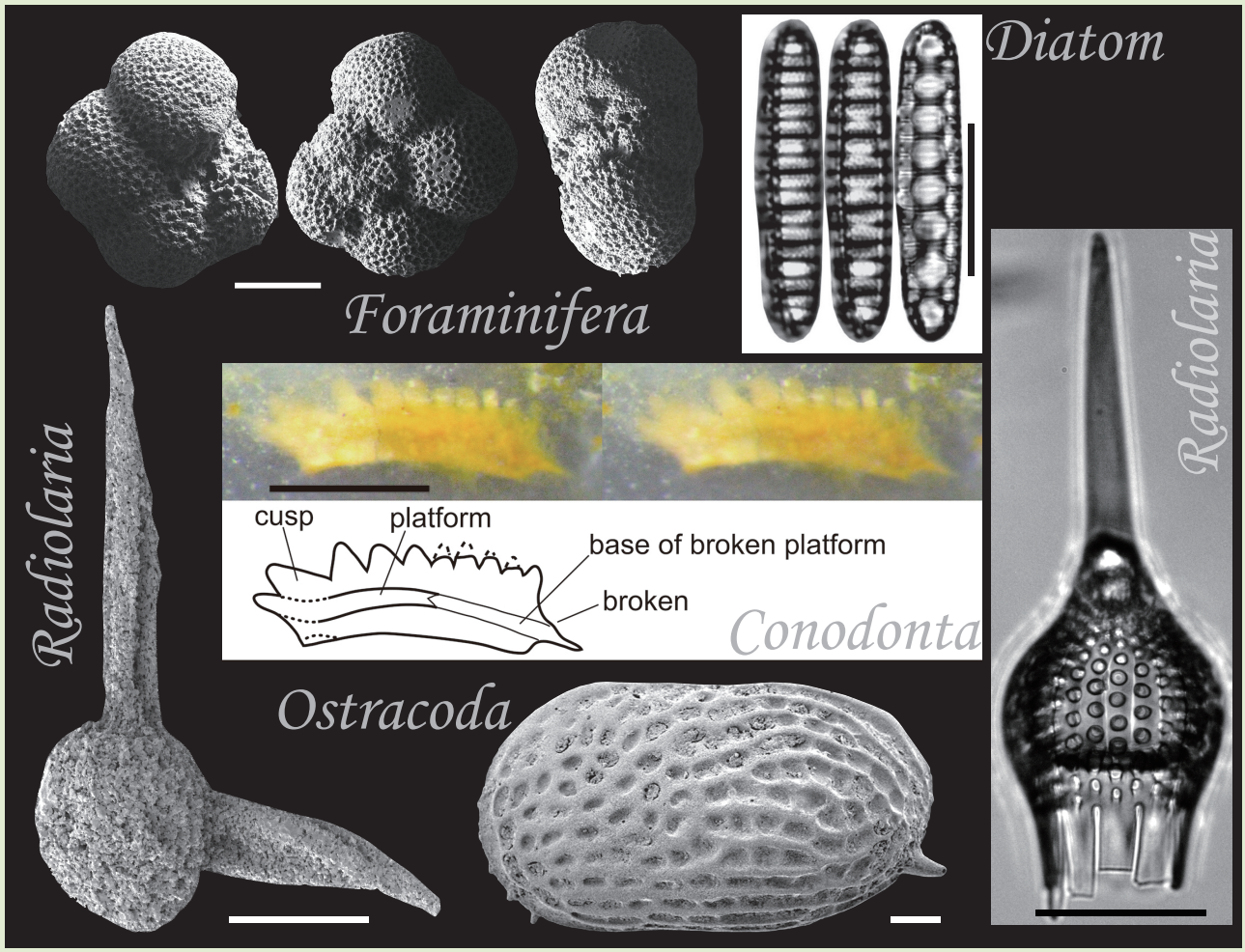
Online ISSN：2186-490X
Print ISSN：1346-4272

地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 70　No. 1/2　2019

特集：微古生物学リファレンスセンター研究集会・放散虫研究集会合同大会論文集



産総研　地質調査総合センター
平成31年

表紙の写真

様々な微化石～コノドント・有孔虫・珪藻・介形虫・放散虫～

微化石は肉眼では見分けることが難しい顕微鏡サイズの生物の化石である．炭酸カルシウムや珪酸といった鉱物質の骨格や殻が堆積物中に保存され，地層の形成年代や堆積環境を知るための手がかりとなる．本特集号には，様々な地質時代の様々な種類の微化石に関する最新の研究成果が収められている．その中から，コノドント，有孔虫，珪藻，介形虫から各 1 種ずつ，放散虫から 2 種を選んで表紙に顕微鏡写真を掲載した．

中央：*Paragondolella bulgarica* Budurov and Stefanov Group（コノドント, 中期三畳紀），スケールは 200 μm，立体視用ステレオ写真，Muto *et al.*（本号）より．
左上：*Neogloboquadrina acostaensis*（Blow）の左巻き型（有孔虫，中新世），スケールは 100 μm，鈴木ほか（本号）より．
右上：*Denticulopsis simonsenii* Yanagisawa et Akiba（珪藻，中新世），スケールは 10 μm，鈴木ほか（本号）より．
右：*Calocycletta costata*（Riedel）（放散虫，中新世），スケールは 100 μm，Kamikuri（本号）より．
下：*Bicornucythere bisanensis*（Okubo）（介形虫, 更新世），スケールは 100 μm, Ozawa and Tanaka（本号）より．
左：*Trilonche* cf. *vetusta* Hinde（放散虫，デボン紀～石炭紀），スケールは 100 μm，内野・栗原（本号）より．

（文：本山　功・板木拓也）

Cover photograph

Various microfossils

Center: *Paragondolella bulgarica* Budurov and Stefanov Group (Conodonta, Triassic), scale = 200 μm, from Muto *et al*. (this issue). Upper left: *Neogloboquadrina acostaensis* (Blow) sinistral form (Foraminifera, Miocene), scale = 100 μm, from Suzuki *et al*. (this issue). Upper right: *Denticulopsis simonsenii* Yanagisawa et Akiba (Diatom, Miocene), scale = 10 μm, from Suzuki *et al*. (this issue). Right: *Calocycletta costata* (Riedel) (Radiolaria, Miocene), scale = 100 μm, from Kamikuri (this issue). Bottom: *Bicornucythere bisanensis* (Okubo) (Ostracoda, Pleistocene), scale = 100 μm, from Ozawa and Tanaka (this issue). Left: *Trilonche* cf. *vetusta* Hinde (Radiolaria, Devonian–Carboniferous), scale = 100 μm, from Uchino and Kurihara (this issue).

(Caption by Isao Motoyama and Takuya Itaki)

地質調査研究報告
BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN
Vol. 70 No. 1/2 2019

特集：微古生物学リファレンスセンター研究集会・放散虫研究集会合同大会論文集

巻頭言

微古生物学リファレンスセンター研究集会・放散虫研究集会研究成果特集号
本山　功･板木拓也……1

論文

Paleoenvironmental analysis from fossil ostracod assemblages of the Middle Pleistocene Naganuma Formation in the Sagami Group, central Japan
Hirokazu Ozawa and Gengo Tanaka ……5

宮城県仙台市北東部に分布する中新統の統合年代層序
鈴木拓馬･林　広樹･柳沢幸夫･藤原　治･檀原　徹 …… 17

Conodont-based age calibration of the Middle Triassic Anisian radiolarian biozones in pelagic deep-sea bedded chert
Shun Muto, Satoshi Takahashi, Satoshi Yamakita, Katsuhito Soda and Tetsuji Onoue …… 43

佐渡島，中新統鶴子層から得られた放散虫化石と堆積年代
川谷文子･指田勝男･上松佐知子･甲能直樹…… 91

Summer surface water polycystine radiolarians in the eastern margin of the Japan Sea
Naoto Ishida ……101

概報

根田茂帯根田茂コンプレックスの礫岩から見出された中期デボン紀～前期石炭紀放散虫化石
内野隆之･栗原敏之……109

高知県馬路地域，四万十帯白亜系付加コンプレックスのチャートから産する放散虫化石
原　英俊･原　康祐……117

総説

日本における過去 20 年間の新第三系放散虫化石層序学の進展
本山　功 ……125

資料・解説

Radiolarian assemblages from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific
Shin-ichi Kamikuri ……137

Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific
Shin-ichi Kamikuri ……163

Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425)
Kenji M. Matsuzaki and Takuya Itaki ……195

半永久的な保存や展示のための柱状堆積物試料の樹脂包埋法
久保田好美·田尻理恵……211

A report of Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian occurrences from the Ashio terrane in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan
Tsuyoshi Ito ……225

特別寄稿

20 世紀後半における日本の中・古生代放散虫研究の進展
八尾　昭 ……249

放散虫化石の研究を始めた頃
水谷伸治郎 ……261

大阪微化石研究会と放散虫研究集会
竹村厚司 ……267

地質調査研究報告, 70 巻, 第 1/2 号 , p. 1–4, 2019

巻　頭　言：微古生物学リファレンスセンター研究集会・放散虫研究集会研究成果特集号

本山　功[1,*]・板木拓也[2]

Isao Motoyama and Takuya Itaki (2019) Special issue on micropaleontological study: Scientific results from the joint meeting of Micropaleontological Reference Center Meeting 2016 and 13th Radiolarian Symposium. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 1–4, 1 table.

Keywords: geology, marine geology, microfossil, radiolarians, foraminifera, diatom, ostracod, conodont

微化石は，様々な堆積岩に含まれる顕微鏡サイズの化石である．少量の試料から多産することから堆積年代及び堆積環境の良質な指標となり，いわゆる示準化石ならびに示相化石として優れた特徴を備えている．そのような微化石（微古生物）の研究がもたらす生層序学的・地質年代学的データは，産業技術総合研究所地質調査総合センターが主導的に取り組んでいる地域地質・海洋地質・燃料資源等の研究に基礎的情報を提供するものであり，特に堆積性地質体を対象とする5万分の1地質図幅・20万分の1海洋地質図等の作成及びそれに立脚した地史編纂において微化石データは重要な役割を担っている．本特集は，微化石に関する全国規模の2つの研究集会（微古生物学リファレンスセンター研究集会と放散虫研究集会）の構成員から最新の成果を募って編集したものであり，収録された論文が扱う微化石の種類は放散虫・有孔虫・珪藻・介形虫・コノドントと多岐にわたる．対象とされる地質時代も古生代デボン紀から第四紀に及んでおり，微古生物学が持つ多様さと地質学への応用範囲の広さを伺うことができる．

微古生物学リファレンスセンター（Micropaleontological Reference Center：略称MRC）は，1968年以来の国際深海掘削計画により蓄積された微化石標本アーカイブと利活用を担う国際的な組織であり，日本では国立科学博物館と宇都宮大学が拠点となって運用されている（谷村, 1998；谷村・相田，2012；齋藤ほか，2016）．微古生物学リファレンスセンター研究集会は，微古生物に関する知識の普及と学術交流を計ることを目的に各種微化石の研究者が一堂に会する分野横断的な集会であり，MRCの名を冠して2007年の第1回集会以来，年に一度のペースで開催されている（第1表）．放散虫研究集会はその名の通り放散虫研究者の情報交換の場として組織され，1981年の第1回以来3年に一度ほどの割合で開催されている息の長い集会である（八尾，2019；竹村，2019の第3表）．集会後にはほぼ毎回論文集（放散虫研究集会論文集）が編まれ，これまでに11号を数える．これら２つの研究集会は，普段は独立に開催されているが，双方の活動を相互に国内に広くアピールすることと微化石研究者による最新の研究成果の情報共有をより促進することを目的として，2016年度の山形大会において，初めて合同で開催することとなった．

2016年度微古生物学リファレンスセンター研究集会・第13回放散虫研究集会合同山形大会は，国立科学博物館微古生物標本･資料センター，大阪微化石研究会（Network for Osaka Micropaleontologists: NOM），山形大学，東北大学総合学術博物館，形の科学会，新潟大学コア・ステーション形の科学研究センター，産業技術総合研究所（AIST）の共催，石油資源開発株式会社（JAPEX）の協賛，及び一般財団法人山形コンベンションビューローと日本地球掘削科学コンソーシアム（J-DESC）の後援・協力を得て，2017年3月2 ～ 5日に山形大学理学部において開催された．その企画の段階で，放散虫研究集会論文集の出版計画について検討がなされ，今回は合同大会の趣旨に即して原稿を広く募集して微化石全般の特集とし，産業技術総合研究所への共催の申請と合わせて「地質調査研究報告」に出版の場を借りる運びとなった．

本号には16編の論文が収録されている．カテゴリー別の内訳は，論文が5編，概報が2編，資料・解説が5編，総説が1編，特別寄稿が3編となっている．以下，個々の論文の目的や意義について簡単に紹介する．

八尾（2019）は，放散虫化石研究を牽引してきた著者の50年にわたる研究の経緯が多角的に紹介されており，中古生代放散虫化石の研究を詳細にたどることができる．研究の経緯を年代順に記述し，また，中・古生代放散虫化石の研究が急展開した背景について，「放散虫化石の特性」，「研究手法の近代化」，「研究体制の組織化」，「情報交換の組織化と国際化」という視点でまとめられている．いわゆる‘放散虫革命’の歴史書とも呼べる解説であり，今後の研究を考える上でも有意義である．

[1] 山形大学理学部（Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata, 990-8560 Japan）

[2] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation)

[*] Corresponding author: I. Motoyama, E-mail: i-motoyama@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

第1表　これまでの微古生物学リファレンスセンター研究集会の一覧．最初の4回(2006～2009年度)の名称は「MRC研究発表会」であった．2010年度以降「微古生物学リファレンスセンター研究集会」の名称が使われている．

Table 1　List of previous Micropaleontological Reference Center meetings.

	開催年度 Fiscal year	開催年月日 Date	開催機関 Venue
1	2006	2007/3/1-3 Mar. 1-3, 2007	北海道大学理学部 Faculty of Science, Hokkaido Univ.
2	2007	2008/3/3-4 Mar. 3-4, 2008	北海道大学理学部 Faculty of Science, Hokkaido Univ.
3	2008	2009/3/2-4 Mar. 2-4, 2009	国立科学博物館新宿分館 National Museum of Nature and Science (Shinjuku)
4	2009	2010/3/17-19 Mar. 17-19, 2010	島根大学松江キャンパス Matsue Campus, Shimane Univ.
5	2010	2011/3/3-5 Mar. 3-5, 2011	東北大学理学部 Faculty of Science, Tohoku Univ.
6	2011	2012/3/2-4 Mar. 2-4, 2012	東北大学理学部 Faculty of Science, Tohoku Univ.
7	2012	2012/11/16-18 Nov. 16-18, 2012	国立科学博物館つくば National Museum of Nature and Science (Tsukuba)
8	2013	2014/2/28-3/2 Feb. 28-Mar. 2, 2014	海洋研究開発機構 横浜研究所 Yokohama Institute, JAMSTEC
9	2014	2015/2/27-3/1 Feb. 27-Mar. 1, 2015	高知大学朝倉・物部キャンパス Asakura/Monobe Campus, Kochi Univ.
10	2015	2015/8/8-10 Aug. 8-10, 2015	東北大学理学部 Faculty of Science, Tohoku Univ.
11	2016	2017/3/2-4 Mar. 2-4, 2017	山形大学理学部 Faculty of Science, Yamagata, Univ.
12	2017	2018/3/2-4 Mar. 2-4, 2018	産業技術総合研究所つくばセンター Tsukuba Center, AIST

水谷（2019）は，1970年代後半のPessagno, E. F. Jr.教授との交流からインスピレーションを得て‘秩父古生層’の放散虫研究を開始し，‘放散虫革命’の一翼を担った経緯の回顧録である．新しい視点に立った研究が誕生し発展してゆく過程で，どのような発想や苦労があったのかが一人称視点で紹介されており，後進へのよい指南書となるものと期待される．

竹村（2019）は，日本の地質学・微古生物学・付加体地質学等の発展に重要な役割を果たしてきた「大阪微化石研究会」及び「放散虫研究集会」についてのレビューである．世代交代が進み，大阪微化石研究会やNOMの発足や経緯について知る人が減少していることから，初期の雰囲気を知る著者の手による歴史的な経緯の整理と紹介は貴重な記録である．

Ozawa and Tanaka（2019）は，海洋酸素同位体ステージ15（MIS 15：約60万年前）に形成された関東南部の地層について，介形虫化石群集を用いて定量的に古水深と古水温を求めており，更新世の日本列島の地史を明らかにする上で重要な研究成果である．

鈴木ほか（2019）は，仙台市北東部に分布する海成上部中新統の入菅谷（いりすがや）層・青麻（あおそ）層・七北田（ななきた）層について，珪藻，有孔虫，フィッション・トラック法を用いて堆積年代を推定し，青麻層と周辺地域の青麻層相当層の間の対比上の問題をほぼ解決したものであり，地域地質にとっての重要性は高く，東北日本の地史編纂を前進させる成果といえる．

Muto *et al.*（2019）は，中部三畳系のコノドント層序と放散虫層序との直接対比を目的に，すでに放散虫層序について研究のなされている大分県津久見地域の網代島セクションと愛知県犬山地域の栗栖セクションの層状チャートについてコノドント層序を明らかにした．三畳紀の年代層序はアンモナイトとコノドントが国際基準に用いられている．そのため，中部三畳系遠洋性チャートの放散虫層序を国際基準の年代尺度に高精度で対比することが，今回初めて可能になった．このように，本論文は，微化石年代層序学の発展に大きく貢献する研究成果といえる．

川谷ほか（2019）は，新潟県佐渡島の地質に関するも

のであり，中部中新統鶴子層と，鶴子層から産する脊椎動物化石に対して，放散虫化石から新たな年代学的制約を与えるものであり，また，これまで日本で産出の知られていなかった種の産出を認めている．このようなことから，地域地質への貢献に加えて，古生物地理学的にも重要な研究である．

Ishida（2019）は，山形県酒田沖におけるプランクトンネット調査により得られた夏季の表層水中の放散虫群集と，特徴種の*Spongosphaera streptacantha*の形態について報じたものである．日本海の第四紀堆積物の層序対比や古環境解析に役立つ放散虫群集についての生態学的な理解を深める情報を提供している．

内野・栗原（2019）は，東北地方の北上山地で今世紀に入り新しく定義された「根田茂帯」における放散虫化石の報告であり，海溝充填堆積物とみなされる礫岩から中期デボン紀～前期石炭紀を示す放散虫化石を見出し，付加年代に制約を与えた．これは日本で唯一の石炭紀付加体である同帯の研究を発展させる上で重要な基礎データを提供している．

原・原（2019）は，5万分の1地質図幅調査に関連した研究であり，生データを提供している．本論文では四国東部馬路地域の四万十帯白亜系付加コンプレックスの谷山ユニットと牟岐ユニットから新たに放散虫化石を報告し，2つのユニットの年代の差に着目して白亜紀の北西太平洋における海洋プレートの移り変わりを論じている．

Kamikuri（2019a, b）とMatsuzaki and Itaki（2019）は，北太平洋の深海掘削コアから産出した放散虫化石の産出報告であり，Kamikuri（2019a, b）は東赤道太平洋のIODP Site U1335の下・中部中新統とカリフォルニア海流域のODP Site 1021の中・上部中新統，Matsuzaki and Itaki(2019)は日本海のIODP Site U1425の上部中新統を対象としている．いずれも多数の顕微鏡写真を提示している．微化石に基づく年代論・古環境解析は，分類群の同定を基礎としているため，同定の根拠となる写真を示すことは，後日第三者による検証を可能にするために重要なことであり，その意味からもこれら3編の論文は海洋地質学的に重要な文献となることが期待される．

久保田・田尻（2019）は，海底堆積物や湖底堆積物の長尺柱状試料を半永久的に保存するための樹脂包埋法の解説であり，深海掘削コア試料を用いた適用例から有用性や問題点を論じている．用いられた柱状試料は，統合国際深海掘削計画により掘削された日本海の海底堆積物コアであり，博物館での展示を目的に長さ約80 cmの堆積物試料に対して試みられた．元のコアからの引きはがしから薬品による固定まで詳細な手順が述べられており，その技法は今後研究・教育・展示等への活用が期待できるものである．

Ito（2019）は，群馬県東部八王子丘陵に露出する，これまで年代資料に乏しかったジュラ紀付加体からペルム紀・三畳紀・ジュラ紀放散虫化石の産出を報告している．この研究もまた，5万分の1地質図幅調査に関連したものであり，図幅編纂及び足尾山地における地質対比の議論の基礎資料として注目される．

本山（2019）は，本邦新第三系放散虫化石層序に関する最近の進展を網羅的にレビューしている．古地磁気層序との対比，北太平洋や日本海などの異なる海域の研究，陸上の新第三系セクションへの適用などが飛躍的に前進したことに加え，分類に関する整理も進んできた．日本の新第三系放散虫層序学の進展を理解するだけでなく，地質調査の事前検討や関連論文の検索等においても有用な資料として活用できる．

これらの研究成果は，いずれも地道に積み上げられた調査と試料分析に基づくもので地味な印象さえ受けるかもしれないが，それのみで完結するというよりも，堆積学・構造地質学・有機地球化学・物理探査等の関連分野と連携することで一層威力を発揮するものと考えられる．したがって，これらの成果を「地質調査研究報告」に集約して出版することにより，今後の地質学的諸研究への応用と発展に利することを期待したい．

謝辞：2016年度微古生物学リファレンスセンター研究集会・第13回放散虫研究集会合同大会を成功裏に導いてくださった実行委員の方々（丸山俊明，R. W. Jordan，齋藤めぐみ，久保田好美，鈴木紀毅，西　弘嗣，黒柳あずみ，松岡　篤，竹村厚司の諸氏），また，「地質調査研究報告」における本特集の企画についてご検討ご承認頂くとともに，編集を担当した鈴木　淳委員長をはじめとする編集委員会・事務局の方々に厚く御礼申し上げます．

文　献

原　英俊・原　康祐（2019）高知県馬路地域，四万十帯白亜系付加コンプレックスのチャートから産する放散虫化石．地質調査研究報告，**70**，117–123.

Ishida, N.（2019）Summer surface water polycystine radiolarians in the eastern margin of Japan Sea. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 101–108.

Ito, T.（2019）A report of Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian occurrence from the Ashio terrane in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 225–247.

Kamikuri, S.（2019a）Radiolarian assemblages from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan,* **70**, 137–161.

Kamikuri, S.（2019b）Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 163–194.

川谷文子・指田勝男・上松佐知子・甲能直樹（2019）佐渡島，

中新統鶴子層から得られた放散虫化石と堆積年代. 地質調査研究報告，**70**，91–99.

久保田好美・田尻理恵(2019) 半永久的な保存や展示のための柱状堆積物試料の樹脂包埋法. 地質調査研究報告，**70**，211–224.

Matsuzaki, K.M. and Itaki, T. (2019) Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425), *Bull. Geol. Surv. Japan,* **70**, 195–209.

水谷伸治郎(2019) 放散虫化石の研究を始めた頃. 地質調査研究報告，**70**，261–265.

本山　功(2019) 日本における過去20年間の新第三系放散虫化石層序学の進展. 地質調査研究報告，**70**，125–136.

Muto, S., Takahashi, S., Yamakita, S., Soda, K. and Onoue, T. (2019) Conodont-based age calibration of the Middle Triassic Anisian radiolarian biozones in pelagic deep-sea bedded chert. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 43–89.

Ozawa, H. and Tanaka, G. (2019) Paleoenvironmental analysis from fossil ostracod assemblages of the Middle Pleistocene Naganuma Formation in the Sagami Group, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 5–16.

齋藤めぐみ・谷村好洋・鈴木紀毅・相田吉昭・須藤　斎 (2016) 微化石標本・資料センター (MRC : Micropaleontological Reference Center) の活動と課題. 化石，no. 99，47–52.

鈴木拓馬・林　広樹・柳沢幸夫・藤原　治・檀原　徹(2019) 宮城県仙台市北東部に分布する中新統の統合年代層序. 地質調査研究報告，**70**，17–41.

竹村厚司 (2019) 大阪微化石研究会と放散虫研究集会. 地質調査研究報告，**70**，267–272.

谷村好洋 (1998)「微化石標本のリファレンス・センター」としての自然史博物館. 地学雑誌，**107**，803–808.

谷村好洋・相田吉昭 (2012) 深海掘削と微化石リファレンス・センター. 谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界. 国立科学博物館叢書，**13**，43–50. 東海大学出版会.

内野隆之・栗原敏之(2019) 根田茂帯根田茂コンプレックスの礫岩から見出された中期デボン紀～前期石炭紀放散虫化石. 地質調査研究報告，**70**，109–115.

八尾　昭(2019) 20世紀後半における日本の中・古生代放散虫研究の進展. 地質調査研究報告，**70**，249–260.

(受 付：2018年10月5日； 受 理：2019年1月24日)

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 5–16, 2019

Article

Paleoenvironmental analysis from fossil ostracod assemblages of the Middle Pleistocene Naganuma Formation in the Sagami Group, central Japan

Hirokazu Ozawa[1,*] and Gengo Tanaka[2]

Hirokazu Ozawa and Gengo Tanaka (2019) Paleoenvironmental analysis from fossil ostracod assemblages of the Middle Pleistocene Naganuma Formation in the Sagami Group, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 5–16, 5 figs, 4 tables.

Abstract: This study estimates paleoenvironmental changes in water depths and temperatures from approximately 0.6 Ma during the marine oxygen isotope stage (MIS) 15 of the Middle Pleistocene along coastal Japan. We used the modern analog technique (MAT), which is based on ostracod assemblages from the Naganuma Formation in the Sagami Group of Kanagawa Prefecture in central Japan. The analysis revealed that the Naganuma Formation was deposited in the shallow-marine environment at paleo-water depths of 25–41 m, similar to current depths of southwestern Japan coastal areas such as the Setonaikai Sea. The estimated summer paleo-water temperature (ca. 28℃) was approximately 2℃ higher than current Sagami Bay water temperatures at depths of shallower than 30 m. The estimated temperatures were also similar to or slightly lower (~2℃) than current summer temperatures in Sagami Bay at depths of 40 m. The estimated winter paleo-water temperatures (6–11℃) were slightly lower (~2℃) than current Sagami Bay temperatures at depths of shallower than 40 m. This study reports for the first time fluctuations in paleo-water temperature estimates quantitatively from 0.6 Ma during the MIS 15 along coastal Japan.

Keywords: osracods, Middle Pleistocene, Naganuma Formation, MIS 15, modern analog technique, paleo-water temperature, Sagami Bay, Kanagawa Prefecture, central Japan

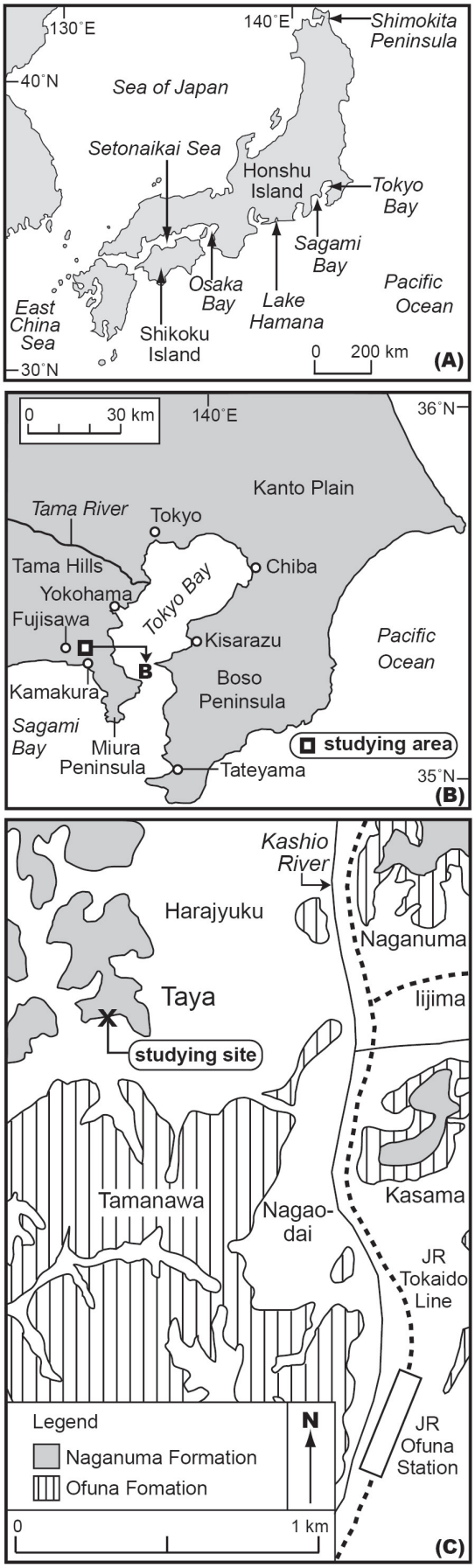
1. Introduction

The paleoenvironment and invertebrate faunas fluctuated drastically during the Pleistocene in response to marine climatic changes and glacioeustacy in shallow seas of the northwest Pacific Ocean margin near the Japanese Islands (Chinzei, 1991; Tada, 1994; Amano, 2004; Ozawa and Kamiya, 2005; Ozawa and Ishii, 2014). Because of the mid-Pleistocene transition (MPT; e.g. Berger and Jansen, 1994) and a shift in the glacioeustatic climatic cycle periodicity from 41 kyr to 100 kyr, the Middle Pleistocene represents an important paleoclimate period.

Benthic ostracods provide clues for understanding paleoenvironments, because they lack a planktic growth stage and are endemic, making them sensitive to environmental changes (e.g. Boomer *et al.*, 2003). Previous Japanese studies of ostracods have documented environmental changes since the Middle Pleistocene, evidenced by fossils in shallow seas along the Pacific coasts of the Osaka Bay, Lake Hamana, and Tokyo Bay (Yajima, 1978, 1982; Ishizaki, 1990a, b; Ozawa *et al.*, 1995; Yasuhara and Kumai, 2003; Irizuki and Seto, 2004; Irizuki *et al.*, 2002, 2005, 2011) from 0.4 Ma in the MIS 11 (MIS age from e.g. Lisiecki and Raymo, 2005). However, details of the Middle Pleistocene paleoenvironment prior to 0.4 Ma along the Japanese coast remain unknown.

The Middle Pleistocene Naganuma Formation (ca. 0.6 Ma, MIS 15; Machida, 2010) of the Sagami Group is exposed on the northern side of Sagami Bay (Fig. 1; Ujiie and Kagawa, 1963) and is known for its shallow marine calcareous fossils, including molluscs (Yabe, 1906; Oyama, 1973). There are no reports of fluctuations in paleo-water temperatures from 0.6 Ma in the MIS 15 for coasts of Japan and adjacent regions. This study reports, for the first time, fluctuations in paleo-water temperatures of coastal Japan from 0.6 Ma (MIS 15) using modern analog technique (MAT) methods.

[1] Earth Sciences Laboratory, College of Bioresource Sciences, Nihon University, Kameino 1866, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan
[2] General Education Courses, Institute of Liberal Arts and Science, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan
[*] Corresponding author: H. Ozawa, Email: ozawa.hirokazu@nihon-u.ac.jp

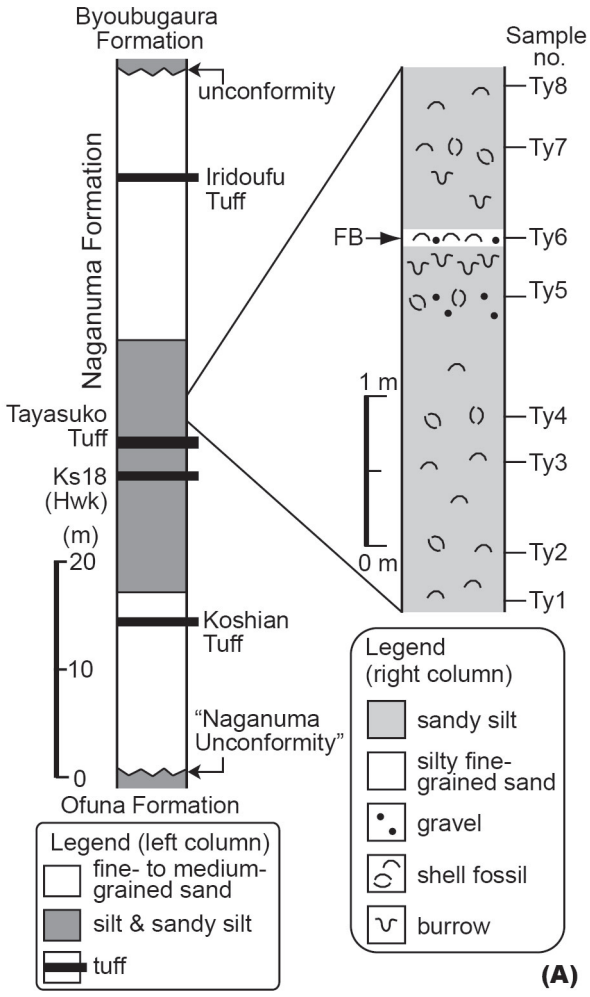


2. Geological setting

The Naganuma Formation in the Sagami Group is exposed at the base of the Miura Peninsula in the southernmost region of Yokohama City and in the northeastern region of Fujisawa City, Kanagawa Prefecture, central Japan (Fig. 1). The geology and fossils of this formation have been studied (e.g. Otuka, 1937; Ujiie and Kagawa, 1963; Oyama, 1973; Mitsukoka *et al.*, 1977; Mitsunashi and Kikuchi, 1982) since 1906 (Yabe, 1906). This stratum unconformably overlies the Lower Pleistocene Ofuna Formation in the Kazusa Group (age from Fujioka *et al.*, 2003), and the unconformable surface is known as the "Naganuma Unconformity" (Machida, 2010; Fig. 2). The Middle Pleistocene Byobugaura Formation in the Sagami Group unconformably overlies the Naganuma Formation (Osada *et al.*, 1982; age from Machida, 2010). The Naganuma Formation primarily consists of silt and fine- to medium-grained sand, and contains calcareous fossils accompanied by layers of tuff (Otsuka, 1937; Ujiie and Kagawa, 1963; Fig. 2). Fossil ostracods have also been found in the Naganuma Formation (Ozawa, 2009).

The chronology of tuff layers suggests that the Naganuma and Byoubugaura formations in the Sagami Group of the Miura Peninsula are correlated with the lower and upper parts, respectively, of the Kasamori Formation in the Kazusa Group of the Boso Peninsula in central Japan (Machida, 2010; Fig. 2). The two unconformities of the Naganuma Formation in the study area (Fig. 2) are also seen in the Kazusa Group of the Boso Peninsula. Based on the chronology of the Ks18 tuff layer of the lower part of Kasamori Formation (Machida, 2010), the Naganuma Unconformity is estimated to have been formed while the sea-level was low during a glacial period (MIS 16). Similarly, the Byobugaura Formation is correlated with the upper part of the Kasamori Formation (Fig. 2). Based on estimations from the Ks11 tuff layer chronology in the Kasamori Formation, previous researches (Machida *et al.*, 1980; Machida, 2010) determined that another unconformity between the Naganuma and Byobugaura formations was also formed while sea-level was low during a glacial period (MIS 14). The Naganuma Formation is thought to have formed from deposits during the high sea-level period of the interglacial period between MIS 16 and 14, and therefore to be correlated with MIS 15, approximately 0.6 Ma (Machida, 2010; MIS age from Lisiecki and Raymo, 2005), although Ozawa (2009) referred previous studies of nannofossils and tuff layers pre-2009 to estimate that the formation was deposited in ca. 0.5 Ma (MIS 13).

Fig. 1 (A) A map of locations described in the text. (B) A map of the study area. (C) A map of the distribution of the Naganuma Formation of central Japan, with the study site, modified from Ujiie and Kagawa (1963). (A)–(C) are modified from Ozawa (2009).



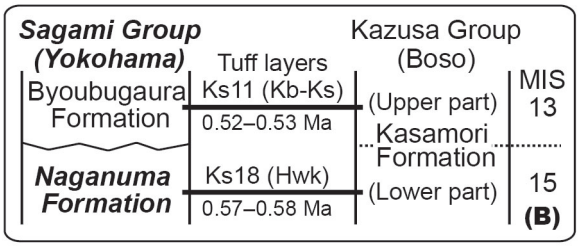


Fig. 2 (A) A columnar section of the Naganuma Formation with sample horizons, modified from Osada *et al.* (1982) and Ozawa (2009). FB: dominant occurrences of fragments of barnacles. (B) Schematic stratigraphic correlation for the Naganuma, Byoubugaura and Kasamori formations between Yokohama and Boso areas. Data for tuff layers in (A) and (B) referred from Mitsuoka *et al.* (1977), Mitsunashi and Kikuchi (1982), Osada *et al.* (1982), Machida and Arai (2003), and Machida (2010). MIS (Marine oxygen Isotope Stage) nos. are referred from Machida (2010).

3. Materials and methods

We used the modern analog technique (MAT) to analyze the Naganuma Formation fossil ostracod assemblage dataset found in Table 1 of Ozawa (2009). Ozawa (2009) described fossil ostracod assemblages from eight sediment samples (Ty1–Ty8) collected from the Naganuma Formation outcrop, which is exposed in the Taya area of Sakae-ku, Yokohama City, Kanagawa Prefecture, central Japan (latitude: 35º 21.77' N, longitude: 139º 31.42' E; Figs. 1 and 2). Then a total of 58 ostracod species were identified.

The MAT is a method for estimating paleoenvironmental conditions, such as the water depth and temperature, by comparing similar recent environmental data to fossil assemblages (Overpeck *et al.*, 1985). The degree of nonsimilarity between objective fossil assemblages and recent assemblages is determined by the formula as follows;

$$SCD = \Sigma_{i=1}^{n} (Fpi^{1/2} - Mpi^{1/2})^2$$

(SCD: square chord distance; Fpi: proportion of the i-th fossil species; Mpi: proportion of the i-th modern species). Ikeya and Cronin (1993) first employed MAT to fossil ostracod assemblages in order to estimate Pliocene and Pleistocene paleoenvironments of Japan, based on 273 recent samples from Japan and adjacent areas. In the current study, we summarized data from 419 recent samples (including 367 species) from Japan and adjacent areas (Zhou, 1993; Tsukawaki *et al.*, 1997, 1998, 1999, 2000; Yamane, 1998, Ozawa *et al.*, 1999; Yasuhara and Irizuki, 2001; Nakao and Tsukagoshi, 2002; Irizuki *et al.*, 2006; Tanaka, 2008) using the modern analog data matrix of the United States Geological Survey (Ikeya and Cronin, 1993). Squared-chord distances (SCDs) were computed using Microsoft Excel 2007 in the Visual Basics for Applications (VBA) environment, following methods described by Tanaka and Nomura (2009).

The SCD is a value between 0 and 2. When the SCD is 0, the objective fossil assemblage is completely concordant with recent assemblages. To obtain the minimum and maximum bottom water temperatures for each recent ostracod sample, temperatures for the sites used in our study were obtained from the sectioned squares of the Japan Oceanographic Data Center (JODC) database within one degree of latitude and longitude (JODC, 2017; http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html). We estimated paleo-water temperatures in both summer and winter at paleo-water depths for eight Naganuma Formation samples described by Ozawa (2009).

4. Results

The MAT results for changes in the paleo-water depth and temperature in summer and winter based on the ostracod assemblage dateset from the Naganuma

Table 1 Results of modern analog area based on the MAT (modern analog technique) for each fossil ostracod sample from the Naganuma Formation. From left to right: sample number from Ozawa (2009); estimated water depth (WD); summer bottom water temperature (SBT); winter bottom water temperature (WBT); square chord distance (SCD); longitude (Long.) and latitude (Lat.) of the most similar modern site in terms of the ostracod assemblage; reference for the recent ostracod assemblage of a modern analog area. N: northern; C.: central; SW: southwestern.

Sample no.	WD (m)	SBT (℃)	WBT (℃)	SCD	Long. (ºN)	Lat. (ºE)	Modern analog area	Reference
Ty1	41	16.0	11.0	1.06	127.09	34.16	N East China Sea	Choe (1985)
Ty2	25	28.4	6.3	0.87	133.25	34.13	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)
Ty3	25	28.4	6.3	0.71	133.25	34.13	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)
Ty4	35	30.6	10.3	1.22	131.37	34.43	SW Sea of Japan	Tsukawaki *et al.* (2000)
Ty5	25	28.4	6.3	0.81	133.25	34.13	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)
Ty6	31	28.4	6.3	0.89	133.20	34.08	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)
Ty7	31	28.4	6.3	0.72	133.20	34.08	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)
Ty8	25	28.4	6.3	0.58	133.25	34.13	C. Setonaikai Sea	Yamane (1998)

Table 2 MAT (modern analog technique) method results (SCD analysis; SCD means square chord distance) for the three ostracod assemblages (A–C) from the Naganuma Formation (Ozawa, 2009). From left to right: assemblage names; five dominant species from Ozawa (2009); assemblage (Ass.); estimated water depth (WD) range; summer bottom water temperature (SBT) range; winter bottom temperature (WBT) range; square chord distance (SCD) range; modern analog area based on the modern analog technique (MAT). C.: central; SW: southwestern; N: northern.

Ass.	Five dominant species	WD range (m)	SBT range (°C)	WBT range (°C)	SCD range	Modern analog areas
A	*Krithe japonica* *Amphileberis nipponica* *Buntonia hanaii* *Bicornucythere bisanensis* *Krithe surugensis*	25–41	16.0–30.6	6.3–11.0	0.71–1.22	C. Setonaikai Sea SW Sea of Japan, N East China Sea
B	*Amphileberis nipponica* *Bicornucythere bisanensis* *Nipponocythere bicarinata* *Krithe japonica* *Loxoconcha tosaensis*	25–31	28.4	6.3	0.72–0.81	C. Setonaikai Sea
C	*Bicornucythere bisanensis* *Amphileberis nipponica* *Trachyleberis scabrocuneata* *Loxoconcha tosaensis* *Nipponocythere bicarinata*	25	28.4	6.3	0.58	C. Setonaikai Sea

Formation (Ozawa, 2009) are shown in Table 1 and Fig. 3. Species compositions of fossil ostracod assemblages from eight Naganuma Formation samples are similar to modern assemblages found in present-day shallow seas surrounding southwestern Japanese Islands, such as the central Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea), the southwestern Sea of Japan, and the northern East China Sea (Tables 1 and 2).

Our results suggest that paleo-water depths fluctuated between 25 and 41 m (Fig. 3; Table 1). These water depths are slightly shallower for Ty1 through Ty8 (41–25 m). The paleo-water temperatures in summer are estimated to be approximately 16ºC for the one lower horizons (Ty1), and 28–31ºC for the seven upper horizons (Ty2–Ty8). Winter paleo-water temperatures are estimated to be approximately 10–11ºC for the two lower horizons (Ty1 and Ty4) and 6ºC for the six upper horizons (Ty2, Ty3 and Ty5–Ty8).

Our results showing a realtively wide SCD range (0.71–1.22; Fig. 3 and Table 2) suggest that the modern analog areas of the assemblage A of Ozawa (2009) are the central Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea), the southwestern Sea of Japan, and the northern East China Sea, from longitudes 127–134ºE and latitudes 34–36ºN and at water depths ranging from 25–41 m. The modern analog area for the assemblage B is the central Setonaikai Sea (Hiuchinada

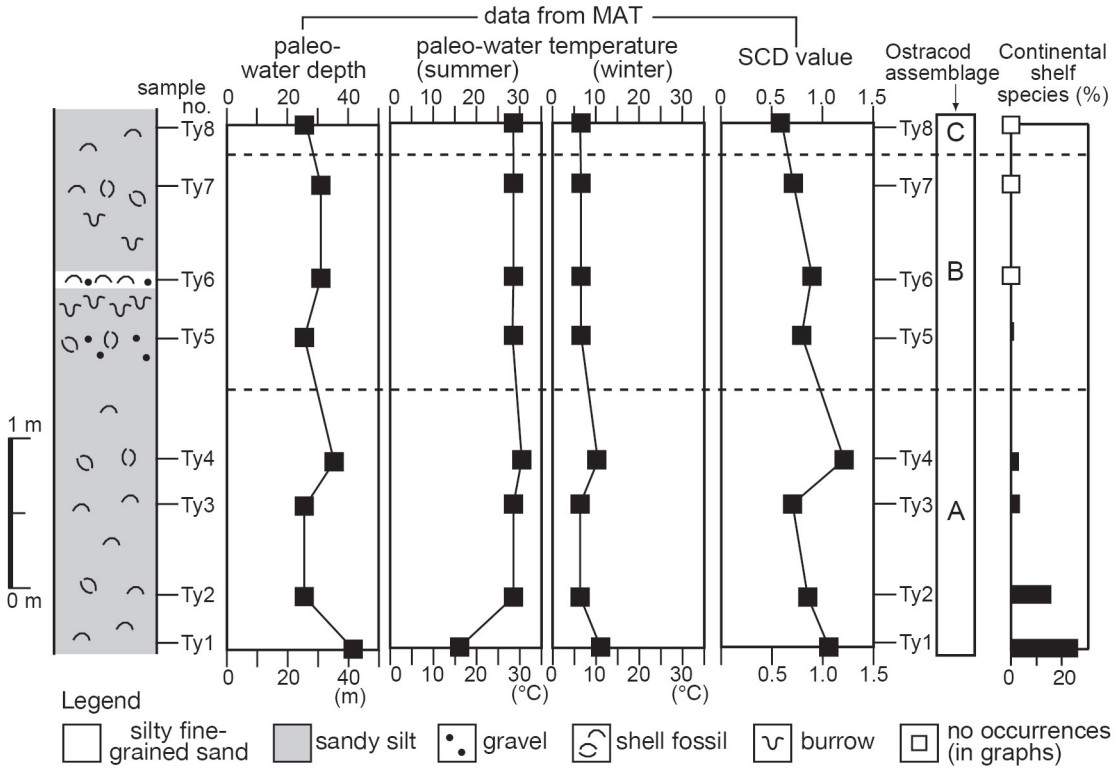


Fig. 3 Vertical changes in results from the MAT (modern analog technique) method (SCD analysis; SCD means square chord distance) for each sample in the Naganuma Formation within a columnar section, with sample horizons. Ostracod assemblages A–C and Continental shelf species are the same as in Ozawa (2009). Data for appearance horizons of the assemblages A–C and percentages for Continental shelf species are referred from Ozawa (2009). Continental shelf species: *Abrocythereis guangdongensis*, *Actinocythereis kisarazuensis*, *Bradleya japonica*, *Bradleya* sp., *Hirsutocythere? hanaii*, *Krithe surugensis* and *Loxoconcha tamakazura*. Columnar section is modified from Ozawa (2009).

Sea) from longitudes 133–134ºE and latitudes 34–35ºN at water depths of 25–31 m, as evidenced by a realtively low SCD range (0.72–0.81). The modern analog area of the assemblage C has the lowest SCD score (0.58), and it is also the central Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea) at longitude 133ºE and latitude 34ºN at a water depth of 25 m.

5. Discussion

5. 1 Paleo-water depth

The paleo-water depth of the Naganuma Formation was reconstructed by several previous studies of molluscan fossils. Osada *et al.* (1982) reported the detailed species composition of the molluscan fossils from the two upper horizons above the Tayasuko tuff layer at the same location as the current study. They recognized one molluscan fossil assemblage, which was dominated by *Acila divaricata* (Hinds) in the two horizons, and reported that the paleoenvironment in their lower horizon (near sample Ty1 of Ozawa (2009)) was the inner bay area influenced by the open sea with 20–60 m water depths. They estimated that the water depth of their upper horizon (near sample Ty6 of Ozawa (2009)), was slightly shallower than that of the lower horizon.

The three steps of the water-depth decrease during the depositional periods of the horizons Ty1–Ty8 were defined from the ostracod assemblages A–C (Fig. 3), which include dominantly *Amphileberis nipponica*, *Bicornucythere bisanenesis* and *Krithe japonica* (Fig. 4; Table2) by Ozawa (2009). That study stated that the water depth decreased upwards in the studied sequence from around 40 m water depth to 10–15 m water depths, and that the influence of the open-sea water was weaker during depositional periods of the upper six horizons of Ty3–Ty8, compared with the lower two horizons Ty1–Ty2, based on the ratio of continental species of Ozawa (2009); i.e., *Abrocythereis guangdongensis*, *Actinocythereis kisarazuensis*, *Bradleya japonica*, *Bradleya* sp., *Hirsutocythere? hanaii*, *Krithe surugensis* and *Loxoconcha tamakazura* (Figs. 3 and 4). These species are reported from modern continental shelf area around Japan (e.g. Ikeya and Suzuki, 1992; Zhou and Ikeya, 1992; Zhou, 1995; Tsukawaki *et al.*, 1998, 2000; Tanaka, 2008, 2012).

Therefore paleo-water depths reconstructed from MAT

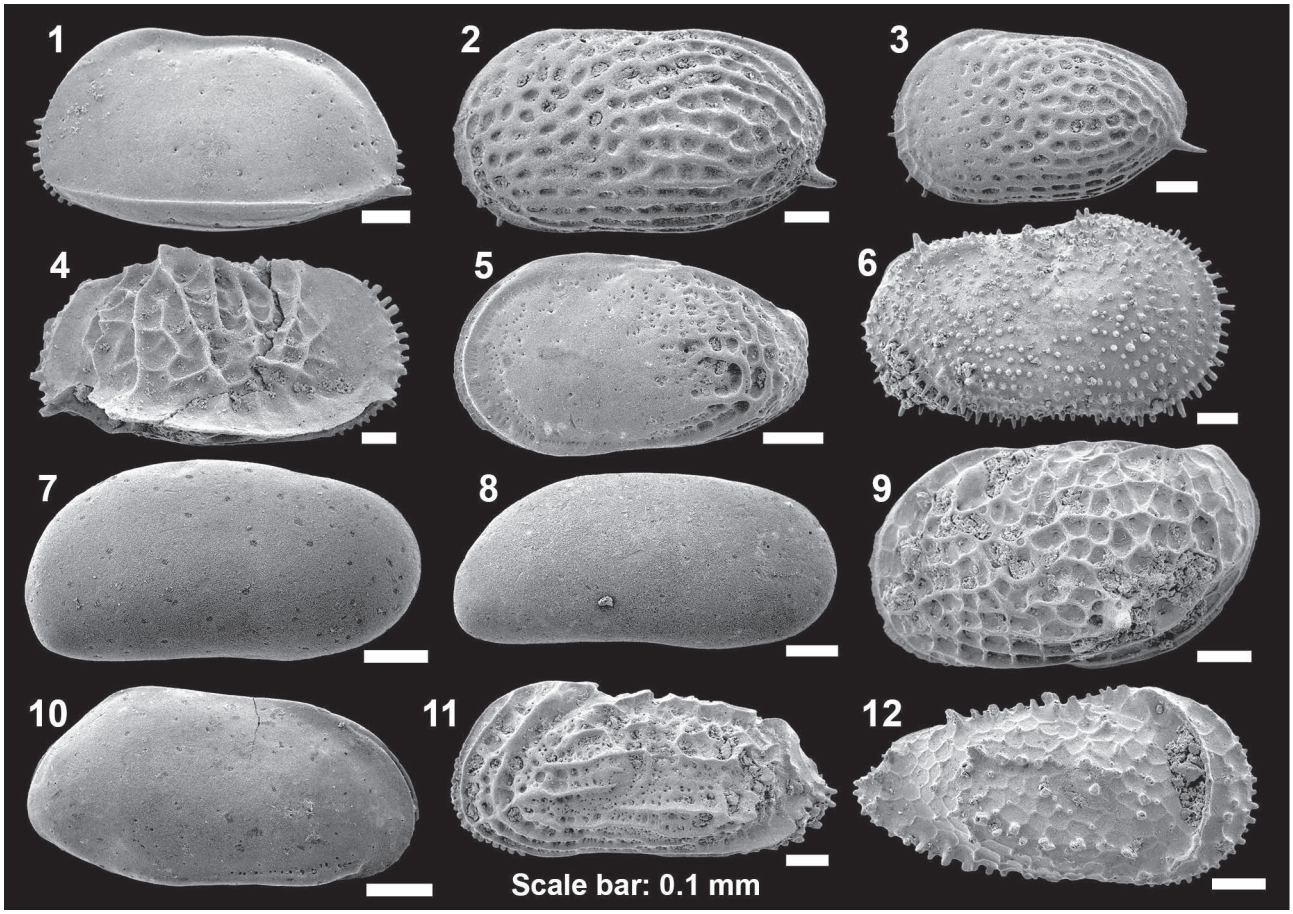


Fig. 4 SEM images of fossil ostracods from the Naganuma Formation, modified from Ozawa (2009). LV: left valve, RV: right valve, CA: carapace. **1**: *Amphileberis nipponica* (Yajima), male LV, sample no. Ty6, **2–3**: *Bicornucythere bisanensis* (Okubo), **2**: female LV, Ty7, **3**: A-1 juvenile LV, Ty1, **4**: *Bradleya japonica* Benson, female RV, Ty1, **5**: *Buntonia hanaii* Yajima, male LV, Ty3, **6**: *Hirsutocythere? hanaii* Ishizaki, A-1 juvenile RV, Ty5, **7**: *Krithe japonica* Ishizaki, female RV, Ty6, **8**: *Krithe surugensis* Zhou and Ikeya, male RV, Ty7, **9**: *Loxoconcha tosaensis* Ishizaki, male LV, Ty7, **10**: *Nipponocythere bicarinata* (Brady), male RV, Ty6, **11**: *Sinoleberis tosaensis* (Ishizaki), female CA left side, Ty5., **12**: *Trachyleberis scabrocuneata* (Brady), A-1 juvenile RV, Ty5. All scale bars are equal to 0.1 mm.

in our study (Fig. 3; Tables 1 and 2) are mostly consistent with results from previous molluscan and ostracod studies.

5. 2 Paleo-water temperature

The SCD scores (0.58–1.22) for paleotempeartures based on ostracods and the MAT were fairly high (Fig. 3; Tables 1 and 2). Ikeya and Cronin (1993) demonstrated that a SCD value below 0.5 indicates analogs at a faunal provincial level, although we could obtain only these SCD scores herein. However we had tried to attempt to compare paleotemperatures to average modern data, including the minimum and maximum water temperature in and around Sagami Bay (Table 3), in an effort to reconstruct the Japanese paleoenvironment from 0.6 Ma, because this study reported for the first time fluctuations in paleo-water temperature estimates quantitatively during the MIS 15 along coastal Japan.

We compared the estimated Naganuma Formation paleotemperatures (Figs. 3 and 5; Tables 1 and 2) to modern water temperatures in and around Sagami Bay, located within latitude 35–36˚N and longitude 139–140˚E (Table 3). We utilized data for this region from Japan Oceanographic Data Center (2017)'s website (http://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/index_j.html), as this is the area closest to the Naganuma Formation sampling site. Modern water temperatures are presented as averages with maximum and minimum values for 97 years between 1906 and 2003. Data are given for latitude 35–36˚N and longitude 139–140˚E (within one degree of latitude and longitude for a given site) at water depths of 20, 30, and 50 m in summer (August) and winter (February) (Table 3). The water depths are not the same as the estimated paleo-water depths, so comparisons were made between similar water depths. For example, a paleo-water depth of

Table 3 Modern average, maximum, and minimum water temperatures from 1906 to 2003 for latitude 35–36˚N and longitude 139–140˚E (within one degree of latitude and longitude for a given site) at three water depths (20, 30, and 50 m) in summer (August) and winter (February). From the J-DOSS database of Japan Oceanographic Data Center (2017).

Water	Summer temperature (°C)			Winter temperature (°C)		
depth (m)	average	maximum	minimum	average	maximum	minimum
20	21.6	26.6	15.5	13.9	17.5	8.6
30	20.0	26.1	14.0	14.4	17.4	10.9
50	17.5	23.2	12.7	14.5	17.3	11.5

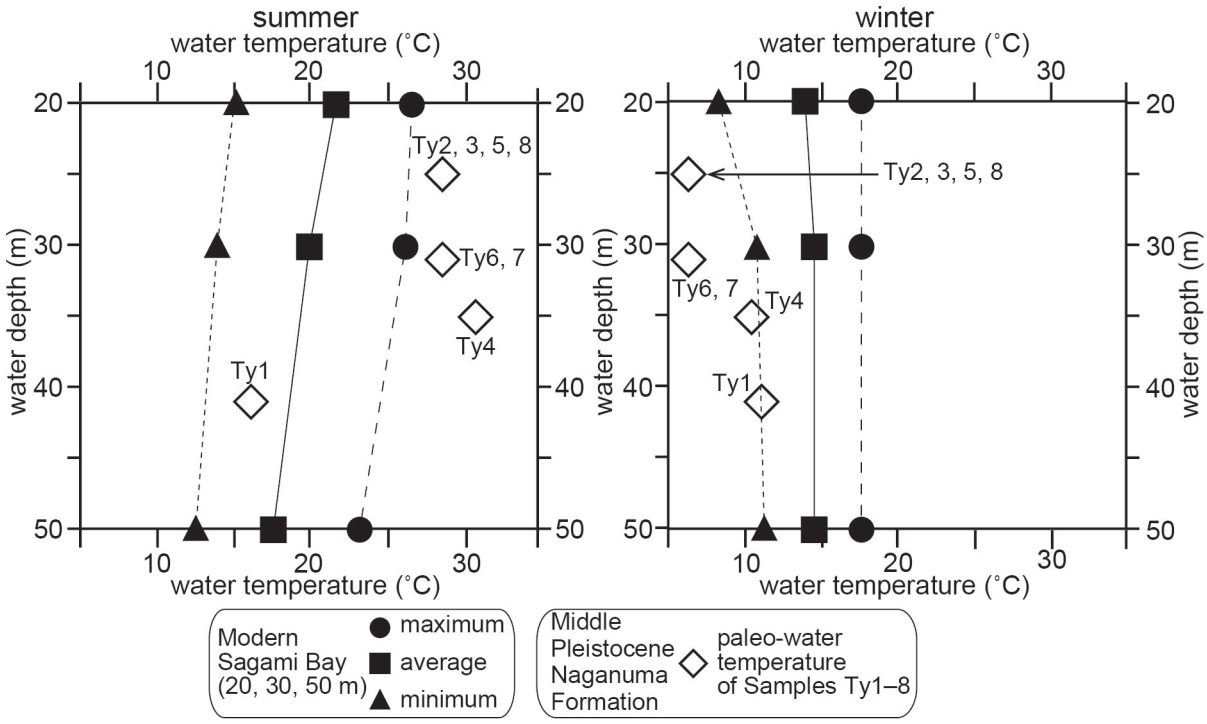


Fig. 5 Results for the paleo-water depth and water tempearature in summer and winter from the MAT (modern analog technique) method (SCD analysis; SCD means square chord distance) for each sample in the Naganuma Formation, and modern average, maximum, and minimum water temperatures from 1906 to 2003 for latitude 35–36˚N and longitude 139–140˚E (within one degree of latitude and longitude for a given site) at three water depths (20, 30, and 50 m) in summer (August) and winter (February). Data of the modern water temperature are referred from the J-DOSS database of Japan Oceanographic Data Center (2017).

31 m was compared to average values at the 30 m depth in modern seas.

Results from these comparisons suggest that estimated paleo-water temperatures at depths of 25–35 m (16–31℃; Fig. 5, Tables 1 and 2) were slightly higher than those in and around the present-day Sagami Bay (ca. 18–22℃ of 20–50 m; Fig. 5; Table 2) in summer for seven of eight samples. For the assemblage A samples (Ozawa, 2009), the summer estimated temperatures at 25 m and 35 m for three samples (28.4℃ for samples Ty2 and Ty4, and 30.6℃ for Ty3, respectively; Fig. 5; Table 2) were 7–10℃ higher than present-day average temperatures at depths of 20 m and 30 m (21.6℃ and 20.0℃; Fig. 5; Table 3). These estimated temperatures are approximately 2–4℃ higher than the modern maximum temperatures in this region (26.6℃ and 26.1℃). Estimated summer temperatures at depths of 41 m for another sample in the assemblage A (16.0℃ for Ty1) were 2–4℃ lower than the modern average temperatures at 30 and 50 m in Sagami Bay (17.5℃ and 20.0℃). This value is also 2–3℃ higher than modern minimum temperatures in this area (12.7℃ and 14.0℃). Estimated summer temperatures of the assemblages B and C at 25 m and 31 m (28.4℃ for Ty5–Ty8) were 7–8℃ higher than average temperatures at 20 m and 30 m (20.0℃ and 21.6℃; Table 3), and are 2℃ higher than recent maximum Sagami Bay temperatures (26.1℃ and 26.6℃).

Estimated winter water temperatures (6–11℃) were lower than recent Sagami Bay water temperatures at depths of 20–50 m (14–15℃; Fig. 5; Table 2) for all samples. Estimated winter temperatures of the assemblage A at 25 m, 35 m, and 41 m (6.3℃ for Ty2 and Ty3, 10.3℃ for Ty4, 11.0℃ for Ty1) were 4–8℃ lower than recent average temperatures at 20 m, 30 m, and 50 m (13.9℃, 14.4℃, and 14.5℃, respectively; Table 3), and 1–2℃ lower than modern minimum temperatures (8.6℃, 10.9℃, and 11.5℃, respectively). Estimated temperatures of the assemblages B and C at 25 m and 31 m (6.3℃ for Ty5–8) were 8℃ lower than average temperatures at depths of 20 m and 30 m (13.9℃ and 14.4℃, respectively), and were 2–5℃ lower than modern minimum temperatures in and around Sagami Bay (8.6℃ and 10.9℃).

The estimated summer water temperature for depths of 25–35 m was slightly higher (~2℃) than that in present-day Sagami Bay at depths of 20–30 m, although the estimated summer temperature at 41 m depths was similar to or slightly lower (~3℃) than current temperatures at 30–50 m depths (Fig. 5). The estimated winter temperatures were slightly lower (~2℃) than those recorded recently in Sagami Bay at depths of 30–50 m.

The ostracod species *Sinoleberis tosaensis* (Fig. 4) was found in assmblage B of the Naganuma Formation (Ozawa, 2009). This shallow-marine species has been mainly found along the Pacific coast of southwestern Japan (south of 35ºN) from Lake Hamana of Honshu Island to Uranouchi Bay of Shikoku Island (water depths of less than 15 m, and in the Taiwan Strait of the southern East China Sea (Ishizaki, 1968; Malz and Ikeya, 1982). This species is not found around modern Tokyo Bay (e.g. Frydl, 1982; Zhou, 1995). *S. tosaensis* fossils are found in Pliocene deposits in southwestern Taiwan along the coast of the northern South China Sea and in Plio-Pleistocene deposits in Taiwan and Japan along the Pacific Ocean coasts (Malz and Ikeya, 1982). Modern-day and fossil distributions of this species suggest that it favors warm envinronments influenced by warm Kuroshio Current along the Pacific Ocean coast (Ozawa, 2009). Therefore, the presence of this species in the Naganuma Formation might suggest that paleo-water temperatures in shallow marine areas were slightly higher 0.6 Ma compared to those in the present-day Sagami Bay, especially in summer.

5. 3 Comparison with results of Ozawa (2009)

Based on the species compositions of three ostracod fossil assemblages from the Naganuma Formation, as determined through Q-mode cluster analysis, Ozawa (2009) described three types of paleoenvironments with three stepwise changes during the depositional period of the horizons Ty1–Ty8; i.e., the outer bay (assemblage A), central bay (assemblage B), and inner bay (assemblage C) (Fig. 3; Table 2). In our MAT analysis, the species composition of the fossil assemblages B and C, described by Ozawa (2009), is most similar to the assemblages from the modern area of the Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea) (Tables 1, 2 and 4). The fossil assemblage A is correlated with the three modern assemblages from three different areas; i.e., the Setonaikai Sea, Sea of Japan, and East China Sea (Tables 1, 2 and 4). Fossil assemblages from six samples (Ty2, Ty3, and Ty5–Ty8) out of a total of eight samples collected from the Naganuma Formation are most similar to those from the modern Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea) (Tables 2 and 4). Ozawa (2009) identified the paleoenvironment of the assemblage A as the outer bay area. The SCD scores for two (Ty1 and Ty4) out of four samples of the assemblage A have the highest range in our study, ca. 1.1–1.2 (Fig. 3; Tables 1 and 4). Thus, our results reflect the utility of relatively small datasets for MAT analysis by including assemblages from just four localities in outer bay areas of the Setonaikai Sea (Hiuchinada Sea).

Comparing the results of Ozawa (2009) with those from our MAT study (Table 4), their paleoenvironments align well with bay areas, with the assemblage A as outer bay (samples Ty1 and Ty4) and B as central bay (Ty5–Ty7), and differ slightly for the assemblages A (Ty2 and Ty3) and C (Ty8). The SCD scores of these three samples (Ty2, Ty3 and Ty8) were greater than 0.5; i.e., 0.6–0.9 (Fig. 3; Tables 1 and 4). Therefore, our data may not yet support a detailed comparison between paleoenvironments and modern sea environments around Japan, especially for these three samples. On the other hand, Ozawa (2009) might have regarded the percentages of *Amphileberis nipponica* and *Loxoconcha tosaensis*, which are often reported from outer and central bay areas (e.g. Yamane, 1998; Tsukawaki *et al.*, 2000), in assemblages A (Ty2, Ty3) and C (Ty8; Table 4) as more important in paleoenvironments. However, our MAT results show a similar tendency with regard to paleoenvironmental fluctuations to those reported by Ozawa (2009), with the water depth decreasing upwards in this sequence from around 40 m to 20 m, and a weaker influence from open-sea water in the upper horizons, as compared to the lower horizons.

5. 4 Paleoenvironment of 0.6 Ma in and around Japan

Several recent studies of other microfossils were used to generate new details of the Japanese paleoenvironment around 0.6 Ma. Radiolarian fossils from 0.74 Ma were present in a drill core that was obtained from the bottom of the sea at a depth of 1,200 m from east of the Shimokita Peninsula in northeastern Japan (Matsuzaki *et al.*, 2014). This study determined that the influenece of the warm Tsugaru Current (a branch of the Tsushima and Kuroshio Currents) significantly increased from 0.62 Ma to 0.48 Ma (from MIS 15 to MIS 13). Based on the fossil radiolarian assemblages, researchers estimated that sea surface water temperatures 0.6 Ma were slightly higher than modern-day temperatures off the Shimokita Peninsula. They hypothesized that warm Kuroshio Current, which flows along the northwest margin of the Pacific Ocean near the Japanese Islands, became more influential for central and southwestern Japan during this time.

Table 4 Comparisons for MAT (modern analog technique) method results (SCD analysis; SCD means square chord distance) for the three ostracod assemblages (A–C) from the Naganuma Formation (Ozawa, 2009). From left to right: sample no., modern analog area (outer bay and central bay are referred from Choe, 1985; Yamane, 1998, Tsukawaki *et al.*, 2000) and square chord distance (SCD) based on the modern analog technique (MAT), paleoenvironment and assemblage names of Ozawa (2009). C.: central; SW: southwestern; N: northern.

	This study		Ozawa (2009)	
Sample no.	Modern analog area	SCD	paleoenvironment	assemblages
Ty1	N East China Sea (outer bay)	1.06	outer bay	A
Ty2	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.87	outer bay	A
Ty3	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.71	outer bay	A
Ty4	SW Sea of Japan (outer bay)	1.22	outer bay	A
Ty5	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.81	central bay	B
Ty6	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.89	central bay	B
Ty7	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.72	central bay	B
Ty8	C. Setonaikai Sea (central bay)	0.58	inner bay	C

Compared to estimates from radioralian and ostracod studies, Japanese Middle Pleistocene pollen studies (Hongo, 2009; Hongo and Mizuno, 2009; Nirei, 2017) differed in paleoclimate estimations for present-day central Japan. Based on the assemblages of the dominant genera *Cryptomeria* and *Fagus* in boring core samples from inland areas near Tokyo and Osaka bays, results from the pollen studies determined that the paleo-air temperatures in inland areas of the Kanto and Osaka plains during MIS 15 were slightly lower than present-day temperatures.

Results from the current study and other micropaleontological studies of 0.6 Ma demonstrate evidence of both warmer and cooler paleotemperatures compared to present temperatures among inland, coastal, and offshore regions of Japan. The SCD scores from our ostracod MAT analysis were relatively high (Fig. 3; Tables 1 and 2). So yet, our study could not address a detailed comparison of paleotemperatures and modern-day sea water temperatures.

The paleotemperatures of the Northwest Pacific margin of the Japanese Islands during the MPT remain unknown. Research on paleoclimates in marine and inland regions during the MPT will clarify changes related to glacioeustacy in both the paleoenvironment and in invertebrate faunas in shallow marine regions along the Northwest Pacific margin. Further paleoenvironmental research on the Middle Pleistocene is needed in Japan and adjacent regions.

Acknowledgement

We extend our thank to Y. Tanimura and M. Saito (National Museum of Nature and Science, Tsukuba, Japan) for their kind assistance in various aspects of preparing the manuscript. For using by scanning electron microscopes, we thank the National Museum of Nature and Science, Tsukuba, Japan. Thanks are also due to K. Yamada (Shinshu University, Japan), I. Motoyama (Yamagata Unibersity, Japan), T. Itaki and A. Suzuki (AIST, Geological Survey of Japan) for critically reading the manuscript and providing many helpful advice. This research was financially supported in part by a Grant-in-Aid from the Japan Society for the Promotion Science (No. 15K07199 to H. Ozawa).

References

Amano, K. (2004) Biogeography and the Pleistocene extinction of neogastropods in the Japan Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **202**, 245–252.

Berger, W. H. and Jansen, E. (1994) Mid-Pleistocene climate shift: The Nansen Connection. *In* Johannessen, O. M., Muench, R. D., Overlands, J. E., eds., *The Polar Oceans and their role in shaping the global environment*. American Geophysical Union, Geophysical Monographs 84, 295–311.

Boomer, I., Horne, D. J. and Slipper, I. J. (2003) The use of ostracodes in paleoenvironmental studies or what can you do with an ostracode shell? *In* Park, L. E. and Smith, A. J., eds., *Bridging the Gap: Trends in the Ostracode Biological and Geological Sciences*. The Paleontological Society Papers 9, Yale University, New Haven, 153–179.

Chinzei, K. (1991) Late Cenozoic zoogeography of the Sea of Japan area. *Episodes*, **14**, 231–235.

Choe, K. L. (1985) Recent Marine Ostracoda of Korea. *Ph.D Thesis of Kyoto University.*

Frydl, P. M. (1982) Holocene ostracods in the southern Boso Peninsula. *Bull. Univ. Museum, Univ. Tokyo*, **20**, 61–140.

Fujioka, M., Kameo, K. and Kotake, N. (2003) Correlation based on key tephra layers between the Ofuna–Koshiba Formation in the Yokohama district and the Kiwada Formation in the Boso Peninsula, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **109**, 166–178. (in Japanese with English abstract)

Hongo, M. (2009) Middle Pleistocene pollen biostratigraphy in the Osaka sedimentary basin, southwest Japan,

with special reference to paleoenvironmental change. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 64–79. (in Japanese with English abstract)

Hongo, M. and Mizuno, K. (2009) Pollen assemblages of Fukasaku A-1 drilling core, Saitama Prefecture, central Kanto plain, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **60**, 559–579. (in Japanese with English abstract)

Ikeya, N. and Cronin, T. M. (1993) Quantitative analysis of Ostracoda and water masses around Japan: Application to Pliocene and Pleistocene paleoceanography. *Micropaleontology*, **39**, 263–281.

Ikeya, N. and Suzuki, C. (1992) Distributional patterns of modern ostracodes off Shimane, southwestern Japan Sea. *Rep. Fac.Sci. Shizuoka Univ.*, **26**, 91–137.

Irizuki, T. and Seto, K. (2004) Temporal and spatial variations of paleoenvironments of Paleo-Hamana bay, central Japan, during the middle Pleistocene–Analyses of fossil ostracode assemblages, and total organic carbon, total nitrogen and total sulfur contents. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **110**, 309–324. (in Japanese with English abstract)

Irizuki, T., Kamiya, M. and Ueda, K. (2002) Temporal and spacial distribution of fossil ostracode assemblages and sedimentary facies in the Middle Pleistocene Tahara Formation, Atsumi Peninsula, central Japan. *Geosci. Rep. Shimane Univ.*, **22**, 149–160. (in Japanese with English abstract)

Irizuki, T., Matsubara, T. and Matsumoto, H. (2005) Middle Pleistocene Ostracoda from the Takatsukayama Member of the Meimi Formation, Hyogo Prefecture, western Japan: significance of the occurrence of *Sinocytheridea impressa. Paleontol. Res.*, **9**, 37–54.

Irizuki, T., Takata, H., and Ishida, K. (2006) Recent Ostracoda from Urauchi Bay, Kamikoshiki-jima Island, Kagoshima Prefecture, southwestern Japan. *Laguna*, **13**, 13–28.

Irizuki, T., Naya, T., Yamaguchi, M. and Mizuno, K. (2011) Temporal changes in the paleoenvironment of the inner part of paleo-Tokyo Bay during the middle Pleistocene (MIS 11 and MIS 9): Analysis of fossil ostracode assemblages from the Shimosa Group in the Shobu core, Saitama Prefecture, Central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **117**, 35–52. (in Japanese with English abstract)

Ishizaki, K. (1968) Ostracodes from Uranouchi Bay, Kochi Prefecture, Japan. *Sci. Reports Tohoku Univ., Sendai, Second Ser. (Geology)*, **40**, 1–45.

Ishizaki, K. (1990a) A setback for the genus *Sinocytheridea* in the Japanese mid-Pleistocene and its implications for a vicariance event. *In* Whatley, R. and Maybury, C., eds., *Ostracoda and Global Events*, Chapman and Hall, London, 139–152.

Ishizaki, K. (1990b) Sea level change in mid-Pleistocene time and effects on Japanese ostracode faunas. *Bull. Marine Sci.*, **47**, 213–220.

Japan Oceanographic Data Center (2017) J-DOSS/ JODC Data On-line Service System (http://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/index_j.html). (accessed, 20, August, 2017).

Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distirbuted benthic δ^{18}O records. *Paleoceanography*, **20**, 1–17.

Machida, H. (2010) Quaternary system from the Oiso Hills to Shimosa Highlands. *In* Sato, T. and Amano, K. *et al.*, eds., *Regional Geology of Japan 3, Kanto District*, Asakura Publishing, Tokyo, 299–315. (in Japanese)

Machida, H. and Arai, F. (2003) Atlas of tephra in and around Japan [revised version]. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 336 p. (in Japanese)

Machida, H., Arai, F. and Sugihara, S. (1980) Tephrochronological study on the middle Pleistocene deposits in the Kanto and Kinki districts, Japan. *Quaternary Res. (Daiyonki-Kenkyu)*, **19**, 233–261.

Malz, H. and Ikeya, N. (1982) On the occurrence of *Sinoleberis* in the Pacific. *Senckenbergiana Lethaea*, **63**, 413–427.

Matsuzaki, K., Nishi, H., Suzuki, N., Cortese, G., Eynaud, F., Takashima, R., Kawate, Y. and Sakai, T. (2014) Paleoceanographic history of the Northwest Pacific Ocean over the past 740 kyr, discerned from radiolarian fauna. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **396**, 26–40.

Mitsuoka, T., Yonezawa, H. and Yokohama Sub-Danken-Group (1977) On the Quaternary System around Yokohama (1): Naganuma and Byoubugaura Formations around Taya City. *Bull. Assoc. Kanto Quaternary Res. (Kanto-no-Yonki)*, no. 4, 44–52. (in Japanese)

Nakao, Y. and Tsukagoshi, A. (2002) Brackish-water Ostracoda (Crustacea) from the Obitsu River Estuary, central Japan. *Species Diversity*, **7**, 67–115.

Nirei, T. (2017) Paleovegetation and paleoclimate changes in middle Pleistocene of inland area of Kanto district, Japan. *Bull. Saitama Museum, Natural History*, no. 11, 1–16. (in Japanese with English abstract)

Osada, T., Ohhira, M. and Katayama, A. (1982) On the Quaternary System of the Sagami Sedimentary Basin (1): molluscan paleogeographical study of the middle part of the Naganuma Formation. *Bull. Hiratsuka City Museum*, no. 5, 25–34. (in Japanese)

Otuka, Y. (1937) Geologic structure of the south Kwanto region, Japan: (1) (Yokohama-Huzisawa district). *Bull. Earthquake Res., Tokyo Imperial Univ.*, **15**, 974–1040. (in Japanese)

Overpeck, J. T., Webb, III T. and Prentice, I. C (1985) Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Res.*, **23**, 87–108.

Oyama, K. (1973) Revision of Matajiro Yokoyama's type Mollusca from the Tertiary and Quaternary of the Kanto area. *Palaeontol. Soc. Japan*, *Special Papers*, **17**, 1–148.

Ozawa, H. (2009) Middle Pleistocene ostracods from the

Naganuma Formation in the Sagami Group, Kanagawa Prefecture, central Japan: palaeo-biogeographical significance of the bay fauna in Northwest Pacific margin. *Paleontol. Res*., **13**, 231–244.

Ozawa, H. and Ishii, T. (2014) Shallow-marine ostracods from the Lower Pleistocene Kazusa Group in the Tama Hills, central Japan, with their biogeographical significance in the Northwest Pacific coast. *Paleontol. Res*., **18**, 189–210.

Ozawa, H. and Kamiya, T. (2005) The effects of glacio-eustatic sea-level change on Pleistocene cold-water ostracod assemblages from the Japan Sea. *Marine Micropaleontol*., **54**, 167–189.

Ozawa, H., Ikehara, K. and Katayama, H (1999) Recent ostracode fauna in the northeastern part of the Japan Sea, off northwestern Hokkaido. *In* Ikehara, K. and Okamura, Y., eds., *Comprehensive study on environmental changes in the western Hokkaido coastal area and study on evaluation of marine active faults, Preliminary reports on researches in the 1998 fiscal year, GSJ Interim Report, no. MG/99/1*, Geological Survey of Japan, Tsukuba, 103–117 (in Japanese).

Ozawa, H., Kamiya, T. and Tsukagoshi, A. (1995) Ostracode evidence for the paleoceanographic changes of the middle Pleistocene Jizodo and Yabu Formations in the Boso Peninsula, central Japan. *Sci. Rep. Kanazawa Univ*., **40**, 9–37.

Tada, R. (1994) Paleoceanographic evolution of the Japan Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatoi. Palaeoecol*., **108**, 487–508.

Tanaka, G. (2008) Recent benthonic ostracod assemblages as indicators of the Tsushima warm current in the southwestern Sea of Japan. *Hydrobiologia*, **598**, 271–284.

Tanaka, G. (2012) Recent ostracod assemblages from Suruga Bay, central Japan. *Bull. Gumma Museum*, Natural History, no. 16, 1–30.

Tanaka, G. and Nomura, S. (2009) Late Miocene and Pliocene Ostracoda from the Shimajiri Group, Kume-jima Island, Japan: Biogeographical significance of the timing of the formation of back-arc basin (OkinawaTrough). *Palaeogeogr. Palaeoclimatoi. Palaeoecol.*, **276**, 56–68.

Tsukawaki, S., Kamiya, T., Kato, M., Matsuzaka, T., Naraoka, H., Negishi, K., Ozawa, H. and Ishiwatari, R. (1997) Preliminary results from the R.V. *Tansei-maru* Cruise KT95-14 Leg 2 in the southern marginal area in the Japan Sea–Part 1: Sediments, Benthic foraminifers and Ostracodes. *Bull. Japan Sea Res. Inst*., no. 28, 13–43.

Tsukawaki, S., Kamiya, T., Ozawa, H. and Kato, M. (1998) Preliminary results on the sediment samplings during the R.V. *Tansei-maru* Cruise KT96-17 Leg 2 in the southwestern part of the Japan Sea–Sediments, Benthic foraminifers and Ostracodes. *Bull. Japan Sea Res. Inst*., no. 29, 67–89.

Tsukawaki, S., Ozawa, H., Domitsu, H., Tanaka, Y., Kamiya, T., Kato, M. and Oda, M. (1999) Preliminary results from the R.V. *Tansei-maru* Cruise KT97-15 in the eastern marginal part of the Japan Sea off Tsugaru Peninsula, Northeast Japan–Sediments, Benthic and Planktonic foraminifers and Ostracodes. *Bull. Japan Sea Res. Inst*., no. 30, 99–140.

Tsukawaki, S., Ozawa, H., Domitsu, H., Kamiya, T., Kato, M. and Oda, M. (2000) Preliminary results from the R.V. *Tansei-maru* Cruise KT98-17 in the southwestern marginal part of the Japan Sea–Sediments, Benthic and Planktonic foraminifers and Ostracodes. *Bull. Japan Sea Res. Inst*., no. 31, 89–119.

Ujiie, H. and Kagawa, E. (1963) Planktonic foraminifera from the Naganuma Formation, Kanagawa Prefecture, Japan. *Bull. National Sci. Museum*, **6**, 328–345.

Yabe, H. (1906) Diluvial and Tertiary deposits in the environs of Tokyo. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **13**, 187–192. (in Japanese)

Yajima, M. (1978) Quaternary Ostracoda from Kisarazu near Tokyo. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan, New Ser*., no. 112, 371–409.

Yajima, M. (1982) Late Pleistocene Ostracoda from the Boso Peninsula, Central Japan. *Bull. Univ. Museum, Univ. Tokyo*, **20**, 141–227.

Yamane, K. (1998) Recent Ostracode assemblages from Hiuchi-nada Bay, Seto Inland Sea of Japan. *Bull. Ehime Pref. Sci. Museum*, no. 3, 9–59. (in Japanese with English abstract)

Yasuhara, M. and Irizuki, T. (2001) Recent Ostracoda from the northeastern part of Osaka Bay, southwestern Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **44**, 57–95.

Yasuhara, M. and Kumai, H. (2003) Fossil ostracodes from the Tako-Shell bed, Shimosa Group and the Somei horizontal hollow tomb floor deposits formed in its outcrop in Somei, Tako-machi, Chiba Prefecture, Japan. *Monogr. Assoc. Geol. Collaborat. Japan*, no. 50, 73–78. (in Japanese with English abstract)

Zhou, B.C. (1993) Ostracode fauna in the Pacific off Southwest Japan. *Ph.D Thesis of Kyoto University*.

Zhou, B.C. (1995) Recent ostracode fauna in the Pacific off Southwest Japan. *Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ. Ser. Geol. Mineral*., **57**, 21–98.

Zhou, B. C. and Ikeya, N. (1992) Three species of *Krithe* (Crustacea: Ostracoda) from Suruga Bay, central Japan. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan, New Ser*., no. 166, 1097–1115.

Recieved September 29, 2017
Accepted September 18, 2018
Published on-line January 18, 2019

相模層群長沼層（中部更新統）産の介形虫化石群に基づく古環境解析

小沢広和・田中源吾

要　旨

本研究は，神奈川県に分布する相模層群長沼層産の海生介形虫化石群に基づき，海洋酸素同位体ステージ15（MIS 15）の約60万年前の古環境（水深，水温）を現生アナログ法（MAT）を用いて推定した．その結果，長沼層の古環境は，現在の瀬戸内海などの西南日本沿岸の水深25～41 mの海域に，最も類似することが明らかになった．これらの西南日本沿岸域の水温値（夏：16～28℃，冬：6～11℃）を，現在の相模湾の水温データと比較したところ，夏の水温は水深30 m以浅では少なくとも2℃ほど高いが，40 m付近では現在とほぼ同じか2℃ほど低く，冬の水温は40 m以浅で少なくとも2℃ほど低いことが明らかになった．本研究は約60万年前（MIS 15）の日本列島沿岸浅海域における古水温の変動を，定量的に推定した初の研究例である．

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 17–41, 2019

論文 - Article

宮城県仙台市北東部に分布する中新統の統合年代層序

鈴木拓馬[1,*]・林　広樹[1]・柳沢幸夫[2]・藤原　治[3]・檀原　徹[4]

Takuma Suzuki, Hiroki Hayashi, Yukio Yanagisawa, Osamu Fujiwara and Toru Danhara (2019) Integrated chronostratigraphy of the Miocene sedimentary sequence in the northeastern area of Sendai City, Miyagi Prefecture, Northeast Honshu, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p.17–41, 11 figs, 2 tables, 3 appendices, 2 plates.

Abstract: The middle to upper Miocene Shida Group is widely distributed in the northeastern Sendai area, Miyagi Prefecture, Northeast Japan. This group is divided into the Irisugaya, Bangamoriyama, Aoso and Nanakita Formations in ascending order. Among them, the Aoso Formation is mainly composed of ocean current-dominated sedimentary facies and yields abundant molluscan and marine vertebrate fossils. Therefore, this formation has been focused for paleoenvironmental, paleogeographic and paleontological studies of Northeast Japan. In this study, we established integrated biostratigraphy using planktonic foraminifera and diatom for the Shida Group in the northeastern Sendai Plain, which includes the type locality of the Aoso Formation. We also report fission track (FT) ages of two pyroclastic layers of Aoso and Nanakita Formations. Consequently, the Irisugaya Formation is correlated with the diatom zone NPD5B. The Aoso Formation is assigned to the diatom zone NPD5D and planktonic foraminiferal zone N.16–N.17A. The Nanakita Formation is correlative with zones NPD6A and NPD6B. FT ages of the uppermost part of the Aoso Formation and the lower part of the Nanakita Formation were determined at 9.3 ± 0.4 Ma and 7.6 ± 0.7 Ma, respectively. These results are concordant with each other and support previous chronostratigraphic data of adjacent areas.

Keywords: Aoso Formation, biostratigraphy, diatom, fission track age, Miocene, Miyagi Prefecture, Nanakita Formation, planktonic foraminifera, Sendai City, Shida Group

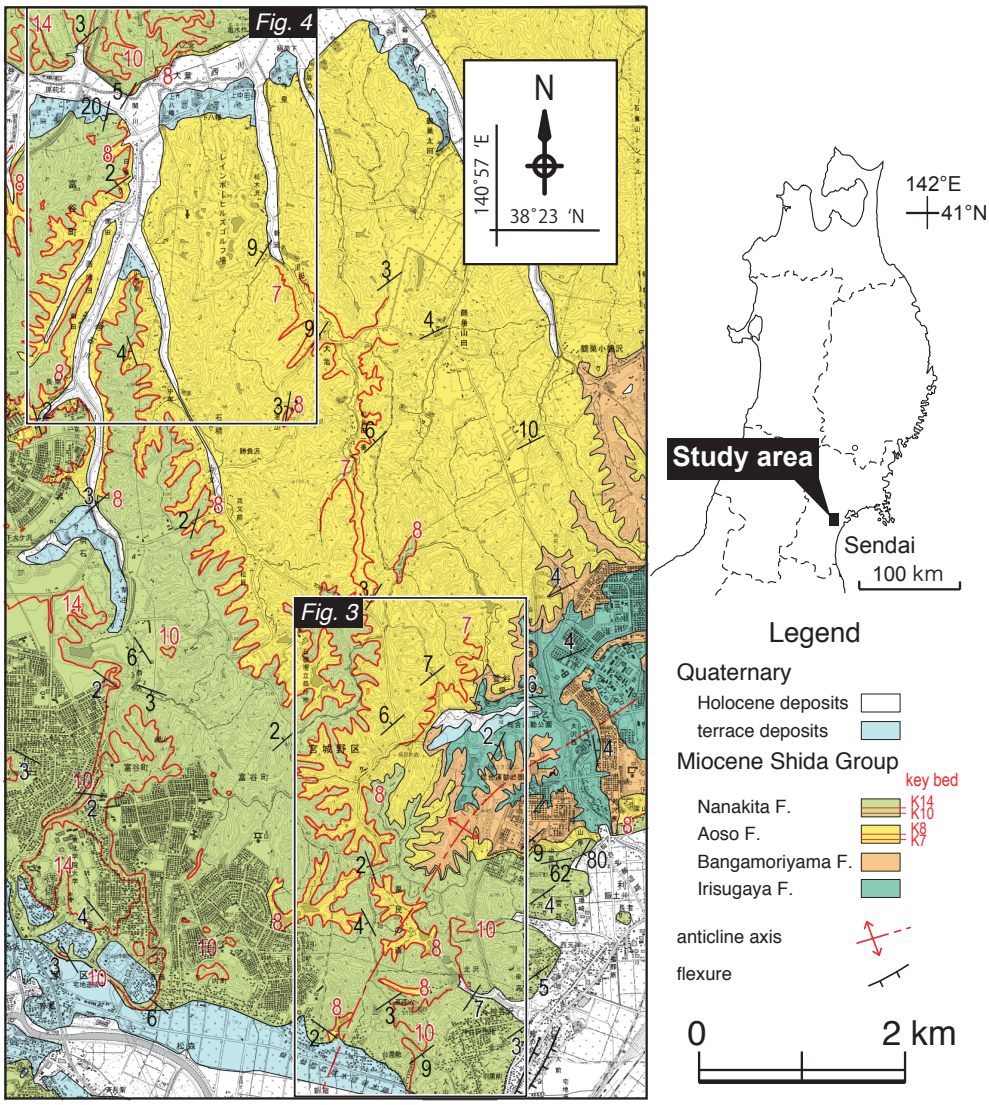
要　旨

宮城県仙台市北東部には海成中部～上部中新統志田層群が広く分布し，下位より，入菅谷層，番ヶ森山層，青麻層，七北田層に区分される．このうち青麻層は海流堆積物を主体とし，軟体動物や海生哺乳類等の化石を多産することから，東北日本の古環境・古地理の変遷や古生物地理などの研究上重要である．本研究では，青麻層の模式地を含む仙台平野中部で浮遊性有孔虫及び珪藻化石層序を再検討し，あわせて凝灰岩のフィッション・トラック(FT)年代測定を行った．入菅谷層からはNPD5B帯に相当する珪藻化石が，青麻層からはN.16帯～ N.17A亜帯最下部に対比される浮遊性有孔虫化石及びNPD5D帯に対比される珪藻化石が，七北田層からはNPD6A帯及びNPD6B帯に相当する珪藻化石が産出した．また，青麻層最上部の凝灰岩からは9.3±0.4 Ma，七北田層下部の凝灰岩からは7.6±0.7 MaのFT年代が得られた．これらの結果は相互に矛盾せず，また，周辺地域の中新統層序とも整合する．

1．はじめに

宮城県仙台市北東部から利府町，富谷市にかけての地域(以下，仙台市北東部地域；第1図)には，海成中部～上部中新統の志田層群が分布し，下位から，入菅谷層，番ヶ森山層，青麻層，七北田層に区分される(北村ほか，1983, 1986)（第2図）．このうち青麻層は，塩原・耶麻動物群に属する軟体動物化石が豊富に産出する(Nakamura, 1940; Hanzawa *et al.*, 1953; 増田，1957; 北村ほか, 1983, 1986；Fujiwara, 1992)．また，海生哺乳類化石も数多く報告されている(例えば，甲能・高泉，1992；

[1] 島根大学大学院総合理工学研究科(Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 1060, Nishikawatsucho, Matsue City, Shimane 690-8504, Japan)
[2] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門（AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation）
[3] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報基盤センター（AIST, Geological Survey of Japan, Geoinformation Service Center）
[4] 株式会社京都フィッション・トラック（Kyoto Fission-Track Co. Ltd.）
[*] Corresponding author: T. Suzuki, E-mail: zaku142 @gmail.com

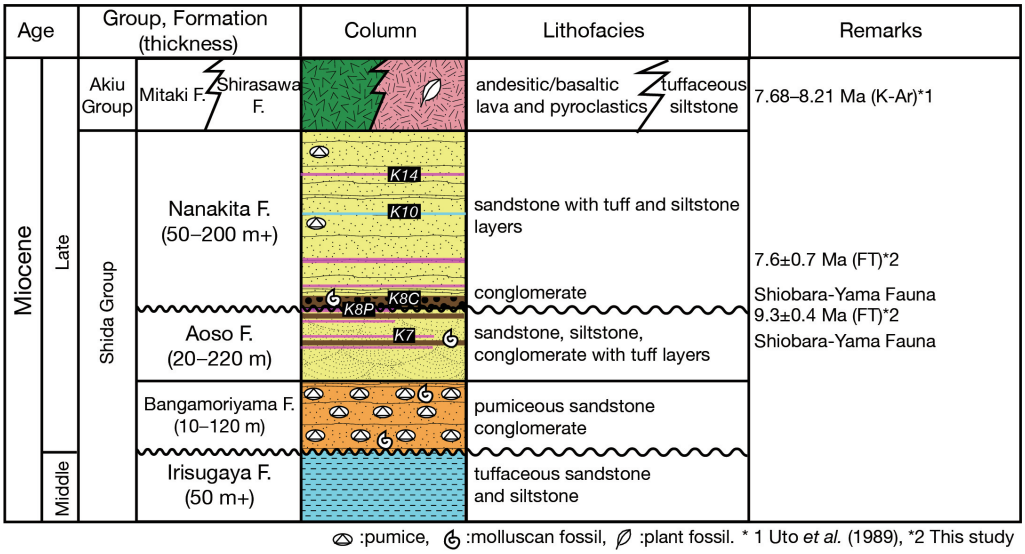


第 1 図　調査地域の地質図．地質調査は北村ほか(1983，1986)を参照しつつ，1990 ～ 1991 年に実施した．地形図には国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「富谷」「仙台東北部」を使用した．

Fig. 1　Geologic map of the study area. Geological survey in 1990–1991 referencing Kitamura *et al.* (1983, 1986). Geographic maps “Tomiya” and “Northeastern Sendai” (1:25,000 in scale) published by Geospatial Information Authority of Japan are used.

浅野，1996；甲能ほか，1997)．さらに，青麻層からは熱帯から亜熱帯の水塊に特徴的な浮遊性有孔虫が産出し，Barron and Baldauf (1990) が報告した後期中新世の温暖期Climatic Optimum 3に対比されている(Saito and Isawa, 1995)．一方，青麻層や番ヶ森山層には，最大セット高6 mに達する大規模斜交層理を特徴とする海流堆積物が発達し，斜交層理の示す古流向と産出する暖流系の浮遊性有孔虫から，当時この地域は，現在の北上山地と阿武隈山地の位置にあった島嶼に挟まれた海峡部に位置し，太平洋側から暖流の分岐が西に向かって流れ込んでいたと推定されている(吉田・立石，2003)．このように，青麻層は古生物学，堆積学，古海洋学などさまざまな分野から見ても非常に重要な地層である．しかし，青麻層の堆積年代に関しては，以下で述べるような深刻な矛盾があり，研究を進める上で障害になっていた．

青麻層からは，Blow (1969) の浮遊性有孔虫化石帯のN.17帯の上部，またはBerggren *et al.* (1995) の浮遊性有孔虫化石帯のN.17B亜帯に相当する浮遊性有孔虫化石が報告されている(北村ほか，1983；Saito and Isawa，1995；Fujiwara，1992)．最新の年代尺度(Geologic Time Scale 2012；Hilgen *et al.*，2012)に基づくと，この年代区間は約6.6–5.6 Maに相当する．一方，青麻層が分布する仙台市北東部の周辺地域にも中新統は広く分布し，それらは地理的分布や岩相の類似，化石記録，鍵層などに基づい



第2図　調査地域に分布する中新統の模式柱状図.
Fig. 2　Schematic geologic column of the Miocene sequence in the study area.

て対比されている．しかし，それら青麻層相当層が示す年代と，青麻層の年代との間には大きなずれがあった．

まず，東側に隣接する松島地域に分布する青麻層・七北田層相当層からは，それぞれ約10–9 Maと 9–8 Maの年代を示す珪藻化石が産出している（秋葉ほか，1982；石井ほか，1982；柳沢・秋葉，1999）．しかし，これらの珪藻年代は青麻層の浮遊性有孔虫年代より最大で300万年以上も古い．

一方，西隣の仙台市南西部地域にも，志田層群に対比される海成の名取層群上部と，その上位の陸成火山噴出物を主とする秋保（あきう）層群が分布している（北村ほか，1986）．このうち，名取層群上部の綱木層は，青麻層と七北田層に対比され（北村ほか，1986），多数のフィッション・トラック（FT）年代により，およそ10–8.3 Maに堆積したことが明らかになっている（Fujiwara *et al.*，2008）．さらに，綱木層の上位の秋保層群のK-Ar年代も8 Ma前後の年代を示す（宇都ほか，1989；今田・植田，1980）．このように，仙台市南西部に分布する青麻層相当層の年代も，青麻層の浮遊性有孔虫年代より200万年以上古く推定されており，岩相に基づく上部中新統の対比とその堆積年代の間には大きな矛盾があった．

以上のように，青麻層の浮遊性有孔虫年代は，周辺地域に分布する青麻層相当層の微化石年代や放射年代とは，全く一致していなかった．こうした年代不一致の原因の一つとして，北西太平洋地域では上部中新統の微化石層序が十分に確立していないことが可能性として挙げられる．生層準は生物の進化的イベントを対比に用いているため，必然的に生物地理学的もしくは進化的要因に伴う適用限界や異時性を伴う．したがって，地層の正確な年代決定のためには，可能であれば複数の微化石分類群の生層準を相互に比較し，各生層準の信頼性や適用限界を慎重に吟味することが望ましい．しかし，日本の上部中新統では石灰質微化石と珪質微化石が同一層序で共産することが少ないため，こうした検討はほとんどされてこなかった．

そこで本研究では，仙台市北東部地域の上部中新統の年代層序の矛盾を解決することと，北西太平洋地域での石灰質・珪質微化石層序の直接対比を目的として，浮遊性有孔虫化石層序の再検討と，珪藻化石層序の検討を行った．また，あわせて，微化石年代と放射年代との対応関係を確実にすることを目指して，青麻層及び七北田層で凝灰岩層のFT年代の測定を行った．その結果，矛盾の主な原因は，従来の青麻層の浮遊性有孔虫年代にあることがわかり，一部問題点は残ったものの，年代層序の不一致をほぼ解消することができた．また，浮遊性有孔虫層序，珪藻化石層序及び放射年代を直接対比し，仙台市北東部地域の上部中新統と周辺地域の上部中新統との対応関係もほぼ確定することができた．

2．地質概説

本研究における層序区分は原則として北村ほか（1986）に従った．本研究地域及びその周辺には，下位から中新統志田層群の入菅谷層，番ヶ森山層，青麻層，七北田層が分布する（第1図，第2図）．志田層群はトリアス系の利府層を不整合に覆っている（北村ほか，1986）．

入菅谷層は主に凝灰質砂岩と凝灰質シルト岩の互層からなる．砂岩は細粒～粗粒で，粗粒部では斜交層理を示す．層厚は約50 m以上である．本層は調査地域東部に存在する北東–南西方向の背斜の軸部に分布する．吉田・

立石(2003)は，志田層群の堆積相解析を行い，入菅谷層が波浪卓越型の内側陸棚システムで堆積したことを明らかにした．

番ヶ森山層は入菅谷層を不整合に覆うスコリア・軽石質砂岩で，数 mm から数10 mmの円から亜円礫を含み，一部で礫岩が発達する．最大セット高6 mに達する大規模な斜交層理が発達する．層厚は調査地域の東方の入菅谷付近で最大約120 mにも達するが，調査地域内では薄くなり10 m程度である．本層は調査地域東部の北東–南西方向の背斜の両翼部で下位の入菅谷層をとりまくように分布する．本層は高いエネルギー領域の海流卓越型陸棚システム下で堆積したと推定される(吉田・立石, 2003)．

青麻層は斜交層理の発達する固結度が低く淘汰の良い石英質の細～中粒砂層を主体とする．調査地域周辺では基底に礫層を伴うことがあり，番ヶ森山層を削り込んで覆っていると思われる．層厚は富谷丘陵南東部で厚く150 ～ 220 mに達するが，北東及び南方へ薄くなり，最小では約20 mである(北村ほか，1983，1986)．調査地域周辺は，層厚が比較的薄い地域にあたり，約70 mである．本層は七北田川の北の富谷丘陵に広く分布し(例えば，北村ほか，1983，1986)，北西へ5°程度緩く傾斜する．青麻層は高いエネルギー領域の海流卓越型陸棚システム下で堆積したと推定される(吉田・立石，2003)．

青麻層は鍵層となる細粒凝灰岩層や軽石凝灰岩層を何層か挟むが，同層の下部に挟まる鍵層K7(北村ほか，1983)は，斜交層理や平行葉理が発達した最大層厚8 m以上に達する細粒凝灰岩層で，よく追跡できる．鍵層K7より下位の青麻層は，細礫をまばらに含む中～粗粒砂層を主とする．鍵層K7のすぐ上位の層厚数mの区間には石灰質ノジュールを多く含み，貝殻の残った貝化石破片が観察される．鍵層K7から青麻層最上部へ向けて全体として粗粒化し，細粒砂層から細礫を疎らに含む中～粗粒砂層を経て細礫質の粗粒砂層へと変化する．その上に鍵層K8 (増田，1957；北村ほか，1983)が重なる．

鍵層K8は，中礫や砂を含む軽石凝灰岩(最大層厚約8 m；本研究では鍵層K8Pと呼ぶ)と，それを覆う亜円中礫岩(層厚1 m前後，最大約3 m；本研究では鍵層K8Cと呼ぶ)のセットからなる．この中礫岩は多重級化構造を持つことがある．また，鍵層K8は全体に貝化石を多く含む．

七北田層は，主に凝灰質砂岩，軽石凝灰岩，火山礫凝灰岩，シルト岩の互層からなる地層で，下位の青麻層を不整合に覆う．本研究では多くの先行研究(Hanzawa *et al,* 1953；増田，1957；北村ほか，1986)に従い，鍵層K8Cの基底を本層の下限とする．したがって，鍵層K8Pの上限までが青麻層，鍵層K8Cの礫岩の基底から上位が七北田層となる．この境界は大局的に見て，大型の斜交層理の発達する淘汰の良い砂層を主体とする青麻層から，相対的に細粒で凝灰質な物質からなり，斜交層理の発達に乏しい七北田層へ層相が急変する境界に一致する．なお，北村ほか(1983)では後述の鍵層K10の下位の礫岩の基底で本層の下限を定義した．これは鍵層K8Cが確認できなかったり，あるいは青麻層の模式地周辺のように鍵層K8Cによる侵食で下位の鍵層K8Pを欠いたりする(増田, 1957；北村ほか，1986)ことがあり，その場合は両層の識別がしばしば困難になることによる．本研究では青麻層の模式地である県民の森から利府町入菅谷に至る道路沿いにおいて青麻層を追跡し，青麻層最上部を覆う七北田層最下部の鍵層K8Cを改めて確認した．

七北田層は層厚が最大で200 mに達し(北村ほか, 1986)，場所によって層厚や層相の変化が大きい．調査地周辺の七北田層は比較的粗粒で，砂層や礫層を含む．一方，北方の吉田川の北岸の丘陵に分布する大松沢層は，鍵層の追跡から七北田層に対比されるが，全体により凝灰質で細粒である(北村ほか，1983；石井ほか，1982)．本層は調査地域西部にあたる七北田川の南北両側の富谷丘陵と七北田丘陵に分布する(北村ほか，1983，1986)．吉田・立石(2003)によれば，七北田層の堆積システムは重力流卓越型陸棚システムである．

七北田層には何枚かの鍵層が認められる．中でも層厚数十cmから1 mの2枚の黒色のシルト岩のセットからなる鍵層K10は，本層下部で良く目立つ．これは詳しく見ると黒色のシルト岩，火山礫凝灰岩，生痕化石が密集するシルト質砂岩の互層(全体として層厚2 m程度)である．

北村ほか(1986)は，鍵層K10を境界として七北田層を下部と上部に分けている．このうち，七北田層下部(層厚90 m)は鍵層K8Cの直上が最も細粒(細粒砂層)で，そこから上方粗粒化して中礫岩が重なるが，鍵層K10の直下数mでは再び細粒化し生痕化石を含む泥質細～中粒砂岩層となる．一方，七北田層上部(層厚45 m)はシルト岩，細粒砂岩，火山礫凝灰岩，軽石凝灰岩の互層からなり，鍵層K10の約18 m上位に層厚10–20 cmで淡桃色の細粒凝灰岩層(鍵層K14)を挟む(北村ほか，1983，1986)，

志田層群内の各層の関係は，入菅谷層と番ヶ森山層が不整合関係，番ヶ森山層と青麻層が整合関係である(北村ほか，1983，1986)．青麻層と七北田層の関係については従来整合関係とされてきた(北村ほか，1983，1986)．しかし，吉田・立石(2003)は，東隣の松島地域における志田層群の珪藻化石層序(柳沢・秋葉，1999)の結果に基づき，青麻層と七北田層は不整合であると考えている．先述のように青麻層最上部の鍵層K8Pが七北田層によって局所的に削剥されていること(北村ほか，1986)，また，後述の微化石年代やFT年代によって両層の間に時間間隙が推定されることから，本研究でも両層は不整合関係と考える．

3．材料及び方法

3. 1　層序セクション

本研究では，青麻，新袋（しんぶくろ），中町，亀水作（きみづくり）及び高森山の5つの層序セクションを設定して試料を採取した（第3図及び第4図）．青麻セクション（第3図）は，仙台市宮城野区菅谷から青麻神社を経て県民の森に至るルートにおいて，A1からA6までの個別セクションを複合させた層序セクションであり，入菅谷層，番ヶ森山層，青麻層及び七北田層下部を含む（第5図及び第6図）．新袋セクション（第4図）は，富谷市新袋南方の道路沿いの大露頭で，鍵層K7を含む青麻層の下部を含む（第7図）．中町セクション（第4図）は，富谷市石積中町の北東の大露頭で，青麻層最上部の砂岩と鍵層K8Pの下部が露出している（第7図）．亀水作セクション（第4図）は，富谷市亀水作の西方の沢沿いのルートで，青麻層最上部から七北田層下部を含む（第8図）．高森山セクション（第3図）は仙台市高森山南方の道路沿いのセクションで，七北田層上部をカバーする（第9図）．

3. 2　浮遊性有孔虫

有孔虫試料は青麻層の模式地周辺の青麻セクションにおいて，沢底や沢沿い及び最近崩壊したとみられる新鮮な斜面崩壊露頭を選んで採取した（第3図）．まず露頭面をよく観察し，比較的細粒な粒子で構成されていること，貝化石が付近にみられること，近くに石灰質ノジュールが含まれていることに留意し，石灰質微化石が良好に保存されているとみられる層準について，ツルハシやハンマーを用いて約30 cm程度掘り下げ，約1 kg程度の岩塊で計32試料（P1–P32）を採取した．本研究における試料採取層準を複合柱状図上に示した（第5図）．

採取した岩石試料は乾燥重量を160 g あるいは80 g に調整した．調整後の試料は硫酸ナトリウム法及びナフサ法を併用して処理した（山崎・堂満，2013）．ほぼすべての試料が，硫酸ナトリウム法，ナフサ法をそれぞれ1度行うのみで泥化した．

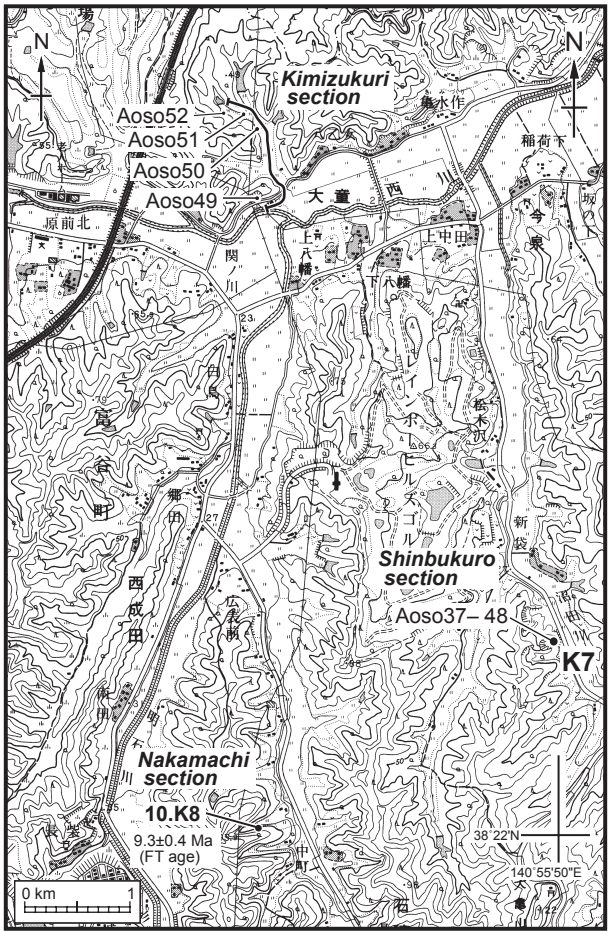
構成粒子まで分解処理した水洗残渣は簡易分割器を用いて分割し，双眼実体顕微鏡下で有孔虫の有無を確認した．有孔虫の認められた試料について1試料あたり200個体を目標に個体の抽出を行った．その際に115メッシュ（開口125 μm）の篩を用いて，125 μm以上のものを抽出した．底生有孔虫については個体数のみを計数した．

3. 3　珪藻化石

珪藻化石の分析は，青麻，新袋，亀水作及び高森山の4セクションで行った．青麻セクション（第3図）では，34試料（Aoso03–36）を採取した．新袋セクション（第4図）では，青麻層の鍵層K7付近から12試料（Aoso37–48）を採取した．亀水作セクション（第4図）では4試料（Aoso

第3図　青麻及び高森山セクションにおける珪藻試料（Aoso03–36, Aoso64–72）と有孔虫試料（P1–32），フィッション・トラック年代測定試料（Aoso35C）の採取位置図．Saito and Isawa（1995）によって浮遊性有孔虫化石が報告された10試料（AOS-30–66）を併せて示した．国土地理院発行2万5千分の1地形図「富谷」及び「仙台東北部」を使用．

Fig. 3　Map showing sampling locations of diatom samples (Aoso03–36, Aoso64–72), planktonic foraminiferal samples (P1–32) and a tuff sample for fission track dating (Aoso35C) in the Aoso and Takamoriyama sections. Samples reported by Saito and Isawa (1995) for their planktonic foraminiferal analysis (total 10 samples; AOS30–66) are also indicated. Geographic maps "Tomiya" and "Northeastern Sendai" (1:25,000 in scale) published by Geospatial Information Authority of Japan are used.



第4図　新袋及び亀水作セクションにおける珪藻試料（Aoso37–48，Aoso49–52）と中町セクションにおけるフィッション・トラック年代測定試料（10.K8）の採取位置図．国土地理院発行2万5千分の1地形図「富谷」を使用．

Fig. 4　Map showing sampling locations of diatom samples (Aoso37–48, Aoso49–52) in the Shinbukuro and Kimizukuri sections and a tuff sample for fission track dating (10.K8) in the Nakamachi section. Geographic map "Tomiya" (1:25,000 in scale) published by Geospatial Information Authority of Japan are used.

49–52）を分析した．南東部の高森山セクション（第3図）では7試料（Aoso 64, 66–68, 70–72）を採取した．各セクションの試料採取層準を第6図から第9図に示した．なお，極粗粒～粗粒の砂岩が主体の層準では，試料は斜交層理砂岩の間に挟在するマッドドレイプ，泥質細粒凝灰岩及び泥質の生痕化石など，可能な限り細粒部を選んで採取した．

試料の処理は，Akiba（1986）のunprocessed strewn slideの方法で行った．乾燥試料は新聞紙でくるみ，ハンマーで砕いた後，約1 gを100 mlビーカーに入れ，試料が浸る程度に純水を注ぎ入れ，一昼夜放置する．この過程で試料はほとんど泥化する．次にビーカーに純水を加えて約100 mlの懸濁液とし，約20秒間放置して粗粒物が底に沈むのを待ち，上澄みの懸濁液からマイクロピペットで0.5 mlを取り出し，18 × 18 mmのカバーグラスに滴下する．これをホットプレートで加熱・乾燥後，アルコールで薄めたPleurax（封入剤）をカバーグラスに滴下し，さらに加熱・乾燥させてアルコール分を蒸発させる．最後に，このカバーグラスをホットプレートで温めたスライドグラスに貼付する．

珪藻殻の計数は，生物顕微鏡600倍の倍率下で行った．*Chaetoceros*属の休眠胞子を除いて，観察されたすべての種の蓋殻が100になるまで計数し，その後，さらにカバーグラスの幅5 mmの範囲を走査して，その過程で新たに認められた種，及び破片としてのみ認められた種はpresent（＋）として記録した．なお，化石帯が決定できない場合は，さらにスライドを全面走査するか，スライドを追加作成して走査した．休眠胞子については，上記100蓋殻計数時に認められた総数を別途記録した．

珪藻の保存状態（preservation）は，殻の破損・溶解の程度と頑丈な殻を持つ珪藻の頻度を基に，G（good），M（moderate），P（poor）の3段階に分けた．産出量（abundance）は100蓋殻に至るまでの走査線の数により，A（abundant）= 走査線1未満，C（common）= 走査線1以上3未満，R（rare）= 走査線3以上と区分した．

珪藻化石帯区分はAkiba（1986）とYanagisawa and Akiba（1998）の新第三紀北太平洋珪藻化石帯区分を適用し，化石帯はNPDコード，生層準はDコード（D10–120）を用いた．年代はWatanabe and Yanagisawa（2005）を用いて修正し，Hilgen *et al.*（2012）の地磁気極性年代尺度に合わせて調整した．なお，この報告では記述を簡略化するために，コード番号のついた生層準を基準として，暫定的に各化石帯を細分した「区間」（interval）を非公式に導入して使用する．本論文で関係する化石帯では，NPD5B帯が区間$5B_1$–$5B_4$，NPD5D帯が区間$5D_1$–$5D_4$，NPD6B帯が区間$6B_1$–$6B_3$にそれぞれ細分される．

3. 4　フィッション・トラック年代

本研究では凝灰岩2試料のFT年代を測定した．1つは青麻層／七北田層境界直下に位置する鍵層K8Pの軽石凝灰岩（試料10.K8）で，最も厚く堆積している富谷市石積の中町セクション（第4図）で採取した．もうひとつは，七北田層下部の酸性粗粒凝灰岩（試料Aoso35C）で，青麻セクションの県民の森付近の露頭（第3図）で，凝灰岩層最上部の軽石濃集部分から直径10 cm程度の発泡のよい軽石片を採取した．両試料の採取層準は第5図及び第7図にそれぞれ示した．

FT年代は，各凝灰岩試料から抽出したジルコン粒子について，ゼータ較正法（Hurford，1990a，b）による外部ディテクター法（ED2 method：Danhara *et al.*，1991）によって測定し，熱中性子照射は，10.K8試料においては

第1表 青麻セクションから産出した浮遊性有孔虫化石.
Table 1 Occurrence chart of planktonic foraminifera in the Aoso section.

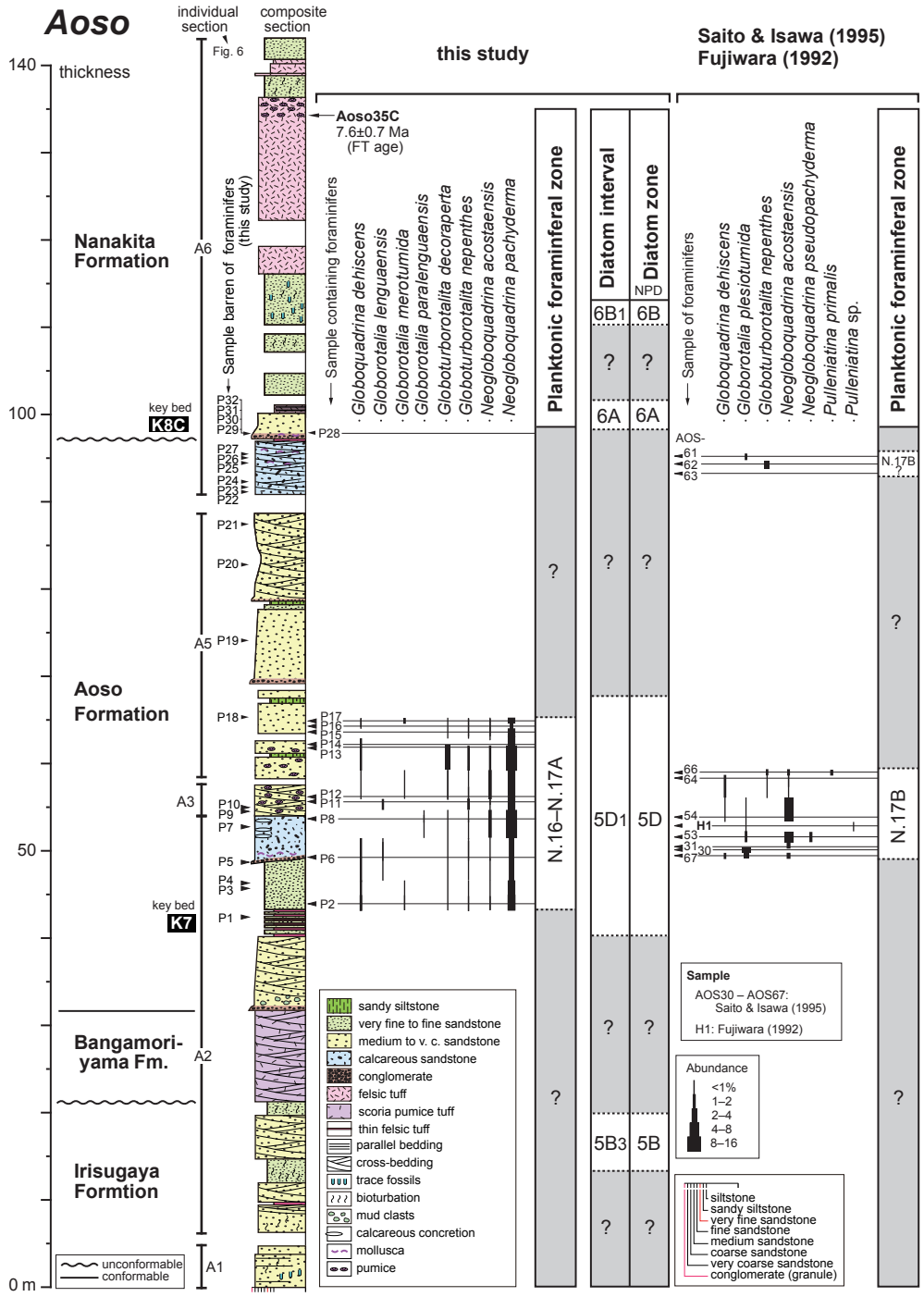
	P2	P6	P8	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P28
Catapsydrax pervulus Bolli, Loeblich et Tappen				1	1					6	
Dentoglobigerina altisprina altisprina (Cushman et Jarvis)					2	1				1	
Dentoglobigerina altisprina globosa (Bolli)	1					1			1		
Dentoglobigerina baroemoenensis (LeRoy)	3										
Dentoglobigerina sp.							1				
Globigerina angustiumbilicata Bolli	11	2	2	6	4	4	12		1	1	
Globigerina bulloides d'Orbigny	73	63	66	30	52	80	56	132	105	85	1
Globigerina falconensis Blow	23	13	7	8	14	18	17	12	11	19	
Globigerina pseudociperoensis Blow	3					1	3			4	
Globigerinella obesa (Bolli)			1			2		2		1	
Globigerinita glutinata (Egger)	9	1	7	4	5	9	2	4	7	6	1
Globigerinita uvula (Ehrenberg)									1		
Globigerinoides bollii (Blow)	5	10	4	2	2	2	6		2	14	
Globigerinoides immaturus LeRoy	5	14	3	7	3	10	2		6	4	
Globoferinoides quadrilobatus (d'Orbigny)	6	2	4	15	11	1			4	7	
Globigerinoides ruber (d'Orbigny)					1	1		2	1	2	
Globigerinoides trilobus (Reuss)	2	4	3	1	1	2	1	1	1	2	
Globoconella miozea (Finlay)		1									
Globoconella conoidea (Walters)			1								
Globoquadrina dehiscens (Chapman, Parr et Collins)	3	4			1	3	2		2	2	
Globorotalia lenguaensis Bolli		1		3							
Globorotalia cf. *mayeri* Cushman et Ellisor sinistral							3				
Globorotalia merotumida Blow et Banner	2				1					3	
Globorotalia cf. *merotumida* Blow et Banner					1					1	
Globorotalia paralenguaensis Blow			2								
Globorotaloides falconarae Giannelli et Salvatorini		2	1	6	5		2	7		3	
Globoturborotalita decoraperta (Takayanagi et Saito)	1	1	1		1	4		4	3	4	
Globoturborotalita nepenthes (Todd)	2	2	1	2	1	3		2	2	2	
Globoturborotalita obliquus (Bolli)	9	23	8	18	20	8	4	4	3	13	
Globoturborotalita woodi (Jenkins)	4	11	11	1		17	20	8	27	27	
Hirsutella scitula (Brady)					1						
Menardella cultrata (d'Orbigny)	2	2	2	1	1		1	2			
Menardella praemenardii (Cushman et Stainforth)	2	6	1	1		2	2			2	
Neogloboquadrina acostaensis (Blow) dextral	1		1		1	1					
Neogloboquadrina acostaensis (Blow) sinistral		2	4	2	6	2	3	1		2	
Neogloboquadrina pachyderma (Ehrenberg) dextral	12	2	2	5	10	6	5	3	1	2	
Neogloboquadrina pachyderma (Ehrenberg) sinistral	6	13	38	10	17	22	25	25	5	26	
Neogloboquadrina praeatlantica Foresi, Iaccarino et Salvatorini dextral	11	8	2	9	3	6	3	3	3	5	
Neogloboquadrina praeatlantica Foresi, Iaccarino et Salvatorini sinistral	20	17	43	22	11	28	15	121	33	62	
Neogloboquadrina praehumerosa (Natori) dextral				2	3					1	
Neogloboquadrina praehumerosa (Natori) sinistral	4	5	3		12	6	1	1		2	
Orbulina suturalis Brönnimann	1	1	2			4			1		
Orbulina universa d'Orbigny	1		1								
Sphaeroidenellopsis seminulina (Schwager)	1	2	1		1	1				1	
Sphaeroidenellopsis subdehiscens (Blow)		3	2	6	1	2					
Total number of identified planktonic foraminiferal specimens	223	215	224	162	193	247	186	334	220	310	2
Unidentified specimens of planktonic foraminifera	11	21	41	19	46	5	30	22	18	8	0
Total number of planktonic foraminiferal specimens	234	236	265	181	239	252	216	356	238	318	2
Total number of benthic foraminiferal specimens	316	853	848	435	504	441	310	241	472	325	8
Planktonic foraminiferal number / 1 g dry weight	11.7	33.2	37.2	13	15.9	52.1	172.8	339.1	46.7	131.6	1.6
Benthic foraminiferal number / 1 g dry weight	31.6	120.1	119.2	43.5	50.4	92.3	248	229.6	93	137.5	6.6
Planktonic / Total foraminiferal ratio (%)	27.0	21.7	23.8	23.0	24.0	36.4	41.1	59.6	33.5	49.5	20
Preservation (Very Good, Good, Moderate, Poor, Very Poor)	P	M	M	M	M	M	M	M	P	M	P

日本原子力研究所JRR4気送管（Danhara *et al.*，2003）で，Aoso35C試料は立教大学原子力研究所回転試料棚RSR No.1（Danhara *et al.*，1991）で行われた．測定条件等は第2表の脚注に示したが，詳細はDanhara *et al.*（2003）に述べられている．

4． 年代層序

4. 1 浮遊性有孔虫化石層序

青麻層から採取した計32試料（P1–P32）のうち，11試料から15属40種が産出した（第1表，第5図）．なお，第5図では，有孔虫が産出した試料の層準は柱状図の右に，産出しなかった試料の層準は柱状図の左に分けて示した．岩石乾燥重量1 g中に含まれる浮遊性有孔虫数は平均77.7，最大339.1（試料P15），最小11.7（試料P2）であった．岩石乾燥重量1 g中に含まれる底生有孔虫数は平均116.5，最大248（試料 P14）であった．浮遊性有孔虫の全有孔虫に対する比率（P/T比）は平均34.0，最大59.6（試料P15）であった．全試料を通じて最も多く産出する種は*Globigerina bulloides* d’Orbignyであった（27.4%）．次いで*Neogloboquadrina praeatlantica* Foresi，Iaccarino et Salvatoriniの左巻き個体，*Neogloboquadrina pachyderma*



第5図　青麻セクションの浮遊性有孔虫化石層序．珪藻化石帯とフィッション・トラック年代測定試料（Aoso35C）の採取層準も合わせて示す．試料採取位置は第3図に，浮遊性有孔虫分析結果は第1表に，フィッション・トラックの年代測定結果は第2表に示す．浮遊性有孔虫化石帯はBlow（1969），珪藻化石帯と珪藻生層準はAkiba（1986），Yanagisawa and Akiba（1998）及びWatanabe and Yanagisawa（2005），珪藻区間は本研究による．

Fig. 5　Planktonic foraminiferal biostratigraphy of the Aoso section, with diatom zones and the horizon of the tuff sample for fission-track dating (Aoso35C). Sample locations, the occurrence of planktonic foraminifera in this section and the result of the fission-track dating are shown in Fig. 3, Table 1 and Table 2, respectively. Planktonic foraminiferal zones: Blow (1969). Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998), and Watanabe and Yanagisawa (2005). Diatom interval: this study.

(Ehrenberg)の左巻き個体が産出した．これらの多産する種は温帯から冷温帯に分布中心を持つ．なお，熱帯から亜熱帯表層の指標種とされる*Globigerinoides*属及び*Orbulina*属も平均16.4%と試料全体を通じて産出が見られた．

年代指標種としては，*Globoquadrina dehiscens*が試料P2, P6, p12, P13, P14, P16, P17で認められた．*Globorotalia lenguaensis* Bolliが試料P6及びP11で産出した．*Globoturborotalita decoraperta* (Takayanagi et Saito)は試料P2, P6, P8, P12, P13, P15, P16, P17から，*Globoturborotalita nepenthes* (Todd)は試料P2, P6, P8, P11, P12, P13, P15, P16, P17に含まれていた．一方, *Neogloboquadrina acostaensis* (Blow)は試料P2, P6, P8, P11, P12, P13, P14, P15, P17から産出した．*N. pachyderma*は，P28を除く浮遊性有孔虫が検出された全試料で認められた．これら浮遊性有孔虫年代指標種の層位分布を第5図に，電子顕微鏡写真を図版1に示した．

これらの年代指標種のうち，*N. acostaensis*の初産出はBlow (1969)の浮遊性有孔虫化石帯N.16帯の下限を定義する．最新の年代尺度に基づくと，この初産出には温帯地域で10.57 Maの天文軌道要素校正年代が与えられている(Hilgen *et al.*, 2012)．また，福島県棚倉地域では，この生層準に対し凝灰岩層のK-Ar放射年代測定によって10.6 Maの年代制約が与えられている(Hayashi and Takahashi, 2008)．従って，本研究地域を含む北西太平洋地域でもこの生層準に10.57 Maの天文軌道要素年代を適用することは妥当と考えられ，今回浮遊性有孔虫を検出した区間はそれより上位に相当するものと考えられる．また，200個体以上の浮遊性有孔虫化石を産出した全試料から*N. pachyderma*が産出した．Berggren (1992)はインド洋南部の深海掘削計画(ODP) Site 748及びSite 751で本種の初産出を古地磁気極性C4Ar.1n.5に対応させ，彼の(亜)南極地域の浮遊性有孔虫化石帯AN7帯の基底を定義した．この生層準は最新の年代尺度で天文軌道要素と関連づけられ，9.37 Maの年代値が与えられている(Hilgen *et al.*, 2012)．しかし，本種は両極性分布を示すため，Berggren (1992)が検討した南インド洋と日本周辺のような北半球中緯度地域とは生物地理学的な分布が連続しないと考えられるため，この年代値をそのまま適用することについては慎重にならざるを得ない．ただし，Kennett and Srinivasan (1983)は本種の生存区間をBlow (1969)のN.16帯以降としており，また，栃木県烏山地域や宇都宮地域ではN.16帯に相当する層準から本種の産出が認められるため(林・高橋，2004；林ほか，2008)，本種の初産出をN.16帯と見なすことは日本付近においても概ね妥当と判断される．

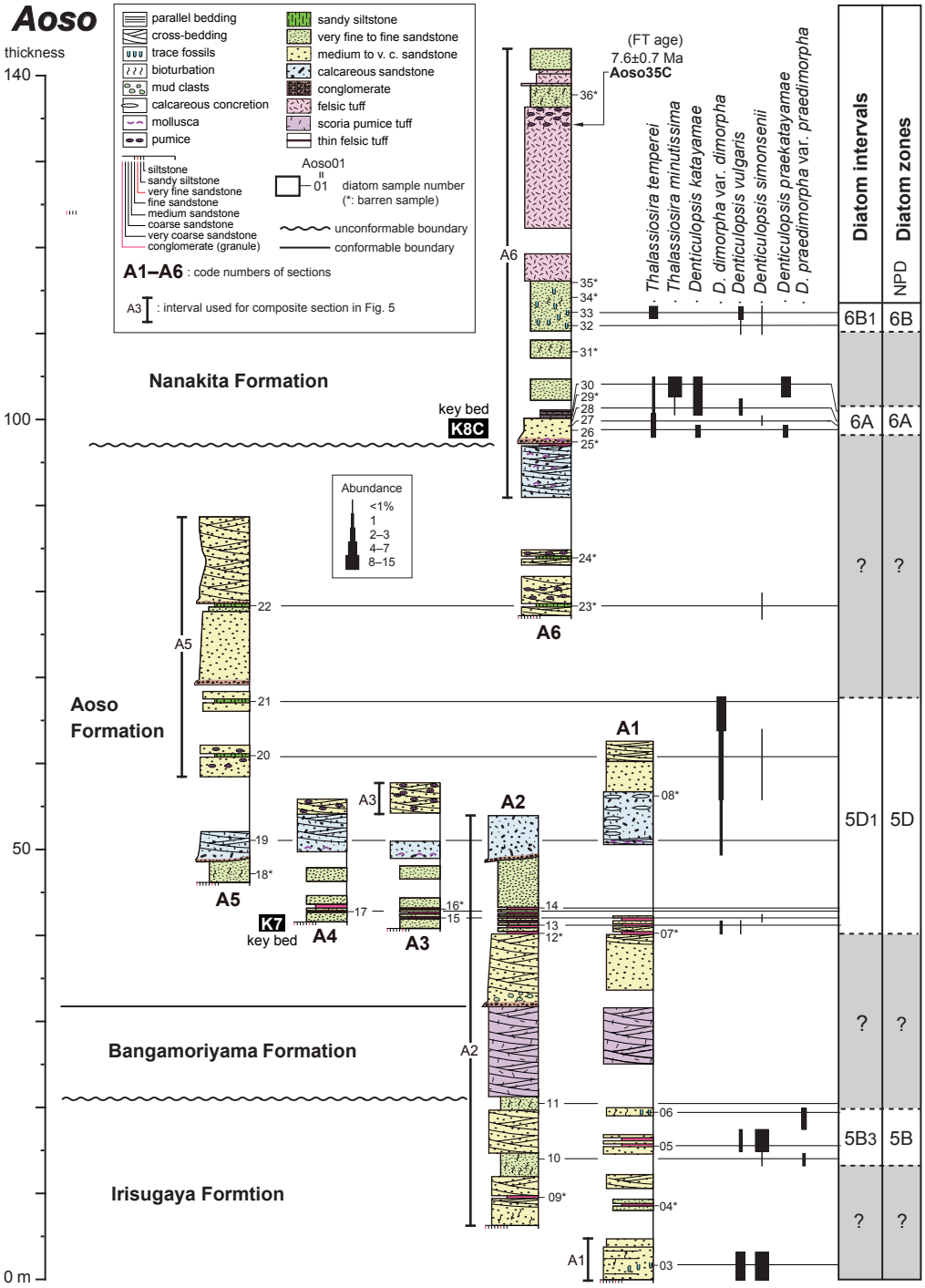
試料P6, P11においては，*G. lenguaensis*も産出している．この種の終産出はBerggren *et al.* (1995)のインド・太平洋地域の浮遊性有孔虫化石帯M14帯の下限を定義し，天文軌道要素年代として6.14 Maの値が与えられている(Hilgen *et al.*, 2012)．従って，本種が産出した2試料は10.57–6.14 Maの間に限定される．ただし，本種は産出試料数・産出個体数ともに少ないため，本研究地域で初産出を厳密に決定することは困難である．

さらに，今回浮遊性有孔虫が200個体以上産出した最上位の試料P17を含む6試料で*G. dehiscens*が産出した．この種の終産出は最新の年代尺度では5.92 Maとされているが(Hilgen *et al.*, 2012)，一方で高緯度地域ほど終産出が早くなる異時性が報告されている(Oda *et al.*, 1984；Hodell and Kennett, 1986；Spencer-Cervato *et al.*, 1994)．Motoyama *et al.* (2004)は，三陸沖ODP Site 1150及びSite 1151でこの生層準の年代を求め，それぞれ9.4–9.6 Ma, 8.4–9.3 Maとしている．この年代値はN.16帯～N.17A亜帯最下部に相当する．従って，本種が産出した試料は少なくとも8.4 Maより古い時代に対比される可能性が高い．以上に基づき，本研究で検討した青麻層の区間は10.57–8.4 Maの区間に限定される．最新の年代尺度(Hilgen *et al.*, 2012)に基づくと，この年代区間はBlow (1969)及びBerggren *et al.* (1995)のN.16帯～N.17A亜帯最下部に相当する．

4. 2　珪藻化石層序

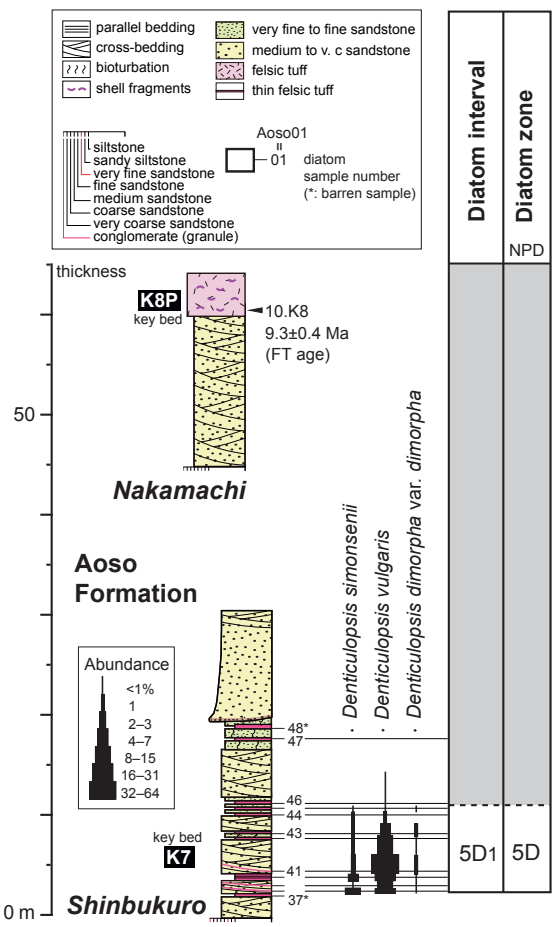
産出した主な珪藻の顕微鏡写真を図版2に，各セクションの珪藻化石分析結果を付表1～3に示す．

青麻セクションでは33試料のうち，入菅谷層の5試料，青麻層の8試料及び七北田層の6試料，合計19試料から珪藻化石が産出した(第6図，付表1)．入菅谷層では珪藻の産出した5試料のうち，試料Aoso10と06から*Denticulopsis praedimorpha* var. *praedimorpha*が，*D. simonsenii*と*D. vulgaris*を伴って産出したので，これら2試料はAkiba (1986)及びYanagisawa and Akiba (1998)のNPD5B帯の上部の生層準D53とD54の間，すなわち区間5B$_3$に位置づけられる．それ以外の3試料については，珪藻化石帯の判定は難しい．青麻層では珪藻化石が産出した8試料のうち，試料Aoso13, 19, 20, 21の4試料からは，*Denticulopsis dimorpha* var. *dimorpha*が産出し，試料Aoso13では*D. vulgaris*が，試料Aoso20では*D. simonsenii*が検出された．しかし，*Denticulopsis praekatayamae*, *D. dimorpha* var. *areolata*及び*D. katayamae*は全く産出しなかった．以上のことから，これら青麻層の4試料は，NPD5D帯下部の生層準D56とD57の間の区間(区間5D$_1$)にあると判定できる．七北田層では，珪藻の産出した試料のうち，試料Aoso26, 28, 30は*D. katayamae*を産出し，*D. dimorpha*を含まないことから，NPD6A帯と認定される．その上位の試料Aoso32と33は，とくに指標種は産出しないものの，NPD6A帯に認定される試料のすぐ上位に位置し，*D. katayamae*も*Thalassionema schraderi*も含まないことから，NPD6B帯最下部の生層準D65とD66の間



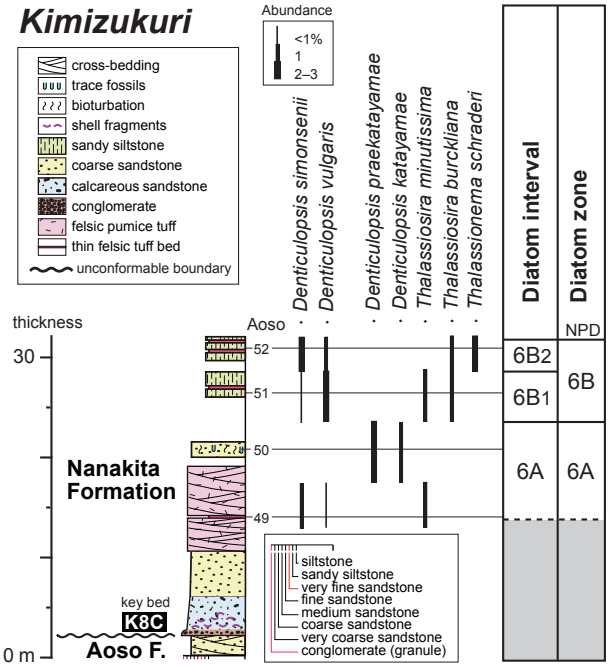
第6図　青麻セクションの珪藻化石層序．試料採取位置は第3図に，珪藻分析結果は付表1に示す．珪藻化石帯と珪藻生層準はAkiba (1986)，Yanagisawa and Akiba (1998) 及びWatanabe and Yanagisawa (2005) による．珪藻区間は本研究による．

Fig. 6　Diatom biostratigraphy of the Aoso section. Sample locations and the occurrence of diatoms in this section are shown in Fig. 3 and Table A1, respectively. Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998), and Watanabe and Yanagisawa (2005). Diatom interval: this study.



第7図　新袋セクションの珪藻化石層序と中町セクションにおけるフィッション・トラック年代測定試料（10.K8）の採取層準．試料採取位置は第4図に，珪藻分析結果は付表2に，フィッション・トラックの年代測定結果は第2表に示す．珪藻化石帯と珪藻生層準はAkiba（1986），Yanagisawa and Akiba（1998）及びWatanabe and Yanagisawa（2005）に，珪藻区間は本研究による．

Fig. 7　Diatom biostratigraphy of the Aoso Formation of the Shinbukuro section, with the horizon of tuff sample for fission track dating (10.K8) in the Nakamachi section. Sample locations, the occurrence of diatoms in this section and a result of fission track dating are shown in Fig. 4, Table A2 and Table 2, respectively. Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998), and Watanabe and Yanagisawa (2005). Diatom interval: this study.



第8図　亀水作セクションにおける七北田層の珪藻化石層序．試料採取位置は第4図に，珪藻分析結果は付表2に示す．珪藻化石帯と珪藻生層準はAkiba（1986），Yanagisawa and Akiba（1998）及びWatanabe and Yanagisawa（2005）に，珪藻区間は本研究による．

Fig. 8　Diatom biostratigraphy of the Nanakita Formation of the Kimizukuri section. Sample locations and the occurrence of diatoms in this section are shown in Fig. 4 and Table A2, respectively. Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998), and Watanabe and Yanagisawa (2005). Diatom interval: this study.

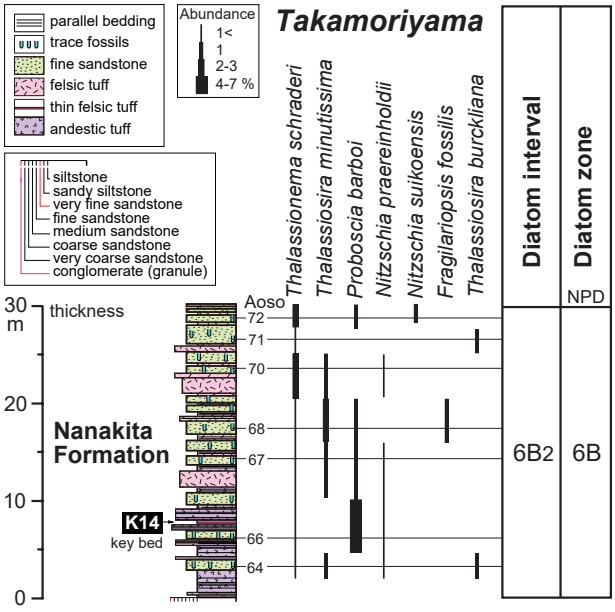
の区間$6B_1$内にあるものと推定できる．

新袋セクションでは，採取した12試料のうち10試料から珪藻化石が検出された（第7図，付表2）．珪藻の産出した試料のうち，試料Aoso38–43, 45は*Denticulopsis dimorpha* var. *dimorpha*，*D. simonsenii*，*D. vulgaris*が産出し，*D. praekatayamae*，*D. dimorpha* var. *areolata*及び*D. katayamae*が見つからないことから，NPD5D帯下部の区間$5D_1$にあると認定される．それ以外の試料については化石帯の判定はできなかった．

亀水作セクションで採取した4試料から珪藻化石が産出した（第8図，付表2）．4試料のうち，試料Aoso50は*D. katayamae*を産出し，*D. dimorpha*を欠くことから，NPD6A帯と認定される．試料Aoso52は*T. schraderi*が産出し，*Nitzschia pliocena*を伴わないので，NPD6B帯の生層準D66とD68の間，すなわち区間$6B_2$と認定できる．その下位の試料51は，指標種を含まないものの，*D. katayamae*も*T. schraderi*も存在しないので，NPD6B帯最下部の区間$6B_1$と判断される．なお，試料Aoso49については化石帯の認定はできない．

高森山セクションでは採取した7試料すべてに珪藻化石が含まれていた（第9図，付表3）．これらの試料は，すべて*T. schraderi*を含み*N. pliocena*を伴わないので，NPD6B帯の区間$6B_2$に属すると判断できる．

以上の各層序セクションの珪藻分析結果を総合すると，各地層の珪藻化石層序と年代は以下のように推定で



第9図　高森山セクションにおける七北田層の珪藻化石層序．試料採取位置は第3図に，珪藻分析結果は付表3に示す．珪藻化石帯と珪藻生層準はAkiba (1986)，Yanagisawa and Akiba (1998) 及びWatanabe and Yanagisawa (2005) に，珪藻区間は本研究による．

Fig. 9　Diatom biostratigraphy of the Nanakita Formation of the Takamoriyama section. Sample locations and the occurrence of diatoms in this section are shown in Fig. 3, Table A3, respectively. Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998), and Watanabe and Yanagisawa (2005). Diatom interval: this study.

きる．入菅谷層のうち，少なくとも上部はNPD5B帯の区間5B$_3$ (12.3–11.6 Ma) に属するが，入菅谷層下部は珪藻化石帯が認定できない．青麻層下部はNPD5D帯の区間5D$_1$ (10.0–9.6 Ma) と認定されるが，本層上部は珪藻化石帯の判定ができない．一方，七北田層については，最下部はNPD6A帯 (9.3–8.7 Ma)，下部はNPD6B帯の区間6B$_1$ (8.7–8.5 Ma)，上部は同じくNPD6B帯の区間6B$_2$ (8.5–7.9 Ma) に対比される．なお，番ヶ森山層については，珪藻分析が可能な試料を採取できなかったため，珪藻化石年代は不明である．

4. 3　フィッション・トラック年代

鍵層K8Pの軽石凝灰岩 (試料10.K8) のジルコンのFT年代として9.3 ± 0.4 Ma（誤差は1σ，以下同様）の値が，七北田層下部の酸性凝灰岩 (試料Aoso35C) のジルコンのFT年代として7.6 ± 0.7 Maの値が得られた (第2表)．以下には，試料ごとの構成結晶状態と測定結果について具体的に述べる．

10. K8試料は，生試料0.50 kg当たり200個と比較的豊富なジルコン結晶 (柱状結晶が主) を含むが，色調と自発FT密度の違いにより2群に大別される．うち10%は赤色の自形～半自形結晶からなり，自発FT密度は1 × 106本/cm^{2}オーダー程度を示す．一方，残り90%は淡褐色～褐色の半自形または破砕状結晶からなり，自発FT密度が赤色のものより数倍程度高い特徴を持つ．両群ともFT長には目立った短縮化傾向は認められない．自発FT密度と年代値との相関 (檀原ほか，2004) から，前者 (赤色結晶群) は中新世の年代が予想され，後者 (褐色結晶群) は古第三紀～中生代の年代が予想される．そのため効率的な年代測定を目指し，測定対象を赤色結晶30粒子に絞ったが，その他の要素による粒子選別は避けた．全測定粒子30個の粒子データは比較的よくまとまるが，χ^2検定には失格する．そのため，χ^2検定に合格まで粒子年代の古い順に除外すると，15 Maより古い2粒子を除外したところでχ^2検定における上側確率 (P(χ^2)) が5%となり合格した．したがって残る28粒子を単一年代集団に属するものとみなし (第10図)，28粒子の加重平均値9.3 ± 0.4 Maを本試料の年代値とした．

Aoso35C試料は，短柱状結晶を主とした自形ジルコン結晶を2000個 / 0.50 kgと豊富に含む．前述の10. K8試料と異なるのは，抽出ジルコン結晶の95%以上が鋭い稜と平滑な結晶面をもつ自形結晶からなることである．しかし粒子の色調は変化に富み，無色に近い淡褐色から濃い赤色を呈するものまでが混在する．平均ウラン濃度が80 ppmと低く，粒子間のウラン濃度に数10倍以上の大きなばらつきがみられるが，粒子の色調との明瞭な対応性は認められない．また測定粒子中のFT長さの短縮化は観察されなかった．そのため測定に際しては，粒径や色調に関係なくランダムに測定対象とした．全測定粒子30個の粒子データは比較的よくまとまるが，χ^2検定には失格する．そのためχ^2検定合格まで粒子年代の古い順に除外すると，18 Maより古い2粒子を除いたところで，P(χ^2)=22% (> 5%) となり合格する．したがって，残る28粒子を単一年代集団に属するものとみなし(第10図)，28粒子の加重平均値 7.6 ± 0.7 Maを本試料の年代値とした．

5．考察

5. 1　統合年代層序

以上の浮遊性有孔虫・珪藻年代層序及びFT年代を総合して，各層の年代を推定する (第11図)．

入菅谷層は，珪藻化石では上部はNPD5B帯の区間5B$_3$ (12.3–11.6 Ma) に対比される．入菅谷層の下部は，年代データはないものの，その層厚からみて，本層全体がNPD5B帯に対比される可能性が高い．

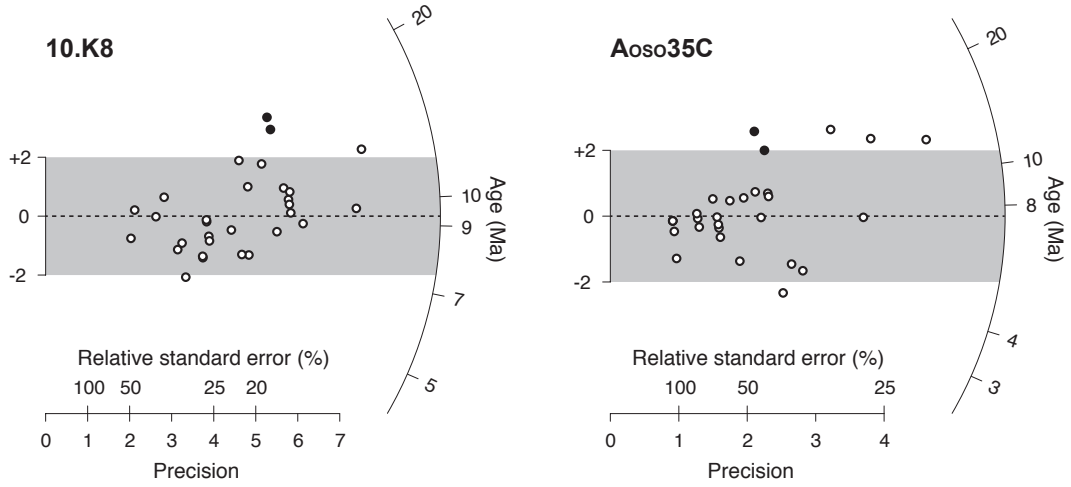
青麻層については，下部から珪藻化石帯のNPD5D帯下部の区間5D$_1$ (10.0–9.6 Ma) に対比される珪藻化石が産出する．また，同じく青麻層下部は，N.16帯～ N.17A亜

第2表　フィッショントラック年代測定の結果.

Table 2　Results of fission track dating of two tuff layers in the study area.

Sample name	No. of grains	Spontaneous ρ_s (cm^{-2})	N_s	Induced ρ_i (cm^{-2})	N_i	Dosimetry ρ_d (cm^{-2})	N_d	Pr(χ^2) (%)	U (ppm)	Age±1σ (Ma)
10.K8 (All)	30	1.21 ×10^6	*916*	3.84 ×10^6	*2899*	8.812 ×10^4	*4512*	0	360	9.7 ± 0.4
(Adopted)	28	1.20 ×10^6	*828*	3.95 ×10^6	*2738*	8.812 ×10^4	*4512*	22	370	9.3 ± 0.4
Aoso35C (All)	30	2.14 ×10^5	*189*	8.57 ×10^5	*759*	8.626 ×10^4	*2208*	1	80	8.0 ± 0.7
(Adopted)	28	2.06 ×10^5	*173*	8.74 ×10^5	*735*	8.626 ×10^4	*2208*	5	80	7.6 ± 0.7

Dating was carried out by the external detector method that applies to external natural surfaces of zircon (ED2). Zeta-calibration values for T. Danhara: ζ_{ED2} = 350±3 for sample 10.K8 using JRR4 reactor with DAP detector (Danhara *et al.*, 2003) or ζ_{ED2} = 372±5 for sample Aoso35C using RSR of Rikkyo University reactor with mica detector (Danhara *et al*., 1991) against NIST SRM612 dosimeter glass. ρ and *N* are the track density and the total number of tracks counted, respectively. Pr(χ^2): the probability of obtaining the χ^2-value for ν degrees of freedom (where ν=number of grains-1) （Galbraith, 1981）. U is average uraniunm content. Ages that passed the χ^2-test after excluding older grains are adopted in this study.



第10図　ラジアルプロットによるフィッショントラック年代測定結果図（10.K8，Aoso35C）．2試料とも古い2粒子を外来粒子とみなし，残る28粒から年代値を計算した．プロットはGalbraith（1990）に基づく．

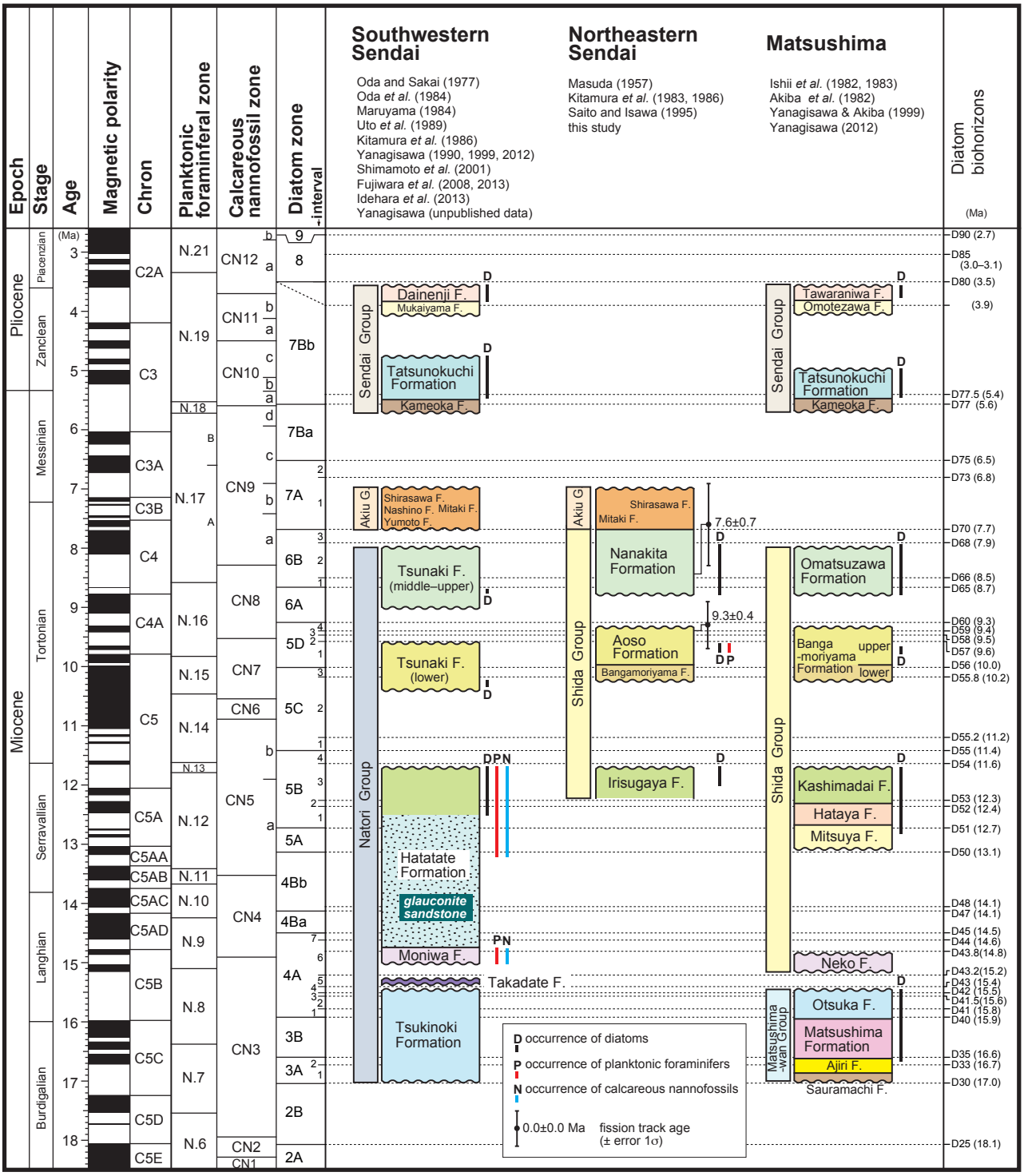
Fig. 10　Radial plot diagram for fission-track data from samples 10.K8 and Aoso35C. Adopted ages are based on the pooled-age calculation for most of grains (open circles) that passed χ^2-test after excluding older ones (closed circles) as a detritus. The radial plot was drawn by Galbraith (1990).

帯最下部に相当する浮遊性有孔虫化石が産出し，産出する種の年代範囲から10.57–8.4 Maの年代区間に相当するものと思われる．さらに，本層最上部の鍵層K8Pの軽石凝灰岩（試料10.K8）のジルコンのFT年代として9.3±0.4 Maが測定された．以上の年代データは相互に矛盾はなく，これらのデータから，青麻層の堆積年代としては最大幅をとっても約10.0–8.9 Ma程度の年代に制約できる．

なお，青麻層の下位の番ヶ森山層については，現在のところ年代を推定するデータはないが，上位の青麻層とは整合の関係にあるので，青麻層よりも少し古い年代が想定される．

七北田層からはNPD6A帯（9.3–8.7 Ma），NPD6B帯の区間6B$_1$（8.7–8.5 Ma）と区間6B$_2$（8.5–7.9 Ma）に対比される珪藻化石が産出している．また，区間6B$_2$（8.5–7.9 Ma）に相当する七北田層下部の層準に挟在する凝灰岩のジルコンのFT年代として7.6±0.7 Maの値が得られた．このFT年代は珪藻年代に比べてやや若いものの，誤差の範囲を考慮すれば，両者は矛盾しない．生層準D65（8.7 Ma）とD66（8.5 Ma）の年代及び本層の層厚から堆積速度曲線を作成し，本研究で検討した層序セクションにおける本層の上限と下限の年代を，堆積速度曲線を外挿して求めると，それぞれ約8.8 Maと7.9 Maとなる．

以上のように，本研究により後期中新世において浮遊性有孔虫化石層序と珪藻化石層序の直接対比し，あわせ



第11図 仙台市北東部及びその周辺に分布する新第三系の年代層序．地磁気極性年代尺度はHilgen *et al.*（2012），浮遊性有孔虫化石帯区分はBlow（1969），石灰質ナノ化石帯区分はOkada and Bukry（1980），珪藻化石帯区分はAkiba（1986），Yanagisawa and Akiba（1998）及びWatanabe and Yanagisawa（2005），及び珪藻区間は本研究による．

Fig. 11 Chronostratigraphy of the Neogene sequence distributed in the northeastern Sendai area and its environs, Miyagi Prefecture, northeastern Japan. Geomagnetic polarity time scale: Hilgen *et al.* (2012); Planktonic foraminiferal zones: Blow (1969) and Berggren *et al.* (1995); Nannofossil zones: Okada and Bukry (1980); Diatom zones: Akiba (1986), Yanagisawa and Akiba (1998) and Watanabe and Yanagisawa (2005); Diatom intervals: this study.

て，微化石年代とFT年代との対応関係を明らかにすることができた．

5. 2　隣接地域の上部中新統との対比

次に本研究の調査地域の東に隣接する松島地域と，南西隣にあたる仙台市南西部に分布する上部中新統との対比を行う（第11図）．

本研究の調査地域の東に隣接する松島地域には，今回研究した上部中新統の志田層群が仙台市北東部地域から連続して分布するが，仙台市北東部地域とは異なる地層区分と地層名が用いられている（石井ほか，1982）．すなわち，松島地域では，志田層群は下位の松島湾層群を不整合に覆い，下位より根古層（凝灰質砂岩），三ッ谷層（斜交層理のある粗粒砂岩），幡谷層（凝灰質砂岩），鹿島台層（塊状細粒砂岩），番ヶ森山層（斜交層理のある粗粒砂岩）及び大松沢層（塊状細粒砂岩）からなる．このうち，松島地域の番ヶ森山層の下部と上部は，仙台市北東部地域の番ヶ森山層と青麻層にそれぞれ連続する．また，松島地域の大松沢層は，仙台市北東部地域の七北田層にそのまま連続する．仙台市北東部地域の入菅谷層は孤立して分布するので，松島地域との直接の岩相対比はできないが，後述する珪藻化石層序から，松島地域の鹿島台層に対比される．

松島地域の志田層群については，秋葉ほか（1982）及び柳沢・秋葉（1999）によって珪藻化石層序が明らかにされている．鹿島台層は珪藻化石区分のNPD5B帯に対比され，入菅谷層に対比される．松島地域の番ヶ森山層上部からはNPD5D帯下部の区間$5D_1$に相当する珪藻化石が報告されており，これは相当する青麻層と全く同じである．また，松島地域の大松沢層からは，NPD6A帯とNPD6B帯の区間$6B_1$と$6B_2$に当たる珪藻群集が産出しており，相当する仙台市北東部地域の七北田層のそれと全く一致する．以上のように，松島地域と仙台市北東部地域の志田層群の珪藻化石層序は，岩相による対比によく一致している．これまで，青麻層の浮遊性有孔虫年代は，松島地域の珪藻化石年代と大きく食い違っていたが，本研究によって明らかにされた青麻層を含む仙台市北東部の志田層群の新たな推定年代は，松島地域の志田層群の年代と非常によく一致し，従来存在した年代の不一致は解消された．

本調査地域の南西隣にあたる仙台市南西部には，志田層群に相当する名取層群上部が分布する（北村ほか，1986）．仙台市南西部地域で，志田層群に相当するのは，名取層群の茂庭層（石灰質砂岩），旗立層（塊状細粒砂岩及びシルト岩）と綱木層（凝灰質砂岩）である．

名取層群とその上位の秋保層群及び仙台層群については，各種微化石層序及び放射年代値が数多く報告されている（尾田・酒井，1977；Oda *et al.*，1984；Maruyama, 1984；宇都ほか，1989；柳沢，1990，1999，2012；島本ほか，2001；Fujiwara *et al.*，2008；藤原ほか，2013；出原ほか，2013）．それに基づくと，仙台市南西部の旗立層はNPD5B帯の珪藻化石を産出することから（Maruyama, 1984；柳沢，1999），仙台市北東部の入菅谷層に確実に対比される．綱木層については，下部と中上部の2つのユニットに区分され，両者の間に不整合が存在する可能性が指摘されている（Fujiwara *et al.*，2008；藤原ほか, 2013）．綱木層では多くのFT年代が測定されて，綱木層全体としての堆積年代がおよそ10 Maから8 Ma前後に及ぶことが判明している（Fujiwara *et al.*，2008）．しかし，測定年代値のばらつきが大きく，また微化石の報告もないので，2つのユニットとその間の時間間隙の正確な年代を推定することは現状では困難である．ただし，綱木層下部では一部でNPD5C帯の区間$5C_2$を示す珪藻化石が，また綱木層中部でNPD6A帯の珪藻化石が産出する（柳沢，未公表資料）．これに基づくと，綱木層下部は，仙台市北東部の番ヶ山森山層と青麻層を合わせたものに，そして綱木層中上部は七北田層に対比するのが妥当であろう．

以上のように，本研究によってこれまで研究を進める上で障害となっていた青麻層と周辺地域の上部中新統の年代の不一致・矛盾をほぼ解消することができた．

5. 3　浮遊性有孔虫層序の問題点と課題

青麻層の浮遊性有孔虫層序を検討したSaito and Isawa（1995）と本研究の結果を比較するために，Saito and Isawa（1995）の浮遊性有孔虫産出地点（AOS30–67）の層準を，岩相及び地質構造に基づいて本研究の青麻セクションの柱状図に対比し，その上でSaito and Isawa（1995）で示された化石帯指標種の産出状況を第5図の右側に示した．また，Fujiwara（1992）の記述に基づいて，浮遊性有孔虫が産出したHorizon1（H1）の結果も合わせて第5図に示した．

Saito and Isawa（1995）は*Neogloboquadrina acostaensis*（Blow），*Globorotalia plesiotumida* Blow et Banner, *Pulleniatina primalis* Banner et Blowの3種の共存に基づき，青麻層をBlow（1969）及びBerggren *et al.*（1995）の浮遊性有孔虫化石帯N.17B亜帯（6.60–5.72 Ma；Hilgen *et al.*，2012）に対比した．また，Fujiwara（1992）も，鍵層K7の約10 m上位のHorizon1（H1）から*G. plesiotumida*と*Pulleniatina* sp.が産出することを根拠に青麻層をN.17B亜帯に対比した．これらの種のうち，本研究においてその産出が追認されたのは*N. acostaensis*のみであった．

一方，初産出がN.17B亜帯の下限を定義する*P. primalis*については，本研究では追認できなかった．Saito and Isawa（1995）においても試料AOS66から2個体のみの産出であり，また標本が写真図版で示されていないため，現在ではその産出の妥当性を検証できない．しかし，本研究では，彼らが本種を検出した試料AOS66や，

Fujiwara（1992）が*Pulleniatina* sp. の産出を報告しているH1の層準を含む青麻層下部で，200 ～ 300個体以上の浮遊性有孔虫個体を同定したにもかかわらず，本種は得られなかった．また，*P. primalis*の産出年代は，青麻層の珪藻化石年代や周辺地域の年代層序学的データと大きく食い違うことから，Saito and Isawa（1995）が報告した*P. primalis*には誤認の可能性が考えられる．

一方で，彼らはその初産出がBlow（1969）のN.17帯の下限を定義する*G. plesiotumida*の産出を5試料から報告し，そのうち2試料から3個体の電子顕微鏡写真を図版に示している（彼らのPlate 1，figs. 1–4）．それらの個体のうち，試料AOS53から産出した“a small specimen”（彼らのPlate 1，figs. 3，4）は非常に小型であるため，祖先種の*Globorotalia merotumida* Blow et Bannerとする方が妥当と考えられる．また，試料AOS67からの個体（彼らのPlate 1，fig. 2）は臍側面のみの図示であるため，種の特徴を判別できない．一方で，試料AOS53から産出した彼らのPlate 1，fig. 1の個体は，より強い卵形（ovate）の外形を有し，また最終室の形状が幅と高さの比率で高さの方が大きいという形態的特徴から，*G. plesiotumida*と同定できると考えられる．本研究ではSaito and Isawa（1995）より多数の浮遊性有孔虫個体を同定したにも関わらず，本種の産出を追認できなかったが，彼らの図版の確認により，少なくとも彼らの試料AOS53は*G. plesiotumida* を含み，N.17帯に達する可能性を留保する．本種が産出した層準は珪藻化石帯NPD5D帯に含まれており（第5図），珪藻化石の示す年代の方が少なくとも約0.7 Ma古くなる．この不一致が北西太平洋地域で普遍的に見られるものかどうかについては，今後の課題である．

6．結論

宮城県仙台市宮城野区岩切の志田層群青麻層模式地及びその周辺において，浮遊性有孔虫化石年代を検討した結果，青麻層はBlow（1969）及びBerggren *et al.*（1995）の浮遊性有孔虫化石帯N.16帯 ～ N.17A亜帯最下部（10.57–8.4 Ma）に限定される．また，珪藻化石を検討した結果，入菅谷層はYanagisawa and Akiba（1998）の珪藻化石帯NPD5B帯（12.7–11.4 Ma）に，青麻層はNPD5D帯（10.0–9.3 Ma）に，七北田層下部はNPD6A帯（9.3–8.7 Ma）及びNPD6B帯（8.7–7.7 Ma）にそれぞれ対比される．青麻層最上部の軽石凝灰岩からは9.3 ± 0.4 Ma，七北田層下部の酸性凝灰岩からは7.6 ± 0.7 MaのジルコンFT年代が得られた．これら微化石層序及びFT年代は相互に矛盾せず，また，東側に隣接する松島地域における志田層群の珪藻化石層序や，西側に隣接する仙台市南東部地域の名取層群や秋保層群の年代層序とも整合的である．

一方で，先行研究のSaito and Isawa（1995）が青麻層から報告した*G. plesiotumida*の産出と，それに基づいて指摘された青麻層中にN.17帯（8.58–5.57 Ma）に相当する区間が含まれる可能性は依然として留保される．珪藻化石との不一致が北西太平洋地域で普遍的に見られるものかどうかについては，今後の課題である．

謝辞：本研究は筆頭著者（鈴木）の島根大学総合理工学部地球資源環境学科卒業研究として実施された．島根大学大学院総合理工学研究科の入月俊明教授には貝形虫化石を検鏡して頂き，また，堆積環境について議論して頂いた．産業技術総合研究所地質情報研究部門の田中裕一郎博士には，年代指標種の検出には至らなかったものの，青麻層で採取した試料について石灰質ナンノ化石の検討をして頂いた．本研究経費の一部に科研費（基盤(C)，15K05311）を用いた．査読者の中嶋　健博士，担当編集幹事の本山　功博士，及び編集委員会からのご助言により本原稿は改善された．以上の方々及び関係諸機関に，記して心から感謝申し上げる．

著者の執筆分担：鈴木は，総括，地質調査と浮遊性有孔虫試料採取（2015 ～ 2016年），浮遊性有孔虫分析，作図，論文執筆を担当した．林は，地質調査と浮遊性有孔虫試料採取（2004，2015年），浮遊性有孔虫分類，論文執筆を担当した．柳沢は，地質調査と珪藻試料採取（1996，2001，2003年），珪藻分析，作図，論文執筆を担当した．藤原は，地質調査（1990 ～ 1991年），地質図作成，FT年代測定試料採取（2003年），論文執筆を担当した．檀原は，FT年代測定試料採取（2003年），FT年代測定，作図，論文執筆を担当した．

文　献

Akiba, F.（1986）Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific. *In* Kagami, H., Karig, D. E., Coulbourn, W. T., *et al.*, *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **87**, 393–480.

秋葉文雄・柳沢幸夫・石井武政（1982）宮城県松島周辺に分布する新第三系の珪藻化石層序．地調月報，**33**, 215–239.

浅野裕一（1996）宮城県大和町産の後期中新世サイ上科臼歯化石．地球科学，**50**, 66–69.

Barron, J. A. and Baldauf, J. G.（1990）Development of biosiliceous sedimentation in the North Pacific during the Miocene and early Pliocene. *In* Tsuchi, R., ed., *Pacific Neogene Events*, University of Tokyo Press, Tokyo, 43–63.

Berggren, W. A.（1992）Neogene planktonic foraminifer magnetobiostratigraphy of the southern Kerguelen

Plateau (Sites 747, 748 and 751). *Proc. ODP., Sci. Results*., **120**, 631–647.

Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, C. C. III and Aubry, M.-P. (1995) A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. *In* Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. P. and Hardenbol, J., eds., *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*. *SEPM Special Publication*, **54**, 129–212.

Blow, W. H. (1969) Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. *In* Brönnimann, P. and Renz, H. R., eds., *Proceedings of First International Conference of Planktonic Microfossils*, *Geneva*, 1967, **1**, 199–422.

Danhara, T., Kasuya, M., Iwano, H. and Yamashita, T. (1991) Fission-track age calibration using internal and external surfaces of zircon. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **97**, 977–985.

Danhara, T., Iwano, H., Yoshioka, T. and Tsuruta, T. (2003) Zeta calibration values for fission track dating with a diallyl phthalate detector. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **109**, 665–668.

檀原　徹・岩野英樹・加藤　進・松井良一（2004）ジルコンFT年代測定における試料評価と測定値の解釈. 石油技誌，**69**，200–213.

Fujiwara, O. (1992) A new species of *Halicardia* (Bivalvia) from the late Miocene of Miyagi Prefecture, Northeast Honshu, Japan. *Saito Ho-on Kai Mus. Nat. Hist. Res. Bull*., no. 60, 9–21.

Fujiwara, O., Yanagisawa, Y., Irizuki, T., Shimamoto, M., Hayashi, H., Danhara, T., Fuse, K. and Iwano, H. (2008) Chronological data for the Middle Miocene to Pliocene sequence around the southwestern Sendai Plain, with special reference to the uplift history of the Ou Backbone Range. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **59**, 423–438.

藤原　治・鈴木紀毅・林　広樹・入月俊明（2013）　仙台市南西部に分布する東北日本太平洋側標準層序としての中・上部中新統および鮮新統．地質雑，**119** 補遺，96–119.

Galbraith R. F. (1981) On statistical models for fission track counts. *Math. Geol*. **13**, 471–478.

Galbraith R. F. (1990) The radial plot: Graphical assessment of spread in ages. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **17**, 207–214.

Hanzawa, S., Hatai, K., Iwai, J., Kitamura, N. and Shibata, T. (1953) The Geology of Sendai and its Environs. *Sci. Repts. Tohoku Univ, 2nd Ser. (Geol.)*, **25**, 1–50.

林　広樹・高橋雅紀（2004）栃木県烏山地域に分布する中新統荒川層群上部の浮遊性有孔虫生層序．地質雑，**110**，85–92.

Hayashi, H. and Takahashi, M. (2008) Numerical age of the planktonic foraminiferal zonal boundary between N.15 and N.16 in the mid-latitude northwest Pacific region. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **59**, 415–422.

林　広樹・田中裕一郎・渡辺真人・青島睦治（2008）栃木県中央部，宇都宮地域の鬼怒川河岸に露出する中新統の微化石年代．地質雑，**114**，141–144.

Hilgen, F. J., Lourens, L. J. and Van Dam, J. A. (2012) The Neogene Period, *In* Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier, 923–978.

Hodell, D. A. and Kennett, J. P. (1986) Late Miocene–early Pliocene stratigraphy and paleoceanography of the South Atlantic and southwest Pacific Oceans: a synthesis. *Paleoceanography*, **1**, 285–311.

Hurford, A. J. (1990a) Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommission of Geochronology. *Chem. Geol*., **80**, 171–178.

Hurford, A. J. (1990b) International Union of Geological Sciences Subcommission on Geochronology recommendation for the standardization of fission-track dating calibration and data reporting. *Nucl. Tracks Radiat. Meas*., **17**, 233–236.

石井武政・柳沢幸夫・山口昇一・寒川　旭・松野久也（1982）松島地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，121p.

石井武政・柳沢幸夫・山口昇一（1983）　塩竈地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，112p.

出原祐樹・林　広樹・藤原　治・熊澤大輔・入月俊明（2013）仙台市名取川ルートの中部中新統旗立層における浮遊性有孔虫化石群集の層位変化．化石，no. 94, 5–18.

Kennett, J. P. and Srinivasan, M. S. (1983) *Neogene Planktonic Foraminifera*. Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, 265p.

北村　信・大沢　穠・中川久夫（1983）吉岡地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，50p.

北村　信・石井武政・寒川　旭・中川久夫（1986）仙台地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，134p.

甲能直樹・高泉幸浩（1992）北西太平洋から初めてのハリテリウム亜科の海牛（Sirenia: Dugongidae）の産出．化石，**53**，1–6.

甲能直樹・上野輝彌・加藤久佳・佐々木　隆・デイビス，P. G.（1997）仙台北部の上部中新統青麻層の古脊椎動物相．日本古生物学会1997年年会予稿集，61.

今田　正・植田良夫（1980）　東北地方の第三紀火山岩のK-Ar年代．岩鉱，特別号，**2**, 343–346.

Maruyama, T. (1984) Miocene diatom biostratigraphy of

onshore sequences on the Pacific side of northeast Japan, with reference to SDSP Hole 438A (Part 2). *Sci. Repts. Tohoku Univ., 2nd Ser. (Geol.)*, **55**, 77–140.

増田孝一郎（1957）仙台北部，七北田層下部についての一考察．地質雑，**63**，704–710.

Motoyama, I., Niitsuma, N., Maruyama, T., Hayashi, H., Kamikuri, S., Shiono, M., Kanamatsu, T., Aoki, K., Morishita, C., Hagino, K., Nishi, H. and Oda, M. (2004) Middle Miocene to Pleistocene magneto – biostratigraphy of ODP Sites 1150 and 1151, northwest Pacific: Sedimentation rate and updated reginal geological timescale. *Island Arc*, **13**, 289–305.

Nakamura, M. (1940) On some Pectinidae fossils from the Miocene deposits of the Tomiya Block, Miyagi-ken, northeast Honsyu, Japan. *Japanese Jour. Geol. Geography*, **17**, 1–15.

尾田太良・酒井豊三郎(1977)　旗立層中・上部の微化石層序―浮遊性有孔虫・放散虫―．藤岡一男教授退官記念論文集，441–456.

Oda, M., Hasegawa, S., Honda, N., Maruyama, T. and Funayama, M. (1984) Integrated biostratigraphy of planktonic foraminifera, calcareous nannofossils, radiolarians and diatoms of middle and upper Miocene sequences of central and northeast Honshu, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **46**, 53–69.

Okada, H., and Bukry, D. (1980) Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation (Bukry, 1973; 1975). *Mar. Micropaleontol*., **5**, 321–325.

Saito, T. and Isawa, T. (1995) Planktonic foraminifers of Late Miocene age (zone N. 17) from the Aoso Formation of Sendai City, northeastern Honsyu, Japan. *Saito Ho-on Kai Mus. Nat. Hist., Res. Bull*., no. 63, 9–23.

島本昌憲・太田　聡・林　広樹・佐々木　理・斎藤常正(2001)　仙台市南西部に分布する中新統旗立層浮遊性有孔虫層序．地質雑，**107**, 258–269.

Spencer-Cervato, C., Thierstein, H. R., Lazarus, D. B. and Beckmann, J. –P. (1994) How synchronous are Neogene marine plankton events? *Paleoceanography*, **9**, 739–763.

宇都浩三・柴田　賢・内海　茂(1989) 東北日本新第三紀火山岩のK-Ar年代－その1.　宮城県仙台地域三滝層および高館層－．地質雑，**95**，865–872.

Watanabe, M. and Yanagisawa, Y. (2005) Refined Early Miocene to Middle Miocene diatom biochronology for the middle- to high-latitude North Pacific. *Island Arc,* **14**, 91–101.

山崎　誠・堂満華子(2013)　試料処理と標本の作製 有孔虫・貝形虫．尾田太良・佐藤時幸(編)，新版微化石研究マニュアル，朝倉書店，22–23.

柳沢幸夫(1990)　仙台層群の地質時代―珪藻化石層序による再検討－．地調月報，**41**, 1–25.

柳沢幸夫(1999)　仙台市西部に分布する中部中新統旗立層の珪藻化石層序．地調月報，**50**，269–278.

柳沢幸夫(2012)　岩手県，宮城県及び福島県北部から産出した束柱類の地質年代．地質調査総合センター研究資料集，no. 550，1–25.

Yanagisawa, Y. and Akiba, F. (1998) Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **104**, 395–414.

柳沢幸夫・秋葉文雄（1999）　松島地域の中新世珪藻化石層序の再検討．地調月報，**50**，431–448.

吉田真見子・立石雅昭（2003）　宮城県仙台北方の上部中新統番ヶ森山層，青麻層の海流堆積相．堆積学研究，no. 56，27–39.

（ 受 付：2017年12月19日； 受 理：2018年9月18日 ）

付表1　青麻セクションから産出した珪藻化石.

Table A1　Occurrence chart of diatoms in the Aoso section.

Section	Aoso section																	
Formation	Irisugaya Formation					Aoso Formation								Nanakita Formation				
Sample number (Aoso)	03	10	05	06	11	13	15	17	14	19	20	21	22	26	27	28	30	32	33
Diatom zones (NPD)	?	5B	?	5B	?	5D	?	?	?	5D	5D	5D	?	6A	?	6A	6A	6B	6B
Diatom intervals	?	5B3	?	5B3	?	5D1	?	?	?	5D1	5D1	5D1	?	6A	?	6A	6A	6B1	6B1
Preservation	P	P	M	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	M	P	M
Abundance	C	R	C	R	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	C
Actinocyclus ellipticus Grunow	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	+	-	-	-
A. ingens f. *ingens* (Rattray) Whiting et Schrader	3	11	12	16	14	2	1	2	2	1	5	11	8	1	3	1	1	1	2
A. ingens f. *nodus* (Baldauf) Whiting et Schrader	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A. ingens f. *planus* Whiting et Schrader	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Actinoptychus senarius (Ehr.) Ehr.	3	4	26	5	3	3	4	6	6	-	2	-	-	-	+	2	2	1	2
Arachnoidiscus spp.	-	-	-	2	+	-	+	+	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-
Azpeitia endoi (Kanaya) P.A.Sims et G.A.Fryxell	1	-	3	-	-	1	-	-	+	-	-	-	-	1	3	-	2	-	4
A. vetustissima (Pant.) P.A.Sims	+	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2
Cavitatus jouseanus (Sheshukova) D.M.Williams	-	-	+	-	-	-	-	2	-	-	-	1	-	-	-	-	+	-	-
C. miocenicus (Schrader) Akiba et Yanagisawa	+	-	-	+	-	1	-	-	1	-	-	-	+	-	1	-	-	1	-
Cocconeis scutellum Ehr.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	2	-	-
C. vitrea Brun	-	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coscinodiscus marginatus Ehr.	2	14	5	12	6	2	11	22	3	2	1	3	6	13	5	1	1	3	3
C. radiatus Ehr.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
C. spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cladogramma dubium Lohman	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clavicula polymorpha Grunow et Pant.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Crucidenticula kanayae var. *kanayae* Akiba et Yanagisawa	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Delphineis surirella (Ehr.) G.W.Andrews	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
Denticulopsis hyalina (Schrader) Simonsen	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
D. ichikawae Yanagisawa et Akiba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
D. lauta (Bailey) Simonsen	-	-	-	1	-	-	+	1	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
D. praedimorpha var. *minor* Yanagisawa et Akiba	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D. praedimorpha var. *praedimorpha* Barron ex Akiba	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D. dimorpha var. *dimorpha* (Schrader) Simonsen	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	1	3	-	-	-	-	-	-	-
(Closed copula)	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
D. crassa Yanagisawa et Akiba	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
D. simonsenii Yanagisawa et Akiba	14	+	9	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+
D. vulgaris (Okuno) Yanagisawa et Akiba	6	-	1	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	+	2
D. praekatayamae Yanagisawa et Akiba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	3	-	-
D. katayamae Maruyama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	3	4	-	-
S-type girdle view of *D. simonsenii* group	7	-	4	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
D-type girdle view of *D. simonsenii* group	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	2	-	-
Diploneis smithii (Bréb.) Cleve	-	-	-	-	+	-	4	1	-	1	-	-	2	1	-	-	-	1	-
Eucampia sp. A (= *Hemiaulus polymorphus* Grunow)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Grammatophora spp.	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+
Hyalodiscus obsoletus Sheshukova	1	1	1	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	1	-	2	-	2	1
Ikebea tenuis (Brun) Akiba	2	2	12	-	-	+	+	-	+	-	-	1	-	6	9	33	13	-	-
Koizumia adaroi (Azpeitia) Yanagisawa	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Melosira sol (Ehr.) Kützing	-	2	-	-	-	2	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Navicula hennedyii W.Smith	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Nitzschia heteropolica Schrader	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Nitzschia praereinholdii Schrader	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Nitzschia rolandii Schrader emend. Koizumi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Odontella aurita (Lyngb.) J.A.Agardh	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	+
Paralia sulcata (Ehr.) Cleve	2	17	+	33	10	7	8	10	31	9	7	9	11	14	16	10	2	56	50
Plagiogramma staurophorum (Greg.) Heib.	-	1	-	-	-	-	3	+	1	-	-	1	-	-	-	-	-	3	-
Proboscia alata (Bright.) Sundström	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
Proboscia barboi (Brun) Jordan et Priddle	-	-	+	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Pterotheca subulata Grunow	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rhaphoneis amphiceros Ehr.	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rhizosolenia hebetata f. *hiemalis* Gran	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R. styliformis Brightw.	1	-	-	1	3	-	-	-	-	-	-	-	1	+	-	2	-	-	2
Rouxia californica Perag.	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
R. peragari Brun et Hérib.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stellarima microtrias (Ehr.) Hasle et P.A.Sims	3	-	+	1	-	-	-	6	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	2
Stephanogonia hanzawae Kanaya	-	-	-	-	3	-	1	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	1	-
Stephanopyxis spp.	6	45	7	21	54	6	22	16	5	10	10	13	9	4	5	2	1	3	+
Thalassionema hirosakiensis (Kanaya) Schrader	3	-	+	-	-	1	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
T. nitzschioides (Grunow) H.Perag. et Perag.	43	+	17	1	6	73	43	30	43	16	11	6	7	48	52	37	36	27	25
Thalassiosira grunowii Akiba et Yanagisawa	+	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T. leptopus (Grunow) Hasle et G.A.Fryxell	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T. manifesta Sheshukova	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
T. minutissima Oreshkina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	13	-	-
T. temperei (Brun) Akiba et Yanagisawa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	1	1	-	4
T. cf. *yabei* (Kanaya) Akiba et Yanagisawa	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T. spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	13	-	-
Thalassiothrix longissima Cleve et Grunow	-	+	1	-	1	+	-	-	1	-	-	-	+	+	2	-	-	1	+
Trochosira spinosa Kitton	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total number of valves counted	100	100	100	100	100	100	100	100	100	52	40	50	50	100	100	100	100	100	100
Resting spore of *Chaetoceros*	23	44	82	10	16	39	11	3	18	4	9	8	6	270	820	300	615	134	256

Preservation, G: good; M: moderate; P: poor. Abundance, A: abundant; C: common; R: rare

付表2　新袋及び亀水作セクションから産出した珪藻化石.

Tabel A2　Occurrence chart of diatoms in the Shinbukuro and Kimizukuri sections.

Sections	Shinbukuro section										Kimizukuri			
Formation	Aoso Formation										Nanakita F.			
Sample number (Aoso)	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	49	50	51	52
Diatom zones (NPD)	5D	5D	5D	5D	5D	5D	?	5D	?	?	?	6A	6B	6B
Diatom intervals	5D1	5D1	5D1	5D1	5D1	5D1	?	5D1	?	?	?	6A	6B1	6B2
Preservation	G	G	G	G	G	G	M	M	M	P	P	P	P	M
Abundance	A	A	A	A	A	A	C	C	R	R	R	R	R	C
Actinocyclus ellipticus Grunow	-	+	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
A. ingens f. *ingens* (Rattray) Whiting et Schrader	-	+	-	+	-	1	+	1	4	-	3	10	3	-
Actinoptychus senarius (Ehr.) Ehr.	1	+	-	2	1	+	3	-	13	-	1	3	12	9
Adoneis pacifica G.W.Andrews et Rivera	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-
Arachnoidiscus spp.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Azpetia nodulifera (A.W.F.Schmidt) G.A.Fryxell et P.A.Sims	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
A. vetustissima (Pant.) P.A.Sims	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Cavitatus jouseanus (Sheshukova) D.M.Williams	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
C. miocenicus (Schrader) Akiba et Yanagisawa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Cocconeis californica Grunow	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	1
C. costata Greg.	-	-	-	1	-	-	-	-	+	-	-	-	1	+
C. scutellum Ehr.	-	-	+	-	+	1	1	-	-	-	-	-	+	+
C. vitrea Brun	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	2	-	1
Coscinodiscus marginatus Ehr.	-	+	-	-	1	+	1	2	2	+	5	2	12	1
Cladogramma dubium Lohman	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Delphineis surirella (Ehr.) G.W.Andrews	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	1	2	1
Denticulopsis lauta (Bailey) Simonsen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
D. praelauta Akiba et Koizumi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
D. dimorpha var. *dimorpha* (Schrader) Simonsen	+	+	+	1	+	1	-	-	-	-	-	-	-	-
(Closed copula)	1	-	-	-	+	-	-	1	-	-	-	-	-	-
D. simonsenii Yanagisawa et Akiba	6	+	4	2	1	1	1	+	-	-	1	-	+	2
D. vulgaris (Okuno) Yanagisawa et Akiba	16	7	13	24	9	6	1	+	+	-	+	-	1	1
D. praekatayamae Yanagisawa et Akiba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
D. katayamae Maruyama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
S-type girdle view of *D. simonsenii* group	15	7	12	18	1	1	-	-	-	-	+	+	1	-
Diploneis smithii (Bréb.) Cleve	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	1	-
Eucampia sp. A (= *Hemiaulus polymorphus* Grunow)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2
Goniothecium rogersii Ehr.	-	-	-	-	-	-	-	1	2	+	-	-	-	-
Grammatophora spp.	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	1	2	-	2
Hyalodiscus obsoletus Sheshukova	-	+	-	-	-	+	2	+	+	1	-	-	2	2
Ikebea tenuis (Brun) Akiba	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	1	+
Koizumia adaroi (Azpeitia) Yanagisawa	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	4	-	-	-
Melosira sol (Ehr.) Kützing	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Nitzschia grunowii Hasle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
N. heteropolica Schrader	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N. porteri Frenguelli	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
N. praereinholdii Schrader	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-
Odontella aurita (Lyngb.) J.A.Agardh	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
Paralia sulcata (Ehr.) Cleve	3	2	4	+	2	+	13	2	12	7	11	37	17	10
Plagiogramma staurophorum (Greg.) Heib.	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	2	-
Proboscia barboi (Brun) Jordan et Priddle	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	4	-	3	4
Pterotheca subulata Grunow	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Rhizosolenia hebetata f. *hiemalis* Gran	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
R. miocenica Schrader	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	1	-	-
R. styliformis Brightw.	-	-	-	-	-	-	-	1	3	-	1	-	1	-
Rouxia californica Perag.	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	1
Stellarima microtrias (Ehr.) Hasle et P.A.Sims	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	+
Stephanogonia hanzawae Kanaya	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stephanopyxis spp.	-	+	-	-	-	-	1	-	-	+	3	5	7	1
Thalassionema hirosakiensis (Kanaya) Schrader	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T. nitzschioides (Grunow) H.Perag. et Perag.	59	82	61	51	85	87	75	92	63	92	54	26	23	50
T. schraderi Akiba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Thalassiosira burckliana Schrader	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
T. grunowii Akiba et Yanagisawa	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T. leptopus (Grunow) Hasle et G.A.Fryxell	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	2	1	-	-
T. manifesta Sheshukova	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	+
T. minutissima Oreshkina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-
T. spp.	+	1	4	+	+	1	-	-	-	-	-	-	-	+
Thalassiothrix longissima Cleve et Grunow	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	1	+	-	2
Total number of valves counted	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Resting spore of Chaetoceros	56	17	17	24	110	13	58	20	243	239	32	98	178	66

Preservation, G: good; M: moderate; P: poor. Abundance, A: abundant; C: common; R: rare.

付表3　高森山セクションから産出した珪藻化石.

Table A3　Occurrence chart of diatoms in the Takamoriyama section.

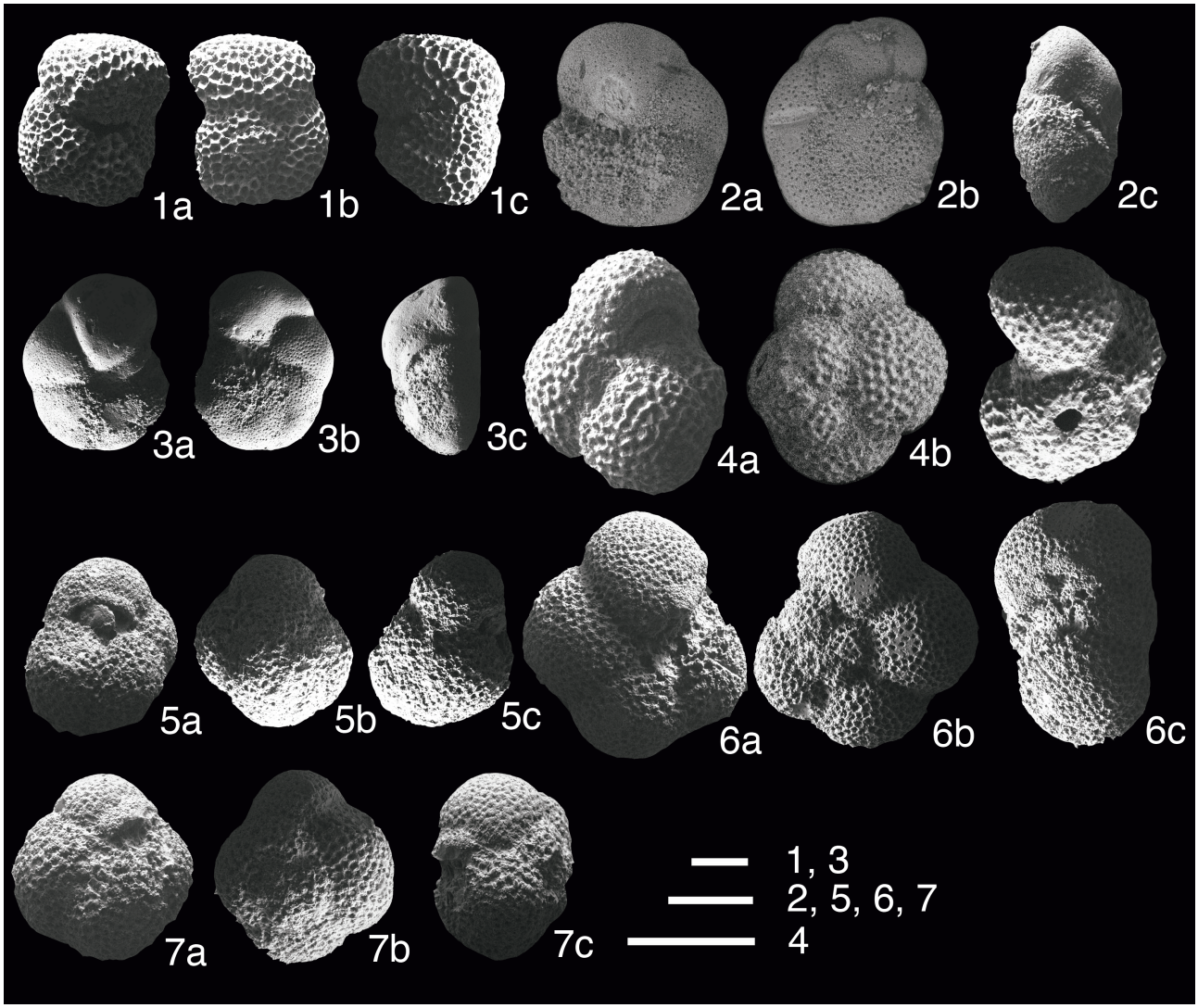
Section	Takamoriyama section						
Formation	Nanakita Formation						
Diatom zones (NPD)	6B	6B	6B	6B	6B	6B	6B
Diatom intervals	6B2	6B2	6B2	6B2	6B2	6B2	6B2
Sample number (Aoso)	64	66	67	68	70	71	72
Preservation	P	M	P	P	P	P	P
Abundance	R	R	R	R	C	R	R
Actinocyclus ellipticus Grunow	2	2	-	-	1	4	-
A. ingens f. *ingens* (Rattray) Whiting et Schrader	-	-	-	-	2	-	-
A. spp.	2	-	-	3	2	1	-
Actinoptychus senarius (Ehr.) Ehr.	10	7	10	13	9	16	4
A. vulgaris Schum.	-	-	-	1	-	-	-
Arachnoidiscus spp.	1	-	-	-	-	-	-
Aulacoseira spp.	1	-	-	-	3	-	-
Azpetia nodulifera (A.W.F.Schmidt) G.A.Fryxell et P.A.Sims	-	1	-	1	1	-	-
A. vetustissima (Pant.) P.A.Sims	-	1	-	-	-	4	-
Cavitatus jouseanus (Sheshukova) D.M.Williams	-	-	-	+	+	-	-
C. miocenicus (Schrader) Akiba et Yanagisawa	-	4	-	-	+	-	16
Cladogramma dubium Lohman	-	1	-	-	1	-	-
Cocconeis californica Grunow	1	-	1	-	1	1	-
C. costata Greg.	-	2	-	2	-	-	-
C. curviritunda Brun et Temp.	-	-	-	-	-	-	+
C. scutellum Ehr.	-	-	2	-	-	-	1
C. vitrea Brun	1	1	-	-	-	-	-
Coscinodiscus marginatus Ehr.	2	2	6	5	5	3	-
C. perforatus Ehr.	-	1	-	-	-	-	-
C. radiatus Ehr.	-	2	-	-	3	-	-
C. spp.	3	1	11	1	1	-	-
Delphineis angustata (Pant.) G.W.Andrews	-	-	-	-	+	-	+
D. surirella (Ehr.) G.W.Andrews	-	-	-	1	1	-	1
Denticulopsis lauta (Bailey) Simonsen	-	-	-	+	1	-	-
D. simonsenii Yanagisawa et Akiba	-	+	1	-	-	-	+
D. vulgaris (Okuno) Yanagisawa et Akiba	-	+	4	-	-	-	1
S-type girdle view of *D. simonsenii* group	-	-	2	-	-	-	-
Diploneis smithii (Bréb.) Cleve	1	-	3	-	-	1	2
Eucampia sp. A (= *Hemiaulus polymorphus* Grunow)	-	-	2	-	-	3	-
Grammatophora spp.	1	+	2	-	1	1	1
Hyalodiscus obsoletus Sheshukova	3	3	1	5	6	-	2
Ikebea tenuis (Brun) Akiba	3	1	1	1	+	1	3
Koizumia adaroi (Azpeitia) Yanagisawa	-	-	2	-	2	-	-
Melosira sol (Ehr.) Kützing	-	-	-	-	-	1	-
Fragilariopsis fossilis (Freng.) Medlin et P.A.Sims	-	-	-	1	-	-	-
Nitzschia praereinholdii Schrader	+	+	+	-	+	-	-
N. suikoensis Koizumi	-	-	-	-	-	-	1
Odontella aurita (Lyngb.) J.A.Agardh	-	-	-	-	-	1	2
Paralia sulcata (Ehr.) Cleve	21	35	14	22	30	15	17
Plagiogramma staurophorum (Greg.) Heib.	-	1	-	1	-	2	-
Proboscia barboi (Brun) Jordan et Priddle	-	4	1	1	-	-	1
Pseudopodosira elegans Sheshukova	-	-	4	-	2	2	-
Rhizosolenia styliformis Brightw.	-	-	-	-	1	1	2
Rouxia californica Perag.	-	-	+	+	-	-	-
Stellarima microtrias (Ehr.) Hasle et P.A.Sims	1	-	-	1	-	5	-
Stephanopyxis spp.	5	-	4	5	-	3	1
Thalassionema hirosakiensis (Kanaya) Schrader	-	-	-	1	+	1	+
T. nitzschioides (Grunow) H.Perag. et Perag.	39	29	23	26	18	28	43
T. schraderi Akiba	+	+	+	+	3	+	2
Thalassiosira burckliana Schrader	1	-	-	-	-	1	-
T. leptopus (Grunow) Hasle et G.A.Fryxell	1	1	-	1	1	-	-
T. manifesta Sheshukova	-	-	-	1	3	4	-
T. minutissima Oreshkina	1	-	1	3	1	-	-
T. sp. A	-	-	-	-	-	-	-
T. sp. B	-	-	1	2	-	1	-
T. spp.	-	-	4	-	-	-	-
Thalassiothrix longissima Cleve et Grunow	+	+	-	-	-	-	-
Triceratium condecorum Brightw.	-	1	-	2	1	-	-
Total number of valves counted	100	100	100	100	100	100	100
Resting spore of Chaetoceros	233	120	104	209	213	96	390

Preservation, G: good; M: moderate; P: poor. Abundance, A: abundant; C: common; R: rare.

図版 1　青麻層から産出した浮遊性有孔虫化石．スケールバーの長さは 100 μm.

Plate 1　Planktonic foraminifera from the Aoso Formation. Length of scale bars equal 100 μm.

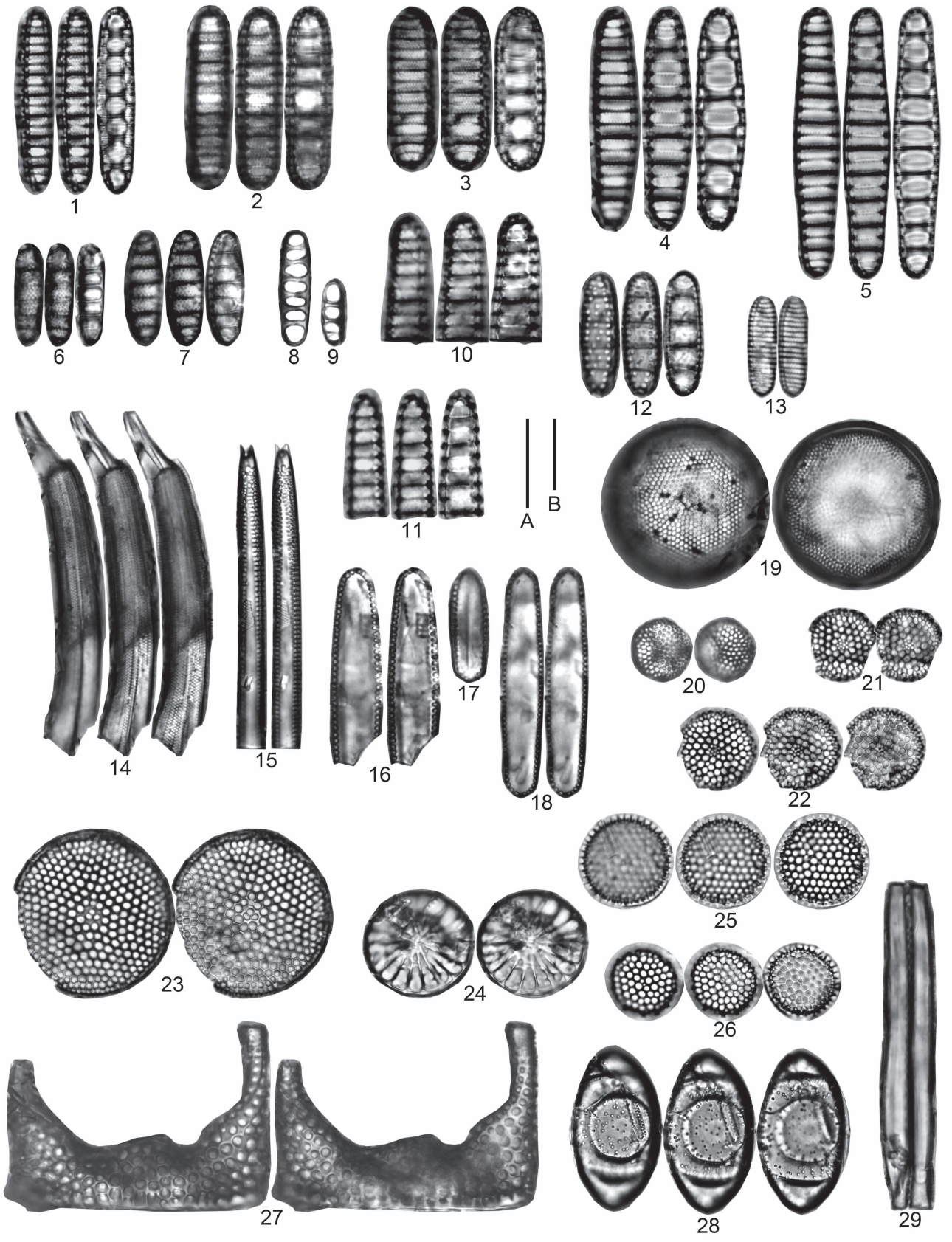
1a-c: *Globoquadrina dehiscens* (Chapman, Parr et Collins), sample P13.
2a-c: *Globorotalia lenguaensis* Bolli, sample P6.
3a-c: *Globorotalia paralenguaensis* Blow, sample P8.
4a-c: *Globoturborotalita decoraperta* (Takayanagi et Saito), sample P6.
5a-c: *Globoturborotalita nepenthes* (Todd), sample P13.
6a-c: *Neogloboquadrina acostaensis* (Blow) sinistral form, sample P13.
7a-c: *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) sinistral form, sample P13.


1a
1b
1c
2a
2b
2c
3a
3b
3c
4a
4b
5a
5b
5c
6a
6b
6c
7a
7b
7c
1, 3
2, 5, 6, 7
4

図版2　青麻層及び七北田層から産出した珪藻化石．スケールバーの長さは10 μm（スケールAは 図1–13に，スケールBは図14–29に適用）．[ ]内は試料番号を示す．

Plate 2　Diatoms from the Aoso and Nanakita formations. Length of scale bars equal 10 μm (Scale A for figs. 1–13, B for figs. 14–29). Code number(s) in parentheses indicate(s) sample number(s).

1–3: *Denticulopsis simonsenii* Yanagisawa et Akiba [1: Aoso42; 2, 3: Aoso52]
4, 5: *Denticulopsis vulgaris* (Okuno) Yanagisawa et Akiba [4: Aoso41; 5: Aoso42]
6–9: *Denticulopsis dimorpha* var. *dimorpha* (Schrader) Simonsen [6: Aoso38 (valve with closed copula); 7: Aoso38 (valve). 8: Aoso13 (isolated closed copula) 9: Aoso19 (isolated closed copula)
10: *Denticulopsis praekatayamae* Yanagisawa et Akiba [Aoso30]
11: *Denticulopsis katayamae* Maruyama [Aoso30]
12: *Crucidenticula kanayae* var. *kanayae* Akiba et Yanagisawa [Aoso06]
13: *Nitzschia porteri* Frenguelli [Aoso52]
14: *Rhizosolenia miocenica* Schrader [Aoso43]
15: *Thalassiothrix longissima* Cleve et Grunow [Aoso52]
16–18: *Thalassionema schraderi* Akiba [Aoso52]
19: *Stellarima microtrias* (Ehr.) Hasle et P.A.Sims [Aoso52]
20: *Thalassiosira minutissima* Oreshkina [Aoso30]
21, 22: *Thalassiosira burckliana* Schrader [Aoso52]
23: *Azpetia nodulifera* (A.W.F.Schmidt) G.A.Fryxell et P.A.Sims [Aoso52]
24: *Cladogramma dubium* Lohman [Aoso43]
25, 26: *Thalasiosira* sp. A [Aoso41]
27: *Eucampia* sp. [Aoso52]
28: *Goniothecium rogersii* Ehr. [Aoso46]
29: *Ikebea tenuis* (Brun) Akiba [Aoso52]


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
12
13
A
B
11
19
14
15
16
17
18
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 43–89, 2019

Article

Conodont-based age calibration of the Middle Triassic Anisian radiolarian biozones in pelagic deep-sea bedded chert

Shun Muto[1,*], Satoshi Takahashi[1], Satoshi Yamakita[2], Katsuhito Soda[3] and Tetsuji Onoue[3]

Shun Muto, Satoshi Takahashi, Satoshi Yamakita, Katsuhito Soda and Tetsuji Onoue (2019) Conodont-based age calibration of the Middle Triassic Anisian radiolarian biozones in pelagic deep-sea bedded chert. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 43–89, 14 figs, 2 tables, 10 plates.

Abstract: The age of pelagic Panthalassic deep-sea bedded chert has been assigned based on radiolarian biostratigraphy. However, Triassic radiolarian biostratigraphy is in many cases not precisely correlated to the conodont zones and the standard geological timescale. In this study, we investigated the conodont biostratigraphy of two radiolarian-controlled bedded chert sections of Anisian age: the Ajiro Island section in Oita Prefecture and the Kurusu section in Aichi Prefecture. We recognised six conodont biozones in the studied sections: the upper Olenekian *Novispathodus brevissimus-Icriospathodus collinsoni* and *Triassospathodus homeri* Zones, the lower Anisian *Chiosella timorensis* Zone, the middle Anisian *Paragondolella bulgarica* Zone, the upper Anisian *Paragondolella excelsa* Zone and the uppermost Anisian to lowermost Ladinian *Paragondolella trammeri* Zone. These conodont zones were successfully correlated to the standard Triassic radiolarian zonation proposed by Sugiyama (1997, *Bull. Mizunami Foss. Mus*., vol. 24, p. 79–193). Sugiyama's radiolarian TR 1 Zone, previously considered to be of Olenekian age, extends to the middle Anisian. The TR 2A Zone, the TR 2B Zone and the lower part of the TR 2C Zone are correlated to the middle Anisian, while the upper part of the TR 2C Zone and the lower part of the TR 3A Zone are correlated to the upper Anisian. The upper part of the TR 3A Zone and the lower part of the TR 3B Zone are probably correlative to the uppermost Anisian, but the possibility that they are correlative to the lowermost Ladinian cannot be ruled out.

Keywords: biostratigraphy, conodont, radiolarian biozone, Panthalassa, Middle Triassic

1. Introduction

Carboniferous to Jurassic pelagic deep-sea bedded chert preserved in the accretionary complex of Japan provides precious sedimentary records of the Panthalassa sea floor (Kojima *et al.*, 2016; Matsuda and Isozaki, 1991; Wakita and Metcalfe, 2005) (Fig. 1A). For instance, evidence of oceanic anoxia (Fujisaki *et al.*, 2016; Takahashi *et al.*, 2009), bolide impact (Sato *et al.*, 2013, 2016) and climate change (Nakada *et al.*, 2014) have been documented from Triassic bedded chert in Japan. The prerequisite for such studies is the recognition of reliable geochronological controls for the bedded chert sequence, which was attempted by biostratigraphic correlations. The age assignment of bedded chert is commonly based on radiolarian biostratigraphy, which has been successfully established in many regions due to the abundant occurrence of radiolarians from bedded chert (e.g. Matsuoka and Yao, 1986; Sugiyama, 1997). Currently, the radiolarian biozones of Sugiyama (1997) established in the Inuyama area in central Japan are regarded as the most complete radiolarian zonation of Triassic deep-sea bedded chert deposited in the pelagic Panthalassa (e.g., O'Dogherty *et al.*, 2010). However, the Triassic radiolarian biozones of Sugiyama (1997) is not precisely correlated to the global standard geological timescale (Ogg, 2012). Hence, it is necessary to calibrate the radiolarian biozones based on geochronological controls that can be robustly correlated to the global standard geological timescale. Calibration by conodont biostratigraphy as in Sato *et al.* (2013, 2016) and Nakada *et al.* (2014) is a useful method, because although much rarer than radiolarians, conodont fossils occur reasonably frequently from deep-sea bedded chert (Hayashi, 1968; Isozaki and Matsuda, 1982, 1983;

[1] Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan
[2] Faculty of Education, University of Miyazaki, 1-1, Gakuen Kibanadainishi, Miyazaki, 889-2192, Japan
[3] Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto, 860-8555, Japan
[*] Corresponding author: S. Muto, Email: smuto@eps.s.u-tokyo.ac.jp

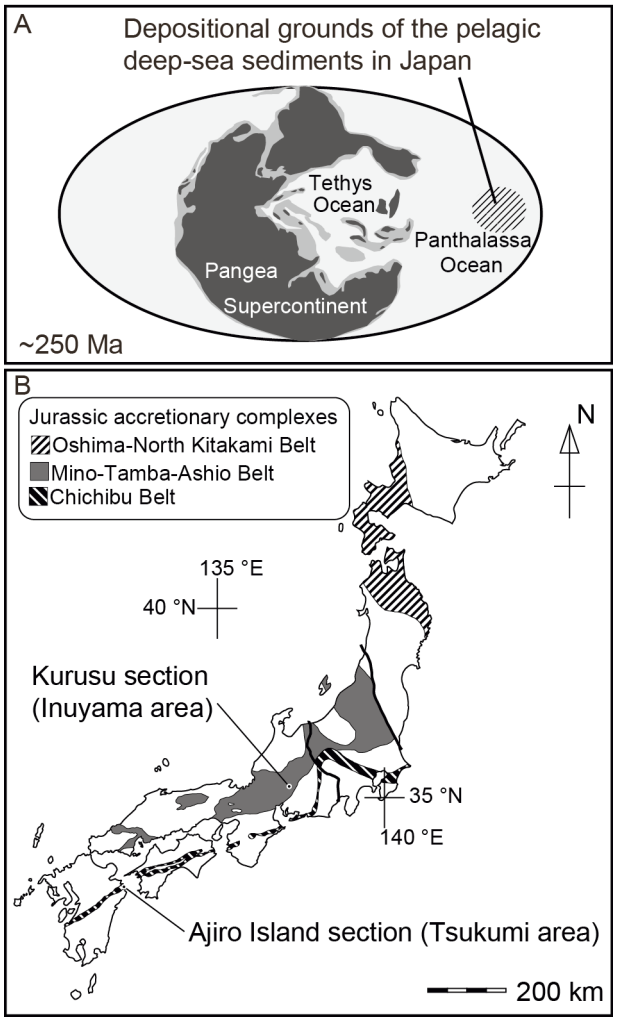


Fig. 1 (A) Palaeogeographic map of the Anisian (Ziegler *et al.*, 1998) showing the location of the depositional site of the pelagic deep-sea sediments in the Jurassic accretionary complex of Japan. (B) Location of the studied sections. The distribution of Jurassic accretionary complexes is after Isozaki *et al.* (2010).

Nishikane *et al.*, 2011). In this article, we focused on the radiolarian biozones previously assigned to the Anisian Age (the TR 2A to TR 3A Zones of Sugiyama, 1997), and calibrated their ages based on conodont biostratigraphy.

Previous reports of Anisian conodonts from bedded chert have been sporadic (Ando *et al.*, 2001; Matsuda and Isozaki, 1982; Mizutani and Koike, 1982; Sugiyama, 1997; Tanaka, 1980). The conodont *Chiosella timorensis*, which has been proposed as a marker for the base of the Anisian (Ogg, 2012; Orchard, 2010) has been found from pelagic deep-sea sediments including bedded chert in the Kuzuu area in east Japan (Muto *et al.*, 2018), the Nichihara area in southwest Japan (Tanaka, 1980) and the Kamiaso area in central Japan (Matsuda and Isozaki, 1982). In particular, Muto *et al.* (2018) indicated that the radiolarian based Olenekian-Anisian boundary, which is placed at the base of the TR 2A Zone of Sugiyama (1997) is within the middle Anisian. Therefore, the age of the "lower Anisian" radiolarian biozones of Sugiyama (1997) needs to be reinvestigated. On the other hand, the finding of middle Anisian conodonts *Paragondolella bulgarica* and *Nicoraella kockeli* from the TR 2B and TR 2C Zones in the Inuyama area (Ando *et al.*, 2001; Mizutani and Koike, 1982; Sugiyama, 1997) ensures that a part of these zones is correlative to the Anisian. However, the full range of these conodonts with regard to the radiolarian biozones remains unknown. The occurrence of the late Anisian conodont *Paragondolella excelsa* followed by that of the Ladinian conodont *Budurovignathus hungaricus* from a continuous bedded chert section in the Nichihara area (Tanaka, 1980) likely indicates the presence of the Anisian-Ladinian boundary. Unfortunately, radiolarians were not reported from this section, and the boundary cannot be correlated with radiolarian biozones. A more intensive investigation on conodont biostratigraphy and its correlation with radiolarian biozones based on high-resolution sampling are required to calibrate the age of the radiolarian biozones.

Two sections were selected for investigation of conodont biostratigraphy in this study. The first is the Ajiro Island section in the Tsukumi area, southwest Japan (Onoue *et al.*, 2011; Soda *et al.*, 2015; Uno *et al.*, 2012) (Figs. 1B, 2). This section was chosen because the TR 2A to TR 3A Zones can be collectively observed in one continuous section (Onoue *et al.*, 2011). Although the stratotype of the radiolarian biozones of Sugiyama (1997) was defined in the Inuyama area, the stratotype sections of the TR 2A to TR 3A Zones were defined in separate outcrops, which is a large disadvantage to the Ajiro Island section. In addition, the Ajiro Island section was logged bed-by-bed in Onoue *et al.* (2011) and Soda *et al.* (2015). Radiolarian biostratigraphy was based on their logs, which meant that we could compare conodont and radiolarian biostratigraphy at bed-by-bed resolutions.

The second section is the Kurusu section in the Inuyama area in central Japan (Yao and Kuwahara, 1997) (Figs. 1B, 3). Although this is not one of the stratotype sections of Sugiyama (1997), it provides crucial evidence on the age of the TR 2A Zone, as detailed below. The stratotype section of the TR 2A Zone is Section M in the Inuyama area, but the base of this zone is not observed there (Sugiyama, 1997). In the Ajiro Island section, the base of the TR 2A section was determined, but the underlying TR 1 Zone did not yield the radiolarian *Parentactinia nakatsugawaensis*, which is the species that most characterises the TR 1 Zone. Therefore, the TR 1 Zone in the Ajiro Island section may not be directly correlative to its type section in the Inuyama area. In contrast, in the Kurusu section, the *Pa. nakatsugawaensis* Assemblage Zone is overlain by the *Hozmadia gifuensis* Assemblage Zone (Yao and Kuwahara, 1997) and the boundary of the two zones can be approximated as the base of the TR 2A Zone. The boundary of the *Pa. nakatsugawaensis* Assemblage Zone

and the *H. gifuensis* Assemblage Zone was also reported from the Momotaro-jinja section in the Inuyama area (Fig. 3; Yao and Kuwahara, 1997). However, the *H. gifuensis* Assemblage Zone in this section did not yield the nominal species *H. gifuensis*. Furthermore, according to Sugiyama (1997) who investigated the lateral extension of the Momotaro-jinja section (Section T of Sugiyama (1997)), the interval assigned to the *H. gifuensis* Assemblage Zone by Yao and Kuwahara (1997) is within the TR 1 Zone. In sum, the Kurusu section is the only well-studied section that includes the base of the TR 2A Zone.

In this article, we present the lithostratigraphy and conodont biostratigraphy of the Ajiro Island and Kurusu sections. The conodont biostratigraphy is illustrated parallel to previous results on radiolarian biostratigraphy. Based on correlation with conodont biostratigraphy established in the Tethys region and North America, including the global boundary stratotype section and point (GSSP) candidate for the base of the Anisian and the GSSP of the base of the Ladinian, the radiolarian biozones were calibrated to the global standard geological timescale.

2. Geologic setting of the study sections

The studied sections belong to the Jurassic accretionary complex in southwest Japan. The Jurassic accretionary complex is mainly composed of Carboniferous to Middle Jurassic oceanic rocks (ocean floor basalt, deep-sea chert, hemipelagic siliceous mudstone, seamount basalt and seamount-capping carbonate), and Middle Jurassic to lowermost Cretaceous trench-fill terrigenous clastic rocks (mudstone and sandstone) (Isozaki *et al.*, 2010; Wakita and Metcalfe, 2005). Of the Carboniferous to Middle Jurassic oceanic rocks, the deep-sea sedimentary rocks were deposited in the pelagic Panthalassa superocean several thousand kilometres away from the nearest continent (Fig. 1A), after which they traveled to a subduction zone along the paleo-continent and formed a part of accretionary complexes by the tectonic movement of the oceanic plates (Isozaki *et al.*, 2010; Matsuda and Isozaki, 1991; Wakita and Metcalfe, 2005).

2. 1 Ajiro Island section

The Ajiro Island section is located in Ajiro Island (Ajiro Jima in Japanese) on the northern coast of the Youra Peninsula, Tsukumi City, Oita Prefecture, Kyushu District (33°4'10" N 131°55'10"E). The studied section belongs to the Southern Chichibu Belt (Fujii, 1954; Hoshizumi *et al.*, 2015; Kambe and Teraoka, 1968: Matsuoka *et al.*, 1998), which is mostly composed of a Jurassic accretionary complex (Isozaki *et al.* 2010; Matsuoka and Yao, 1990; Matsuoka *et al.*, 1998). The studied section is a part of the Shakumasan Group, which preserves the upper part of the original sequence on the oceanic plate (Nishi, 1994). The Shakumasan Group is further subdivided into the lower Enoura Formation and the upper Youra Formation (Nishi, 1994). The Enoura Formation is composed of Lower Triassic to Middle Jurassic pelagic deep-sea sedimentary rocks (mostly chert) (Matsuoka, 1986; Nishi, 1994), and is overlain conformably by trench-fill clastic rocks of the Youra Formation (Fig. 2; Nishi, 1994). The succession of these two formations occurs repeatedly due to the imbricate structure formed by thrusts (Fig. 2; Nishi, 1994).

The section investigated in this study belongs to the lowermost part of the Enoura Formation (Fig. 2B). The Ajiro Island section is located in the southernmost part of the Ajiro Island on the northern coast of the Tsukumi area. The studied outcrop corresponds to the "alternation beds of siliceous claystone and chert" and "red chert" in Fig. 2 of Uno *et al.* (2012). According to the age assignment based on radiolarian biostratigraphy, the bedded chert of the Ajiro Island has been dated as latest Spathian to early Ladinian, and has a northward younging trend (Onoue *et al.*, 2011; Takahashi *et al.*, 1998). The palaeolatitude of the depositional grounds have been estimated to be 2.1 ± 5.2°S based on rock magnetic records (Uno *et al.*, 2012).

2. 2 Kurusu section

The Kurusu section (Kr-2 section of Yao and Kuwahara, 1997) is located on the eastern bank of the Kiso River in Inuyama City, Aichi Prefecture, Chubu District (35°25'8"N 136°57'50"E). The Kurusu section belongs to the Mino-Tamba-Ashio Belt, which is mostly composed of a Jurassic accretionary complex (Isozaki *et al.*, 2010; Yamakita and Otoh, 2000; Kojima *et al.*, 2016). The Kurusu section is a part of the Kamiaso Unit (Wakita, 1988), which is a coherent tectonostratigraphic unit composed of Lower Triassic siliceous claystone, Middle Triassic to Lower Jurassic pelagic deep-sea bedded chert, Middle Jurassic hemipelagic siliceous shale and Upper Jurassic turbidite and massive sandstone in ascending order (Yao *et al.*, 1980). Thus, the upper part of the original sequence on the oceanic plate is preserved in the Kamiaso Unit. The Kamiaso Unit in the Inuyama area has been studied in detail by Kimura and Hori (1993). They clarified that the coherent sequence from pelagic siliceous claystone and chert to trench-fill clastic rocks ("Inuyama Sequence" in their paper) repeated six times as thrust sheets, which together form a synclinal structure with a W-plunging, WNW-ESE trending axis (the Sakahogi syncline; Mizutani, 1964). The Kurusu section corresponds to the lowermost strata of "sheet 4" in Kimura and Hori (1993), and is located on the northern wing of the Sakahogi syncline, close to the axis (Fig. 3).

Yao and Kuwahara (1997) studied the radiolarian biostratigraphy of the Kurusu section and indicated that the section is correlated to the *Parentactinia nakatsugawaensis* Zone and the *Hozmadia gifuensis* Zone. The radiolarian biostratigraphy indicates a southward younging trend for this section. This younging trend is consistent with the fact that the south of the section faces the axis of the Sakahogi syncline. The palaeolatitude of the depositional site of the Anisian bedded chert in the Inuyama area has been estimated to be 12.3 ± 15.6°N

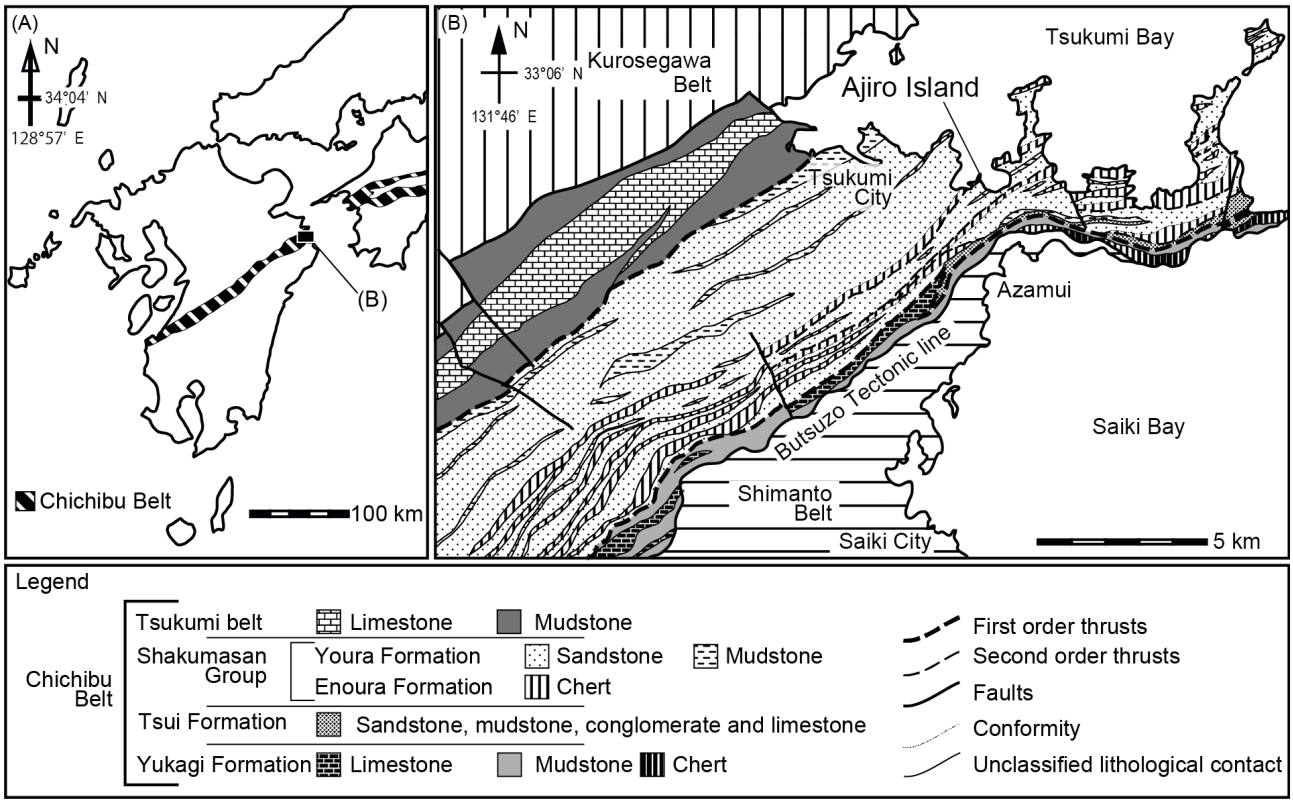


Fig. 2 (A) Distribution of the Chichibu Belt in Kyushu District (after Isozaki *et al.*, 2010). (B) Geological map of the Tsukumi area (Nishi, 1994).

or S (Oda and Suzuki, 2000) or 5.6 ± 2.2°S by (Ando *et al.*, 2001) based on palaeomagnetic records. Ikeda *et al.* (2010) investigated the "Kr-2 section of Yao and Kuwahara (1997)" for cyclostratigraphy, but their section was observed in a different part of the outcrop (compare Fig. 4 of Yao and Kuwahara (1997) and Fig. 1S in the supplementary materials of Ikeda *et al.* (2010)). In this study, we investigated the studied section of Ikeda *et al.* (2010) in addition to the section of Yao and Kuwahara (1997).

3. Methods

3. 1 Field mapping

For both the Ajiro Island and Kurusu sections, geological maps of the outcrop were made based on examination of the geological structure and lithology at the sub-metre scale. For the major part of the Ajiro Island section, detailed lithostratigraphy has been reported by Onoue *et al.* (2011), Soda *et al.* (2015) and Uno *et al.* (2012). We conducted a biostratigraphic investigation building on the lithostratigraphic section constructed by these studies. For the lower part of the Ajiro Island section, lithostratigraphy has not been investigated thoroughly by previous studies. Therefore, we reconstructed the lithostratigraphy of this part of the outcrop based on detailed mapping with careful attention to deformation and continuity. Lithostratigraphy of the Kurusu section has been reported by Yao and Kuwahara (1997) and Ikeda *et al.* (2010). However, both studies did not investigate the entire outcrop. In this study, we present an original outcrop sketch map and lithostratigraphic columns that include, but are not restricted to, stratigraphic intervals that were investigated by these studies.

3. 2 Conodont biostratigraphy

Conodonts were found by observing the surfaces of sample rocks cleaved parallel to the bedding into small "chips" (the "chip method"; Muto *et al.*, 2018; Takemura *et al.*, 2001). This method allows us to find conodonts that are cracked or preserved as moulds and impossible to extract by dissolving the host rock. A preliminary search for conodonts by the "chip method" was conducted at the outcrop using a hand lens (20 magnifications), and horizons that yielded conodonts were selected for further investigation. Following Muto *et al.* (2018), 2–5 kg blocks of the selected horizons were brought back to the laboratory, and then cleaved into thin planar chips. These chips were moistened with tap water and then examined under a stereoscopic microscope of 20 to 60 magnifications. Early attempts of the "chip method" resulted in larger numbers of specimens from greenish grey parts of the bedded chert compared to red or purple parts. This is probably because conodont fossils have more chances of being found in the more transparent greenish

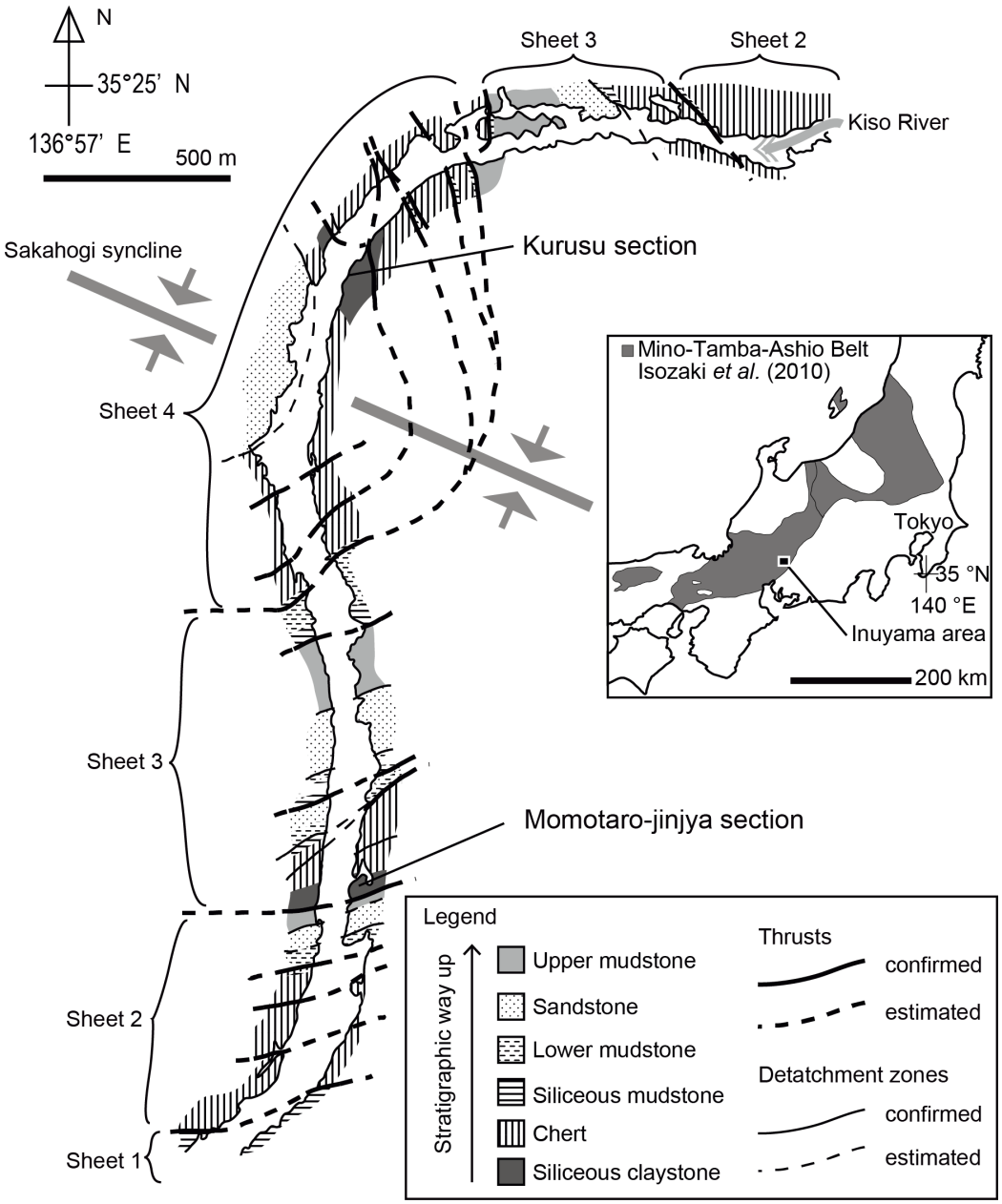


Fig. 3 Geological map of the Inuyama area (Kimura and Hori, 1993).

grey chert compared to purple or red chert. Therefore, the parts of strata that have been altered to greenish grey were targeted in the later attempts to find conodonts from dominantly purple or red intervals.

For specific identification, the chips were observed under a stereoscopic microscope of 100 magnifications. The surface of the chips were dried, soaked with water or coated with oil depending on the type of host rock and the state of preservation of the specimens. Moulds in siliceous claystone without grey fillings were best observed on dry surfaces, while moulds in siliceous claystone with grey fillings were better observed when soaked with water. Specimens in chert were best observed when the surface of the chert was coated with oil.

4. Results

4. 1 Ajiro Island section

4. 1. 1 Field mapping

The Ajiro Island section is exposed on the southern coast of Ajiro Island, Tsukumi City, Oita Prefecture (Fig. 2). The outcrop of the Ajiro Island section consists of two parts that have different geological structure and lithology. The main part of the section (the AJR section), which is exposed along the south to southeast coast of Ajiro Island, comprises bedded chert (Fig. 4). The AJR section

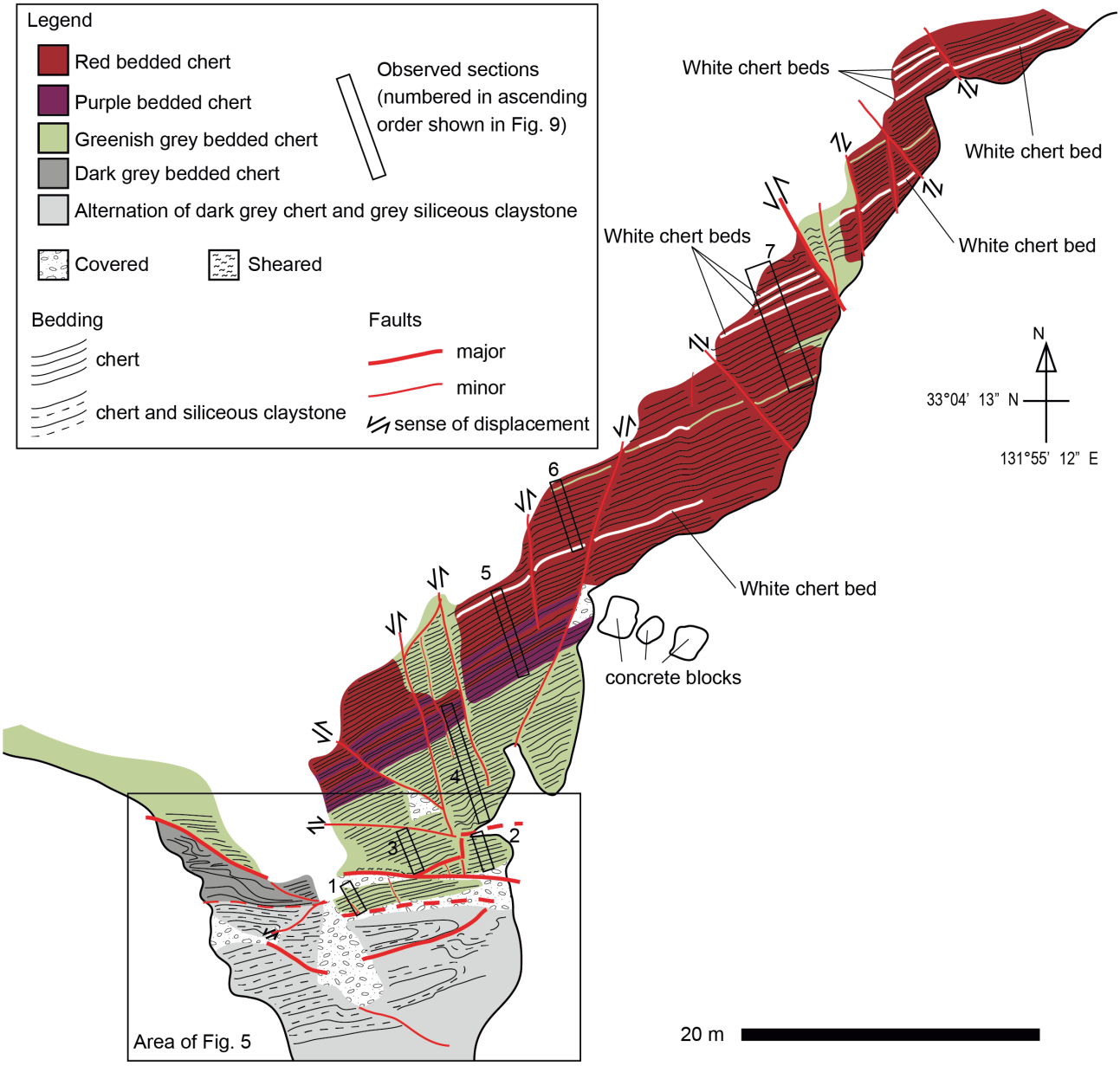


Fig. 4 Geological map of the southeast coast of Ajiro Island. The stratigraphic way up of the bedded chert is to the north (Onoue *et al.*, 2011; Takahashi *et al.*, 1998; Uno *et al.*, 2012).

has already been studied in detail by previous studies (Onoue *et al.*, 2011; Soda *et al.*, 2015; Uno *et al.*, 2012), and therefore we will only give a brief description of the outcrop. The other part is exposed at the southern tip of Ajiro Island, and comprises alternating beds of siliceous claystone and chert that are more intensely folded and faulted compared to strata of the AJR section (Figs. 4, 5). This part has been mapped by Onoue *et al.* (2011) and Uno *et al.* (2012), but lithostratigraphy was not examined in detail. Here, we provide a more detailed geological map and lithostratigraphic columns for this part of the section (the AJ-1, AJ-2, AJ-3-1 and AJ-3-2 sections). In the following text, we will explain the geological structures and lithofacies of the Ajiro Island section in stratigraphically ascending order (stratigraphic order is explained in Section 4.1.2.).

The lower part of the Ajiro Island section corresponds to the AJ-1, AJ-2, AJ-3-1 and AJ-3-2 sections exposed at the southern tip of Ajiro Island (Fig. 5). The strata here generally strike ENE-WSW and dip steeply to the north, apart from the northwestern part where the strata strike E-W to WNW-ESE. Isoclinal folds with wavelengths up to 2 m are present throughout the outcrop, and the strata are locally overturned. The axial planes of these folds are almost parallel to the bedding. The faults in this part of the outcrop can be distinguished into the following

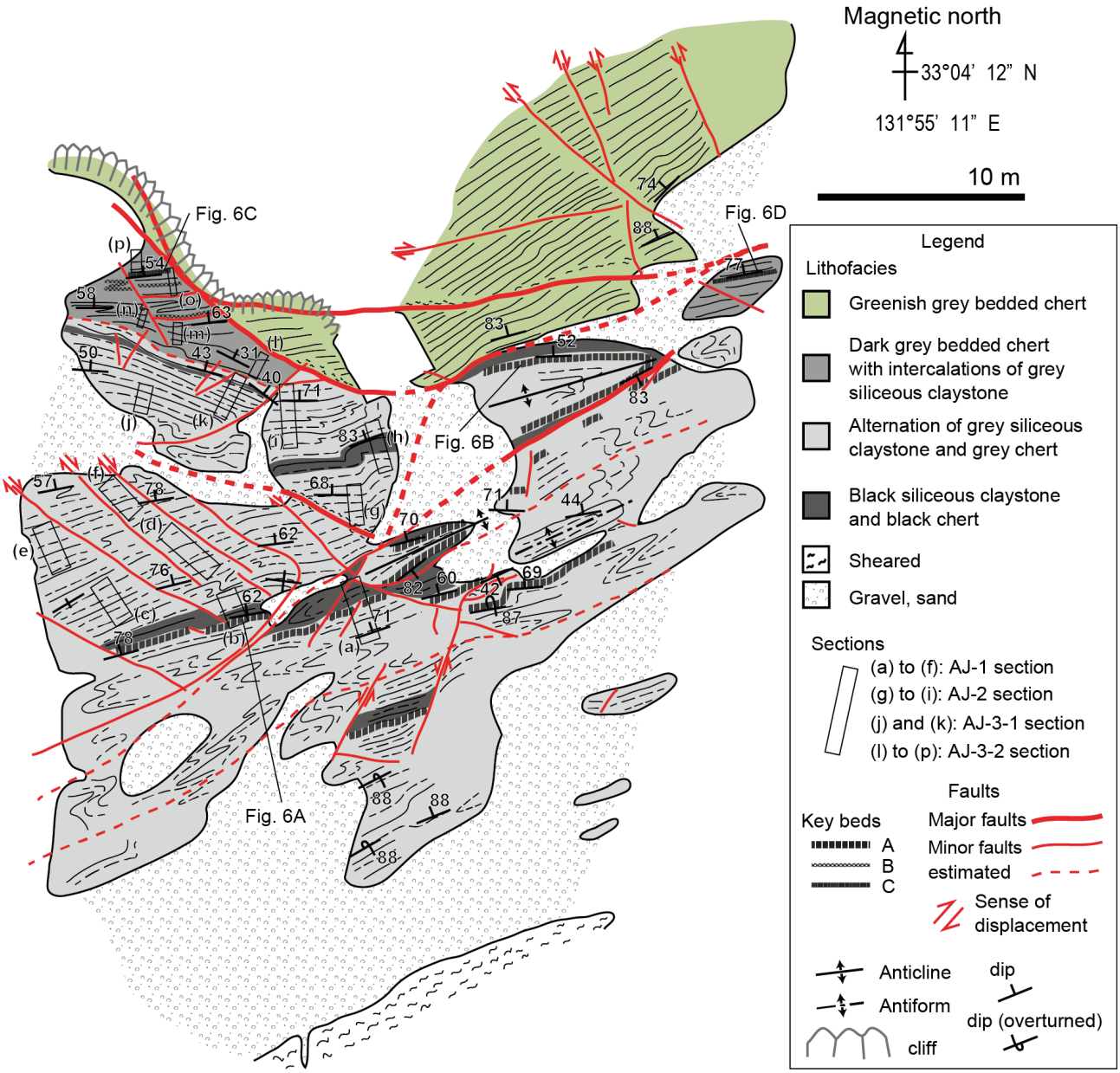


Fig. 5 Geological map of the southern tip of Ajiro Island. The lower part of the Ajiro Island section is exposed in this area. Sections (a) to (p) are labelled in stratigraphically ascending order.

two types. Major faults with displacements of at least several metres were identified in the northern part. These faults are characterised by sheared zones about 50 cm wide on either side of the fault plane. Minor faults with displacements of up to 2 m are present throughout the outcrop. These faults are not accompanied by wide sheared zones. Recognition of three key beds (Figs. 5, 6) revealed that strata in the western half of the outcrop are relatively weakly deformed. Therefore, we observed the lithostratigraphy in the western half of the outcrop, avoiding areas where strata are deformed by faults and folds. The reconstructed lithostratigraphic column comprises four continuous sequences: AJ-1 section, AJ-2 section, AJ-3-1 section and AJ-3-2 section in ascending order (Figs. 5, 9). On the other hand, in the eastern part of the outcrop, strata in the lower part of the AJ-1 section are repeated by faults and folds, while the upper part of the AJ-1 section, the AJ-2 section, the AJ-3-1 section and most of the AJ-3-2 section are missing.

The AJ-1 section is approximately 8.4 m thick, and is composed mainly of alternating beds of grey siliceous claystone and dark grey chert (Fig. 7A). An interval composed of black siliceous claystone and black chert occurs in the lower part of this sequence. The AJ-2 section is approximately 4.8 m thick, and is composed mainly of alternating beds of grey siliceous claystone and dark grey

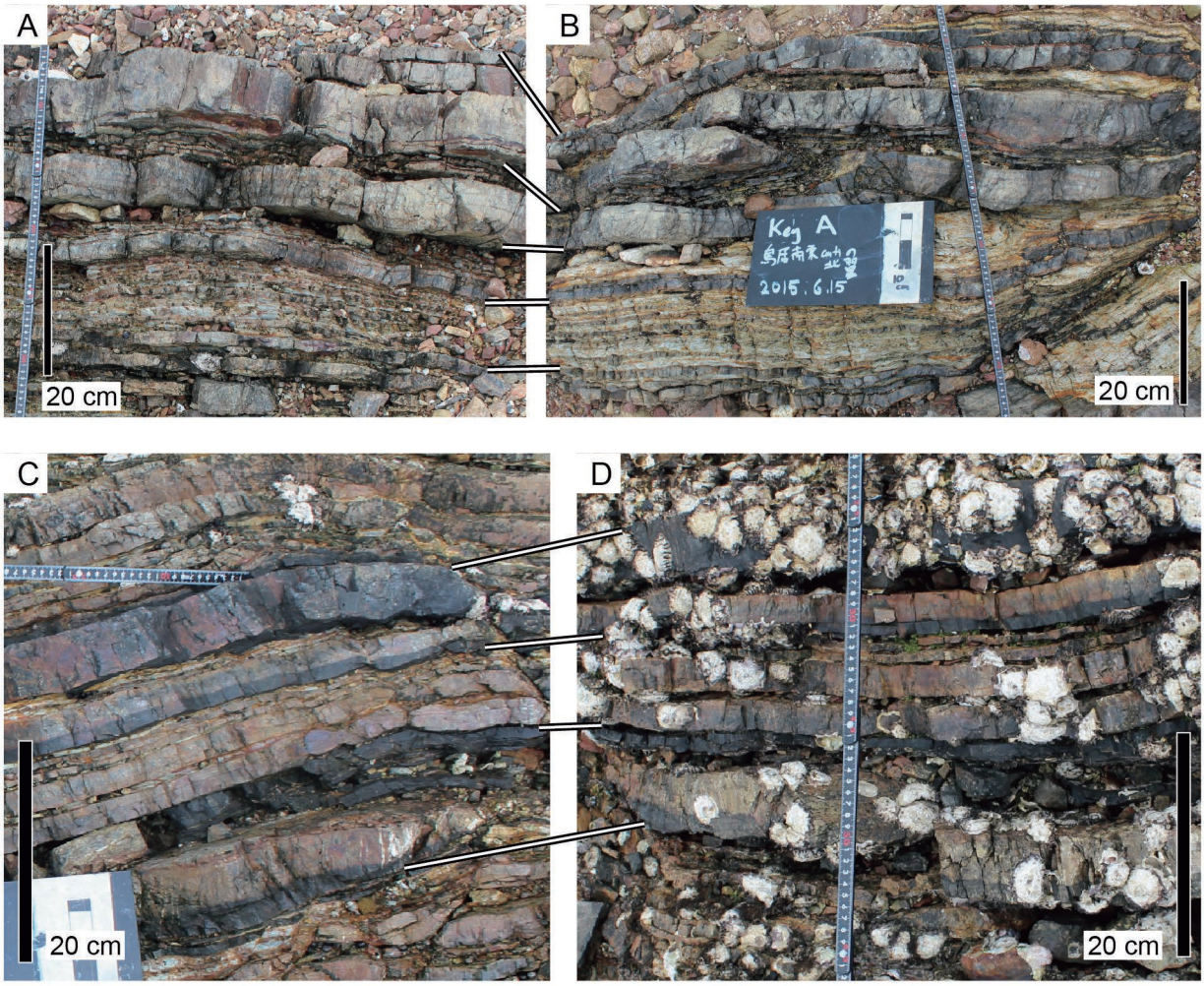


Fig. 6 Photographs of key beds in the lower part of the Ajiro Island section. White lines indicate the correlation between the same key bed in different places (see Fig. 5 for location). (A, B) Key bed A. (C, D) Key bed C.

or black chert (Fig. 7B). Thin (~10 mm thick) red siliceous claystone beds occur characteristically in this section. The AJ-3-1 section is approximately 2.0 m thick, and is composed mainly of alternating beds of grey siliceous claystone and grey or dark grey chert (Fig. 7C). The AJ-3-2 section lies directly above the AJ-3-1 section, but a slip plane exists between the two sections, and therefore they are not confirmed to be continuous (Fig. 7C, D). The AJ-3-2 section is approximately 3 m thick, and is composed of dark grey bedded chert with intercalations of grey siliceous claystone (Fig. 7D). This section is in fault contact with greenish grey bedded chert to the north.

In the outcrop of the AJR section, the strata strike ENE-WSW and dip steeply to the north (Fig. 4). A major fault with an apparent displacement of ~10 m occurs in the northern part. Minor faults with apparent displacements of up to 2 m occur throughout the outcrop. Deformation of the strata is negligible, apart from drags and shears near faults. The colour of bedded chert changes from greenish grey to purple, then to red in ascending order (Figs. 8A–D, Fig. 9). Some white highly recrystallised chert beds occur in the red bedded chert. Some parts of the purple and red bedded chert are altered to greenish grey (Fig. 8D). Our study section mostly corresponds to the section illustrated in previous studies (Onoue *et al.*, 2011; Soda *et al.*, 2015; Uno *et al.*, 2012). However, we observed an additional ~2 m of red bedded chert above the top of their section. In addition, we identified a stratigraphic discontinuity at the basal part of the lithologic column by Onoue *et al.* (2011) (the two faults within the AJR section in Fig. 9). Our reinvestigation of the geological structure showed that the stratigraphic intervals corresponding to the TR 1 and TR 2A Zones in their section are separated by a fault. Furthermore, a block of greenish grey bedded chert occurs structurally between these two intervals. The lithostratigraphic column illustrated in this study incorporates this new finding.

4. 1. 2 Conodont biostratigraphy

Conodont fossils were found from all of the investigated

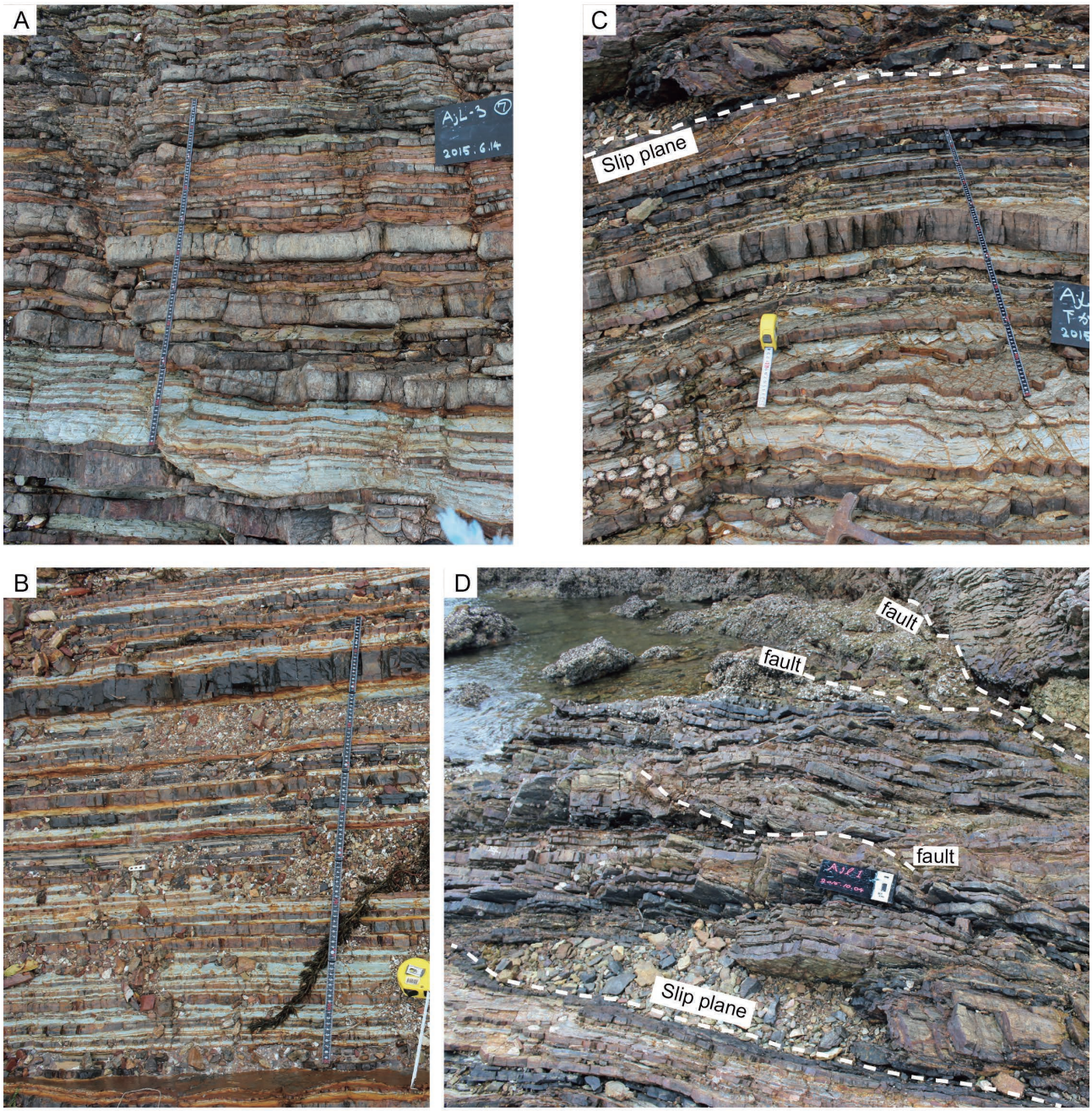


Fig. 7 Outcrop photographs of the lower part of the Ajiro Island section. (A) Alternating beds of grey siliceous claystone and dark grey chert in the AJ-1 section. (B) Alternating beds of grey siliceous claystone and dark grey or black chert in the AJ-2 section. (C) Alternating beds of grey siliceous claystone and grey or dark grey chert in the AJ-3-1 section. (D) Dark grey bedded chert in the AJ-3-2 section. Note the slip plane in (C) and (D). The stratigraphic way up is to the top in all photos. The black ruler in (A) to (C) is 1 m long. The black board in (D) is 20 cm × 30 cm.

samples (more than 2000 specimens in total). Conodonts in siliceous claystone were preserved as moulds, while those in chert were dark grey skeletons or white or orange casts. Although most of the specimens were broken and unidentifiable, 194 specimens were identified at the species level (Table 1; Plates 1–7). Conodont animals are taxonomically classified based on their apparatuses that comprise an assemblage of conodont elements (Clark *et al.*, 1981; Orchard, 2005; Sweet, 1988), but some morphologically distinguishable elements are yet to be assigned to any apparatus. Such elements are classified as form groups and are indicated in this paper with quotation marks.

Conodonts from the siliceous claystone that alternates

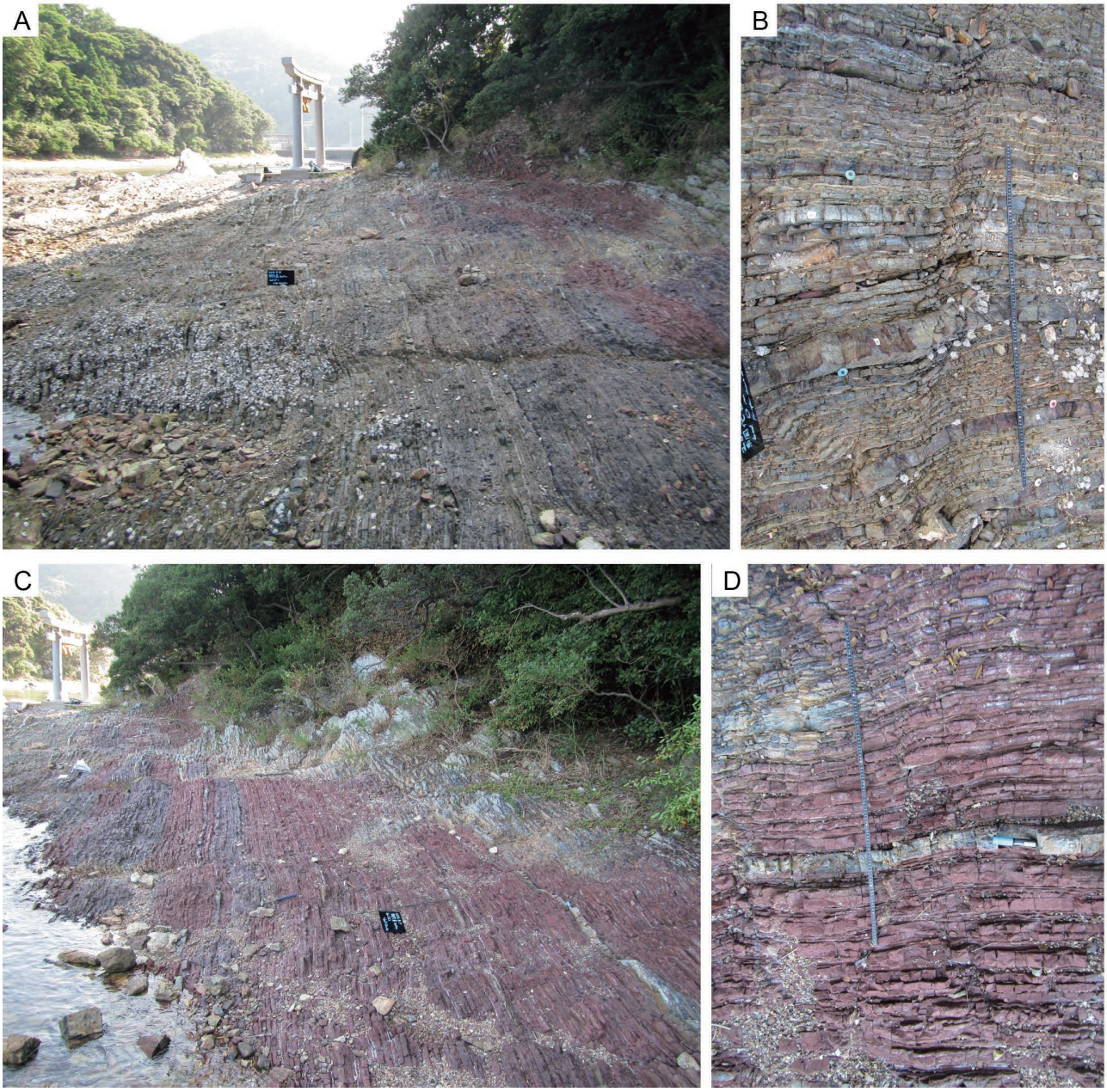


Fig. 8 Outcrop photographs of the AJR section. (A) The upward lithofacies change from greenish grey bedded chert to purple and red bedded chert. (B) Greenish grey bedded chert. (C) Purple and red bedded chert. (D) Red bedded chert. Note that the colour is altered to greenish grey in some parts. The stratigraphic way up is to the right in (A) and (C), and to the top in (B) and (D). The black ruler and board in the photos as scale are the same as that in Fig. 7.

(p.53) Fig. 9
Lithostratigraphy, conodont biostratigraphy, radiolarian biostratigraphy and magnetostratigraphy of the Ajiro Island section. The range chart for conodonts excludes some specimens that were not identified at the species level. See Table 1 for full list and numbers of identified conodonts. Radiolarian biostratigraphy is after Onoue *et al.* (2011) and Uno *et al.* (2012). Magnetic polarity zones are after Uno *et al.* (2012). *brevissimus-collinsoni* Zone: *Nv. brevissimus-I. collinsoni* Zone; *timorensis* Z.: *Ch. timorensis* Zone; *excelsa* Z.: *Pg. excelsa* Zone. The species names denoted in quotation marks are form species defined based on discrete conodont elements.

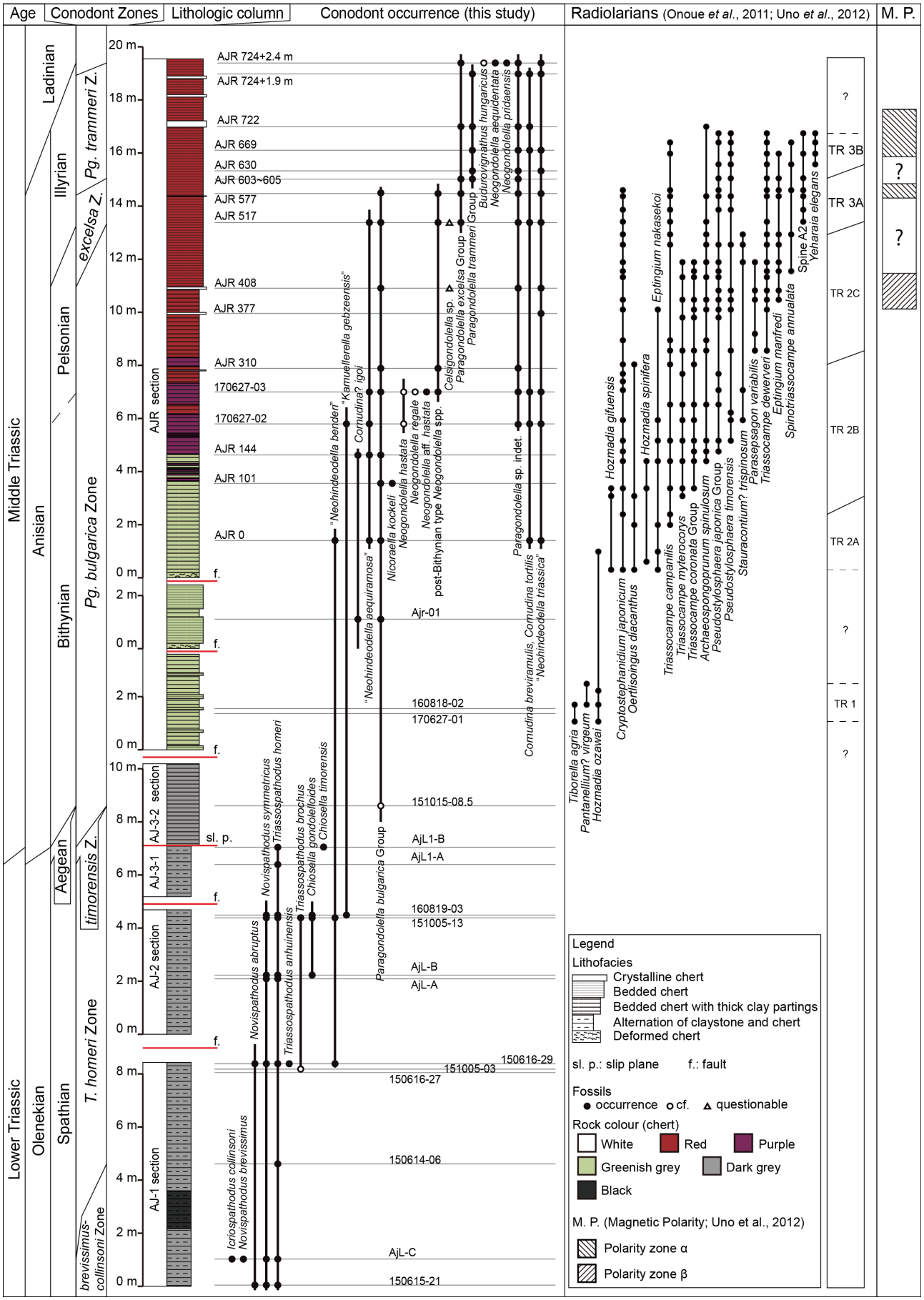

Age
Conodont Zones
Lithologic column
Conodont occurrence (this study)
Radiolarians (Onoue et al., 2011; Uno et al., 2012)
M. P.
Lower Triassic
Middle Triassic
Olenekian
Anisian
Spathian
Bithynian
Pelsonian
Illyrian
Ladinian
Aegean
T. homeri Zone
brevissimus-collinsoni Zone
timorensis Z.
excelsa Z.
Pg. trammeri Z.
Pg. bulgarica Zone
AJR section
AJ-3-2 section
AJ-3-1
AJ-2 section
AJ-1 section
AJR 724+2.4 m
AJR 724+1.9 m
AJR 722
AJR 669
AJR 630
AJR 603~605
AJR 577
AJR 517
AJR 408
AJR 377
AJR 310
170627-03
170627-02
AJR 144
AJR 101
AJR 0
Ajr-01
160818-02
170627-01
151015-08.5
AjL1-B
AjL1-A
160819-03
151005-13
AjL-B
AjL-A
150616-29
151005-03
150616-27
150614-06
AjL-C
150615-21
sl. p.
f.
"Neohindeodella benderi"
"Kamuellerella gebzeensis"
Comudina? igoi
"Neohindeodella aequiramosa"
Nicoraella kockeli
Neogondolella hastata
Neogondolella regale
Neogondolella aff. hastata
post-Bithynian type Neogondolella spp.
Celsigondolella sp.
Paragondolella excelsa Group
Paragondolella trammeri Group
Budurovignathus hungaricus
Neogondolella aequidentata
Neogondolella pridaensis
Paragondolella sp. indet.
Comudina breviramulis, Comudina tortilis
"Neohindeodella triassica"
Paragondolella bulgarica Group
Novispathodus symmetricus
Triassospathodus homeri
Triassospathodus brochus
Chiosella gondolelloides
Chiosella timorensis
Novispathodus abruptus
Triassospathodus anhuinensis
Icriospathodus collinsoni
Novispathodus brevissimus
Tiborella agria
Pantanellium? virgeum
Hozmadia ozawai
Cryptostephanidium japonicum
Oertlisoingus diacanthus
Hozmadia gifuensis
Hozmadia spinifera
Triassocampe campanilis
Eptingium nakasekoi
Triassocampe myterocorys
Triassocampe coronata Group
Archaeospongoprunum spinulosum
Pseudostylosphaera japonica Group
Pseudostylosphaera timorensis
Stauracontium? trispinosum
Parasepsagon variabilis
Triassocampe deweverii
Eptingium manfredi
Spinotriassocampe annualata
Spine A2
Yeharaia elegans
TR 3B
TR 3A
TR 2C
TR 2B
TR 2A
TR 1
Legend
Lithofacies
Crystalline chert
Bedded chert
Bedded chert with thick clay partings
Alternation of claystone and chert
Deformed chert
sl. p.: slip plane
f.: fault
Fossils
occurrence
cf.
questionable
Rock colour (chert)
White
Red
Purple
Greenish grey
Dark grey
Black
M. P. (Magnetic Polarity; Uno et al., 2012)
Polarity zone α
Polarity zone β

Table 1. Occurrence list of conodonts from the Ajiro Island section. Underlined numbers indicate the number of conferred specimens. Bracketed numbers indicate the number of questionable specimens. The species names denoted in quotation marks are form species defined based on discrete conodont elements.

	Icriospathodus collinsoni (Solien)	*Novispathodus brevissimus* (Orchard)	*Novispathodus* sp.	*Nv. abruptus* (Orchard)	*Nv. symmetricus* (Orchard)	*Triassospathodus homeri* (Bender)	*T. anhuinensis* (Ding)	*T. brochus* (Orchard)	*Triassospathodus* sp.	*Triassospathodus* or *Novispathodus* sp.	*Chiosella gondolelloides* (Orchard)	*Chiosella* sp.	*Chiosella timorensis* (Nogami)	"*Neohindeodella benderi* (Kozur & Mostler)"	"*Kamuellerella gebzeensis* Gedik"	*Cornudina? igoi* Koike	"*Nh. aequiramosa* Kozur & Mostler"	*Paragondolella bulgarica* Group	*Nicoraella kockeli* (Tatge)	*Nicoraella* sp.	*Neogondolella* sp.	*Ng. hastata* Golding & Orchard	*Neogondolella regale* Mosher	*Neogondolella* spp. or *Paragondolella* sp.	*Ng.* aff. *hastata* Golding & Orchard	post-Bithynian type *Neogondolella* sp.	*Celsigondolella* sp.	*Pg. excelsa* Group	*Pg. trammeri* Group	*Budurovignathus hungaricus* (Kozur & Vegh)	*Ng. aequidentata* Kozur et al.	*Ng. pridaensis* (Nicora)	*Cornudina breviramulis* (Tatge)	*Co. tortilis* (Kozur & Mostler)	*Paragondolella* sp.	*Cornudina* sp.	"*Nh. triassica* (Müller)"	"*Neohindeodella* sp."
AJR724+2.4m																											1		2	1	1			3 (13)	(1)	3	
AJR724+1.9m																		1										2			1	3	7 (8)		3	5
AJR722																											1 1	1				1	6 (2)			1
AJR669																												1				1	1		1	
AJR630																												3					3 (2)	(1)	1	
AJR603-605																											2	1					3 (2)			
AJR577																	3 2									1	3						1 (2)		2	
AJR517																1	5									1	(1)	1				2	6 (1)		3	1
AJR408																	3										(3)						3		3	
AJR377																																			2	
AJR310																	3									1							1			

170627-03																	1				6	2	2	4	2	5	2	5	3		
170627-02															2		3			2		2					1	1 (1)	1	1	
AJR144																1	1	7			1							(1)		2	
AJR101																		2 1	1												
AJR 0														2	1	1	3	3									1			1	2
Ajr-01																		1													
160818-02	no identifiable elements																														
170627-01	no identifiable elements																														
151015-08.5																		1													
AjL1-B						2							1																		2
AjL1-A						1			1			1																			
160819-03			1		8 1	5				2	1				1																3
151005-13			1		9	12		2 1	2		3	1		1																	5
AjL-B			1		2	5					1																				2
AjL-A					1 1	2																									
150616-29			1	1	1 1	2	1		(1)					1																	
151005-03								1																							
150615-27	no identifiable elements																														
150614-06			1 (1)			1 1									1																
AjL-C	1	1	1		2	1																									5
150615-21			2	1	3	1																									

with chert in the AJ-1, AJ-2 and AJ3-1 sections include many adult specimens, but conodonts from the bedded chert in the AJR section are mostly juvenile forms. Especially, species of *Paragondolella*, which occurred abundantly from the AJR section, are almost entirely represented by juvenile stages with incomplete platform development.

Species belonging to the genus *Paragondolella* are difficult to distinguish in juvenile forms. Identification of our specimens is further hindered by the fact that they are partly immersed in the host rock. Hence, in the case of specimens of *Paragondolella*, we referred to a group of species that share some important morphological characters (see the palaeontological notes in Chapter 9 for details). Specifically, three "Groups" are used in this paper: the *Paragondolella bulgarica* Group (*Pg. bulgarica*, *Paragondolella bifurcata* and *Paragondolella hanbulogi*), the *Paragondolella excelsa* Group (*Pg. excelsa*, *Paragondolella fueloepi* and *Paragondolella liebermani*), and the *Paragondolella trammeri* Group (*Pg. trammeri* and *Paragondolella alpina*). Note that these "Groups" do not necessarily represent taxonomic lineages.

Based on the occurrence of conodonts, six conodont biozones were recognised in the Ajiro Island section: the *Novispathodus brevissimus-Icriospathodus collinsoni* Zone, the *Triassospathodus homeri* Zone, the *Chiosella timorensis* Zone, the *Pg. bulgarica* Zone, the *Pg. excelsa* Zone and the *Pg. trammeri* Zone in ascending order (Fig. 9).

The *Nv. brevissimus-I. collinsoni* Zone is characterised by the occurrence of *Nv. brevissimus* and *I. collinsoni.* Its base is not defined in the Ajiro Island section and its top is defined by the last occurrence (LO) of the two species. This zone is recognised in the lowermost part of the AJ-1 section (Fig. 9). Other associated species are *Novispathodus abruptus*, *Novispathodus symmetricus* and *T. homeri*.

The *T. homeri* Zone is characterised by the occurrence of *Nv. abruptus*, *Nv. symmetricus* and *T. homeri*. Its base is defined by the LO of *Nv. brevissimus* and *I. collinsoni* and its top is defined by the first occurrence (FO) of *Ch. timorensis*. This zone is recognised in the main part of the AJ-1 section and the lower part of the AJ-2 section (Fig. 9). Other associated species are *Chiosella gondolelloides*, *Triassospathodus anhuinensis* and "*Neohindeodella benderi*".

The *Ch. timorensis* Zone is characterised by the occurrence of *Ch. timorensis*. Its base is defined by the FO of the nominal species and its top is defined by the FO of the *Pg. bulgarica* Group. This zone is recognised in the AJ-3-1 section (Fig. 9). *T. homeri* also occurred from this zone.

The *Pg. bulgarica* Zone is characterised by the occurrence of the *Pg. bulgarica* Group. Its base is defined by the FO of the *Pg. bulgarica* Group and its top is defined by the FO of the *Pg. excelsa* Group. This zone is recognised in the AJ-3-2 section and the lower to middle part of the AJR section (Fig. 9). "*Nh. benderi*", *Cornudina*? *igoi* and "*Kamuellerella gebzeensis*" occurred from the lower part of this zone. The middle part of this zone yielded *Neogondolella* cf. *hastata*, in addition to *Ng*. aff. *hastata* and *Neogondolella* cf. *regale*, as well as species of *Neogondolella* with a large cusp that is fused to the posterior platform brim (post-Bithynian type *Neogondolella*; detailed explanation in Section 5.3.). Other associated species are *Cornudina breviramulis*, "*Neohindeodella aequiramosa*" and "*Neohindeodella triassica*".

The *Pg. excelsa* Zone is characterised by the occurrence of the *Pg. excelsa* Group. Its base is defined by the FO of the *Pg. excelsa* Group and its top is defined by the FO of the *Pg. trammeri* Group. This zone is recognised in the upper part of the AJR section (Fig. 9). Other associated conodonts are the *Pg. bulgarica* Group, *Co. breviramulis*, "*Nh. aequiramosa*" and "*Nh. triassica*".

The *Pg. trammeri* Zone is characterised by the occurrence of the *Pg. trammeri* Group. Its base is defined by the FO of the *Pg. trammeri* Group and its top is defined by the FO of *Budurovignathus* cf. *hungaricus*. This zone is recognised in the uppermost part of the AJR section (Fig. 9). Other associated conodonts are the *Pg. excelsa* Group, *Co. breviramulis*, *Cornudina tortilis* and "*Nh. triassica*". At the top of this zone, *Neogondolella aequidentata* and *Neogondolella pridaensis* co-occurred with *B.* cf. *hungaricus*.

4. 2 Kurusu section

4. 2. 1 Field mapping

The Kurusu section is exposed on the east bank of the Kiso River in Kurusu, Inuyama City, Aichi Prefecture, Chubu District (Fig. 3). Strata in this outcrop are deformed by many faults and folds (Fig. 10). The outcrop is divided into two parts that have different lithology by a fault ("dividing fault" in Fig. 10). The eastern part includes the area mapped by Yao and Kuwahara (1997), and the section observed in this part of the outcrop is named the Kr-2-YK section (Fig. 10). The western part was studied by Ikeda *et al.* (2010), and the section observed here is named the Kr-2-I section.

The outcrop of the Kr-2-YK section has a complicated geological structure (Fig. 10). The orientation of the bedding plane is variable due to folding. Tracing of characteristic black claystone and black chert beds revealed that the lower part of this section is repeated by folds. In some parts, the bedding of the strata was difficult to identify due to strong deformation. The Kr-2-YK section was observed in parts of the outcrop where deformation was minimal, which include the area studied by Yao and Kuwahara (1997). The Kr-2-YK section is composed mainly of grey bedded chert with intercalations of grey siliceous claystone (Fig. 11A). Black claystone and black chert beds also occur in several horizons. The transition between grey chert layers and grey siliceous claystone layers is gradual. Therefore, the contrast

between the chert layers and the siliceous claystone layers is not strongly expressed in the configuration of the outcrop surface. This may have led to the description of the strata as "siliceous claystone" by Yao and Kuwahara (1997). However, the rocks have moderate vitreous luster and are not fissile, which indicate that its lithology is better described as chert. This is further supported by the presence of numerous radiolarian tests and quartz matrix confirmed in thin sections (Fig. 11D). Dolomite occurs as beds or planar nodules in two horizons. The lithology of the Kurusu section deserves further detailed observation, because it likely represents a transitional lithofacies between the Lower Triassic siliceous claystone ("Toishi"; Imoto, 1984) and Middle Triassic bedded chert. However, it is beyond the scope of this paper, and we will tentatively refer to the chert beds that grade into siliceous claystone as "muddy" chert.

The section studied by Yao and Kuwahara (1997), which corresponds directly to the upper 7 m of the Kr-2-YK section, was regarded as continuous in the previous studies. However, a fault was identified in the middle part of this interval (Fig. 11C). This fault is accompanied by a highly deformed sheared zone on both sides of the fault plane. Therefore, the displacement and consequent stratigraphic gap of this fault could be considerable.

The Kr-2-I section is composed mainly of "muddy" chert with intercalations of black claystone (Figs. 10, 11B). Intense folding such as that observed in the outcrop of the Kr-2-YK section is not observed in this part of the outcrop. However, the strata have experienced significant deformation, represented by the distortion of the bedding by numerous cm-scale faults and slip planes (Fig. 11B). The Kr-2-I section corresponds almost exactly to the section reported by Ikeda *et al.* (2010), but was not observed in exactly the same part of the outcrop, because some parts that they observed had become covered by thick gravel. Ikeda *et al.* (2010) assumed that the stratigraphic way up in this section is to the northeast. However, the general younging of the strata is to the southwest in this part of the Inuyama area (see Section 2.2.), which is consistent with outcrop-scale biostratigraphy in the Kurusu section (Yao and Kuwahara, 1997). Therefore, it would be more orthodox to assume that the stratigraphic way up is to the southwest, which will be adopted in this study. Nonetheless, it should be noted that the way up in the Kr-2-I section remains indeterminate, even considering our biostratigraphic data presented in Subsection 4.2.2.

4. 2. 2 Conodont biostratigraphy

Conodonts were found from all of the investigated samples (more than 200 specimens in total). Conodonts occurred as dark grey skeletons. Although most conodonts were broken, 28 specimens were identified at the species level (Table 2; Plates 8–10). Since conodont occurrence from the Kurusu section is sporadic, independent zonation for this section will not be defined. Instead, we will refer to the conodont biozones recognised in the Ajiro Island section (Fig. 12).

The Kr-2-YK section yielded *Ch. timorensis* and "*Nh. aequiramosa*". These conodonts indicate that the Kr-2-YK section is mostly correlative to the *Ch. timorensis* Zone.

The Kr-2-I section yielded *Nv. symmetricus*, *T. homeri*, *Ch. gondolelloides* and "*Nh. benderi*". These conodonts indicate that the Kr-2-I section is referable to the *T. homeri* Zone. *Co. breviramulis*, *Co.*? *igoi*, *Neostrachanognathus tahoensis* and "*K. gebzeensis*" also occurred from this section. Since the Kr-2-YK section is referable to the *Ch. timorensis* Zone, the Kr-2-I section is stratigraphically below the Kr-2-YK section. Ikeda *et al.* (2010) and Ikeda and Tada (2014) argued that the Kr-2-I section and Section M of Sugiyama (1997) in the Inuyama area can be partly correlated by key beds to produce a continuous lithostratigraphy, based on the assumption that the Kr-2-I section is equivalent to the Kr-2-YK section. However, since the Kr-2-I section does not overlap with the Kr-2-YK section, their correlation is not valid. Consequently, the lowermost part of the composite section of the Inuyama bedded chert by Ikeda *et al.* (2010) and Ikeda and Tada (2014) that concerns the Kr-2-I section is not continuous.

5. Age assignment of the conodont biozones

5. 1 The Lower-Middle Triassic (Olenekian-Anisian) boundary (OAB)

The global boundary stratotype section and point (GSSP) for the Olenekian-Anisian boundary (OAB) is yet to be ratified. The Desli Caira section in north Dobrogea, Romania has been proposed as a candidate (Gradinaru *et al.*, 2007), while the Guandao section in Guizhou Province, South China is a potential reference section (Ogg, 2012). The OAB is classically defined by the ammonoid *Japonites welteri* (Balini *et al.*, 2010; Bucher, 1989). This has been applied to the Desli Caira section (Gradinaru *et al.*, 2007), but the Guandao section lacks a significant ammonoid fauna (Ogg, 2012). On the other hand, Orchard *et al.* (2007a, b) and Orchard (2010) proposed that the first appearance datum (FAD) of *Chiosella timorensis*, that occurs readily from both Desli Caira and Guandao, can be used as a marker for the OAB. Subsequently, Goudemand *et al.* (2012) concluded that the FAD of *Ch. timorensis* is very close to, but is slightly below the ammonoid-defined OAB and is within the uppermost Spathian. Based on high-resolution investigation of conodont biostratigraphy in the Desli Caira section and the Guandao section, Goudemand *et al.* (2012) placed the OAB above the FAD of *Ch. timorensis* and below the last appearance datum (LAD) of *Novispathodus symmetricus* and *Triassospathodus homeri*, so that the ammonoid based age assignment (Bucher, 1989) is followed. Our definition of the OAB will follow that by Goudemand *et al.* (2012).

In the Ajiro Island section, the first occurrence (FO) of *Ch. timorensis* and the last occurrence (LO) of *T. homeri* are both at the level of Sample AjL1-B, which is the base of the *Ch. timorensis* Zone (Fig. 9). Therefore, the OAB

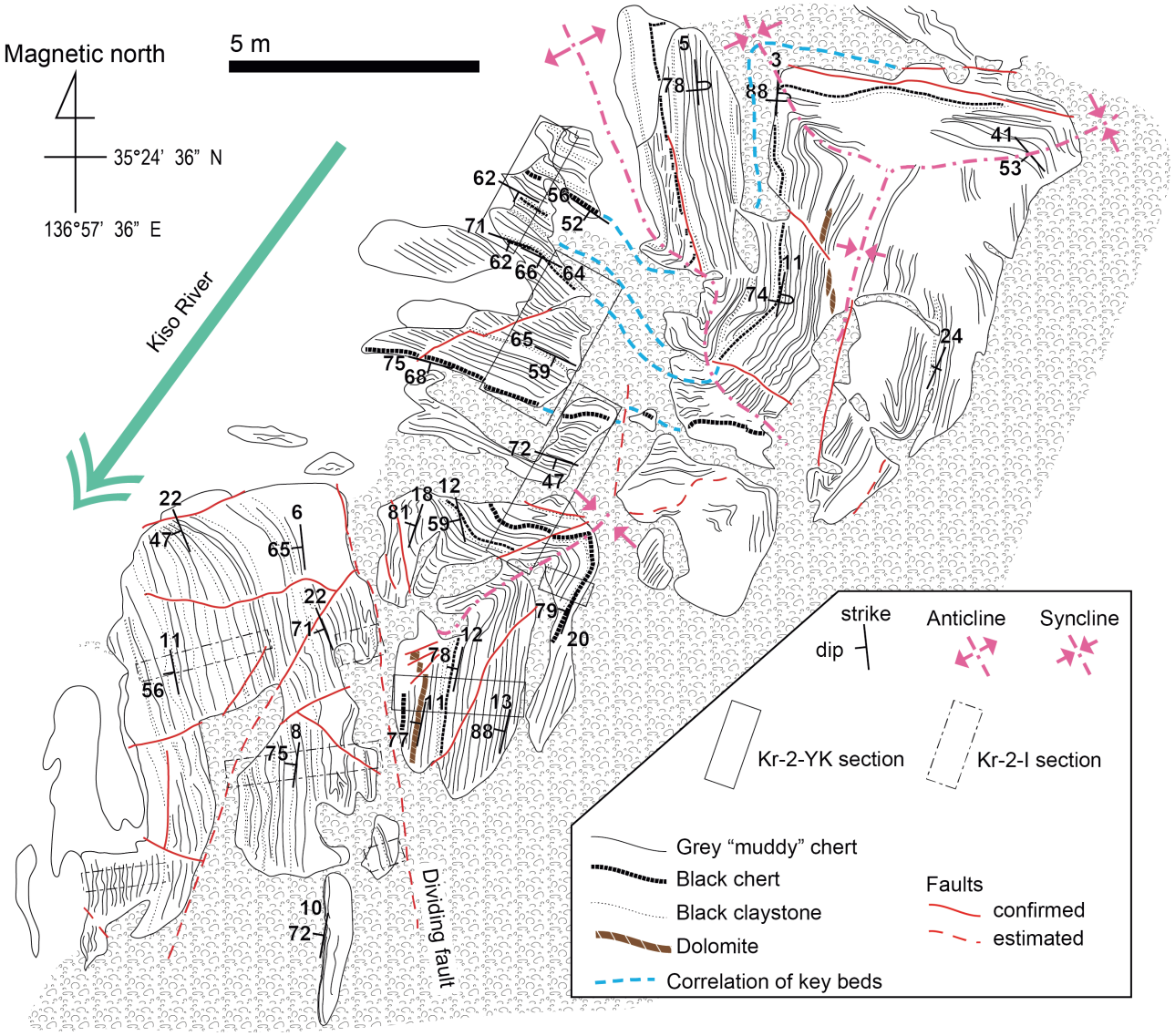


Fig. 10 Geological map of the outcrop of the Kurusu section. Note that the Kr-2 section of Yao and Kuwahara (1997) and Ikeda *et al.* (2010) (Kr-2-YK and Kr-2-I sections, respectively) correspond to different parts of the outcrop.

is placed between the level of Sample AjL1-B and the level of Sample AjL1-A. The placement of the OAB at the base of the *Ch. timorensis* Zone indicates that the underlying *Novispathodus brevissimus-Icriospathodus collinsoni* Zone and the *T. homeri* Zone are of Olenekian age. The occurrence of *Nv. brevissimus* and *I. collinsoni* is confined to the basal part of the Spathian (Chen *et al.*, 2015; Koike, 1981, 2004; Orchard, 1995, 2007; Zhao *et al.*, 2007). Therefore, the *Nv. brevissimus-I. collinsoni* Zone is correlated to the lower Spathian, and the succeeding *T. homeri* Zone to the upper Spathian.

In the Kurusu section, *Nv. symmetricus* and *T. homeri* did not co-occur with *Ch. timorensis*. Therefore, the interval referred to the *Ch. timorensis* Zone in this section is likely to be of Anisian age. Thus, the OAB is in the lower 1 m or below the base of the Kr-2-YK section (Fig. 12).

The thickness of the *Ch. timorensis* Zone is different between the Ajiro Island and Kurusu sections. An explanation can be given by the slip plane between the AJ-3-1 section and the AJ-3-2 section at Ajiro Island. That is, lowermost Anisian strata are missing at the slip plane above the *Ch. timorensis* Zone in the Ajiro Island section. If this is the case, the *Ch. timorensis* Zone in the Kurusu section mostly corresponds in age to an interval that is missing at the slip plane in the Ajiro Island section.

5. 2 The Anisian-Ladinian boundary (ALB)

The Anisian-Ladinian boundary (ALB) was ratified at the base of the *Eoprotrachyceras curionii* ammonoid zone in the Bagolino section in Brescia, Northern Italy (Brack, 2010; Brack *et al.*, 2005). This horizon is above the FO of species belonging to the *Paragondolella trammeri* Group

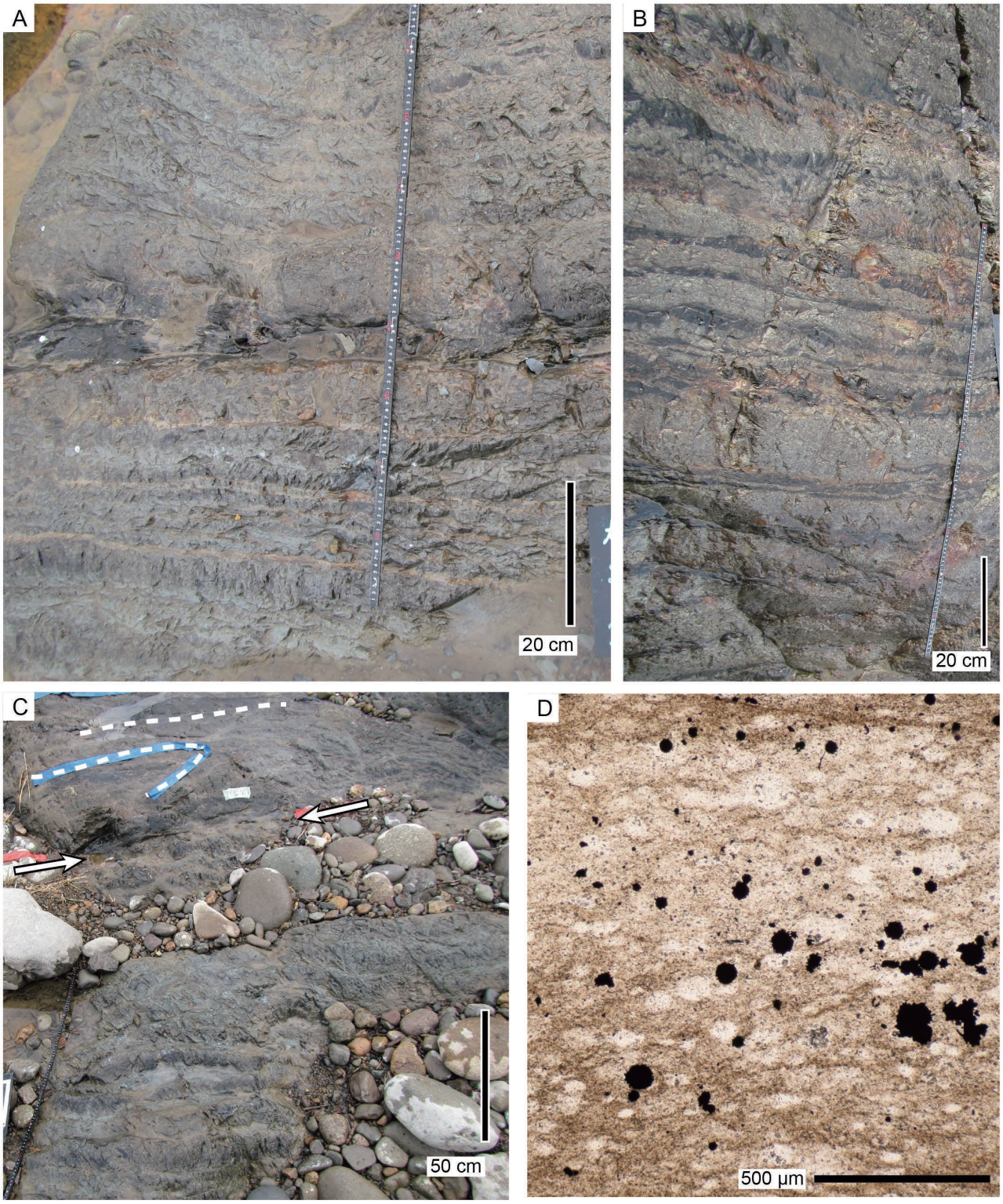


Fig. 11 (A–C) Outcrop photographs of the Kurusu section. (A) The Kr-2-YK section. (B) The Kr-2-I section. (C) The fault in the Kr-2-YK section. The fault runs between the arrows. Broken lines represent bedding planes. (D) Photo-micrograph of muddy chert from the Kr-2-YK section viewed in plane-polarised light.

Table 2 Occurrence list of conodonts from the Kurusu section. Underlined numbers indicate the number of conferred specimens. The species names denoted in quotation marks are form species defined based on discrete conodont elements.

	Cornudina breviramulis (Tatge)	*Cornudina? igoi* Koike	*Neostrachanognathus tahoensis* Koike	*Novispathodus symmetricus* (Orchard)	*Novispathodus* sp.	*Triassospathodus homeri* (Bender)	*Chiosella gondolelloides* (Orchard)	"*Kamuellerella gebzeensis* Gedik"	"*Neohindeodella benderi* (Kozur & Mostler)"	"*Nh. aequiramosa* Kozur & Mostler"	*Ch. timorensis* (Nogami)	*Chiosella* sp.	"*Neohindeodella* sp."
Kr2-YK section													
Kr1-02											2	1	
Kr1-03										1	1		
Kr1-04											3 1	3	1
Kr1-05	no identifiable elements												
Kr-2-I section													
Kr2-03					3	1	1	1	1			1	
Kr2-01	2	1	1	3	2	1	1		3 1				

and below the FO of *Budurovignathus hungaricus* (Brack *et al.*, 2005). The same is true for the ALB (the base of the *curionii* amonnoid zone) in the Balaton Highland, Hungary (Kovács, 1994). Therefore, the ALB can be placed within the *Pg. trammeri* Zone in the Ajiro Island section (Fig. 9). In the GSSP, the FO of the conodont *Budurovignathus praehungaricus* is very close to the ALB (Brack *et al.*, 2005), and provides a good correlation marker for the boundary (Chen *et al.*, 2016b; Ogg, 2012; Orchard, 2010). However, this species has not been found from the Ajiro Island section. Another potentially useful marker species is *Neogondolella aequidentata*, which has a short range straddling the ALB (Chen *et al.*, 2016b; Muttoni *et al.*, 2004; Orchard, 2010). In the Ajiro Island section, *Ng. aequidentata* occurred from the top of the *Pg. trammeri* Zone, suggesting that the ALB is near this horizon in the upper part of the zone.

5. 3 The Anisian substages

The Anisian Stage is divided into four substages: Aegean, Bithynian, Pelsonian and Illyrian in ascending order. The Aegean is characterised by *Ch. timorensis* all over the world (Chen *et al.*, 2016b; Lehrmann *et al.*, 2015; Nicora, 1977). In Europe and North America, the Bithynian is characterised by *Paragondolella bulgarica* (Nicora, 1977), and the Pelsonian is characterised by *Nicoraella kockeli* (Nicora, 1976; Pisa *et al.*, 1980). On the other hand, *Ni. kockeli* occurs from below the FO of *Pg. bulgarica* in South China (Lehrmann *et al.*, 2015). Hence, the stratigraphic order of the FOs of these species requires further investigation, and the recognition of the Pelsonian based on the occurrence of *Ni. kockeli* may not be valid on the global scale. In any case, the occurrence of *Ni. kockeli* from our studied sections is too sporadic to determine substage boundaries. Therefore, we refrain from conclusively determining the Bithynian-Pelsonian boundary. Based on the fact that species of the *Paragondolella excelsa* Group characterises the Illyrian (Kozur, 1980), the *Pg. bulgarica* Zone is correlated to the Bithynian to Pelsonian interval, and the *Pg. excelsa*

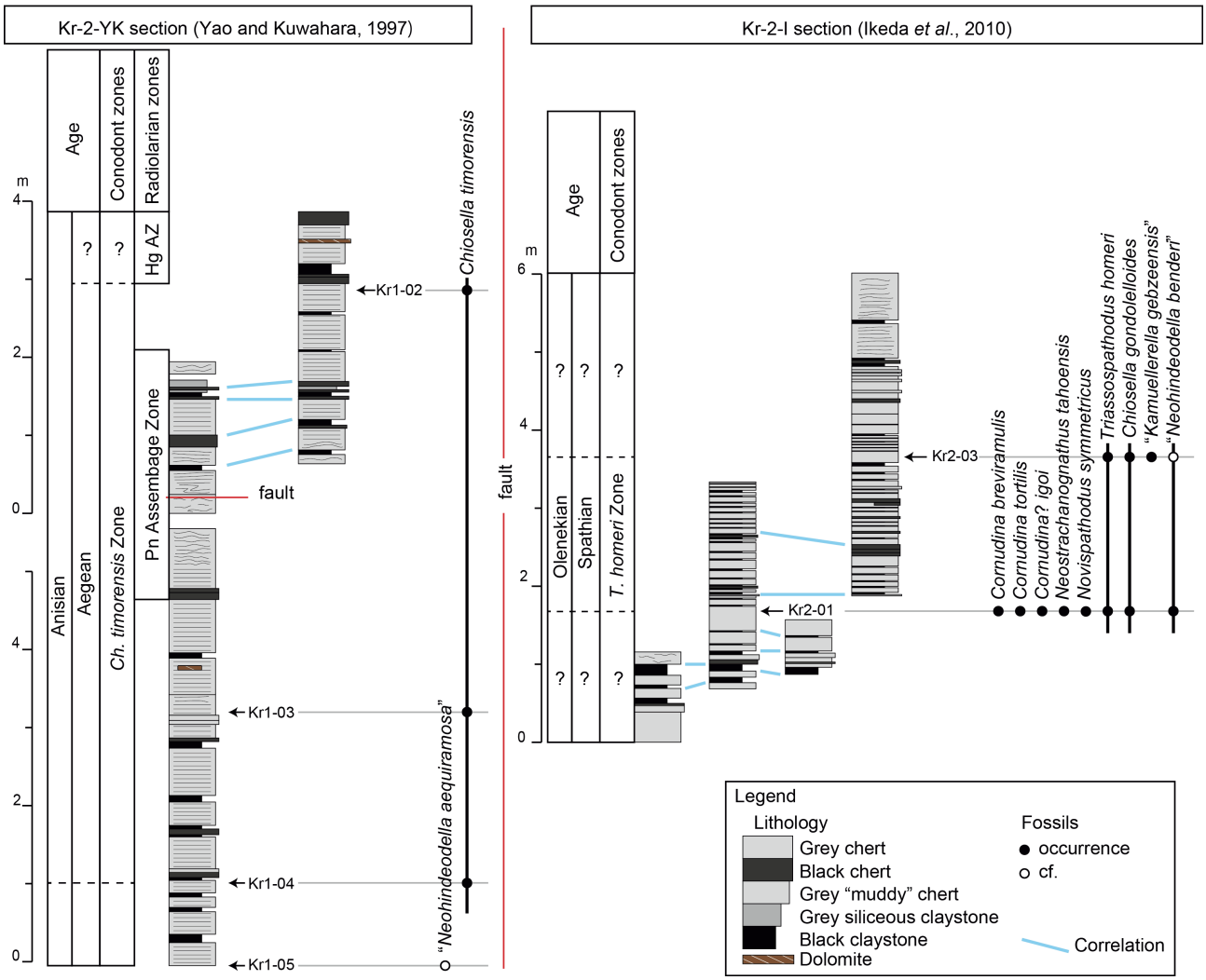


Fig. 12 Lithostratigraphy and conodont occurrence of the Kurusu section. The radiolarian biozones for the Kr-2-YK section are after Yao and Kuwahara (1997). Pn Assemblage Zone: *Parentactinia nakatsugawaensis* Assemblage Zone. Hg AZ: *Hozmadia gifuensis* Assemblage Zone. The species names denoted in quotation marks are form species defined based on discrete conodont elements.

Zone to the lower Illyrian (the Illyrian likely extends to the lower part of the *Pg. trammeri* Zone; see section 5.2) (Fig. 9).

It is notable that a type of *Neogondolella* characteristic to the Pelsonian and younger age occurs from the upper part of the *Pg. bulgarica* Zone. These are species of *Neogondolella* that possess a large cusp that is fused to the posterior platform margin and occupies the posterior end of the element. Such forms can be referred to species such as *Neogondolella cornuta*, *Neogondolella constricta* and *Neogondolella shoshonensis*. In fact, some of our specimens have characteristics that may be referable to *Ng. shoshonensis* (Plate 3, Figs. 5, 6). The species of *Neogondolella* mentioned above are known only from the Pelsonian and younger strata (Chen *et al.*, 2016b). Therefore, we refer to them as post-Bithynian type *Neogondolella*. In the Ajiro Island section, the FO horizon of the post-Bithynian type *Neogondolella* is sample 170627-03 and the Bithynian-Pelsonian boundary may be placed at this horizon (Fig. 9).

6. Age calibration of the radiolarian biozones

According to the radiolarian zonation proposed by Sugiyama (1997), the OAB was regarded to be correlative to the TR 1-TR 2A radiolarian biozone boundary, and the ALB to the TR 3A-TR 3B radiolarian biozone boundary. Our conodont-based age control proved that the age assignment is erroneous for the TR 1-TR 2A boundary, and probably also for the TR 3A-TR 3B boundary (Fig. 13). In the following text, the age calibration of the radiolarian biozones TR 1 to TR 3B (Sugiyama, 1997) is discussed in ascending order.

In the Ajiro Island section, the TR 1 Zone was

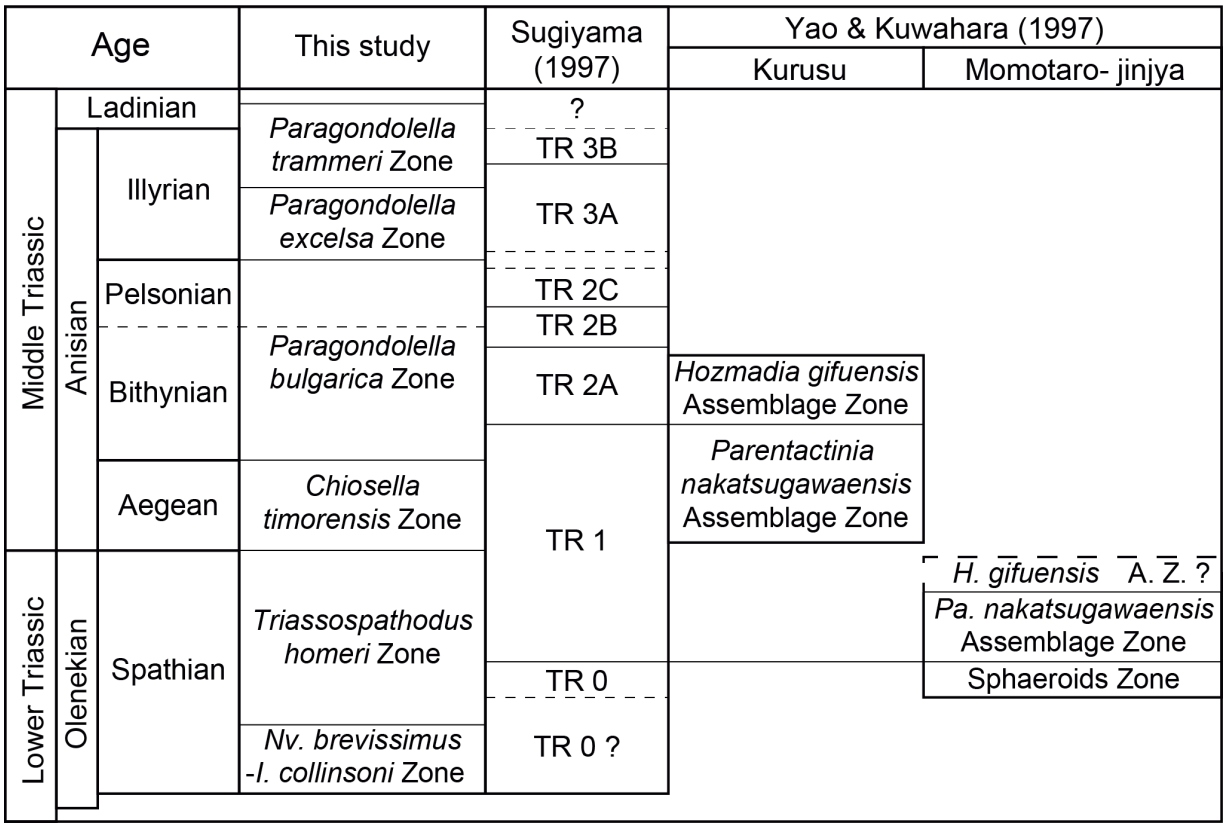


Fig. 13 Age calibration of the Anisian radiolarian biozones. Dashed lines represent uncertain boundaries. The *Nv. brevissimus-I. collinsoni* Zone was not recognized in the sections of Sugiyama (1997), but is inferred to be encompassed in the TR 0 Zone, because conodonts from the Momotaro-jinja section indicate that the TR 0 Zone extends to the Smithian (Yamakita *et al.*, 2010).

recognised in the *Paragondolella bulgarica* Zone, well above the OAB (Onoue *et al.*, 2011; Uno *et al.*, 2012) (Fig. 9). In the Kurusu section, the TR 1-TR 2A boundary is approximated by the boundary between the *Parentactinia nakatsugawaensis* Asemblage Zone and the *Hozmadia gifuensis* Assemblage Zone (Yao and Kuwahara, 1997), which is well above the base of the *Chiosella timorensis* Zone (Fig. 12). Thus, the TR 1 Zone includes part of the *Pg. bulgarica* Zone, which is of Bithynian to Pelsonian age. This age assignment is consistent with the finding of a radiolarian assemblage indicating the TR 1 Zone from the Bithynian to Pelsonian interval in the pelagic deep-sea Ogama section in Kuzuu, Tochigi Prefecture, Japan (Muto *et al.*, 2018). On the other hand, pelagic deep-sea siliceous claystone correlative with the TR 1 Zone and the underlying TR 0 Zone in the Momotaro-jinja section in the Inuyama area (Sugiyama, 1997; Yao and Kuwahara, 1997) yielded Spathian conodonts *Novispathodus symmetricus* and "*Neohindeodella benderi*" (Takahashi *et al.*, 2009). Based on data of the Ajiro Island section, the Kurusu section and the Momotaro-jinja section, the TR 1 Zone is correlated to the upper Spathian to the lower part of the Bithynian to Pelsonian interval, and the OAB is within this zone (Fig. 13).

The entire part of the TR 2A and TR 2B Zones and most of the TR 2C Zone is encompassed in the *Pg. bulgarica* Zone, and is correlated to the Bithynian to Pelsonian interval (Figs. 9, 13). This age assignment is consistent with the occurrence of *Pg. bulgarica* from the TR 2B and TR 2C Zones reported from bedded chert sections in the Inuyama area (Mizutani and Koike, 1982; Sugiyama, 1997). If the placement of the Bithynian-Pelsonian boundary at the FO of post-Bithynian type conodonts in the Ajiro Island section is correct, this boundary is within the TR 2B Zone (Figs. 9, 13). The TR 3A Zone is mostly correlated to the Illyrian *Paragondolella excelsa* Zone, but its base may be within the uppermost part of the *Pg. bulgarica* Zone, and its top is in the basal part of the *Paragondolella trammeri* Zone (Figs. 9, 13). It is possible that the upper part of the TR 3A Zone extends into the Ladinian (Fig. 13), but this is unlikely given that the ALB is probably in the upper part of the *Pg. trammeri* Zone (detailed in Section 5.4.).

The top of the TR 3B Zone was not recognised in the Ajiro Island section (Onoue *et al.*, 2011; Uno *et al.*, 2012). We assume that only the lower part of the TR 3B Zone of Sugiyama (1997) is present in the Ajiro Island section, because it lacks radiolarians such as *Triassocampe*

postdewerveri that appear in the upper part of the TR 3B Zone (Onoue *et al.*, 2011; Uno *et al.*, 2012). The lower part of the TR 3B Zone is within the *Pg. trammeri* Zone, and therefore falls within the upper Illyrian to the lower Fassanian (lower substage of the Ladinian). Since the ALB is probably in the upper part of the *Pg. trammeri* Zone, the lower part of the TR 3B Zone is likely to be correlative to the upper Illyrian (uppermost Anisian). Unfortunately, radiolarian biostratigraphy has not been investigated for the upper part of the *Pg. trammeri* Zone. Therefore, we cannot determine whether the TR 3B Zone extends above the top of the *Pg. trammeri* Zone. Further study is needed in order to clarify the age of the top of the TR 3B Zone.

7. Correlation with rock magnetic records

The Ajiro Island section has been studied for rock magnetic records by Uno *et al.* (2012), who recognised two magnetic polarity zones in the red bedded chert. A reference record of Middle Triassic magnetic reversals was compiled by Hounslow and Muttoni (2010) based mainly on sedimentary records of the Tethys, many of which have been studied also for conodont biostratigraphy. We attempted to correlate the rock magnetic records of the Ajiro Island section to the reference record by Hounslow and Muttoni (2010) based on the framework of conodont biostratigraphy (Fig. 14). However, a single solution was not obtained and there are two possible options, as detailed below.

In Option 1 (Fig. 14A), polarity zone β in the Ajiro Island section is correlated to the reversed polarity in magnetozone MT4 to MT5. The two stratigraphically isolated intervals of polarity zone α are either correlated to the two separate normal polarities in magnetozones MT6 and MT7, or together correlated to the normal polarity in magnetozone MT7. In this case, the ALB in the Ajiro Island section is above polarity zone α and below the FO of *Budurovignathus* cf. *hungaricus*, within the upper 1.5 m of the *Pg. trammeri* Zone. This option agrees with Uno *et al.* (2012) in that polarity zone α is correlated to a normal polarity and polarity zone β to a reversed polarity, suggesting deposition in the southern hemisphere.

In Option 2 (Fig. 14B), polarity zone β in the Ajiro Island section is correlated to the normal polarity in magnetozone MT6, whereas zone α of the Ajiro Island section is correlated to the reversed polarity in magnetozones MT6 to MT8. In this case, the ALB is placed in the lower part of the *Paragondolella trammeri* Zone, ~1 m above its base. This option assumes that polarity zones α and β are correlated to reversed and normal polarities, respectively, contradictory to Uno *et al.* (2012). Hence, this option suggests the deposition of the bedded chert of the Ajiro Island section took place in the northern hemisphere.

The ambiguity in the correlation of mangnetic polarities results mainly from two reasons. Firstly, the gaps in the polarity zones in the Ajiro Island section due to the difficulty in recovering primary magnetic records from deep-sea chert (Uno *et al.*, 2012) allow a considerable amount of speculation in the correlation. Another reason is the lack of both biostratigraphic and magnetostratigraphic data within the MT6 magnetozone of the reference magnetostratigraphy from the Tethys sections (Hounslow and Muttoni, 2010). Thus, further studies in both the Panthalassic deep-sea sections in Japan and the reference Tethyan sections are required to establish a conclusive correlation of integrated Anisian bio-magnetostratigraphy between the two regions.

8. Conclusions

We investigated conodont biostratigraphy in the Ajiro Island section in Oita Prefecture and the Kurusu section in Aichi Prefecture. Six conodont biozones were recognised: the lower Spathian *Novispathodus brevissimus-Icriospathodus collinsoni* Zone, the upper Spathian *Triassospathodus homeri* Zone, the Aegean *Chiosella timorensis* Zone, the Bithynian to Pelsonian *Paragondolella bulgarica* Zone, the lower Illyrian *Paragondolella excelsa* Zone, and the upper Illyrian to basal Fassanian *Paragondolella trammeri* Zone, in ascending order. The age of the radiolarian biozones previously recognised in the studied sections were assigned based on conodont biostratigraphy. The TR 1 Zone was assigned to the upper Spathian to Bithynian (or Pelsonian) and thus the Olenekian-Anisian boundary is within this zone. The TR 2A Zone, the TR 2B Zone and most of the TR 2C Zone are correlated to the Bithynian to Pelsonian interval. The uppermost part of the TR 2C Zone and the lower part of the TR 3A Zone are definitely correlated to the Illyrian. The upper part of the TR 3A Zone and the lower part of the TR 3B Zone fall within the upper Illyrian to the basal Fassanian, while the possibility that both intervals are correlative to the upper Illyrian is more likely. The Anisian-Ladinian boundary is within the TR 3B Zone or above it, and further study is needed to clarify its position relative to the radiolarian biozones. Our conodont data are helpful in correlating the magnetic polarity zones detected from the Ajiro Island section to the reference magnetostratigraphy of the Triassic obtained in the Tethys realm. Further studies will establish an integrated bio-magnetostratigraphic correlation between the pelagic Panthalassic deep-sea sections and the Tethyan sections.

9. Palaeontological notes

(Form species defined by discrete elements rather than multi-element apparatuses are shown in quotation marks.)

Budurovignathus* cf. *hungaricus (Kozur & Vegh)
(Plate 1, Figs. 1, 2.)

Epigondolella hungarica Kozur & Vegh in Kozur & Mock, 1972. p. 8–9, Plate 2, Figs. 3–7.

Remarks: This species is distinguished by a short free blade, a sinuous but unornamented platform and a posterior process. The platform margins are unornamented unlike

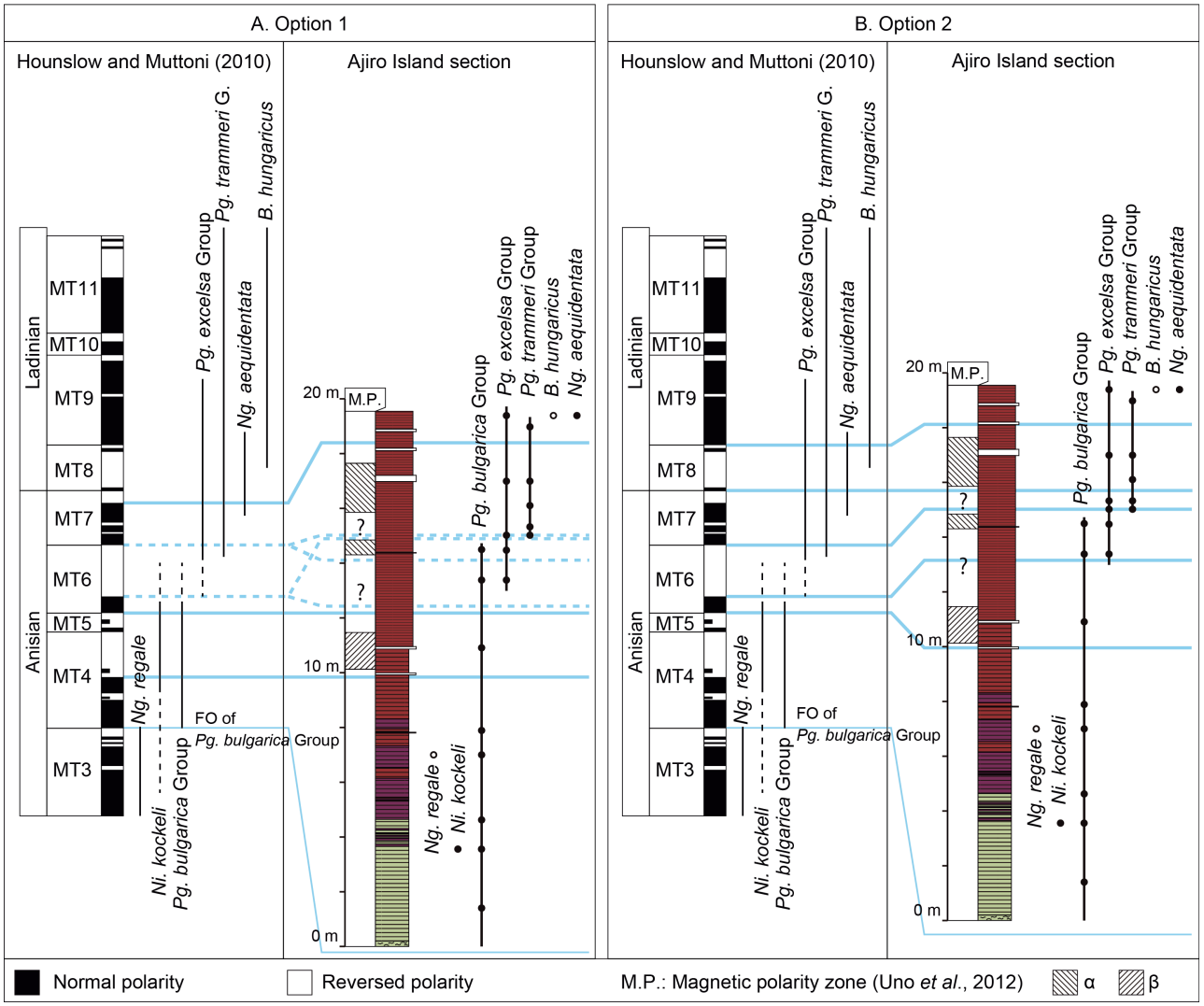


Fig. 14 Correlation of magnetic polarity zones in the Ajiro Island section (Uno *et al.*, 2012) to the reference magnetostratigraphy by Hounslow and Muttoni (2010). The range of *Ni. kockeli*, *Pg. bulgarica* Group and *Pg. excelsa* is not well understood in magnetozone MT6, but they are known to overlap to some extent (Kovács, 2011; Kozur, 1980). See Fig. 9 for legends of lithofacies and fossil occurrence.

younger species of *Budurovignathus*.

The specimen illustrated in Plate 1, Fig. 1 has a short free blade and a sinuous but unornamented platform. The posterior denticles are broken, and therefore the presence of a posterior process is not confidently confirmed. The specimen illustrated in Plate 1, Fig. 2 has a sinuous platform and a posterior process extending behind the basal pit, which are characteristics of *Budurovignathus*. The posterior platform margin is not pointed, which is a characteristic only seen in *B. hungaricus*. The anterior part is broken, and therefore the presence of a free blade cannot be confirmed.

Chiosella gondolelloides (Bender)
(Plate 1, Figs. 3, 4, Plate 9, Figs. 1, 2.)
Spathognathodus gondolleloides Bender, 1970. p. 529–530, Plate 10, Figs. 17, 19, 20.
Neospathodus gondolleloides (Bender). Orchard, 1995. p. 115, Figs. 2.4, 2.5.

Remarks: The specimens are pectiniform elements characterised by a faint mid-lateral rib. *Chiosella timorensis* is similar to *Ch. gondolelloides*, but the former has a more developed mid-lateral rib that rises sharply from the blade, a higher length: height ratio (greater than 2.5:1) and a smaller basal cavity. *Ch. gondolelloides* is similar to *Triassospathodus homeri*, *Triassospathodus brochus* and *Novispathodus symmetricus* in lateral profile, but the former can be distinguished from the latter three species by the presence of a mid-lateral rib. *Ch. gondolelloides* differs from *T. brochus* also in having more fused denticles.

Chiosella timorensis (Nogami)

(Plate 1, Fig. 5, Plate 8, Figs. 1–6.)

Gondolella timorensis Nogami, 1968. p. 127–128, Plate 10, Figs. 17–21.

Neogondolella timorensis (Nogami). Koike, 1981. Plate 2, Fig 7.

Chiosella timorensis (Nogami). Goudemand *et al.*, 2012. Figs. 2.1–14, 3.1–8.

Remarks: The specimens are pectiniform elements characterised by a prominent mid-lateral rib, small basal cavity and increasingly inclined denticles at the posterior end. The specimen illustrated in Plate 1, Figure 5 is a juvenile form, which is shorter and has a less prominent mid-lateral rib compared with adult forms. The basal cavity, which is terminally located, is relatively small. The specimen is similar to juvenile forms of *Ch. gondolelloides*, *T. homeri*, *T. brochus* and *Nv. symmetricus*, but can be distinguished from the latter four species by the narrower basal cavity.

Cornudina breviramulis (Tatge)

(Plate 1, Figs. 6–8, Plate 9, Figs. 3, 4.)

Ozarcodina breviramulis Tatge, 1956. p. 139, Plate 5, Figs. 12.

Cornudina breviramulis (Tatge). Koike, 1996. p. 118–119, Figs. 3.1–3.21.

Cornudina breviramulis (Tatge). Koike, 2016. p. 168–170, Figs. 4.1–4.3.

Remarks: The specimens are angulate pectiniform elements with a thick long cusp and short anterior and posterior processes. The anterior process bears up to four small discrete denticles that increase in size and inclination to the posterior. The posterior process bears up to three denticles that are smaller than those of the anterior process.

Cornudina tortilis Kozur & Mostler (Plate 2, Figs. 2, 3.)

Cornudina tortilis Kozur & Mostler, 1970. p. 432–433, Plate 1, Figs. 10, 16, 20, 24.

Cornudina tortilis Kozur & Mostler. Koike, 1981. Plate 1, Fig. 34.

Remarks: The specimens are characterised by a short anterior process and a very long and curved cusp. The posterior process bears small denticles of equal size. *Cornudina tortilis* is considered to be the P2 element of *Co. breviramulis* (Koike, 1996, 2016).

Cornudina*? *igoi Koike

(Plate 1, Fig. 9, Plate 2, Fig. 1, Plate 9, Fig. 5.)

Cornudina igoi Koike, 1996. p. 119–120, Figs. 4.1–4.20.

Remarks: The specimens identified as this species is distinguished by a long cusp and a very short anterior process that bears only two denticles. Although this species may not belong to the genus *Cornudina*, which typically has a posterior process, it is tentatively included in this genus following the original description.

Icriospathodus collinsoni (Solien) (Plate 2, Fig. 5.)

Neospathodus collinsoni Solien, 1979. p. 302–303, Plate 3, Figs. 10, 12–20.

Neospathodus? *collinsoni* Solien. Koike, 1981. Plate 1, Figs. 42–44.

Remarks: *Icriospathodus collinsoni* (Solien) is a species characterised by a biserial row of denticles that form ridges extending laterally across the element, that commonly possess short lateral processes. Although the biserial nature of the denticles cannot be observed in lateral view, the ridge-like form of the denticles and the lateral process can be observed in the specimen illustrated in Plate 2, Fig. 5. This specimen also shows affinity to the holotype in that the element is relatively low and decreases height gradually to the anterior. The specimen illustrated in Plate 2, Fig. 6 also shows affinity to the holotype in lateral view, but the biserial nature and ridge-like form of the denticles cannot be confirmed.

"*Kamuellerella gebzeensis* Gedik" (form species)

(Plate 2, Fig. 4, Plate 9, Fig. 6.)

Kamuellerella gebzeensis Gedik, 1975. p. 124–125, Plate 8, Figs. 1, 2, 4.

Remarks: The specimens are bipennate ramiform elements characterised by an anterior process that is bent downwards and bears relatively high denticles, and a posterior process that bears numerous thin erect denticles.

Neogondolella aequidentata Kozur *et al.*

(Plate 2, Fig. 7.)

Neogondolella aequidentata Kozur *et al.*, 1994a. p. 278–279, Plate 2, Figs. 5–9.

Remarks: This species is characterised by a curved element with a platform that runs its entire length and a high carina of uniform height. The lateral platform margins are sub-parallel. *Neogondolella regale* also has a carina of uniform height, but it is not arched and it has more fused denticles.

Neogondolella* cf. *hastata Golding & Orchard

(Plate 2, Figs. 8–11.)

Neogondolella hastata Golding & Orchard, 2016. p. 1205–1206, Fig. 9.

Remarks: The specimens are characterised by a platform that extends from the anterior end to the anterior side of the base of the large terminal cusp and a uniform carina of discrete denticles. The platform is widest around mid-length. It does not surround the cusp, and terminates before the cusp in juvenile forms. The cusp is conspicuously higher and thicker than the other denticles.

Neogondolella* aff. *hastata Golding & Orchard

(Plate 3, Figs. 1, 2.)

Remarks: The specimens are similar to *Neogondolella hastata* in having a platform that is widest around mid-length and terminates at the anterior base of the conspicuously large cusp, and a relatively low carina of uniform height. However, their carina is composed of fused denticles as opposed to discrete denticles in *Ng.*

hastata. This species differs from *Ng. regale* in having a thick and high cusp.

Neogondolella pridaensis (Nicora, Kozur & Mietto) (Plate 3, Fig. 3.)

Neogondolella pridaensis Nicora *et al.*, 1981. p. 762–763, Plate 89, Figs. 1–9.

Remarks: The specimen is characterised by a reduced platform and a large terminal cusp. The platform terminates in a rib surrounding the posterior side of the cusp. The denticles are of even height and are fused. Species of *Paragondolella* differ from *Neogondolella pridaensis* in having a well-developed platform, which is particularly evident near the posterior end.

Neogondolella* cf. *regale Mosher (Plate 3, Fig. 4.)

Neogondolella regale Mosher, 1970. p. 741–742, Plate 110, Figs. 1, 2, 4, 5.

Neogondolella regale Mosher. Nicora, 1977. Plate 5, Figs 1–7.

Remarks: This species is distinguished by an almost straight element with a well-developed platform that runs almost its entire length, and a high carina of uniform height composed of moderately fused denticles. The platform has mostly uniform width throughout its length, and does not surround the terminal denticle. The specimens from the Ajiro Island sections show these characteristics, although they are partly not visible.

Neogondolella shoshonensis Nicora

Neogondolella shoshonensis Nicora, 1976. p. 640–642, Plate 83, Figs. 1–15, Plate 84, Fig. 17.

Remarks: This species is distinguished by a well-developed platform, a low carina that becomes extremely low around mid-length and an enormous, posteriorly reclined cusp with a large basal area that dominates the posterior end. Some of the specimens identified as "post-Bithynian type *Neogondolella*" (Plate 3, Figs. 5, 6) display the latter two features, but the platform is not well preserved. Therefore, the specific identification of these specimens is pending. Other specimens identified as "post-Bithynian type *Neogondolella*" (Plate 3, Figs. 7–9) are similar to *Ng. shoshonensis*, but some important characters are different or unconfirmed. The specimens illustrated in Plate 3, Fig. 7 and Fig. 8 have a large cusp and a very low carina, but the cusp does not recline posteriorly. The specimen illustrated in Plate 3, Fig. 9 has a very low anterior carina and an enormous cusp that reclines posteriorly, but the middle part of the carina is not visible.

"***Neohindeodella aequiramosa*** Kozur & Mostler" (form species) (Plate 3, Figs. 10, 11.)

"***Neohindeodella* cf. *aequiramosa*** Kozur & Mostler" (Plate 8, Fig. 8.)

Neohindeodella aequiramosa Kozur & Mostler, 1970. p. 445–446, Plate 2, Figs. 1, 2, 4, 5, 7, 8.

Neohindeodella aequiramosa Kozur & Mostler. Koike, 1982. Plate 8, Figs. 35–37.

Remarks: The specimens are bipennate ramiform elements characterised by an anterior process that bears relatively large, anteriorly reclined denticles. The basal margin is deflected downwards below the cusp and forms a convex down outline below the anterior process. The specimen illustrated in Plate 8, Fig. 8 is identical to "*Neohindeodella aequiramosa*" in the configuration of the basal margin and the denticulation of the anterior process, but its cusp and much of the posterior process is broken.

"***Neohindeodella benderi*** (Kozur & Mostler)" (form species) (Plate 3, Figs. 12, 13, Pl. 10, Figs. 1, 2.)

Hindeodella benderi Kozur & Mostler, 1970 p. 440–441, Plate 2, Figs. 10, 11, 13.

Neohindeodella benderi (Kozur & Mostler). Koike, 1981. Plate 1, Fig. 14.

Remarks: The specimens are bipennate ramiform elements marked by a short anterior process that is conspicuously downturned and bears an enormous denticle at the anterior end. Apart from this large denticle, there are no denticles or only one or two minute denticles on the anterior process.

This form species is identical to the S elements of the apparatus of *Neostrachanognathus* sp. A in Agematsu *et al.* (2008), which is referred to as *Neostrachanognathus tahoensis* in this paper.

"***Neohindeodella triassica*** (Müller)" (form species) (Plate 4, Fig. 1–3.)

Hindeodella triassica Müller, 1956. p. 826, Plate 96, Figs. 4, 5.

Neohindeodella triassica (Müller). Koike, 1981. Plate 1, Fig. 25.

Neohindeodella triassica (Müller). Koike, 1982. Plate 8, Figs. 21–30.

Remarks: The specimens are bipennate ramiform elements distinguished by a large cusp and denticles that are upright at the anterior and become reclined in the posterior part. The basal margin is convex under the cusp, and is relatively straight to the posterior. There is a short anterior process with relatively large denticles near the anterior end. "*Nh. aequiramosa*" differs from this species in the bending of the element below the cusp and the configuration of the basal margin, which is convex downwards below the anterior process and not below the cusp.

This form species is considered to be the S3/4 elements of *Cornudina breviramulis* (Koike, 2016), and also shows affinity to the S3 element of the apparatus of *Triassospathodus* reconstructed by Orchard (2005).

Neostrachanognathus tahoensis Koike.

(Plate 10, Fig. 3.)

Neostrachanognathus tahoensis Koike, 1998. p. 127–128, Figs. 9.10, 9.14, 9.16–23.

Neostrachanognathus sp. A. Agematsu *et al.*, 2008. Fig. 8.

Remarks: This specimen is a coniform element with a posteriorly elongated basal area. Agematsu *et al.* (2008)

redefined the original definition of *Neostrachanognathus tahoensis* by Koike (1998), and argued that the P1 element of this species is a coniform element without a posterior elongation of the basal area. However, the holotype of *Nc. tahoensis* has a posterior elongation of the basal area. Agematsu *et al.* (2008) also described another species of *Neostrachanognathus* (*Neostrachanognathus* sp. A), which has a coniform P1 element with a posterior elongation of the basal area, and is assigned here to *Nc. tahoensis*. The S element of *Nc. tahoensis* in Agematsu *et al.* (2008) (their *Neostrachanognathus* sp. A) is identical to "*Nh. benderi*".

Nicoraella kockeli (Tatge) (Plate 4, Fig. 4.)
Ozarkodina kockeli Tatge, 1956. p. 137, Plate 5, Figs. 13, 14.
Neospathodus kockeli (Tatge). Koike, 1982. Plate 6, Figs. 2–11.
Remarks: The specimens are pectiniform elements characterised by an angular profile of the upper margin due to the denticles decreasing in height in both anterior and posterior directions from the conspicuously wide cusp. The cusp is located posterior to the mid-length of the elements. The decrease in height of the denticles is rapid to the posterior side of the cusp. The basal cavity is not expanded laterally, and is positioned slightly anterior from the posterior end. This species is distinguished from *Novispathodus abruptus* by the forward-shifted position and unflared configuration of the basal cavity, and from *T. homeri* by the small basal cavity.

Novispathodus abruptus (Orchard) (Plate 4. Fig. 5.)
Neospathodus abruptus Orchard, 1995. p. 118–119, Figs. 3.16–3.19, 3.23–3.26.
Remarks: The specimens are pectiniform elements characterised by denticles that decrease height rapidly at the posterior end, resulting in the arcuate outline of the upper margin. This species is distinguished from *T. homeri* by the lack of a distinct posterior process.

Novispathodus brevissimus (Orchard) (Plate 4, Fig. 6.)
Neospathodus triangularis (Bender). Koike, 1981. Pl. 1, Fig. 6.
Neospathodus brevissimus Orchard, 1995. p. 119, Figs. 3.14–3.15, 3.20–3.22.
Remarks: The specimen is characterised by a blade composed of thin fused denticles and a basal cavity that expands widely in lateral directions and truncates abruptly at the posterior end. The height of the blade is equal for almost its entire length, giving the element a quadrate outline in lateral view.

Novispathodus symmetricus (Orchard)
(Plate 4, Figs. 7–10, Plate 10, Figs. 4, 5.)
Neospathodus symmetricus Orchard, 1995. p. 120–121, Figs. 2.6, 2.10–2.13, 2.18.
Remarks: The specimens are pectiniform elements characterised by sub-equal denticles that are slightly to moderately inclined to the posterior. This species is distinguished from *T. homeri* by the lack of a posterior process and abrupt truncation of the basal cavity, and from *T. brochus* by the more fused denticles and the lack of radiating denticles at the posterior end. Orchard (2007) assigned *Nv. symmetricus* to the genus *Triassospathodus*, which was distinguished from *Novispathodus* based on differences in their multielement apparatus (Orchard, 2005), but the apparatus of this particular species is yet to be reconstructed. As far as the P1 element is concerned, *Nv. symmetricus* is closer to *Nv. abruptus* than to *T. homeri* in that it lacks a well-developed posterior process. Hence, we include *Nv. symmetricus* in *Novispathodus*.

Novispathodus triangularis (Bender)
Spathognathodus triangularis Bender, 1970. p. 530, Plate 5, Fig. 22.
Neospathodus triangularis (Bender). Orchard, 1995. p. 116, 118, Figs. 3.1–3.4.
Remarks: *Novispathodus triangularisi* (Bender) was redefined by Orchard (1995) as a species with a conspicuous fold on the upper surface of the basal cup, that extends vertically to a sub-terminal cusp. The specimen illustrated in Plate 4, Figure 11 has a vertical groove above the basal cup, which may be the "fold" described by Orchard (1995). The specimen also has a length-height ratio similar to the specimens illustrated by Orchard (1995). However, the poor preservation of the specimen makes it difficult to make a conclusion.

Paragondolella bulgarica Group (Plate 5, Fig. 2–8.)
Paragondolella* cf. *bulgarica Group (Plate 5, Fig. 1.)
Paragondolella bulgarica Budurov & Stefanov, 1975. p. 794, Plate 1, Figs. 1–23.
Neogondolella bulgarica (Budurov & Stefanov). Nicora, 1977. Plate 5, Figs. 8–14.
Neogondolella bulgarica (Budurov & Stefanov). Koike, 1981. Plate 2, Figs. 1–3.
Neogondolella bulgarica (Budurov & Stefanov). Koike, 1982. Plate 4, Figs. 1–19, 22–24.
Paragondolella bifurcata Budurov & Stefanov. Chen *et al.*, 2016a. p. 728, Fig. 2.
Neogondolella unilobata Gedik, 1975. p. 133–134, Plate 1, Figs. 9–25.
Neogondolella hanbulogi Sudar & Budurov, 1979. p. 50–51, Plate 1, Figs. 9, 10, Plate 2, Figs. 1–9, Plate 3, Figs. 1–12.
Remarks: This group is distinguished by an arched element and a high-carina of moderately fused denticles that ends with a strong terminal cusp. A small denticle is often present behind the cusp. The last denticle is sometimes fused to the posterior brim of the platform. In juvenile specimens, the platform is not developed (Plate 5, Fig. 6) or confined to the posterior part (Plate 5, Figs. 4, 5). In later stages, the platform runs almost its entire length. These characteristics match with those of *Paragondolella*

bulgarica.

In juvenile stages, *Pg. bulgarica* is very similar to *Paragondolella bifurcata*, which is considered as a descendant of the former species (Chen *et al.*, 2016a). Since our specimens are almost entirely juveniles, it is impossible to separate them into the two species. We also follow Nicora (1977) and Chen *et al.*, (2016a) in treating *Paragondolella unilobata* as a junior synonym of *Pg. bulgarica*. Therefore, we will include *Pg. bifurcata* and *Pg. unilobata* in the *Pg. bulgarica* Group. In addition, Kovács and Rálisch-Felgenhauer (2005) reported transitional morphotypes between both these two species and *Paragondolella hanbulogi*. Hence, *Pg. hanbulogi* is also included in the *Pg. bulgarica* Group.

Paragondolella excelsa Group (Plate 5, Figs. 9–14.)

Paragondolella excelsa Mosher, 1968a. p. 938–939, Plate 118, Figs. 1–8.

Paragondolella excelsa Mosher. Mosher, 1968b. Plate 120, Figs. 1–7.

Gondolella liebermani Kovács & Krystyn in Kovács, 1994. p. 492–493, Plate 6, Figs. 1–3.

Gondolella fueloepi Kovács, 1994. p. 493.

Gondolella fueloepi fueloepi Kovács, 1994. Plate 7, Figs. 2, 3, Pl. 8, Fig. 4.

Gondolella fueloepi pseudobifurcata Kovács, 1994. Plate 8, Figs. 1, 3.

Remarks: The specimens are segminiplanate elements with a high blade and a thick platform developed in the posterior part of the element that surrounds the terminal cusp. The cusp is thick, reclined posteriorly and its tip is lower than the anterior denticles. These characteristics match with juvenile forms of *Paragondolella excelsa*. In adult forms, this species is characterised by a carina that is high at the anterior and decreases height posteriorly ending in a node-like cusp, and a massive platform that surrounds the terminal denticle. The low, thick cusp and well-developed platform in our specimens are regarded as a precursor of these adult characters. *Paragondolella liebermani* and *Paragondolella fueloepi* also has a carina that decreases to a low, node-like cusp and a thick platform that surrounds the posterior end. Hence, we treat *Pg. excelsa*, *Pg. liebermani* and *Pg. fueloepi* as the *Pg. excelsa* Group, although juvenile characters of the latter two species have not been thoroughly investigated.

In juvenile stages, the *Pg. excelsa* Group somewhat resembles the *Pg. bulgarica* Group, but the former has a thicker platform and a lower and more reclined cusp.

Paragondolella trammeri Group (Plate 6, Figs. 1–7.)

Gondolella haslachensis trammeri Kozur and Mock, 1972. p. 13, Plate 1, Figs. 3–7.

Paragondolella trammeri (Kozur) Kozur *et al.*, 1994b. p. 176–178, Plate 2, Figs. 19, 23, 24. Plate 3, Figs. 10, 13, 16.

Gondolella alpina Kozur & Mostler, 1982. p. 292–293, Plate 1, Fig. 1, Plate 2, Figs. 4, 5.

Gondolella alpina alpina Kozur & Mostler. Kovács, 1994. p. 488–489, Plate 4, Figs. 2, 4, Plate 5, Figs. 1–3.

Remarks: The specimens are segminiplanate elements characterised by a large posteriorly reclined cusp and a platform that merges at the posterior end into a pointed denticle behind the cusp. The platform is thicker in larger specimens (Plate 6, Fig. 6) reflecting ontogenic growth. These characters match with those of *Paragondolella trammeri*. *Paragondolella alpina* is similar to *Pg. trammeri*, but can be distinguished from the latter in adult specimens by the presence of a free blade. Immature specimens of *Pg. alpina* have not been well studied. We withhold from conclusively differentiating the two species in our specimens, and refer to them as the *Pg. trammeri* Group.

In earliest growth stages, the *Pg. trammeri* Group somewhat resembles late juvenile stages of the *Pg. bulgarica* Group in having a pointed posterior platform end behind the cusp. However, the former differs from the latter in the lower and more discrete denticles, and the higher cusp. In later juvenile stages, the *Pg. trammeri* Group differs from the *Pg. bulgarica* Group in having a thicker platform. *Pg. trammeri* Group is distinguished from the *Pg. excelsa* Group in having a small terminal denticle fused to the posterior brim of the platform.

Triassospathodus anhuinensis (Ding) (Plate 6, Fig. 8.)

Neospathodus anhuinensis Ding, 1983. p. 44, Plate 5, Figs. 9, 10.

Remarks: The specimen is characterised by a blade composed of small and fused denticles and a well-developed posterior process that occupies around one third of the element. It differs from *T. homeri* in having a much longer posterior process and smaller denticles.

Triassospathodus brochus (Orchard) (Plate 7, Fig. 1.)
Triassospathodus* cf. *brochus (Orchard) (Plate 7, Fig. 2.)

Neospathodus brochus Orchard, 1995. p. 119, Figs. 3.27, 3.28, 3.35, 3.36.

Remarks: This species is distinguished by a pectiniform element that possesses relatively discrete denticles that become increasingly reclined near the posterior end, so that the terminal denticle is orientated at a low angle to the basal margin. This species is distinguished from *T. homeri* by the more discrete denticles and radiating denticles at the posterior end.

The specimen illustrated in Plate 7, Fig. 2 is partly broken at the anterior side, but the observed features are identical to those of *T. brochus*.

Triassospathodus homeri (Bender)
(Plate 7, Figs. 3–6, Pl. 10, Figs. 6, 7.)

Spathognathodus homeri Bender, 1970. p. 528–529, Plate 5, Figs. 16, 18.

Neospathodus homeri (Bender). Orchard, 1995. p. 115–116, Figs. 2.1–2.3, 2.7–2.9, 2.14–2.17, 2.20–2.21.

Remarks: The specimens are pectiniform elements marked by a short posterior process that bears up to five denticles. The posterior process is commonly downturned and bears denticles that are sometimes smaller than the anterior process. This species is distinguished from *Nv. abruptus* and *Nv. symmetricus* by the presence of the distinct posterior process.

Acknowledgements

We are grateful for an anonymous reviewer who provided many fruitful comments. Sincere gratitude is expressed to H. Shirozu, H. Matsumoto, K. Yoshizawa and residents of the Enoura district in Tsukumi City for their kind support during fieldwork. This study was partly supported by Grant-in-aid for JSPS Research Fellow Number 16J04796 (to S. Muto) and 16J09728 (to K. Soda).

References

Agematsu, S., Orchard, M. J. and Sashida, K. (2008) Reconstruction of an apparatus of Neostrachanognathus tahoensis from Oritate, Japan and species of Neostrachanognathus from Oman. *Palaeontology*, **51**, 1201–1211.

Ando, A., Kodama, K. and Kojima, S. (2001) Low-latitude and Southern Hemisphere origin of Anisian (Triassic) bedded chert in the Inuyama area, Mino terrane, central Japan. *Jour. Geophys. Res. Solid Earth*, **106**, 1973–1986.

Balini, M., Lucas, S. G., Jenks, J. F. and Spielmann, J. A. (2010) Triassic ammonoid biostratigraphy: an overview. *Geolo. Soc. London, Spec. Publ*., **334**, 221–262.

Bender, H. (1970) Zur Gliederung der Mediterranen Trias II. Die Conodontenchronologie der Mediterranen Trias. *Annales Géologiques des Pays Hélleniques, Serie 1*, **19**, 465–540.

Brack, P. (2010) The "golden spike" for the Ladinian is set! *Albertiana*, **38**, 8–10.

Brack, P., Rieber, H., Nicora, A. and Mundil, R. (2005) The global boundary stratotype section and point (GSSP) of the Ladinian Stage (Middle Triassic) at Bagolino (Southern Alps, Northern Italy) and its implications for the Triassic time scale. *Episodes*, **28**, 233–244.

Bucher, H. (1989) Lower Anisian ammonoids from the northern Humboldt Range (northwestern Nevada, USA) and their bearing upon the Lower-Middle Triassic boundary. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, **82**, 945–1002.

Budurov, K. and Stefanov, S. (1975) Neue Daten über die Conodontenchronologie der Balkaniden Mittleren Trias. *Doklady Bolgarskoi Akademii Nauk*, **28**, 791–794.

Chen, Y., Jiang, H., Lai, X., Yan, C., Richoz, S., Liu, X. and Wang, L. (2015) Early Triassic conodonts of Jiarong, Nanpanjiang Basin, southern Guizhou Province, South China. *Jour. Asian Earth Sci*., **105**, 104–121.

Chen, Y., Neubauer, T. A., Krystyn, L. and Richoz, S. (2016a) Allometry in Anisian (Middle Triassic) segminiplanate conodonts and its implications for conodont taxonomy. *Palaeontology*, **59**, 725–741.

Chen, Y., Krystyn, L., Orchard, M. J., Lai, X. L. and Richoz, S. (2016b) A review of the evolution, biostratigraphy, provincialism and diversity of Middle and early Late Triassic conodonts. *Papers in Palaeontology*, **2**, 235–263.

Clark, D. L., Sweet W. C., Bergström, S. M., Klapper, G., Austin, R. L., Rhodes, F. H. T., Müller, K. J., Ziegler, W., Lindström, M., Miller, J. F. and Harris, A. G. (1981) *Treatise on invertebrate paleontology. Part W Miscellanea, Supplement 2*, *Conodonta*. Geol. Soc. Amer. and Univ. Kansas, Boulder Colorado, and Lawrence, Kansas, 1–202.

Ding, M. (1983) Lower Triassic conodonts from the Mountain Majiashan in Anhui Province and their stratigraphic significance. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, **2**, 37–48 (in Chinese).

Fujii, K. (1954) Stratigraphy and geological structure of the Usuki area, Oita Prefecture, Kyushu (1). *Jour. Geol. Soc. Japan*, **60**, 413–427 (in Japanese with English abstract).

Fujisaki, W., Sawaki, Y., Yamamoto, S., Sato, T., Nishizawa, M., Windley, B. F. and Maruyama, S. (2016) Tracking the redox history and nitrogen cycle in the pelagic Panthalassic deep ocean in the Middle Triassic to Early Jurassic: Insights from redox-sensitive elements and nitrogen isotopes. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **449**, 397–420.

Gedik, I. (1975) Die Conodonten der Trias auf der Kocaeli-Halbinsel (Türkei). *Palaeontographica, Abteiling A*, **150**, 99–160 (in German with English summary).

Golding, M. L. and Orchard, M. J. (2016) New species of the conodont Neogondolella from the Anisian (Middle Triassic) of northeastern British Columbia, Canada, and their importance for regional correlation. *Jour. Paleontol*., **90**, 1197–1211.

Goudemand, N., Orchard, M. J., Bucher, H. and Jenks, J. (2012) The elusive origin of *Chiosella timorensis* (Conodont Triassic). *Geobios*, **45**, 199–207.

Gradinaru, E., Orchard, M. J., Nicora, A., Gallet, Y., Besse, J., Krystyn, L., Sobolev, E. S., Atudorei, N.-V. and Ivanova, D. (2007) The global boundary stratotype section and point (GSSP) for the base of the Anisian stage: Deşli Caira Hill, North Dobrogea, Romania. *Albertiana*, **36**, 54–71.

Hayashi, S. (1968) Permian in the chert of the Adoyama Formation, Ashio Mountains, central Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **22**, 63–77 (in Japanese with English abstract and description).

Hoshizumi, H., Saito, M., Mizuno, K., Miyazaki, K., Toshimitsu, S., Matsumoto, A., Ohno, T. and Miyakawa, A. (2015). *Geological map of Japan*

1:200,000, Oita (2nd edition). Geol. Surv. Japan, AIST (in Japanese with English abstract).

Hounslow, M. W. and Muttoni, G. (2010) The geomagnetic polarity timescale for the Triassic: linkage to stage boundary definitions. *Geol. Soc. of London, Spec. Publ*., **334**, 61–102.

Ikeda, M. and Tada, R. (2014) A 70 million year astronomical time scale for the deep-sea bedded chert sequence (Inuyama, Japan): Implications for Triassic–Jurassic geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett*., **399**, 30–43.

Ikeda, M,. Tada, R. and Sakuma, H. (2010) Astronomical cycle origin of bedded chert: A middle Triassic bedded chert sequence, Inuyama, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett*., **297**, 369–378.

Imoto, N. (1984) Late Paleozoic and Mesozoic cherts in the Tamba Belt, Southwest Japan. *Bull. Kyoto Univ. Educ*., B 65, 15–71.

Isozaki, Y. and Matsuda, T. (1982) Middle and Late Triassic conodonts from bedded chert sequences in the Mino-Tamba Belt, Southwest Japan Part 1: Epigondolella. *Jour. Geosci. Osaka City Univ*., **25**, 103–136.

Isozaki, Y. and Matsuda, T. (1983) Middle and Late Triassic conodonts from bedded chert sequences in the Mino-Tamba Belt, Southwest Japan Part 2: Misikella and Parvigondolella. *Jour. Geosci. Osaka City Univ*., **26**, 65–86.

Isozaki, Y., Maruyama, S., Aoki, K., Nakama, T., Miyashita, A. and Otoh, S. (2010) Geotectonic Subdivision of the Japanese Islands Revisited: Categorization and definition of elements and boundaries of Pacific-type (Miyashiro-type) orogen. *Jour. Geogr. (Chigaku-Zasshi)*, **119**, 999–1053 (in Japanese with English abstract).

Kambe, N. and Teraoka, Y. (1968) *Geological map of Japan, Scale 1:50,000. Usuki sheet and its explanatory text.* Geol. Surv. Japan (in Japanese with English abstract).

Kimura, K. and Hori, R. (1993) Offscraping accretion of Jurassic chert-clastic complexes in the Mino-Tamba Belt, central Japan. *Jour. Structural Geol*., **15**, 145–161.

Koike, T. (1981) Biostratigraphy of Triassic conodonts in Japan. *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ*., *section 2*, **28**, 25–46.

Koike, T. (1982) Triassic conodont biostratigraphy in Kedah, west Malaysia. *Geol. Paleontol. Southeast Asia*, **23**, 9–51.

Koike, T. (1996) Skeletal apparatuses of Triassic conodonts of Cornudina. *Prof. Hisayoshi Igo commemorative volume on geology and paleontology of Japan and Southeast Asia*, 113–120.

Koike, T. (1998) Triassic coniform conodont genera Aduncodina and Neostrachanognathus. *Paleontol. Res.,* **2**, 120–129.

Koike, T. (2004) Early Triassic *Neospathodus* (Conodonta) apparatuses from the Taho Formation, southwest Japan. *Paleontol. Res*., **8**, 129–140.

Koike, T. (2016) Multielement conodont apparatuses of the Ellisonidae from Japan. *Paleontol. Res*., **20**, 161–175.

Kojima, S., Hayasaka, Y., Yoshikunihiroi, A., Sano, H., Sugamori, Y., Suzuki, N. and Takemura, S. (2016) 2b Pre-Cretaceous accretionary complexes. *In* Moreno, T., *et al.*, eds., *The Geology of Japan*, 61–100. The Geological Society of London, London.

Kovács, S. (1994) Conodonts of stratigraphical importance from the Anisian/Ladinian boundary interval of the Balaton Highland, Hungary. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **99**, 473–514.

Kovács, S. (2011) Middle-Late conodont evolutionary events as recorded in the Triassic basinal deposits of Hungary. *Földtani Közlöny*, **141**, 141–166 (in Hungarian with English abstract).

Kovács, S. and Rálisch-Felgenhauer, E. (2005) Middle Anisian (Pelsonian) platform conodonts from the Triassic of the Mecsek Mts (South Hungary)-Their taxonomy and stratigraphic significance. *Acta Geologica Hungarica*, **48**, 69–105.

Kozur, H. (1980) Revision der Conodontenzonierung der Mittel- und Obertrias des tethyalen Faunenreichs. Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, **10**, 79-112 (in German).

Kozur, H. and Mock, R. (1972) Neue Conodonten aus der Trias der Slowakei und ihre stratigraphische Bedeutung. *Geologisch Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **2**, 1–20 (in German).

Kozur, H. and Mostler, H. (1970) Neue conodonten aus der Trias. *Berichte des Naturwissenschaftlich–medizinischen Vereins in Innsbruck*, **58**, 429–464 (in German with English abstract).

Kozur, H. and Mostler, H. (1982) Neue Conodontenarten aus dem Illyr und Fassan der Profile Fellbach und Karalm (Gailtaler Alpen, Kärnten, Österreich). *Geologisch Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **11**, 291–298 (in German).

Kozur, H., Krainer, K. and Lutz, D. (1994a) Middle Triassic conodonts from the Gartnerkofel—Zielkofel area, Carnic Alps (Carinthia, Austria). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **137**, 275-287.

Kozur, H., Krainer, K. and Mostler, H. (1994b) Middle Triassic conodonts from the southern Karawanken Mountains (Southern Alps) and their stratigraphic importance. *Geologisch Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **19**, 165-200.

Lehrmann, D. J., Stepchinski, L., Altiner, D., Orchard, M. J., Montgomery, P., Enos, P., Ellwood, B. B., Bowring, S. A., Ramezani, J., Wang, H., Wei, J., Yu, M., Griffiths, J. D., Minzoni, M., Schaal, E. K., Li, X., Meyer, K. M. and Payne, J. L. (2015) An integrated biostratigraphy (conodonts and foraminifers) and chronostratigraphy (paleomagnetic reversals, magnetic susceptibility, elemental chemistry, carbon isotopes

and geochronology) for the Permian-Upper Triassic strata of Guandao section, Nanpanjiang Basin, south China. *Jour. Asian Earth Sci*., **108**, 117–135.

Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1982) Radiolarians around the Triassic-Jurassic boundary from the bedded chert in the Kamiaso area, Southwest Japan. Appendix: "Anisian" radiolarians. *News Osaka Micropaleontol., Spec. Vol*., no. 5, 93–101 (in Japanese with English abstract).

Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1991) Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: from remote ocean to subduction zone. *Tectonics*, **10**, 475–499.

Matsuoka, A. (1986) Mesozoic strata of the Southern Chichibu Terrane in the Tsukumi area, Oita Prefecture. *News Osaka Micropaleontol., Spec. Vol*., no. 7, 219–223.

Matsuoka, A. and Yao, A. (1986) A newly proposed radiolarian zonation for the Jurassic of Japan. *Marine Micropaleontol*., **11**, 91–106.

Matsuoka, A. and Yao, A. (1990) Southern Chichibu Terrane. *In* Ichikawa, K. *et al.*, eds., *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. Tokai Univ. Press, Tokyo, Japan, 203–216.

Matsuoka, A., Yamakita, S., Sakakibara, M. and Hisada, K. (1998) Unit division of the Chichibu Composite Belt from a view point of accretionary tectonics and geology of western Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **104**, 634–653 (in Japanese with English abstract).

Mizutani, S. (1964) Superficial folding of the Paleozoic system of central Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **12**, 17–83.

Mizutani, S. and Koike, T. (1982) Radiolarians in the Jurassic siliceous shale and in the Triassic bedded chert of Unuma, Kakamigahara City, Gifu Prefeture, central Japan. *News Osaka Micropalaeontol., Spec. Vol*., no. 5, 117–134 (in Japanese with English abstract).

Mosher, L. C. (1968a) Triassic conodonts from western North America and Europe and their correlation. *Jour. Paleontol*., **42**, 895–946.

Mosher, L. C. (1968b) Evolution of Triassic platform conodonts. *Jour. Paleontol*., **42**, 947–954.

Mosher, L. C. (1970) New conodont species as Triassic guide fossils. *Jour. Paleontol.*, **44**, 737–742.

Müller, K. J. (1956) Triassic conodonts from Nevada. *Jour. Paleontol*., **30**, 818–830.

Muto, S., Takahashi, S., Yamakita, S., Suzuki, N., Suzuki, N. and Aita, Y. (2018) High sediment input and possible oceanic anoxia in the pelagic Panthalassa during the latest Olenekian and early Anisian: Insights from a new deep-sea section in Ogama, Tochigi, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **490**, 687–707.

Muttoni, G., Nicora, A., Brack, P. and Kent, D. V. (2004) Integrated Anisian–Ladinian boundary chronology. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **208**, 85–102.

Nakada, R., Ogawa, K., Suzuki, N., Takahashi, S. and Takahashi, Y. (2014) Late Triassic compositional changes of aeolian dusts in the pelagic Panthalassa: response to the continental climatic change. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **393**, 61–75.

Nicora, A. (1976) Conodont-fauna, stratigraphic position and relations to the Tethyan successions of the Shoshonensis Zone (Pelsonian) of Nevada. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **82**, 627–650.

Nicora, A. (1977) Lower Anisian platform-conodonts from the Tethys and Nevada: Taxonomic and stratigraphic revision. *Palaeontographia Abteilung A*, **157**, 88–107.

Nicora, A., Kozur, H. and Mietto, P. (1981) Gondolella pridaensis sp. n.: A new conodont species from the Middle Triassic. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **86**, 761–768.

Nishi, T. (1994) Geology and tectonics of the Sambosan Terrane in eastern Kyushu, southwest Japan—stratigraphy, sedimentological features of the depositional setting of the Shakumasan Group. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **100**, 199–215.

Nishikane, Y., Kaiho, K., Takahashi, S., Henderson, C. M., Suzuki, N. and Kanno, M. (2011) The Guadalupian-Lopingian boundary (Permian) in a pelagic sequence from Panthalassa recognized by integrated conodont and radiolarian biostratigraphy. *Marine Micropaleontol*., **78**, 84–95.

Nogami, Y. (1968) Trias-Conodonten von Timor, Malaysien und Japan (Palaeontological Study of Portuguese Timor, 5). *Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ., Ser. Geol. Mineral*., **34**, 115–136 (in German with English abstract).

Oda, H. and Suzuki, H. (2000) Paleomagnetism of Triassic and Jurassic red bedded chert of the Inuyama area, central Japan. *Jour. Geophys. Res.: Solid Earth (1978–2012)*, **105**, 25743–25767.

O'Dogherty, L., Carter, E. S., Goričan, Š. and Dumitrica, P. (2010) Triassic radiolarian biostratigraphy. *Geol. Soc., London, Spec. Publ*., **334**, 163–200.

Ogg, J. G. (2012) The Triassic period. *In* Gradstein, F. M., *et al.*, eds., *A Geologic Time Scale*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 681–730.

Onoue, T., Nakamura, T., Haranosono, T. and Yasuda, C. (2011) Composition and accretion rate of fossil micrometeorites recovered in Middle Triassic deep-sea deposits. *Geology*, **39**, 567–570.

Orchard, M. J. (1995) Taxonomy and correlation of Lower Triassic (Spathian) segminate conodonts from Oman and revision of some species of Neospathodus. *Jour. Paleontol*., **69**, 110–122.

Orchard, M. J. (2005) Multielement conodont apparatuses of Triassic Gondolelloidea. *Special Papers in Palaeontol*., **73**, 73–101.

Orchard, M. J. (2007) Conodont diversity and evolution through the latest Permian and Early Triassic upheavals. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol.,*

Palaeoecol., **252**, 93–117.
Orchard, M. J. (2010) Triassic conodonts and their role in stage boundary definition. *Geol. Soc. London, Spec. Publ*., **334**, 139–161.
Orchard, M. J., Gradinaru, E. and Nicora, A. (2007a) A summary of the conodont succession around the Olenekian-Anisian boundary at Desli Caira, Dobrogea, Romania. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, **41**, 341–346.
Orchard, M. J., Lehrmann, D. J., Wei, J., Wang, H. and Taylor, H. J. (2007b) Conodonts from the Olenekian-Anisian boundary beds, Guandao, Guizhou Province, China. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, **41**, 347–354.
Pisa, G., Perri, C. and Veneri, P. (1980) Upper Anisian conodonts from Dont and M. Bivera Formations, Southern Alps (Italy). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **85**, 807–828.
Sato, H., Onoue, T., Nozaki, T. and Suzuki, K. (2013) Osmium isotope evidence for a large Late Triassic impact event. *Nature Communications*, **4**, doi: 10.1038/ncomms3455.
Sato, H., Shirai, N., Ebihara, M., Onoue, T. and Kiyokawa, S. (2016) Sedimentary PGE signatures in the Late Triassic ejecta deposits from Japan: Implications for the identification of impactor. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **442**, 36–47.
Soda, K., Onoue, T. and Ikeda, M. (2015) Cyclostratigraphic examination of Middle Triassic (Anisian) bedded chert in the Chichibu Belt from Tsukumi area, eastern Kyushu, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **121**, 147–152 (in Japanese with English abstract).
Solien, M. A. (1979) Conodont biostratigraphy of the Lower Triassic Thaynes FGormation, Utah. *Jour. Paleontol.*, **53**, 276–306.
Sudar, M. N. and Budurov, K. (1979) New conodonts from the Triassic in Yugoslavia and Bulgaria. *Geologica Balcanica*, **9**, 47–52.
Sugiyama, K. (1997) Triassic and Lower Jurassic radiolarian biostratigraphy in the siliceous claystone and bedded chert units of the southeastern Mino Terrane, Central Japan. *Bull. Mizunami Fossil Museum*, **24**, 79–193.
Sweet, W. C. (1988) *The Conodonta: morphology, taxonomy, paleoecology, and evolutionary history of a long-extinct animal phylum*. Oxford Monogr. Geol. Geophys, 10. Clarendon Press, Oxford.
Takahashi, O., Kawarazaki, T. and Ishii, A. (1998) Middle Triassic radiolarians from the Tsukumi area, eastern Kyushu, southwest Japan. *News Osaka Micropaleontol., Spec. Vol*., no. 11, 115–121.
Takahashi, S., Oba, M., Kaiho, K., Yamakita, S. and Sakata, S. (2009) Panthalassic oceanic anoxia at the end of the Early Triassic: A cause of delay in the recovery of life after the end-Permian mass extinction. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **274**,185–195.
Takemura, A., Aita, Y., Sakai, T., Hori, S. R., Kodama, K., Yamakita, S., Kamata, Y., Suzuki, N., Spörli, K. B. and Campbell, H. J. (2001) Radiolarians from the Waipapa Terrane in North Island, New Zealand. *Topics on Palaeontology*, **2**, 17–24 (in Japanese).
Tanaka, K. (1980) Kanoashi Group, an olistostrome, in the Nichihara area, Shimane Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **86**, 613–628 (in Japanese with English abstract).
Tatge, U. (1956) Conodonten aus dem germanischen Muschelkalk. *Paläontologische Zeitschrift*, **30**, 108–147 (in German).
Uno, K., Onoue, T., Hamada, K. and Hamami, S. (2012) Palaeomagnetism of Middle Triassic red bedded cherts from southwest Japan: equatorial palaeolatitude of primary magnetization and widespread secondary magnetization. *Geophys. Jour. Internat.*, **189**, 1383–1398.
Wakita, K. (1988) Origin of chaotically mixed rock bodies in the Early Jurassic to Early Cretaceous sedimentary complex of the Mino terrane, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **39**, 675–757.
Wakita, K. and Metcalfe, I. (2005) Ocean plate stratigraphy in East and Southeast Asia. *Jour. Asian Earth Sci*., **24**, 679–702.
Yao, A. and Kuwahara, K. (1997) Radiolarian faunal change from Late Permian to Middle Triassic times. *News Osaka Micropalaeontol., Spec. Vol*., no. 10, 87–96 (in Japanese with English abstract).
Yao, A., Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1980) Triassic and Jurassic radiolarians from the Inuyama area, central Japan. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, **23**, 135–154.
Yamakita, S. and Otoh S. (2000) Tectonostratigraphic division of accretionary-sedimentary complex of the Tamba-Mino-Ashio Belt and comparison with the Northern and Southern Chichibu Belts. *Structural Geology*, **44**, 5–32 (in Japanese with English abstract).
Yamakita, S., Takahashi, S. and Kojima, S. (2010) Conodont-based age-determination of siliceous claystone in the lower part of the Momotaro-jinja section, Inuyama, central Japan. *Abstract, The 2010 Annual Meeting of the Palaeontological Society of Japan*, 47 (in Japanese).
Zhao, L., Orchard, M. J., Jinnan, T., Zhiming, S., Jinxun, Z., Suxin, Z. and Ailing, Y. (2007) Lower Triassic conodont sequence in Chaohu, Anhui Province, China and its global correlation. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **252**, 24–38.
Ziegler, A. M., Gibbs, M. T. and Hulver, M. L. (1998) A mini-atlas of oceanic water masses in the Permian Period. *Proc. Royal Society of Victoria*, **110**, 323–343.

Recieved December 19, 2017
Accepted January 18, 2019

コノドント生層序による中部三畳系アニシアン遠洋深海層状チャートにおける放散虫化石帯年代の再検討

武藤　俊・高橋　聡・山北　聡・曽田勝仁・尾上哲治

要　旨

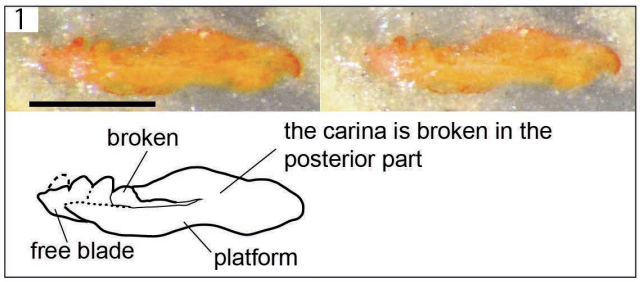
超海洋パンサラッサの遠洋域深海で堆積した層状チャートは，放散虫化石層序により年代が決められてきた．一方で，三畳系の放散虫化石帯は国際基準の地質年代との厳密な対比には用いられない場合が多い．本研究は，放散虫化石帯が確立され，中部三畳系アニシアン階に対比されていた大分県津久見地域の網代島セクションと愛知県犬山地域の栗栖セクションの珪質粘土岩・層状チャートにおいてコノドント化石層序を検討した．結果，オレネキアン階の上部の*Novispathodus brevissimus-Icriospathodus collinsoni* 帯と*Triassospathodus homeri* 帯，アニシアン階の下部の*Chiosella timorensis* 帯，アニシアン階の中部の*Paragondolella bulgarica* 帯，アニシアン階の上部の*Paragondolella excelsa* 帯，アニシアン階の最上部からラディニアン階の最下部の*Paragondolella trammeri* 帯が認識された．上記のコノドント化石層序との比較により，Sugiyama (1997, *Bull. Mizunami Foss. Mus*., vol. 24, p. 79–193)による放散虫化石帯の年代を再検討した．従来オレネキアン階に対比されていたTR 1化石帯はオレネキアン階の上部からアニシアン階の中部に対比された．TR 2A化石帯，TR 2B化石帯，及びTR 2C化石帯の下部はアニシアン階の中部に対比され，TR 2C化石帯の上部とTR 3A化石帯の下部はアニシアン階の上部に対比された．TR 3A化石帯の上部とTR 3B化石帯の下部はアニシアン階の最上部に対比される可能性が高いが，ラディニアン階の最下部に対比される可能性も否めない．

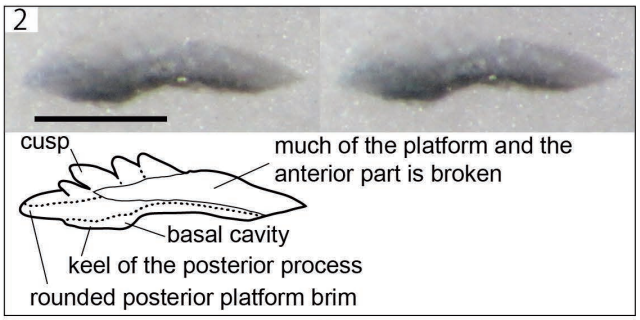
難読･重要地名

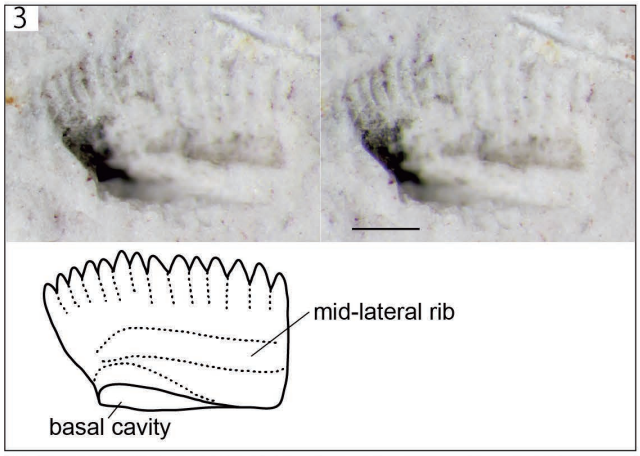
Tsukumi：津久見，Youra：四浦，Sambosan：三宝山，Yukagi：床木，Tsui：津井，Shakumasan：尺間山，Enoura：江ノ浦，Ajiro：網代，Kurusu：栗栖，Inuyama：犬山，Kamiaso：上麻生

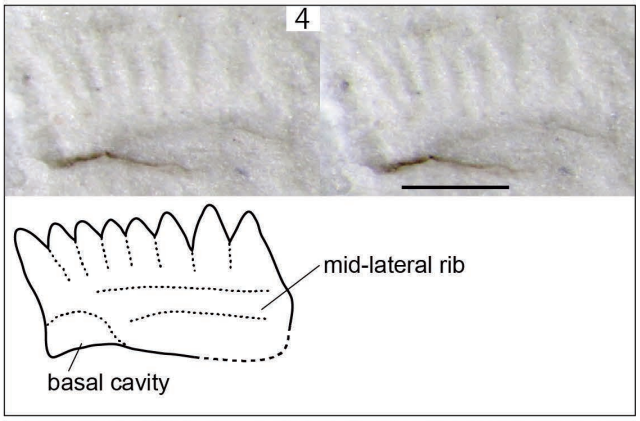
Plate 1 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. Figs. 3–5 are reversely arranged so that the moulds appear as casts. All other figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

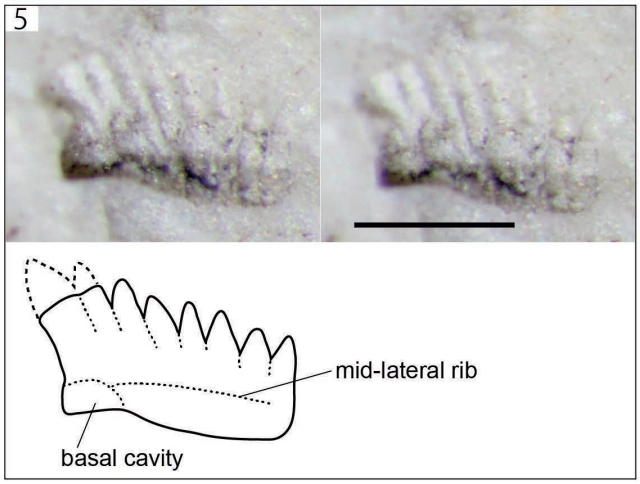
1, 2: *Budurovignathus* cf. *hungaricus* (Kozur & Vegh). Sample AJR 724+2.4m.
3, 4: *Chiosella gondolelloides* (Bender). 3. Sample AjL-B. 4. Sample 151005-13.
5: *Chiosella timorensis* (Nogami). Sample AjL-1-B.
6–8: *Cornudina breviramulis* (Tatge). 6. Sample 170627-02. 7. Sample 170627-03. 8. Sample AJR 724+1.9m.
9: *Cornudina*? *igoi* Koike. Sample AJR 0.

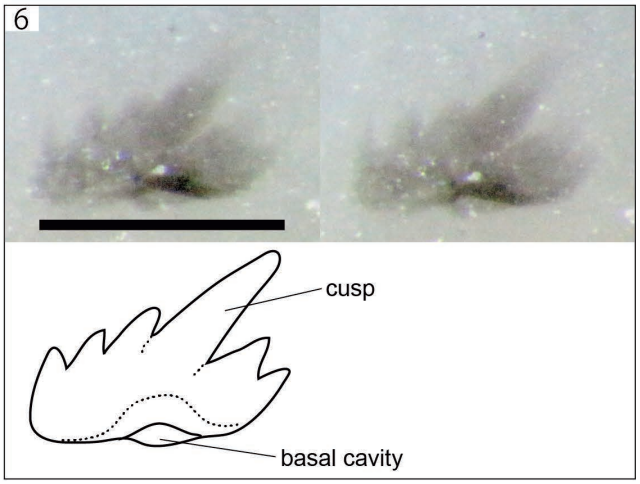

1
broken
the carina is broken in the posterior part
free blade
platform

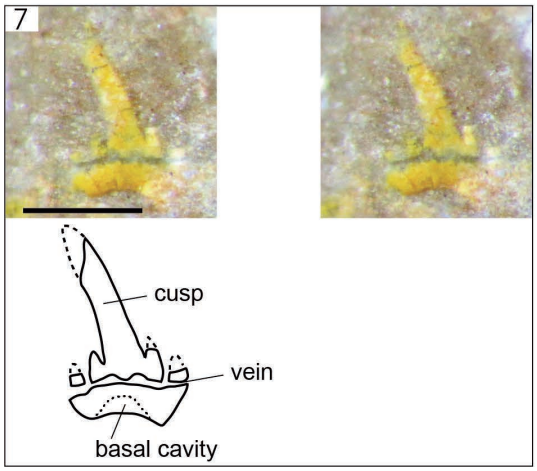

2
cusp
much of the platform and the anterior part is broken
basal cavity
keel of the posterior process
rounded posterior platform brim

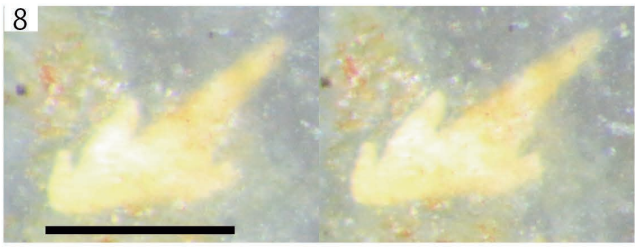

3
mid-lateral rib
basal cavity


4
mid-lateral rib
basal cavity


5
mid-lateral rib
basal cavity


6
cusp
basal cavity

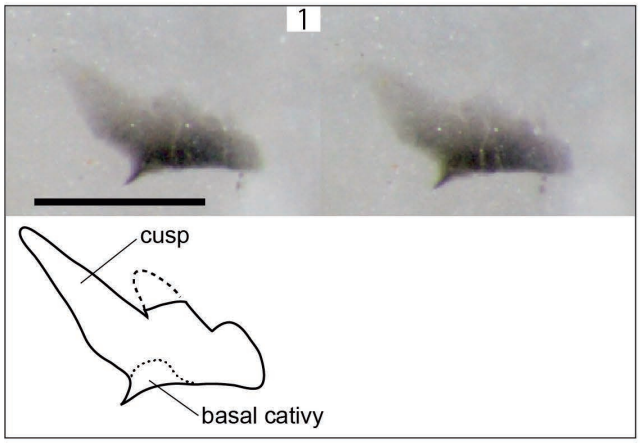

7
cusp
vein
basal cavity

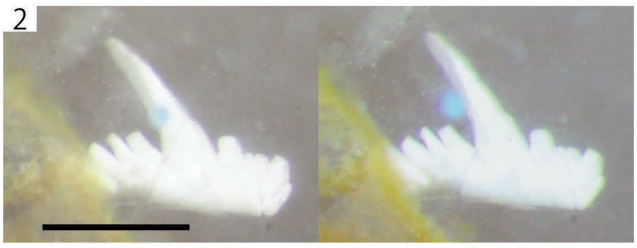

8

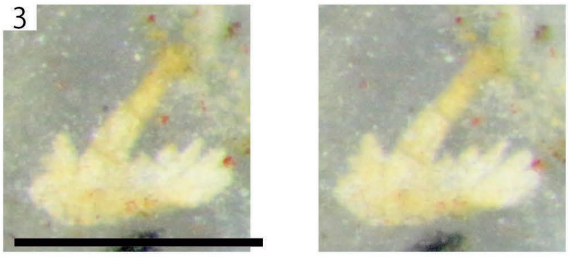
9

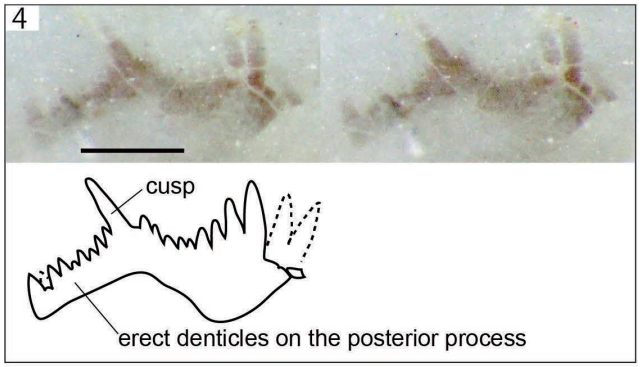
Plate 2 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. Fig. 5 is reversely arranged so that the mould appears as a cast. All other figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

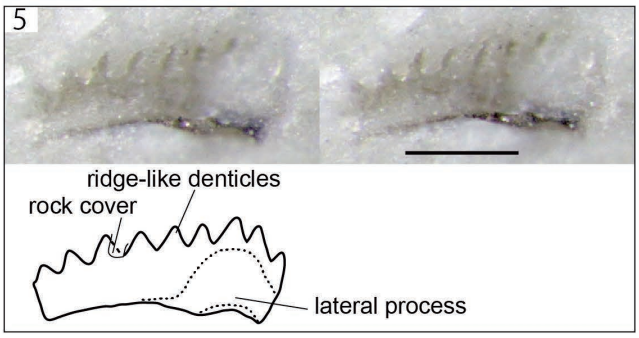
1: *Cornudina*? *igoi* Koike. Sample AJR 144.
2, 3: *Cornudina tortilis* Kozur & Mostler. 2. Sample AJR 722. 3. Sample AJR 724+1.9m.
4: "*Kamuellerella gebzeensis* Gedik". Sample 170627-02.
5: *Icriospathodus collinsoni* (Solien). Sample AjL-C.
6: *Icriospathodus* sp.? Sample AjL-C.
7: *Neogondolella aequidentata* Kozur. Sample AJR 724+2.4m.
8–11: *Neogondolella* cf. *hastata* Golding & Orchard. 8, 9. Sample 160627-02. 10, 11. Sample 160627-03.

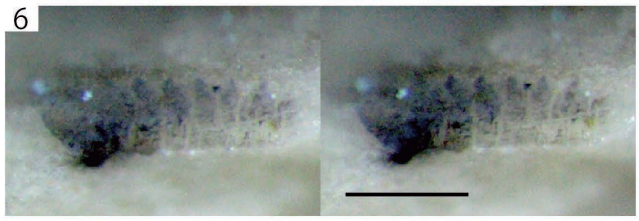

1
cusp
basal cativy

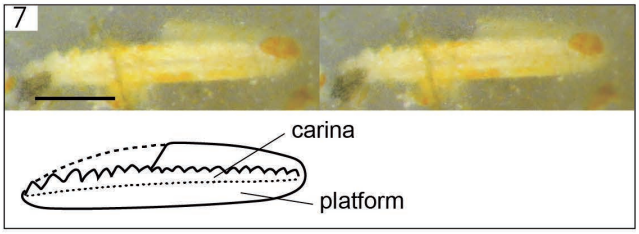

2

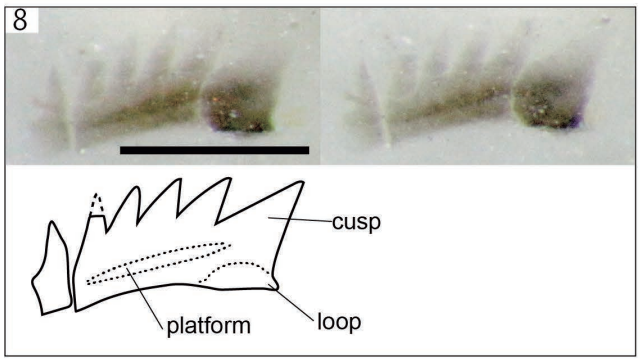

3

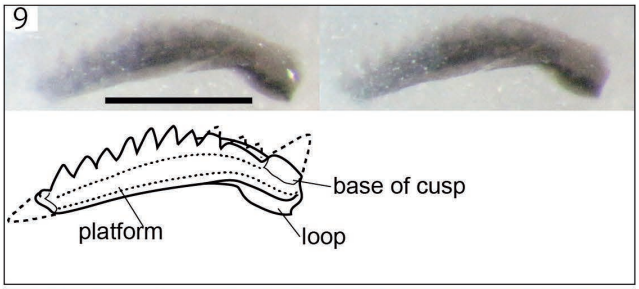

4
cusp
erect denticles on the posterior process

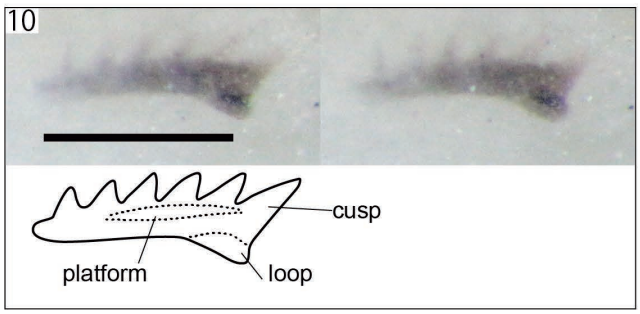

5
ridge-like denticles
rock cover
lateral process


6


7
carina
platform


8
cusp
platform
loop


9
base of cusp
platform
loop


10
cusp
platform
loop

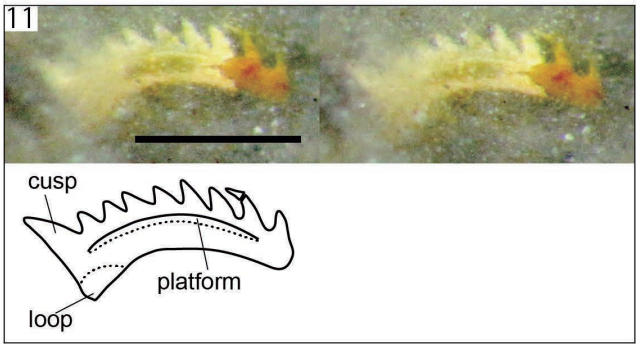
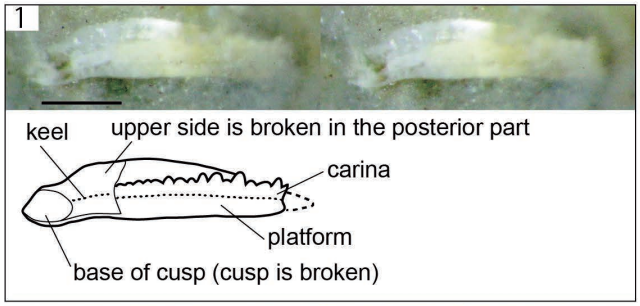
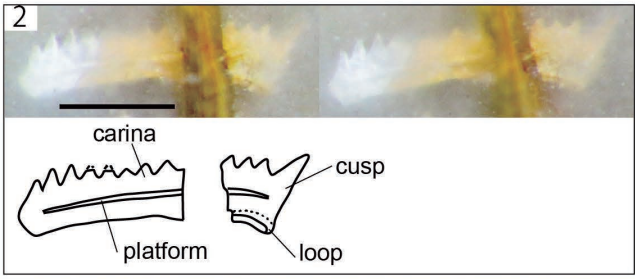
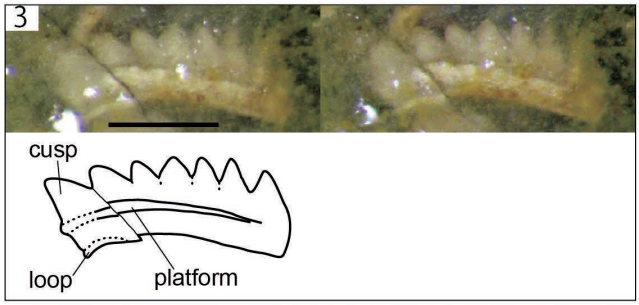

11
cusp
platform
loop

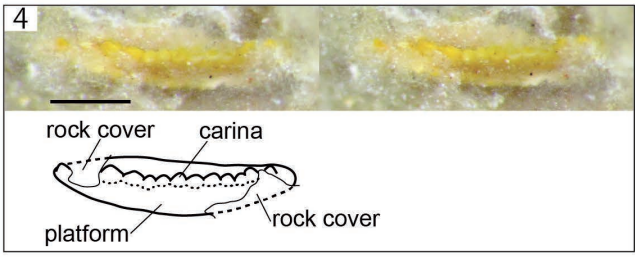
Plate 3 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. Fig. 12 is reversely arranged so that the mould appears as a cast. All other figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

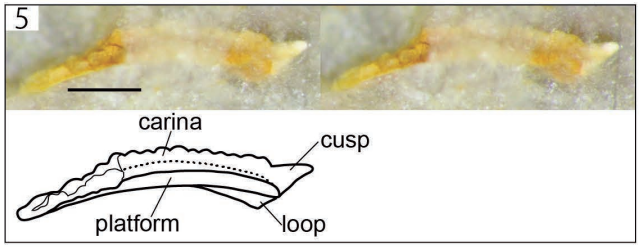
1, 2: *Neogondolella* aff. *hastata* (Golding & Orchard). Sample 170627-03.
3: *Neogondolella pridaensis* (Nicora, Kozur & Mietto). Sample AJR 724+2.4m.
4: *Neogondolella* cf. *regale* Mosher. Sample 170627-03.
5–9: post Bithynian type *Neogondolella*. 5, 7. Sample 170627-03. 6. Sample AJR 577. 8. Sample AJR 310. 9. Sample AJR 517.
10, 11: "*Neohindeodella aequiramosa* Kozur & Mostler". 10. Sample AJR 144. 11. Sample 170627-02.
12, 13: "*Neohindeodella benderi* (Kozur & Mostler)". 12. Sample 151005-13. 13. Sample AJR 0.

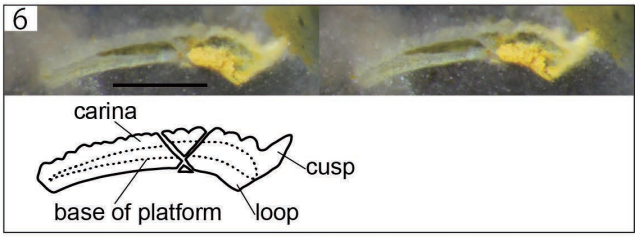

1
keel
upper side is broken in the posterior part
carina
platform
base of cusp (cusp is broken)

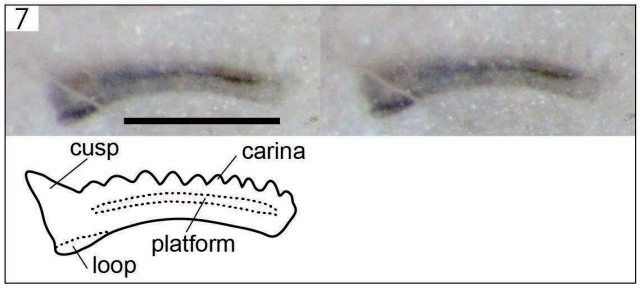

2
carina
cusp
platform
loop

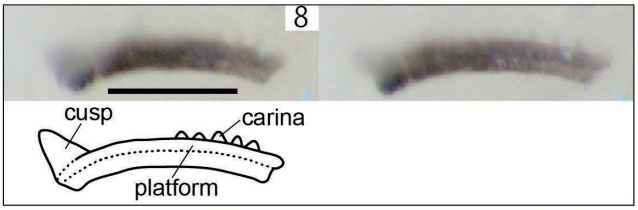

3
cusp
loop
platform

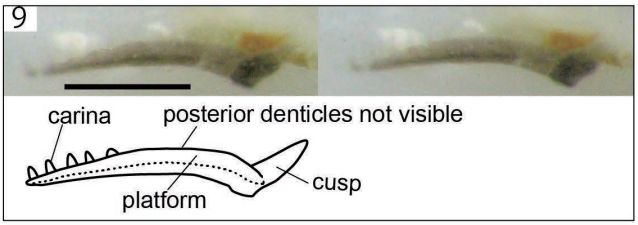

4
rock cover
carina
platform
rock cover

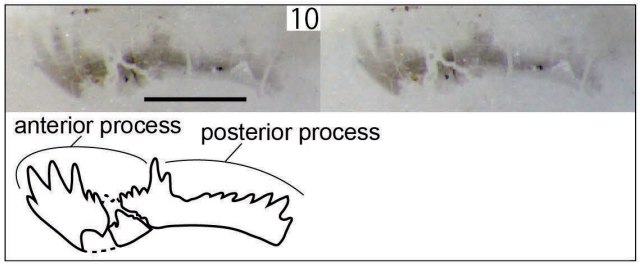

5
carina
cusp
platform
loop

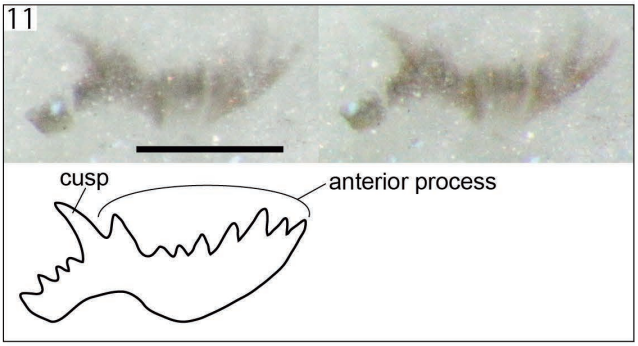

6
carina
cusp
base of platform
loop

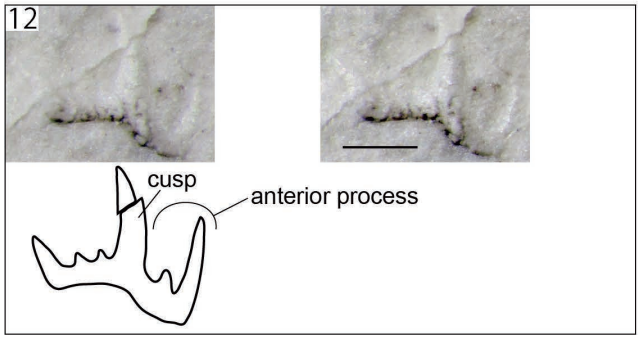

7
cusp
carina
platform
loop


8
cusp
carina
platform


9
carina
posterior denticles not visible
cusp
platform


10
anterior process
posterior process


11
cusp
anterior process


12
cusp
anterior process

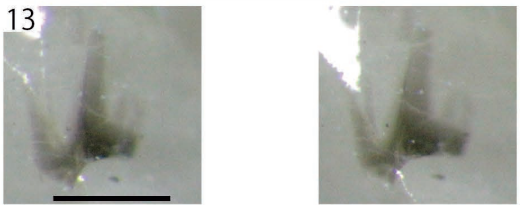

13

Plate 4 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. Figs. 5, 7–11 are reversely arranged so that the moulds appear as casts. All other figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

1–3: "*Neohindeodella triassica* (Müller)". 1. Sample AJR 144. 2. Sample AJR 517. 3. Sample AJR 724+1.9m.
4: *Nicoraella kockeli* (Tatge). Sample AJR 101.
5: *Novispathodus abruptus* (Orchard). Sample 150615-21.
6: *Novispathodus brevissimus* (Orchard). Sample AjL-C.
7–10: *Novispathodus symmetricus* (Orchard). 7. Sample 150615-21. 8. Sample AjL-B. 9. Sample 151005-13. 10. Sample 160819-03.
11: *Novispathodus* sp. indet. Sample AjL-B.

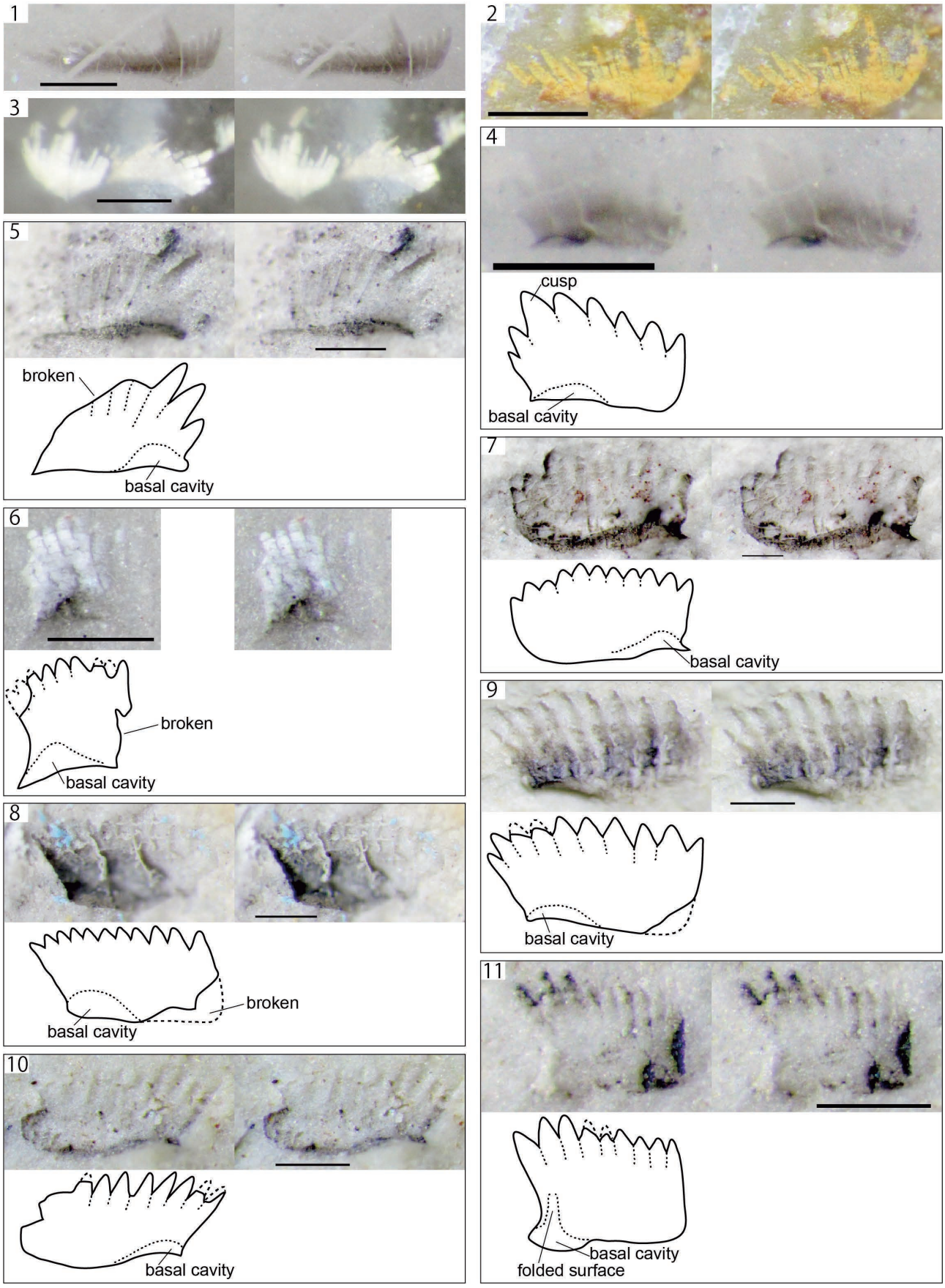
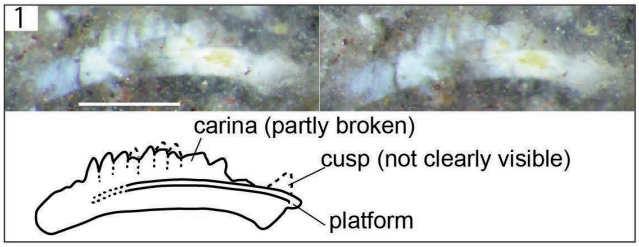
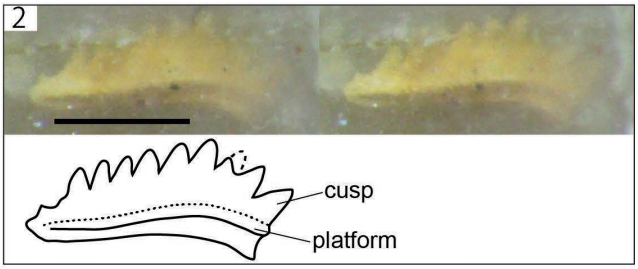
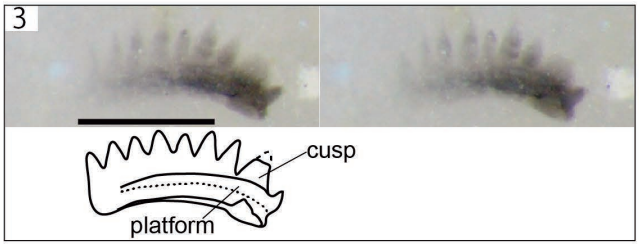

1
2
3
4
cusp
basal cavity
5
broken
basal cavity
6
broken
basal cavity
7
basal cavity
8
broken
basal cavity
9
basal cavity
10
basal cavity
11
basal cavity
folded surface

Plate 5 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. All figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

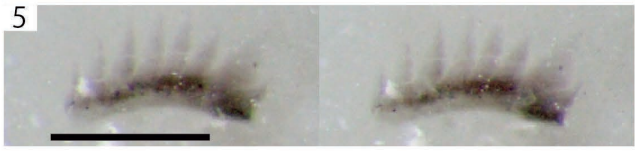
1: *Paragondolella* sp. cf. *Paragondolella bulgarica* Group. Sample 151015-08.5.
2–8: *Paragondolella bulgarica* Group. 2. Sample AJR 0. 3, 4. Sample AJR 144. 5. Sample AJR 310. 6, 7. Sample AJR 517. 8. Sample AJR 577.
9–14: *Paragondolella excelsa* Group. 9. Sample AJR 517. 10–12. Sample AJR 577. 13. Sample AJR 722. 14. Sample AJR 724+2.4m.

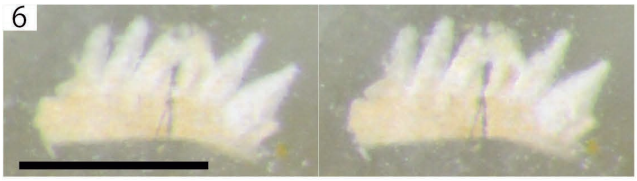

1
carina (partly broken)
cusp (not clearly visible)
platform

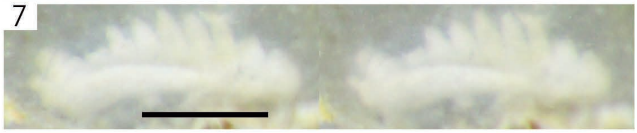

2
cusp
platform

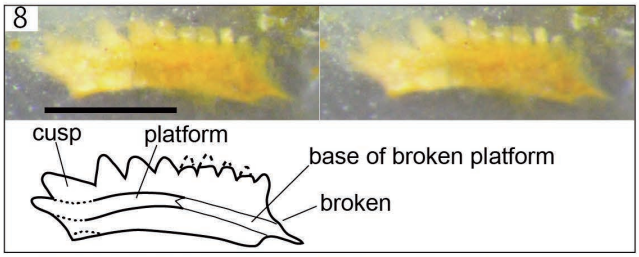

3
cusp
platform

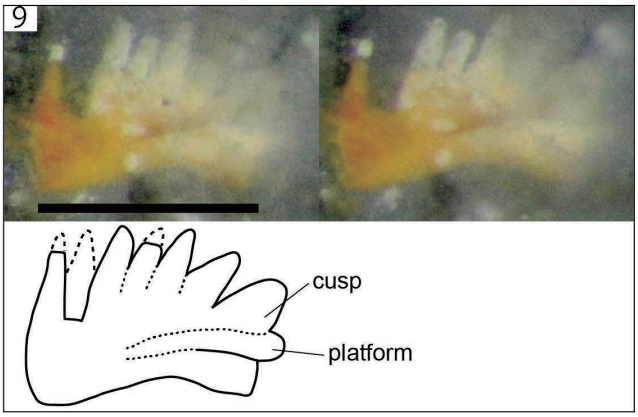
4

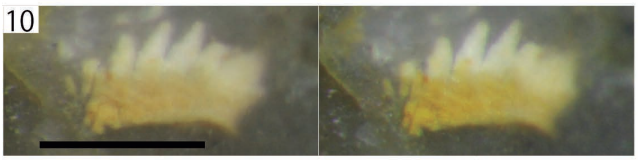

5

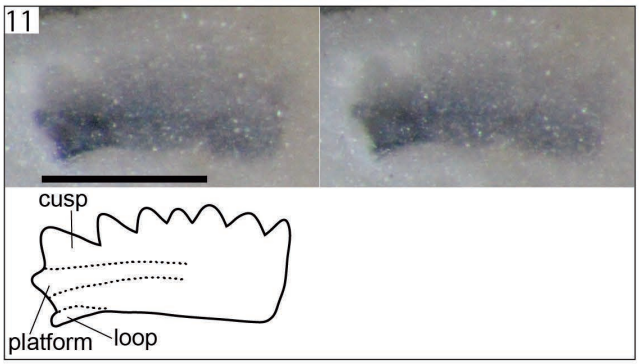

6

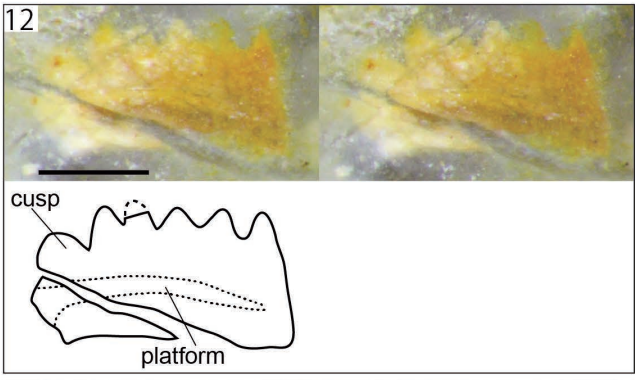

7

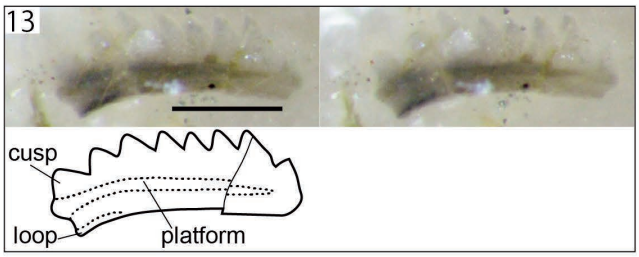

8
cusp
platform
base of broken platform
broken

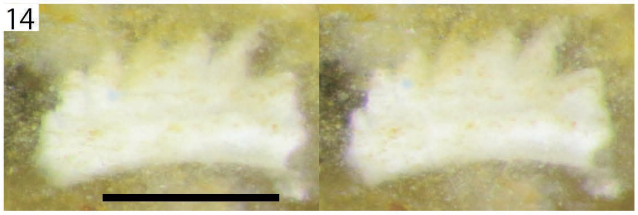

9
cusp
platform


10


11
cusp
platform
loop


12
cusp
platform


13
cusp
loop
platform


14

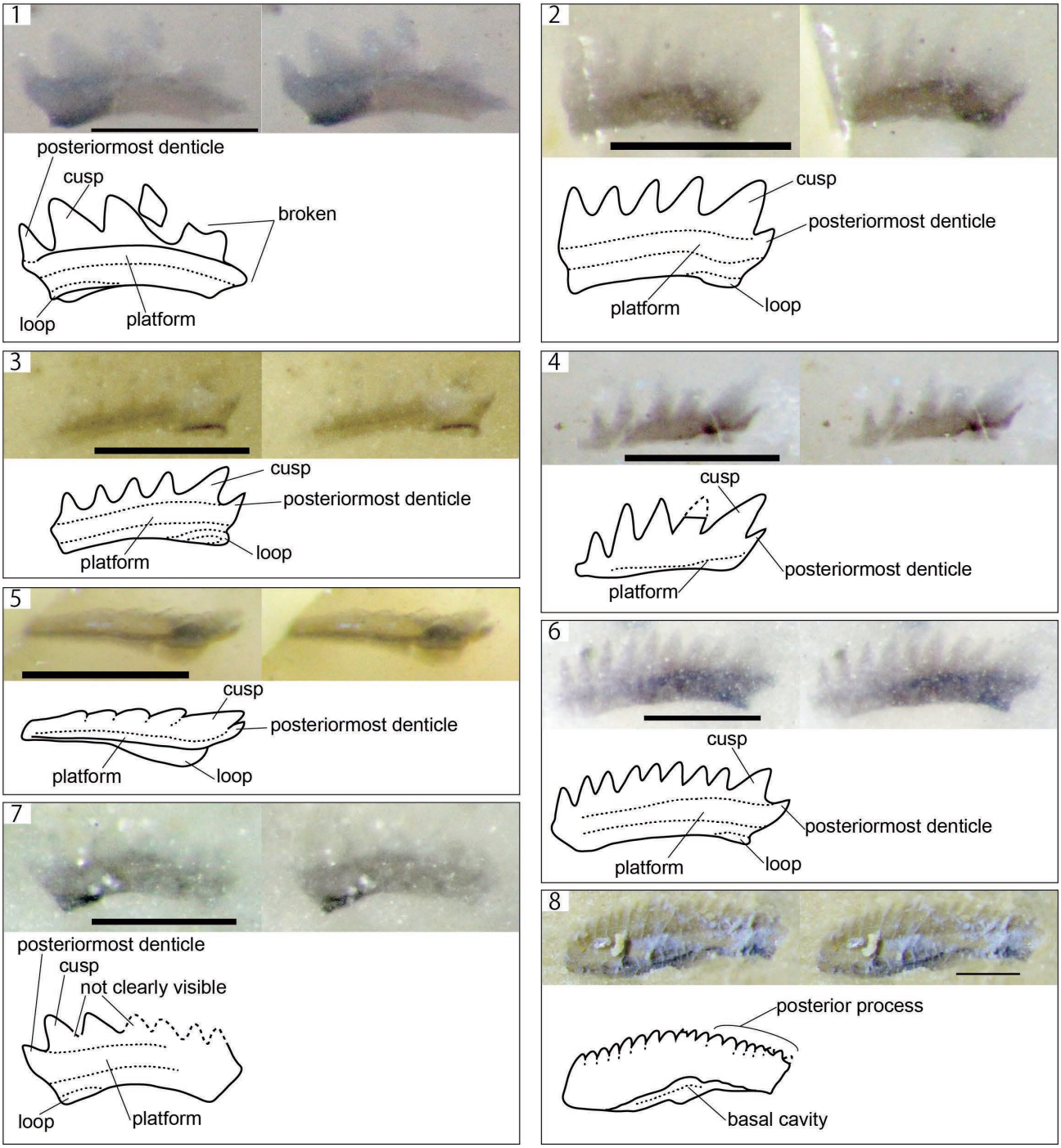


Plate 6 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. Fig. 8 is reversely arranged so that the mould appears as a cast. All other figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

1–7: *Paragondolella trammeri* Group. 1. Sample AJR 603–605. 2–4. Sample AJR 630. 5. Sample AJR 722. 6, 7. Sample AJR 724+1.9m.
8: *Triassospathodus anhuinensis* (Ding). Sample 150616-29.

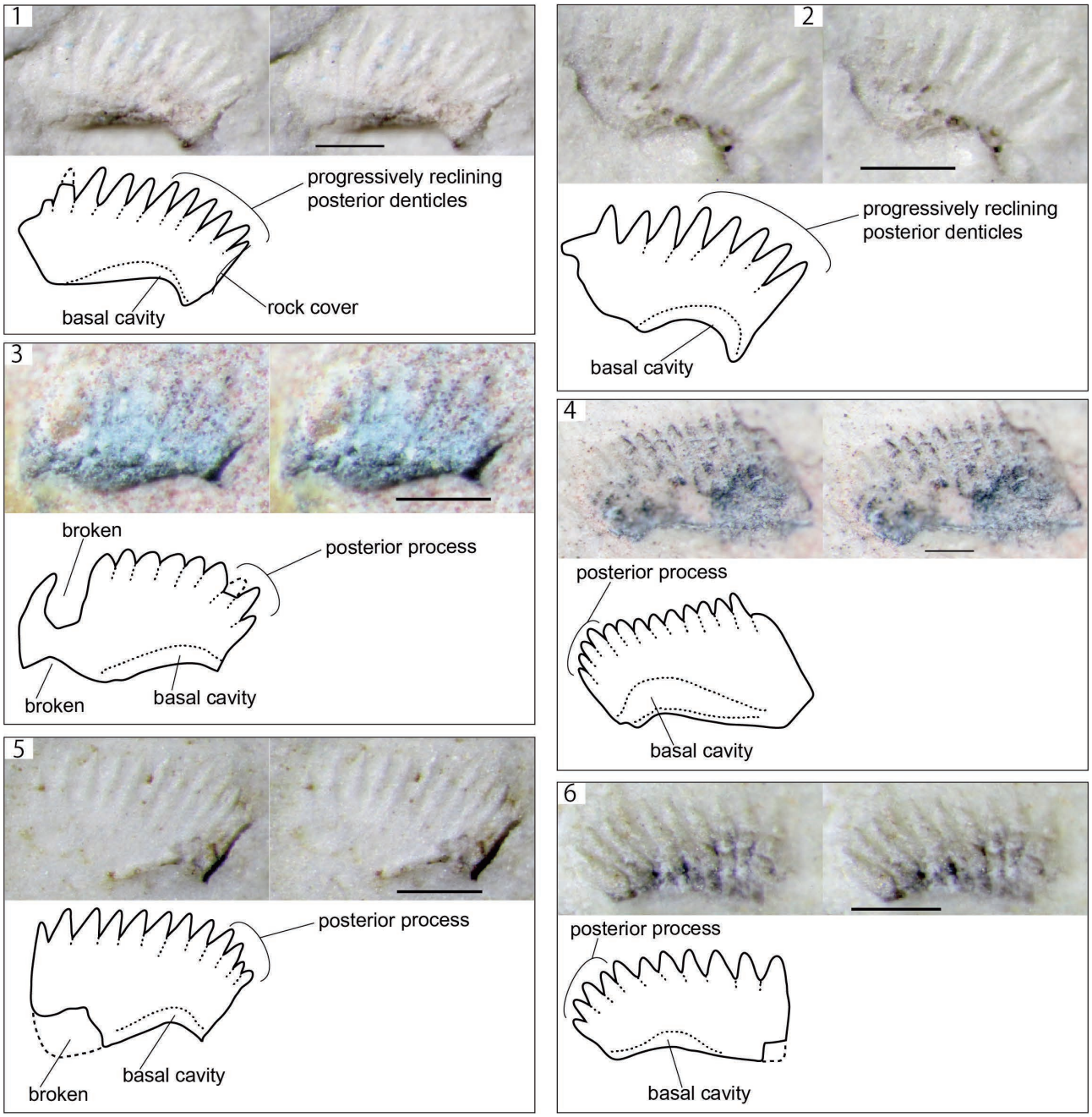


Plate 7 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Ajiro Island section. All figures are reversely arranged so that the moulds appear as casts. Scale bars are 200 μm.

1: *Triassospathodus brochus* (Orchard). Sample 151005-13.
2: *Triassospathodus* cf. *brochus* (Orchard). Sample 151005-13.
3–6: *Triassospathodus homeri* (Bender). 3. Sample 150615-21. 4. Sample AjL-B. 5. Sample 151005-13. 6. Sample AjL1-A.

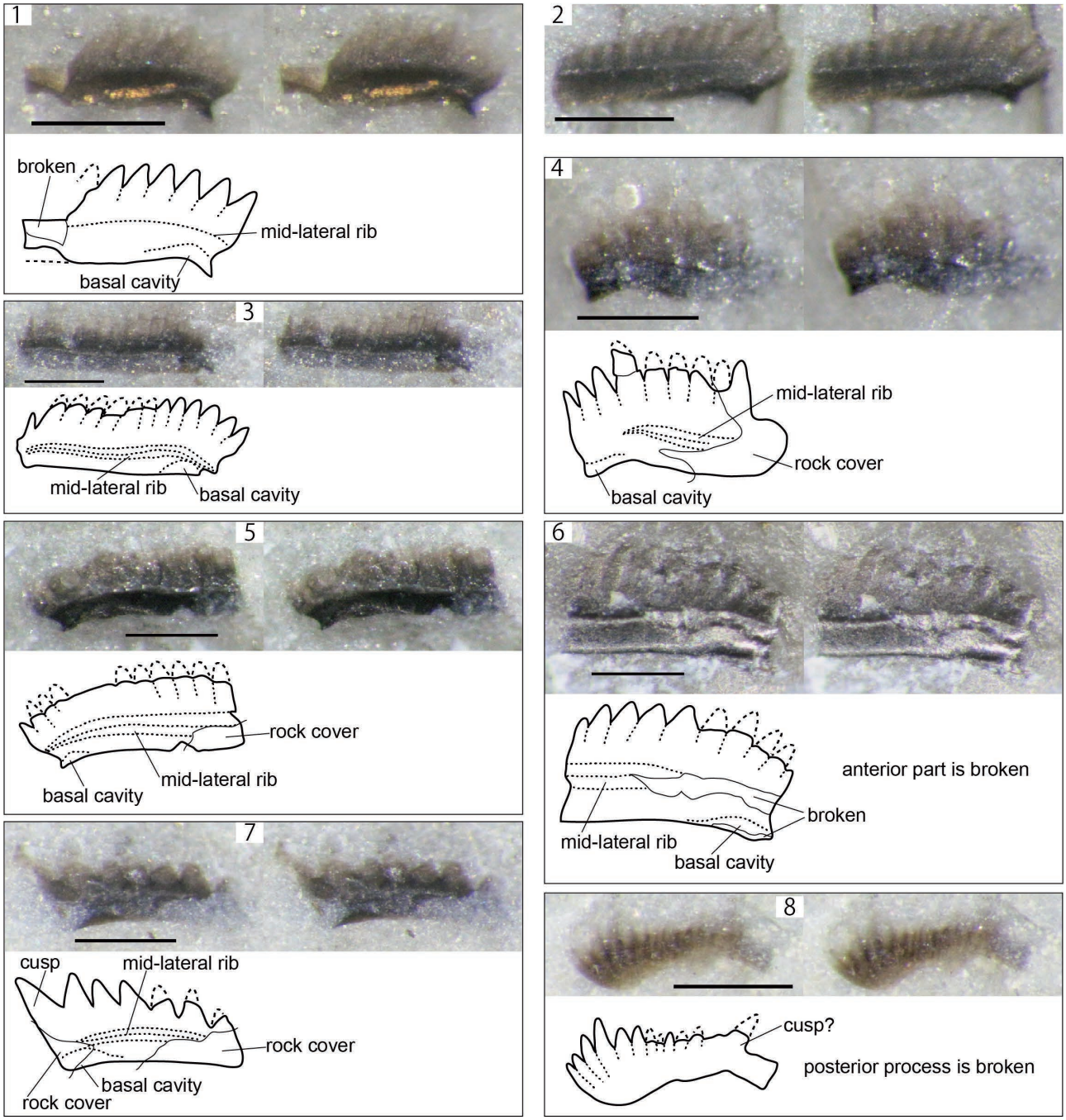


Plate 8 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Kr-2-YK section. All figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

1–6: *Chiosella timorensis* (Nogami). 1–3. Sample Kr1-04. 4. Sample Kr1-03. 5, 6. Sample Kr1-02.
7: *Chiosella* sp. Sample Kr1-04.
8: "*Neohindeodella* cf. *aequiramosa* Kozur & Mostler". Sample Kr1-03.

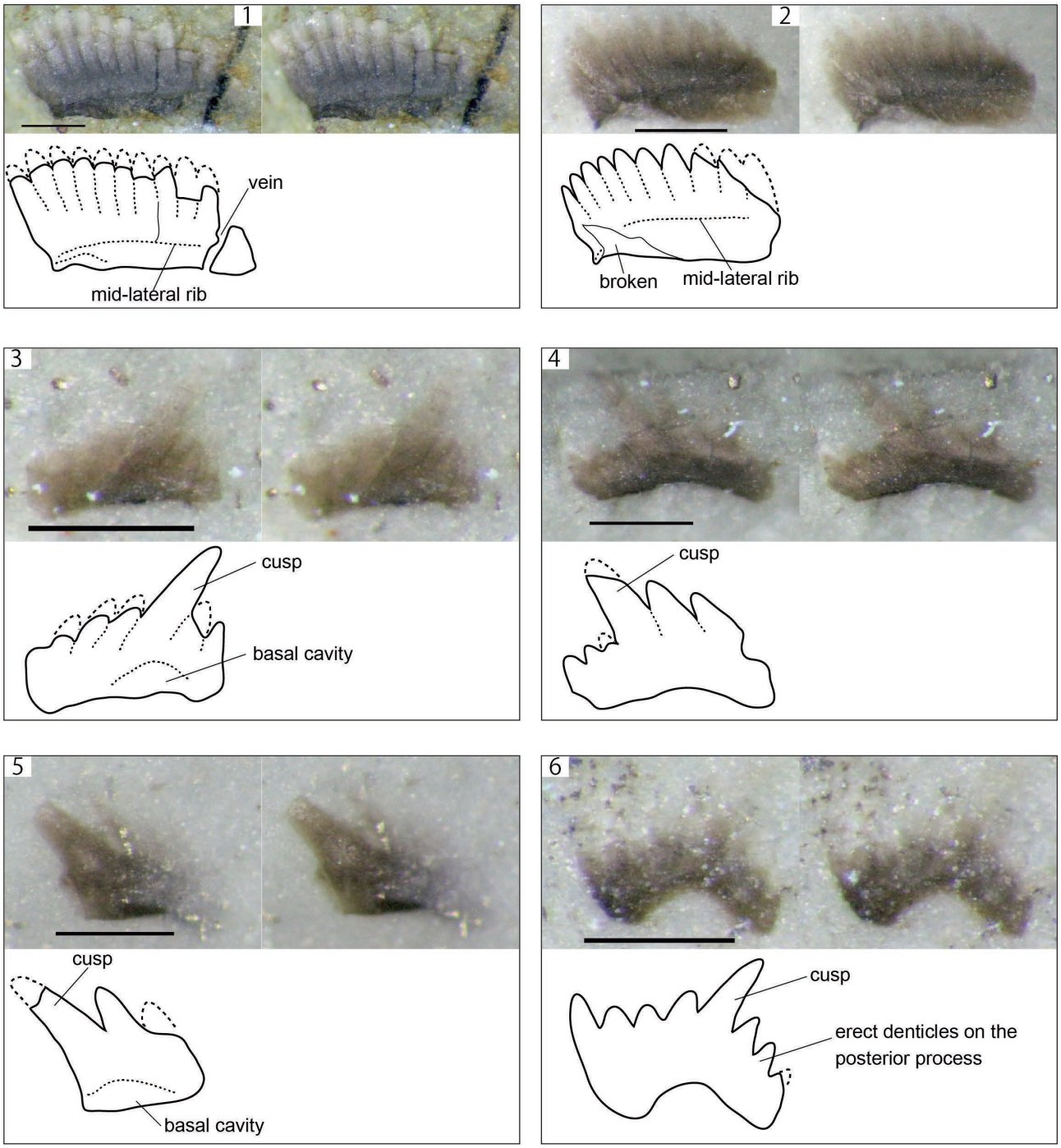
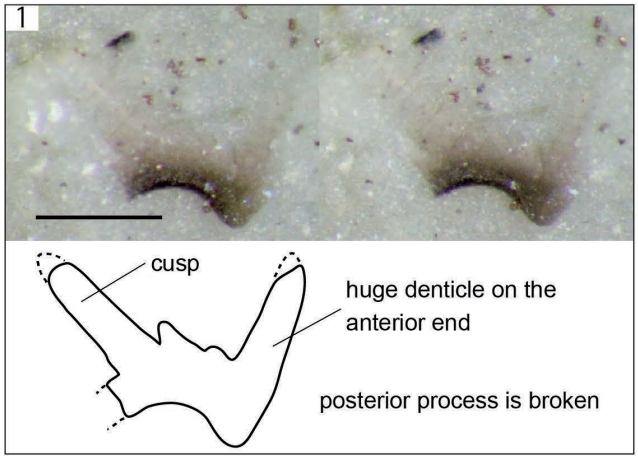


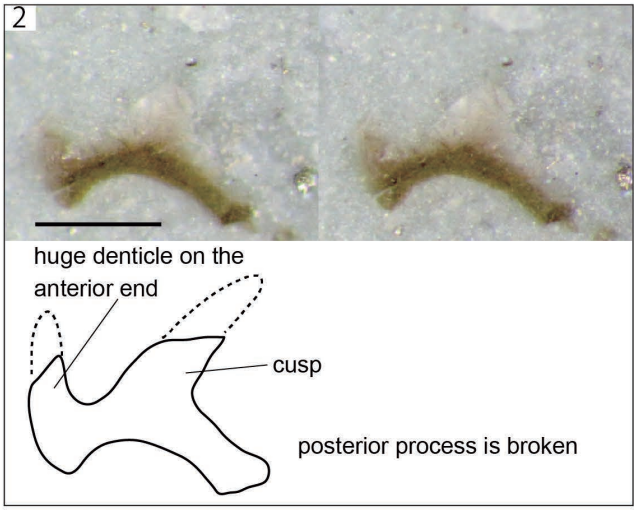
Plate 9 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Kr-2-I section. All figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

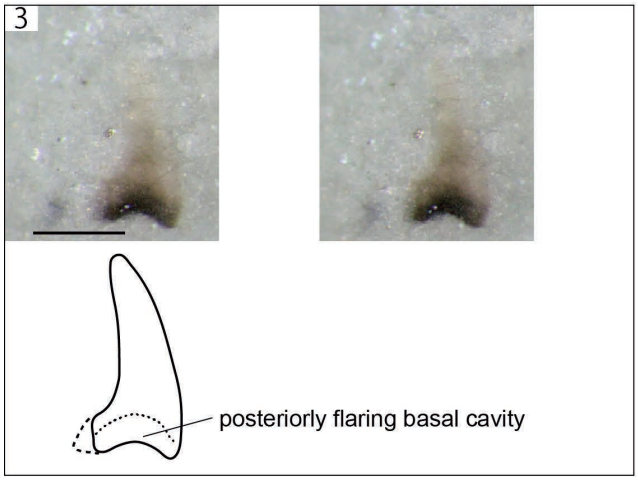
1, 2: *Chiosella gondolelloides* (Bender). 1. Sample Kr2-01. 2. Sample Kr2-03.
3, 4: *Cornudina breviramulis* (Tatge). Sample Kr2-01.
5: *Cornudina*? *igoi* Koike. Sample Kr2-01.
6: "*Kamuellerella gebzeensis* Gedik". Sample Kr2-03.

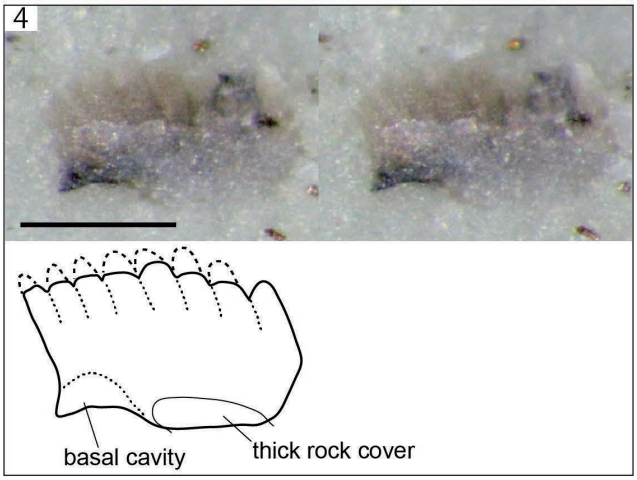
Plate 10 Stereo-photographs and sketches of conodonts from the Kr-2-I section. All figures are normally arranged. Scale bars are 200 μm.

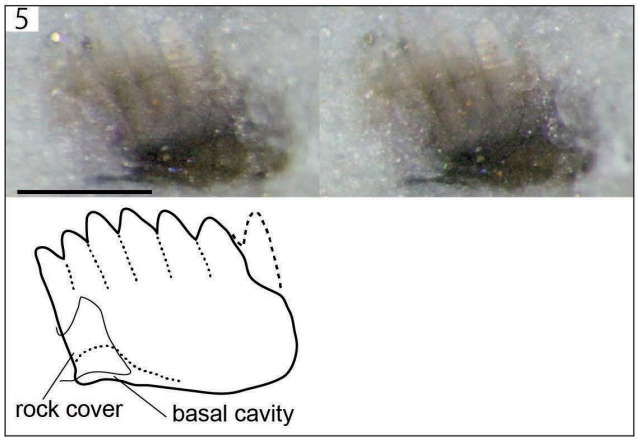
1, 2: "*Neohindeodella benderi* (Kozur & Mostler)". Sample Kr2-01.
3: *Neostrachanognathus tahoensis* Koike. Sample Kr2-01.
4, 5: *Novispathodus symmetricus* (Orchard). Sample Kr2-01.
6, 7: *Triassospathodus homeri* (Bender). 6. Sample Kr2-01. 7. Sample Kr2-03.

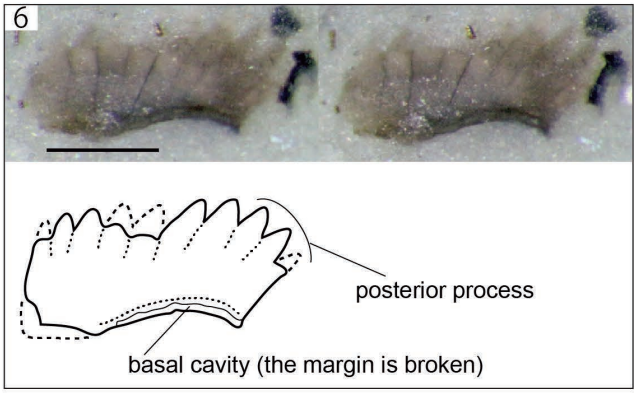

1
cusp
huge denticle on the anterior end
posterior process is broken

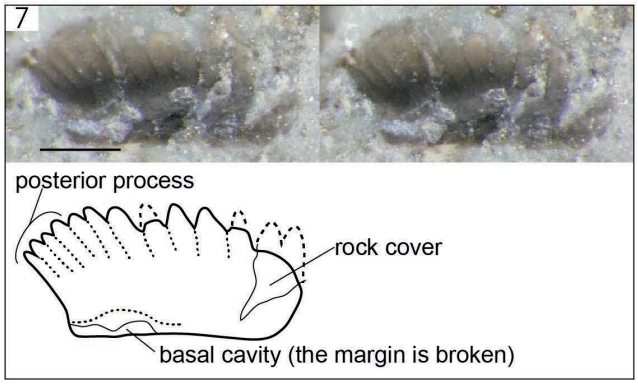

2
huge denticle on the anterior end
cusp
posterior process is broken


3
posteriorly flaring basal cavity


4
basal cavity
thick rock cover


5
rock cover
basal cavity


6
posterior process
basal cavity (the margin is broken)


7
posterior process
rock cover
basal cavity (the margin is broken)

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 91–99, 2019

論文 - Article

佐渡島，中新統鶴子層から得られた放散虫化石と堆積年代

川谷文子[1, *]・指田勝男[1]・上松佐知子[1]・甲能直樹[1, 2]

Ayako Kawatani, Katsuo Sashida, Sachiko Agematsu and Naoki Kohno (2019) Radiolarian fossils from the Miocene Tsurushi Formation distributed in Sado Island, Niigata Prefecture, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p.91–99, 4 figs, 1 table, 1 plate.

Abstract: The Middle Miocene Tsurushi Formation distributed in Sado Island is composed of the lower basalt and upper mudstone. This formation is important to elucidate the geohistory of Sado Island and the expansion process of Japan Sea.

We tried to clarify the geologic age of the Tsurushi Formation by using biostratigraphical data on microfossils from this formation. We identified radiolarian fossils from three sites (Sites 1 to 3) of the Tsurushi Formation and correlated the radiolarian assemblages with the previously proposed radiolarian zones. At the Site 1, we discriminated *Eucyrtidium inflatum*. *E. inflatum* indicate the *E. inflatum* Zone, which corresponds to 15.3–11.7 Ma. At the Site 2, *E. inflatum*, *Lychnocanoma kamtschatica* and *Lychnocanoma magnacornuta* were identified. On the basis of the occurrences of these species, the formation of the Site 2 can be correlated with the *E. inflatum* Zone (15.3–11.7 Ma) to the *L. magnacornuta* Zone (11.7–9.1 Ma). *L. kamtschatica* has been reported only from the high latitudes of the North Pacific. The occurrence of this species from the Tsurushi Formation is its first occurrence from the Japan Sea region. At the Site 3, relatively a lot of specimens of *Cyrtocapsella tetrapera* and *Cyrtocapsella japonica* are identified, which indicate the Subzone a of the *E. inflatum* Zone or older zones.

Keywords: Miocene, radiolaria, Japan Sea, Tsurushi Formation

要　旨

新潟県佐渡島に分布する鶴子層は，主に下部の玄武岩と上部の泥岩からなる中期中新世の地層である．鶴子層は，堆積した当時に大規模な日本海の拡大がおきたことから佐渡島の地史や日本海の発達史を解明する手掛かりを持つと考えられる．本研究では，鶴子層の詳細な年代を検討するため，佐渡島南部に分布する露頭より泥岩試料と炭酸塩ノジュール試料を採取し，放散虫化石の抽出を行った．

鶴子層の分布する3地点の試料より得られた放散虫化石に基づいて生層序学的検討を行った．その結果，鶴子層の年代は，地点1は*Eucyrtidium inflatum*が産出することから*E. inflatum* Zone に相当する15.3–11.7 Maであると考えられる．地点2からは，*E. inflatum*，*Lychnocanoma magnacornuta*及び*Lychnocanoma kamtschatica*が産出した．これら3種の産出により，地点2の鶴子層は*E. inflatum* Zone (15.3–11.7 Ma) から*L. magnacornuta* Zone (11.7–9.1 Ma) に相当すると考えられる．*L. kamtschatica*はこれまで北太平洋高緯度地域からしか報告がなかったが，今回この種の生息域が日本海に及んでいたことが初めて示された．地点3の年代は，*Cyrtocapsella tetrapera*と*Cyrtocapsella japonica*が比較的多く産出している点から，*E. inflatum* Zone のSubzone aかそれよりも古いと考えられる．

1．はじめに

新潟県の北西に位置する佐渡島は日本海最大の島であり，北部の大佐渡地域と南部の小佐渡地域に分けられる．大佐渡地域と小佐渡地域の間には国中平野が広がっている（第１図）．

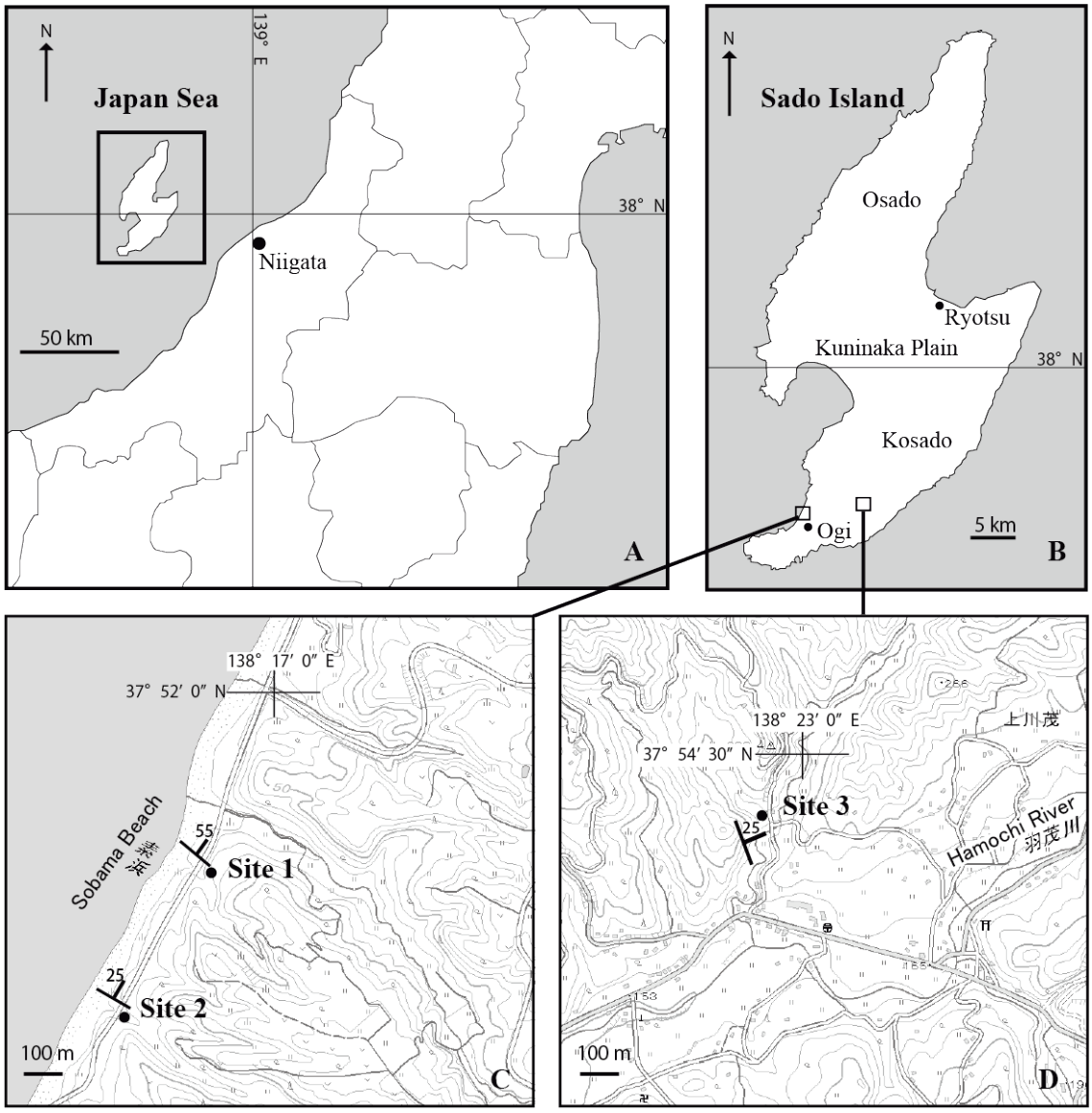
佐渡島では，中古生界と白亜紀の花崗岩からなるわずかな基盤の上を，漸新世から中新世前期のグリーンタフ層が不整合に覆い，新第三紀後期以降の海成層がさらにその上を不整合で覆っている（島津ほか，1977）．

新生界のうち，主に玄武岩とシルト岩からなる中部中新統鶴子層は，その堆積当時に日本海の拡大がおきたとされており（小林，2001），佐渡島の地史や日本海の発達

[1] 筑波大学大学院生命環境科学研究科 (Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan)

[2] 国立科学博物館（National Museum of Nature and Science, 4-1-1, Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-0005, Japan）

[*] Corresponding author: A. Kawatani, Email: kawatani@geol.tsukuba.ac.jp



第 1 図　調査地域の位置図．地形図は国土地理院の地理院地図（https://maps.gsi.go.jp/#16/37.862158/138.294353/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0l0u0t0z0r0f0，https://maps.gsi.go.jp/#16/37.904395/138.385892/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0l0u0t0z0r0f0（2018 年 12 月 27 日））を使用．
A，佐渡島の位置．B，佐渡島における試料採取地点．C，地点 1 と地点 2 の位置．D，地点 3 の位置．

Fig. 1　Map of the study area. Topographic map is from the GIS map (https://maps.gsi.go.jp/#16/37.862158/138.294353/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0l0u0t0z0r0f0, https://maps.gsi.go.jp/#16/37.904395/138.385892/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0l0u0t0z0r0f0 (December 27, 2018)) of the Geospatial Information Authority of Japan.
A, Location map of Sado Island. B, Location map of samples. C, Location map of Site 1 and Site 2. D, Location map of Site 3.

史を解明する際に重要な地層であると考えられる．

これまで鶴子層について，放散虫化石や有孔虫化石の年代（渡辺，1987）や堆積環境の研究（渡辺，1983，1987）などが行われてきたが，特に放散虫化石については船山（1988）の化石帯区分が提案される以前のデータであること，鶴子層とその上位の野田山（のたやま）層との境界の再検討が必要である（柳沢，2012a）ことなどの課題が存在する．本研究では，鶴子層分布域の 3 地点の露頭より得られた放散虫化石を最新知見に基づき検討し，鶴子層の年代推定を行った．

2．地質概説

佐渡島の一部地域でわずかに露出している中古生界の基盤岩のうち，大佐渡地域の暗灰色泥岩からは後期三畳紀を示す放散虫化石の産出が報告されている（板坂ほか，1994）．その暗灰色泥岩は付加体を覆う堆積物の可能性

があるとされ，大佐渡地域の基盤岩は秋吉帯の一部とみなされている（田沢，2000）．また，小佐渡地域の黒色泥岩から前期ジュラ紀の放散虫化石が報告され（鈴木・桑原，2003），小佐渡地域の基盤岩は足尾帯のジュラ紀付加体に対比されている（小林，2001）．

佐渡島における新第三系の層序は，歌代（1950），島津ほか（1973），島津・外山（1982）などにより層序学的研究が進められ，小木団体研究グループ（1986）により小佐渡地域の新第三系は下位から相川層，三瀬層，経塚山層，下戸層，鶴子層，野田山層，山田川層に区分された．

相川層は，下部は砂岩や礫岩，細粒凝灰岩などに富み，上部は凝灰岩，変質安山岩溶岩などからなる浅海～陸成層である（島津ほか，1973）．三瀬層と経塚山層はそれぞれ，粗面岩質安山岩溶岩や輝石角閃石安山岩溶岩などからなる陸成層と，石英安山岩や安山岩の火砕岩類を主体とし，火山円礫岩，礫岩，砂岩，炭層を挟む陸成層である（竹内ほか，2011）．下戸層は歌代（1950）により記載された大部分が砂岩，シルト岩，礫岩などの砕屑岩類からなる海成層である．経塚山層以下を不整合に覆う海進初期の堆積物で（柳沢，2012a），軟体動物化石，棘皮動物化石，海生哺乳類化石などが産出している．下戸層の上位の鶴子層は，小佐渡地域と大佐渡地域に分布する珪質頁岩を主体とする海成層である．鶴子層は渡辺（1932）により定義され，その後歌代（1950）により再定義された．鶴子層の上位の地層は従来中山層とされていたが，小木団体研究グループ（1986）はこの地層を岩質の特徴から二つに区分し，下位の珪藻質泥岩層を野田山層，上位の無層理塊状泥岩層を山田川層と定義した．

鶴子層の模式地は佐和田町（現佐渡市）鶴子周辺とされている（渡辺，1932）．鶴子層は珪質頁岩を主体とし，一部が玄武岩により構成されている（小林，2001）．鶴子層の最下部には海緑石が濃集した暗緑色の砂岩層が発達しており，上部では，珪質頁岩と同時異相である小木玄武岩層を挟む（柳沢，2012b）．鶴子層は放散虫化石及び珪藻化石により中期中新世の年代が提案されている（柳沢，2012a）．渡辺（1987）は*Cyrtocapsella tetrapera*の産出から，鶴子層を中世古・菅野（1973）の*C. tetrapera* Zoneに相当するとした．また，鶴子層下部より産出した浮遊性有孔虫をBlow（1969）の浮遊性有孔虫化石帯のN10–N11に対比し，鶴子層の年代を約15–13 Maとした．さらに，渡辺(1987)は，鶴子層上部より米谷（1978）による日本海側浮遊性有孔虫化石帯のPF3帯とPF4 帯下部に位置づけられる浮遊性有孔虫化石が産出していることから，鶴子層上部を約12.3–11.5 Maと推定した．

鶴子層の層理の発達した泥岩からは深海生軟体動物，ニシン科魚類，海亀，鳥類などの化石が発見されている（小野・上野，1985）．また，炭酸塩ノジュールからは海棲哺乳類化石が見つかっており（廣田ほか，1987），それと同一のノジュールから，中世古・菅野（1973）の*Cyrtocapsella tetrapera* Zoneに対比される放散虫化石群集が産出している（竹村・廣田，1983）．

3．調査地域の地質と分析用試料

鶴子層分布域の3地点の露頭について調査を行い，放散虫化石検討のために試料採取を行った（第1図）．試料は，小佐渡地域西部の素浜沿いの露頭（地点 1），地点1から浜沿いに1 kmほど南西に移動した場所に位置する露頭（地点 2），小佐渡地域の東部に位置する川茂の露頭（地点3）から採取した．とくに地点2周辺の鶴子層からは数多くの海生哺乳類化石が発見されている（佐渡海生哺乳動物化石研究グループ，1987；高橋ほか，1989）．

地点1の露頭における層厚は約22 mで，走向傾斜はN50° W55° Nである．地点1の柱状図を第2図に示す．岩相は灰色シルト岩層が卓越し，10–20 cmほどの厚さの黒色頁岩層がまれに挟在する．灰色シルト岩中には直径1.5 mの灰色炭酸塩ノジュールが含まれる．地点1の露頭から泥岩6試料，炭酸塩ノジュール1試料を採取した．

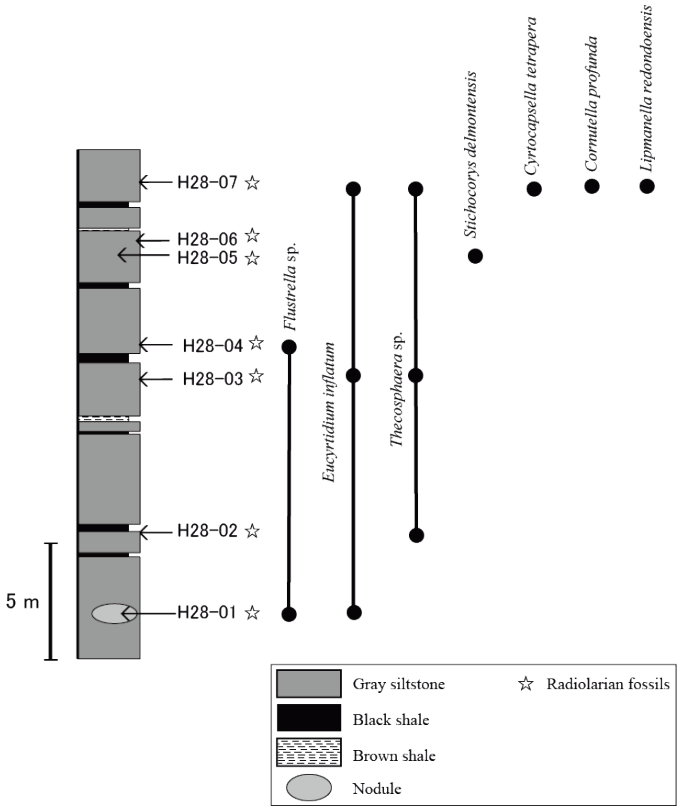
地点2の露頭における層厚は約14 mで，走向傾斜はN60° W25° Nである．地点2の柱状図を第3図に示す．岩相は灰色シルト岩層が卓越し，20–30 cmの厚さの黒色シルト岩層が最下部にみられる．厚さ30 cmの青灰色凝灰岩層や，灰色シルト岩と黒色頁岩が頻繁に繰り返す厚さが2.5 mの互層もみられた．最下部より10 m上位の暗灰色シルト岩中に直径20 cmの炭酸塩ノジュールが含まれる．地点2より泥岩9試料，炭酸塩ノジュール1試料を採取した．

地点3の露頭における層厚は約24 mで，走向傾斜はN20° W25° Nである．地点3の柱状図を第4図に示す．岩相は灰色から褐色，黒色のシルト岩が卓越し，上部の一層準に厚さ1.4 mの黒色頁岩層がみられる．下部の灰色シルト岩層の間に2–3cmの青灰色粘土岩層が観察できる．露頭の一部が厚さ2.5 m程観察できず，その上位に，4.5 mの褐色シルト岩層，魚類化石を含む1.4 mの黒色頁岩層，1.5 mの暗灰色シルト岩層，1.5 mの灰色シルト岩層の順で堆積している．最下部より5 m程上位の灰色シルト岩中に直径30 cmほどの炭酸塩ノジュールが含まれる．地点3からは泥岩12試料，炭酸塩ノジュール1試料を採取した．

走向傾斜から，3地点の相対的な上下関係は，地点2が最も下位で，地点1はそれよりも上位，地点3は最も上位と思われる．

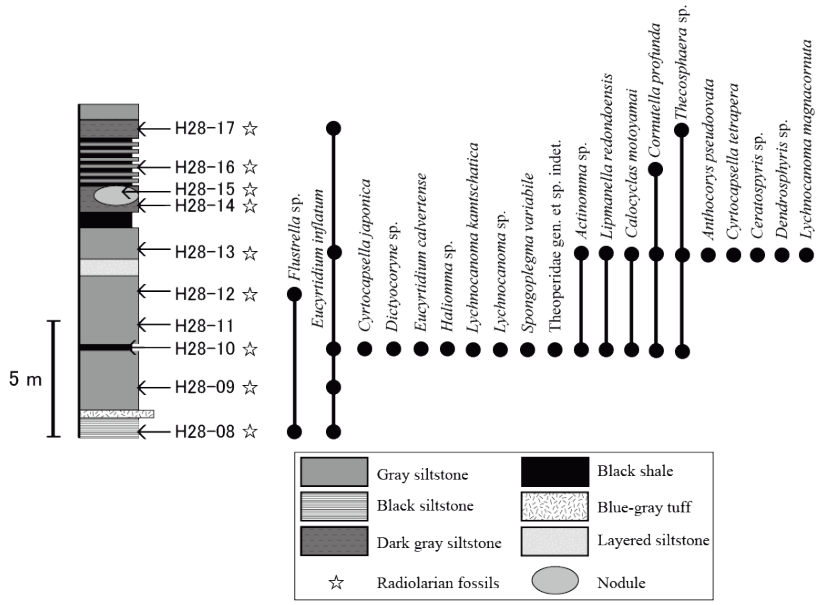
4．岩石の処理方法

岩石中から放散虫化石を抽出するため，硫酸ナトリウム法（鈴木，2012）とフッ化水素酸溶液を用いた酸処理（鈴木，2012）を行った．頁岩，シルト岩の試料は硫酸ナトリウム法により処理を行い，残渣を得た．ノジュー



第2図　地点1の柱状図と主な放散虫化石レンジ．

Fig. 2　Columner section and stratigraphic occurrence of radiolarian fossils of the Tsurushi Formation at Site 1.



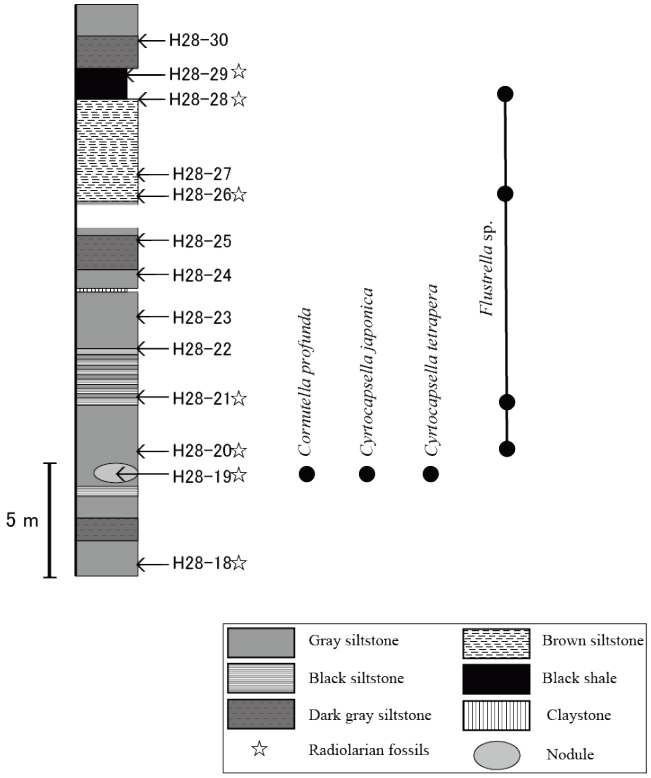
第3図　地点2の柱状図と主な放散虫化石レンジ．

Fig. 3　Columner section and stratigraphic occurrence of radiolarian fossils of the Tsurushi Formation at Site 2.

ルはフッ化水素酸溶液により酸処理を行い残渣を得た．乾燥した残渣を実体顕微鏡で観察した．残渣中の放散虫化石を面相筆で拾い上げ，走査型電子顕微鏡で写真撮影を行い同定を行った．

5．放散虫化石の産出状況

3地点の30試料を処理した結果，23試料から放散虫化石が得られた．その中で同定可能な状態の放散虫化石が産出した18試料における化石一覧を第1表に示す．各



第4図 地点3の柱状図と主な放散虫化石レンジ.

Fig. 4 Columner section and stratigraphic occurrence of radiolarian fossils of the Tsurushi Formation at Site 3.

地点の柱状図とともに，産出化石の産出レンジを第2図～第4図に示す.

地点1の試料H28-01より*Eucyrtidium inflatum*，*Flustrella* sp.，試料H28-02より*Thecosphaera* sp.，H28-03より*E. inflatum*，*Thecosphaera* sp.，H28-04より*Flustrella* sp.，H28-05より*Stichocorys delmontensis*，H28-07より*Cornutella profunda*，*C. tetrapera*，*E. inflatum*，*Lipmanella redondoensis*，*Thecosphaera* sp.などの放散虫化石が得られた． 本露頭での下部からは保存良好な放散虫化石は得られず，属・種まで同定できないものが多かった.

地点2の試料H28-08より*E. inflatum*，*Flustrella* sp.，H28-09より*E. inflatum*，H28-10より*Actinomma* sp.，*Calocyclas motoyamai*，*C. profunda*，*Cyrtocapsella japonica*，*Dictyocoryne* sp.，*Eucyrtidium calvertense*，*E.inflatum*，*Haliomma* sp.，*L. redondoensis*，*Lychnocanoma kamtschatica*，*Lychnocanoma* sp.，*Spongoplegma variabile*，*Theoperidae* sp.，*Thecosphaera* sp.，H28-12より*Flustrella* sp.，H28-13より*Actinomma* sp.，*Anthocorys pseudoovata*，*C.motoyamai*，*Ceratospyris* sp.，*C. profunda*，*C. tetrapera*，*Dendrosphyris* sp.，*E. inflatum*，*L. redondoensis*，*Lychnocanoma magnacornuta*，*Thecosphaera* sp.，H28-16より*C. profunda*，H28-17より*E. inflatum*，*Thecosphaera* sp.などの放散虫化石が得られた．試料H28-10の黒色頁岩からは，他の試料に比べ特に保存状態の良い放散虫化石が得られた.

地点3の試料H28-19の炭酸塩ノジュールからはフッ酸処理により*C. profunda*，*C. tetrapera*，*C. japonica*などの比較的保存良好な放散虫化石が多産し，試料H28-20，H28-21，H28-26，H28-28から*Flustrella* sp.が得られた.

6． 放散虫化石帯と年代

日本の新第三紀放散虫化石層序の研究は1950年代にはじめられ，中世古ほか（1972a，1972b），中世古・菅野（1973）によって放散虫化石帯が設定された． その後も船山（1988），Motoyama（1996）などにより化石帯区分の再検討が行われてきた． 近年の研究例としては，Kamikuri *et al.*（2004，2007，2017）による深海掘削コアを用いた生層序学的研究やKamikuri（2010）による新種の記載と新たな示準化石の検討などがあげられる.

船山（1988）は能登地域の放散虫化石層序の研究により，*E. influtum* Zone（Reynolds，1980）の再定義とともに*Lychnocanoma nipponica magnacornuta* Zoneを提唱し，北陸・東北日本をはじめとした北太平洋地域へ広く適用できる放散虫化石帯を確立した． 船山（1988）による生層序区分の確立が，日本海地域の放散虫化石研究に大きな影響を与えたと言える．彼による化石帯の基本的な枠組みは，その後もMotoyama（1996），Kamikuri *et al.*（2004，2007，2017）によって踏襲されている． 本研究では，Kamikuri *et al.*（2007）とKamikuri（2010）による放散虫化石帯と年代値を用いて，それぞれの地点の鶴子層の放散虫化石帯と堆積年代を検討した.

地点1の鶴子層から産する放散虫化石の特徴として，

第1表　産出した放散虫化石リスト.
Table 1　List of radiolarian fossils.

	Site 1						Site 2							Site 3				
Sample number	H28-01	H28-02	H28-03	H28-04	H28-05	H28-07	H28-08	H28-09	H28-10	H28-12	H28-13	H28-16	H28-17	H28-19	H28-20	H28-21	H28-26	H28-28
Actinomma sp.									●		●							
Anthocorys pseudoovata											●							
Calocyclas motoyamai									●		●							
Ceratospyris sp.											●							
Cornutella profunda						●			●		●	●		●				
Cyrtocapsella japonica									●					●				
Cyrtocapsella tetrapera						●					●			●				
Dendrosphyris sp.											●							
Dictyocoryne sp.									●									
Eucyrtidium calvertense									●									
Eucyrtidium inflatum	●		●			●	●	●	●		●		●					
Flustrella sp.	●			●			●			●					●	●	●	●
Haliomma sp.									●									
Lipmanella redondoensis						●			●		●							
Lychnocanoma kamtschatica									●									
Lychnocanoma magnacornuta											●							
Lychnocanoma sp.									●									
Spongoplegma variabile									●									
Stichocorys delmontensis					●													
Theoperidae gen. et sp. indet.									●									
Thecosphaera sp.		●	●			●			●		●		●					

*E. inflatum*の産出を挙げることができる．また，*C. tetrapera* が共産している点も注目される．船山(1988)によって *E. inflatum*の初産出から*L. magnacornuta*の初産出までが*E. inflatum* Zoneと定義され，その年代はKamikuri *et al.* (2007)によって15.3–11.7 Maとされている．従って，*E. inflatum*が産出し*L. magnacornuta*が産出しないH28-01からH28-07にかけての層序区間は*E. inflatum* Zoneに相当し，その年代は15.3–11.7 Maと考えられる．

地点2の放散虫化石の特徴として，他の地点では見られない*L. kamtschatica*と *L. magnacornuta*が産出している．また*E. inflatum*が産出している点にも注目し，年代の検討を行った．*E. inflatum*が産出し*L. magnacornuta*が産出しないことから，下部のサンプルH28-08からH28-10までが*E. inflatum* Zoneに相当すると考えられる．特に，サンプルH28-10からは，*E. inflatum* Zoneの最上部付近の11.7–1.0 Maを示す*L. kamtschatica* (Kamikuri, 2010)が産出している．よって，サンプルH28-10は*E. inflatum* Zone中の11.7–13.0 Maに相当すると考えられる．また，サンプルH28-13から*L. magnacornuta*が産出していることから，サンプルH28-13は*L. magnacornuta* の産出で定義づけられる*L. magnacornuta* Zoneに対比され，11.7–9.1 Maに相当すると考えられる． サンプルH28-14からH28-17については明確に化石帯を示す種が産出していないため，化石帯の特定はできない．

地点3の1試料(H28-19)から，*C. tetrapera*と*C. japonica* が多産した．船山(1988)によると，*E. inflatum* Zoneのうち，*C. tetrapera*の急減層準以下がSubzone aと定義されている．従って，この試料は*E. inflatum* ZoneのSubzone aかそれよりも古い年代に相当すると考えられる．

放散虫化石による年代検討により，地点２の年代が他の2地点に比べて最も新しいことが明らかとなったが，この結果は走向傾斜に基づいた3地点の相対的な上下関係と異なる．小木団体研究グループ(1986)における小佐渡地域の地質構造と比較した結果，少なくとも本研究における3地点の走向傾斜に関して矛盾はないと考えられる．佐渡島の小佐渡地域において，西側の小木半島側で

は複雑な褶曲構造が存在し，東側の小佐渡山塊では断層と単調な向斜背斜構造が存在することが知られている（小木団体研究グループ，1986）．特に地点1と地点2が位置する素浜周辺には複数の褶曲構造が分布しており（小木団体研究グループ，1986），今回の結果に至った原因としてそれらの褶曲が関係している可能性が考えられる．しかし，現段階では証拠が不十分であるため，走向傾斜に基づいた3地点の相対的な上下関係に矛盾が生じた原因の断定はせず，さらなる情報収集と詳細な地質学的・生層序学的検討を今後の課題としたい．

7．まとめ

鶴子層の堆積年代の検討を行った．3地点で柱状図を作成し，放散虫の層序分布を検討した．地点1で見られる地層の堆積年代は，*E. inflatum* Zoneに相当し，15.3–11.7 Maに相当すると考えられる．地点2で見られる地層の堆積年代は，少なくとも*E. inflatum* Zoneから*L. magnacornuta* Zoneに相当すると考えられる．地点3で見られる地層の堆積年代は，*E. inflatum* ZoneのSubzone aかそれよりも古い年代に相当すると考えられる．

本研究で推定された3地点でみられる地層の堆積年代は，先行研究で推定されている鶴子層の年代と整合的である．しかし，走向傾斜に基づいた3地点の地層の相対的な上下関係とは異なり，地点2の地層の堆積年代が最も新しい可能性があることがわかった．このような結果に至った原因について，今後さらなる検討が必要である．また，本研究ではこれまで高緯度の北太平洋地域でしか見られなかった*L. kamtschatica*が得られ，その生息地域がより広域なものであったことを示すことができた．これまで鶴子層では未発見であった放散虫化石を用いて，近年の層序学的研究のもと年代検討を行ったことで，従来の鶴子層についての層序学的情報を更新することができた．

謝辞：本研究を進めるにあたり，佐渡島ジオパーク推進委員会室長斎藤辰弥氏，推進指導員相田満久氏，学芸員市橋弥生氏からご協力をいただいた．佐渡市立佐渡博物館の滝川邦彦氏には，佐渡博物館に所蔵されている化石標本の観察をさせていただいた．査読者の山形大学本山功博士，熊本大学秋元和實博士からは，懇切丁寧なご教示をいただいた．以上の方々に深く感謝申し上げる．

文　献

Blow, W. H. (1969) Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. *Proc. First International Conference on Planktonic Microfossils*, **1**, 199–422.

船山政昭（1988）能登半島珠洲地域の新第三系の岩相および放散虫化石層序．東北大地質古生物研邦報，no. 91，15–41.

廣田清治・小林巌雄・笹川一郎・堀川秀夫・亀井節夫（1987）佐渡島で発見されたアロデスムス（哺乳綱食肉目）の頭骨化石について．佐渡博研報，no. 9，197–209.

板坂孝司・松岡　篤・田沢純一（1994）新潟県佐渡島北東部鷲崎地域の先第三系より三畳紀後期放散虫化石の発見．地質雑，**100**，368–370.

Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Revue de Micropaléontologie*, **53**, 85–106.

Kamikuri, S., Nishi, H., Motoyama, I. and Saito, S. (2004) Middle Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the Northwest Pacific Ocean, ODP Leg 186. *The Island Arc*, **13**, 191–226.

Kamikuri, S., Nishi, H. and Motoyama, I. (2007) Effects of late Neogene climatic cooling on North Pacific radiolarian assemblages and oceanographic conditions. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **249**, 370–392.

Kamikuri, S., Itaki, T., Motoyama, I. and Matsuzaki, K. (2017) Radiolarian biostratigraphy from middle Miocene to late Pliocene in the Japan Sea. *Paleontol. Res*, **21**, 230–254.

小林巌雄（2001）新潟の新生界–佐渡島編．新潟応用地質研究会誌，**57**，9–21.

米谷盛寿郎（1978）東北日本油田地域における上部新生界の浮遊性有孔虫層序．池辺展生教授記念論文集，35–60.

Motoyama, I.（1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221–262.

中世古幸次郎・菅野耕三（1973）日本新第三紀の化石放散虫分帯．地質学論集，no. 8，23–33.

中世古幸次郎・菅野耕三・家田享一（1972a）新潟堆積盆地の化石放散虫層序に関する2，3の問題．石油技誌，**37**，55–70.

中世古幸次郎・小泉　格・菅野耕三・米谷盛寿郎（1972b）富山県灘浦地方の新第三系の微化石層序．地質雑，**78**，253–264.

小木団体研究グループ（1986）小佐渡山塊南部の新生界．地球科学，**40**，417–436.

小野慶一・上野輝彌（1985）佐渡島の第三紀脊椎動物化石．国立科博専報，**18**，65–73.

Reynolds, R. A. (1980) Radiolarians from the Western North Pacific, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. *In* Scientific Party, *Init. Repts. DSDP*, **56-57**, 735–767.

佐渡海棲哺乳動物化石研究グループ（1987）佐渡島，中新統鶴子層産クジラ化石について．佐渡博研報，no. 9，211–217.

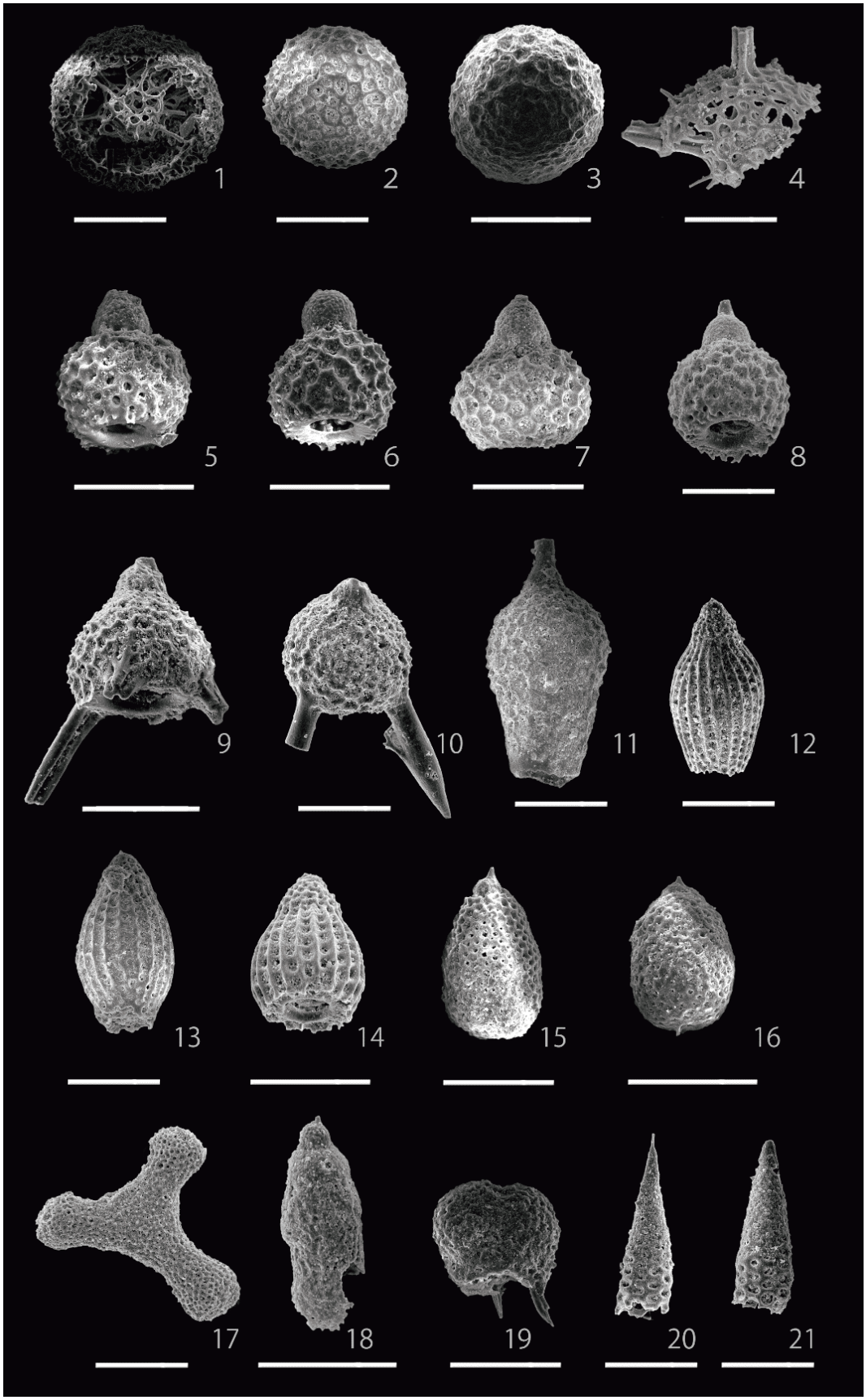
島津光夫・外山哲英（1982）佐渡島の新第三紀火山岩類. 地質雑, **88**, 381–400.
島津光夫・金井克明・外山哲英・市橋紘一淋・皆川　潤・高浜信行(1973) 佐渡島の地質構造発達と火成活動. 地質学論集, no. 9, 147–157.
島津光夫・外山哲英・皆川　澗・高浜信行・若林茂敬・斉藤良二郎・金井克明・市橋紘ー・佐々木　正・歌代　勤・高野武男・長谷川　正・小林忠夫（1977）佐渡地質説明書, 日本油田・ガス田図11. 地質調査所, 112p.
鈴木紀毅(2012) 篩を使った微化石処理と検鏡準備(放散虫, 有孔虫, 貝形虫, コノドント). 谷村好洋・辻　彰洋編, 微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界, 東海大学出版会, 泰野, 345–360.
鈴木寿志・桑原希世子（2003）佐渡島小佐渡地域から産したペルム紀放散虫. 地質雑, **109**, 489–492.
高橋啓一・野村正弘・小林巖雄（1989）佐渡島小木町堂釜産の鯨類(ツチクジラ属)頭骨化石の1標本. 地球科学, **43**, 102–105.
竹村厚司・廣田清治(1983) 佐渡, 鶴子層の脊椎動物化石を含むドロマイトノジュールの放散虫化石. 大阪微化石研究会誌, no. 10, 29–38.
竹内圭史・尾崎正紀・小松原　琢(2011)新潟沿岸域20万分の1地質図及び説明書. 海陸シームレス地質情報集,「新潟沿岸域」, 数値地質図S-2, 地質調査総合センター.
田沢純一(2000) 中・古生界の地体区分と形成史. 新潟県地質図改訂委員会編「新潟県地質図説明書」, 新潟県, 30.
歌代　勤(1950) 佐渡ケ島(大佐渡)南西部・澤根一相川地域の層序について. 地質雑, **56**, 302–303.
渡辺其久男(1983) 東北裏日本油田地域の年代層序の現状. 石油技誌, **48**, 88–92.
渡辺其久男(1987) 佐渡島の有孔虫および放散虫化石について. 佐渡博研報, no. 9, 127-156.
渡辺久吉(1932) 第四章. 日本地質鉱産誌, **1**, 92–152.
柳沢幸夫(2012a) 佐渡島羽茂地域の後期中新世海生珪藻化石. 地質調査総合センター研究資料集, no. 568, 1–19.
柳沢幸夫（2012b) 佐渡島小木半島の中新世玄武岩層の年代 ―珪藻年代層序による再検討―. 地質調査総合センター研究資料集, no. 569, 1–19.

（ 受 付：2017年12月19日； 受 理：2019年1月18日 ）

(→ p. 99)

図版 1　鶴子層より産出した放散虫化石の走査型電子顕微鏡写真.
Plate 1　SEM photomicrographs of radiolarian fossils from the Tsurushi Formation. Scale bar = 100 μm

1. *Spongoplegma variabile* Nakaseko (H28-10)
2. *Thecosphaera* sp. (H28-10)
3. *Thecosphaera* sp. (H28-02)
4. *Haliomma* sp. (H28-01)
5. *Lipmanella redondoensis* Campbell and Clark (H28-07)
6. *Lipmanella redondoensis* Campbell and Clark (H28-13)
7. *Lipmanella redondoensis* Campbell and Clark (H28-10)
8. *Lipmanella redondoensis* Campbell and Clark (H28-10)
9. *Lychnocanoma magnacornuta* Sakai (H28-13)
10. *Lychnocanoma kamtschatica* Kamikuri (H28-10)
11. *Calocyclas motoyamai* Kamikuri (H28-10)
12. *Eucyrtidium inflatum* Kling (H28-13)
13. *Eucyrtidium inflatum* Kling (H28-10)
14. *Eucyrtidium calvertense* Martin (H28-10)
15. *Cyrtocapsella tetrapera* Haeckel (H28-07)
16. *Cyrtocapsella japonica* Nakaseko (H28-13)
17. *Dictyocoryne* sp. (H28-10)
18. Theoperidae gen. et sp. indet. (H28-10)
19. *Dendrosphyris* sp. (H28-13)
20. *Cornutella profunda* Ehrenberg (H28-10)
21. *Cornutella profunda* Ehrenberg (H28-10)


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 101–108, 2019

Article

Summer surface water polycystine radiolarians in the eastern margin of the Japan Sea

Naoto Ishida[1,*]

Naoto Ishida (2019) Summer surface water polycystine radiolarians in the eastern margin of the Japan Sea. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 101–108, 6 figs.

Abstract: In late August 2014, a living polycystine radiolarian assemblage was collected from the surface waters off the shore of Sakata, Yamagata Prefecture, in the eastern margin of the Japan Sea. The assemblage was dominated by the spumellarian *Spongosphaera streptacantha*, and included a few individuals of *Pseudocubus obeliscus* and *Tetrapyle octacantha*. The intraspecific variation in *S. streptacantha* observed in the main spine and spongiose layer was thought to reflect skeletal growth. Morphometric analysis of the main spine and spongiose layer indicated that most individuals of *S. streptacantha* were growing. On the sampling day, the surface water attained the annual maximum water temperature and was strongly influenced by the Tsushima Warm Current. *S. streptacantha* inhabited the summer surface water of this ocean area almost exclusively.

Keywords: living radiolarian assemblage, summer surface water, *Spongosphaera streptacantha* Haeckel, Tsushima Warm Current, Japan Sea

1. Introduction

The Japan Sea is a mid-latitude marginal sea enclosed by the Eurasian Continent, Japanese Islands, and Sakhalin (Fig. 1A). The surface water in the southeastern half of the Japan Sea is strongly influenced by the Tsushima Warm Current (TWC), which flows into the Japan Sea through the Tsushima Strait in the southwest and exits through the Tsugaru and Soya (La Perouse) straits in the northeast. Microplankton in the surface water of the TWC drift north and develop ontogenetically and heterogenetically under the influence of the warm water, salinity, and nutriments.

Polycystine radiolarians are useful paleoenvironmental indicators in the Japan Sea. Over the last 15 years, our knowledge of radiolarians in the Japan Sea has increased based on investigations using core sediments (e.g. Itaki, 2001; Itaki and Ikehara, 2003), surface sediments (e.g. Itaki, 2003; Motoyama *et al.*, 2016), and living material (e.g. Matsuoka *et al.*, 2001; Itaki *et al.*, 2003). This study reports a living polycystine radiolarian assemblage in the high summer surface waters of the eastern margin of the Japan Sea. The assemblage provides useful information on the skeletal growth of the radiolarian S*pongosphaera streptacantha* and is very suggestive of the seasonal change in surface-water radiolarians in the Japan Sea.

2. Oceanographic condition

Figure 1A shows the surface currents in the Japan Sea on the sampling day. After entering through the Tsushima Strait, the TWC branched, meandered, and eddied in the southeast Japan Sea and flowed toward the northeast at less than 1 knot (Japan Coast Guard, 2014a). On the sampling day, one of the main currents of the TWC passed through the Sado Strait and streamed along the west coast of Honshu, the main island of Japan. In 2014, the surface water temperature at the sampling site reached the annual maximum of 26–27 °C from August 25 to 27 (Japan Coast Guard, 2014b).

3. Sampling site and methods

The radiolarian assemblage investigated in this study was collected by the research vessel *Kaiyomaru No. 3* (Kaiyo Engineering) in the early morning of August 26, 2014. The sampling was conducted at a site located about 65 km off the shore of Sakata, Yamagata Prefecture (38° 59’ 44” N, 139° 17’ 46” E; Fig. 1B). A 200-mm-diameter, 450-mm-long plankton net with a 72-μm mesh, was used for the sampling. The net was towed by hand for 25 minutes at a depth of 10–15 m. The volume of water filtered while sampling was not estimated.

[1] Department of Social Systems and Civil Engineering, Graduate school of Engineering, Tottori University, Tottori 680–8550, Japan
[*] Corresponding author: N. Ishida, Email: naoto_ishida@tottori-u.ac.jp

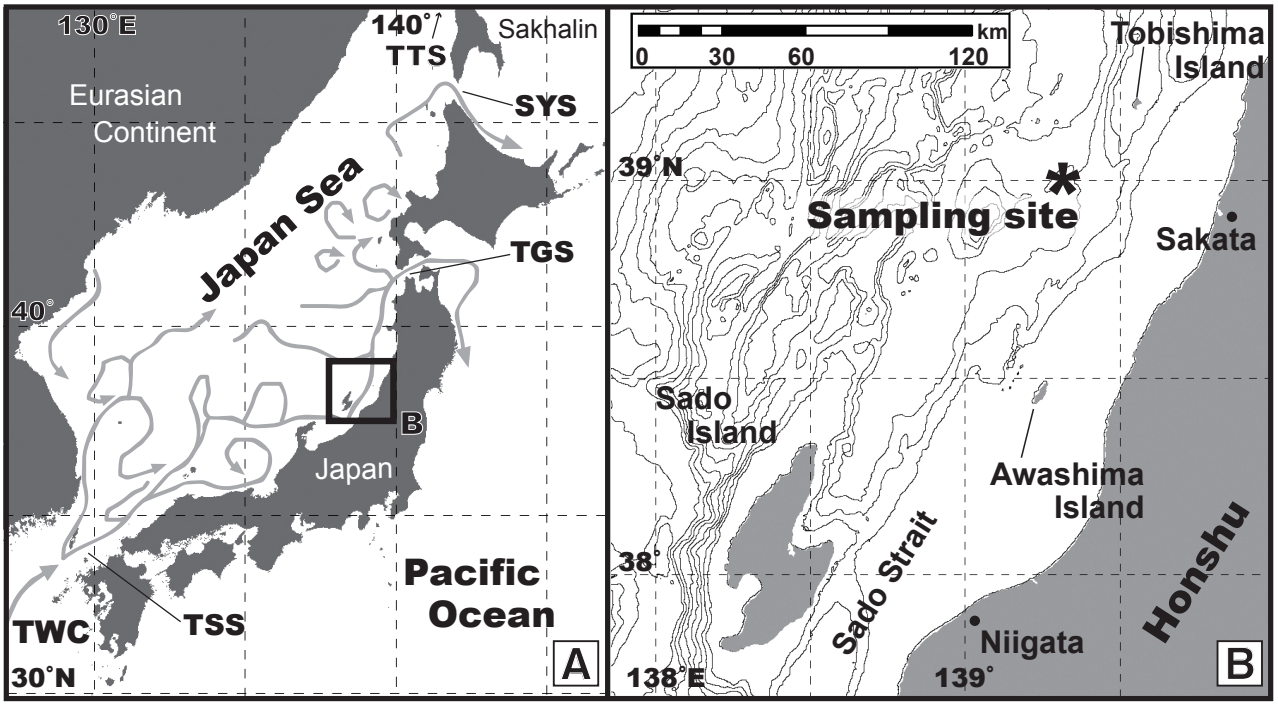


Fig. 1 A) Geographical setting of the Japan Sea and surface currents on the sampling day (from the Japan Meteorological Agency, 2014). Abbreviations are as follows: TWC, Tsushima Warm Current; TSS, Tsushima Strait; TGS, Tsugaru Strait; SYS, Soya (La Perouse) Strait; TTS, Tatar Strait. The black square indicates the area in B. B) Map showing the geography around the sampling site located off Sakata, Yamagata Prefecture. The sampling site is indicated by the asterisk.

The sample was placed in ca. 10 % hydrogen peroxide for several days to remove organic matter from the radiolarians. After rinsing with dilute hydrochloric acid to eliminate carbonates, the sample was sieved through a 41-μm mesh. The residue on the sieve was mounted on glass slides using "Entellan New" mounting medium. Radiolarians were observed and photographed by transmitted light using a biological microscope.

4. Radiolarians

4. 1 Faunal composition

The sample contained 48 polycystine radiolarians, of which 42 were *Spongosphaera streptacantha* Haeckel (87.5 %); a few *Pseudocubus obeliscus* Haeckel and *Tetrapyle octacantha* Müller were also found. Figure 2 shows photomicrographs of the radiolarian species and individuals from the sample.

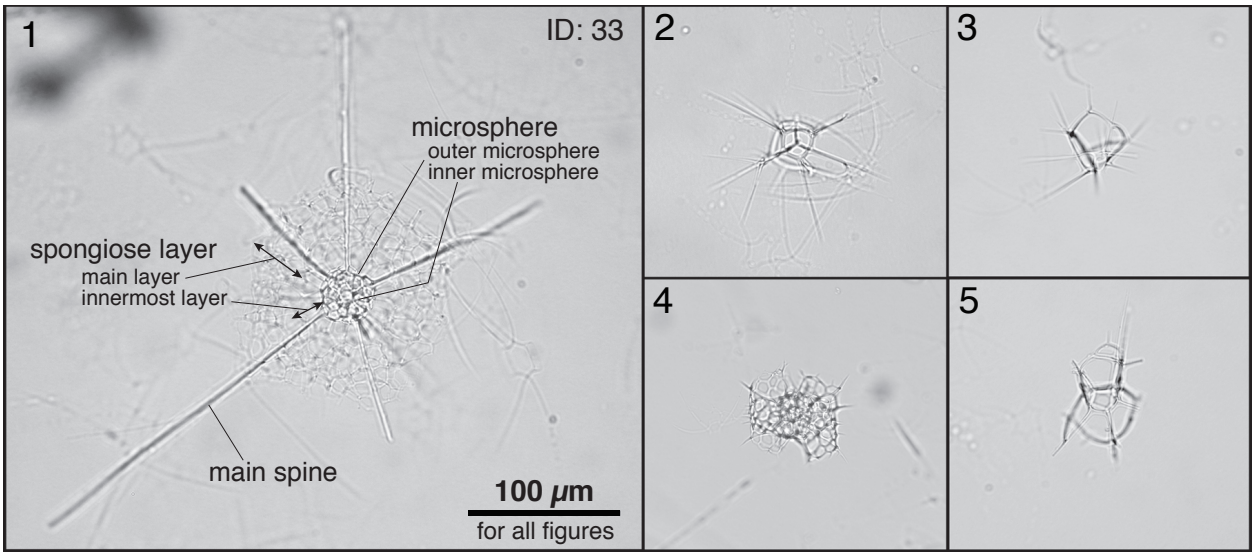
4. 2 Morphologic variation of *Spongosphaera streptacantha*

Haeckel (1860) originally described the spumellarian species *S. streptacantha*. According to Kurihara and Matsuoka (2004), a typical specimen of *S. streptacantha* is composed of three main elements: the microsphere, main spine, and spongiose layer (Fig. 2-1). The microsphere consists of two concentric microspheres, the inner and outer microspheres, which are situated in the center of the skeleton. Six to nine main spines arise from the surface of the outer microsphere. A main spine has three distinct ridges and grooves and is Y-shaped in cross-section. Teeth-like apophyses are arrayed along the ridges of the main spines.

Wide intraspecific variation was recognised in *S. streptacantha* in this assemblage. The microsphere and main spine were observed in all specimens, whereas the spongiose layer was sometimes absent. Figure 3 summarises the diameter of the outer microsphere, length of the main spine, and diameter of the spongiose layer of 37 specimens. The outer microsphere diameter ranged from 35.4 to 41.7 (mean $\pm$ 1σ: 38.1 $\pm$ 1.6) μm and was fairly uniform, while the length of the main spine and diameter of the spongiose layer ranged widely (Fig. 3). This study subdivided *S. streptacantha* into three classes based on the developmental of the spongiose layer.

4. 2. 1 Morphotype-A

Nineteen specimens that lacked the spongiose layer were classified into Morphotype-A. Figure 4 shows three typical specimens of Morphotype-A. The main spines of this morphotype were shorter than those of Mophotypes-B and -C (Fig. 3). The specimen in Figure 4-1 had a 44-μm-long main spine, which was the shortest in the study assemblage. The main spines tapered toward the tips and were fairly slender compared with those of the specimens



Taxa (Photo No.)	Number of individuals	Taxa (Photo No.)	Number of individuals
SPUMELLARIA		**NASSELLARIA**	
Spongosphaera streptacantha Haeckel (1)	42	*Pseudocubus obeliscus* Haeckel (2, 3)	4
Tetrapyle octacantha Müller (4)	1	Nassellaria gen. et sp. indet. (5)	1
		Total number	48

Fig. 2 Transmitted light photomicrographs and list of polycystine radiolarians in the study assemblage. 1) *Spongosphaera streptacantha* Haeckel. The specimen ID and skeletal characters are indicated. 2, 3) *Pseudocubus obeliscus* Haeckel. 4) *Tetrapyle octacantha* Müller. 5) Nassellaria gen. et sp. indet.

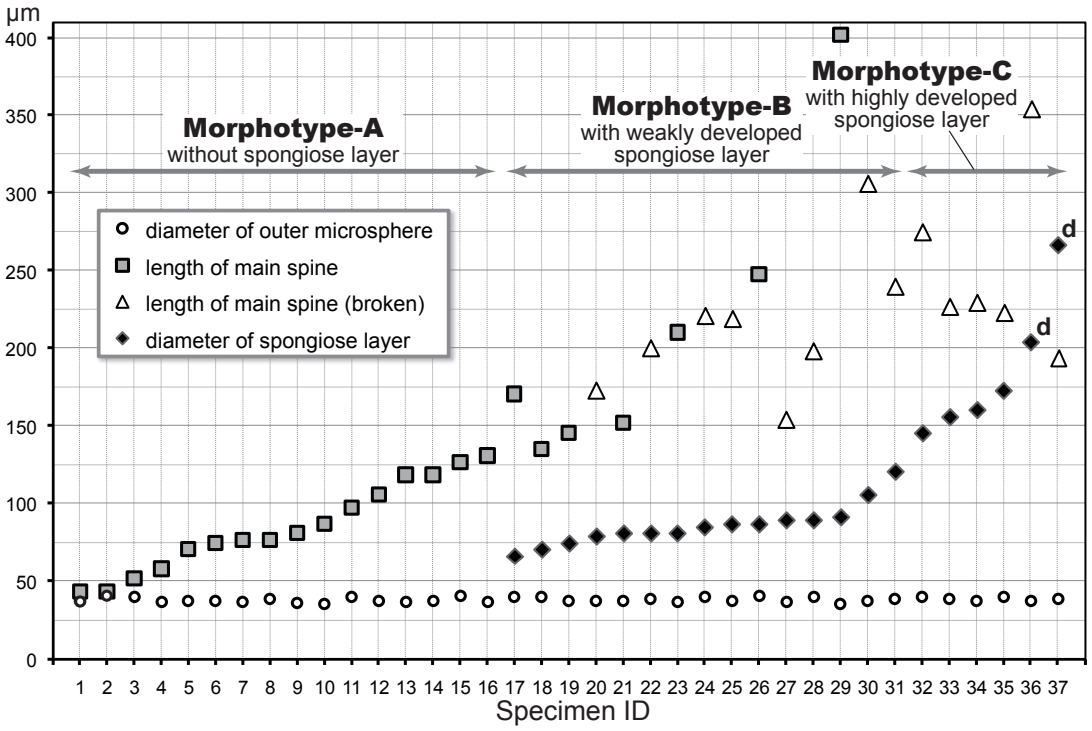


Fig. 3 The diameters of the outer microsphere, lengths of the main spine, and diameters of the spongiose layer of 37 specimens of *Spongosphaera streptacantha* in the study assemblage. *S. streptacantha* was subdivided into Morphotypes-A, -B, and -C based on the development of the spongiose layer. The black diamond with "d" indicates specimens with a delicate layer in the spongiose layer.

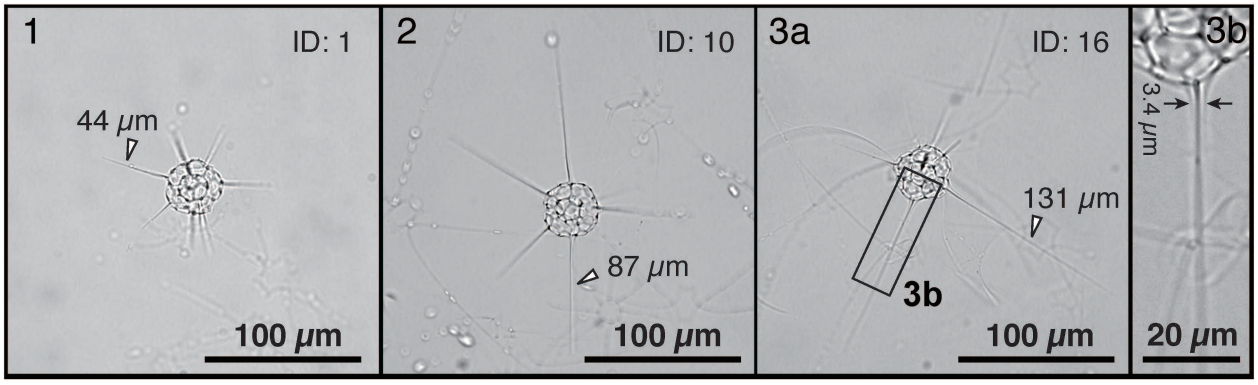


Fig. 4 Transmitted light photomicrographs of *Spongosphaera streptacantha* without a spongiose layer (Morphotype-A). The specimen ID is indicated in each photograph. 1) A specimen with short main spines. The left main spine is 44 μm long. 2, 3a) Specimens with longer main spines. 3b) Close-up view of the main spine of the specimen in 3a. Ridges and grooves are recognised only at the base and no serrated apophysis is seen. The base of the main spine is 3.4 μm wide.

in Figures 4-2 and 4-3.

The specimens shown in Figures 4-2 and 4-3 had main spines 87 and 131 μm in length, respectively. Distinct ridges and grooves were recognised only at the bases of these main spines (Fig. 4-3b). The main spine shown in Figure 4-3b was 3.4 μm wide at the base. Although teeth-like apophyses were visible along the edges of the main spines of Morphotypes-B and -C, as described below, none were observed in specimens of Morphotype-A (Fig. 4-3b).

4. 2. 2 Morphotype-B

Seventeen individuals were classified as Morphotype-B, which had a weakly developed spongiose layer (<120 μm in diameter). Figure 5 shows three specimens of Morphotype-B. The specimen shown in Figure 5-1 had a faint spongy network around the microsphere. The main spines, 248 μm in length, tapered distally, like those in Figure 4.

The specimens in Figures 5-2a and 5-3 had sparsely developed spongiose layers. The main spines of these specimens were over 300 μm in length; that of specimen in Figure 5-3 was 402 μm long and was the longest in the study assemblage. Distinct thin ridges and grooves were recognised proximally and distally on the main spine in Figure 5-2b. The maximum width of the main spine was 5.5 μm. Weakly developed teeth-like apophyses were visible at the edges of the ridges and were connected with the spongiose layer at the proximal part of the main spine.

4. 2. 3 Morphotype-C

Six individuals were classified into Morphotype-C, which had a large, dense developed spongiose layer (>120 μm in diameter). Three typical specimens of Morphotype-C are shown in Figures 2-1, 6-1, and Fig. 6-2. The total length of the main spines of Morphotype-C was unknown because most of the main spines longer than 150 μm were broken (Fig. 3). Figure 6-1b shows a close-up view of a main spine of Morphotype-C. The maximum width of the main spine was 10.3 μm. Teeth-like apophyses were visible at the edges of ridges. A delicate layer was recognised only in two specimens with larger (>200 μm in diameter) spongiose layers (Fig. 3). The specimen in Figure 6-2 possessed a delicate layer in part of the outer rim of the spongiose layer.

5. Discussion

5. 1 Intraspecific variation of *Spongosphaera streptacantha*

This study focused on the morphological variation of *S. streptacantha* in terms of the diameter of the outer microsphere, length of the main spine, and diameter of the spongiose layer. Previously, Kurihara and Matsuoka (2004) examined the skeletal development of *S. streptacantha* in 19 specimens that had spongiose layers ranging from 122.8 to 351.4 μm in diameter, which would be classified into Morphotype-C of this study. By contrast, as most specimens in the study assemblage were classified into Morphotype-A or -B, this study can examine the early stage of skeletal development of *S. streptacantha*.

All specimens had microspheres in the centers of the skeletons and the diameters were quite uniform (Fig. 3). The microsphere is evidently formed in the initial stage of morphogenesis before the formation of the main spine and spongiose layer. Matsuoka (2017) shows a specimen of *S. streptacantha* with extremely short main spines, ca. 10 μm in length.

The lengths of main spines were distributed continuously from 44 to 402 μm (Fig. 3). The width and structure of the main spine developed gradually in tandem with the length, as is shown in Figures 4-3b, 5-2b, and 6-1b. This character variation is considered to be a process of accretionary skeletal growth.

The spongiose layer forms in the latter stage of skeletal

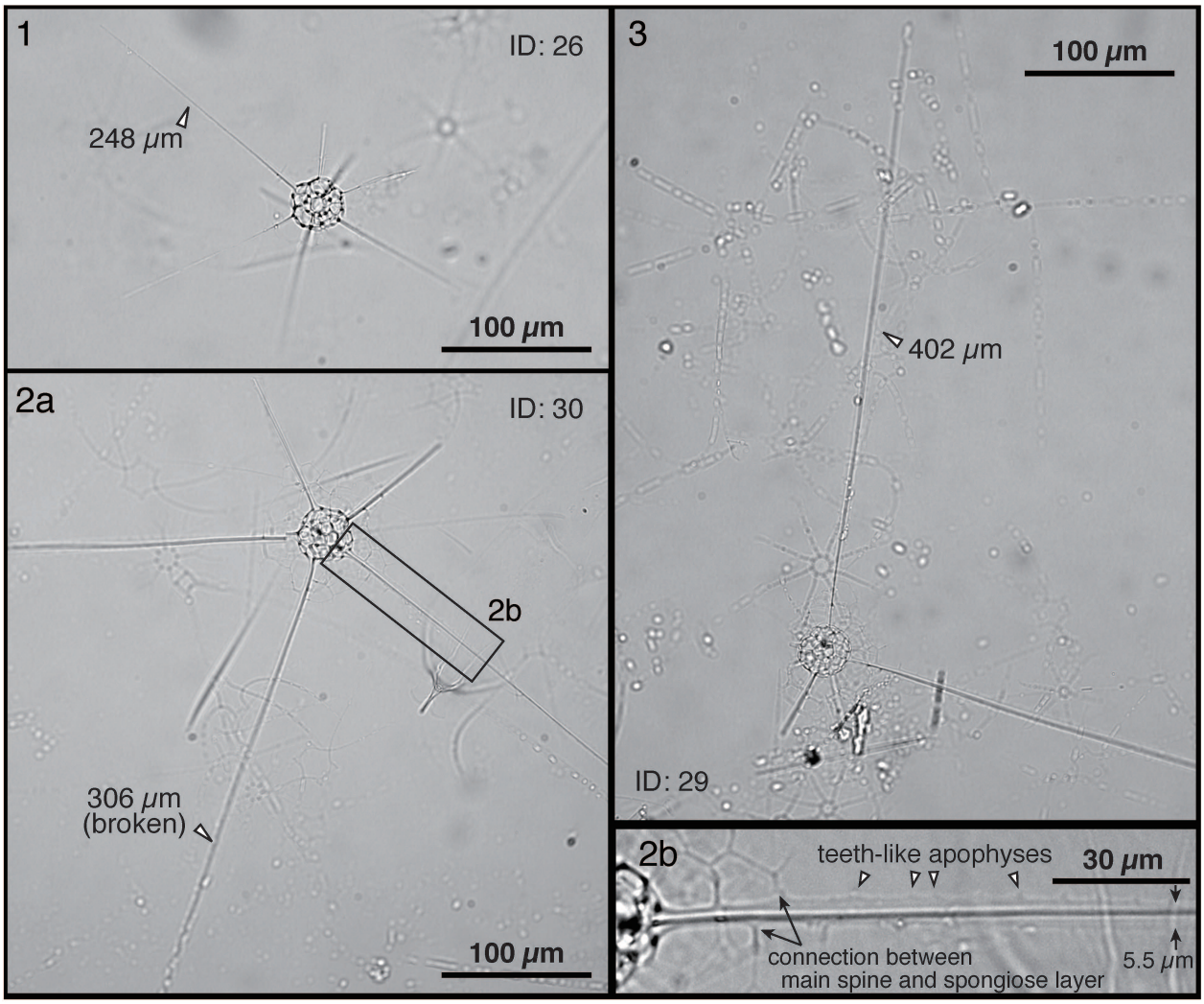


Fig. 5 Transmitted light photomicrographs of *Spongosphaera streptacantha* with a weakly developed spongiose layer (Morphotype-B). The specimen ID is indicated in each photograph. 1) A specimen with slightly developed spongiose layer. The main spines of this specimen are thread-like and taper at the top. The main spine is 248 μm long. 2a) A specimen with main spines with distinct ridges and grooves. The spongiose layer is clearly observed. 2b) Close-up view of the main spine of the specimen shown in 2a. Weakly developed serrated edges are seen. The maximum breadth was 5.5 μm. 3) A specimen with a 402-μm-long main spine.

growth (Fig. 3). The delicate layer, which is in the peripheral part of the spongiose layer, forms in the final phase of ontogenesis. Morphometric analyses of this study and those of Kurihara and Matsuoka (2004) found that the delicate layer develops in larger spongiose layers, over 200 μm in diameter.

The maximum size of the spongiose layer examined by Kurihara and Matsuoka (2004) was 351 μm in diameter, while the largest one in this study was 267 μm. In addition, no specimen in this study assemblage had a fully developed delicate layer, as shown in Figure 9 of Kurihara and Matsuoka (2004). Therefore, all the *S. streptacantha* found in the study assemblage were immature individuals.

5. 2 Implication for radiolarian seasonal change in the Japan Sea

Kurihara *et al.* (2007) noted that *S. streptacantha* is present in surface waters from late summer to early autumn and prefers warmer water (>ca. 20 °C) based on observations southwest of Sado Island, which is located ca. 140 km southwest of the sampling site of this study. For example, Matsuoka *et al.* (2001) and Kurihara and Matsuoka (2004, 2005) reported that *P. obeliscus* and *S. streptacantha* were abundant in August and September. In addition, Kurihara and Matsuoka (2007) collected an assemblage dominated by three species, *S. streptacantha*, *P. obeliscus*, and *Pseudocubus* sp. A, at 0–35 m depths on September 28, 2005.

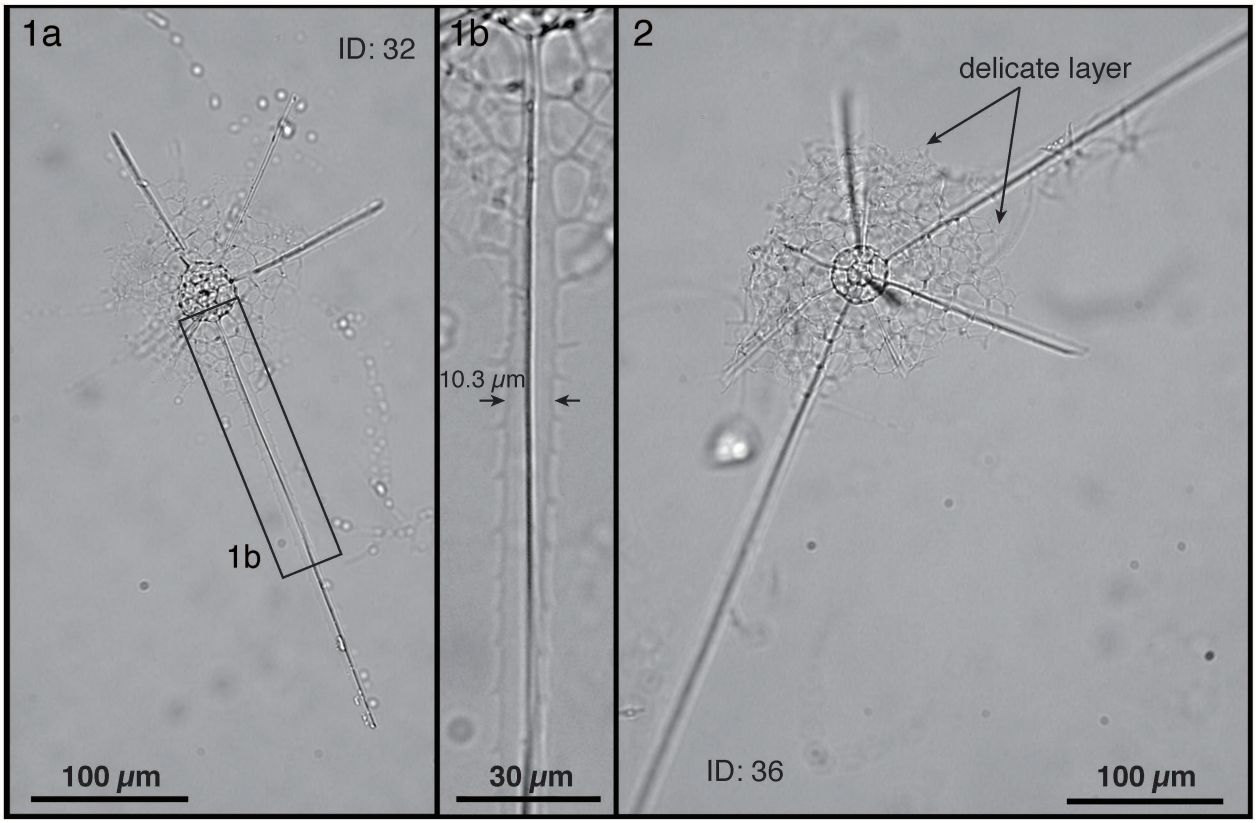


Fig. 6 Transmitted light photomicrographs of *Spongosphaera streptacantha* with highly developed spongiose layers (Morphotype-C). The specimen ID is indicated in each photograph. 1a) A typical specimen of Morphotype-C. The total length of main spine of this specimen is not known because it was broken. 1b) Close-up view of the main spine of specimen of 1a. Distinct ridges and groove are developed. Serrated apophyses align along the ridge lines. The maximum breadth was 10.3 μm. 2) A specimen with a weakly developed delicate layer in the outer periphery of the spongiose layer.

In comparison, *S. streptacantha* was absent from the assemblage collected from surface waters on May 20, 2002 off Sado Island (Itaki *et al.*, 2003). A sample obtained at 63–90 m depths on June 6, 2005, contained one possible *S. streptacantha* (Kurihara *et al.*, 2006). Each sample at 0–40 and 40–70 m depths on June 4, 2007 yielded one individual (Kurihara *et al.*, 2008). On June 7, 2010, only one dead *S. streptacantha* was recovered at 100–200 m depths (Kurihara and Matsuoka, 2011).

Except off Sado Island, only a few living *S. streptacantha* in the Japan Sea have been studies. *S. streptacantha* was not collected at a site northwest of Hokkaido in July 1999 (Itaki, 2003). Samples from depths shallower than 100 m in the Tsushima Strait on October 31, 2006 rarely contained *S. streptacantha* (Itaki *et al.*, 2010). Matsuzaki *et al.* (2016) investigated the vertical distribution of polycystine radiolarians in the East China Sea southwest of the Tsushima Strait in late May 2008 and noted that *S. streptacantha* was dominant at 20–50 m depths characterised by high temperatures (>20 °C) and high chlorophyll *α* levels.

This study obtained a polycystine radiolarian assemblage composed mainly of *S. streptacantha* with a few *P. obeliscus*. The faunal composition of the study assemblage matches the assemblage reported in surface waters around Sado Island in August and September. Although *S. streptacantha* dominated the study assemblage, all the individuals were immature and in the process of growing. Therefore, *S. streptacantha* likely started proliferating just before the sampling and grows predominantly in the warm summer surface waters under the strong influence of the TWC.

6. Summary

Living polycystine radiolarians were collected in late August, 2014 from surface water at the eastern margin of the Japan Sea. This assemblage was dominated by *Spongosphaera streptacantha*, with small numbers of *Pseudocubus obeliscus* and *Tetrapyle octacantha*. Many of the *S. streptacantha* specimens were immature forms in various stages of growth. *S. streptacantha* matured almost exclusively in the warm summer surface water in this ocean area, which is strongly influenced by the Tsushima Warm Current.

Acknowledgement

This study was conducted as part of the scientific research program examining shallow gas hydrate in the Japan Sea. The author thanks Prof. Ryo Matsumoto of Meiji University, the general manager of the research programs. I also acknowledge Prof. Hideki Numanami of Tokyo Kasei Gakuin University, Dr. Hitoshi Tomaru of Chiba University, and the captain, crew, and scientists on this cruise for their assistance with the sampling operation. I also thank Dr. Isao Motoyama and Dr. Toshiyuki Kurihara for their valuable suggestions, which helped to improve the original manuscript. This study was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16K05596.

References

Haeckel, E. (1860) Fernere Abbildungen und Diagnosen neuer Gattungen und Arten von lebenden Radiolarien des Mittelmeeres. *Monatsberichte der Königlichen Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Gedruckt in der Buchdruckerei der Königlichen Akademie der Wissenschaften, Berlin, 835–845. (in Germany)

Itaki, T. (2001) Radiolarian faunal change in the eastern margin of Japan Sea during the last 30 kyr. *News Osaka Micropaleontol. (NOM), Spec. Vol*., no. 12, 359–374. (in Japanese with English abstract)

Itaki, T. (2003) Depth-related radiolarian assemblage in the water column and surface sediments of the Japan Sea. *Marine Micropaleontol*., **47**, 253–270.

Itaki, T. and Ikehara, K. (2003) Radiolarian biozonation for the upper Quaternary in the Japan Sea. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 96–105.

Itaki, T., Matsuoka, A., Yoshida, K., Machidori, S., Shinzawa, M. and Todo, T. (2003) Late spring radiolarian fauna in the surface water off Tassha, Aikawa Town, Sado, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 18, 41–51.

Itaki, T., Kimoto, K. and Hasegawa, S. (2010) Polycystine radiolarians in the Tsushima Strait in autumn of 2006. *Paleontol. Res*., **14**, 19–32.

Japan Coast Guard (2014a) Quick bulletin of ocean conditions, Ocean condition: 26 Aug., Ocean current. http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2014cal/cu0/qboc2014161cu0.html (access: 2015/6/27) (in Japanese)

Japan Coast Guard (2014b) Quick bulletin of ocean conditions, Ocean condition: 26 Aug., Surface (°C). http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2014cal/tp0/qboc2014161tp0.html (access: 2015/6/27) (in Japanese)

Japan Meteorological Agency (2014) Daily 50 m current, 26 Aug. 2014. http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/current_HQ.html?areano=0&stryy=2014&strmm=08&strdd=26 (access: 2015/6/27) (in Japanese)

Kurihara, K. and Matsuoka, A. (2004) Shell structure and morphologic variation in *Spongosphaera streptacantha* Haeckel (Spumellaria, Radiolaria). *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 19, 35–48.

Kurihara, T. and Matsuoka, A. (2005) Shell variability of *Pseudocubus obeliscus* Haeckel in the early autumn radiolarian fauna off Tassha, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 20, 29–45.

Kurihara, T. and Matsuoka, A. (2007) Radiolarian faunas and water properties in surface and subsurface waters of the Japan Sea in September 2005, off Tassha, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 22, 43–56.

Kurihara, T. and Matsuoka, A. (2011) Living radiolarians sampled on 7 June 2010 in surface–subsurface waters of the Japan Sea off Tassha, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 26, 53–60.

Kurihara, T., Shimotani, T. and Matsuoka, A. (2006) Water temperature, salinity, algal-chlorophyll profiles and radiolarian fauna in the surface and subsurface waters in early June, off Tassha, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 21, 31–46.

Kurihara, T., Uchida, K., Shimotani, T. and Matsuoka, A. (2007) Radiolarian faunas and water properties in surface and subsurface waters of the Japan Sea in September 2005, Off Tassha, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 22, 43–56.

Kurihara, T., Uchida, K., Shimotani, T. and Matsuoka, A. (2008) Radiolarian faunal characteristics in surface-subsurface waters of the Japan Sea off Tassha, Sado Island, central Japan in June 2007: inflowing radiolarians on the Tsushima Warm Current. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 25, 83–92.

Matsuoka, A. (2017) Catalogue of living polycystine radiolarians in surface waters in the East China Sea around Sesoko Island, Okinawa Prefecture, Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 32, 57–90.

Matsuoka, A., Yoshida, K., Hasegawa, S., Shinzawa, M., Tamura, K., Sakumoto, T., Yabe, H., Niikawa, I. and Tateishi, M. (2001) Temperature profile and radiolarian fauna in surface waters off Tassha, Aikawa Town, Sado Island, central Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E (Geology)*, no. 16, 83–93.

Matsuzaki, K. M., Itaki, T. and Kimoto, K. (2016) Vertical distribution of polycystine radiolarians in the northern East China Sea. *Marine Micropaleontol*., **125**, 66–84.

Motoyama, I., Yamada, Y., Hoshiba, M. and Itaki, T. (2016) Radiolarian assemblages in surface sediments of the Japan Sea. *Paleontol. Res*., **20**, 176–206.

Recieved December 19, 2017
Accepted January 18, 2019

日本海東縁における夏季表層水の放散虫（ポリキスティナ）群集

石田直人

要　旨

2014年８月の後半, 日本海東縁に位置する山形県酒田市沖の表層水から放散虫（ポリキスティナ）群集を採取した. この群集は*Spongosphaera streptacantha*が大多数を占め, 少数の*Pseudocubus obeliscus* と*Tetrapyle octacantha*を伴う. *S. streptacantha*にはmain spine やspongiose layerに種内変異が認められ, これは殻成長の過程を反映したものと考えられる. main spine とspongiose layerの形態計測の結果は, この群集の*S. streptacantha*の全てが成長途中の未成熟個体であることを示している. 対馬暖流の強い影響下にあり, 年最高水温に達していた採取地点の表層水では, *S. streptacantha*が優占的に生育していたことが明らかとなった.

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 109–115, 2019

概報 - Report

根田茂帯根田茂コンプレックスの礫岩から見出された中期デボン紀～前期石炭紀放散虫化石

内野隆之[1,*]・栗原敏之[2]

Takayuki Uchino and Toshiyuki Kurihara (2019) Middle Devonian–early Carboniferous radiolarian fossils extracted from the conglomerate in the Nedamo Complex, Nedamo Terrane, Northeast Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 109–115, 5 figs.

Abstract: The latest Middle Devonian to early Carboniferous (Mississippian) radiolarian fossils (e.g. *Trilonche* cf. *vetusta*) has been obtained from the muddy matrix or mud-chips in the conglomerate in the early Carboniferous Nedamo Complex of the Nedamo Terrane, Northeast Japan. This conglomerate bed lies conformably on the mudstone bed including early Carboniferous radiolarian fossils reported by the previous study. The conglomerate is also almost composed of terrigenous rock clasts (e.g. felsic tuff, tuffaceous clastic rocks, mudstone), and strongly deformed.

The radiolarian fossils in the conglomerate support adequacy of the early Carboniferous accretion age of the Nedamo Complex, which was constrained by the Late Devonian conodont age from the chert in accordance with the oceanic plate stratigraphy.

The discovery of the radiolarian fossils in this study is a second report from the terrigenous rocks in the Nedamo Complex. These reports are important to discuss the tectonics of an early Carboniferous island-arc-trench system, because the Nedamo Complex is the only Carboniferous accretionary complex recognizable in the Japanese Islands.

Keywords: radiolarian fossil, *Trilonche*, Devonian, Carboniferous, accretionary complex, Nedamo Terrane, Nedamo Complex, Northeast Japan

要　旨

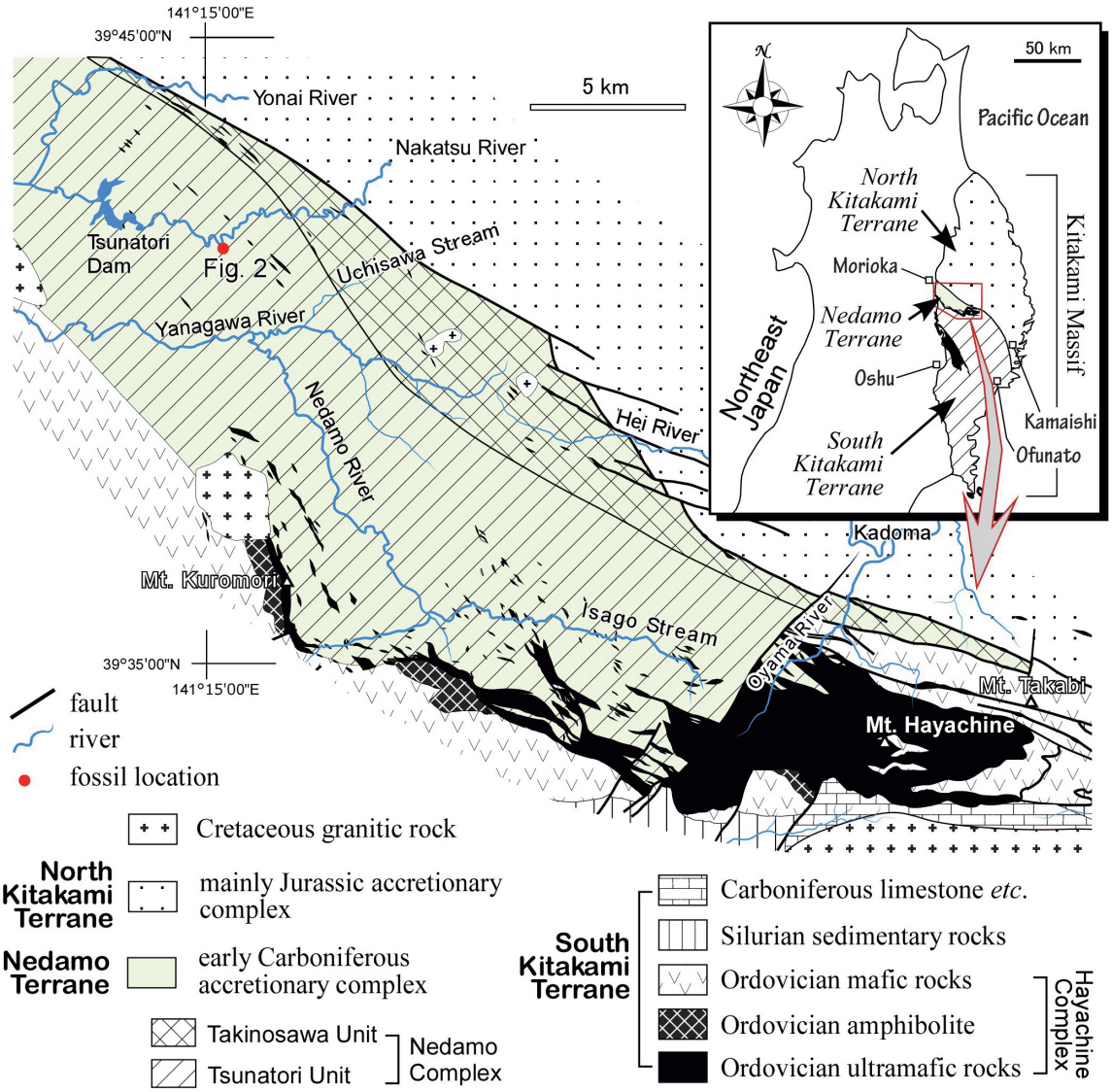
東北日本，北上山地に分布する根田茂帯根田茂コンプレックス綱取ユニットの礫岩の泥質基質あるいは泥岩偽礫から中期デボン紀最後期～前期石炭紀のどこかの年代を示す放散虫化石を発見した．過去の研究によって示された根田茂コンプレックスの前期石炭紀という付加年代は，海洋プレート層序の概念に則って解釈されたものであったが，本化石はその付加年代を補強し得るデータである．また，本化石は根田茂帯の陸源性砕屑岩からは2例目の報告であり，石炭紀付加体の分布は日本列島では根田茂帯のみであることからも，前期石炭紀の島弧海溝系のテクトニクスを考える上で重要な基礎データである．

1．はじめに

東北地方の北上山地には，北半部にジュラ紀の付加体からなる北部北上帯が，南半部に中古生代の島弧陸棚堆積岩類からなる南部北上帯が広く分布し，その境界域に石炭紀の付加体からなる根田茂帯が狭長に分布する（永広ほか，2005）．この境界域にはかつて，根田茂帯の前身である“早池峰構造帯”が設定されていた（吉田・片田，1964）が，1980年代から同構造帯及び周辺の地質の詳細が徐々に明らかにされ（例えば，大沢，1983；永広ほか，1988；川村・北上古生層研究グループ，1988；川村ほか，1996），同帯は“構造帯”というよりもむしろ独自の地史を有する独立した地体として認識されるようになった．しかし，同帯の呼称・分布範囲・地質構成・時代論などについては，研究者ごとに見解が分かれていた（例えば，永広ほか，1988；川村・北上古生層研究グループ，1988，永広・鈴木，2003）．

2000年代に入り漸く，チャートから後期デボン紀コノドント化石（濱野ほか，2002）が，泥岩から前期石炭紀放散虫化石（内野ほか，2005）が相次いで報告され，この発見が“早池峰構造帯”に代わる根田茂帯の設定（永広・鈴木，2003）と，北上山地における地体区分の整理（永広ほ

[1] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門（AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation）
[2] 新潟大学大学院自然科学研究科（Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan）
[*] Corresponding author: T. Uchino, Central7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: t-uchino@aist.go.jp



第 1 図　根田茂帯及びその周辺地域の地質図．内野ほか (2008) を一部改変．挿入図は北上山地の地質概略図．

Fig. 1　Geological map of the Nedamo Terrane and its surrounding area modified after Uchino *et al.* (2008). The inset shows the geologic index map in the Kitakami Massif.

か，2005) につながった．

ところで，内野ほか (2005) で議論された根田茂帯 (原典では早池峰帯) の付加年代について，泥岩から見出された放散虫化石年代自体は前期デボン紀～前期石炭紀を示すものの，近接した層準のチャートのコノドント化石年代が後期デボン紀であることで，「前期石炭紀」と解釈されたものであった．つまり，海溝充填堆積物からなる陸源性砕屑岩が遠洋性堆積物からなるチャートよりも新しいという海洋プレート層序 (Isozaki *et al.*, 1990) の考え方に則り，下限が制約された．したがって，付加年代を議論する上で重要な，海溝充填堆積物 (陸源性砕屑岩) からの更なる年代データの蓄積が望まれている状況にある．

今回，著者らは，内野ほか (2005) で報告された放散虫化石を含む泥岩の上位に累重する礫岩から，中期デボン紀～前期石炭紀を示す放散虫化石を見出したので，ここに報告する．

2．根田茂帯の概要

根田茂帯は盛岡市南東部から早池峰山北方の宮古市門馬 (旧下閉伊郡川井村) 付近にかけ，南北幅最大 10 km，東西幅約 40 km で，西北西–東南東方向に狭長に分布する (第 1 図)．北側は北部北上帯のジュラ紀付加体と，南側は南部北上帯の最下部をなすオルドビス紀火成岩類 (早池峰複合岩類) と，ともに断層を介して接する．東端部では南北幅は 1 km 程度に狭まり，東方に尖滅する．

根田茂帯は根田茂コンプレックスのみから構成され，

本コンプレックスは，玄武岩類や泥岩珪長質凝灰岩互層を主体として，チャート，砂岩，砂岩泥岩互層，礫岩を僅かに伴う．泥質基質中にチャートや砂岩の岩塊を含む混在岩はほとんど産出しない．内野ほか(2008)は根田茂コンプレックスを，より低次の岩相層序単元として南西部の綱取(つなとり)ユニットと北東部の滝ノ沢ユニットに区分している．後者は前者と比較して，1)砂岩泥岩互層が卓越する，2)砂岩の鉱物組成がより石英・長石に富む，3)層状チャートが多い，4)変形が弱い，という特徴を示す．ちなみに，濱野ほか(2002)のコノドント化石と内野ほか(2005)の放散虫化石はともに綱取ユニットから報告されている．

玄武岩類は，玄武岩溶岩及び火山砕屑岩と少量のドレライトが認められ，その全岩化学組成は中央海嶺玄武岩及び海洋島玄武岩(アルカリ岩とソレアイト)の特徴を示す(濱野ほか，2002；内野・川村，2009)．変成度は，ぶどう石–パンペリー石相，パンペリー石–アクチノ閃石相，緑色片岩相，青色片岩相(緑れん石–藍閃石亜相)といったやや幅広い変成度を示す(Moriya, 1972；大貫ほか，1988；内野・川村，2010)．

泥岩珪長質凝灰岩互層は，暗灰色の泥岩と淡緑色の珪長質凝灰岩がともに厚さ数mm～数cmで互層しており，根田茂コンプレックスを特徴付ける岩石である．泥岩や珪長質凝灰岩はしばしば層厚が1 m以上に達することもある．変形が強い場合，コンピーテント層である珪長質凝灰岩は破断し，ブーダン状を呈する．

チャートは，玄武岩に伴う熱水性の塊状チャートであることが多く，層状チャートは極めて少ない．塊状チャートは赤～赤紫色を，層状チャートは灰色を呈する．層厚はともに厚くても数m程度である．塊状チャートはしばしば鉄マンガン層を伴う．

砂岩は，多くが岩片の多い石質ワッケであり，中には岩片が75％以上を占めるものがある．この非常に岩片に富む石質ワッケは，綱取ユニットでしばしばみられ(第2図a)，特に変質・変成鉱物が多く含まれる場合，淡緑色を呈する．

礫岩は砂岩に漸移しながら産する場合や，泥岩中に数10 cm以下の単層として挟在する場合がある．主に細～中礫大の亜角～角礫からなる．礫種は，珪長質凝灰岩，砂岩，泥岩，チャート，石灰岩，玄武岩，花崗岩質岩，変成岩などがあり，ほとんどが砕屑岩礫よりなるものから，砕屑岩礫に加え大陸・島弧起源物質の礫を含むものまで様々である．次章で述べるように，今回報告する含放散虫化石礫岩はほとんど砕屑岩礫のみからなる．なお，Uchino and Kawamura (2010)は，盛岡市水沢地区北方の建石(たていし)林道(内沢(うちさわ))沿いで見出した，高圧変成岩礫や超苦鉄質岩礫を含む礫岩(建石礫岩)について堆積学・岩石学的検討を行い，前期石炭紀の沈み込み帯における高圧変成岩上昇モデルを提示している．

根田茂コンプレックスの分布域には，蛇紋岩，角閃岩，角閃石斑れい岩，石英閃緑岩～トーナル岩，含藍閃石結晶片岩(内野・川村，2006)が小岩塊として産する．5万分の1地質図幅「早池峰山」(川村ほか，2013)によると，結晶片岩を除いた上記の岩石は，南部北上帯の構成要素であるオルドビス紀の火成岩類(早池峰複合岩類)に対比されている．また，結晶片岩は380 Maのフェンジャイト Ar–Ar年代を示し，北上山地西部及び阿武隈山地北東縁部に分布する母体–松ヶ平帯の先後期デボン紀高圧型変成岩(永広・大上，1990)に対比できる可能性が指摘されている(Kawamura *et al.*, 2007)．

3．礫岩の記載

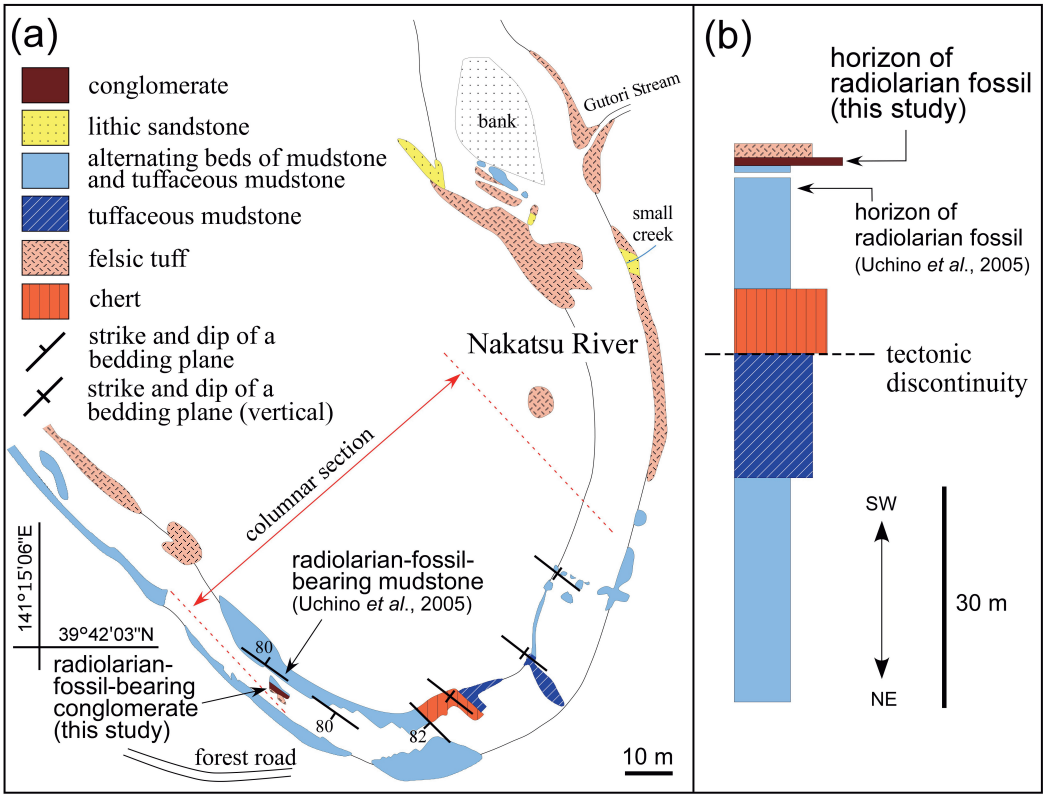
放散虫化石を含む礫岩は盛岡市の綱取ダムから約2 km遡った中津川の河床に南北幅約3 mで露出する(第2図)．この礫岩露頭は川の水量が少ない時のみ確認できる．礫岩の層厚は約50 cmで，下位の泥岩珪長質凝灰岩互層及び上位の珪長質凝灰岩と整合関係にある．本礫岩の2～3 m下位層準の泥岩珪長質凝灰岩互層からは，前期石炭紀放散虫化石(内野ほか，2005)が得られている(第2図b)．そしてこの泥岩珪長質凝灰岩互層の10数m下位には層厚数mの灰色チャートが産する．

礫岩は強い変形を被っているため，礫同士あるいは礫と基質が密着し，境界が不明瞭なことが多いが，色の違いからそれらは区別できる(第3図)．礫は，長径数mm程度の偏平した亜角礫からなり，短径1 cm以上のより大きい泥岩偽礫や層厚1 cm以上の泥岩薄層が挟在している．礫種は，約70％を凝灰質岩(珪長質凝灰岩，凝灰質砂岩，凝灰質泥岩)が占め，約20％を泥岩が，残り約10％を斜長石粒子，石英粒子，玄武岩が占める(第4図)．前述した建石礫岩のように，花崗岩質岩，変成岩，超苦鉄質岩などの礫は含まれていない．砕屑岩礫は，泥岩が暗灰色を，砂岩が灰色を呈し，砕屑岩に含まれる火山灰の量が多くなるほど明色(主に淡緑色)になる．礫岩中には幅1 mm以下の方解石脈がしばしば発達している．

放散虫化石は礫岩の泥質基質あるいは凝灰質泥岩偽礫中に含まれている．基質中の放散虫化石は泥岩偽礫中のものに比べより強い変形を受けている傾向にあり，しばしば非対称プレッシャーシャドーを有することがある(第3図b)．

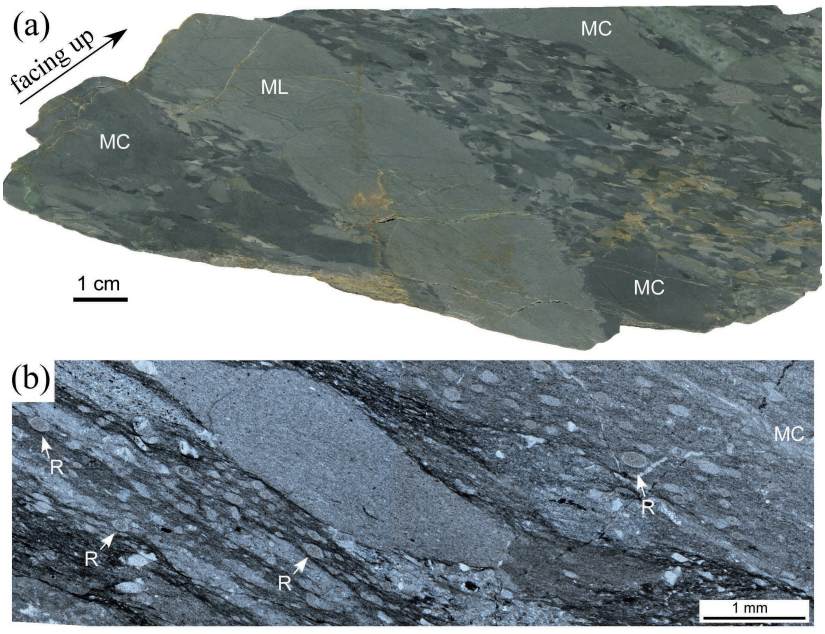
4．放散虫化石と年代

放散虫化石を抽出するにあたり，礫岩を5％フッ化水素酸溶液で約18時間浸した後，目合い65 μm及び250 μmの篩を用いて残渣を得る作業を4回行った．その後，実体顕微鏡を用いて放散虫殻を拾い上げ，電子顕微鏡で観察・撮影した．残渣中で見られる放散虫殻は球状のもの



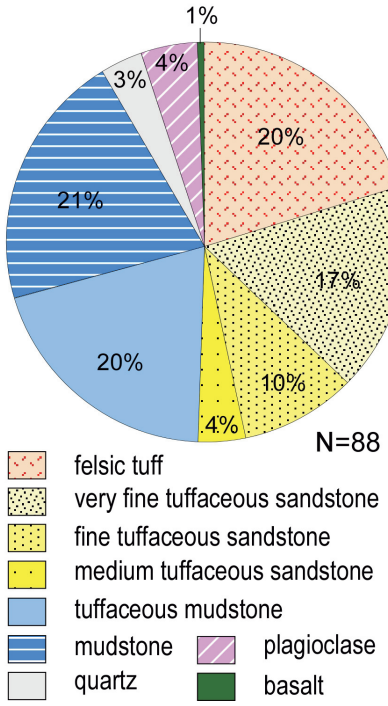
第2図　放散虫化石地点周辺のルートマップ (a) 及び柱状図 (b)．内野ほか (2008) を一部改変.

Fig. 2　Route map (a) and columnar section (b) around the fossil location (modified after Uchino *et al.*, 2008).



第3図　放散虫化石を含む礫岩の研磨片 (a) と薄片写真 (b)．MC：泥岩偽礫，ML：泥岩薄層，R：放散虫化石.

Fig. 3　Polished sample section (a) and thin section (b) of the radiolarian fossil-bearing conglomerate. MC: mud-chip, ML: mudstone thin layer, R: radiolarian fossil.



第4図　礫岩における礫種構成及び割合を示す円グラフ．
Fig. 4　Circle graph showing the composition and rate of the clasts in the conglomerate.

が多く，全体的に再結晶化及び偏平化を被っている．また，ほとんどの個体で殻の構造や棘が残されていない．本論では，それらの中でも主棘が保存されているものを選択し，図示した（第5図）．

図示した放散虫化石のうち，第5図の1～9は，100～150 μm程度の球状の殻を持ち，稜–溝構造が発達した主棘を有している．これらの殻の内部構造を観察することはできなかったが，本研究では，外形からこれらを*Trilonche*属と判断した．第5図の1は，稜–溝構造が発達した比較的太い主棘を持ち，それらの長さと太さにおいて極端に大きな違いがない．また，それら主棘間の角度は110°程度である．このような特徴は，Hinde (1899) が記載した*Trilonche vetusta*の主棘の形状にほぼ合致するが，第5図の1の標本は主棘が2本残されているのみなので，本論では*Trilonche* cf. *vetusta*とした．第5図の2と3は，*Trilonche* spp.としたものの中でも，主棘が短く，稜–溝構造における溝の幅が広いという特徴を持つ．この主棘の形状はSashida *et al.* (1998) が報告したEntactiniidae gen. et sp. indet. sp. AやEntactiniidae gen. et sp. indet. sp. Bにやや似ている．なお，後者はWonganan and Caridroit (2005) により*Trilonche chiangdaoensis*と命名されている．

上記のHinde (1899)が報告した*Trilonche vetusta*とその近縁種からなる群集は，Aitchison *et al.* (1999)が*Trilonche minax*群集としたものである．Aitchison *et al.* (1999) は，この群集が産出する上・下の地層から得られているコノドント化石（Aitchison and Stratford, 1997）に基づき，*Trilonche minax*群集を中期デボン紀ジベティアン期の最後期から後期デボン紀フラニアン期の群集として位置づけた．この群集を構成する*Trilonche vetusta*をはじめとする*Trilonche*属の放散虫化石は，世界各地でフラニアン期以降の地層から多くの産出報告があり（例えば，Foreman, 1963；Nazarov, 1975；Nazarov and Ormiston, 1983；Aitchison, 1993；Kiessling and Tragelehn, 1994；Wang *et al.*, 2003；Obut and Shcherbanenko, 2008），*Trilonche palimbola* (Foreman) のような一部の種の生存期間は前期石炭紀にまで及ぶ（例えば，Gourmelon, 1987；Braun, 1990；Wonganan *et al.*, 2007；Noble *et al.*, 2008）．ただし，*Trilonche vetusta*の生存期間が前期石炭紀にまで及ぶか否かについては，従来の報告からでは言及しがたい．また，本研究の礫岩試料では，より詳細な年代決定に有効なグループ（例えば，Ceratoikiscidae科やAlbaillellidae科）が得られていない．したがって，図示した放散虫化石では年代を詳細に限定することはできないが，上述した*Trilonche minax*群集の年代と本群集の*Trilonche*属の生存期間を根拠とすれば，少なくとも中期デボン紀の最後期から前期石炭紀のある時期のものと考えられる．これは，内野ほか（2005）によって下位層準の泥岩から得られた放散虫化石の年代（前期石炭紀）と調和的である．

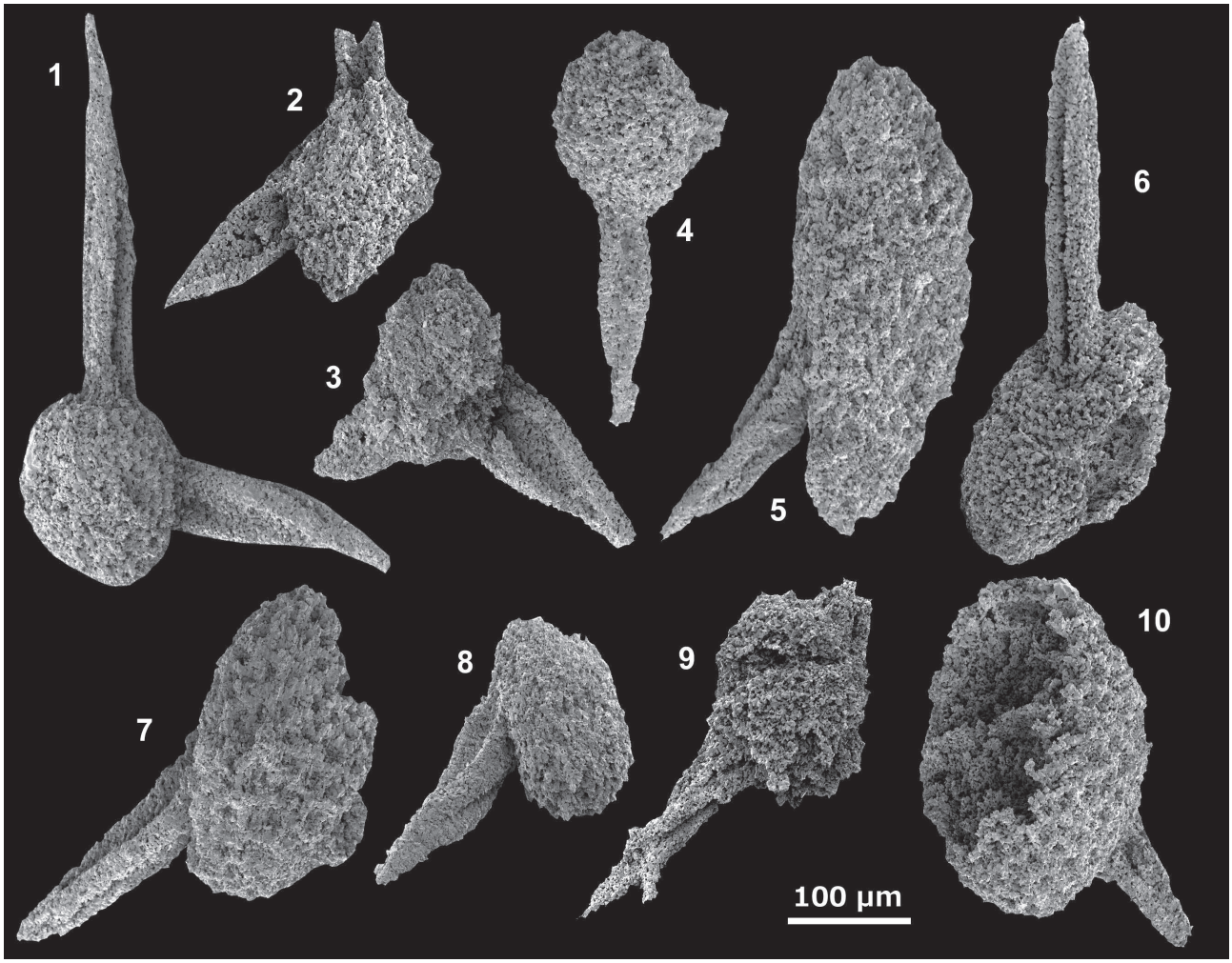
5．まとめ

1）根田茂帯根田茂コンプレックス綱取ユニットの礫岩の泥質基質あるいは泥岩偽礫から中期デボン紀最後期～前期石炭紀のどこかの年代を示す放散虫化石を発見した．

2）根田茂コンプレックスの前期石炭紀という付加年代は，海洋プレート層序の概念に則り，泥岩中の前期デボン紀～前期石炭紀の放散虫化石年代を，チャート中の後期デボン紀のコノドント化石年代で制約したものであったが，本化石はその付加年代を補強し得る．

3）本化石は根田茂帯の陸源性砕屑岩からは2例目の報告であり，石炭紀付加体の分布は日本列島では根田茂帯のみであることからも，前期石炭紀の島弧海溝系のテクトニクスを考える上で重要な基礎データである．

謝辞：査読者の伊藤　剛博士（地質情報研究部門）及び編集担当の本山　功博士（山形大学）によって本原稿は改善された．記して，感謝申し上げる．



第5図　礫岩から得られた放散虫化石の電子顕微鏡写真.
Fig. 5.　Photomicrograph of the radiolarian fossils from the conglomerate in the Nedamo Terrane.
1: *Trilonche* cf. *vetusta* Hinde, 2–9: *Trilonche* spp., 10: *Stigmosphaerostylus*? sp.

文　献

Aitchison, J. C.(1993) Devonian (Frasnian) radiolarians from the Gogo Formation, Canning Basin, Western Australia. *Palaeontographica A*, **228**, 105–128.

Aitchison, J. C. and Stratford, J. M. C.(1997) Middle Devonian (Givetian) Radiolaria from Eastern New South Wales, Australia: a reassessment of the Hinde (1899) fauna. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh*., **203**, 369–390.

Aitchison, J. C., Davis, A. M., Stratford, J. M. C. and Spiller, F. C. P.(1999) Lower and Middle Devonian radiolarian biozonation of the Gamilaroi terrane New England Orogen, eastern Australia. *Micropaleontology*, **45**, 138–162.

Braun, A.(1990) Radiolarien aus dem Unter-Karbon Deutschlands. *Courier Forschungs Institut Senckenberg*, **133**, 1–177.

永広昌之・大上和良(1990)阿武隈山地東縁部の松ヶ平変成岩と上部デボン系合ノ沢層の層位関係．地質雑, **96**, 537–547.

永広昌之・鈴木紀毅(2003)早池峰構造帯とは何か－早池峰構造帯の再定義と根田茂帯の提唱－．構造地質, **47**, 13–21.

永広昌之・大上和良・蟹澤聰史(1988)“早池峰構造帯”研究の現状と課題．地球科学, **42**, 317–335.

永広昌之･川村信人･川村寿郎(2005) Ⅱ. 1.1 東北地方, 中･古生界, 概説および構造帯区分．日本の地質増補版編集委員会編, 日本の地質増補版, 共立出版, 東京, 49–50.

Foreman, H. P.(1963) Upper Devonian Radiolaria from the Huron member of the Ohio shale. *Micropaleontology*, **9**, 267–304.

Gourmelon, F.(1987) Les Radiolaires tournaisiens des nodules phosphatés de la Montagne Noire et des Pyrénées centrales. *Biostratigraphie du Paléozoïque*, **6**, 1–172.

濱野幸治・岩田圭示・川村信人・北上古生層研究グループ(2002)早池峰帯緑色岩中の赤色チャートから得られた後期デボン紀コノドント年代．地質雑，**108**，114–122.

Hinde, G. J.(1899) On the Radiolaria in the Devonian rocks of New South Wales. *Quart. Jour. Geol. Soc. London*, **55**, 38–64.

Isozaki, Y., Maruyama, S. and Furuoka, F.(1990) Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, **181**, 179–205.

川村信人・北上古生層研究グループ(1988)早池峰構造帯の地質学的諸問題．地球科学，**42**，371–378.

川村寿郎・井龍康文・川村信人・町山栄章・吉田孝紀(1996)南部北上古生界標準層序と“早池峰構造帯”．日本地質学会第103年学術大会見学旅行案内書，59–97.

川村寿郎・内野隆之・川村信人・吉田孝紀・中川　充・永田秀尚(2013)早池峰山地域の地質．地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)．産総研地質調査総合センター，101p.

Kawamura, M., Uchino, T., Gouzu, C. and Hyodo, H.（2007）380 Ma $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of the high-P/T schists obtained from the Nedamo Terrane, Northeast Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 492–499.

Kiessling, W. and Tragelehn, H.（1994）Devonian radiolarian faunas of conodont-dated localities in the Frankenwald (Northern Bavaria, Germany). *Abhandlungen der geologisches Bundesanstalt in Wien*, **50**, 219–255.

Moriya, S. (1972) Low-grade metamorphic rocks of the northern Kitakami Mountainland. *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 3*, **11**, 239–282.

Nazarov, B. B. (1975) Lower and Middle Paleozoic radiolarians of Kazakhstan (methods of investigation, systematics and stratigraphic significance). *In* Raaben, M. E., ed., *Transactions of the Academy of Sciences of the USSR*, Geological Institute. Izdatelstvo Nauka, Moscow, **275**, 1–203.

Nazarov, B. B. and Ormiston, A.(1983) Upper Devonian (Frasnian) radiolarian fauna from the Gogo Formation, Western Australia. *Micropaleontology*, **29**, 454–466.

Noble, P. J., Tekin, U. K., Gedik, I. and Sukru, P. (2008) Middle to Upper Tournasian Radiolaria of the Baltalimani formation, Istanbul, Turkey. *Jour. Paleontol.*, **82**, 37–56.

Obut, O. T. and Shcherbanenko, T. A. (2008) Late Devonian radiolarians from the Rudny Altai (SW Siberia). *Bull. Geosci.*, **83**, 371–382.

大貫　仁・柴　正敏・香川浩昭・堀　弘(1988)　北部北上山地の低温広域変成岩類　Ⅰ．区界－盛岡地域．岩鉱，**83**，495–506.

大沢正博(1983)“早池峰構造帯”の地質学的研究．東北大学理地質古生物研報，no. 85，1–30.

Sashida, K., Igo, H., Adachi, S., Ueno, K., Nakornsri, N. and Apsorn, S.（1998）Late Paleozoic radiolarian faunas from northern and northeastern Thailand. *Sci. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, sec. B*, **19**, 1–27.

内野隆之・川村信人(2006) 根田茂帯(旧“早池峰帯”)から発見された藍閃石を含む苦鉄質片岩とその意義．地質雑，**112**，478–481.

内野隆之・川村信人(2009) 根田茂帯緑色岩の化学組成．地質雑，**115**，242–247.

内野隆之・川村信人(2010) 根田茂帯の変玄武岩から見出された藍閃石とその意義．地質調査研究報告，**61**，443–450.

Uchino, T. and Kawamura. M. (2010) Tectonics of Early Carboniferous Eastern Paleo-Asian arc-trench system from high-*P/T* schist-bearing conglomerate in the Nedamo Terrane, Northeast Japan. *Island Arc*, **19**, 177–191.

内野隆之・栗原敏之・川村信人(2005)　早池峰帯から発見された前期石炭紀放散虫化石－付加体砕屑岩からの日本最古の化石年代－．地質雑，**111**，249–252.

内野隆之・川村信人・川村寿郎(2008)　北上山地前期石炭紀付加体「根田茂帯」の構成岩相と根田茂帯・南部北上帯境界．地質雑，**114**補遺，141–157.

Wang, Y., Aitchison, J. C. and Luo, H. (2003) Devonian radiolarian faunas from South China. *Micropaleontology*, **49**, 127–145.

Wonganan, N. and Caridroit, M.(2005) Middle and Upper Devonian radiolarian faunas from Chiang Dao area, Chiang Mai province, northern Thailand. *Micropaleontology*, **51**, 39–57.

Wonganan, N., Randon, C. and Caridroit, M.(2007) Mississippian (early Carboniferous) radiolarian biostratigraphy of northern Thailand (Chiang Dao area). *Geobios*, **40**, 875–888.

吉田　尚・片田正人(1964) 5万分の1地質図幅「大槌・霞露岳」および同説明書．地質調査所.

（ 受 付：2018年2月28日； 受 理：2018年9月18日 ）
（早期公開：2019年1月31日）

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 117–123, 2019

概報 - Report

高知県馬路地域，四万十帯白亜系付加コンプレックスのチャートから産する放散虫化石

原　英俊[1, *]・原　康祐[2]

Hidetoshi Hara and Kousuke Hara (2019) Radiolarians from chert of the Cretaceous Shimanto accretionary complex in the Umaji district, Kochi Prefecture, Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 117–123, 4 figs.

Abstract: The Cretaceous Shimanto accretionary complex, which is composed of the Taniyama, Hiwasa, and Mugi units, is distributed in the Umaji district, Kochi Prefecture, Southwest Japan. The Taniyama and Mugi units are characterized by mélange units including blocks of sandstone, chert and basalt. We report radiolarian fossils from cherts of the Taniyama and Mugi units, indicating a latest Barremian to early Aptian age and a late Santonian to early Campanian age, respectively. These ages obtained in the Umaji district are coincident with the chert radiolarian ages reported from the both units distributed in surrounding area of eastern Shikoku. A clear gap of chert ages clarified from both units supports that subducted oceanic slabs between the Taniyama and Mugi units were changed from the old Izanagi Plate to the young oceanic plates with ridge.

Keywords: radiolaria, chert, Shimanto accretionary complex, Cretaceous, Umaji, Shikoku

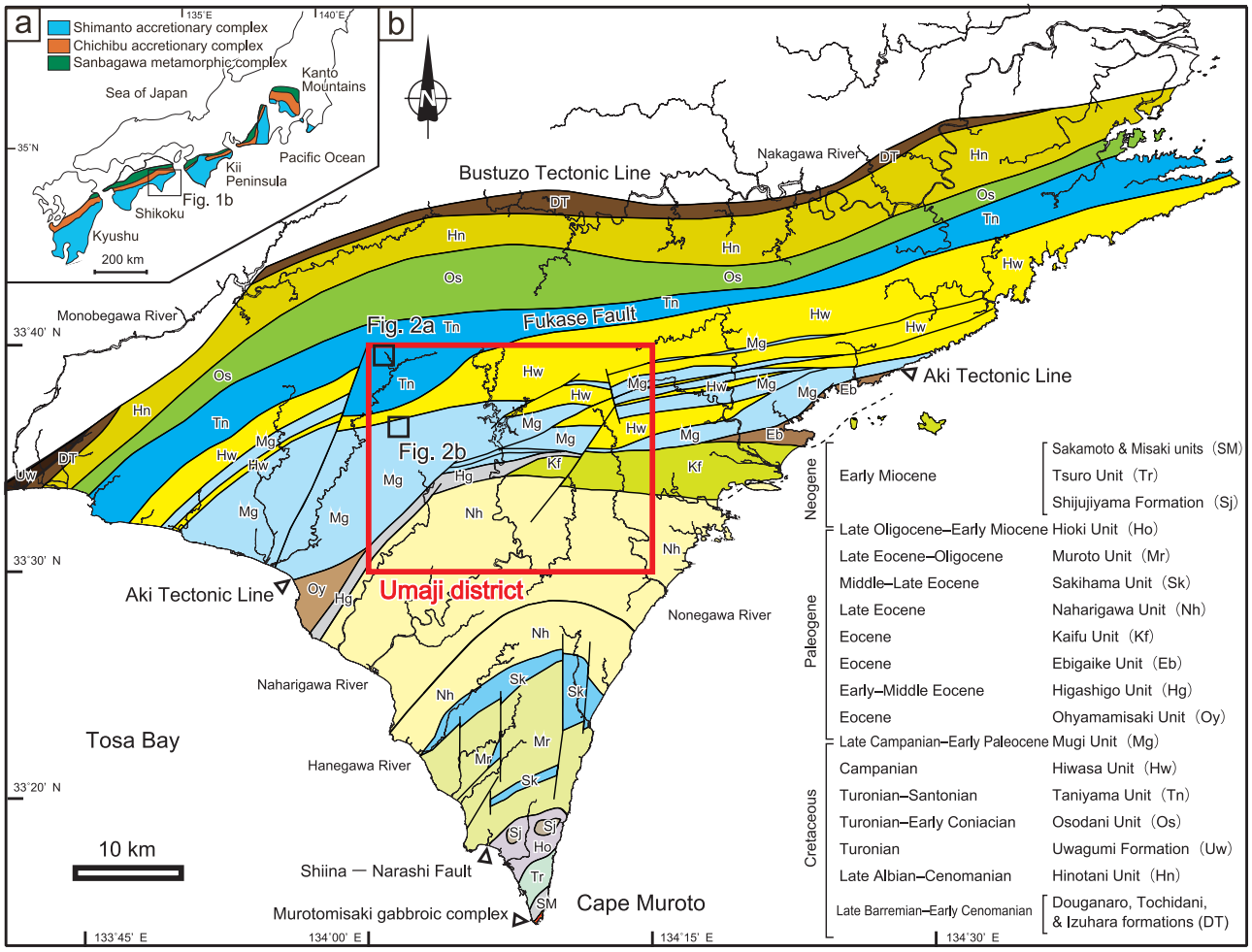
要　旨

四国東部の馬路（うまじ）地域には，四万十帯白亜系付加コンプレックスの谷山ユニット・日和佐（ひわさ）ユニット・牟岐（むぎ）ユニットが分布する．谷山ユニットと牟岐ユニットは，砂岩，チャート及び玄武岩を含む混在岩（メランジュ）を特徴とする．これらのユニットのチャートから，放散虫化石を見出した．チャートの放散虫化石年代は，谷山ユニットではバレミアン期末～アプチアン期前半であるのに対し，牟岐ユニットではサントニアン期後半～カンパニアン期前半と異なる2つの年代が得られた．これらの年代は，四国東部の谷山ユニット及び牟岐ユニット相当層から，これまでに報告されているチャート年代の範囲に収まる．両ユニットに含まれるチャート年代の違いは，谷山ユニットと牟岐ユニットにて沈み込む海洋プレートが，古いイザナギプレートから海嶺を伴う若い海洋プレートへと変化したことを支持する．

1．はじめに

四国東部の四万十帯白亜系付加コンプレックスは，岩相層序及び放散虫化石年代により構造層序区分が行われている（石田，1998；君波ほか，1998；原ほか，2014）．そして，地層の破断や混在化の程度の違いによる整然相・破断相・混在相の識別や，北から南に向かい地質年代が若くなる年代極性が求められ，付加コンプレックスとしての特徴が良く調べられている．四国東部の中央部に位置する馬路地域には，構造的上位より，谷山ユニット，日和佐ユニット・牟岐ユニットが分布する．このうち，谷山ユニットと牟岐ユニットが，砂岩・チャート及び玄武岩の岩体・岩塊を泥質岩中に伴う混在相（混在岩・メランジュ）によって特徴づけられ，これらのユニットのチャートから前期及び後期白亜紀放散虫化石が産出した．一方，日和佐ユニットは，厚層理砂岩や砂岩泥岩互層の整然相からなり，遠洋性のチャートを含まない．一般に，海洋プレート層序に基づけば，付加コンプレックス中に産するチャート及び半遠洋性の多色泥岩は，海洋プレートが中央海嶺玄武岩の噴出により誕生してから，海溝に運ばれ沈み込み消失するまでの深海底の情報を保持していると考えられている（Matsuda and Isozaki, 1991; Wakita and Metcalfe, 2005）．さらに，そのチャートや多色泥岩から産する放散虫化石によるその年代幅は，海溝に沈み込んだ海洋プレートの年齢を近似している．そこで今回，

[1] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門（AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation）
[2] 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 リサーチアシスタント（Research Assistant, 2015 ～ 2016, AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation），新潟大学大学院自然科学研究科（Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan）
現所属：クニミネ工業株式会社（present: Kunimine Industries CO., Ltd, Iwaki, Fukushima 972-8312, Japan）
[*] Corresponding author: H. Hara, Central7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: hara-hide@aist.go.jp



第1図　四国東部の四万十帯付加コンプレックス．地質図は，公文・井内(1976)，平ほか(1980b)，公文(1981)，君波ほか(1998)，石田(1998)，Taira *et al.* (1988)，溝口ほか(2009)，Hara *et al.* (2017)，及び原ほか(2018)に基づき編纂した．

Fig. 1　Geological map of the Cretaceous Shimanto accretionary complex in eastern Shikoku. The geological map is based on Kumon and Inouchi (1976), Taira *et al.* (1980b, 1988), Kumon (1981), Kiminami *et al.* (1998), Ishida (1998), Mizoguchi *et al.* (2009), and Hara *et al.* (2017, 2018).

馬路地域及び周辺地域のチャート年代から，四国東部における四万十帯白亜系付加コンプレックスに沈み込んだ海洋プレートの年齢について検討を行う．

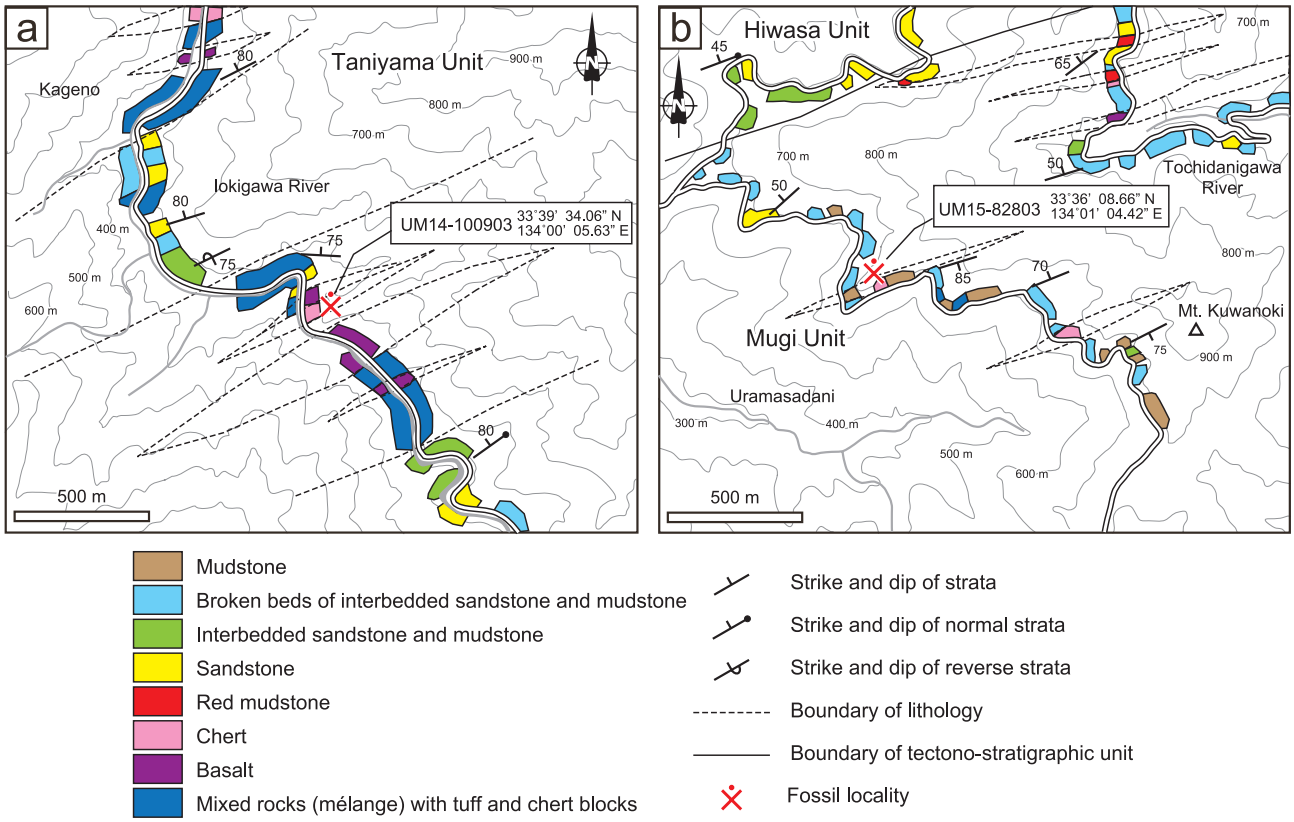
2．地質概略

四国東部の四万十帯白亜系付加コンプレックスは，君波ほか(1998)，石田(1998)，原ほか(2014)により，岩相層序及び放散虫化石年代により構造層序区分が行われている(第1図)．本報告では，原ほか(2014)に従い，馬路地域の四万十帯白亜系付加コンプレックスを谷山ユニット・日和佐ユニット・牟岐ユニットに区分した．

谷山ユニットは，玄武岩・チャート・多色泥岩の岩体を伴う混在岩，砂岩・泥岩・砂岩泥岩互層からなる．砂岩泥岩互層は頻繁に破断相を呈する．泥岩・珪長質凝灰岩・緑色泥岩から，コニアシアン期～サントニアン期の放散虫化石が報告されている(君波ほか，1998)．砕屑性ジルコンの最若ピークの加重平均U-Pb年代は，放散虫化石年代よりやや若いカンパニアン最前期まで示す(Hara *et al.*，2017)．そのため砕屑岩の堆積年代は，コニアシアン期～カンパニアン期最前期といえる．

日和佐ユニットは，厚層理砂岩及び砂岩泥岩互層からなり，整然相によって特徴づけられる．また君波ほか(1998)は，本ユニット南部の泥岩からカンパニアン期後半の放散虫化石を報告し，日和佐ユニットの堆積年代は北部と南部をあわせカンパニアン期と推定した．砕屑性ジルコンの最若ピークU–Pb年代は，カンパニアン期後半を示す(Hara *et al.*，2017)．

牟岐ユニットは，玄武岩・チャート・砂岩の岩体を伴う混在岩を特徴とする．またしばしば砂岩泥岩互層の破



第2図　放散虫化石産出地点のルートマップ．a: UM14-100903．b: UM15-82803．

Fig. 2　Route map around the occurrence points of radiolarians. a: UM14-100903．b: UM15-82803.

断相を伴う．泥岩よりカンパニアン期後半～マーストリヒチアン期前半の放散虫化石が得られている（君波ほか，1998；Hara *et al.*，2017）．また凝灰岩のジルコンU-Pb年代や砕屑性ジルコンの最若ピークU-Pb年代が前期暁新世を示すことから，牟岐ユニットの堆積年代はカンパニアン期後半～前期暁新世とされる（Shibata *et al.*，2008；Hara *et al.*，2017）．

3．放散虫化石年代

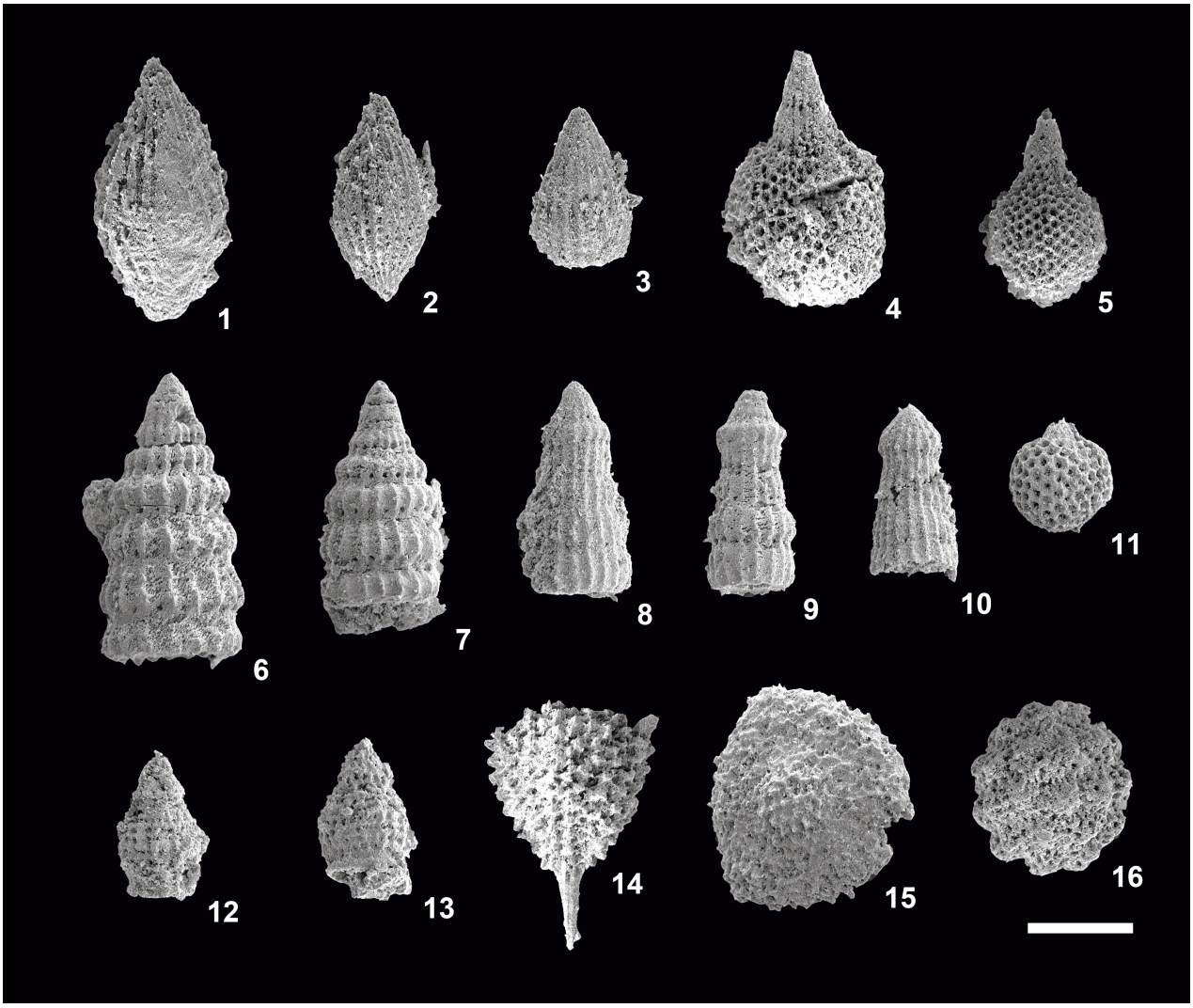
3. 1　抽出処理方法

試料は洗浄した後，ポリビーカー内で約5％のフッ化水素酸溶液に10～20時間浸した．試料を水洗しながらステンレス篩（開孔63 μm）を用いて，残渣試料を回収した．この作業を数回繰り返した．回収された残渣試料は，蒸発皿にてエタノール洗浄し，その後ホットプレートにて乾燥させた．実体顕微鏡下で，残渣試料中に放散虫化石が認められた試料について，放散虫化石を残渣からピックアップし，走査型電子顕微鏡（JEOL JSM-6610LV）を用いて画像を撮影した．今回，谷山ユニットのチャート（UM14-100903）及び牟岐ユニットのチャート（UM15-82803）より年代決定に有効な放散虫化石を見出した．これら化石の採取地点及び周辺のルートマップを第2図に示す．

3. 2　谷山ユニットのチャート

放散虫化石を産する谷山ユニットのチャート（UM14-100903）は，伊尾木川上流の影野に分布する（33°39′ 34.06″ N，134°00′ 05.63″ E）．やや泥質な赤色チャートで，層厚約100 mである．また層厚200 mの赤色な玄武岩に付随して分布する．玄武岩は，枕状溶岩ないし塊状溶岩からなり，一部片理面の発達が見られる．これらチャートと玄武岩は，混在岩中の岩体として産する．

本試料からは，*Hiscocapsa asseni*（Tan），*Thanarla brouweri*（Tan），及び*Thanarla lacrimula*（Foreman）の放散虫化石が得られた（第3図）．O’Dogherty（1994）による放散虫化石の分類及びUnitary Association（UA）法による年代決定に基づけば，*H. asseni*はUA1～UA10，*T. brouweri*はUA1～UA11，*T. lacrimula*はUA1～UA6に生存期間がある．これらの種が重複する期間はUA1～UA6であり，O’Dogherty and Guex（2002）に従えば，その年代はバレミアン期末～アプチアン期前半である．



第3図　谷山ユニット及び牟岐ユニットのチャートから産出した放散虫化石．1, 2：*Thanarla lacrimula*（Foreman）．3：*Thanarla brouweri*（Tan）．4, 5：*Hiscocapsa asseni*（Tan）．6, 7：*Dictyomitra formosa* Squinabol．8, 9：*Dictyomitra koslovae* Foreman．10：*Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman．11：*Cryptamphorella conara* Dumitrica．12, 13：*Artostrobium urna* Foreman．14：*Alievium superbum*（Squinabol）．15：*Pseudoaulophacus* cf. *praeflorensis* Pessagno．16：*Praeconocaryomma universa* Pessagno．スケールバーは，100 μmを示す．

Fig. 3　Radiolarians from chert of the Taniyama and Mugi units. 1, 2: *Thanarla lacrimula* (Foreman). 3: *Thanarla brouweri* (Tan). 4, 5: *Hiscocapsa asseni* (Tan). 6, 7: *Dictyomitra formosa* Squinabol. 8, 9: *Dictyomitra koslovae* Foreman. 10: *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman. 11: *Cryptamphorella conara* Dumitrica. 12, 13: *Artostrobium urna* Foreman. 14: *Alievium superbum* (Squinabol). 15: *Pseudoaulophacus* cf. *praeflorensis* Pessagno. 16: *Praeconocaryomma universa* Pessagno. Scale bar is 100 μm.

3. 3　牟岐ユニットのチャート

放散虫化石を産する牟岐ユニットのチャート（UM15-82803）は，加勝林道から分岐する裏正林道沿いの桑ノ木山西方に分布する（33°36′ 08.66 N, 134°01′ 04.42″ E）．砂岩泥岩互層の破断相ないし砂岩岩塊を含む混在岩中に，約10 mの層厚を持つ岩体として産する．チャートは赤色ないし淡灰色を呈し，赤色泥岩と互層する．

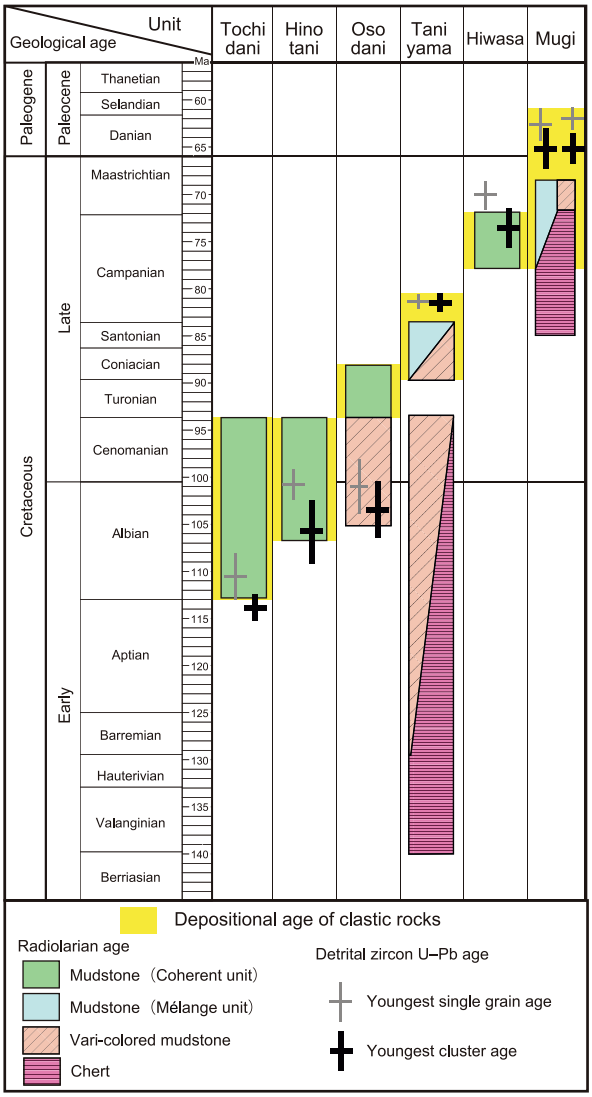
本試料からは，*Alievium superbum*（Squinabol），*Artostrobium urna* Foreman，*Cryptamphorella conara* Dumitrica，*Dictyomitra formosa* Squinabol，*Dictyomitra koslovae* Foreman，*Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman，*Praeconocaryomma universa* Pessagno，及び*Pseudoaulophacus* cf. *praeflorensis* Pessagnoの放散虫化石が得られた．Hollis and Kimura（2001）による年代決定に基づけば，*A. urna* はTu帯～ Dk2帯，*D. formosa*はTu帯～ At帯，*D. koslovae*はTu帯～ Pa帯，*P. praeflorensis*はDk1帯後半～ Pa帯に生存期間がある．これらの種が重複する期間は，Dk1帯後半～ Dk2帯であり，その年代はサントニアン期後半～カンパニアン期前半である．

4．チャート及び多色泥岩の堆積年代と海洋プレートの年齢

馬路地域の谷山ユニットと牟岐ユニットのチャートは，それぞれバレミアン期末～アプチアン期前半とサントニアン期後半～カンパニアン期前半と異なる年代を示すことが明らかとなった．四国東部，四万十帯白亜系付加コンプレックスの海洋プレート層序を第4図にとりまとめた．

馬路地域より北東側，北川地域及び桜谷地域に分布する谷山ユニットからは，オーテリビアン期～アルビアン期のチャート（中川ほか，1980；公文，1981），バレミアン期～アルビアン期の赤色泥岩（公文，1981）が報告されている．また谷山ユニットは，高知県の夜須町及び芸西村に分布する手結（てい）メランジュ（平ほか，1980a）に対比される．手結メランジュからは，バランギニアン期～オーテリビアン期及びアプチアン期～セノマニアン期のチャート，アルビアン期～セノマニアン期前半の赤色泥岩が報告されている（平ほか，1980a）．またわずかであるが後期ジュラ紀のチトニアン期を示すチャートも知られている（青木，1982）．なお泥岩と同様の年代を示すコニアシアン期～サントニアン期の赤色泥岩も報告されている（平ほか，1980a）．以上のことから，谷山ユニットのチャートは少なくともバランギニアン期～セノマニアン期を，赤色泥岩はバレミアン期～セノマニアン期の年代を示し，その時代幅は約45 m.y.に達する．西南日本の後期白亜紀島弧では，約89～85 Ma頃に，沈み込む海洋プレートがイザナギプレートからクラプレートに変化したとされる（Engebretson *et al.*，1985；Onishi and Kimura, 1995；Tokiwa，2009）．この時期は，谷山ユニットが堆積したコニアシアン期～サントニアン期に相当する．そのため谷山ユニットには，イザナギプレート上に堆積していたチャートが付加されたと考えられる．なお石田・橋本（1998）は，谷山ユニットに対比される彼らの谷山累層より，カンパニアン期後半のチャートとマーストリヒチアン期前半の泥岩からなるセクションを見出した．これらの年代は，谷山ユニットのチャート及び泥岩の年代より有意に若く，後述の牟岐ユニットの年代に近い．そのため，このセクションの帰属については検討が必要であると考えられる．

牟岐ユニットのチャートから放散虫化石の報告は少ない．石田・橋本（1998）は，徳島県牟岐町の海岸沿いに分布する牟岐ユニット（彼らの赤丸メランジュ）のチャートからカンパニアン期後半，珪質粘土岩からマーストリヒチアン期前半の放散虫化石を報告した．そのため，牟岐ユニットのチャートはサントニアン期後半～カンパニアン期，珪質泥岩はマーストリヒチアン期前半の年代を示し，これらの年代幅は約15 m.y.に相当する．牟岐ユニットは，砕屑岩の堆積年代（カンパニアン期後半～前期漸新世）に近いもしくは重複する年代を示す主にカンパニアン期のチャートを含み，前期白亜紀のチャートを含まない特徴を持つといえる．また牟岐ユニットの玄武岩は，その化学組成が中央海嶺玄武岩（N-MORB）や島弧ソレアイトを示すことが指摘されている（君波ほか，1992；麻木・吉田，1998；中村ほか，2000）．そして一部の玄武岩は，陸源堆積物である泥質岩と急冷縁を伴って密接に産出すること，玄武岩中に黒色泥岩のゼノリスを含むことなどから，現地性の中央海嶺玄武岩として解釈されている（君波ほか，1992）．この砕屑岩中に含まれる現地性の中央



第4図　四国東部，四万十帯白亜系付加コンプレックスの海洋プレート層序．放散虫化石年代の取りまとめ及び砕屑性ジルコンU-Pb年代は，Hara *et al.*（2017）に基づく．

Fig. 4　Ocean plate stratigraphy of the Cretaceous Shimanto accretionary complex in eastern Shikoku. Compiled radiolarian ages and detrital zircon U–Pb ages are based on Hara *et al.* (2017).

海嶺玄武岩の成因として，クラ–太平洋海嶺が海溝付近にて活動していた説（君波ほか，1992；Kiminami *et al.*, 1994），前弧域で海洋プレートの沈み込みによる島弧火成活動が生じていた説（麻木・吉田，1998）が考えられている．またSakaguchi（1996）では，四万十帯白亜系付加コンプレックスが，クラ–太平洋海嶺の沈み込みに伴い90°C/kmの非常に高い地温勾配を保持したことを示した．また一般に西南日本では，カンパニアン期以降に，海嶺の沈み込みにより，大規模な花崗岩バソリスが形成されたとされる（Kinoshita，1995；Nakajima *et al.*，1990；Iida *et al.*，2015）．また，Seton *et al.*（2012，2015）は，55～50 Ma頃にイザナギ–太平洋海嶺が沈み込んだモデルを提唱している．この様に，カンパニアン期以降は，海嶺を伴う若い海洋プレートが沈み込んでおり，牟岐ユニットに含まれるチャートは海嶺の近傍からもたらされたと考えられる．そして海嶺がすぐに海溝に達したため，チャートの堆積期間が短くなっているといえる．

この様なチャートの堆積年代における時空変遷については，四国西部や紀伊半島西部の四万十帯白亜系付加コンプレックスでも指摘されている．四国西部では，横波メランジュが谷山ユニットに，興津メランジュが牟岐ユニットに対比される．横波メランジュからは，バランギニアン期～セノマニアン期のチャート及び赤色泥岩が報告されている（岡村・宇部，1982；Taira *et al.*，1988）．そして，Saito *et al.*（2014）は，赤道付近で形成された古い海洋プレート（彼らのクラプレート）の横波メランジュへの付加を示唆している．また興津メランジュは，チャートから放散虫化石は見出されていないものの，セノマニアン期～チューロニアン期のチャートを伴う赤色泥岩が報告され（平ほか，1980a），さらに現地性玄武岩の存在が指摘されている（Kiminami *et al.*，1994）．紀伊半島西部では，カンパニアン期前半以前の堆積年代を示す花園コンプレックスと美山コンプレックスでは，ベリアシアン期～チューロニアン期のチャートを大量に含むのに対し，カンパニアン期後半以降の竜神コンプレックスでは現地性玄武岩を伴う（Kiminami *et al.*，1994）もののチャートを欠くという特徴がある（鈴木・中屋，2012）．鈴木・中屋（2012）は，付加コンプレックス中に含まれるチャートの存在量や年代の違いに関して，沈み込む海洋地殻がイザナギプレート・クラプレート・クラー太平洋海嶺へと変化したことを指摘している．

以上のように，チャートの堆積年代は，谷山ユニットには約45 m.y.に達する古い年齢を持つイザナギプレートが，牟岐ユニットには15 m.y.以下の非常に若く海嶺を伴う海洋プレートの沈み込み及び付加が生じていたことを支持する．

謝辞：本報告は，産業技術総合研究所地質調査総合センターが発行する5万分の1地質図幅「馬路」の調査研究の一部である．安芸森林管理署には，加勝林道及び裏正林道への入林許可を頂いた．山形大学の本山　功氏及び信州大学の常盤哲也氏には，査読を通じて有益なコメントを頂いた．以上の方々に，厚く御礼を申し上げます．

文　献

青木隆弘（1982）高知県四万十帯北帯の月見山・手結メランジュ中の上部ジュラ系・下部白亜系の放散虫化石．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 5，339–351.

麻木孝郎・吉田武義（1998）徳島県南東部の四万十帯北帯に分布する沈み込み帯型緑色岩．岩鉱，**93**，83–102.

Engebretson, D., Cox, A. and Gordon, R. G.（1985）*Relative plate motions between ocean and continental plates in the Pacific basin. Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, **206**, Boulder, CO, 59p.

原　英俊・植木岳雪・辻野泰之（2014）北川地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）．産総研地質調査総合センター，72p.

Hara, H., Nakamura, Y., Hara, K., Kurihara, T., Mori, H., Iwano, H., Danhara, T., Sakata, S. and Hirata, T.（2017）Detrital zircon multi-chronology, provenance, and low-grade metamorphism of the Cretaceous Shimanto accretionary complex, eastern Shikoku, Southwest Japan: Tectonic evolution in response to igneous activity within a subduction zone. *Island Arc*, **26**. e12218, doi:10.1111/iar.12218.

原　英俊・青矢睦月・野田　篤・田辺　晋・山崎　徹・大野哲二・駒澤正夫（2018）20万分の1地質図幅「高知」（第2版）．産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

Hollis, C. J. and Kimura, K.（2001）A unified radiolarian zonation for the Late Cretaceous and Paleocene of Japan. *Micropaleontology*, **47**, 235–255.

Iida, K., Iwamori, H., Orihashi, Y., Taeho, P., Jwa, Y. J., Kwon, S. T., Danhara, T. and Iwano, H.（2015）Tectonic reconstruction of batholith formation based on the spatiotemporal distribution of Cretaceous–Paleogene granitic rocks in southwestern Japan. *Island Arc*, **24**, 205–220.

石田啓佑（1998）四国東部，四万十累層群の岩相層序と放散虫年代．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 11，189–209.

石田啓祐・橋本寿夫（1998）四国東部，四万十北帯の上部白亜系チャート-砕屑岩シーケンスと放散虫生層序．大阪微化石研究会誌 特別号，no. 11，211–225.

君波和雄・柏木庸孝・宮下純夫（1992）上部白亜系牟岐累層 (四国東部)中の in-situ玄武岩類の産状とその意義．地質雑，**98**，867–883.

Kiminami, K., Miyashita, S. and Kawabata, K.（1994）

Ridge collision and in situ greenstones in accretionary complexes: An example from the Late Cretaceous Ryukyu Islands and southwest Japan margin. *Island Arc*, **3**, 103–111.

君波和雄・松浦卓史・岩田尊夫・三浦健一郎(1998)四国東部に分布する白亜系四万十累層群の砂岩組成と白亜紀火山活動との関連．地質雑，**104**，314–326.

Kinoshita, O. (1995) Migration of igneous activities related to ridge subduction in Southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics*, **245**, 25–35.

公文富士夫(1981)徳島県南部の四万十累帯白亜系．地質雑，**87**，277–295.

公文富士夫・井内美朗(1976)室戸半島北東部，徳島県宍喰町周辺の四万十累層群古第三系．地質雑，**82**，383–394.

Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1991) Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: From remote ocean to subduction zone. *Tectonics*, **10**, 475–499.

溝口秀治・君波和雄・今岡照喜・亀井淳志(2009)室戸岬地域における中新世の海溝近傍火成活動．地質雑，**115**，17–30.

中川衷三・中世古幸次郎・川口輝与隆・吉村隆三(1980)四国東端の四万十帯上部ユラ系及び白亜系放散虫化石の概要．徳島大学学芸紀要(自然科学)，**31**，1–27.

Nakajima, T., Shirahase, T. and Shibata, K. (1990) Along-arc variation of Rb-Sr and K-Ar ages of Cretaceous granitic rocks in Southwest Japan. *Contrib. Mineral. Petrol*., **104**, 381–389.

中村謙太郎・藤永公一郎・加藤泰浩(2000)四万十帯北帯に分布する現地性玄武岩の希土類元素組成とその起源に関する示唆．岩鉱，**29**，175–190.

O'Dogherty, L. (1994) Biochronology and paleontology of mid-Cretaceous radiolarians from Northern Apennines (Italy) and Betic Cordillera (Spain). *Mémoires de Géologie (Lausanne)*, no. 21, 1–413.

O'Dogherty, L. and Guex, J. (2002) Rates and pattern of evolution among Cretaceous radiolarians: relations with global paleoceanographic events. *Micropaleontology*, **48**, 1–22.

岡村　真・宇部秀幸(1982)高知県横波半島に分布する下部白亜系チャート岩体中の放散虫の層位的分布(予察)．高知大学術研報 自然科学編，**31**，87–94.

Onishi, C. T. and Kimura, G. (1995) Change in fabric of melange in the Shimanto Belt, Japan: Change in relative convergence?. *Tectonics*, **14**, 1273–1289, doi:10.1029/95TC01929.

Saito, T., Okada, Y., Fujisaki, W., Sawai, Y., Sakata, S., Dohm, J., Maruyama, S. and Hirata, T. (2014) Accreted Kula plate fragment at 94 Ma in the Yokonami-melange, Shimanto-belt, Shikoku, Japan. *Tectonophysics*, **623**, 136–146.

Sakaguchi, A. (1996) High paleogeothermal gradient with ridge subduction beneath the Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, **24**, 795–798.

Seton, M., Müller, R.D., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S. and Chandler, M. (2012) Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth Sci. Rev*., **113**, 212–270.

Seton, M., Flament, N., Whittaker, J., Müller, R. D., Gurnis, M. and Bower, D. J. (2015) Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate-mantle system 60–50 million years ago. *Geophys. Res. Lett*., **42**, doi:10.1002/2015GL063057.

Shibata, T. Orihashi, Y., Kimura, G. and Hashimoto, Y. (2008) Underplating of mélange evidenced by the depositional ages: U-Pb dating of zircons from the Shimanto accretionary complex, southwest Japan. *Island Arc*, **17**, 376–393.

鈴木博之・中屋志津男(2012)紀伊半島における四万十付加体の発達史について–付加体の多様性とその起源–．地団研専報，no. 59，273–282.

平　朝彦・岡村　真・甲藤次郎・田代正之・斎藤靖二・小玉一人・橋本光男・千葉とき子・青木隆弘(1980a)高知県四万十帯北帯(白亜系)における“メランジュ”の岩相と時代．平　朝彦・田代正之編，四万十帯の地質学と古生物学(甲藤次郎教授還暦記念論文集)，林野弘済会高知支部，高知，179–214.

平　朝彦・田代正之・岡村　真・甲藤次郎(1980b)高知県四万十帯の地質とその起源．平　朝彦・田代正之編，四万十帯の地質学と古生物学(甲藤次郎教授還暦記念論文集)，林野弘済会高知支部，高知，249–264.

Taira, A., Katto, J., Tashiro, M., Okamura, M. and Kodama, K. (1988) The Shimanto belt in Shikoku, Japan, evolution of Cretaceous to Miocene accretionary prism. *Modern Geology*, **12**, 5–46.

Tokiwa, T. (2009) Timing of dextral oblique subduction along the eastern margin of the Asian continent in the Late Cretaceous: Evidence from the accretionary complex of the Shimanto Belt in the Kii Peninsula, Southwest Japan. *Island Arc*, **18**, 306–319.

Wakita, K. and Metcalfe, I. (2005) Ocean Plate Stratigraphy in East and Southeast Asia. *Jour. Asian Earth Sci*., **24**, 679–702.

（受 付：2018年4月28日； 受 理：2018年9月18日）

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 125–136, 2019

総説 - Review

日本における過去 20 年間の新第三系放散虫化石層序学の進展

本山　功 [1, *]

Isao Motoyama (2019) A review of Neogene radiolarian biostratigraphy in Japan during the last two decades. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 125–136, 2 figs.

Abstract: Progress in Neogene radiolarian biostratigraphy in Japan and the North Pacific region during the last two decades is characterized by (1) the direct correlation between the radiolarian biostratigraphy and the magnetostratigraphy, which has now been extended back to the Middle Miocene using deep-sea cores, (2) advances in regional Neogene radiolarian biostratigraphy from the Northwest Pacific, the California margin, and the Japan Sea, and (3) application of the revised zonations to correlate onshore Neogene sections. These results have been supported by the reinvestigation of type-species described by earlier studies in the 19th to earliest 20th century, revision of taxonomic systems from lower to higher taxa, and researches for new biostratigraphic index fossils. Great advances have also been made in Quaternary radiolarian biostratigraphy in the nearshore seas surrounding the Japanese islands, proposing new radiolarian zones for the Kuroshio and Oyashio regions and the Japan Sea.

Keywords: Neogene, Quaternary, Radiolaria, biozone, geomagnetic polarity time scale, Japan, North Pacific, Japan Sea

要　旨

本山(1999a, b)によるレビュー以降の本邦新第三系放散虫化石層序学における進展について考証を試みた．過去20年間を振り返ると，主要な進歩として，第一に，深海掘削コアに基づいて中部中新統にまで遡って古地磁気層序との直接対比がなされ，それによって化石帯と生層序イベントの数値年代が精度良く求められたことが挙げられる．第二に，北西太平洋，カリフォルニア沿岸海域，日本海などの異なる海域の地域的な放散虫化石層序の研究が進んだこと，そして，第三に，改訂された放散虫化石帯が陸上の新第三系セクションの対比に適用されるようになったことが挙げられる．これらの進歩とともに，分類学的研究により学名の整理や新種の記載がなされ，低次から高次分類群におよぶ分類体系の見直しも進められてきた．また，最近とくに日本周辺海域において第四紀放散虫化石帯の研究が活発化している点が注目される．

1．はじめに

日本における新第三系放散虫化石層序学は，石油探鉱への応用を目的として1950年代に端緒を開き，その後目覚ましい発展を遂げてきた．要約すると，1960 〜 1970年代における含油新第三系の精力的な分帯，1970年代以降の深海掘削研究に基づく生層序イベントの認定と化石帯の細分化，2000年以降の古地磁気層序との対比の進展という，大きく3つの段階に分けられる．そのうちの1998年以前の経緯の詳細は，中世古・菅野(1973)，家田(1974)，本山(1999a, b)によって紹介されている．1999年以降については本山(2009, 2014)による紹介があるものの，それらはごく手短な紹介にすぎない．そこで，本総説では，日本を含む北太平洋における年代決定ツールとしての新第三紀放散虫化石層序学の最近の歩みについて網羅的に紹介し，その応用としての放散虫化石を用いた本邦新第三系の対比・年代論の研究をレビューする．

2．古地磁気層序との対比と数値年代

1998年以前の日本の新第三系放散虫化石層序学の進展については，本山・丸山(1998)と本山(1999a, b)により，また，1999年から2013年については本山(2014)により紹介されている．本山(2014)でも述べたが，1999年以降の進展には2つの側面が認められる．1つは北太平洋における放散虫化石層序と古地磁気層序を直接対比する研究の増加であり(Kamikuri *et al.*, 2004, 2007；曽野ほか，2009；Kamikuri, 2010, 2017)，もう1つは2004年

[1] 山形大学理学部（Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata, 990-8560 Japan）

[*] Corresponding author: I. Motoyama, E-mail: i-motoyama@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

と2012年に出版された標準地質年代尺度の改訂である（Gradstein *et al.*, eds., 2004, 2012）．

堆積残留磁気の測定により古地磁気層序が確立されている柱状試料やセクションから微化石データが得られれば，微化石層序を古地磁気層序に直接対比することができ，それに基づいて化石帯や生層序イベントの数値年代を求めることができる（例えば，高橋，1995；柳沢・高橋，2008；鈴木紀毅，2012）．このような方法によって，Kamikuri *et al.*（2004）は三陸沖の2本の深海掘削コア（ODP Leg 186, Sites 1150, 1151）を使って，後期中新世～第四紀の放散虫化石帯・生層序イベントの数値年代を計算した．同様にKamikuri *et al.*（2007）は北太平洋北部の2本の深海掘削コア（ODP Leg 145, Sites 884, 887）に基づいて中期中新世～第四紀の放散虫化石帯・生層序イベントの数値年代を求めた．これらにより，放散虫化石の年代決定ツールとしての信頼性と有用性がそれ以前に比べて格段に高まった．

古地磁気層序は堆積時の地球磁場を記録したものであるが，地球磁場の逆転史に年代を与える地磁気極性年代論についても，Heirtzler *et al.*（1968）以来いくどとなく改訂が行われている（例えば，Harland *et al.*, 1982, 1990；Berggren *et al.*, 1985；Cande and Kent, 1992, 1995；Gradstein *et al.*, eds., 2004, 2012）．数値年代の計算に当たって，Kamikuri *et al.*（2004, 2007）とKamikuri（2010）は1995年版の地磁気極性年代尺度（CK95：Cande and Kent, 1995）に準拠していたが，本山（2014）は2004年版の年代尺度（ATNTS2004：Lourense *et al.* 2004）に基づいて計算し直した．最近Kamikuri *et al.*（2017）は，2012年版の年代尺度（ATNTS2012：Ogg, 2012；Hilgen *et al.*, 2012）に準拠して再計算した数値年代を示している．日本からは離れるが，Kamikuri（2017）は北太平洋東部カリフォルニア沿岸海域の深海掘削コア（ODP Leg 167, Sites 1020, 1021）の放散虫化石層序と鮮新世～第四紀の古地磁気層序との対応関係を明らかにし，数値年代の算定にあたりATNTS2012を用いている．

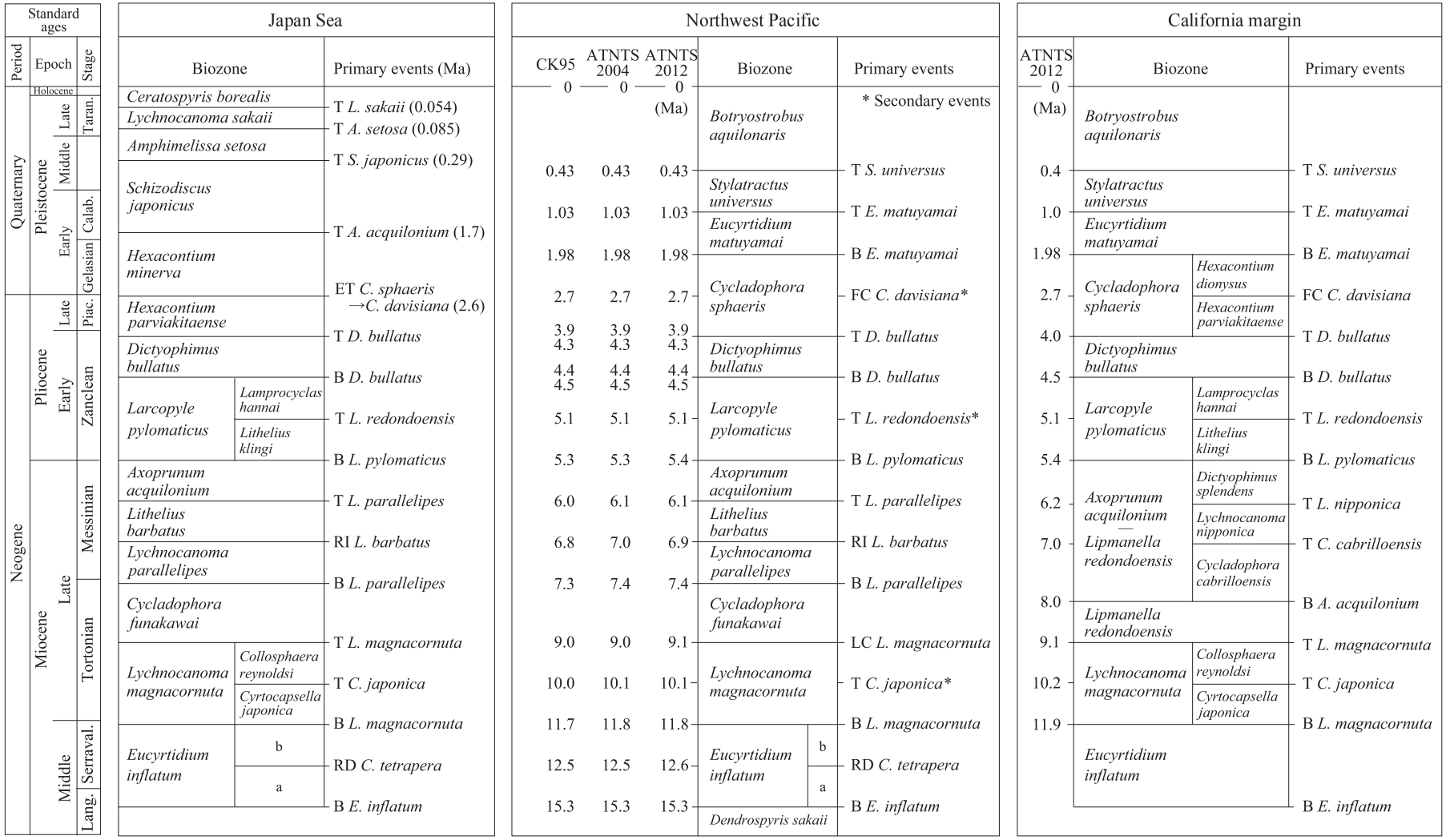
第1図に，Kamikuri *et al.*（2004, 2007, 2017），本山（2014），Kamikuri（2017）に基づいて，日本海，北西太平洋，カリフォルニア沿岸の3地域における中期中新世～第四紀の放散虫化石帯と年代値を図示した．北西太平洋放散虫化石帯は元はHays（1970），船山（1988），Motoyama（1996）によって設立されたもので，上記のようにKamikuri *et al.*（2004, 2007）により古地磁気層序との直接対比から年代値が与えられ，その年代値は，本山（2014）によってATNTS2004に換算され，Kamikuri *et al.*（2017）によってATNTS2012に換算されている．

3．化石帯区分

日本付近（北西太平洋と日本海）の中期中新世～鮮新世の化石帯区分は，1999年以降に大きな変更はない．しかし，後述するように日本付近の第四紀化石帯は変革期を迎えている．カリフォルニア沿岸海域については，Kamikuri（2017）によって後期中新世から鮮新世にかけて8つの亜帯（subzone）が提唱された．Kamikuri *et al.*（2017）は，そのうちの5つの亜帯が日本海にも適用可能であるとしている．第1図を見ると，北西太平洋，日本海，カリフォルニアの3つの地域間で示帯種や特徴種の多くは共通するが，地域差もあることが読み取れる．これは示準種の産出量の低下等が原因で化石帯を定義付けている生層序イベントが隣接地域へ追跡できないか，追跡できても時間面と大きく斜交していることを意味しているので，化石帯の適用の際には注意を払う必要がある．例えば，北西太平洋における後期中新世の特徴種である*Lychnocanoma parallelipes*と*Lithelius barbatus*は，カリフォルニア沖では産出しないため，*L. parallelipes*帯と*L. barbatus*帯は日本付近には適用できるが，カリフォルニアでは使えない（Kamikuri, 2017）．第1図には載せていないが日本付近も含めて低～中緯度地域で第一級の生層序イベントである*Stichocorys delmontensis/peregrina*の進化的移行イベントについては，形態の時間的な変化と地理的な変化の両面から適用性や同時性の考察が行われている（Kamikuri, 2012）．進化的移行は祖先と子孫の関係にある2種の勢力交代のことであり，イベントの認定は単に産出個体数の増減に過ぎないが，Kamikuriの分析はその背後にある分類学的・進化学的・生態学的な意味と問題を掘り起こすものとして興味深い．

さて，2003年に開始した統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program：IODP）と2013年からそれを引き継いだ国際深海科学掘削計画（International Ocean Discovery Program：IODP）によって，近年，日本周辺海域で多数の調査航海が実施されている．そのうちの，下北沖（Site C9001C），紀伊半島沖（Exp. 315 Site C0001），宮城沖（Exp. 343 Site C0019），日本海・東シナ海（Exp. 346 Sites U1422–U1430）の掘削サイトにおいて，中新世～第四紀放散虫の研究が行われている．下北沖と紀伊半島沖では，第四紀放散虫化石帯の提唱とともに同一コアでの古地磁気層序や酸素同位体比層序との対比がなされている（Matsuzaki *et al.*, 2014a, b, c, d）．宮城沖ではプレート境界断層近傍の地層の年代決定がなされた（Chester *et al.*, 2013）．日本海ではKamikuri *et al.*（2017）により7本の深海コアの放散虫化石層序が検討されている．

それらのうち，Matsuzaki *et al.*（2014c）は紀伊半島沖の黒潮流域において，過去約200万年間にわたって，水域の異なる三陸沖と同じ生層序イベントを認定できることを示した．これは中～高緯度化石帯の適用範囲やそれと低緯度化石帯（Nigrini, 1971；Sanfilippo and Nigrini, 1998）との対応関係を明らかにする上で重要である．このテーマについては，ほぼ同じ時代をカバーする千葉県銚



第1図　北太平洋地域の新第三紀放散虫化石帯の地域間対比：日本海(Kamikuri *et al.*, 2017), 北西太平洋(Kamikuri *et al.*, 2004, 2007), カリフォルニア沿岸海域(Kamikuri, 2017). 北西太平洋の放散虫イベントの1995年版年代尺度（CK95）に基づく数値年代はKamikuri *et al.* (2004, 2007)によって求められたものであり，本山(2014)はそれを2004年版の年代尺度（ATNTS2004）に合わせて再計算し，さらにKamikuri *et al.* (2017)は2012年版の年代尺度（ATNTS2012）へ換算した.

Fig. 1　Correlation of Neogene radiolarian zonations between the Japan Sea (Kamikuri *et al.*, 2017), Northwest Pacific (Kamikuri *et al.*, 2004, 2007) and California margin (Kamikuri, 2017). The CK95-base numerical ages for the Northwest Pacific radiolarian events given by Kamikuri *et al.* (2004, 2007) were recalibrated to the ATNTS2004 timescale by Motoyama (2014) and recalibrated to the ATNTS2012 timescale by Kamikuri *et al.* (2017). Abbreviations: B, bottom (first occurrence); T, top (last occurrence); FC, first common occurrence; LC, last common occurrence; RI, rapid increase; RD, rapid decrease; ET, evolutionary transition.

子の古地磁気・放散虫化石層序（酒井，1990）との比較も含めて，今後の展開に期待したい．下北沖では過去約70万年間に相当する深海掘削コア（Site C9001C）が8つの放散虫化石帯に分帯されている（Matsuzaki *et al.*, 2014d）．これはほぼ10万年間隔という生層序としては驚異的な時間分解能を持つことから，その適用性が期待される．

Kamikuri *et al.*（2017）は，日本海のIODP Exp. 346により掘削された中部中新統～鮮新統に対して北西太平洋あるいはカリフォルニア沿岸海域で設立された化石帯が適用できることを示した．そして第四系についてはそれが難しいことを指摘し，第四系については5つの放散虫化石帯に区分する案を示している（第1図）．日本海の第四紀放散虫化石帯については，これ以前にも独自の分帯が試みられている．例えば，Itaki and Ikehara（2003）は過去約3万年に当たる第四系を4つの放散虫化石帯に分帯した．その放散虫化石帯は，顕著な群集変化に基づくものであるが，日本海の海底堆積層に特徴的な明暗互層との対比から生層序イベントの数値年代も計算されており，日本海の海底コアの対比・年代決定に有効である．この特性を生かして，タービダイトの発生時期や堆積速度の推定がなされている（池原ほか，2004；片山・板木，2007；Nakajima and Itaki，2007；Nakajima *et al.*, 2014）．

海洋コアをベースにした最近の放散虫研究を総観すると，とくに第四紀生層序・古海洋学の進展が著しい．日本列島に近いところから見てゆくと，まず上述の松崎（Matsuzaki）らによる下北沖・紀伊半島沖における一連の研究と上栗（Kamikuri）らによる日本海の研究がある．日本海ではさらに板木（Itaki）らにより顕著な成果が上げられている（例えば，板木，2001；Itaki *et al.*, 2004，2007；Ikehara and Itaki，2007）．北方へ目を転じると，オホーツク海（例えば，Matul *et al.*, 2002, 2009; Itaki *et al.*, 2008；Ikenoue *et al.*, 2011），ベーリング海（IODP Exp. 323：例えば，Ikenoue *et al.*, 2016；朝日ほか，2018によるレビューも参照されたい），北東太平洋（IODP Exp. 341：Matsuzaki and Suzuki，2018）においても，長尺ピストンコアや深海掘削船の連続コア回収技術の進歩を背景にして高時間解像度の研究が活況を呈しており，放散虫に限らず北太平洋生層序・古海洋学全体が21世紀初期に新たなルネッサンス期を迎えているといえる．本項目で紹介した生層序学的研究は，古海洋学的研究とも密接に関係しているが，古海洋学については本総説の主題からそれるためここでは扱わない．しかし，最近の放散虫を用いた新生代古海洋学の進展は目を見張るものがあるので，その基礎となる生物地理・生態学的研究の進展と合わせて，しかるべき専門家によって包括的な解説がなされることを期待したい．

4．複合微化石層序

微化石を使って地層の年代を求める場合，例えば放散虫だけを用いるよりも有孔虫や珪藻なども同時に用いた方がより精度よく年代を決めることができる．複数の微化石グループで地層の年代を決めるときの基準となるのが，複合微化石年代尺度である（例えば，Berggren *et al.*, 1995）．複合微化石年代尺度を作るには，同一の地質断面や掘削コアで複数の微化石グループの生層序イベントの層序関係を明らかにする方法と，同一の地質断面や掘削コアで個別に微化石の生層序を古地磁気層序に対比し，古地磁気層序を媒介にして複数の微化石層序の相互関係を定める方法とがある．実際にはこれら2つの方法を組み合わせて古地磁気・微化石年代尺度が作られている．

1999年以降では，まず斎藤（1999）により，珪藻・放散虫・浮遊性有孔虫・石灰質ナンノ化石の4つの微化石グループの化石帯とCK95の地磁気極性年代をコンパイルして，日本版新第三紀古地磁気・微化石年代尺度が作られた．柳沢（1999）は，能登半島珠洲地域の中部中新統における珪藻・放散虫・浮遊性有孔虫・石灰質ナンノ化石の生層序データの層序関係を詳しく検討した．それにより，例えば放散虫については，珪藻の生層序イベントとの直接対比に基づいて，*Eucyrtidium asanoi*の初産出層準，*Cyrtocapsella tetraperа*の急減層準，*Cyrtocapsella japonica*の多産層準の3つのイベントの数値年代が精度よく求められている．Takahashi *et al.*（1999）は房総半島の中部中新統の同一セクションの珪藻・放散虫・石灰質ナンノ化石層序と近隣セクションの浮遊性有孔虫化石層序を凝灰岩鍵層を介して対比し，複合微化石層序を作成した．Motoyama *et al.*（2004）は，三陸沖の深海掘削コア（ODP Leg 186 Sites 1150，1151）に基づいて，中部中新統～第四系の珪藻・放散虫・浮遊性有孔虫・石灰質ナンノ化石層序の直接対比を行い，さらに上部中新統～第四系については古地磁気層序との直接対比によりCK95ベースの数値年代を求めた．

低緯度浮遊性有孔虫化石帯の適用の難しい日本海側の新第三系・第四系については，日本海側地域用の複合微化石年代尺度が作られている．例えば，新潟県発行の地質図の解説書にはCK95に準拠した新潟県版の複合微化石年代尺度が載っている（新潟県，2000，第IV-1図）．小布施（2014）は石油探鉱への適用を前提にして，浮遊性有孔虫・底生有孔虫・石灰質ナンノ化石・珪藻・放散虫・花粉・渦鞭毛藻の7グループの生層序とATNTS2004の地磁気極性年代尺度をコンパイルして，日本海側含油新第三系の対比に有効な複合微化石年代尺度を編纂した．

1980年代の複合微化石層序（例えば，尾田，1986）では，微化石グループ間の対比はできていても，古地磁気層序との直接対比データが十分になかったために数値年代を決めるのが難しかった．それと比べて，今は，どの微化石グループの生層序も高い精度で古地磁気層序との対比がなされているため（珪藻：Watanabe and Yanagisawa, 2005．放散虫：Kamikuri *et al.*, 2004，2007．浮遊性有孔

虫・石灰質ナンノ化石：Lourens *et al.*, 2004；Hilgen *et al.*, 2012），かつてOda *et al.*（1984）や林ほか（1999），上述の柳沢（1999），Takahashi *et al.*（1999），Motoyama *et al.*（2004）が行ったような，自ら生データを集めて比較検討するという手間をかけなくても，出版済みの文献から化石帯と年代値を引用し，地磁気極性年代尺度を基準にして張り合わせることで複合微化石年代尺度を容易に作れるようになった．例えば，柳沢・高橋（2008）の図1.4.6や，安藤ほか（2011）のFig. 4，本特集号の鈴木ほか（2019）の第11図もその一例といえる．このことは，この20年の間に，地域地質や古環境学の研究者の間に，複合微化石層序の有用性と活用法への理解が十分に浸透してきたことを意味しているのであろう．

５．分類学的研究

分類学は古生物を用いた生層序学・進化学・古生態学・古環境学等の基礎をなす学問であり，発展的な研究にとって分類の充実は欠かすことができない．生層序学はおもに種・亜種レベルの低次分類群を利用する．化石帯や生層序イベントの認定は，指標となる種の同定に基づいているため，新たな指標種の発見も重要であるが，すでに記載された種・亜種の分類基準と学名の適格性を確保し，それらを研究者間で共有することも大切である．

放散虫は5億年の歴史を有し，生息域が全海洋に及ぶ多様性の高い生物であるため，その分類学的研究も博物学全盛の19世紀以来現在に至るまで脈々と続けられている．ヘッケル（Ernst Haeckel：1834 〜 1919）とエーレンベルク（Christian Gottfried Ehrenberg：1795 〜 1876）は，今日の放散虫学の礎を築いた19世紀の博物学の大家として知られる．二人によって新種として命名された放散虫種は，ヘッケルが3500種以上，エーレンベルクが500種以上に及び，合わせて4000を超える（相田，2012；鈴木・大金，2012；辻・谷村，2012）．しかしながら，当時の新種記載は，まだ写真ではなくスケッチによるものであったこと，さらにヘッケルによる記載種のタイプ標本の多くが行方不明になっていること等が，その後の分類学上の混乱の原因となっていた．このような状況を打開するために国立科学博物館・東北大学・宇都宮大学・フンボルト大学・ロンドン自然史博物館・ヘッケルハウスの共同により「ヘッケル・エーレンベルク計画」が2004 〜 2005年に実施され，その成果は国立科学博物館からモノグラフとして2009年に出版された（Tanimura and Aita，eds., 2009）．ヘッケル・エーレンベルク計画の趣旨と経緯については，辻・谷村（2012）の日本語による解説があり，その中でプロジェクトの成果についても簡略に紹介されている．それによると，保管されていた放散虫標本の顕微鏡写真が撮影されたことや，属のタイプとなる標本のレビューが大きな成果といえる（個々の論文はTanimura and Aita，eds., 2009の中に収録されている）．また，ヘッケルとエーレンベルク以外の19世紀〜 20世紀初頭の研究者（例えば，Bailey，Cleve，Jørgensen）によって記載された放散虫種についても，似たような検証が行われている（Itaki and Bjørklund，2007；Dolven *et al.*, 2014；Bjørklund *et al.*, 2014）．

以上は，おもに種・属レベルの分類学における進歩であるが，科レベル以上の高次分類についても検討が進められている．新生代放散虫の科レベルの分類体系は，20世紀後半を通じてRiedel（1967），Petrushevskaya（1971），Riedel and Sanfilippo（1977）等が広く使われてきたが，2001年に出版されたいわゆる黒本“Radiolarians in the Sedimentary Record”（De Wever *et al.*, 2001）によって大幅な改訂がなされ，顕生代を網羅する科レベル以上の高次分類が体系化された．高次分類群については，その後も検討が加えられている（例えば，Matsuzaki *et al.*, 2015）．

この章の冒頭部で，生層序学で新たな指標種の発見も重要だと述べたように，示準化石となりえる新種の記載は，化石帯の細分化に大きく貢献する．Kamikuri（2010）は，北太平洋の深海掘削コアから17の新種と1つの新亜種を記載し，ODP Sites 884, 887, 1151の3地点のコアにおけるそれらの層序分布を示すとともに，いくつかの種の出現あるいは消滅イベントが広域で高い同時性をもつことを明らかにした．Kamikuri（2010）による新種のうちの少なくとも11種（*Calocyclas motoyamai*，*Cycladophora funakawai*，*Cycladophora teocalli*，*Dendrospyris eurus*，*Dendrospyris uruyaensis*，*Hexacontium minerva*，*Hexacontium dionysus*，*Hexacontium parviakitaense*，*Lithelius klingi*，*Lychnocanoma kamtschatica*，*Spongodiscus cauleti*）は北海道や本州の陸上セクションからも産出が認められており（本山・仲村，2002；新澤ほか，2009；Motoyama *et al.*, 2017b；本山ほか，2018；川谷ほか，2019；坂井ほか，印刷中），今後，本邦の新第三系の対比・年代論に役立つ可能性がある．本特集号には日本海や北太平洋の深海掘削コアから産出した中新世放散虫化石に関する論文が含まれている（Kamikuri，2019；Matsuzaki and Itaki, 2019）．これらの資料は，分類の論文というよりも，写真集的な色合いが強いが，種のコンセプトと形態バリエーションのイメージを研究者間で共有するために役立つであろう．日本からは地理的に遠いが，2000年以降に南大洋から記載された新生代放散虫（Lazarus *et al.*, 2005）の中には，*Larcopyle weddelium*のように日本付近の新第三系から産出する種も含まれているので，そういった遠隔地の研究成果にも注意を払う必要がある．

以上，この章で述べてきたように，低次から高次まで，あらゆる分類階層にわたる地道な研究の積み重ねによって，放散虫分類学は今後ますます安定性を増すものと期待される．それによって新第三紀放散虫化石層序学の信頼性と利便性も一層高められるにちがいない．

6．陸上セクションへの適用

本山(1999b)は1998年以前に論文として出版された我が国の新第三系放散虫の研究地域を図に示した．本論文では，同様に，1999年以後今日までの間に公表された新第三系放散虫化石層序の研究地域を白地図にプロットした(第2図)．収録の対象とした文献は，本山(1999b)と同じく，原則として放散虫化石の種名あるいは化石帯名が掲載されていて，かつ試料採取地点あるいは試料採取ルートが明示されている公表論文とした．基本は陸上セクションを対象としたが，大陸棚調査等の近海におけるドレッジやロックコアラーによる海底岩石データもいくつか収録した．放散虫データを含んでいても，収録の対象としなかった文献には，地質調査総合センター発行の地質図類(地域地質研究報告など)や航海報告書類と県や地方自治体発行の地質図類がある．例えば，地質調査総合センターのGH航海報告書にも海底岩石試料からの新第三紀放散虫化石の産出が報告されているが，本総説には収録しなかった．GH航海のうちの北海道周辺海域におけるサンプリング地点と放散虫化石年代については，能條ほか(2003)によりリスト化されていて参考になる．なお，1998年以前に出版された文献のうち，本山(1999b)における収録から漏れていたものがいくつかあったため，それらも第2図に収録した．

第2図に見るように，過去20年間の新第三系放散虫化石層序の研究は，北は北海道から南は沖縄県に至る広域から多数報告されている．とくに新第三系の主要な分布域に一致する関東・信越・東北・北海道で数が多く，これは1998年以前の傾向と同じである．この中で，松岡・鈴木(2014)による古墳時代の土器に使われた粘土の起源の研究は，ちょっと変わり種で興味深い．

第2図中の本州の日本海側と北海道における研究はすべて中部中新統かそれ以新の地層を対象としているが，太平洋側では下部中新統を対象とした研究も少なくない(釧路沖：本山ほか，2010．常磐：相田・竹谷，2001．三浦：鈴木・蟹江，2010；鈴木　進，2012．設楽：星ほか，2000．紀伊半島：紀州四万十帯団体研究グループ，2008)．中部中新統かそれ以新の研究のほとんどでは本山(1999a)かそれ以降の化石帯が用いられており，それらの地層は基本的に第1図に示した化石帯が適用可能であることが分かる．しかしながら，数値年代に関しては，CK95に基づくものが大半であり，ATNTS2004に基づくものは，第2図に示した論文のうち北海道の本山ほか(2016，2018)，長野県の田邊ほか(2016)及び房総半島沖の川村ほか(2018)の4編に限られる．ATNTS2012に基づくものは，青森県の坂井ほか(印刷中)の1編にとどまっている．設楽の星ほか(2000)ではShilov（1995)による北太平洋化石帯の適用が試みられているが，他の下部中新統の研究では低緯度化石帯(Sanfilippo and Nigrini，1998)が用いられている．

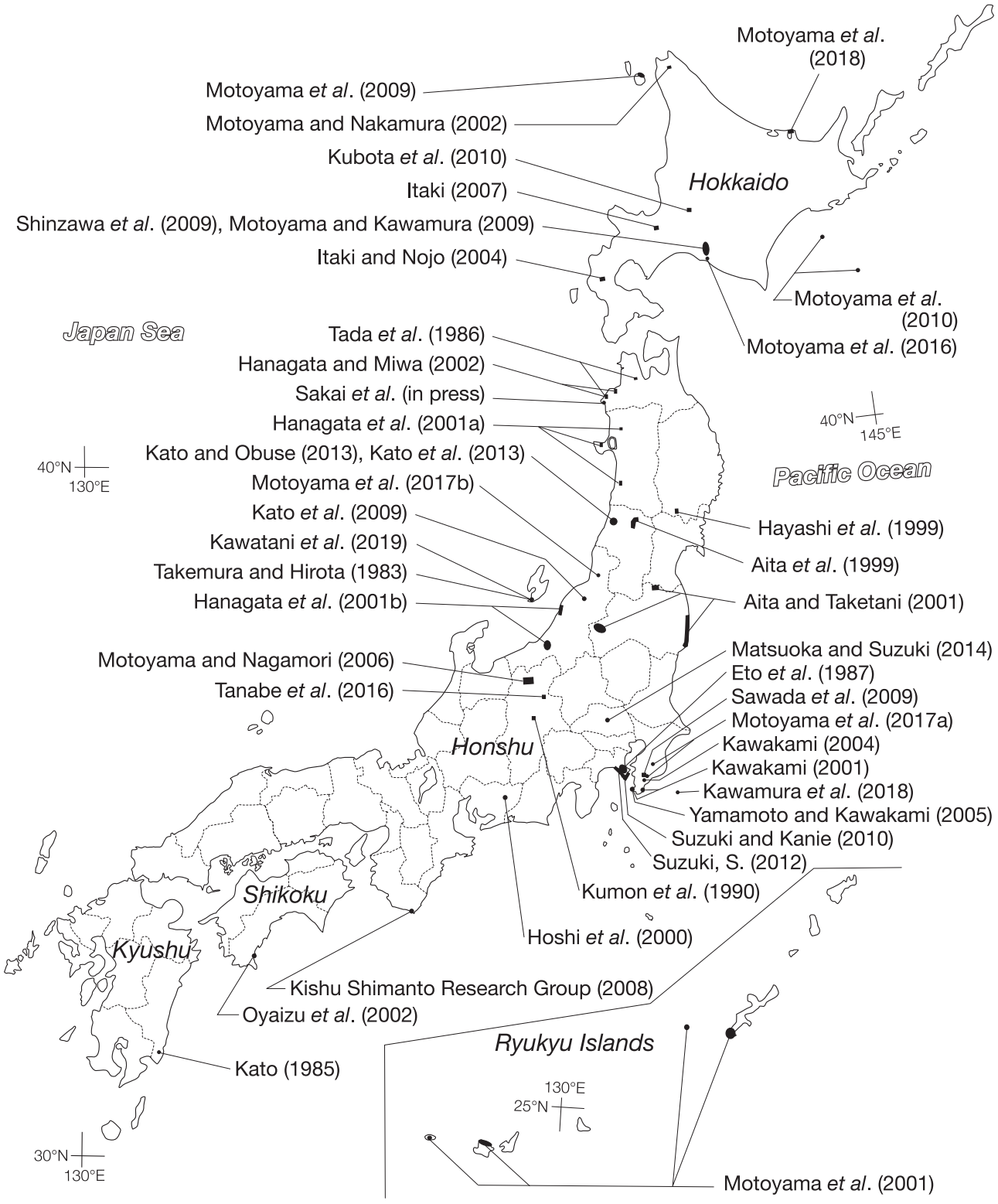
7．その他

ここ20年の間には，放散虫用のサンプル処理法の改良も試みられている(板木，1998，2003；Itaki and Hasegawa, 2000；Matsuzaki and Itaki，2016)．また，「化石の研究法―採集から最新の解析法まで」(化石研究会編，2000)や「新版微化石研究マニュアル」(尾田・佐藤編，2013)といった技術的な解説書も出版されている．専門外の人をターゲットに放散虫の魅力を伝えることにも力が注がれている(板木，2005；鈴木・相田，2011；鈴木ほか，2012)．とくに2012年に出版された「微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界」(谷村・辻編，2012)は，美しい写真にあふれ，遊び心も満載でかつ専門的な内容も含む，微化石全般を網羅するユニークな普及書であり，我々を不思議の国へといざなってくれる．この書籍との出会いをきっかけに微化石に興味をもち，放散虫学を志す人が増えることを願ってやまない．

8．むすび

本総説では，1999年以降の本邦新第三系放散虫化石層序学とそれにまつわる様々な放散虫研究の進展について考証を試みた．この20年間を振り返ると，放散虫化石層序と古地磁気層序との直接対比が進められ，年代決定ツールとしての成熟度が増し，それによって陸上セクションの層序対比や年代決定精度が格段に高められた躍進の時代だったといえる．さらに，本総説の主題から外れるためあまり深く掘り下げなかったが，北太平洋及び日本海における第四紀放散虫化石層序学が今まさに発展の途上にあるということも強調しておきたい．また，この20年の間には分類学的研究と古海洋学的な研究にも著しい進展が見られるが，やはり本総説の主題から逸脱するため，ここではごく一部の紹介にとどまった．それぞれの分野の専門家によりレビューがなされるのを待ちたい．著者自身の今後の課題としては，陸上セクションの対比・年代決定への応用をさらに促進するとともに，とくに中部中新統～第四系に比べて大きく立ち後れている下部中新統の放散虫分帯の早期決着を図りたいと考えている．

謝辞：著者は2001年から2005年にかけて，産業技術総合研究所地球科学情報研究部門主任研究員併任・招へい型客員研究員として年代層序学的研究に従事した．本論文にはその成果の一部が含まれている．査読者の上栗伸一氏から頂いたコメントによって本原稿は改善された．Richard W. Jordan氏には英文を添削して頂いた．記して御礼申し上げたい．



第2図　本邦において1999年以降に出版された新第三系放散虫化石層序の論文とその研究地域．1998年以前に出版されていたが本山（1999b）から漏れていた論文も収録した．

Fig. 2　Locations of Neogene geological sections investigated for radiolarian biostratigraphy in Japan since 1999. Some papers published before 1999 but missed in Motoyama (1999b) are also indicated.

文　献

相田吉昭(2012) エルンスト・ヘッケルの人物像：放散虫の造形にみせられるまで．谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界，国立科学博物館叢書，**13**，25–28，東海大出版．

相田　優・竹谷陽二郎(2001) 福島県内に分布する海成新第三系の微化石調査資料．福島県博調査報告，no. 36，1–53．

相田　優・竹谷陽二郎・丸山俊明・田中裕一郎・小笠原憲四郎(1999) 山形県真室川町における新第三紀鯨類化石産出層の微化石年代．山形県真室川町産鯨類化石調査報告書，山形県立博物館，69–105．

安藤寿男・柳沢幸夫・小松原純子(2011) 常磐地域の白亜系から新第三系と前弧盆堆積作用．地質雑，**117**，49–67．

朝日博史・高橋孝三・岡崎裕典・小野寺丈尚太郎(2018) IODP Expedition 323 ベーリング海掘削航海の成果と今後の展望：全球水循環・気候変動に関わる顕著な役割．地質雑，**124**，17–34．

Berggren, W. A., Kent, D. V., Flynn, J. J. and Van Couvering, J. A. (1985) Cenozoic geochronology. *Geol. Soc. Am. Bull*., **96**, 1407–1418.

Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, C. C., III and Aubry, M.-P. (1995) A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. *In* Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M.-P., and Hardenbol, J., eds., *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM Spec. Pub., no. 54, 129–212.

Bjørklund, K. R., Itaki, T. and Dolven, J. K. (2014) Per Theodor Cleve: a short résumé and his radiolarian results from the Swedeish Expedition to Spitsbergen in 1898. *Jour. Micropalaeontol*. **33**, 59–93.

Cande, S. C. and Kent, D. V. (1992) A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Jour. Geophys. Res*., **97**, 13917–13951.

Cande, S. C. and Kent, D. V. (1995) Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Jour. Geophys. Res*., **100**, 6093–6095.

Chester, F. M., Rowe, C., Ujiie, K., Kirkpatrick, J., Regalla, C., Remitti, F., Moore, J.C., Toy, V., Wolfson-Schwehr, M., Bose, S., Kameda, J., Mori, J.J., Brodsky, E.E., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013) Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science*, **342**, 1208–1211.

De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., Nigrini, C. and Caridroit, M. (2001) *Radiolarians in the sedimentary record*. Gordon and Breach Sci. Publ., 533p.

Dolven, J. K., Bjørklund, K. R. and Itaki, T. (2014) Jørgensen's polycystine radiolarian slide collection and new species. *Jour. Micropalaeontol*., **33**, 21–58.

江藤哲人・尾田太良・長谷川四郎・本田信幸・船山政昭(1987) 三浦半島中・北部の新生界の微化石生層序年代と古環境．横浜国立大理科紀要，Sec. 2，no. 34, 41–57.

船山政昭(1988) 能登半島珠洲地域の新第三系の岩相および放散虫化石層序．東北大地質古生物研邦報，no. 91，15–41．

Gradstein, F., Ogg, J. and Smith, A., eds. (2004) *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge Univ. Press, 589p.

Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds. (2012) *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier BV, 1144p.

花方　聡・三輪美智子(2002) 青森県深浦地域の中新統～鮮新統微化石層序および古環境．地質雑，**108**，767–780．

花方　聡・本山　功・三輪美智子(2001a) 日本海地域における底生有孔虫*Spirosigmoilinella compressa*の消滅と*Miliammina echigoensis*の出現の年代およびその古海洋学的意義－中新世～鮮新世の海水準変動との関連．地質雑，**107**，101–116．

花方　聡・本山　功・平松　力・渡邊和恵・辻　隆司(2001b) 新潟県上越～中越地域における中新統・鮮新統境界部の微化石層序．地質雑，**107**，565–584．

Harland, W. B., Cox, A. V., Llewellyn, P. G., Pickton, C. A. G., Smith, A. G. and Walters, R. (1982) *A geologic time scale*. Cambridge Univ. Press, 131p.

Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. V., Craig, L. E., Smith, A. G. and Smith, D. G. (1990) *A geologic time scale 1989*. Cambridge Univ. Press, 263p.

林　広樹・柳沢幸夫・鈴木紀毅・田中裕一郎・斎藤常正(1999) 岩手県一関市下黒沢地域に分布する中部中新統の複合微化石層序．地質雑，**105**，480–494．

Hays, J. D. (1970) Stratigraphy and evolutionary trends of Radiolaria in North Pacific deep-sea sediments. *Geol. Soc. America, Mem*., **126**, 185–218.

Heirtzler, J. R., Dickson, G. O., Herron, E. M., Pittman, W. C., III, and LePichon, X. (1968) Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversal and motions of the ocean floor and continents. *Jour. Geophys. Res*., **73**, 2119–2136.

Hilgen, F. J., Lourens, L. J. and Van Dam, J. A. (2012) The Neogene Period, *In* Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier BV, 923–978.

星　博幸・伊東宣貴・本山　功(2000) 愛知県設楽地域に分布する北設亜層群の地質，放散虫化石，および地質年代．地質雑，**106**，713–726．

家田享一（1974）本邦含油第三系における化石放散虫を用いた調査報告のまとめと将来の研究方向について．石資技研所報，**17**，241–256.

Ikehara, K. and Itaki, T. (2007) Millennial-scale fluctuations in seasonal sea-ice and deep-water formation in the Japan Sea during the late Quaternary. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **247**, 131–143.

池原　研・片山　肇・辻野　匠・荒井晃作・板木拓也・保柳康一（2004）深海底タービダイトを用いた地震発生間隔推定における堆積作用理解の重要性―北海道沖日本海東縁海洋海山周辺の例．地質学論集, no. 58, 111–122.

Ikenoue, T., Takahashi, K., Sakamoto, T., Sakai, S. and Iijima, K. (2011) Occurrences of radiolarian biostratigraphic markers *Lychnocanoma nipponica sakaii* and *Amphimelissa setosa* in Core YK07-12 PC3B from the Okhotsk Sea. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth Planet. Sci*., **32**, 1–10.

Ikenoue, T., Okazaki, Y., Takahashi, K. and Sakamoto, T. (2016) Bering Sea radiolarian biostratigraphy and paleoceanography at IODP Site U1341 during the last four million years. *Deep-Sea Res. II*, **125/126**, 38–55.

板木拓也（1998）堆積物試料の乾燥による放散虫殻の破損について．化石，no. 65，1–9.

板木拓也（2001）日本海東縁部における過去3万年間の放散虫群集変遷．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 12，359–374.

板木拓也（2003）砂質堆積物からの放散虫殻の懸濁分離法．化石，no. 73，38–41.

板木拓也（2005）放散虫学のススメ．化石，no. 77，45–50.

板木拓也（2007）放散虫．札幌市大型動物化石総合調査報告書―サッポロカイギュウとその時代の解明，札幌市，84–89.

Itaki, T. and Bjørklund, K. R. (2007) Bailey's (1856) radiolarian types from the Bering Sea re-examined. *Micropaleontology*, **52**, 449–463.

Itaki, T. and Hasegawa, S. (2000) Destruction of radiolarian shells during sample drying and its effect on apparent faunal composition. *Micropaleontology*, **46**, 179–185.

Itaki, T. and Ikehara, K. (2003) Radiolarian biozonation for the upper Quaternary in the Japan Sea. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **109**, 96–105.

板木拓也・能條　歩（2004）西南北海道今金地域の新第三系黒松内層から産出した放散虫化石による生層序年代．地質雑，**110**，325–328.

Itaki, T., Ikehara, K., Motoyama, I. and Hasegawa, S. (2004) Abrupt ventilation changes in the Japan Sea over the last 30 ky: evidence from deep-dwelling radiolarians. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **208**, 263–278.

Itaki, T., Komatsu, N. and Motoyama, I. (2007) Orbital- and millennial-scale changes of radiolarian assemblages during the last 220 kyrs in the Japan Sea. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **247**, 115–130.

Itaki, T., Khim, B.-K. and Ikehara, K. (2008) Last glacial–Holocene water structure in the southwestern Okhotsk Sea inferred from radiolarian assemblages. *Marine Micropaleontol*., **67**, 191–215.

Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Rev. Micropaleontol*., **53**, 85–106.

Kamikuri, S. (2012) Evolutionary changes in the biometry of the fossil radiolarian *Stichocorys peregrina* lineage in the eastern equatorial and eastern North Pacific. *Marine Micropaleontol*., **90–91**, 13–28.

Kamikuri, S. (2017) Late Neogene radiolarian biostratigraphy of the eastern North Pacific ODP Sites 1020/1021. *Paleontol. Res*., **21**, 230–253.

Kamikuri, S. (2019) Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 163–194.

Kamikuri, S., Nishi, H., Motoyama, I. and Saito, S. (2004) Middle Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the Northwest Pacific, Ocean Drilling Program Leg 186. *Island Arc*, **13**, 191–226.

Kamikuri, S., Nishi, H. and Motoyama, I. (2007) Effects of late Neogene climatic cooling on North Pacific radiolarian assemblages and oceanographic conditions. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **249**, 370–392.

Kamikuri, S., Itaki, T., Motoyama, I. and Matsuzaki, K. M. (2017) Radiolarian biostratigraphy from Middle Miocene to Late Pleistocene in the Japan Sea. *Paleontol. Res*., **21**, 397–421.

化石研究会編（2000）化石の研究法―採集から最新の解析法まで．共立出版，388p.

片山　肇・板木拓也（2007）日本海東部，秋田沖における堆積速度の広域分布．地質雑，**113**，505–518.

加藤　進・小布施明子（2013）山形県余目油田における放散虫および渦鞭毛藻化石層序．瑞浪市化石博研報，no. 39，73–90.

加藤　進・秋葉文雄・平松　力・岩野英樹（2009）新潟県新津丘陵における金津層の珪藻化石と地質年代．瑞浪市化石博研報，no. 35，111–125.

加藤　進・早稲田周・西田英毅・岩野裕継（2013）山形県余目油田の石油地質と地球化学．石油技誌，**78**，265–275.

加藤高政（1985）日南層群の層位学的研究．東北大地質古生物研邦報，no. 87，1–23.

川上俊介(2001) 房総半島南部の上部中新統西岬層および石堂層群から産出する放散虫化石とその地質学的意義. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. 12, 343–358.

川上俊介(2004) 礫中の第三系放散虫化石群集から見直す房総半島嶺岡構造帯の地質. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. 13, 197–204.

川村喜一郎・本山　功・吉本佳太(2018) 房総半島南東沖から採取されたドレッジ試料の放散虫化石年代. *JAMSTEC-R*, **27**, 77–86.

川谷文子・指田勝男・上松佐知子・甲能直樹(2019) 佐渡島, 中新統鶴子層から得られた放散虫化石と堆積年代. 地調研報, **70**, 91–99.

紀州四万十帯団体研究グループ(2008) 熊野層群基底部の放散虫化石年代―紀伊半島四万十累帯の研究(その14). 地球科学, **62**, 57–61.

久保田資浩・本山　功・川村好毅・上栗伸一・小笠原憲四郎(2010) 北海道岩見沢市幌向川流域の中新統の放散虫化石層序. 石油技誌, **75**, 371–381.

公文富士夫・佐藤玲子・小坂共栄(1990) 長野県諏訪湖北方の新第三系横河川累層の中新世放散虫化石. 信州大理学部紀要, **25**, 25–33.

Lazarus, D., Faust, K. and Popova-Goll, I. (2005) New species of prunoid radiolarians from the Antarctic Neogene. *Jour. Micropalaeontol*., **24**, 97–121.

Lourens, L., Hilgen, F., Shackleton, N. J., Laskar, J. and Wilson, D. (2004) The Neogene Period. *In* Gradstein, F., Ogg, J. and Smith, A., eds., *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge Univ. Press, 409–440.

松岡喜久次・鈴木紀毅(2014) 須恵器(土器)から発見された中新世中期の放散虫化石と胎土の起源となった層準の推定. 地球科学, **68**, 109–114.

Matsuzaki, K. M. and Itaki, T. (2016) The effect of boron (B) on radiolarian skeletons during extraction from mudstone and soft sediments. *News Osaka Micropaleontol. (NOM), Spec. Vol*., no. 16, 75–78.

Matsuzaki, K. M. and Itaki, T. (2019) Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425), *Bull. Geol. Surv. Japan*, **70**, 195–209.

Matsuzaki, K. M. and Suzuki, N. (2018) Quaternary radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northeastern Pacific (IODP Expedition 341 Site U1417) and synchroneity of bioevents across the North Pacific. *Jour. Micropalaeontol*. **37**, 1–10.

Matsuzaki, K. M., Nishi, H., Suzuki, N., Kawate, Y., Takashima, T. and Sakai, T. (2014a) *Cycladophora davisiana* abundances as a paleoceanographic and stratigraphic tool in high latitude siliceous sediments. *Marine Micropaleontol*., **106**, 1–9.

Matsuzaki, K. M., Nishi, H., Suzuki, N., Cortese, G., Eynaud, F., Takashima, R., Kawate, Y. and Sakai, T. (2014b) Paleoceanographic history of the Northwest Pacific Ocean over the past 740 kyr, discerned from radiolarian fauna. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **396**, 26–40.

Matsuzaki, K. M., Nishi, H., Hayashi, H., Suzuki, N., Gyawali, B. R., Ikehara, M., Tanaka, T. and Takashima, R. (2014c) Radiolarian biostratigraphic scheme and stable oxygen isotope stratigraphy in southern Japan (IODP Expedition 315 Site C0001). *Newslet. Stratigr*., **47**, 107–130.

Matsuzaki, K. M., Suzuki, N., Nishi, H., Takashima, R., Kawate, Y. and Sakai, T. (2014d) Middle to Late Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the water-mixed region of the Kuroshio and Oyashio currents, northeastern margin of Japan (JAMSTEC Hole 902-C9001C). *Jour. Micropalaeontol*., **33**, 205–222.

Matsuzaki, K. M., Suzuki, N. and Nishi, H. (2015) Middle to Upper Pleistocene polycystine radiolarians from Hole 902-C9001C, northwestern Pacific. *Paleontol. Res*., **19**, Suppl., 1–77.

Matul, A. G., Abelmann, A., Tiedemann, R., Kaiser, A. and Nürnberg, D. (2002) Late Quaternary policystine radiolarian datum events in the Sea of Okhotsk. *Geo-Marine Letters*, **22**, 25–32.

Matul, A. G., Abelmann, A., Nürnberg, D, and Tiedemann, R. (2009) Stratigraphy and major paleoenvironmental changes in the Sea of Okhotsk during the last million years inferred from radiolarian data. *Oceanology*, **49**, 93–100.

Motoyama, I. (1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221–262.

本山　功(1999a) 本邦含油新第三系をめぐる放散虫化石層序の進歩－化石帯区分の進歩. 石油技誌, **64**, 28–39.

本山　功(1999b) 本邦含油新第三系をめぐる放散虫化石層序の進歩－石油探鉱への適用. 石油技誌, **64**, 268–281.

本山　功(2009) 放散虫を用いた第四紀編年. 日本第四紀学会50周年電子出版編集委員会編, デジタルブック最新第四紀学, 日本第四紀学会. (in CD)

本山　功(2014) 放散虫. 石油鉱業便覧, 石油技術協会, 229–231.

本山　功・川村好毅(2009) 北海道穂別地域の中新統の地質と放散虫化石層序. むかわ町立穂別博研報, no. 24, 1–18.

本山　功・丸山俊明(1998) 中・高緯度北西太平洋地域における新第三紀珪藻・放散虫化石年代尺度：地磁気極性年代尺度CK92およびCK95への適合. 地質

雑，**104**，171–183.

本山　功・長森英明(2006) 長野県北信地域の鮮新統より産出した放散虫化石．地質雑，**112**，541–548.

本山　功・仲村佐知子(2002) 北海道稚内市宇流谷川における中新統増幌層と稚内層の放散虫化石層序と不整合境界の再認定．地質雑，**108**，219–234.

本山　功・田中仁氏・山里直哉・兼子尚知・伊藤　孝(2001) 沖縄県沖縄島，久米島，西表島，与那国島の新第三系放散虫化石の研究．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 12, 337–342.

Motoyama, I., Niitsuma, N., Maruyama, T., Hayashi, H., Kamikuri, S., Shiono, M., Kanamatsu, T., Morishita, C., Aoki, K., Hagino, K., Nishi, H. and Oda, M. (2004) A Middle Miocene to Pleistocene magnetobiostratigraphy of ODP Sites 1150 and 1151, northwest Pacific: sedimentation rate and updated regional geologic time scale. *Island Arc*, **13**, 289–305.

本山　功・岩井雅夫・佐藤雅彦(2009) 利尻島の新第三系と第四系より産出した放散虫化石．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 14，109–115.

本山　功・上栗伸一・辻野　匠・川村喜一郎・三輪哲也(2010) 釧路海底谷から採取された岩石試料の放散虫化石年代．地調研報，**61**，87–103.

本山　功・丸山俊明・西村智弘・櫻井和彦(2016) 北海道波恵川産含鯨類化石転石炭酸塩団塊の放散虫・珪藻化石年代．むかわ町穂別博研報，no. 31，1–6.

Motoyama, I., Itaki, T., Kamikuri, S., Taketani, Y. and Okada, M. (2017a) Cenozoic biostratigrphy, chronostratigraphy and paleoceanography in the Boso Peninsula and Bandai Volcano in the Aizu region, East Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ. (Geol.)*, no. 32 (Suppl.), 1–27.

Motoyama, I., Kurihara, T. and Itaki, T. (2017b) Neogene biosiliceous sedimentary sequence and radiolarian biostratigraphy in the Tainai area, Niigata Prefecture. *Sci. Rep. Niigata Univ. (Geol.)*, no. 32 (Suppl.), 91–102.

本山　功・丸山俊明・五十嵐澪・江口瑞紀・須藤めぐみ・鈴木政文(2018) 北海道能取湖付近の上部中新統呼人層の放散虫・珪藻化石層序．地質雑，**124**，517–532.

Nakajima, T. and Itaki, T. (2007) Late Quaternary terrestrial climatic variability recorded in deep-sea turbidites along the Toyama Deep-Sea Channel, central Japan Sea. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **247**, 162–179.

Nakajima, T., Kakuwa, Y., Yasudomi, Y., Itaki, T., Motoyama, I., Tomiyama, T., Machiyama, H., Katayama, H., Okitsu, O., Morita, S., Tanahashi, M. and Matsumoto, R. (2014) Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan. *Jour. Asian Earth Sci*., **90**, 228–242.

中世古幸次郎・菅野耕三(1973) 日本新第三紀の化石放散虫分帯．地質学論集，no. 8, 23–33.

Nigrini, C. A. (1971) Radiolarian zones in the Quaternary of the equatorial Pacific Ocean. *In* Funnell, B. M. and Riedel, W. R., eds., *The Micropalaeontology of Oceans*, Cambridge Univ. Press, 443–461.

新潟県(2000) 新潟県地質図および新潟県地質図説明書（2000年版）．200p.

能條　歩・板木拓也・石村豊穂(2003) 北海道における新生界の微化石研究―1990年以降の研究成果の総括と今後の課題．地球科学，**57**，343–355.

小布施明子(2014) 古生物分析総論．石油鉱業便覧，石油技術協会，221–223.

尾田太良(1986) 新第三紀の微化石年代尺度の現状と問題点―中部および東北日本を中心として．北村記念地質論文集，297–312.

尾田太良・佐藤時幸編(2013) 新版微化石研究マニュアル．朝倉書店，110p.

Oda, M., Hasegawa, S., Honda, N., Maruyama, T. and Funayama, M. (1984) Integrated biostratigraphy of planktonic foraminifera, calcareous nannofossils, radiolarians and diatoms of middle and upper Miocene sequences of central and northeast Honshu, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **46**, 53–69.

Ogg, J. G. (2012) Geomagnetic polarity time scale. *In* Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. and Ogg, G., eds., *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier BV, 85–113.

小柳津　篤・三浦健一郎・田中利治・林　久晃・君波和雄(2002) 四国西部の四万十累層群の地質と放散虫年代．地質雑，**108**，701–720.

Petrushevskaya, M. G. (1971) On the natural system of Polycystine Radiolaria (Class Sarcodina). *In* Farinacci, A., ed., *Proceedings of the Second Planktonic Conference*, *Roma 1970*, Edizioni Tecnoscienza–Roma, 981–992.

Riedel, W. R. (1967) Subclass Radiolaria. *In* Harland, W. B. *et al.*, eds., *The Fossil Record,* Geological Society of London, 291–298.

Riedel, W. R. and Sanfilippo, A. (1977) Cainozoic Radiolaria. *In* Ramsay, A. T. S., ed., *Oceanic Microplaeontology*, Academic Press, 847–912.

斎藤常正(1999) 最近の古地磁気層序の改訂と日本の標準微化石層序．石油技誌，**64**，2–15.

坂井志緒乃・伊藤　孝・上栗伸一・本山　功・小室光世(印刷中) 青森県深浦地域に分布する新第三系層状マンガン鉱床の放散虫化石と地質年代．地質雑.

酒井豊三郎(1990) 千葉県銚子地域の上部新生界―岩相・古地磁気・放散虫化石層序．宇都宮大教養部研報，

no. 23, Sec. 2, 1–34.

Sanfilippo, A. and Nigrini, C. (1998) Code numbers for Cenozoic low latitude radiolarian biostratigraphic zones and GPTS conversion tables. *Marine Micropaleontol*., **33**, 109–156.

澤田大毅・新藤亮太・本山　功・亀尾浩司(2009) 房総半島，小糸川流域の中新・鮮新統の地質と放散虫化石層序．地質雑，**115**, 206–222.

Shilov, V. V. (1995) Miocene-Pliocene radiolarians from Leg 145, North Pacific. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., Scholl, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. ODP, Sci. Results*, **145**, College Station TX (Ocean Drilling Program), 93–116.

新澤みどり・上栗伸一・本山　功(2009) 北海道中央南部穂別地域の中新統から産出した放散虫化石．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 14，117–141.

曽野明洋・鈴木紀毅・吉村悦子・鹿納晴尚・武田浩太郎(2009) 北太平洋中緯度における640万年間の放散虫群集変動(ODP Leg 198，Site 1210，シャッキーライズ)．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 14, 143–181.

鈴木紀毅(2012) 層序と地質年代尺度．谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界，国立科学博物館叢書，**13**，190–194，東海大出版.

鈴木紀毅・相田吉昭(2011) 放散虫の生物学―分布，現存量，共生生物．日本プランクトン学会報，**58**, 40–48.

鈴木紀毅・大金　薫(2012) 歴史に埋もれた偉人エーレンベルク．谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界，国立科学博物館叢書，**13**，29–33，東海大出版.

鈴木紀毅・大金　薫・相田吉昭(2012) 放散虫．谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界，国立科学博物館叢書，**13**，76–91，東海大出版.

鈴木　進(2012) 神奈川県東部の三浦半島に分布する中新統葉山層群の放散虫化石年代．神奈川県博調査研報(自然)，no. 14，65–74.

鈴木　進・蟹江康光(2010) 神奈川県南東部の葉山層群と三浦層群から産出した放散虫化石による生層序年代．横須賀市博研報(自然)，no. 57，1–17.

鈴木拓馬・林　広樹・柳沢幸夫・藤原　治・檀原　徹(2019) 宮城県仙台市北東部に分布する中新統の統合年代層序．地調研報，**70**，17– 41.

Tada, R., Watanabe, Y. and Iijima, A. (1986) Accumulation of laminated and bioturbated Neogene siliceous deposits in Ajigasawa and Goshogawara areas, Aomori Prefecture, Northeast Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sec. 2*, **21**, 139–167.

高橋雅紀(1995) 地層の年代をいかに知るか―現状と課題．地質ニュース，no. 495，40–46.

Takahashi, M., Mita, I., Watanabe, M. and Motoyama, I. (1999) Integrated stratigraphy of the Middle Miocene marine sequence in the Boso Peninsula, central Japan: a review. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 225–243.

竹村厚司・廣田清治(1983) 佐渡，鶴子層の脊椎動物化石を含むドロマイトノジュールの放散虫化石．大阪微化石研究会誌，no. 10，29–38.

田邊勝彦・本山　功・川村好毅・澤田大毅・柳沢幸夫(2016) 長野県上田市太郎山周辺の中新統の地質と放散虫化石層序．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 16, 61–73.

Tanimura, Y. and Aita, Y., eds. (2009) Joint Haeckel and Ehrenberg Project, Reexamination of the Haeckel and Ehrenberg Microfossil Collections as a Historical and Scientific Legacy. *National Museum of Nature and Science Monographs*, **40**, 106p. (in CD)

谷村好洋・辻　彰洋編(2012) 微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界．国立科学博物館叢書，**13**, 396p，東海大出版.

辻　彰洋・谷村好洋(2012) ヘッケル・エーレンベルク計画．谷村好洋・辻　彰洋編，微化石―顕微鏡で見るプランクトン化石の世界，国立科学博物館叢書，**13**, 211–216，東海大出版.

Watanabe, M. and Yanagisawa, Y. (2005) Refined Early to Middle Miocene diatom biochronology for the middle- to high-latitude North Pacific. *Island Arc,* **14**, 91–101.

Yamamoto, Y. and Kawakami, S. (2005) Rapid tectonics of the Late Miocene Boso accretionary prism related to the Izu-Bonin arc collision. *Island Arc*, **14**, 178–198.

柳沢幸夫(1999) 能登半島珠洲地域の中新統の珪藻化石層序．地調月報，**50**, 167–213.

柳沢幸夫・高橋雅紀(2008) 関東概説：複合年代尺度．日本地質学会編，日本地方地質誌3関東地方，20–26, 朝倉書店.

（ 受 付：2018年3月5日； 受 理：2019年1月18日 ）

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 137–161, 2019

Notes and Comments

Radiolarian assemblages from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific

Shin-ichi Kamikuri[1,*]

Shin-ichi Kamikuri (2019) Radiolarian assemblages from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 137–161, 1 figure, 1 table, 18 plates.

Abstract: Totally 183 species or species group of radiolarians including 78 spumellarians and 105 nassellarians were identified from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific. Photographs have been illustrated in 18 plates. These taxa include 70 unidentified forms, particularly within the families Actinommidae, Collosphaeridae, Hexalonchidae, Litheliidae, Pyloniidae, Spongodiscidae and Stylodictyidae. Some of these taxa might be new species.

Keywords: radiolaria, Miocene, equatorial Pacific

1. Introduction

The eastern equatorial Pacific is one of the major upwelling areas and supports a significant proportion of the new biological production (Chavez and Barber, 1987). The band of cool surface water from about 3°S to 3°N is called the equatorial "cold tongue" (Fiedler and Talley, 2006; Kessler, 2006; Pennington *et al.*, 2006). Hence this area makes global contribution to biogenic sediment burial due to equatorial upwelling.

Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 320, "Pacific Equatorial Age Transect (PEAT)", was designed to recover continuous well-preserved sediments of the eastern equatorial Pacific (Pälike *et al.*, 2010). The primary object was to reconstruct the evolution of the equatorial climate system throughout the Cenozoic. Pälike *et al.* (2012) presented a record of the carbonate compensation depth (CCD) that covers the past 53 million years from a depth transect in the eastern equatorial Pacific, and found large superimposed fluctuations in the CCD during the middle Eocene.

One of the other aims of this program was to provide information about rapid biological evolution and turnover rates during times of climatic stress (Pälike *et al.*, 2010). IODP Exp. 320 Site 1335 focused on the early and middle Miocene. This interval of the time is noted for its significantly heavy benthic oxygen isotopes, indicating long-term global cooling (Zachos *et al.*, 2001). The early and middle Miocene also marks the beginning of the deposition of the abundant siliceous microfossil in the eastern equatorial Pacific (Keller and Barron, 1983).

Species components and the faunal turnover of radiolarians, which is one of siliceous microfossils, have been well documented from the Quaternary to late Neogene in the eastern equatorial Pacific (e.g. Molina-Cruz, 1977; Moore *et al.*, 1981; Haslett and Funnell, 1996; Kamikuri *et al.*, 2009). However that of radiolarian assemblages during the early and middle Miocene are still unknown. The purpose of this study is to illustrate radiolarian morphotypes from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in order to record the species components in the eastern equatorial Pacific.

2. Material and methods

Site U1335 was drilled at a water depth of 4,327.5 m (5°18.735' N, 126°17.002' W) in the eastern tropical Pacific (Fig. 1). The position of this site was estimated to

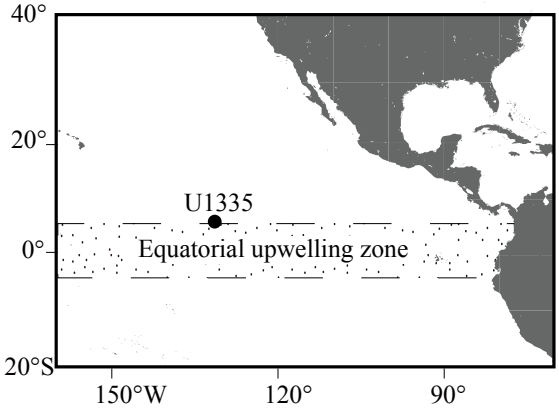


Fig. 1 Location map of IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific.

[1] Faculty of Education, Ibaraki University, Bunkyo 2-1-1, Ibaraki 310-8512, Japan
[*] Corresponding author: S. Kamikuri, Email: shin-ichi.kamikuri.millefeuille@vc.ibaraki.ac.jp

have ranged in latitude from about 0° to 2°N from the early to middle Miocene (Pälike *et al.*, 2010). The lithology from the lower to middle Miocene of this site consists of nannofossil ooze with well-preserved radiolarians (Pälike *et al.*, 2010). A total of 21 sediment samples from U1335A-10H-CC to 31H-CC (106.0 to 337.1 meters composite core depth below seafloor) were examined in this study. The samples were treated with standard methods to isolate radiolarian individuals (Sanfilippo *et al.*, 1985). The sediment samples were treated with H_2O_2 and HCl solution. The residues were sieved with 63 μm, and covered with a 24 × 40 mm cover glass with Norland Optical Adhesive #61 as the mounting medium. The studied interval was divided into four radiolarian biostratigraphic zones from RN5 to RN2 (Pälike *et al.*, 2010).

3. Radiolarian fauna

The aim of this study is to illustrate radiolarians of the early to middle Miocene age collected from IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific. A total 183 morphotypes of radiolarians including 78 spumellarians and 105 nassellarians were encountered (Table 1, Plates 1 to 18). These taxa

Table 1 Explanation of Plates 1 to 18.

Plate no.	Species and species group	Location	Zone	Reference
Pl.01, fig. 1	*Trisolenia combinata* Bjørklund and Goll	13H-2, 104-106 cm, D32/4	RN5	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.01, fig. 2	*Collosphaera macropora* Popofsky	15H-CC, B26/3	RN5	Popofsky, 1917
Pl.01, fig. 3	*Trisolenia* sp. A	15H-CC, K44/0	RN5	
Pl.01, fig. 4	*Siphonosphaera* sp. C	13H-2, 104-106 cm, Z20/0	RN5	
Pl.01, fig. 5	*Collosphaera pyloma* Reynolds	13H-CC, Q23/0	RN5	Reynolds, 1980
Pl.01, fig. 6	*Collosphaera reynoldsi* Kamikuri	10H-CC, H23/1	RN5	Kamikuri, 2010
Pl.01, fig. 7	*Trisolenia megalactis costlowi* Bjørklund and Goll	13H-2, 104-106 cm, Y39/4	RN5	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.01, fig. 8	*Polysolenia spinosa* (Haeckel) group	15H-CC, R37/2	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.01, fig. 9	*Polysolenia murrayana* (Haeckel)	11H-CC, T33/3	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.01, fig. 10	*Polysolenia spinosa* (Haeckel) group	11H-CC, D20/1	RN5	Nigrini and Moore, 1979
Pl.02, fig. 1	*Trisolenia megalactis megalactis* Ehrenberg	17H-CC, W48/4	RN4	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.02, fig. 2	*Trisolenia megalactis megalactis* Ehrenberg	18H-CC, G40/4	RN4	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.02, fig. 3	*Trisolenia megalactis megalactis* Ehrenberg	17H-CC, Y48/1	RN4	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.02, fig. 4	*Siphonosphaera* sp. A	17H-CC, G41/3	RN4	
Pl.02, fig. 5	*Siphonosphaera* sp. A	17H-CC, D22/1	RN4	
Pl.02, fig. 6	*Siphonosphaera* sp. D	18H-CC, R10/1	RN4	
Pl.02, fig. 7	*Siphonosphaera* sp. B	13H-2, 104-106 cm, P39/2	RN5	
Pl.02, fig. 8	*Collosphaera glebulenta* Bjørklund and Goll	19H-CC, V21/1	RN3	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.02, fig. 9	*Collosphaera glebulenta* Bjørklund and Goll	13H-CC, R21/3	RN5	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.02, fig. 10	*Collosphaera* sp. A	15H-CC, E36/3	RN5	
Pl.02, fig. 11	*Collosphaera* sp. A	13H-2, 104-106 cm, Q37/3	RN5	
Pl.02, fig. 12	*Collosphaera* sp. A	13H-CC, J15/4	RN5	
Pl.02, fig. 13	*Collosphaera brattstroemi* Bjørklund and Goll	10H-CC, S38/4	RN5	Bjørklund and Goll, 1979
Pl.03, fig. 1	*Axoprunum bispiculum* (Popofsky)	11H-CC, K20/0	RN5	Takemura, 1992
Pl.03, fig. 2	*Axoprunum bispiculum* (Popofsky)	11H-CC, V12/1	RN5	Takemura, 1992
Pl.03, fig. 3	*Stylosphaera communis* (Carnevale)	23H-CC, D38/0	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1978
Pl.03, fig. 4	*Stylosphaera* sp. B	13H-CC, P35/0	RN5	
Pl.03, fig. 5	*Amphisphaera santaeannae* (Campbell and Clark)	16H-CC, S38/0	RN5	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.03, fig. 6	*Amphistylus polistylus* (Carnevale)	16H-CC, X40/0	RN5	Takemura, 1992
Pl.03, fig. 7	*Amphisphaera neptunus* (Haeckel)	17H-CC, U43/3	RN4	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.03, fig. 8	*Stylosphaera* sp. A	23H-CC, L46/4	RN2	
Pl.03, fig. 9	*Amphistylus angelinus* (Campbell and Clark)	16H-CC, U45/2	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.03, fig. 10	*Stylosphaera* sp. B	13H-CC, F14/1	RN5	
Pl.04, fig. 1	*Actinomma robusta* (Kling)	10H-CC, G38/0	RN5	Morley and Nigrini, 1995
Pl.04, fig. 2	*Actinomma robusta* (Kling)	10H-CC, W20/1	RN5	Morley and Nigrini, 1995
Pl.04, fig. 3	*Thecosphaera* sp. A	11H-CC, O35/0	RN5	
Pl.04, fig. 4	*Actinomma robusta* (Kling)	13H-2, 104-106 cm, E39/4	RN5	Morley and Nigrini, 1995
Pl.04, fig. 5	*Thecosphaera* sp. B	13H-CC, U36/0	RN5	
Pl.04, fig. 6	*Thecosphaera* sp. C	18H-CC, N15/3	RN4	
Pl.04, fig. 7	*Thecosphaera* sp. D	18H-CC, H20/3	RN4	
Pl.04, fig. 8	*Thecosphaera* sp. E	25H-CC, T34/2	RN2	
Pl.04, fig. 9	*Hexacontium* sp. B	20H-CC, U27/3	RN3	
Pl.04, fig. 10	*Hexacontium* cf. *arachnoidale* Hollande and Enjumet	11H-CC, E21/2	RN5	
Pl.04, fig. 11	*Saturnalis circularis* Haeckel	11H-CC, W43/1	RN5	Nishimura and Yamauchi, 1984
Pl.05, fig. 1	*Cenosphaera* sp. A	15H-CC, Q45/4	RN5	
Pl.05, fig. 2	*Heliodiscus* sp. B	15H-CC, X21/1	RN5	
Pl.05, fig. 3	*Hexapyle dodecantha* Haeckel	15H-CC, L15/2	RN5	Haeckel, 1887
Pl.05, fig. 4	*Excentrodiscus* sp. A	15H-CC, R12/0	RN5	
Pl.05, fig. 5	*Cenosphaera* sp. B	15H-CC, E12/0	RN5	
Pl.05, fig. 6	*Heliodiscus* sp. A	16H-CC, C46/0	RN5	
Pl.05, fig. 7	*Thecosphaera* sp. E	15H-CC, N37/0	RN5	
Pl.05, fig. 8	*Hexacontium* sp. C	15H-CC, V37/3	RN5	
Pl.05, fig. 9	*Axoprunum* sp. A	15H-CC, Q45/4	RN5	
Pl.05, fig. 10	*Didymocyrtis violina* (Haeckel)	18H-CC, P33/2	RN4	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.05, fig. 11	*Didymocyrtis tubaria* (Haeckel)	17H-CC, T46/4	RN4	Sanfilippo *et al.*, 1985

Table 1 Continued.

Plate no.	Species and species group	Location	Zone	Reference
Pl.05, fig. 12	*Didymocyrtis mammifera* (Haeckel)	15H-CC, X21/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.05, fig. 13	*Spongurus cylindricus* Haeckel	15H-CC, Y39/3	RN5	Takahashi, 1991
Pl.06, fig. 1	*Cladococcus* sp. A	16H-CC, L44/2	RN5	
Pl.06, fig. 2	*Hexacontium pachydermum* Jørgensen	13H-CC, Y40/1	RN5	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.06, fig. 3	*Hexaloncheˆ* sp. A	21H-CC, S23/3	RN3	
Pl.06, fig. 4	*Didymocyrtis prismatica* (Haeckel)	25H-CC, D11/2	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 5	*Didymocyrtis prismatica* (Haeckel)	23H-CC, O31/0	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 6	*Didymocyrtis tubaria* (Haeckel)	16H-CC, G16/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 7	*Didymocyrtis tubaria* (Haeckel)	16H-CC, K41/2	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 8	*Didymocyrtis laticonus* (Riedel)	10H-CC, L30/2	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 9	*Didymocyrtis mammifera* (Haeckel)	13H-2, 104-106 cm, D23/1	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 10	*Didymocyrtis bassanii* (Carnevale)	25H-CC, Y43/0	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 11	*Cladococcus dentata* (Mast)	17H-CC, O45/1	RN4	Nigrini and Moore, 1979
Pl.06, fig. 12	*Didymocyrtis bassanii* (Carnevale)	13H-CC, V12/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.06, fig. 13	*Didymocyrtis bassanii* (Carnevale)	18H-CC, Q37/0	RN4	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.07, fig. 1	*Larcopyle hayesi* (Chen) group	15H-CC, U42/3	RN5	Lazarus *et al.*, 2005
Pl.07, fig. 2	*Larcopyle hayesi* (Chen) group	13H-2, 104-106 cm, Z24/0	RN5	Lazarus *et al.*, 2005
Pl.07, fig. 3	*Larcopyle hayesi* (Chen) group	19H-CC, W15/2	RN3	Lazarus *et al.*, 2005
Pl.07, fig. 4	*Larcopyle hayesi* (Chen) group	23H-CC, C26/0	RN2	Lazarus *et al.*, 2005
Pl.07, fig. 5	*Larcopyle* sp. C	13H-2, 104-106 cm, M39/0	RN5	
Pl.07, fig. 6	*Lithelius* sp. A	12H-4, 104-106 cm, X27/2	RN5	
Pl.07, fig. 7	*Larcopyle polyacantha* (Campbell and Clark)	23H-CC, N37/0	RN3	Motoyama, 1996
Pl.07, fig. 8	*Larcopyle* sp. B	17H-CC, S14/3	RN4	
Pl.07, fig. 9	*Lithelius* sp. A	16H-CC, K31/1	RN5	
Pl.07, fig. 10	*Lithelius* sp. A	15H-CC, Q43/3	RN5	
Pl.07, fig. 11	*Lithelius* sp. A	23H-CC, N37/1	RN2	
Pl.07, fig. 12	*Lithelius* sp. C	25H-CC, J36/2	RN2	
Pl.07, fig. 13	*Larcopyle* sp. A	10H-CC, F22/2	RN5	
Pl.07, fig. 14	*Larcopyle* sp. A	15H-CC, X33/4	RN5	
Pl.07, fig. 15	*Larcopyle* sp. A	15H-CC, J12/0	RN5	
Pl.07, fig. 16	*Larcopyle titan* (Campbell and Clark)	15H-CC, F40/0	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.07, fig. 17	*Actinomma* sp. B	17H-CC, M44/2	RN4	
Pl.07, fig. 18	*Larcospira moschkowskii* Kruglikova	10H-CC, V23/0	RN4	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.08, fig. 1	*Stylodictya* sp. A	15H-CC, R43/2	RN4	
Pl.08, fig. 2	*Stylodictya* sp. A	11H-CC, C14/4	RN4	
Pl.08, fig. 3	*Stylodictya* sp. A	25H-CC, R36/0	RN2	
Pl.08, fig. 4	*Spongurus cylindricus* Haeckel	17H-CC, J16/0	RN4	Takahashi, 1991
Pl.08, fig. 5	*Stylodictya camerina* Campbell and Clark	14H-2, 105-107 cm, N10/2	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.08, fig. 6	*Stylodictya camerina* Campbell and Clark	25H-CC, T36/2	RN2	Campbell and Clark, 1944
Pl.08, fig. 7	*Stylodictya* sp. B	15H-CC, U34/1	RN5	
Pl.08, fig. 8	*Stylodictya camerina* Campbell and Clark	15H-CC, Y32/3	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.08, fig. 9	*Amphymenium amphistylium* Haeckel	11H-CC, D27/1	RN5	Morley and Nigrini, 1995
Pl.08, fig. 10	*Stylodictya* sp. C	25H-CC, P30/3	RN2	
Pl.08, fig. 11	*Porodiscus circularis* Clark and Campbell	10H-CC, J36/1	RN5	Clark and Campbell, 1942
Pl.08, fig. 12	*Porodiscus* sp. A	15H-CC, Z39/1	RN5	
Pl.08, fig. 13	*Heliodiscus* sp. A	16H-CC, F38/2	RN5	
Pl.08, fig. 14	*Phacodiscus* sp. A	11H-CC, T19/3	RN5	
Pl.08, fig. 15	*Dictyocoryne* sp. B	16H-CC, V34/0	RN5	
Pl.09, fig. 1	*Spongasteriscus marylandicus* Martin	25H-CC, D28/0	RN2	Palmer, 1986
Pl.09, fig. 2	*Heliodiscus* sp. C	17H-CC, E31/0	RN4	
Pl.09, fig. 3	*Tetrapyle* sp. A	10H-CC, D40/0	RN5	
Pl.09, fig. 4	*Tetrapyle* sp. A	17H-CC, G37/1	RN4	
Pl.09, fig. 5	*Dictyocoryne malagaense* (Campbell and Clark)	10H-CC, G46/3	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.09, fig. 6	*Spongaster* sp. A	13H-CC, J30/1	RN5	
Pl.09, fig. 7	*Dictyocoryne* sp. A	18H-CC, U32/0	RN4	
Pl.09, fig. 8	*Spongopyle osculosa* Dreyer	17H-CC, H46/4	RN4	Nigrini and Moore, 1979
Pl.09, fig. 9	*Spongodiscus resurgens* Ehrenberg	17H-CC, Q31/4	RN4	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.09, fig. 10	*Spongodiscus resurgens* Ehrenberg	23H-CC, O44/4	RN2	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.09, fig. 11	*Spongodiscus resurgens* Ehrenberg	23H-CC, O43/4	RN2	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.09, fig. 12	*Spongodiscus resurgens* Ehrenberg	17H-CC, R29/2	RN4	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.09, fig. 13	*Excentrococcus annulatus* Dumitrica	16H-CC, H13/4	RN5	Dumitrica, 1978
Pl.09, fig. 14	*Spongodiscus* sp. B	16H-CC, C29/3	RN5	
Pl.09, fig. 15	*Spongodiscus* sp. C	15H-CC, N21/3	RN5	
Pl.09, fig. 16	*Spongodiscus klingi* Caulet	25H-CC, J34/2	RN2	Caulet, 1986
Pl.10, fig. 1	*Cyrtocapsella tetrapera* Haeckel	10H-CC, U23/0	RN5	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 2	*Cyrtocapsella tetrapera* Haeckel	12H-4, 104-106 cm, W44/1	RN5	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 3	*Cyrtocapsella japonica* (Nakaseko)	17H-CC, X10/1	RN4	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 4	*Cyrtocapsella japonica* (Nakaseko)	19H-CC, S42/4	RN3	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 5	*Cyrtocapsella cornuta* Haeckel	12H-4, 104-106 cm, V18/0	RN5	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 6	*Cyrtocapsella cornuta* Haeckel	10H-CC, Y15/2	RN5	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 7	*Lithopera baueri* Sanfilippo and Riedel	13H-2, 104-106 cm, X30/4	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.10, fig. 8	*Stichocorys delmontensis* (Campbell and Clark)	13H-CC, T33/1	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.10, fig. 9	*Lithopera renzae* Sanfilippo and Riedel	15H-CC, L37/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.10, fig. 10	*Stichocorys wolffii* Haeckel	21H-CC, R41/1	RN3	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.10, fig. 11	*Lithopera thornburgi* Sanfilippo and Riedel	10H-CC, U43/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985

Table 1 Continued.

Plate no.	Species and species group	Location	Zone	Reference
Pl.10, fig. 12	*Eucyrtidium* sp. A	23H-CC, D38/0	RN2	
Pl.10, fig. 13	*Stichocorys armata* (Haeckel)	19H-CC, L40/3	RN3	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.10, fig. 14	*Phormocyrtis alexandrae* O'Connor	25H-CC, Z39/1	RN2	O'Connor, 1997b
Pl.10, fig. 15	*Eucyrtidium* sp. C	17H-CC, N12/3	RN4	
Pl.10, fig. 16	*Eucyrtidium cienkowskii* Haeckel	10H-CC, V9/3	RN5	Sakai, 1980
Pl.10, fig. 17	*Stichocorys diaphanes* (Sanfilippo and Riedel)	27H-CC, C46/1	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.11, fig. 1	*Carpocanium cingulatum* (Riedel and Sanfilippo)	18H-CC, T15/0	RN4	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 2	*Carpocanium bramlettei* (Riedel and Sanfilippo)	15H-CC, E44/1	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 3	*Carpocanium bramlettei* (Riedel and Sanfilippo)	10H-CC, Z44/1	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 4	*Carpacanium* sp. B	23H-CC, T42/0	RN2	
Pl.11, fig. 5	*Carpacanium kinugasense* Nishimura	10H-CC, S34/1	RN5	Nishimura, 1990
Pl.11, fig. 6	*Carpacanium kinugasense* Nishimura	25H-CC, G44/1	RN2	Nishimura, 1990
Pl.11, fig. 7	*Siphocampe* sp. D	17H-CC, K18/3	RN4	
Pl.11, fig. 8	*Siphocampe grantmackiei* O'Connor	15H-CC, L24/0	RN5	O'Connor, 1997b
Pl.11, fig. 9	*Botryostrobus* sp. B	10H-CC, M43/0	RN5	
Pl.11, fig. 10	*Botryostrobus aquilonaris* (Bailey)	15H-CC, W38/2	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 11	*Spirocyrtis subtilis* Petrushevskaya	12H-4, 104-106 cm, D39/2	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 12	*Siphostichartus corona* (Haeckel)	10H-CC, E20/3	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 13	*Botryostrobus* sp. A	15H-CC, L37/0	RN5	
Pl.11, fig. 14	*Theocamptra ovata* (Haeckel)	16H-CC, Z42/0	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 15	*Siphocampe* sp. B	13H-CC, V36/0	RN5	
Pl.11, fig. 16	*Siphocampe* sp. B	15H-CC, T38/1	RN5	
Pl.11, fig. 17	*Phormostichoartus fistula* Nigrini	15H-CC, M34/0	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 18	*Phormostichoartus fistula* Nigrini	11H-CC, K40/0	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.11, fig. 19	*Lithocampana* sp. A	17H-CC, X10/1	RN4	
Pl.11, fig. 20	*Lithocampana* sp. B	17H-CC, Y42/1	RN4	
Pl.11, fig. 21	*Cycladophora conica* Lombari and Lazarus	25H-CC, F36/4	RN2	Lombari and Lazarus, 1988
Pl.12, fig. 1	*Calocycletta caepa* Moore	16H-CC, N38/4	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.12, fig. 2	*Calocycletta virginis* (Haeckel)	17H-CC, T42/1	RN4	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.12, fig. 3	*Calocycletta serrata* Moore	30H-CC, S38/0	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.12, fig. 4	*Calocycletta costata* (Riedel)	14H-CC, V39/4	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.12, fig. 5	*Calocycletta robusta* Moore	31H-CC, X43/4	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.12, fig. 6	*Albatrossidium minzok* Sanfilippo and Riedel	10H-CC, J23/3	RN5	Sanfilippo and Riedel, 1992
Pl.12, fig. 7	*Anthocyrtidium* sp. A	25H-CC, Y37/3	RN2	
Pl.12, fig. 8	*Anthocyrtidium* sp. B	25H-CC, T46/1	RN2	
Pl.12, fig. 9	*Cyrtolagena* sp. A	19H-CC, M26/4	RN3	
Pl.13, fig. 1	*Lophocyrtis tanythorax* (Sanfilippo and Riedel)	13H-2, 104-106 cm, W25/4	RN5	Sanfilippo and Riedel, 1970
Pl.13, fig. 2	*Lophocyrtis tanythorax* (Sanfilippo and Riedel)	15H-CC, S38/4	RN5	Sanfilippo and Riedel, 1970
Pl.13, fig. 3	*Cinclopyramis pacifica* (Nakaseko)	18H-CC, N12/4	RN4	Nakaseko, 1963
Pl.13, fig. 4	*Cinclopyramis woodringi* (Campbell and Clark)	17H-CC, T16/0	RN4	Campbell and Clark, 1944
Pl.13, fig. 5	*Lophocyrtis* sp. A	25H-CC, Y43/4	RN2	
Pl.13, fig. 6	*Calocyclura* sp. A	12H-4, 104-106 cm, Y24/4	RN5	
Pl.14, fig. 1	*Lamprocyclas maritalis* Haeckel	11H-CC, M20/0	RN5	Nigrini and Moore, 1979
Pl.14, fig. 2	*Lophocyrtis aspera* (Ehrenberg)	25H-CC, S29/3	RN2	Sanfilippo and Caulet, 1998
Pl.14, fig. 3	*Theocorys spongoconus* Kling	27H-CC, C28/0	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.14, fig. 4	*Lamprocyclas* sp. B	27H-CC, H49/3	RN2	
Pl.14, fig. 5	*Theocorys* sp. A	17H-CC, J22/0	RN4	
Pl.14, fig. 6	*Clathrocanium atreta* Sanfilippo and Riedel	25H-CC, C45/1	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1973
Pl.14, fig. 7	*Lithomelissa* sp. A	11H-CC, D22/0	RN5	
Pl.14, fig. 8	*Lithomelissa* sp. A	12H-4, 104-106 cm, M39/0	RN5	
Pl.14, fig. 9	*Lophophaena* sp. A	11H-CC, G19/0	RN5	
Pl.14, fig. 10	*Ceratocyrtis* sp. A	12H-4, 104-106 cm, K44/1	RN5	
Pl.14, fig. 11	*Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. A	16H-CC, U9/3	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.14, fig. 12	*Lipmanella conica* Petrushevskaya	25H-CC, T28/3	RN2	Petrushevskaya and Kozlova, 1979
Pl.14, fig. 13	*Lophophaena tekopua* O'Connor	12H-4, 104-106 cm, X36/2	RN5	O'Connor, 1997a
Pl.14, fig. 14	*Lophophaena tekopua* O'Connor	25H-CC, L40/4	RN2	O'Connor, 1997a
Pl.14, fig. 15	*Clathrocanium coarctatum* Ehrenberg	16H-CC, Z40/0	RN5	Takahashi, 1991
Pl.15, fig. 1	*Pterocanium audax* (Riedel)	14H-2, 105-107 cm, G17/3	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.15, fig. 2	*Pterocanium audax* (Riedel)	23H=CC, J20/1	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.15, fig. 3	*Lychnocanoma elongata* (Vinassa de Regny)	25H-CC, W33/4	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.15, fig. 4	*Pterocanium* aff. *tridentatum* (Ehrenberg)	13H-2, 104-106 cm, L15/0	RN5	
Pl.15, fig. 5	*Pterocanium charybdeum* (Müller)	16H-CC, J43/0	RN5	Lazarus *et al.*, 1985
Pl.15, fig. 6	*Pterocanium* sp. A	10H-CC, E43/3	RN5	
Pl.16, fig. 1	*Lychnocanoma* sp. A	23H-CC, P42/2	RN2	
Pl.16, fig. 2	*Lychnocanoma* sp. A	23H-CC, E29/2	RN2	
Pl.16, fig. 3	*Lychnocanoma* sp. A	27H-CC, H41/1	RN2	
Pl.16, fig. 4	*Lychnocanoma nodosum* (Haeckel)	21H-CC, S28/4	RN3	Haeckel, 1887
Pl.16, fig. 5	*Lychnocanoma nodosum* (Haeckel)	18H-CC, U41/3	RN4	Haeckel, 1887
Pl.16, fig. 6	*Dictyophimus splendens* (Campbell and Clark)	11H-CC, W43/1	RN5	Morley and Nigrini, 1995
Pl.16, fig. 7	*Dictyophimus* sp. A	17H-CC, D12/0	RN4	
Pl.16, fig. 8	*Valkyria pukapuka* O'Connor	15H-CC, W44/1	RN5	O'Connor, 1997a
Pl.16, fig. 9	*Valkyria pukapuka* O'Connor	13H-CC, D41/2	RN5	O'Connor, 1997a
Pl.17, fig. 1	*Dorcadospyris dentata* Haeckel	18H-CC, U11/0	RN4	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.17, fig. 2	*Dorcadospyris alata* (Riedel)	16H-3, 149-151 cm, D44/0	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.17, fig. 3	*Dorcadospyris ateuchus* (Ehrenberg)	27H-CC, O46/1	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985

Table 1 Continued.

Plate no.	Species and species group	Location	Zone	Reference
Pl.17, fig. 4	*Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. B	15H-CC, V38/2	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.17, fig. 5	*Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. B	16H-CC, U27/4	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.17, fig. 6	*Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. B	15H-CC, V36/3	RN5	Campbell and Clark, 1944
Pl.17, fig. 7	*Cornutella trochus* Ehrenberg	15H-CC, N37/0	RN5	Ehrenberg, 1873
Pl.18, fig. 1	*Tympanomma binoctonum* (Haeckel)	25H-CC, G43/3	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 2	*Tympanomma binoctonum* (Haeckel)	18H-CC, N15/0	RN4	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 3	*Tholospyris anthophora* (Haeckel)	19H-CC, E42/3	RN3	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 4	*Tholospyris anthophora* (Haeckel)	17H-CC, T13/2	RN4	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 5	*Dendrospyris pannosa* Goll	23H-CC, O44/4	RN2	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.18, fig. 6	*Tholospyris mammillaris* (Haeckel)	19H-CC, J49/3	RN3	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 7	*Tholospyris kantiana* (Haeckel)	10H-CC, K45/2	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 8	*Tympanomma tuberosum* (Haeckel)	17H-CC, V14/1	RN4	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.18, fig. 9	*Liriospyris mutuaria* Goll	25H-CC, D29/0	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 10	*Liriospyris* sp. A	25H-CC, C43/4	RN2	
Pl.18, fig. 11	*Dendrospyris* sp. A	10H-CC, Q40/4	RN5	
Pl.18, fig. 12	*Eucoronis octopylus* (Haeckel)	14H-CC, X37/4	RN5	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.18, fig. 13	*Eucoronis perspicillum* Haeckel	16H-CC, V22/3	RN5	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.18, fig. 14	*Eucoronis perspicillum* Haeckel	16H-CC, P45/0	RN5	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.18, fig. 15	*Acanthodesmia circumflexa* (Goll)	25H-CC, C45/1	RN2	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 16	*Acanthodesmia* sp. A	25H-CC, X36/0	RN2	
Pl.18, fig. 17	*Acanthodesmia* sp. B	13H-2, 104-106 cm, Q30/0	RN5	
Pl.18, fig. 18	*Dendrospyris pododendros* (Carnevale)	13H-CC, C46/3	RN5	Petrushevskaya and Kozlova, 1972
Pl.18, fig. 19	*Giraffospyris annulispina* Goll	18H-CC, U11/0	RN4	Goll, 1969
Pl.18, fig. 20	*Eucoronis toxarium* (Haeckel)	14H-CC, D16/2	RN5	Goll, 1969
Pl.18, fig. 21	*Phormospyris stabilis* (Goll)	11H-CC, C11/4	RN5	Nigrini and Lombari, 1984
Pl.18, fig. 22	*Phormospyris* sp. B	13H-CC, D41/0	RN5	
Pl.18, fig. 23	*Liriospyris parkerae* Riedel and Sanfilippo	17H-CC, Q31/0	RN4	Riedel and Sanfilippo, 1978
Pl.18, fig. 24	*Liriospyris stauropora* (Haeckel)	17H-CC, J16/0	RN4	Riedel and Sanfilippo, 1978
Pl.18, fig. 25	*Zygocircus* sp.	15H-CC, Z39/1	RN5	
Pl.18, fig. 26	*Zygocircus* sp.	15H-CC, S37/0	RN5	
Pl.18, fig. 27	*Botryocyrtis* sp. A	23H-CC, D38/3	RN2	
Pl.18, fig. 28	*Centrobotrys thermophila* Petrushevskaya	28H-CC, S45/2	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.18, fig. 29	*Centrobotrys petrushevskayae* Sanfilippo and Riedel	28H-CC, S45/2	RN2	Sanfilippo *et al.*, 1985
Pl.18, fig. 30	*Acrobotrys disolenia* Haeckel	25H-CC, G44/3	RN2	Haeckel, 1887

include 70 unidentified forms, particularly within the families Actinommidae, Collosphaeridae, Hexalonchidae, Litheliidae, Pyloniidae, Spongodiscidae and Stylodictyidae. Some of these taxa will be described as new species in the near future. The radiolarian assemblages included at least 68 tropical-subtropical taxa (e.g. *Acanthodesmia circumflexa*, *Calocycletta caepa*, *Calocycletta robusta*, *Carpocanium cingulatum*, *Centrobotrys petrushevskayae*, *Collosphaera brattstroemi*, *Dendrospyris pannosa*, *Didymocyrtis laticonus*, *Didymocyrtis tubaria*, *Dorcadospyris alata*, *Eucoronis octopylus*, *Hexapyle dodecantha*, *Liriospyris parkerae*, *Lithopera thornburgi*, *Lophocyrtis tanythorax*, *Lychnocanoma elongata*, *Polysolenia spinosa*, *Pterocanium audax*, *Stichocorys armata*, *Stichocorys wolffii*, *Tholospyris anthophora*, *Trisolenia megalactis costlowi*) and 31 cosmopolitan taxa (e.g. *Actinomma robusta*, *Amphisphaera neptunus*, *Amphymenium amphistylium*, *Axoprunum bispiculum*, *Botryostrobus aquilonaris*, *Cinclopyramis pacifica*, *Cladococcus dentata*, *Cycladophora conica*, *Cyrtocapsella japonica*, *Dictyophimus splendens*, *Lamprocyclas margatensis*, *Larcopyle polyacantha*, *Lipmanella conica*, *Lophocyrtis aspera*, *Stylodictya camerina*, *Theocamptra ovata*).

Acknowledgement

The author is grateful to Dr. Isao Motoyama for reviewing the manuscript, and to Dr. Noritoshi Suzuki and Dr. Kaoru Ogane for useful discussions concerning taxonomic problems. Samples were provided by the Integrated Ocean Drilling Program (IODP). This work was also supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Number 15K17780 (S. Kamikuri).

References

Bjørklund, K. R. and Goll, R. M. (1979) Internal skeletal structures of Collosphaera and Trisolenia: a case of repetitive evolution in the Collosphaeridae (Radiolaria). *Jour. Paleontol.*, **53**, 1293–1326.

Campbell, A. S. and Clark, B. L. (1944) Miocene radiolarian faunas from southern California. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, no. 51, 1–76.

Caulet, J. P. (1986) Radiolarians from the southwest Pacific. *In* Kennett, J. P., von der Borch, C. C. *et al.*, eds., *Init. Repts. DSDP*, **90**, Washington (U.S. Government Printing Office), 835–861.

Chavez, F. P. and Barber, R. T. (1987) An estimate of new production in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Res. Pt. A*, **34**, 1229–1243.

Clark, B. L. and Campbell, A. S. (1942) Eocene radiolarian faunas from the Mt. Diablo area, California. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, no. 39, 1–112.

Dumitrica, P. (1978) Badenian Radiolaria from Central Paratethys. *In* Brestenska, E., ed., *Chronostratigraphie und Neostratotypen Miozän der Zentralen Paratethys*,

6, VEDA, Bratislava, 231–261.
Ehrenberg, C. G. (1873) Grössere Felsproben des Polycystinen-Mergels von Barbados mit weiteren Erläuterungen. *K. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Monatsberichte*, 1873, 213–263.
Fiedler, P. C. and Talley, L. D. (2006) Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. P*rogress in Oceanography*, **69**, 143–180.
Goll, R. M. (1969) Classification and phylogeny of Cenozoic Trissocyclidae (Radiolaria) in the Pacific and Caribbean basins, Part II. *Jour. Paleontol*., **43**, 322–339.
Haeckel, E. (1887) Report on the Radiolaria collected by H.M.S. Challenger during the years 1873–1876. *Rep. Sci. Results Voy. H.M.S. Challenger, 1873–1876, Zool*., **18**, 1–1803.
Haslett, S. and Funnell, B. M. (1996) Sea-surface temperature variation and palaeo-upwelling throughout the Plio-Pleistocene Olduvai subchron of the eastern equatorial Pacific: an analysis of radiolarian data from ODP sites 677, 847, 850 and 851. *In* Moguilevsky, A., Whatley, R., eds, *Microfossils and oceanic environments*, University of Wales, Aberystwyth-Press, Aberystwyth, United Kingdom, 155–164.
Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Revue de Micropaléontologie*, **53**, 85–106.
Kamikuri, S., Motoyama, I., Nishi, H. and Iwai, M. (2009) Evolution of Eastern Pacific Warm Pool and upwelling processes since the middle Miocene based on analysis of radiolarian assemblages: Response to Indonesian and Central American Seaways. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **280**, 469–479.
Keller, G. and Barron, J. A. (1983) Paleoceanographic implications of Miocene deep-sea hiatuses. *Geol. Soc. Amer., Bull*. **94**, 590–613.
Kessler, W. (2006) The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**, 181–217.
Lazarus, D., Scherer, R. P. and Prothero, D. R. (1985) Evolution of the radiolarian species-complex Pterocanium: a preliminary survey. *Jour. Paleontol*., **59**, 183–220.
Lazarus, D., Faust, K. and Popova-Goll, I. (2005) New species of prunoid radiolarians from the Antarctic Neogene. *Jour. Micropalaeontol*., **24**, 97–121.
Lombari, G. and Lazarus, D. B. (1988) Neogene cycladophorid radiolarians from North Atlantic, Antarctic, and North Pacific deep-sea sediments. *Micropaleontology*, **34**, 97–135.
Molina-Cruz, A. (1977) Radiolarian assemblages and their relationship to the oceanography of the subtropical S. E. Pacific. *Marine Micropaleontol.*, **2**, 315–352.
Moore, T. C. Jr., Hutson, W. H., Kipp, N., Hays, J. D., Prell, W., Thompson, P. and Boden, G. (1981) The biological record of the ice-age ocean. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **35**, 357–370.
Morley, J. J. and Nigrini, C. (1995) Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific Sites 881, 884, 885, 886 and 887. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., Scholl, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. ODP, Sci. Res*., **145**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 55–91.
Motoyama, I. (1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221–262.
Nakaseko, K. (1963) Neogene Cyrtoidea (Radiolaria) from the Isozaki Formation in Ibaraki Prefecture, Japan. *Sci. Rep., Osaka Univ., Gen. Stud*., **12**, 165–198.
Nigrini C. and Lombari, G. (1984) A guide to Miocene Radiolaria. Cushman Found. Foram. *Res., Spec. Pub*., no. 22, S1-S102, N1-N206.
Nigrini, C. and Moore, T. C., Jr. (1979) A guide to modern Radiolaria. Cushman Found. Foram. *Res., Spec. Pub.*, no. 16, S1-S142, N1-N106.
Nishimura, A. and Yamauchi, M. (1984) Radiolarians from the Nankai Trough in the Northwest Pacific. *News Osaka Micropaleontol., Spec. Vol*., no. 6, 1–148.
Nishimura, H. (1990) Taxonomic study on Cenozoic Nassellaria (Radiolaria). *Sci. Rep. Inst. Geosc. Univ. Tsukuba, Sect. B, Geol. Sci.*, **11**, 69–172.
O'Connor, B. (1997a) New radiolarian from the Oligocene and early Miocene of Northland, New Zealand. *Micropaleontology*, **43**, 63–100.
O'Connor, B. (1997b) Lower Miocene Radiolaria from Te Koputa Point, Kaipara Harbour, New Zealand. *Micropaleontology*, **43**, 101–128.
Palmer, A. A. (1986) Miocene radiolarian biostratigraphy, U.S. mid-Atlantic Coastal Plain. *Micropaleontology*, **32**, 19–31.
Pennington, J. T., Mahoney, K. L., Kuwahara, V. S., Kolber, D. D., Calienes, R., Chavez, F. P. (2006) Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**, 285–317.
Petrushevskaya, M. G. and Kozlova, G. E. (1972) Radiolaria, Leg 14, Deep Sea Drilling Project. *In* Hayes, D. E., Pimm, A. C., *et al.*, *Init. Repts. DSDP*, **14**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 495–648.
Petrushevskaya, M. G. and Kozlova, G. E. (1979) Opisanie rodov i vidov radiolyarii. *Issledovaniya Fauny Morei*, **23**, 86–157.
Popofsky, A. (1917) Die Collosphaeriden der Deutschen Sudpolar-Expedition 1901–1903. Mit Nachtrag zu den Spumellarien und Nassellarien. *Deutsche Sudpolar-Expedition 1901–1903, Zoologie II*, **16**, 235–278.
Pälike, H., Nishi, H., Lyle, M., Raffi, I., Gamage, K., Klaus, A. and the Expedition 320/321 Scientists (2010) Expedition 320/321 summary. *In* Pälike, H., Lyle, M., Nishi, H., Raffi, I., Gamage, K., Klaus, A. and the Expedition 320/321 Scientists, *Proc. Integrated Ocean Drilling Program 320/321*, Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International,

Inc.), 1–141.
Pälike, H., Nishi, H., Lyle, M. and the Expedition 320/321 Scientists (2012) A Cenozoic record of the equatorial Pacific carbonate compensation depth. *Nature*, **488**, 609–614.
Reynolds R. A. (1980) Radiolarians from the western North Pacific, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. *In* Scientific Party, *Init. Repts. DSDP*, **56/57**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 735–769.
Riedel, W. R. and Sanfilippo, A. (1978) Stratigraphy and evolution of tropical Cenozoic radiolarians. *Micropaleontology*, **24**, 61–96.
Sakai, T. (1980) Radiolarians from Sites 434, 435, and 436, Northwest Pacific, Leg 56, Deep Sea Drilling Project. *In* Scientific Party, *Init. Repts. DSDP*, **56/57**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 695–733.
Sanfilippo, A. and Caulet, J. -P. (1998) Taxonomy and evolution of Paleogene Antarctic and tropical Lophocyrtid radiolarians. *Micropaleontology*, **44**, 1–43.
Sanfilippo, A. and Riedel, W. R. (1970) Post-Eocene "closed" theoperid radiolarians. *Micropaleontology*, **16**, 446–462.
Sanfilippo, A. and Riedel, W. R. (1992) The origin and evolution of Pterocorythidae (Radiolaria): A Cenozoic phylogenetic study. *Micropaleontology*, **38**, 1–36.
Sanfilippo, A., Burckle, L. H., Martini, E. and Riedel, W. R. (1973) Radiolarians, diatoms, silicoflagellates and calcareous nannofossils in the Mediterranean Neogene. *Micropaleontology*, **19**, 209–234.
Sanfilippo, A., Caulet, J.- P. and Riedel, W. R. (1978) Radiolaria from Mediterranean sediments, DSDP Leg 42A. *In* Hsu, K. J., Montadert, L., *et al.*, *Init. Repts. DSDP*, **42A**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 753–760.
Sanfilippo, A., Westberg-Smith, M. J. and Riedel, W. R. (1985) Cenozoic radiolaria. *In* Bolli, H. M., Saunders, J. B. and Perch-Nielsen, K., eds., *Plankton Stratigraphy*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 631–712.
Takahashi, K. (1991) Radiolaria: flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic. *Ocean Biocoenosis Serie*s, Woods Hole Oceanographic Institution, 1–303.
Takemura, A. (1992) Radiolarian Paleogene biostratigraphy in the Southern Indian Ocean, Leg 120. *In* Wise, S. W., Jr., Schlich, R., *et al.*, *Proc. ODP, Sci. Res*., **120**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 735–756.
Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K. (2001) Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**, 686–693.

Recieved December 19, 2017
Accepted September 18, 2018
Published on-line January 18, 2019

東赤道太平洋における統合国際深海掘削計画 (IODP) U1335 地点の下部および中部中新統から産出した放散虫群集

上栗伸一

要　旨

東赤道太平洋における統合国際深海掘削計画 (IODP) U1335地点の下部および中部中新統から, 78種のSpumellaria亜目および105種のNassellaria亜目を含む合計183種の放散虫化石が産出した. その写真を18枚のプレートに示した. これらの分類群にはActinommidae科, Collosphaeridae科, Hexalonchidae科, Litheliidae科, Pyloniidae科, Spongodiscidae科およびStylodictyidae科 を含む70の未同定種が含まれており, この中のいくつかは新種である可能性がある.

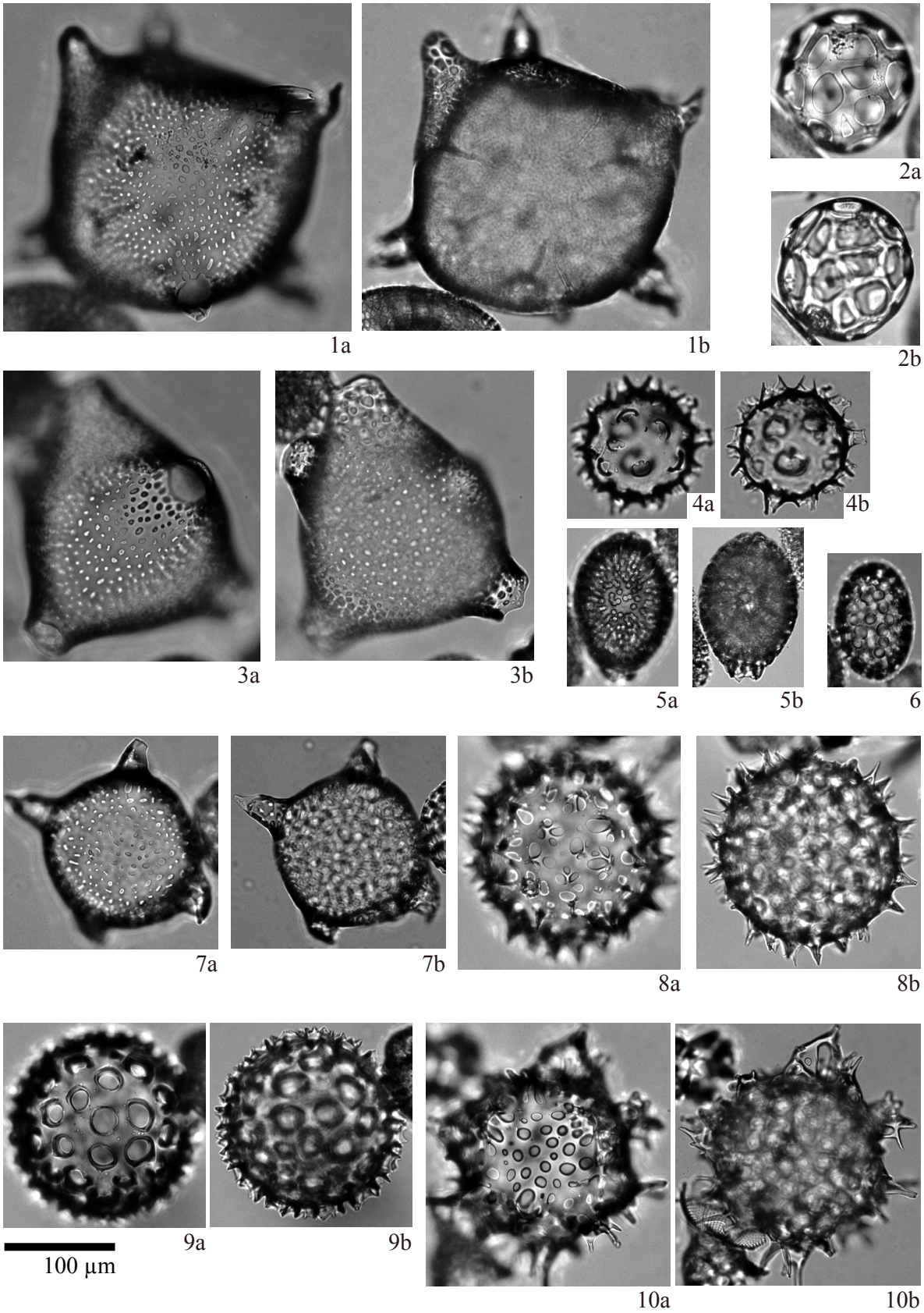


Plate 1 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Trisolenia combinata* Bjørklund and Goll; 2: *Collosphaera macropora* Popofsky; 3: *Trisolenia* sp. A; 4: *Siphonosphaera* sp. C; 5: *Collosphaera pyloma* Reynolds; 6: *Collosphaera reynoldsi* Kamikuri; 7: *Trisolenia megalactis costlowi* Bjørklund and Goll; 8, 10: *Polysolenia spinosa* (Haeckel) group; 9: *Polysolenia murrayana* (Haeckel).

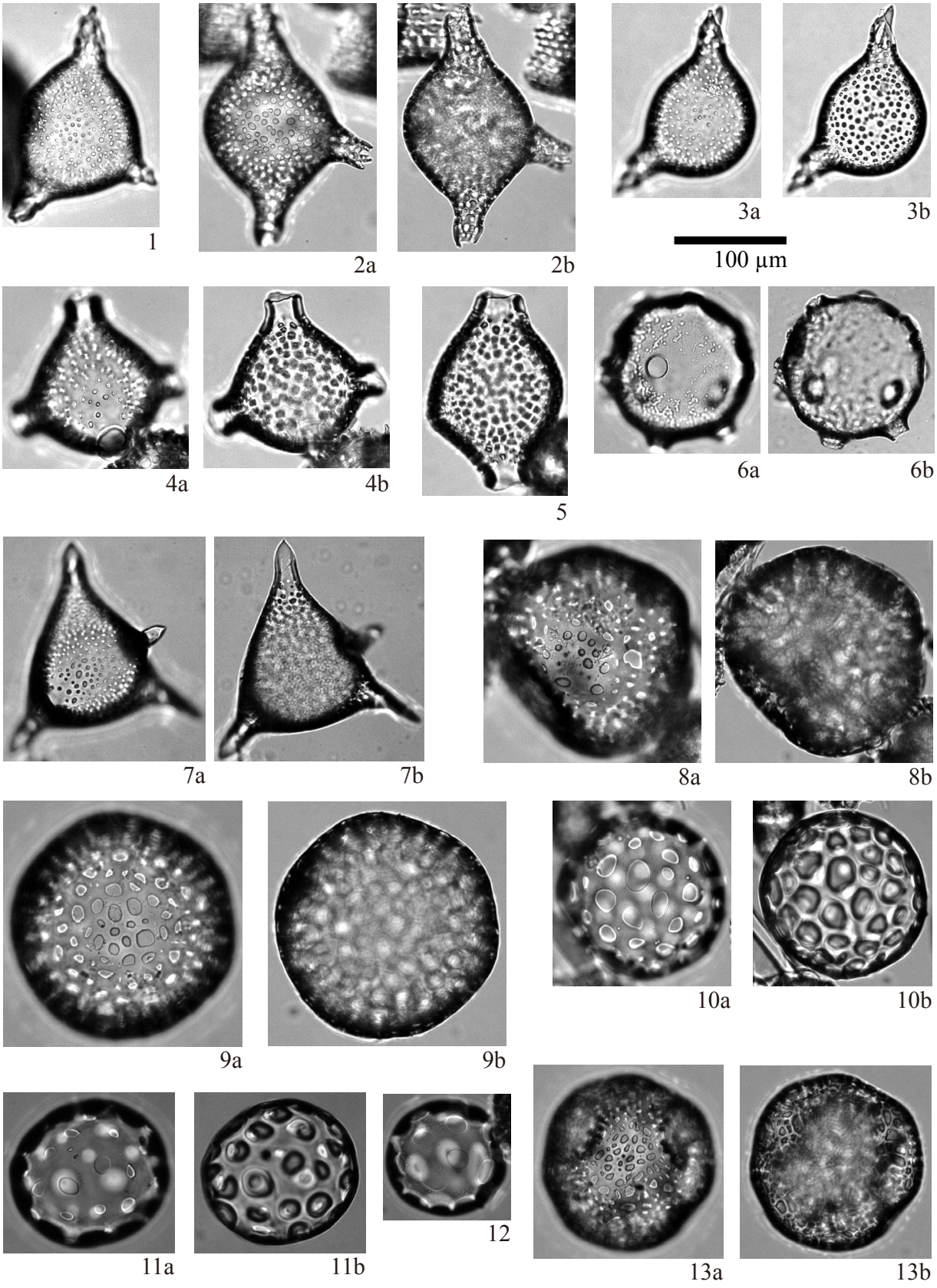


Plate 2 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–3: *Trisolenia megalactis megalactis* Ehrenberg; 4, 5: *Siphonosphaera* sp. A; 6: *Siphonosphaera* sp. D; 7: *Siphonosphaera* sp. B; 8, 9: *Collosphaera glebulenta* Bjørklund and Goll; 10–12: *Collosphaera* sp. A; 13: *Collosphaera brattstroemi* Bjørklund and Goll.

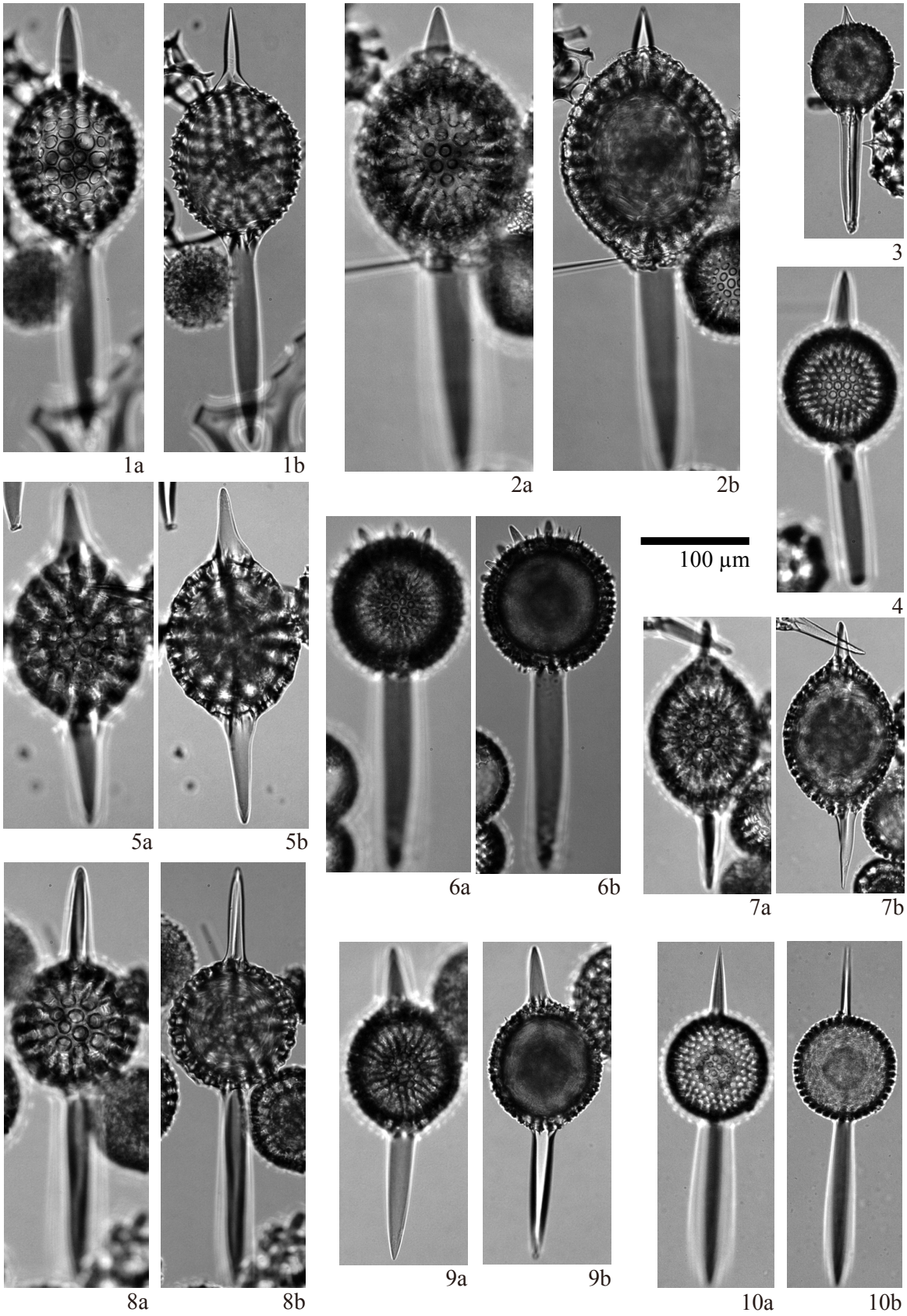


Plate 3 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Axoprunum bispiculum* (Popofsky); 3: *Stylosphaera communis* (Carnevale); 4, 10: *Stylosphaera* sp. B; 5: *Amphisphaera santaeannae* (Campbell and Clark); 6: *Amphistylus polistylus* (Carnevale); 7: *Amphisphaera neptunus* (Haeckel); 8: *Stylosphaera* sp. A; 9: *Amphistylus angelinus* (Campbell and Clark).

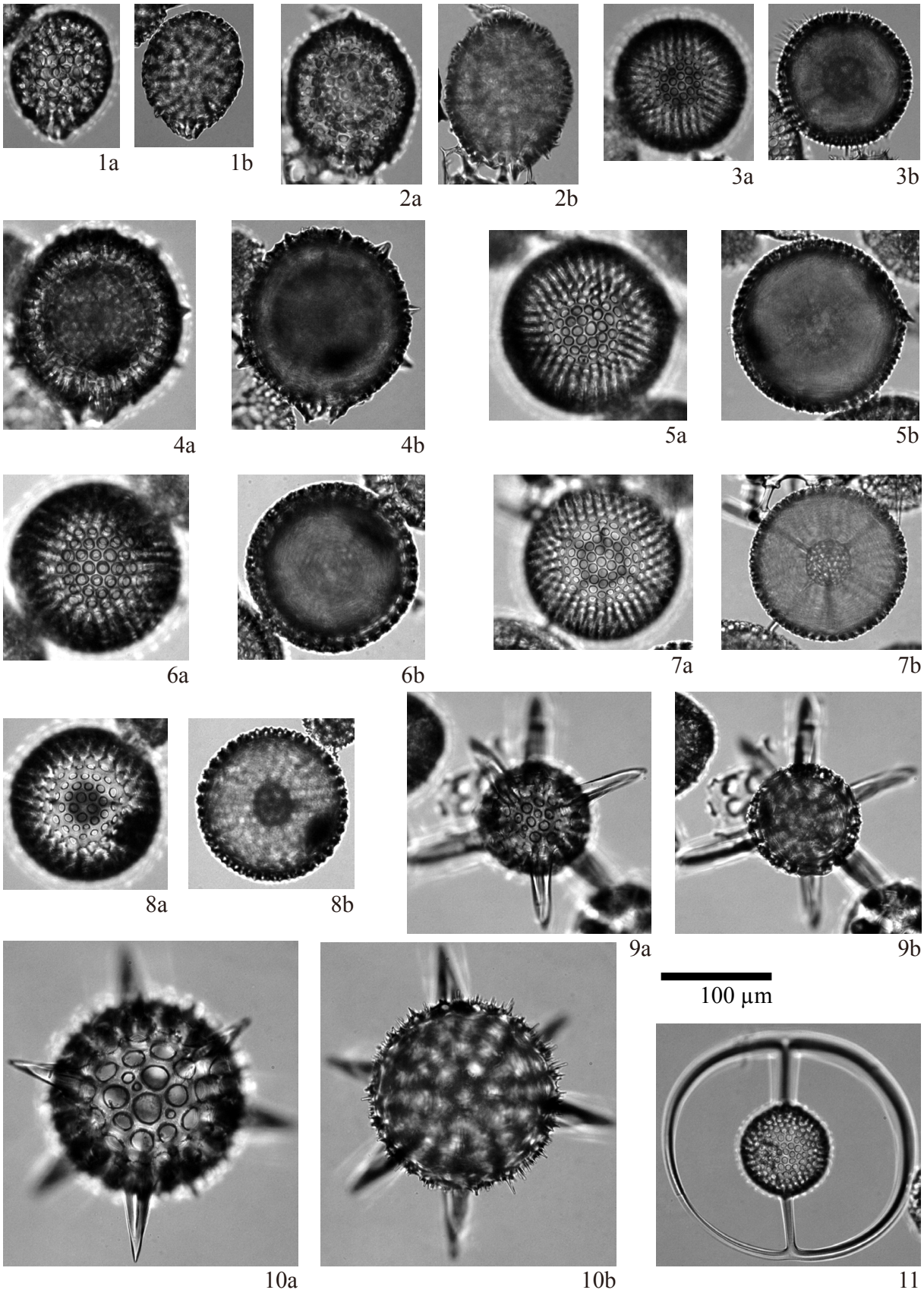


Plate 4 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2, 4: *Actinomma robusta* (Kling); 3: *Thecosphaera* sp. A; 5: *Thecosphaera* sp. B; 6: *Thecosphaera* sp. C; 7: *Thecosphaera* sp. D; 8: *Thecosphaera* sp. E; 9: *Hexacontium* sp. B; 10: *Hexacontium* cf. *arachnoidale* Hollande and Enjumet; 11: *Saturnalis circularis* Haeckel.

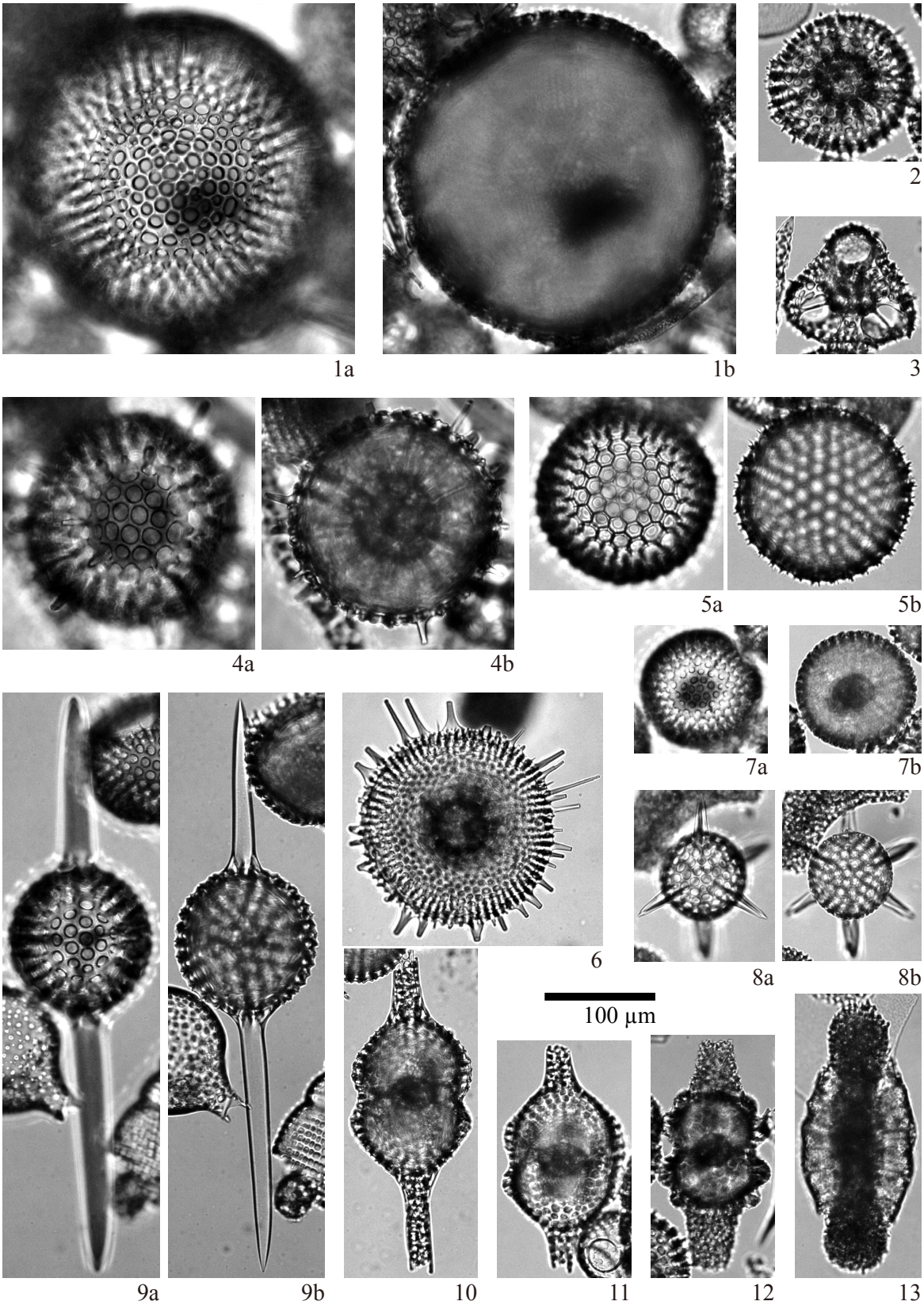


Plate 5 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Cenosphaera* sp. A; 2: *Heliodiscus* sp. B; 3: *Hexapyle dodecantha* Haeckel; 4: *Excentrodiscus* sp. A; 5: *Cenosphaera* sp. B; 6: *Heliodiscus* sp. A; 7: *Thecosphaera* sp. E; 8: *Hexacontium* sp. C; 9: *Axoprunum* sp. A; 10: *Didymocyrtis violina* (Haeckel); 11: *Didymocyrtis tubaria* (Haeckel); 12: *Didymocyrtis mammifera* (Haeckel); 13: *Spongurus cylindricus* Haeckel.

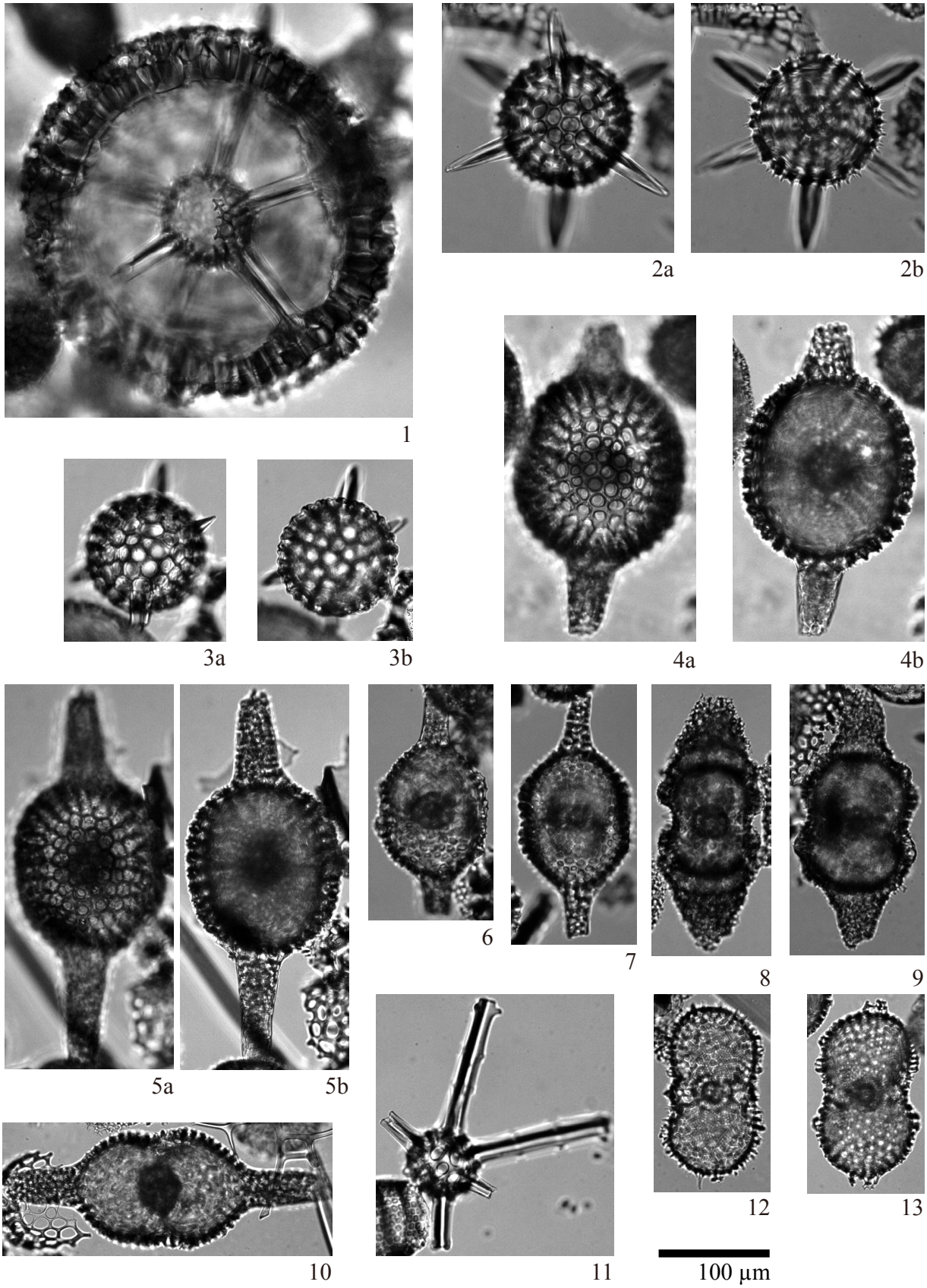


Plate 6 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Cladococcus* sp. A; 2: *Hexacontium pachydermum* Jørgensen; 3: *Hexalonche* sp. A; 4, 5: *Didymocyrtis prismatica* (Haeckel); 6, 7: *Didymocyrtis tubaria* (Haeckel); 8: *Didymocyrtis laticonus* (Riedel); 9: *Didymocyrtis mammifera* (Haeckel); 10, 12, 13: *Didymocyrtis bassanii* (Carnevale); 11: *Cladococcus dentata* (Mast).

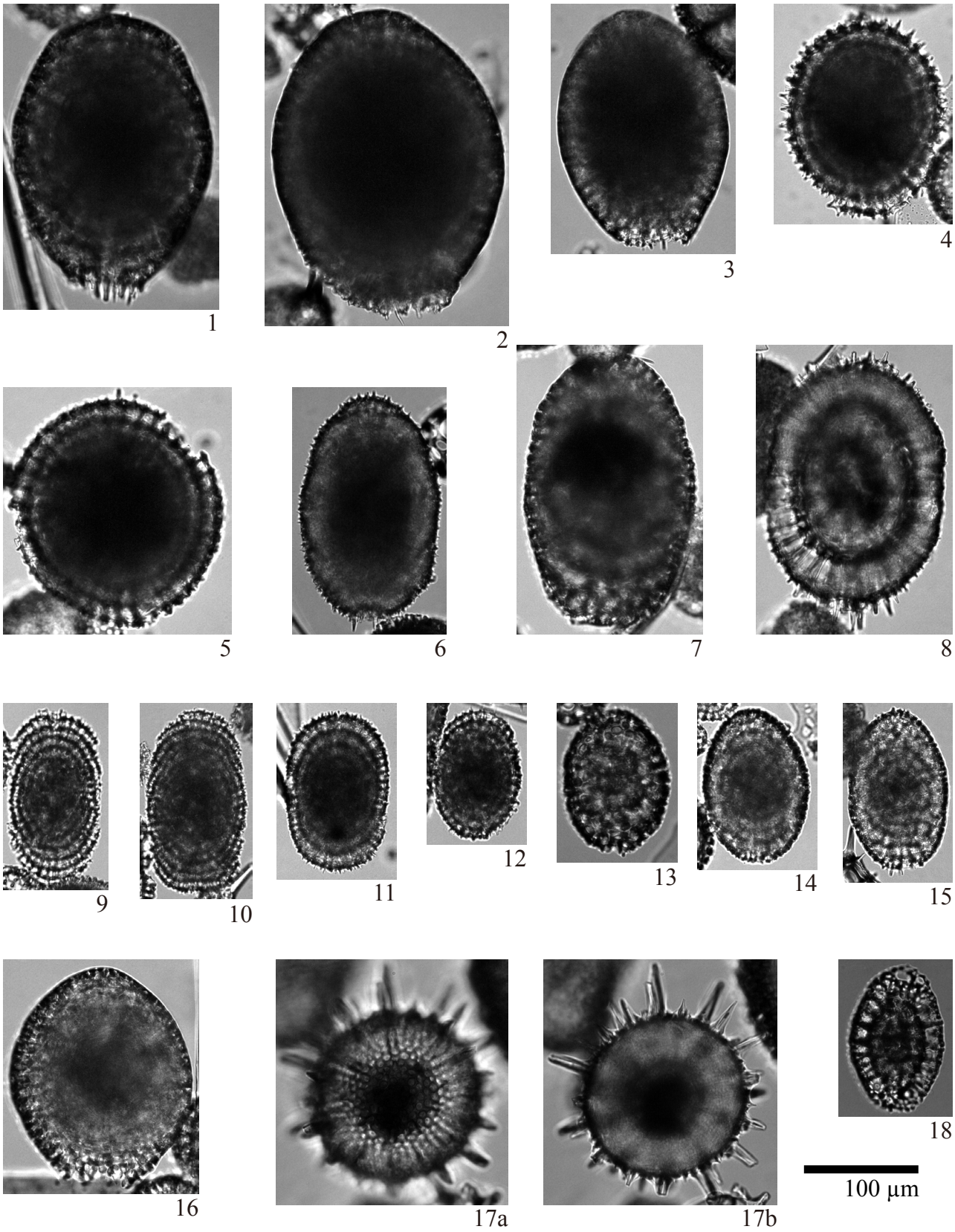


Plate 7 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–4: *Larcopyle hayesi* (Chen) group; 5: *Larcopyle* sp. C; 6, 9–11: *Lithelius* sp. A; 7: *Larcopyle polyacantha* (Campbell and Clark); 8: *Larcopyle* sp. B; 12: *Lithelius* sp. C; 13–15: *Larcopyle* sp. A; 16: *Larcopyle titan* (Campbell and Clark); 17: *Actinomma* sp. B; 18: *Larcospira moschkowskii* Kruglikova.

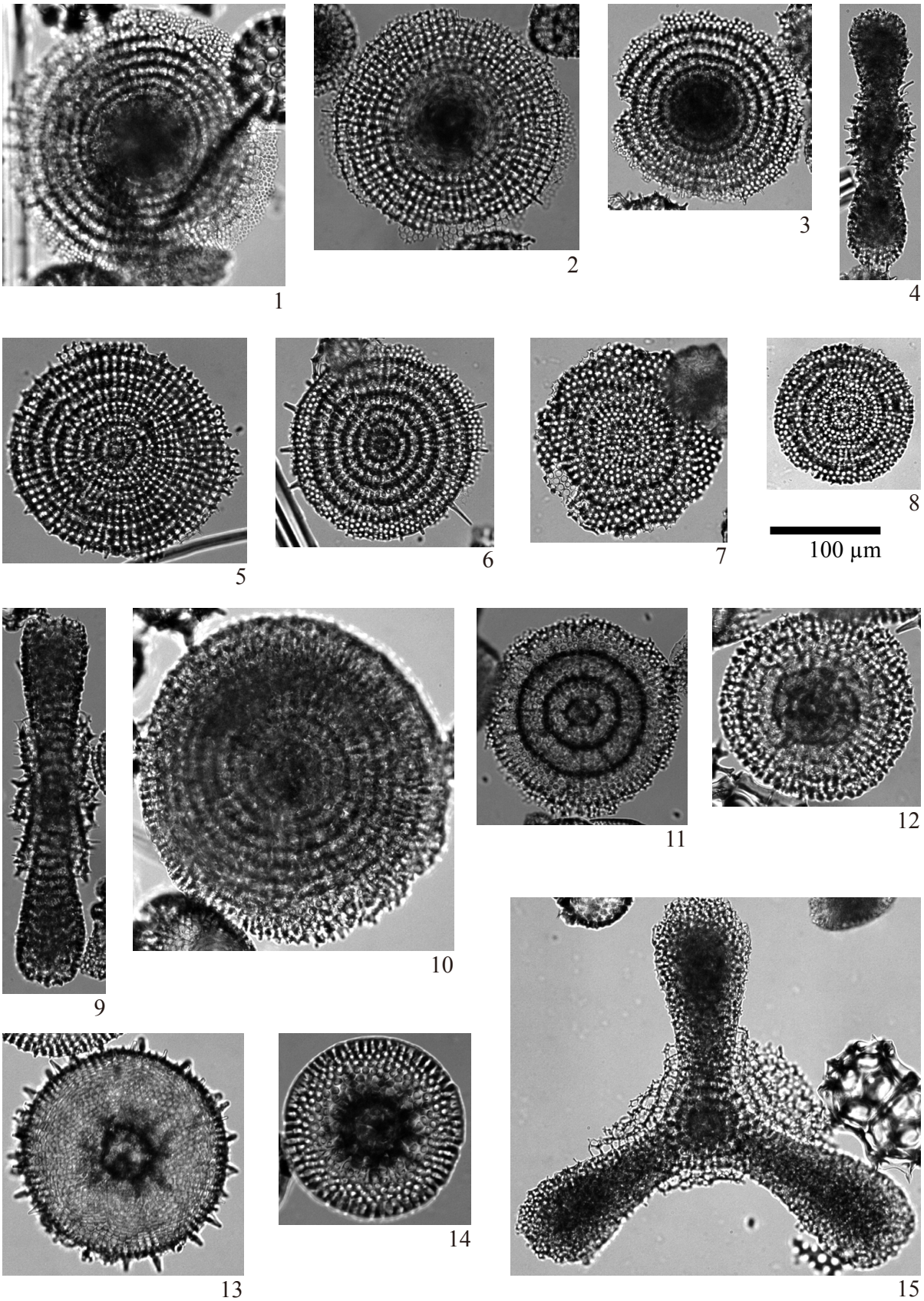


Plate 8 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–3: *Stylodictya* sp. A; 4: *Spongurus cylindricus* Haeckel; 5, 6, 8: *Stylodictya camerina* Campbell and Clark; 7: *Stylodictya* sp. B; 9: *Amphymenium amphistylium* Haeckel; 10: *Stylodictya* sp. C; 11: *Porodiscus circularis* Clark and Campbell; 12: *Porodiscus* sp. A; 13: *Heliodiscus* sp. A; 14: *Phacodiscus* sp. A; 15: *Dictyocoryne* sp. B.

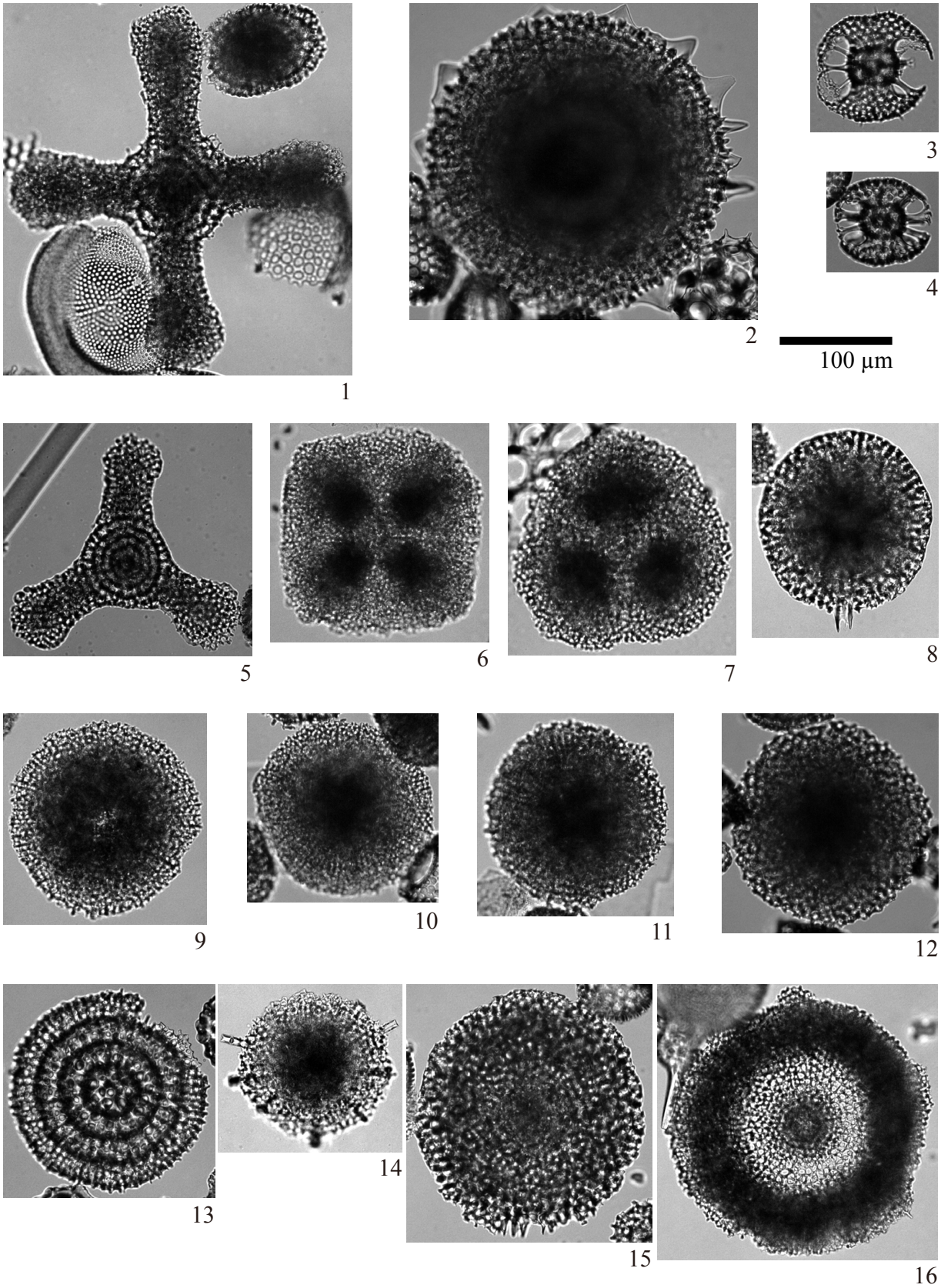


Plate 9 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Spongasteriscus marylandicus* Martin; 2: *Heliodiscus* sp. C; 3, 4: *Tetrapyle* sp. A; 5: *Dictyocoryne malagaense* (Campbell and Clark); 6: *Spongaster* sp. A; 7: *Dictyocoryne* sp. A; 8: *Spongopyle osculosa* Dreyer; 9–12: *Spongodiscus resurgens* Ehrenberg; 13: *Excentrococcus annulatus* Dumitrica; 14: *Spongodiscus* sp. B; 15: *Spongodiscus* sp. C; 16: *Spongodiscus klingi* Caulet.

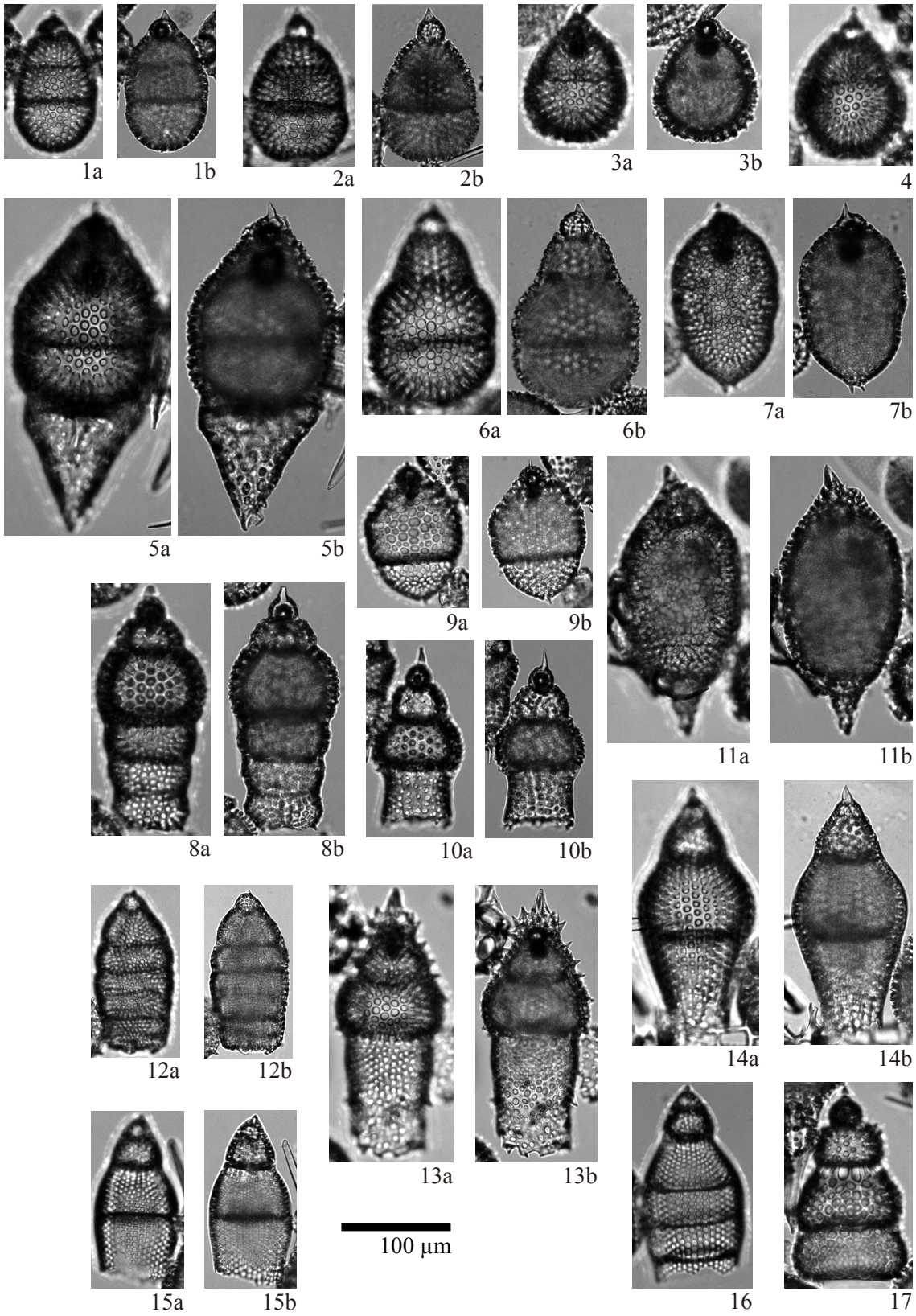


Plate 10 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Cyrtocapsella tetrapera* Haeckel; 3, 4: *Cyrtocapsella japonica* (Nakaseko); 5, 6: *Cyrtocapsella cornuta* Haeckel; 7: *Lithopera baueri* Sanfilippo and Riedel; 8: *Stichocorys delmontensis* (Campbell and Clark); 9: *Lithopera renzae* Sanfilippo and Riedel; 10: *Stichocorys wolffii* Haeckel; 11: *Lithopera thornburgi* Sanfilippo and Riedel; 12: *Eucyrtidium* sp. A; 13: *Stichocorys armata* (Haeckel); 14: *Phormocyrtis alexandrae* O'Connor; 15: *Eucyrtidium* sp. C; 16: *Eucyrtidium cienkowskii* Haeckel; 17: *Stichocorys diaphanes* (Sanfilippo and Riedel).

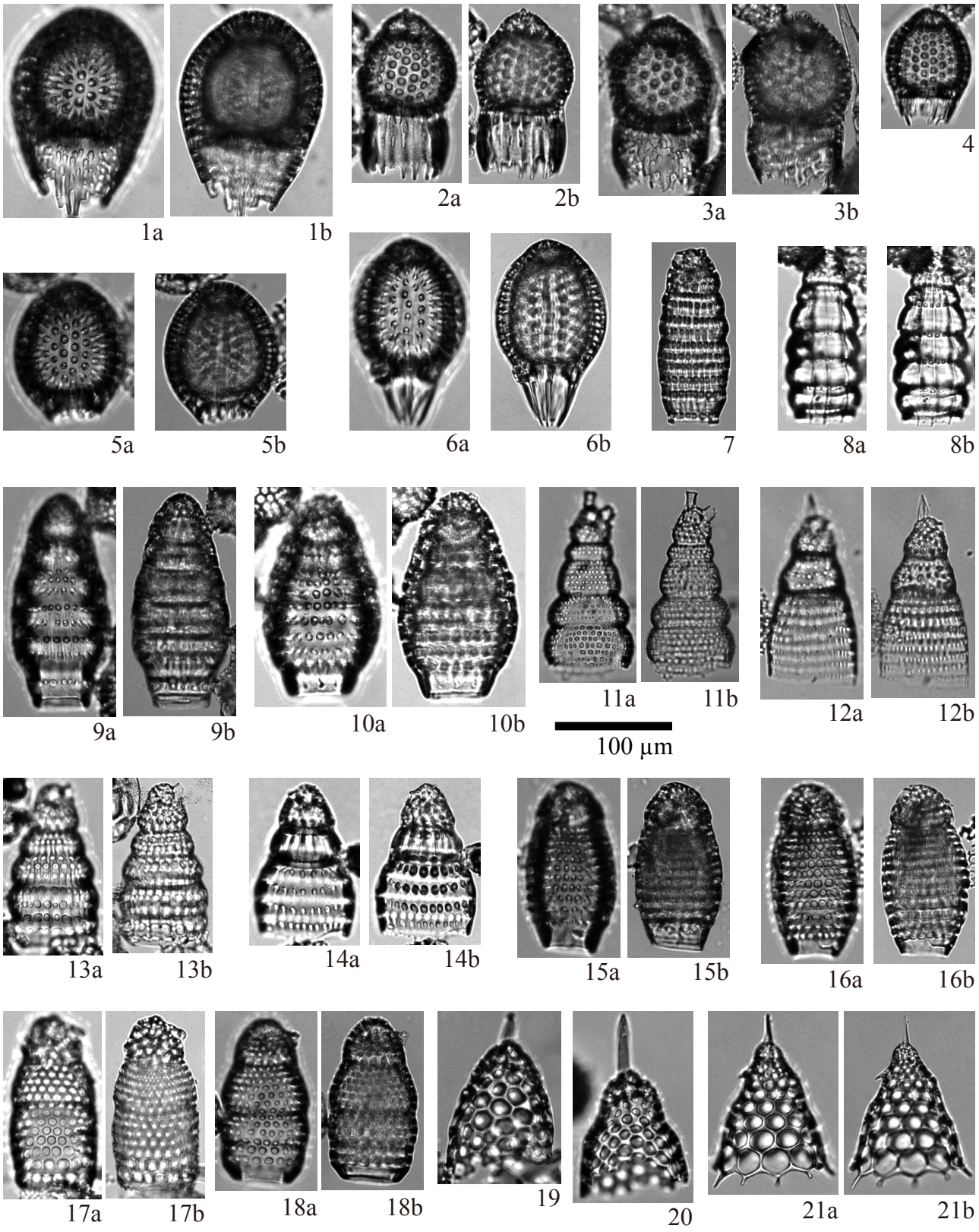


Plate 11 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Carpocanium cingulatum* (Riedel and Sanfilippo); 2, 3: *Carpocanium bramlettei* (Riedel and Sanfilippo); 4: *Carpacanium* sp. B; 5, 6: *Carpacanium kinugasense* Nishimura; 7: *Siphocampe* sp. D; 8: *Siphocampe grantmackiei* O'Connor; 9: *Botryostrobus* sp. B; 10: *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey); 11: *Spirocyrtis subtilis* Petrushevskaya; 12: *Siphostichartus corona* (Haeckel); 13: *Botryostrobus* sp. A; 14: *Theocamptra ovata* (Haeckel); 15, 16: *Siphocampe* sp. B; 17, 18: *Phormostichoartus fistula* Nigrini; 19: *Lithocampana* sp. A; 20: *Lithocampana* sp. B; 21: *Cycladophora conica* Lombari and Lazarus.

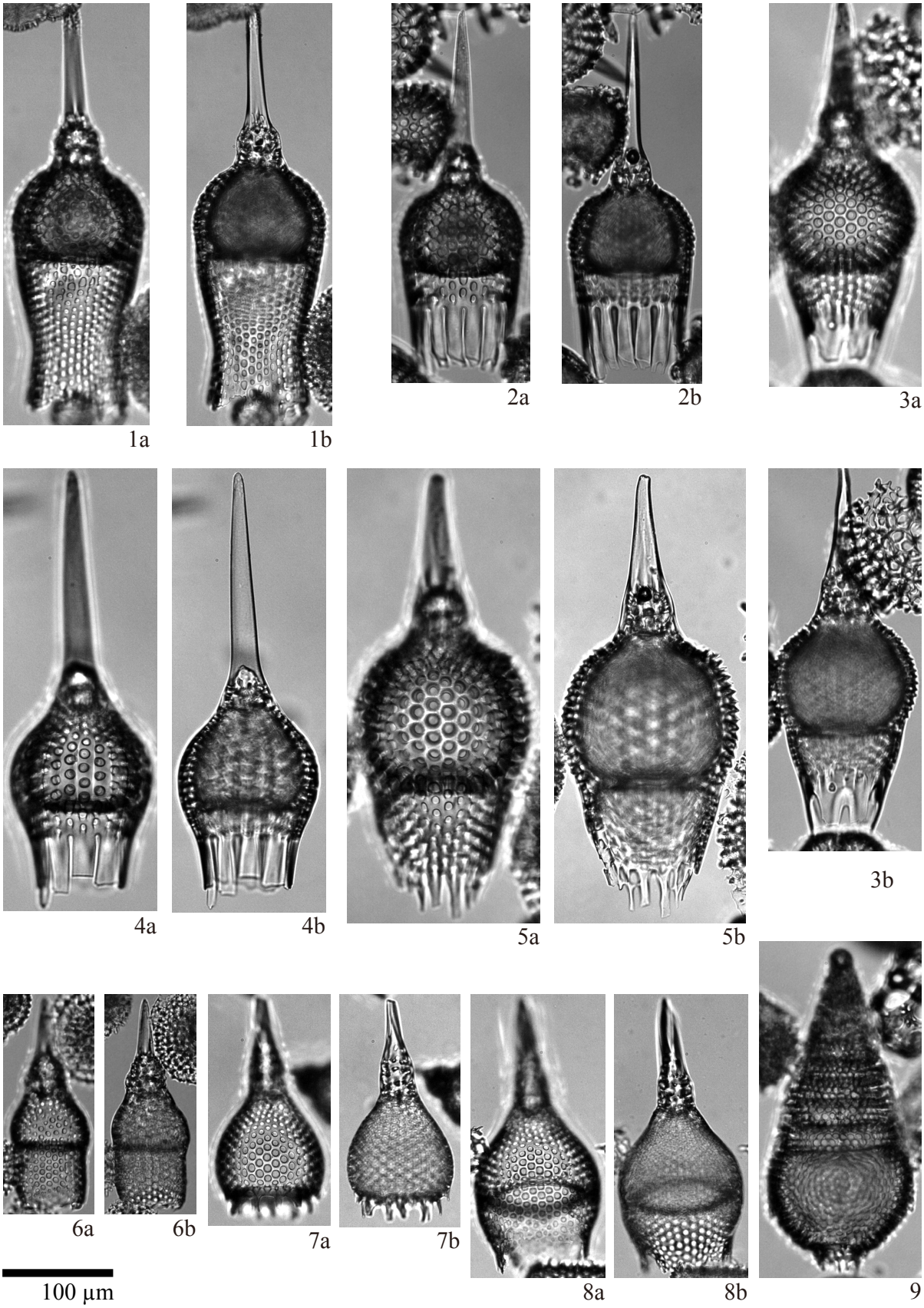


Plate 12 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Calocycletta caepa* Moore; 2: *Calocycletta virginis* (Haeckel); 3: *Calocycletta serrata* Moore; 4: *Calocycletta costata* (Riedel); 5: *Calocycletta robusta* Moore; 6: *Albatrossidium minzok* Sanfilippo and Riedel; 7: *Anthocyrtidium* sp. A; 8: *Anthocyrtidium* sp. B; 9: *Cyrtolagena* sp. A.

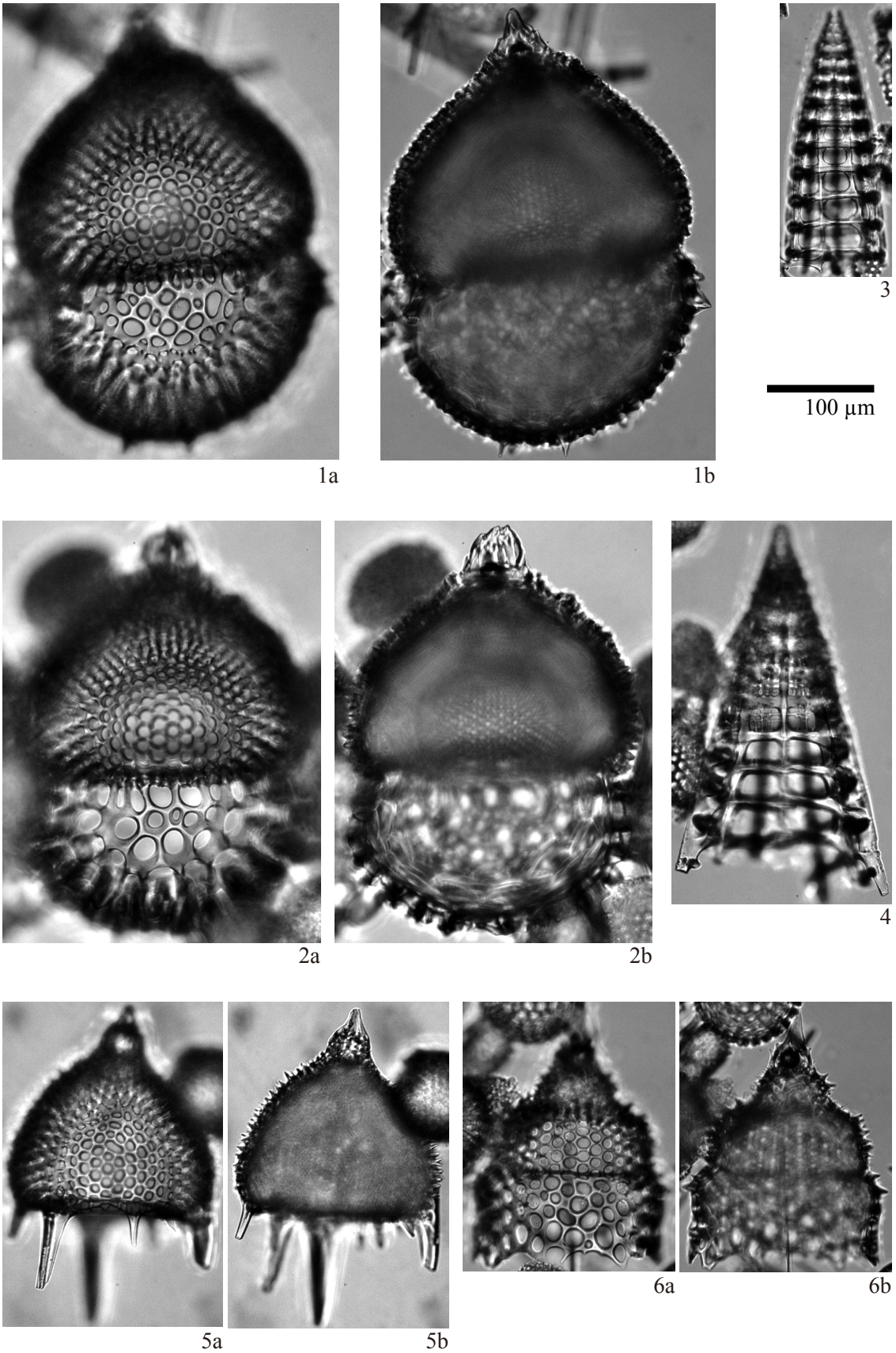


Plate 13 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Lophocyrtis tanythorax* (Sanfilippo and Riedel); 3: *Cinclopyramis pacifica* (Nakaseko); 4: *Cinclopyramis woodringi* (Campbell and Clark); 5: *Lophocyrtis* sp. A; 6: *Calocyclura* sp. A.

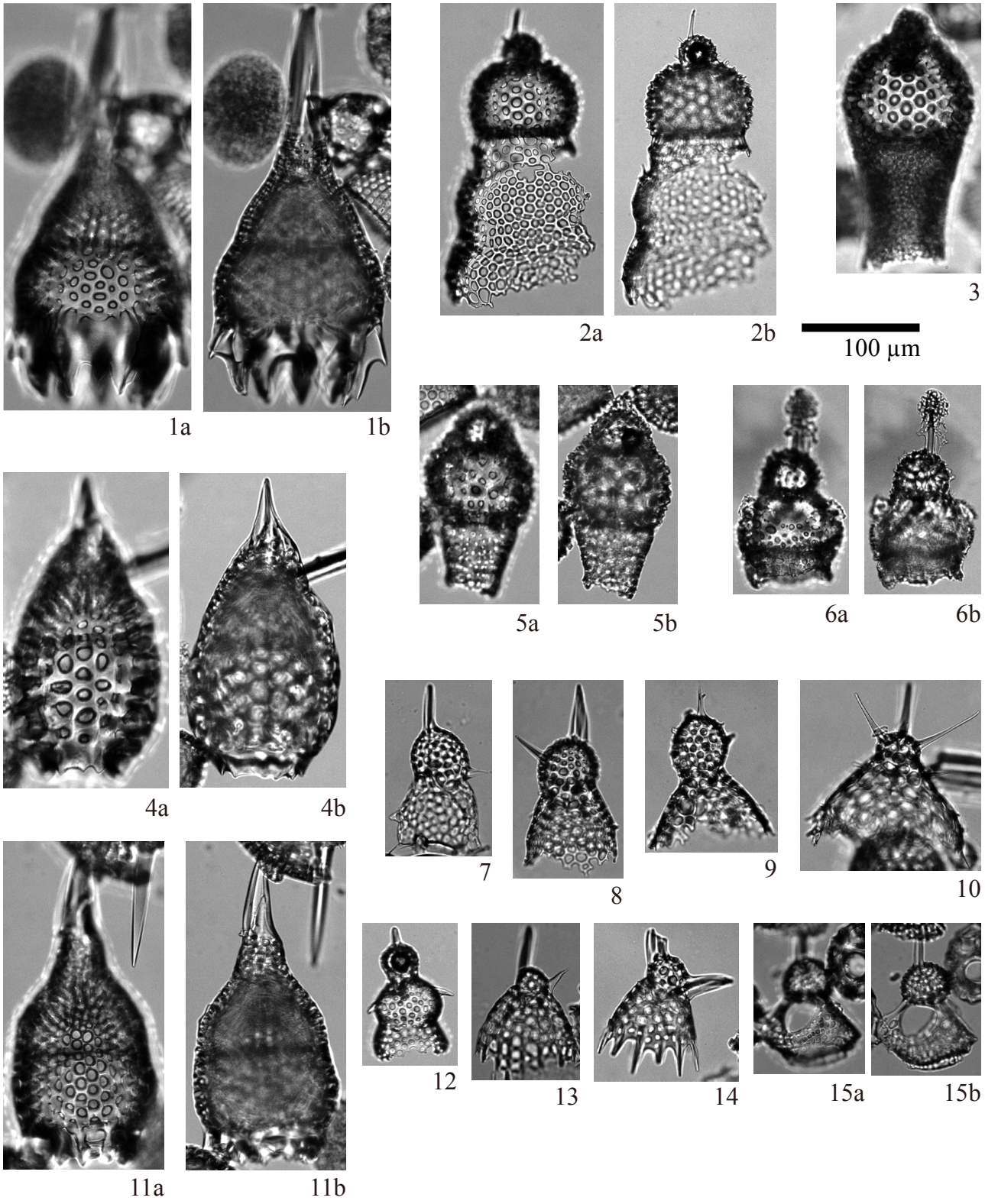


Plate 14 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Lamprocyclas maritalis* Haeckel; 2: *Lophocyrtis aspera* (Ehrenberg); 3: *Theocorys spongoconus* Kling; 4: *Lamprocyclas* sp. B; 5: *Theocorys* sp. A; 6: *Clathrocanium atreta* Sanfilippo and Riedel; 7, 8: *Lithomelissa* sp. A; 9: *Lophophaena* sp. A; 10: *Ceratocyrtis* sp. A; 11: *Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. A; 12: *Lipmanella conica* Petrushevskaya; 13, 14: *Lophophaena tekopua* O'Connor; 15: *Clathrocanium coarctatum* Ehrenberg.

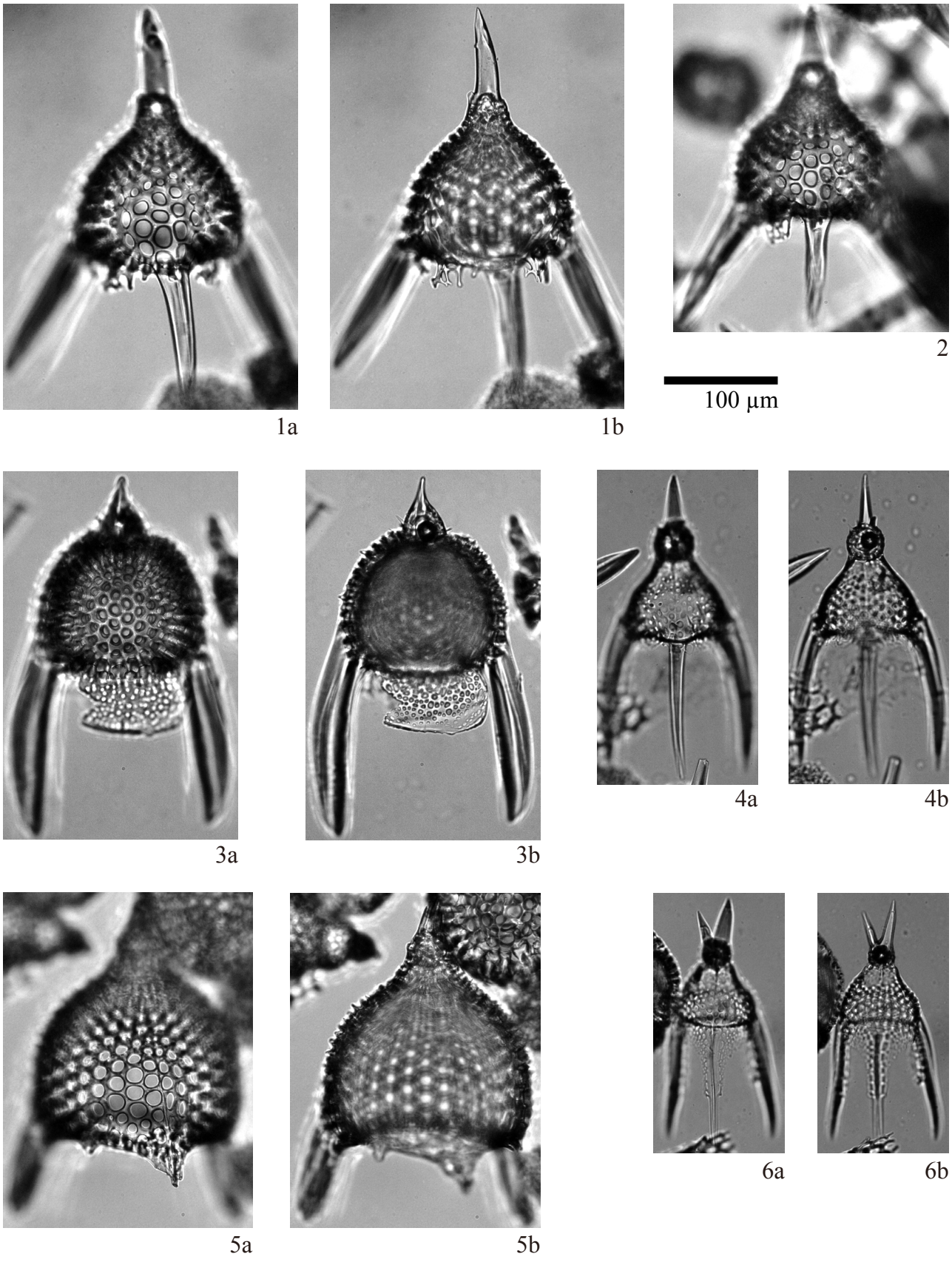


Plate 15 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Pterocanium audax* (Riedel); 3: *Lychnocanoma elongata* (Vinassa de Regny); 4: *Pterocanium* aff. *tridentatum* (Ehrenberg); 5: *Pterocanium charybdeum* (Müller); 6: *Pterocanium* sp. A.

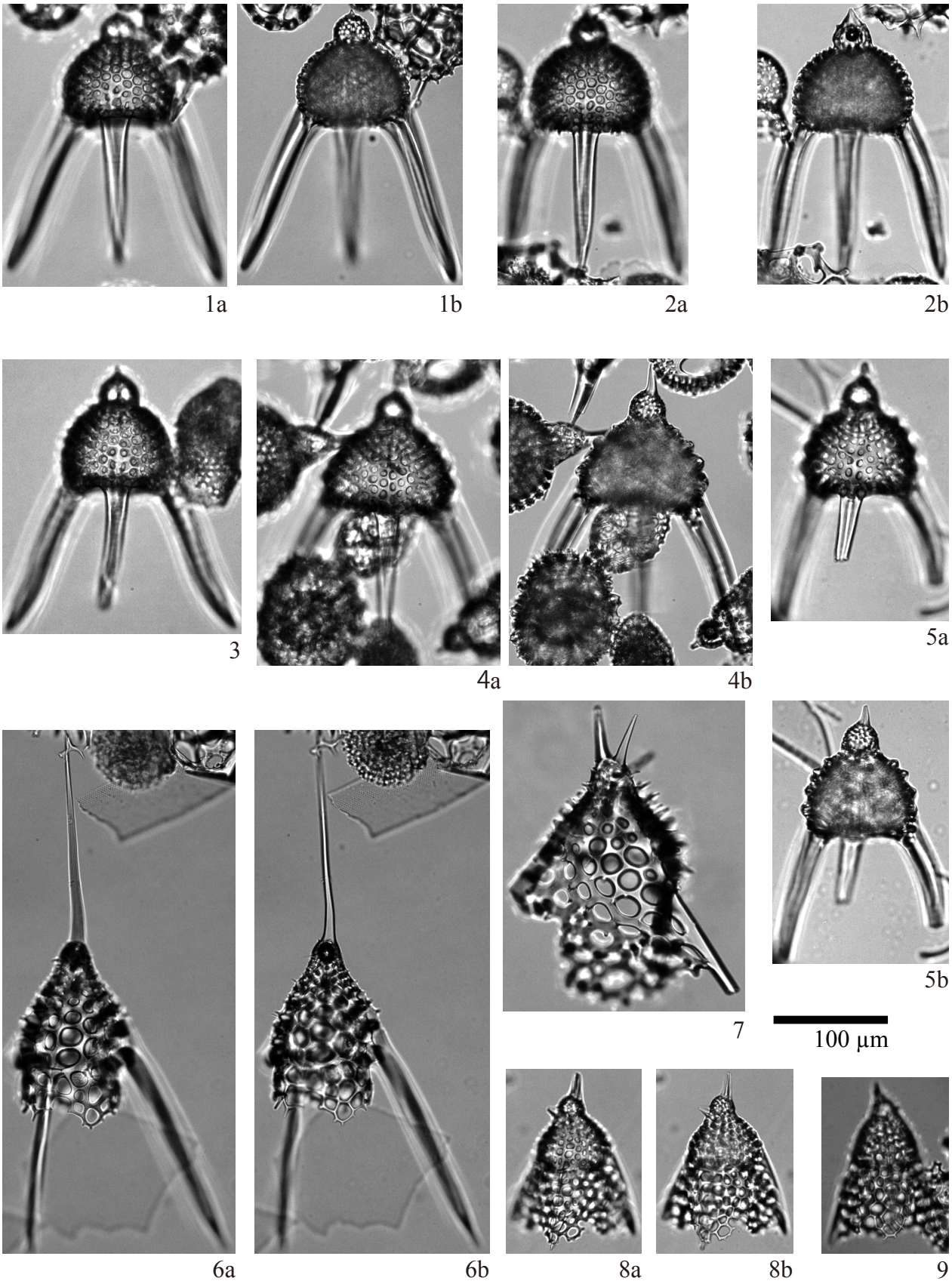


Plate 16 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–3: *Lychnocanoma* sp. A; 4, 5: *Lychnocanoma nodosum* (Haeckel); 6: *Dictyophimus splendens* (Campbell and Clark); 7: *Dictyophimus* sp. A; 8, 9: *Valkyria pukapuka* O'Connor.

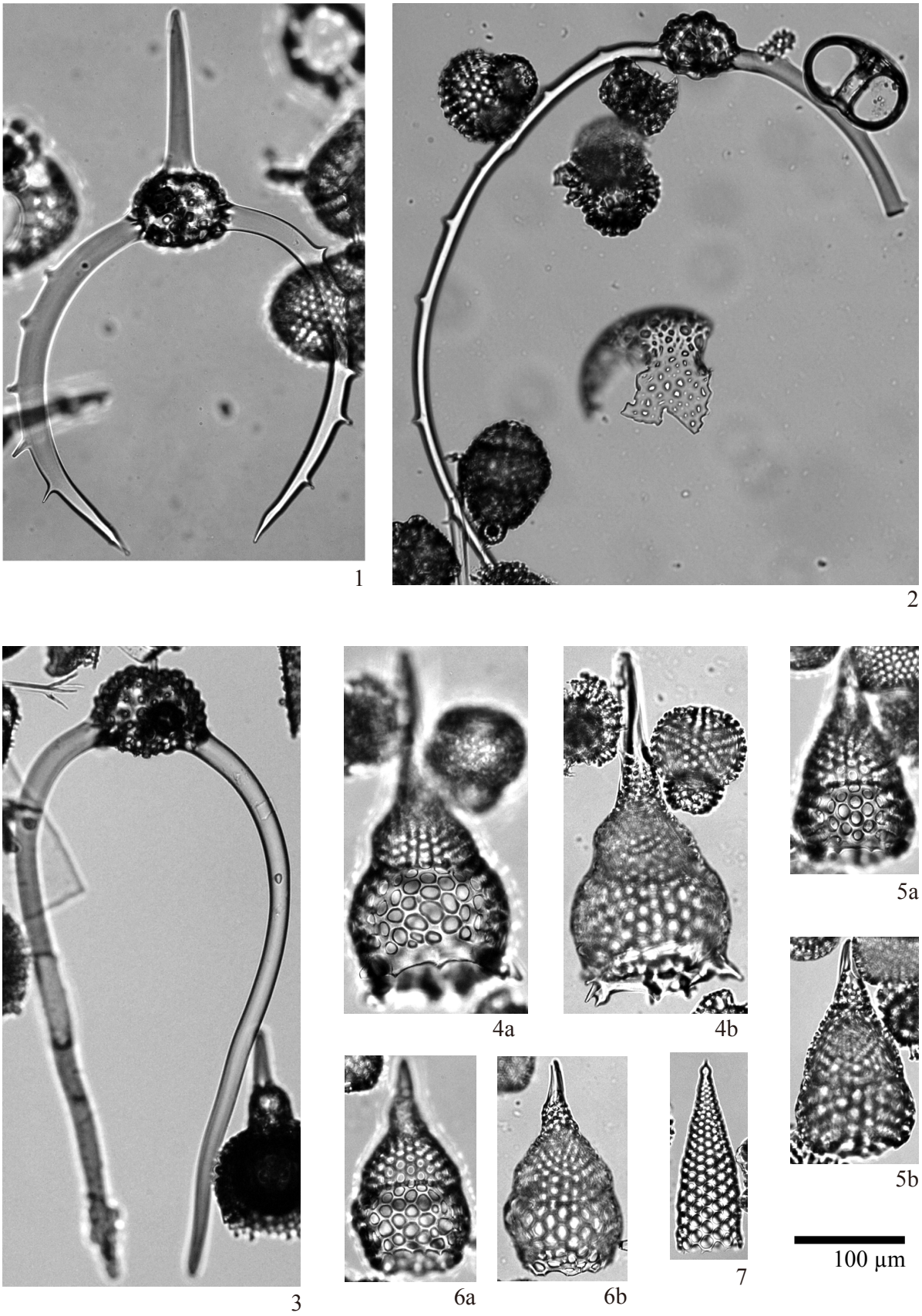


Plate 17 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Dorcadospyris dentata* Haeckel; 2: *Dorcadospyris alata* (Riedel); 3: *Dorcadospyris ateuchus* (Ehrenberg); 4–6: *Lamprocyclas margatensis* Campbell and Clark var. B; 7: *Cornutella trochus* Ehrenberg.

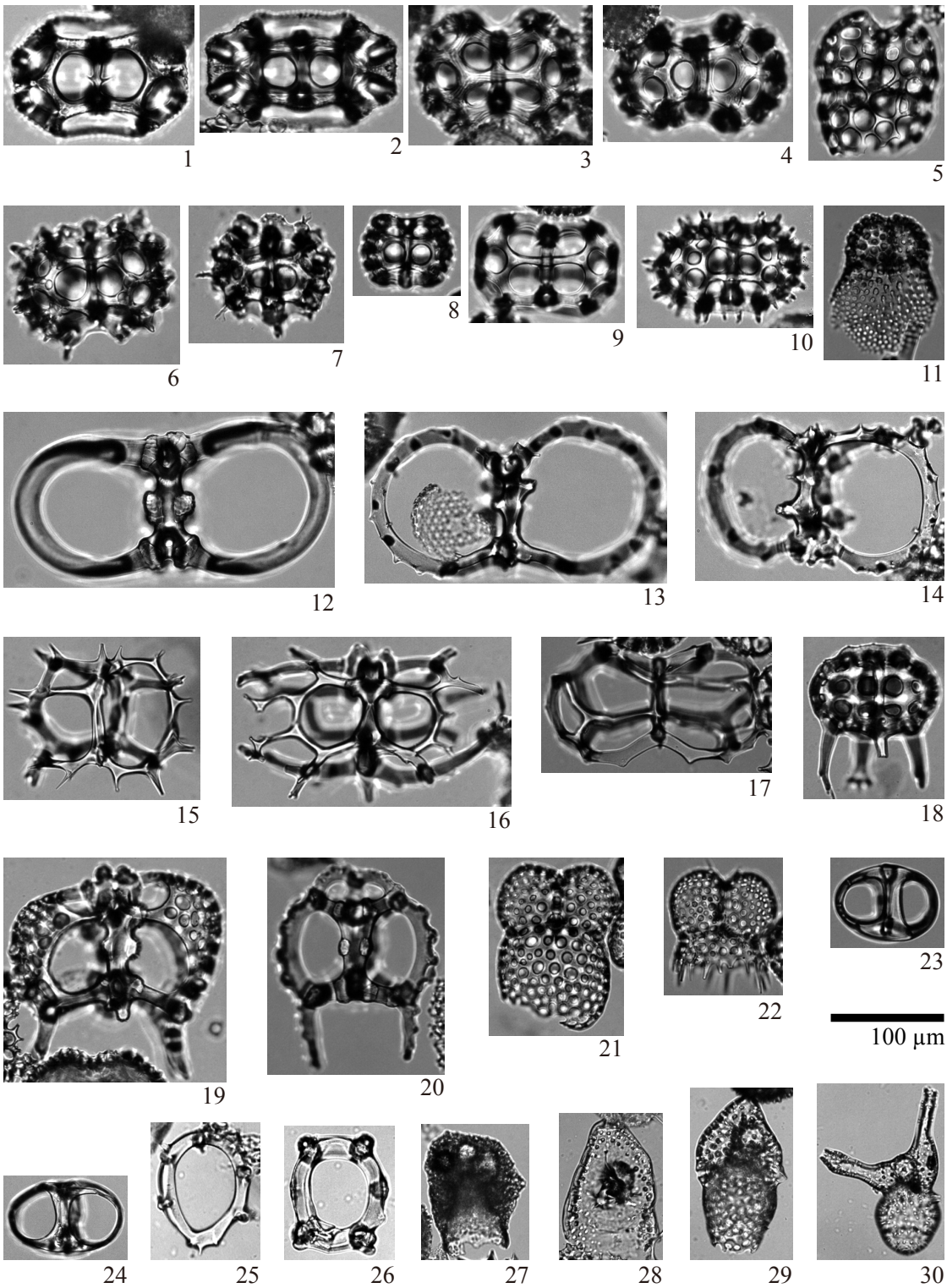


Plate 18 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Tympanomma binoctonum* (Haeckel); 3, 4: *Tholospyris anthophora* (Haeckel); 5: *Dendrospyris pannosa* Goll; 6: *Tholospyris mammillaris* (Haeckel); 7: *Tholospyris kantiana* (Haeckel); 8: *Tympanomma tuberosum* (Haeckel); 9: *Liriospyris mutuaria* Goll; 10: *Liriospyris* sp. A; 11: *Dendrospyris* sp. A; 12: *Eucoronis octopylus* (Haeckel); 13, 14: *Eucoronis perspicillum* Haeckel; 15: *Acanthodesmia circumflexa* (Goll); 16: *Acanthodesmia* sp. A; 17: *Acanthodesmia* sp. B; 18: *Dendrospyris pododendros* (Carnevale); 19: *Giraffospyris annulispina* Goll; 20: *Eucoronis toxarium* (Haeckel); 21: *Phormospyris stabilis* (Goll); 22: *Phormospyris* sp. B; 23: *Liriospyris parkerae* Riedel and Sanfilippo; 24: *Liriospyris stauropora* (Haeckel); 25, 26: *Zygocircus* sp.; 27: *Botryocyrtis* sp. A; 28: *Centrobotrys thermophila* Petrushevskaya; 29: *Centrobotrys petrushevskayae* Sanfilippo and Riedel; 30: *Acrobotrys disolenia* Haeckel.

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 163–194, 2019

Notes and Comments

Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific

Shin-ichi Kamikuri[1,*]

Shin-ichi Kamikuri (2019) Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 163–194, 1 figure, 24 plates.

Abstract: The purpose of this study is to present microphotgraphs of all the encountered taxa of the middle to late Miocene age from Ocean Drilling Program (ODP) Site 1021 in the eastern North Pacific in order to analyze the species diversity of radiolarians. Totally 149 species or species groups of radiolarians were identified from Site 1021 in the eastern North Pacific. Micro-photographs have been illustrated in the 24 plates, and a new species, *Lychnocanoma californica*, is described.

Keywords: eastern North Pacific, Miocene, radiolaria, new species

1. Introduction

The California Current system is one of the most biologically productive ecosystems in the world's ocean because they benefit from nutrient-rich coastal upwelling. Ocean Drilling Program (ODP) Leg 167 was designed to study the evolution of the California Current system and associated upwelling systems from the middle Miocene to the Quaternary (Lyle *et al.*, 1997), and thirteen sites were drilled from about 30°N to 42°N along the California continental margin in the eastern North Pacific Ocean. Of these thirteen sites, Site 1021 was drilled for paleoceanographic reconstruction of the northern region of the area influenced by the California Current during the Neogene. LaRiviere *et al.* (2012) estimated quantitative geochemical sea surface temperature since the late middle Miocene from Site 1021 in the eastern North Pacific. Barron *et al.* (2002) presented weight percent opal records since the late middle Miocene from Site 1021, and indicated that a dramatic decline occurred at about 7.6 Ma.

Radiolarians, which is one of the siliceous microfossil group, were found in the sediment recovered from Site 1021, however its preservation of the fauna changed from age to age (Lyle *et al.*, 1997; Kamikuri, 2017). Sediments older than the latest Miocene was relatively abundant in radiolarians, of which preservation was good. The sediments from the middle to upper Miocene are suitable for studies of taxonomy, biostratigraphy and species diversity on radiolarians.

The most important taxonomic studies of the middle to upper Miocene in the eastern North Pacific is that of Campbell and Clark (1944). The taxonomic studies were based on siliceous sediments of onshore California. After that, several biostratigaraphic studies of radiolarians were conductive in the eastern North Pacific (Rowell, 1981; Poore *et al.*, 1981; Weaver *et al.*, 1981; Perez-Guzman, 1985; Perez-Guzman and Casey, 1986). Kamikuri (2017) studied biostratigraphic distribution of selected radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific. The purpose of this study is to present microphotgraphs of all the encountered taxa of the middle to late Miocene age from Site 1021 in the eastern North Pacific in order to analyze the species diversity of radiolarians.

2. Material and methods

Site 1021 was drilled at a water depth of 4211.5 m (39°5.248' N, 127°46.985' W) in the eastern North Pacific (Fig. 1). The lithology of the middle to upper Miocene of this site is characterized by clay and diatom ooze with well-preserved radiolarians (Lyle *et al.*, 1997). A total of 49 sediment samples from 1021B-22X-1, 20-22 cm to 33X-6, 20-22 cm (210.32 to 308.21 meters composite depth below seafloor; 7.50 to 12.83 Ma) were examined in this study (Plates 1 to 24). Sample preparation for microscopic examination followed the standard techniques (Sanfilippo *et al.*, 1985). Sediment samples were treated with H_2O_2 and HCl solution. The residues were sieved with 63 μm. An optical microscope was used for observation and photomicrographic work.

[1] Faculty of Education, Ibaraki University, Bunkyo 2-1-1, Ibaraki 310-8512, Japan

[*] Corresponding author: S. Kamikuri, Email: shin-ichi.kamikuri.millefeuille@vc.ibaraki.ac.jp

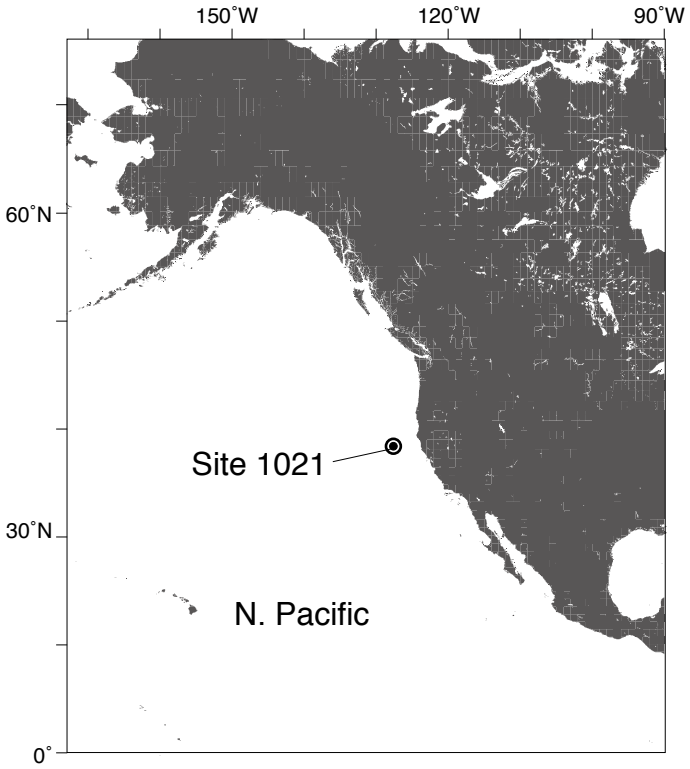


Fig. 1 Location map of ODP Site 1021 in the eastern North Pacific.

3. Radiolarian species diversity

Totally 149 species or species groups of radiolarians were identified from Site 1021 in the eastern North Pacific. Micro-photographs are illustrated in the 24 plates including a new species, *Lychnocanoma californica*.

4. Taxonomic Notes

Genus *Lychnocanoma* Haeckel 1887, emend. Foreman 1973

Lychnocanoma californica Kamikuri **n. sp**.

Plate 1, figs. 6-11.

Lychanocanoma nipponica type B. Kamikuri 2017, figs. 2a, b.

Holotype: MPC-42136; ODP Hole 1021B-26X-4, 70-72 cm, D42/0. Plate 1, figs 8a, b. Holotype is on deposit in the micropaleontological reference collection of the Natural Science Museum, Tokyo, Japan.

Description: Cephalis moderate in size with a few small subcircular pores. Apical horn, simple unbladed and its length being 0.5 times to twice as long as cephalic diameter. Collar stricture distinct. Thorax hemispherical, usually thick-walled with a relatively smoothed surface and being subcircular pores aligned longitudinally. Thoracic pores, medium and regular in size, about 12-16 pores on a half circumference. Three feet, three-bladed, robust, straight or slightly curved with outward convexity. Feet have usually one or two proximal pores. In some specimens, meshwork on the inner margin of the feet.

Dimensions (based on ten specimens): Length of apical horn: up to 40 μm; cephalic diameter: 20-30 μm; length of thorax: 50-70 μm; width of thorax: 85-120 μm; length of foot: up to 170 μm.

Distinguishing characters: *Lychnocanoma californica* is closely related to *Lychnocanoma parallelipes* Motoyama. *Lychnocanoma californica* differs from *L. parallelipes* by a relatively thin thorax with a smooth surface, and a shorter and thin apical horn. *Lychnocanoma californica* can be distinguished from *Lychnocanoma nipponica* Nakaseko and *Lychnocanoma magnacornuta* Sakai by its parallel or slightly convergent feet.

Occurrence: *Lychnocanoma californica* (=*Lychnocanoma nipponica* type B in original paper) occurred from 9.4 to 6.2 Ma in the late Miocene (Kamikuri, 2017).

Genus *Actinomma* Haeckel 1861a, sensu Burridge *et al.* 2014

Actinomma hootsi (Campbell and Clark)

Plate 10, figs. 1a-4b, plate 16, figs. 8a, b.

Hexacontium hootsi Campbell and Clark 1944, p. 14, pl. 2, fig. 5.

Remarks: I changed the genus name to *Actinomma*, because this species characterized by three cortical shells with eight to ten unbranched spines.

Actinomma robusta (Kling)

Plate 12, figs. 4a-8b.

Sphaeropyle robusta Kling 1973, p. 634, pl. 1, figs. 11, 12, pl. 9, figs. 9-13, pl. 13, figs. 1-5; Morley and Nigrini 1995, p. 81, pl. 1, figs. 6, 7.

Remarks: I changed the genus name to *Actinomma*, because this species is similar to *Actinomma langii* (Dreyer) in Burridge *et al.* (2014).

Genus *Cinclopyramis* Haeckel 1879,
sensu Suzuki *et al.* 2009
Cinclopyramis circumtexta (Haeckel) group
Plate 6, figs. 13, 14, 17.

Peripyramis circumtexta Haeckel 1887, p. 1162, pl. 54, fig. 5.
Peripyramis circumtexta Haeckel group in Petrushevskaya 1975, p. 587, pl. 13, fig. 29, pl. 44, figs. 5, 6.

Remarks: I changed the genus name to *Cinclopyramis*, because *Peripyramis* is junior synonym of *Cinclopyramis* (Suzuki *et al.*, 2009).

Genus *Cycladophora* Ehrenberg 1872, emend.
Lombari and Lazarus 1988
Cycladophora klingi Lombari and Lazarus
Plate 1, figs. 3a, b.

Cycladophora bicornis klingi Lombari and Lazarus 1988, p. 108, pl. 4, figs. 1-5.

Remarks: *Cycladophora klingi* was described originally as a subspecies of *Cycladophora bicornis* by Lombari and Lazarus (1988). I have raised this taxon to species rank, because this species is distinguished from other cycladophorids by its small compact shape and lower thorax skirt.

Genus *Lamprotripus* Haeckel 1882
Lamprotripus splendens (Campbell and Clark)
Plate 2, fig. 6

Pterocorys (*Pterocyrtidium*) *splendens* Campbell and Clark 1944, p. 46, pl. 6, figs. 16, 19, 20.
Dictyophimus splendens (Campbell and Clark) in Morley and Nigrini 1995, p. 79, pl. 7, figs. 3, 4.

Remarks: I changed genus name to *Lamprotripus*, because this species is similar to *Lamprotripus cortina* (Haeckel) and *L. hirundo* (Haeckel) in Matsuzaki *et al.* (2015).

Genus Rhizosphaera Haeckel 1861b,
sensu Dumitrica 2017
Rhizosphaera churchi (Campbell and Clark) group
Plate 8, figs. 1-8.

Plegmosphaera churchi Campbell and Clark 1944, p. 10, pl. 1, figs. 6-10.

Remarks: I changed genus name to *Rhizosphaera*, because this species is similar to *Rhizosphaera antarctica* (Haeckel) in Dumitrica (2017).

5. Species list

Amphistylus angelinus (Campbell and Clark) in Takemura 1992, p. 741, pl. 1, figs. 8, 9. [Plate 14, fig. 13.]
Amphymenium amphistylium Haeckel in Morley and Nigrini 1995, p. 78, pl. 1, figs. 8, 9. [Plate 19, fig. 4.]
Anthocyrtidium sp. A: This study. [Plate 3, figs. 9, 10.]
Anthocyrtidium sp. B: This study. [Plate 3, fig. 11.]
Axoprunum bispiculum (Popofsky) in Takemura 1992, p. 741, pl. 1, figs. 1, 2. [Plate 14, fig. 11.]
Botryostrobus bramlettei (Campbell and Clark) in Nigrini and Lombari 1984, p. N175, pl. 31, figs. 2a–2c. [Plate 1, fig. 12.]
Calocycletta caepa Moore 1972, p. 150, pl. 2, figs. 4–7. [Plate 3, fig. 1.]
Calocycletta sp. A: This study. [Plate 3, fig. 5.]
Calocycletta sp. B: This study. [Plate 3, fig. 4.]
Calocycletta sp. C: This study. [Plate 3, figs. 2, 3.]
Carpocanium favosa (Haeckel): *Carpocanistrum favosum* (Haeckel) in Takahashi 1991, p. 131, pl. 45, fig. 8: *Carpocanium* spp. in O'Connor 1997, p. 111, pl. 3, figs. 18–20. [Plate 1, fig. 15.]
Cenosphaera jenkinsi Campbell and Clark group: *Cenosphaera jenkinsi* Campbell and Clark 1944, p. 9, pl. 1, figs. 2–4. [Plate 15, figs. 1–11; Plate 16, figs. 6, 7.]
Ceratocyrtis aff. *mashae* Bjørklund in Matsuzaki *et al.* 2015, p. 46, fig. 7.24. [Plate 5, figs. 10, 11.]
Ceratocyrtis sp. A: This study. [Plate 5, fig. 12.]
Ceratocyrtis sp. C: This study. [Plate 5, fig. 13.]
Cinclopyramis murrayana Haeckel in Matsuzaki *et al.* 2015, p. 58, figs. 9.19, 9. 20; *Bathropyramis woodringi* Campbell and Clark 1944, p. 39, pl. 5, figs. 21, 22. [Plate 6, fig. 7.]
Circodiscus circularis (Clark and Campbell) in Jackett *et al.*, 2008, p. 50, pl. 4, figs. 10, 12; *Porodiscus circularis* Clark and Campbell 1942, p. 42, pl. 2, figs. 2, 6, 10. [Plate 20, figs. 1–4.]
Collosphaera glebulenta Bjørklund and Goll 1979, p. 1316, pl. 2, figs. 9–25. [Plate 17, figs. 1–6.]
Collosphaera reynoldsi Kamikuri 2010, p. 97, pl. 3, figs. 18-25. [Plate 17, fig. 7.]
Collosphaera sp. A: This study. [Plate 17, fig. 9.]
Collosphaera sp. B: This study. [Plate 17, fig. 8.]
Cornutella paloverdensis Campbell and Clark 1944, p. 40, pl. 5, figs. 17, 20, 24, 25. [Plate 6, fig. 3.]
Cornutella profunda Ehrenberg in Nigrini and Lombari 1984, p. N93, pl. 22, fig. 1. [Plate 6, fig. 15.]
Cromydruppocarpus esterae Campbell and Clark 1944, p. 20, pl. 2, figs. 26–28. [Plate 14, figs. 4–6.]
Cycladophora bicornis (Popofsky) in Matsuzaki *et al.*

2015, p. 63, figs. 8.19–8. 22; Not C*ycladophora bicornis bicornis* (Popofsky) in Lombari and Lazarus 1988, p. 106, pl. 5, figs. 9–12. [Plate 1, fig. 4.]

Cycladophora cabrilloensis (Campbell and Clark): *Clathrocyclas cabrilloensis* Campbell and Clark 1944, p. 48, pl. 7, fig. 1 (only); *Cycladophora cabrilloensis cabrilloensis* (Campbell and Clark) in Lombari and Lazarus 1988, p. 118, pl. 7, figs. 1–12. [Plate 1, fig. 1.]

Cycladophora cosma Lombari and Lazarus: *Cycladophora cosma cosma* Lombari and Lazarus 1988, p. 104, pl. 1, figs. 1-6; *Cycladophora cosma irregularis* Lombari and Lazarus 1988, p. 105, pl. 1, figs. 7–12. [Plate 1, fig. 2.]

Cycladophora sphaeris (Popova): *Spuroclathrocylas sphaeris* Popova 1989, p. 73, pl. 11, fig. 17, pl. 12, fig. 3; *Cycladophora sakaii* Motoyama 1996, p. 246, pl. 4, figs. 4a–6b; *Cycladophora sphaeris* (Popova) in Kamikuri 2017, fig. 8.5. [Plate 1, fig. 5.]

Cyrtocapsella cornuta Haeckel in Sakai 1980, p. 709, pl. 8, figs. 8a, 8b. [Plate 5, fig. 4.]

Cyrtocapsella japonica (Nakaseko) in Sakai 1980, p. 709, pl. 8, figs. 7a, 7b. [Plate 5, figs. 8, 9.]

Cyrtocapsella tetrapera Haeckel in Sakai 1980, p. 709, pl. 8, figs. 5, 6. [Plate 5, fig. 5.]

Cyrtolagena sp. A: This study. [Plate 6, fig. 16.]

Dendrospyris aff. *bursa* (Sanfilippo and Riedel): This study. [Plate 7, figs. 12, 13.]

Dendrospyris sp. A: This study. [Plate 7, figs. 3-5.]

Dendrospyris sp. B: This study. [Plate 7, fig. 6.]

Dendrospyris sp. C: This study. [Plate 7, fig. 8.]

Dendrospyris sp. D: This study. [Plate 7, fig. 9.]

Dendrospyris sp. E: This study. [Plate 7, fig. 11.]

Dendrospyris sp. F: This study. [Plate 7, fig. 14.]

Diartus hughesi (Campbell and Clark) in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 655. Fig. 8.11. [Plate 19, figs. 20, 21.]

Dictyocoryne malagaense (Campbell and Clark) group: *Rhopalodictyum malagaense* Campbell and Clark 1944, p. 29, pl. 4, figs. 4, 5. [Plate 19, figs. 1, 2.]

Dictyocoryne sp. A: This study. [Plate 19, fig. 3.]

Dictyophimus sp. A: This study. [Plate 5, fig. 16.]

Didymocyrtis antepenultima (Riede and Sanfilippo) in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 657, fig. 8.6. [Plate 19, figs. 18, 19.]

Didymocyrtis laticonus (Riedel) in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 658, figs. 8.5a, 8.5b. [Plate 19, figs. 16, 17.]

Didymocyrtis penultima (Riede and Sanfilippo) in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 658, figs. 8.7a, 8.7b. [Plate 19, figs. 14, 15.]

Didymocyrtis sp. C: This study. [Plate 19, figs. 22, 23.]

Didymocyrtis sp. D: This study. [Plate 19, figs. 24, 25.]

Druppatractus hastatus Blueford 1982, p. 206, pl. 6, figs. 3, 4. [Plate 14, fig. 7.]

Eucyrtidium calvertense Martin in Morley and Nigrini 1995, p. 82, pl. 4, fig. 8. [Plate 4, fig. 8.]

Eucyrtidium cienkowskii Haeckel group in Sakai 1980, p. 710, pl. 7, figs. 8a–10. [Plate 4, figs. 9–11.]

Eucyrtidium hexagonatum Haeckel in Nigrini and Lombari 1984, p. N115, pl. 23, fig. 8. [Plate 4, fig. 7.]

Eucyrtidium inflatum Kling 1973, p. 636, pl. 11, figs. 7, 8, pl. 15, figs. 7-10. [Plate 4, fig. 13; Plate 5, fig. 15.]

Eucyrtidium sp. D: This study. [Plate 5, fig. 14.]

Eucyrtidium sp. E: This study. [Plate 4, fig. 12.]

Eucyrtidium sp. G: This study. [Plate 4, fig. 14.]

Excentrodiscus japonicus (Nakaseko and Nishimura) in Kamikuri 2010, p. 86, pl. 2, figs. 2a–3b, 5a–6b, 8a–9b, 11a, 11b, 13a–14b, pl. 4, figs. 19a–19c. [Plate 10, figs. 5–7.]

Gondwanaria campanulaeformis (Campbell and Clark), Funakawa 2000, p. 100, pl. 1, figs. 1a–1d, pl. 7, figs. 1a, 1b, text-fig. 4. [Plate 6, fig. 2.]

Haliommetta miocenica (Campbell and Clark) group in Petrushevskaya and Kozlova 1972, p. 517, pl. 9, figs. 8, 9. [Plate 9, figs. 1–9.]

Heliodiscus sp. A: This study. [Plate 24, fig. 9.]

Hexacontium aff. *arachnoidale* Hollande and Enjumet: This study. [Plate 11, figs. 4, 5.]

Hexacontium minerva Kamikuri 2010, p. 97, pl. 3, figs. 12a–14b, 16a–17b. [Plate 11, figs. 6–9.]

Hexacontium sp. A: This study. [Plate 11, fig. 1.]

Hexacontium sp. B: This study. [Plate 11, figs. 2, 3.]

Hexacontium sp. E: This study. [Plate 12, fig. 1.]

Hexastylus aculeata (Campbell and Clark): *Staurolonche aculeate* Campbell and Clark 1944, p. 13, pl. 2, figs. 2, 3. [Plate 12, fig. 3.]

Hexastylus sp. A: This study. [Plate 12, fig. 2.]

Lamprocyclas hannai (Campbell and Clark): *Calocyclas hannai* Campbell and Clark 1944, p. 48, pl. 6, figs. 21, 22; *Lamprocyclas hannai* (Campbell and Clark) in Sanfilippo *et al.* 1985, fig. 29.8. [Plate 4, figs. 1–6.]

Lamprocyclas sp. C: This study. [Plate 3, figs. 12, 13.]

Lamprotripus cortina (Haeckel) in Matsuzaki *et al.* 2015, p. 64, fig. 8.5. [Plate 2, fig. 4.]

Larcopyle aff. *pylomaticus* (Riedel): This study. [Plate 18, fig. 5.]

Larcopyle buetschlii Dreyer in Matsuzaki *et al.* 2015, p. 33, fig. 6.21–6.28. [Plate 18, figs. 18–22.]

Larcopyle polyacantha (Campbell and Clark): *Larnacantha polyacantha* Campbell and Clark 1944, p. 30, pl. 5, figs. 4-7. [Plate 18, figs. 7-17.]

Larcopyle sp. A: This study. [Plate 18, fig. 6.]

Larcospira moschkovskii Kruglikova in Nigrini and Lombari 1984, p. S91, pl. 13, figs. 2a, 2b. [Plate 20, fig. 17; Plate 22, fig. 8.]

Larcospira quadrangula Haeckel group in Nigrini and Lombari 1984, p. S93, pl. 13, figs. 3a-3c. [Plate 18, fig. 3; Plate 22, figs. 9, 10.]

Liosphaera hexagonia Haeckel in Takahashi and Honjo 1981, p. 146, pl. 1, fig. 23. [Plate 13, fig. 16.]

Lipmanella hister (Petrushevskaya) in Sugiyama and Furutani 1992, p. 209, pl. 13, figs. 7, 8. [Plate 6, fig. 11.]

Lipmanella redondoensis (Campbell and Clark) in Funakawa 2000, p. 108, pl. 4, figs. 2a–3c, pl. 7, figs. 6a–6c, text-fig. 8. [Plate 6, figs. 8–10.]

Lithelius aff. *elliptica* (Ehrenberg): This study. [Plate 18, fig. 4.]
Lithelius klingi Kamikuri 2010, p. 95, pl. 4, figs. 9-14. [Plate 18, fig. 1.]
Lithelius minor Jørgensen group: *Lithelius minor* Jørgensen in Nigrini and Moore 1979, p. S135, pl. 17, figs. 3-4b. [Plate 18, fig. 2.]
Lithomelissa cf. *ultima* Caulet: *Lithomelissa ultima* Caulet 1979, p. 129, pl. 1, figs. 2, 3. [Plate 6, fig. 4.]
Lithomelissa sp. A: This study. [Plate 6, fig. 5.]
Lithomelissa sp. B: This study. [Plate 6, fig. 6.]
Lithopera neotera Sanfilippo and Riedel in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 675, figs. 16.5a-16.4c. [Plate 5, fig. 3.]
Lithopera renzae Sanfilippo and Riedel in Sanfilippo *et al.* 1985, p. 675, figs. 16.4a, 16.5b. [Plate 5, figs. 1, 2.]
Lophoconus bihastatus Clark and Campbell 1945, p. 47, pl. 6, fig. 15. [Plate 3, fig. 6.]
Lophocyrtis aspera (Ehrenberg) in Sanfilippo and Caulet 1998, p. 14, pl. 3A, figs. 5-10, pl. 3B, figs. 1, 2, 5-9, pl. 6, figs. 6-8. [Plate 6, fig. 1.]
Lophospyris laventaensis (Campbell and Clark): *Ceratospyris* (*Lophospyris*) *laventaensis* Campbell and Clark 1944, p. 36, pl. 5, fig. 15. [Plate 7, figs. 1, 2.]
Lychnocanoma magnacornuta Sakai in Motoyama 1996, p. 248, pl. 5, figs. 10a-11. [Plate 2, fig. 5.]
Lychnocanoma nipponica (Nakaseko): *Lychnocanium nipponicum* Nakaseko in Shilov 1995, p. 109, pl. 3, figs. 4a, 4b; *Lychnocanoma nipponica nipponica* (Nakaseko) in Morley and Nigrini 1995, p. 81, pl. 5, figs. 4, 5; *Lychnocanoma nipponica* (Nakaseko) type A in Kamikuri 2017, pl. 6, figs. 1a, 1b. [Plate 2, figs. 1, 2.]
Lychnodictyum aff. *audax* Riedel: This study. [Plate 2, fig. 3.]
*Perichlamydium scutaeform*e Campbell and Clark 1944, p. 24, pl. 3, figs. 14-16. [Plate, 20 figs. 10-15; Plate 23, figs. 9-12.]
Perichlamydium sp. K: This study. [Plate 24, figs. 7, 8.]
Perichlamydium sp. P: This study. [Plate 20, fig. 16.]
Phormospyris stabilis (Goll): *Phormospyris stabilis stabilis* (Goll) in Nigrini and Lombari 1984, p. N59, pl. 19, fig. 7. [Plate 7, fig. 7.]
Phormostichoartus fistula Nigrini in Nigrini and Lombari 1984, p. N183, pl. 31, figs. 6a-6c. [Plate 1, fig. 13.]
Phorticium clevei (Jørgensen) in Matsuzaki *et al.* 2015, p. 32, figs. 6.9, 6.10. [Plate 19, figs. 11-13.]
Phorticium sp. A: This study. [Plate 19, figs. 8-10.]
Polysolenia murrayana (Haeckel) in Nigrini and Moore 1979, p. S17, pl. 2, figs. 4a, 4b. [Plate 17, fig. 11.]
Polysolenia pseudarktios (Caulet): *Acrosphaera pseudarktios* Caulet 1986, p. 226, pl. 1, fig. 8. [Plate 17, fig. 10.]
Saturnalis circularis Haeckel in Takahashi 1991, p. 78, pl. 15, figs. 15-18. [Plate 13, fig. 11.]
Spirocyrtis subscalaris Nigrini in Nigrini and Lombari 1984, p. N199, pl. 32, figs. 7a, 7b. [Plate 1, fig. 14.]
Spongaster sp. A: This study. [Plate 21, fig. 13.]
Spongodiscus cauleti Kamikuri 2010, p. 94, pl. 4, figs. 1-4. [Plate 24, figs. 5, 6.]
Spongodiscus resurgens Ehrenberg in Petrushevskaya and Kozlova 1972, p. 528, pl. 21, fig. 5. [Plate 21, figs. 1-12.]
Spongodiscus sp. D: This study. [Plate 21, fig. 14.]
Spongopyle osculosa Dreyer in Nigrini and Moore 1979, p. S115, pl. 15, fig. 1. [Plate 22, figs. 5-7.]
Spongotrochus sol Campbell and Clark 1944, p. 28, pl. 4, figs. 7, 9-11. [Plate 24, figs. 1, 2.]
Spongotrochus sp. B: This study. [Plate 22, fig. 1.]
Spongotrochus sp. C: This study. [Plate 22, figs. 2-4.]
Spongotrochus sp. Z: This study. [Plate 24, figs. 3, 4.]
Spongurus cylindricus Haeckel in Takahashi 1991, p. 85, pl. 17, figs. 6-9. [Plate 19, fig. 5.]
Stichocorys delmontensis (Campbell and Clark) in Kamikuri 2012, p. 24, pl. 1, figs. 1-9, pl. 3, figs. 1-6. [Plate 5, fig. 7.]
Stichocorys peregrina (Riedel) in Kamikuri 2012, p. 25, pl. 2, figs. 1-9, pl. 3, figs. 7-12. [Plate 5, fig. 6.]
Stylatractus neptunus Haeckel in Petrushevskaya and Kozlova 1972, p. 520, pl. 11, fig. 11. [Plate 16, figs. 3-5.]
Stylatractus santaeannae (Campbell and Clark) in Petrushevskaya and Kozlova 1972, p. 520, pl. 11, fig. 10. [Plate 16, fig. 9.]
Stylatractus universus Hays in Morley and Nigrini 1995, p. 82, pl. 2, fig. 3. [Plate 14, fig. 12.]
Stylodictya ornata Campbell and Clark 1944, p. 26, pl. 3, fig. 20. [Plate 23, figs. 1-6.]
Stylodictya tenuispina Jørgensen 1905, p. 118, pl. 10, fig. 39. [Plate 23, figs. 7, 8.]
Stylodictya sp. A: This study. [Plate 20, figs. 5-9.]
Stylosphaera radiosa Ehrenberg in Petrushevskaya and Kozlova 1972, p. 520; *Amphisphaera radiosa* (Ehrenberg) group in Petrushevskaya 1975, p. 570, pl. 2, figs. 18-20; *Lithatractus santaennae pusillus* Campbell and Clark 1944, p. 19, pl. 2, figs. 23-25. [Plate 14, figs. 1-3.]
Stylosphaera timmsi (Campbell and Clark): *Stylosphaera* (?) *timmsi* (Campbell and Clark) in Sugiyama and Furutani 1992, p. 203, pl. 12, figs. 3, 4, pl. 15, figs. 1, 2. [Plate 14, figs. 8-10.]
Styptosphaera spumacea Haeckel in Vitukhin 1993, pl. 27, fig. 6, pl. 28, fig. 5. [Plate 16, figs. 1, 2.]
Tetrapyle circularis/fruticosa group: *Tetrapyle circularis* Haeckel in Zhang and Suzuki, 2017, p. 15, figs. 8.1-8.15, 9.1-9.9; *Tetrapyle fruticosa* (Tan and Chen) in Zhang and Suzuki 2017, p. 18, figs. 10.1-10.4; *Tetrapyle* spp. (juvenile form) in Zhang and Suzuki 2017, p. 19, figs. 11.1-11.18. [Plate 19, figs. 6, 7.]
Thecosphaera dedoensis Nakaseko in Motoyama 1996, pl. 2, fig. 2. [Plate 13, figs. 1-8.]
Thecosphaera sp. A: This study. [Plate 13, figs. 9, 10.]
Thecosphaera sp. B: This study. [Plate 13, figs. 12-15.]
Theocorys perforalvus O'Connor 1997, p. 86, pl. 4, figs. 9-12, pl. 10, figs. 9-14, pl. 11, fig. 6. [Plate 6, fig. 12.]
Thecorythium sp. A: This study. [Plate 3, fig. 7.]

Tholospyris kantiana (Haeckel) in Nigrini and Lombari 1984, p. N71, pl. 20, figs. 2a–2c. [Plate 7, fig. 10.]

Acknowledgement

The authors are grateful to Dr. Kenji M. Matsuzaki for reviewing the manuscript. Samples were provided by the Ocean Drilling Program (ODP).

This work was also supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Number 15K17780 (S. Kamikuri).

References

Barron, J. A., Lyle, M. and Koizumi, I. (2002) Late Miocene and early Pliocene biosiliceous sedimentation along the California margin. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, **19**, 161–169.

Bjørklund, K. R. and Goll, R. M. (1979) Internal skeletal structures of Collosphaera and Trisolenia: a case of repetitive evolution in the Collosphaeridae (Radiolaria). *Jour. Paleontol*., **53**, 1293–1326.

Blueford, R. (1982) Miocene actinommid Radiolaria from the equatorial Pacific. *Micropaleontology*, **28**, 189–213.

Burridge, A. K., Bjørklund, K. R., Kruglikova, S. B. and Hammer, Ø. (2014) Inter- and intraspecific morphological variation of four shelled Actinomma taxa (Radiolaria) in polar and subpolar regions. *Marine Micropaleontol*., **110**, p. 50–71.

Campbell, A. S. and Clark, B. L. (1944) Miocene radiolarian faunas from southern California. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, **51**, 1–76.

Caulet, J. -P. (1979) Les Radiolaires des boues superficielles de la Méditerranée. *Bulletin du Muséum National d'Histoire Naturelle, Série 3*, **39**, 217–287.

Caulet, J. -P. (1986) Radiolarians from the southwest Pacific. *In* Kennett, J. P., von der Borch, C. C. *et al.*, eds., *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **90**, Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office, 835–861.

Clark, B. L. and Campbell, A. S. (1942) Eocene radiolarian faunas from the Mt. Diablo area, California. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap*., **39**, 1–112.

Clark, B. L. and Campbell, A. S. (1945) Radiolaria from the Kreyenhagen formation near Los Banos, California. *Geol. Soc. Amer., Mem*., **10**, 1–66.

Dumitrica, P. (2017) Contribution to the knowledge of the Entactinaria radiolarian family Rhizosphaeridae Haeckel and description of some new genera and species. *Revue de Micropaléontol.*, **60**, 469–491.

Ehrenberg, C. G. (1872) Mikrogeologische Studien über das kleinste Leben der Meeres-Tiefgrunde aller Zonen und dessen geologischen Einfluss. *Abhandlungen der K. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Jahrg*, **1872**, 131–399.

Foreman, H. P. (1973) Radiolaria of Leg 10 with systematics and ranges for the families Amphipyndacidae, Artostrobiidae, and Theoperidae. *In* Worzel, J.L., Bryant, W., *et al.*, eds., I*nit. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **10**, Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office, 407–474.

Funakawa, S. (2000) Internal skeletal structures of the Cenozoic genera *Gondwanaria*, *Lipmanella* and *Lithomelissa* (Plagiacanthidae, Nassellaria) and their taxonomy. *Micropaleontology*, **46**, 97–121.

Haeckel, E. (1861a) Über neue, lebende Radiolarian des Mittelmeeres und legte die dazu gehörigen Abbildungen. *Monatsberichte der Königlich Preu βischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1860, 794–817.

Haeckel, E. (1861b) Abbildungen and Diagnosen neuer Gattungen und Arten von lebenden Radiolarien des Mittelmeeres, 1860. *Monatsberichte der Königlich Preu βischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1860, 835–845.

Haeckel, E. (1879) *Natürliche Schöpfungsgeschichte*. Reimer, Berlin, 1–718.

Haeckel, E. (1882) Entwurf eines Radiolarien-System auf Grund von Studien der Challenger Radiolarien. *Jenaische Zeitschrift Naturwissenschaft*, **15**, 418–472.

Haeckel, E. (1887) Report on the Radiolaria collected by H. M. S. Challenger during the years 1873-76. *Report Voyage Challenger, Zoology*, **18**, 1–140.

Jackett, S. -J., Baumgartner, P. O. and Bandini, A. N. (2008) A new low-latitude late Paleocene-early Eocene radiolarian biozonation based on unitary associations: applications for accreted terranes. *Stratigraphy*, **54**, 39–62.

Jørgensen, E. (1905) The protist plankton and the diatoms in bottom samples. *Bergens Museum Skrift*, **7**, 49–151.

Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Revue de Micropaléontol*., **53**, 85–106.

Kamikuri, S. (2012) Evolutionary changes in the biometry of the fossil radiolarian Stichocorys peregrina lineage in the eastern equatorial and eastern North Pacific. *Marine Micropaleontol*., **90**, 13–28.

Kamikuri, S. (2017) Late Neogene radiolarian biostratigraphy of the eastern North Pacific ODP Sites 1020/1021. *Paleontol. Res*., **21**, 230–254.

Kling, S. A. (1973) Radiolaria from the eastern North Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 18. *In* Kulm, L. D., von Huene, R., *et al.*, *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **18**, Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office, 617–671.

LaRiviere, J. P., Ravelo, A. C., Crimmins, A., Dekens, P. S., Ford, H. L., Lyle, M. and Wara, M. W. (2012) Late Miocene decoupling of oceanic warmth and atmospheric carbon dioxide forcing. *Nature*, **486**, 97–100.

Lombari, G. and Lazarus, D. B. (1988) Neogene cycladophorid radiolarians from North Atlantic, Antarctic, and North Pacific deep-sea sediments. *Micropaleontology*, **34**, 97–135.

Lyle, M., Koizumi, I., Richter, C., Behl, R. J., Bodén, P., Caulet, J. -P., Delaney, M. L., deMenocal, P., Desmet, M., Fornaciari, E., Hayashida, A., Heider, F., Hood, J., Hova,, S. A., Janecek, T. R., Janik, A. G., Kennett, J., Lund, D., Castillo, M. L. M., Maruyama, T., Merrill, R. B., Mossman, D. J., Pike, J., Ravelo, A. C., Vera, G. A. R., Stax, R., Tada, R., Thurow, J. and Yamamoto, M. (1997) *Proc. Ocean Drilling Program, Init. Rep*., **167**, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1–1378.

Matsuzaki, K. M., Suzuki, N. and Nishi, H. (2015) Middle to Upper Pleistocene polycystine radiolarians from Hole 902-C9001C, northwestern *Pacific. Paleontol. Res*., **19**, 1–77.

Moore, T. C. Jr. (1972) Mid-Tertiary evolution of the radiolarian genus Calocycletta. *Micropaleontology*, **18**, 144–152.

Morley, J. J. and Nigrini, C. (1995) Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific Sites 881, 884, 885, 886 and 887. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., Scholl, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, **145**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 55–91.

Motoyama, I. (1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221–262.

Nigrini C. and Lombari, G. (1984) A guide to Miocene Radiolaria. *Cushman Found. Foram. Res., Spec. Pub*., **22**, S1-S102, N1-N206.

Nigrini, C. and Moore, T. C., Jr. (1979) A guide to modern Radiolaria. *Cushman Found. Foram. Res., Spec. Pub*., **16**, S1-S142, N1-N106.

O'Connor, B. (1997) New radiolarian from the Oligocene and early Miocene of Northland, New Zealand. *Micropaleontology*, **43**, 63–100.

Perez-Guzman, A. M. (1985) Radiolarian biostratigraphy of the late Miocene in Baja California and the Tres Marias Islands, Mexico. *Micropaleontology*, **31**, 320–334.

Perez-Guzman, A. M. and Casey, R. E. (1986) Paleoceanographic reconstructions from radiolarian-bearing Baja California and adjacent sections. *In* Casey, R. E. and Barron, J. A., eds., *Siliceous Microfossil and Microplankton of the Monterey Formation and Modern Analogs*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, **45**, 55–68.

Petrushevskaya, M. G. (1975) Cenozoic radiolarians of the Antarctic, Leg 29, DSDP. *In* Kennett, J. P., Houtz, R. E., *et al.*, *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **29**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 541–675.

Petrushevskaya, M. G. and Kozlova, G. E. (1972) Radiolaria, Leg 14, Deep Sea Drilling Project. *In* Hayes, D. E., Pimm, A. C., *et al.*, *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **14**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 495–648.

Poore, R. Z., McDougall J. A., Barron, J. A., Brabb, E. E. and Kling, S. A. (1981) Microfossil biostratigraphy and biochronology of the type Relizian and Luisian stages of California. *In* Garrison, R. E. and Douglas, R. G., eds., *The Monterey Formation and Related Siliceous Rocks of California*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, **15**, 15–41.

Popova, I. (1989) New insight on the systematics of some Theopiliinae (Radiolaria). *In* Anonymous ed., *Paleontologo-Stratigraphicheskie Issledavaniya Fanerozoya, Dal'nego Vostoka*, Dal'nevostochniy Otdel Akademii Nauka SSSR, Vladivostok, 68–77, 131, and 143–145. (*in Russian; original title translated*).

Rowell, H. C. (1981) Diatom biostratigraphy of the Monterey Formation, Palos Verdes Hills, California. *In* Garrison, R. E. and Douglas, R. G., eds., *The Monterey Formation and Related Siliceous Rocks of California*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, **15**, 55–70.

Sakai, T. (1980) Radiolarians from Sites 434, 435, and 436, Northwest Pacific, Leg 56, Deep Sea Drilling Project. *In* Scientific Party, *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **56/57**, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 695–733.

Sanfilippo, A. and Caulet, J.-P. (1998) Taxonomy and evolution of Paleogene Antarctic and tropical Lophocyrtid radiolarians. *Micropaleontology*, **44**, 1–43.

Sanfilippo, A., Westberg-Smith, M. J. and Riedel, W. R. (1985) Cenozoic radiolaria. *In* Bolli, H. M., Saunders, J. B. and Perch-Nielsen, K., eds., *Plankton Stratigraphy*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 631–712.

Shilov, V. V. (1995) Miocene-Pleistocene radiolarians from Leg 145, North Pacific. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., Scholl, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, **145**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 93–116.

Sugiyama, K. and Furutani, H. (1992). Middle Miocene radiolarians from the Oidawara Formation, Mizunami Group, Gifu Prefecture, central Japan. *Bull. Mizunami Fossil Mus*., **19**, 199-213.

Suzuki, N., Ogane, K. and Chiba, K. (2009) Middle Eocene polycystine radiolarians from the Site 1172, Leg 189, Southwest Pacific. *News Osaka Micropaleontol. (NOM), Spec. Vol*., no. 14, 239–296.

Takahashi, K. (1991) Radiolaria: flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic. *Ocean Biocoenosis Series*, no. 3, Woods Hole Oceanographic Institution, 1–303.

Takahashi, K. and Honjo, S. (1981) Vertical flux of Radiolaria: A taxon-quantitative sediment trap study from the western tropical Atlantic. *Miocropaleontology*, **27**, 140–190.

Takemura, A. (1992) Radiolarian Paleogene biostratigraphy in the Southern Indian Ocean, Leg 120. *In* Wise, S. W., Jr., Schlich, R., *et al.*, *Proc. ODP, Sci. Results*,

120, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 735–756.
Vitukhin, D. I. (1993) Subdivision of the Russian Far East Cenozoic sediments based on Radiolaria. Transactions, *Geol. Inst., Russian Academi Sci*., **485**, p. 1–105. (in Russian with English abstract).
Weaver, F. M., Casey, R. E. and Perez, A. M. (1981) Stratigraphic and paleoceanographic significance of early Pliocene to middle Miocene radiolarian assemblages from Northern to Baja California. *In* Garrison, R. E. and Douglas, R. G., eds., *The Monterey Formation and Related Siliceous Rocks of California*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, **15**, 71–86.
Zhang, L. and Suzuki, N. (2017) Taxonomy and species diversity of Holocene pylonioid radiolarians from surface sediments of the northeastern Indian Ocean. *Palaeontol. Electron*., **20.3.48A**, 1–68.

Recieved December 19, 2017
Accepted September 18, 2018
Published on-line January 18, 2019

北東太平洋における国際深海掘削計画 (ODP) 1021 地点の中部および上部中新統から産出した放散虫化石

上栗伸一

要　旨

北東太平洋における国際深海掘削計画 (ODP) 1021地点の中部および上部中新統から, 合計149種の放散虫化石が産出した. その写真を24枚のプレートに示した. これらの分類群にはActinommoidea科, Eurcyrtidioidea科, Hexastylioidea科, Litheliidae科, Lychnocanoidea科およびSpongodiscidae科を含む40の未同定種が含まれている. 本論文において*Lychnocanoma californica*を新種として記載した.

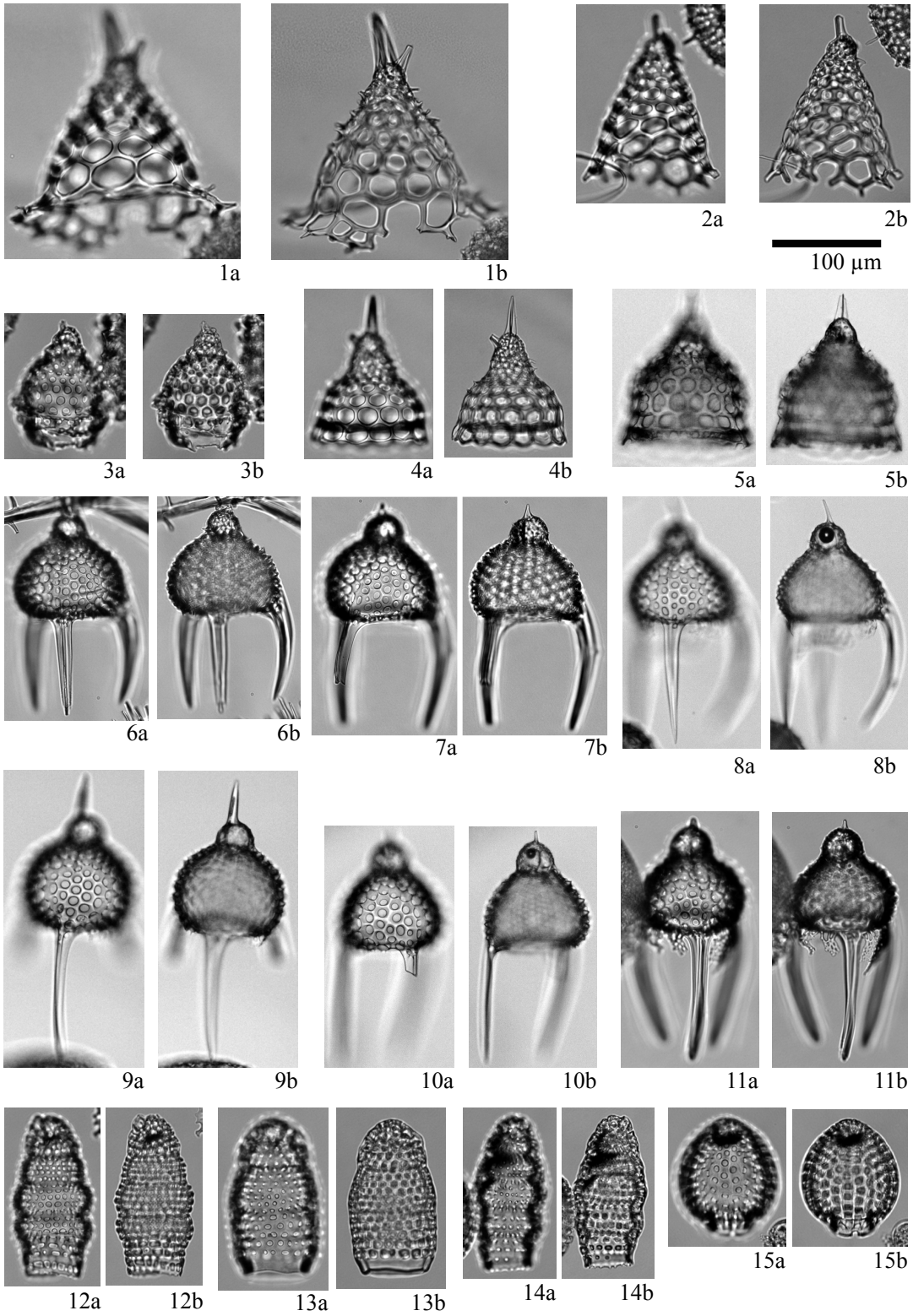


Plate 1 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Cycladophora cabrilloensis* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 2: *Cycladophora cosma* Lombari and Lazarus (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 3: *Cycladophora klingi* Lombari and Lazarus (Sample 1021B-26X-6, 20-22 cm, 9.0 Ma); 4: *Cycladophora bicornis* (Popofsky) (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 5: *Cycladophora sphaeris* (Popova) (Sample 1021B-22X-6, 20-22 cm, 7.8 Ma); 6–11: *Lychnocanoma californica* n. sp. (6–8, 11: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 9, 10: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 12: *Botryostrobus bramlettei* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13: *Phormostichoartus fistula* Nigrini (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 14: *Spirocyrtis subscalaris* Nigrini (Sample 1021B-26X-6, 20-22 cm, 9.0 Ma); 15: *Carpocanium favosa* (Haeckel) (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

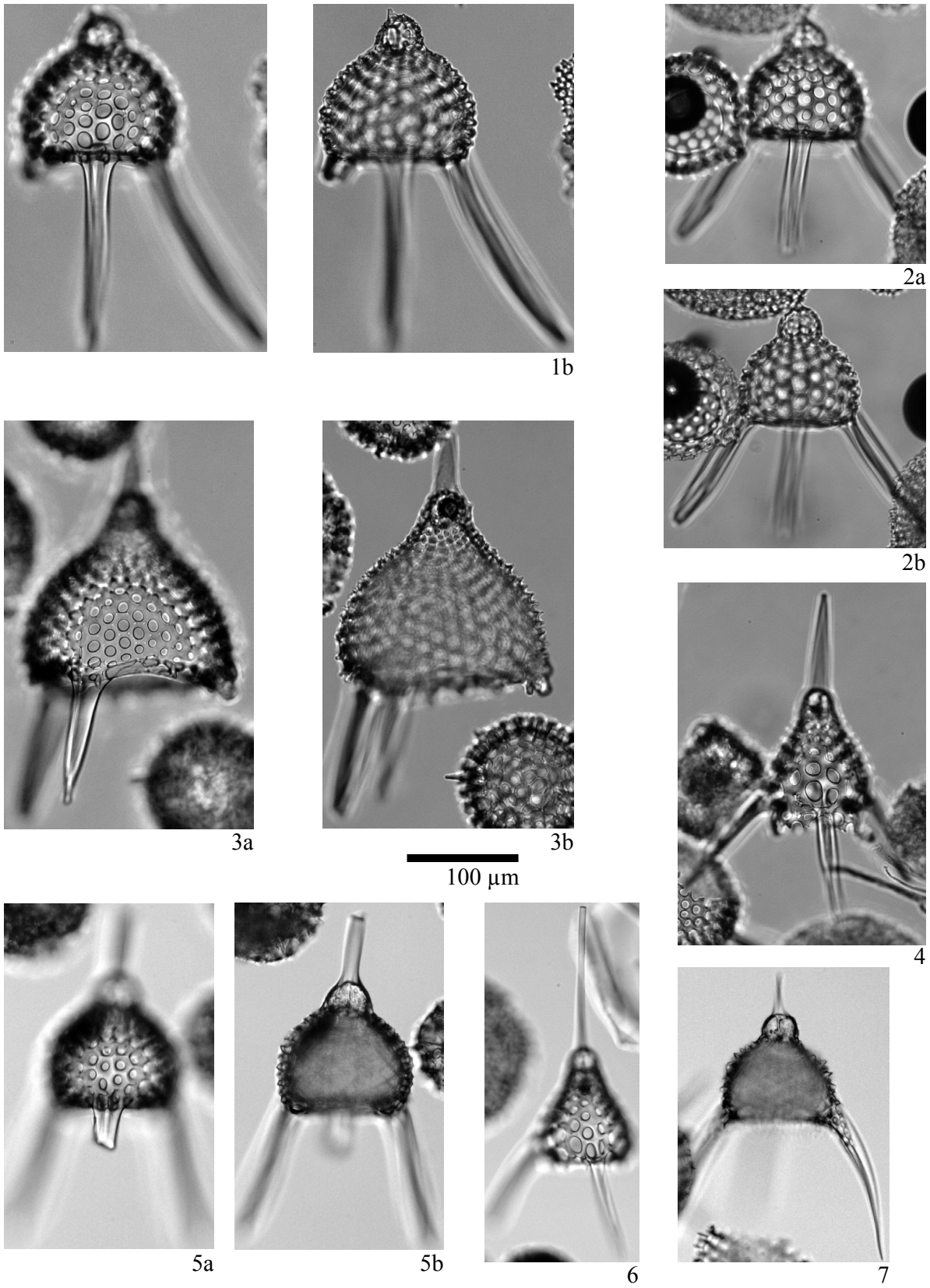


Plate 2 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Lychnocanoma nipponica* (Nakaseko) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 3: *Lychnodictyum* aff. *audax* Riedel (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 4: *Lamprotripus cortina* (Haeckel) (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 5: *Lychnocanoma magnacornuta* Sakai (Sample 1021B-29X-4, 70-72 cm, 10.2 Ma); 6: *Lamprotripus splendens* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-29X-2, 120-122 cm, 10.1 Ma); 7: *Pterocanium* sp. A (Sample 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma).

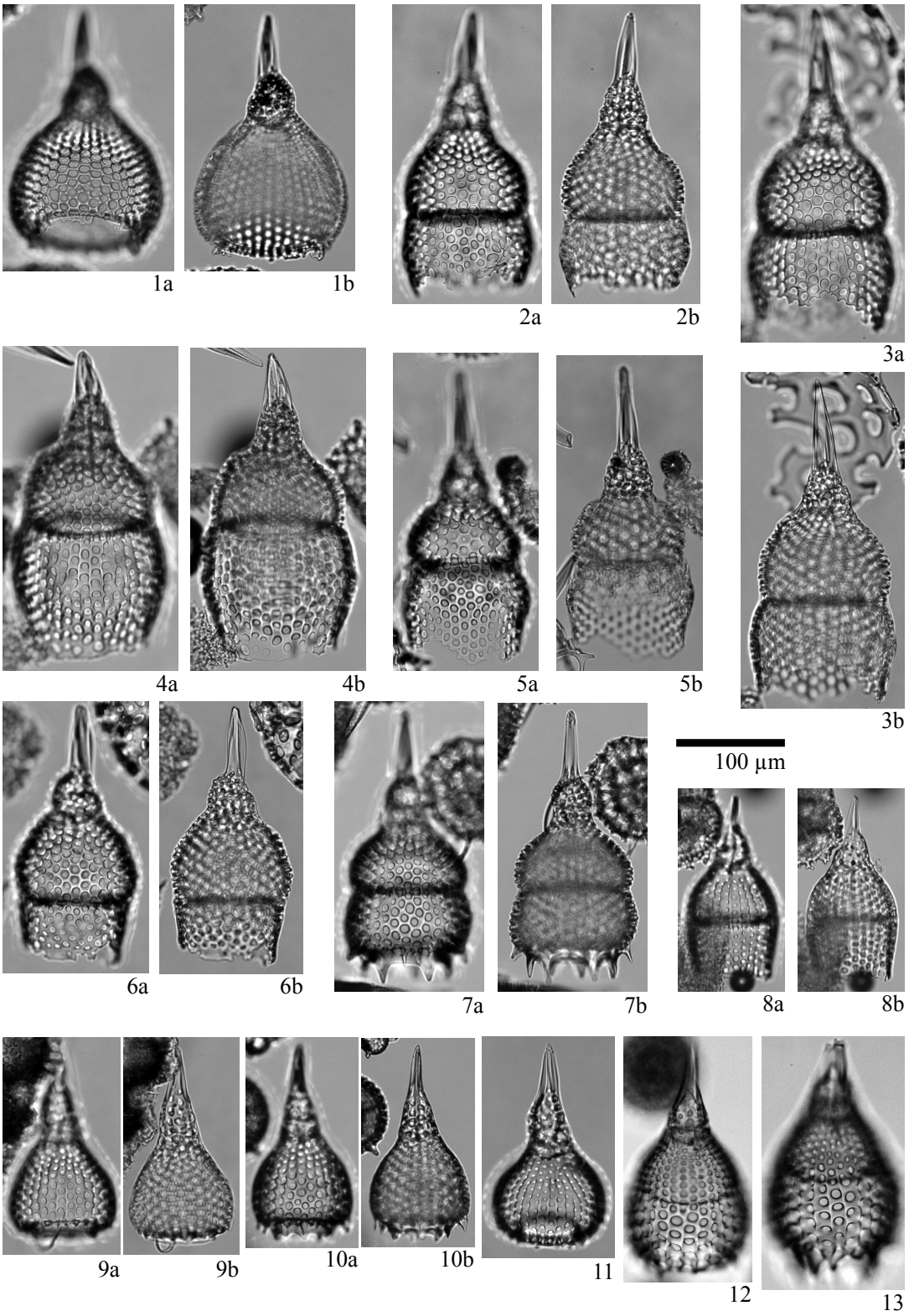


Plate 3 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Calocycletta caepa* Moore (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 2, 3: *Calocycletta* sp. C (2: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.8 Ma; 3: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 4: *Calocycletta* sp. B (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5: *Calocycletta* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 6: *Lophoconus bihastatus* Clark and Campbell (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 7: *Theocorythium* sp. A (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 8: *Albatrossidium* sp. C (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9, 10: *Anthocyrtidium* sp. A (9: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 10: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 11: *Anthocyrtidium* sp. B (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 12, 13: *Lamprocyclas* sp. C (Sample 1021B-29X-4, 70-72 cm, 10.2 Ma).

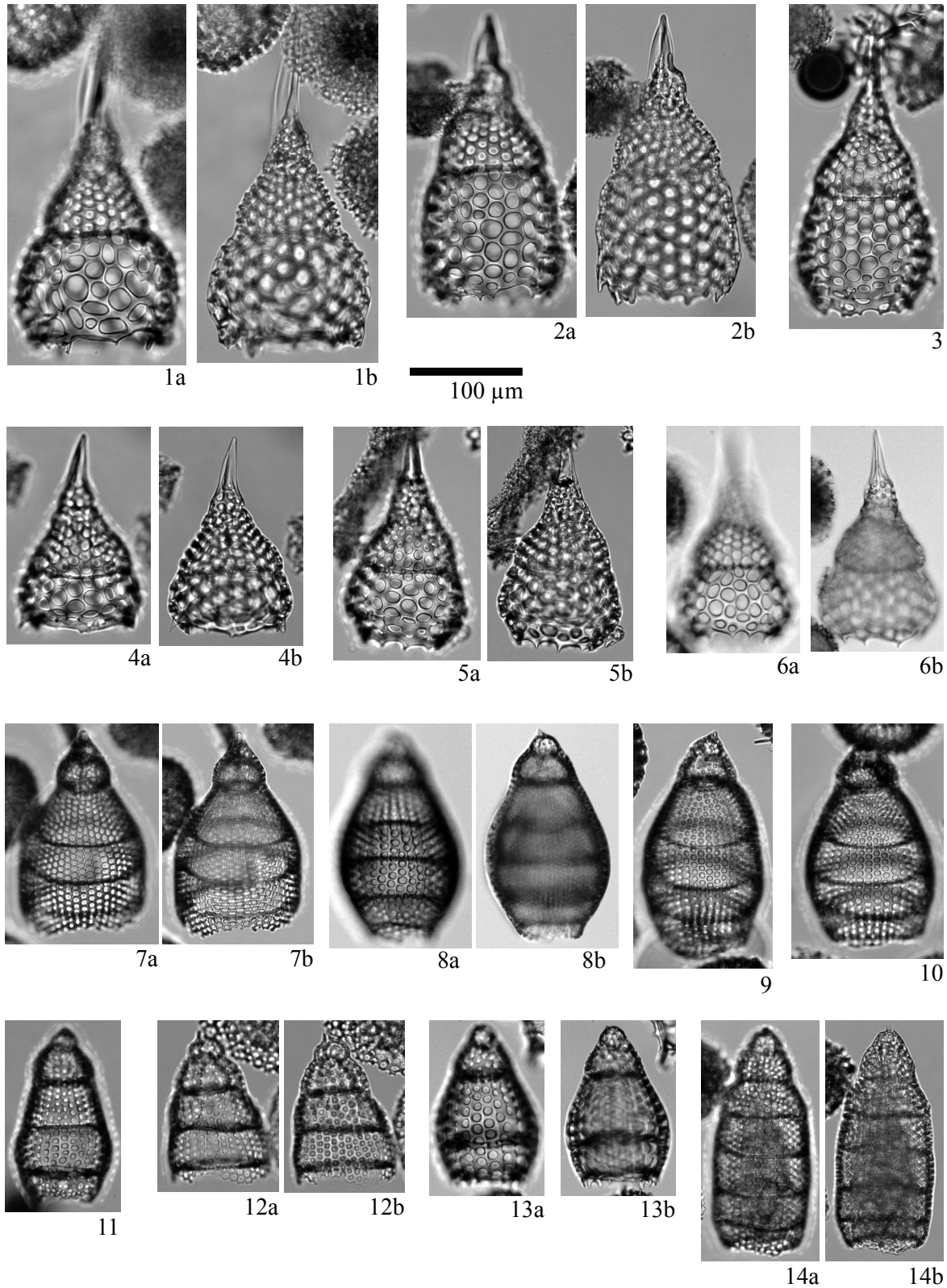


Plate 4 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–3: *Lamprocyclas hannai* (Campbell and Clark) type A (1, 3: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 2: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 4–6: *Lamprocyclas hannai* (Campbell and Clark) type B (4, 5: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 6: 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma); 7: *Eucyrtidium hexagonatum* Haeckel (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 8: *Eucyrtidium calvertense* Martin (Sample 1021B-31X-6, 20-22 cm, 11.6 Ma); 9–11: *Eucyrtidium cienkowskii* Haeckel group (9, 10: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 11: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 12: *Eucyrtidium* sp. E (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13: *Eucyrtidium inflatum* Kling (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 14: *Eucyrtidium* sp. G (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

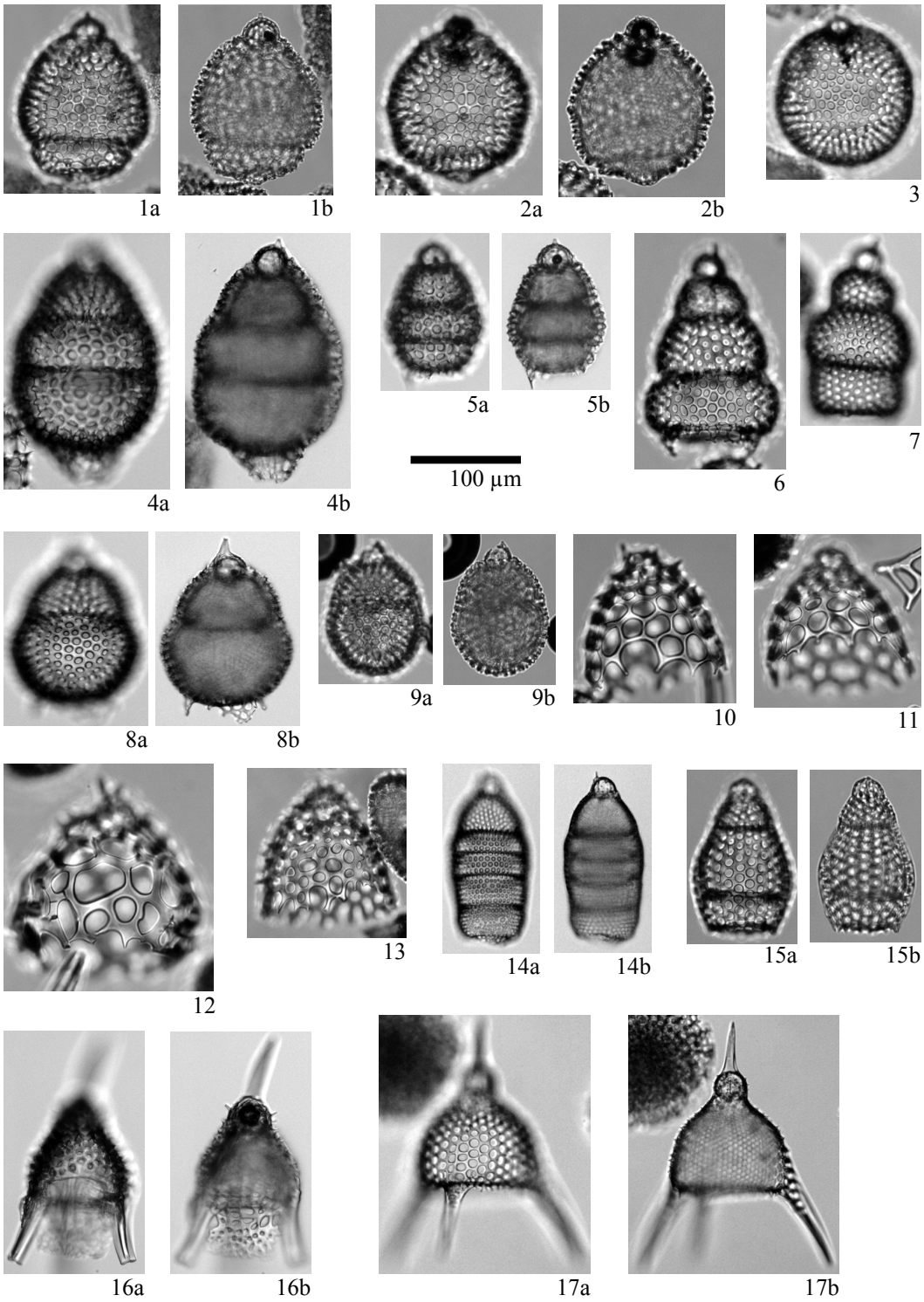


Plate 5 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Lithopera renzae* Sanfilippo and Riedel (1: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 2: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 3: *Lithopera neotera* Sanfilippo and Riedel (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 4: *Cyrtocapsella cornuta* Haeckel (Sample 1021B-33X-4, 70-72 cm, 12.7 Ma); 5: *Cyrtocapsella tetrapera* Haeckel (Sample 1021B-33X-4, 70-72 cm, 12.7 Ma); 6: *Stichocorys peregrina* (Riedel) (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 7: *Stichocorys delmontensis* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-31X-6, 20-22 cm, 11.6 Ma); 8, 9: *Cyrtocapsella japonica* (Nakaseko) (8: Sample 1021B-33X-4, 70-72 cm, 12.7 Ma; 9: Sample 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma); 10, 11: *Ceratocyrtis* aff. *mashae* Bjørklund (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 12: *Ceratocyrtis* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13: *Ceratocyrtis* sp. C (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 14: *Eucyrtidium* sp. D (Sample 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma); 15: *Eucyrtidium inflatum* Kling (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 16: *Dictyophimus* sp. A (Sample 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma); 17: *Pterocanium* sp. A (Sample 1021B-32X-4, 70-72 cm, 12.1 Ma).

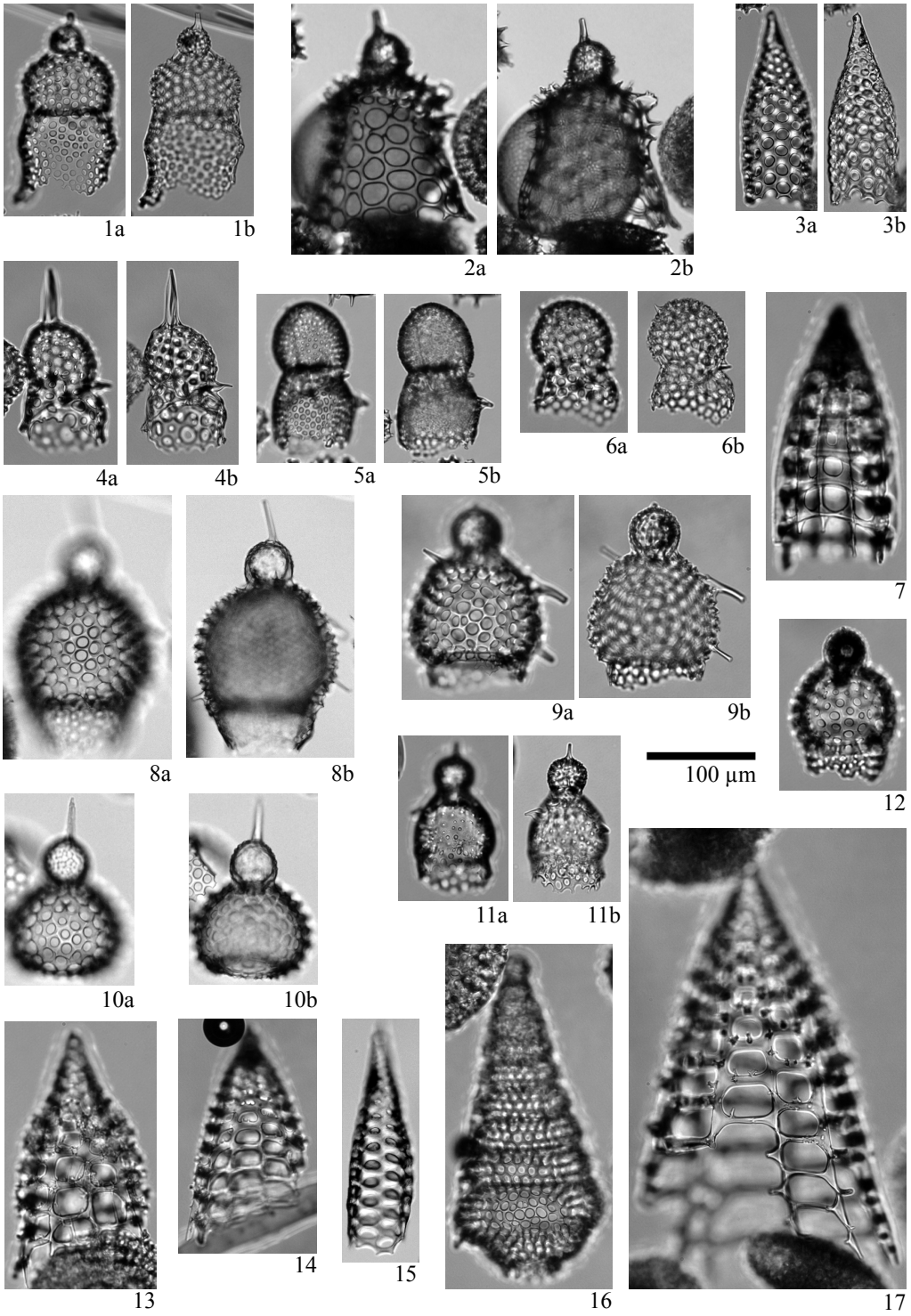


Plate 6 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Lophocyrtis aspera* (Ehrenberg) (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 2: *Gondwanaria campanulaeformis* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 3: *Cornutella paloverdensis* Campbell and Clark (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 4: *Lithomelissa* cf. *ultima* Caulet (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5: *Lithomelissa* sp. A (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 6: *Lithomelissa* sp. B (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 7: *Cinclopyramis murrayana* Haeckel (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 8−10: *Lipmanella redondoensis* (Campbell and Clark) (8: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 9: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 10: 1021B-33X-4, 70-72 cm, 12.7 Ma); 11: *Lipmanella hister* (Petrushevskaya) (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 12: *Theocorys perforalvus* O'Connor (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13, 14, 17: *Cinclopyramis circumtexta* (Haeckel) group (13, Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma; 14: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 17: Sample 1021B-24X-1, 120-122 cm, 8.1 Ma); 15: *Cornutella profunda* Ehrenberg (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 16: *Cyrtolagena* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

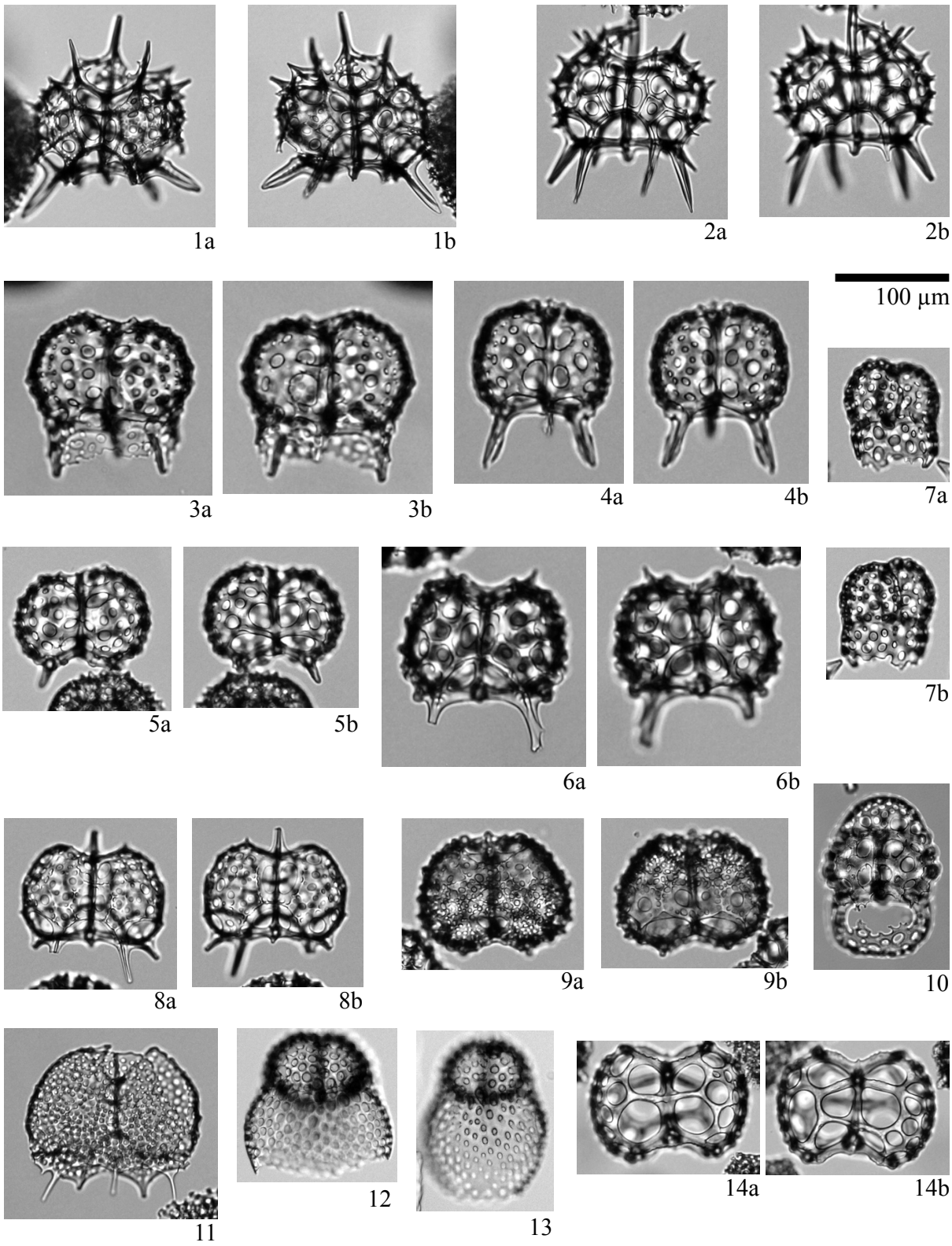


Plate 7 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Lophospyris laventaensis* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 3–5: *Dendrospyris* sp. A (3, 4: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 5: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 6: *Dendrospyris* sp. B (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 7: *Phormospyris stabilis* (Goll) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 8: *Dendrospyris* sp. C (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9: *Dendrospyris* sp. D (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 10: *Tholospyris kantiana* (Haeckel) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 11: *Dendrospyris* sp. E (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 12, 13: *Dendrospyris* aff. *bursa* (Sanfilippo and Riedel) (Sample 1021B-29X-2, 120-122 cm, 10.1 Ma); 14: *Dendrospyris* sp. F (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

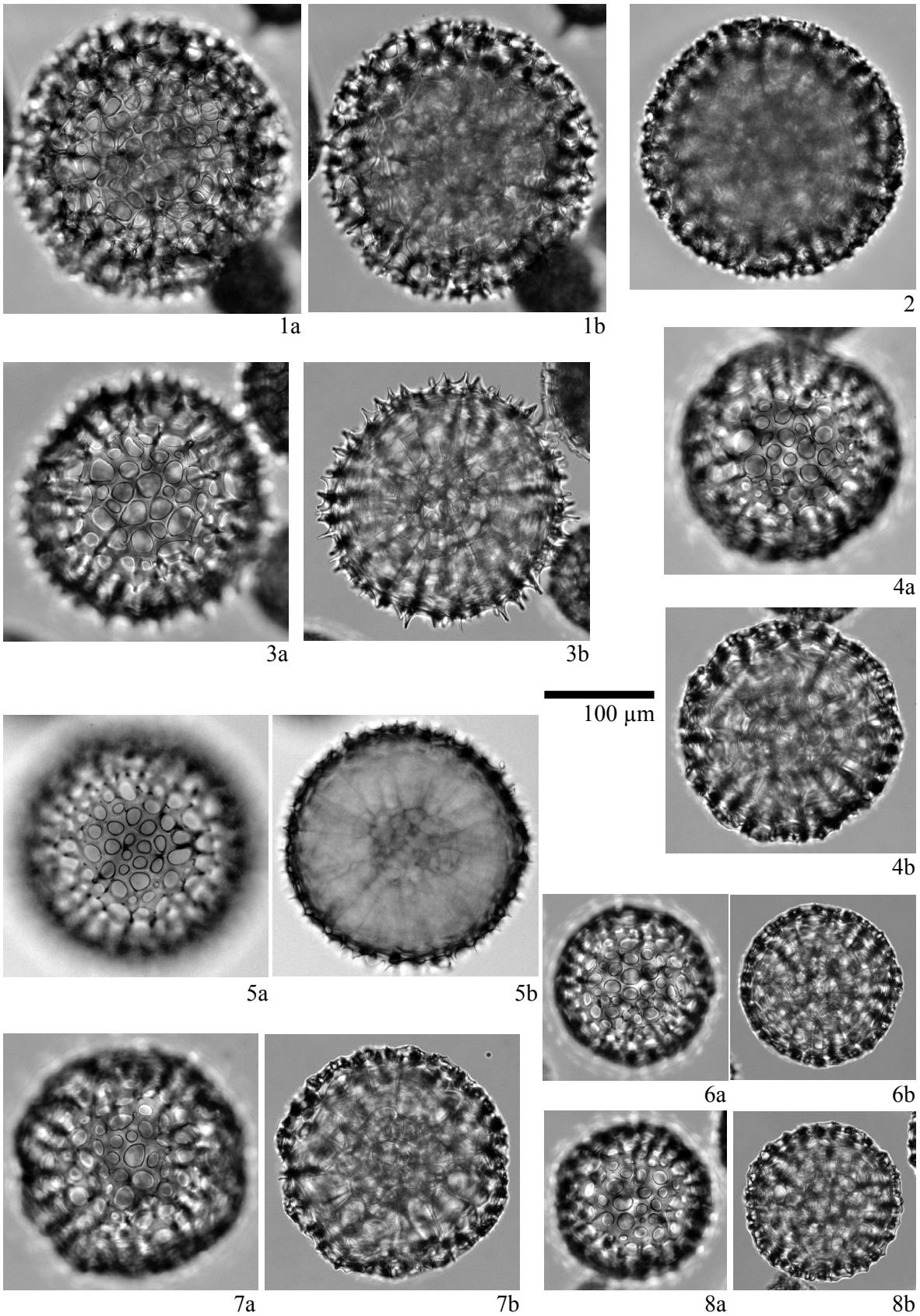


Plate 8 Illustrations of the encountered radiolarians. 1−8: *Rhizosphaera churchi* (Campbell and Clark) group (1−4, 7: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 5: Sample 1021B-27X-1, 20-22 cm, 9.1 Ma; 6: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 8: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

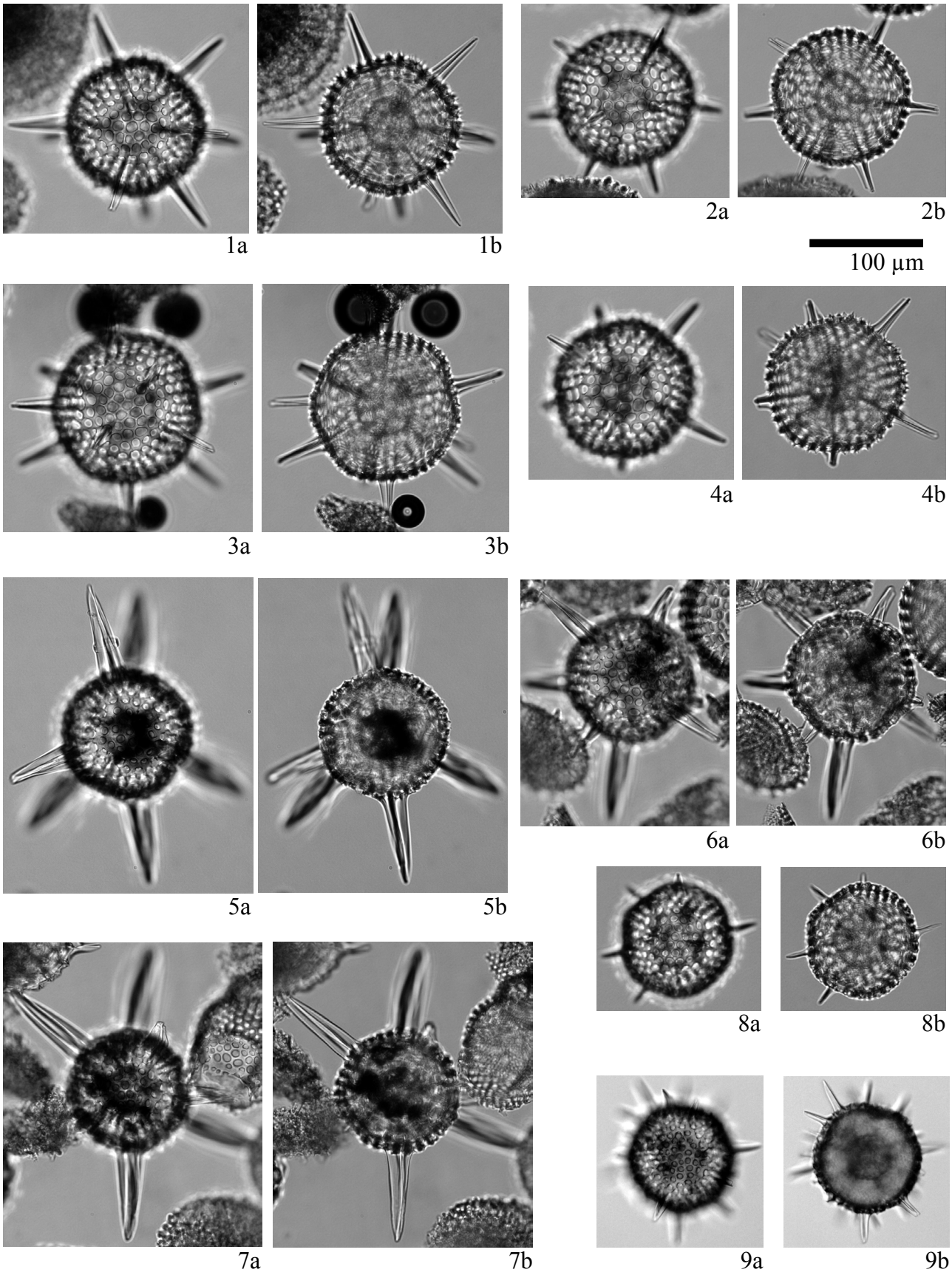


Plate 9 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–9: *Haliommetta miocenica* (Campbell and Clark) group (1, 2, 4: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 3, 6–8: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 5: 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma).

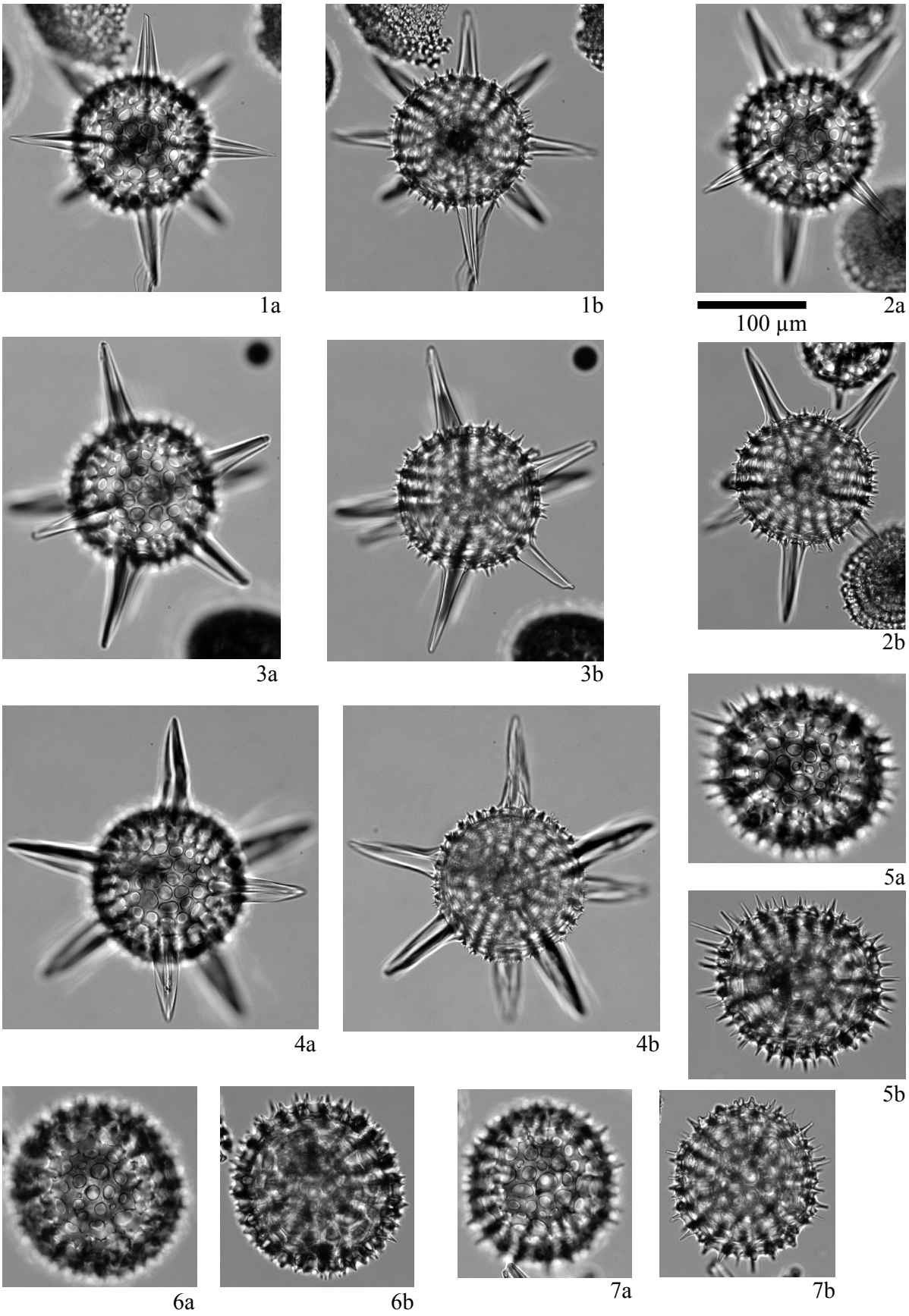


Plate 10 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–4: *Actinomma hootsi* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5–7: *Excentrodiscus japonicus* (Nakaseko and Nishimura) (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma).

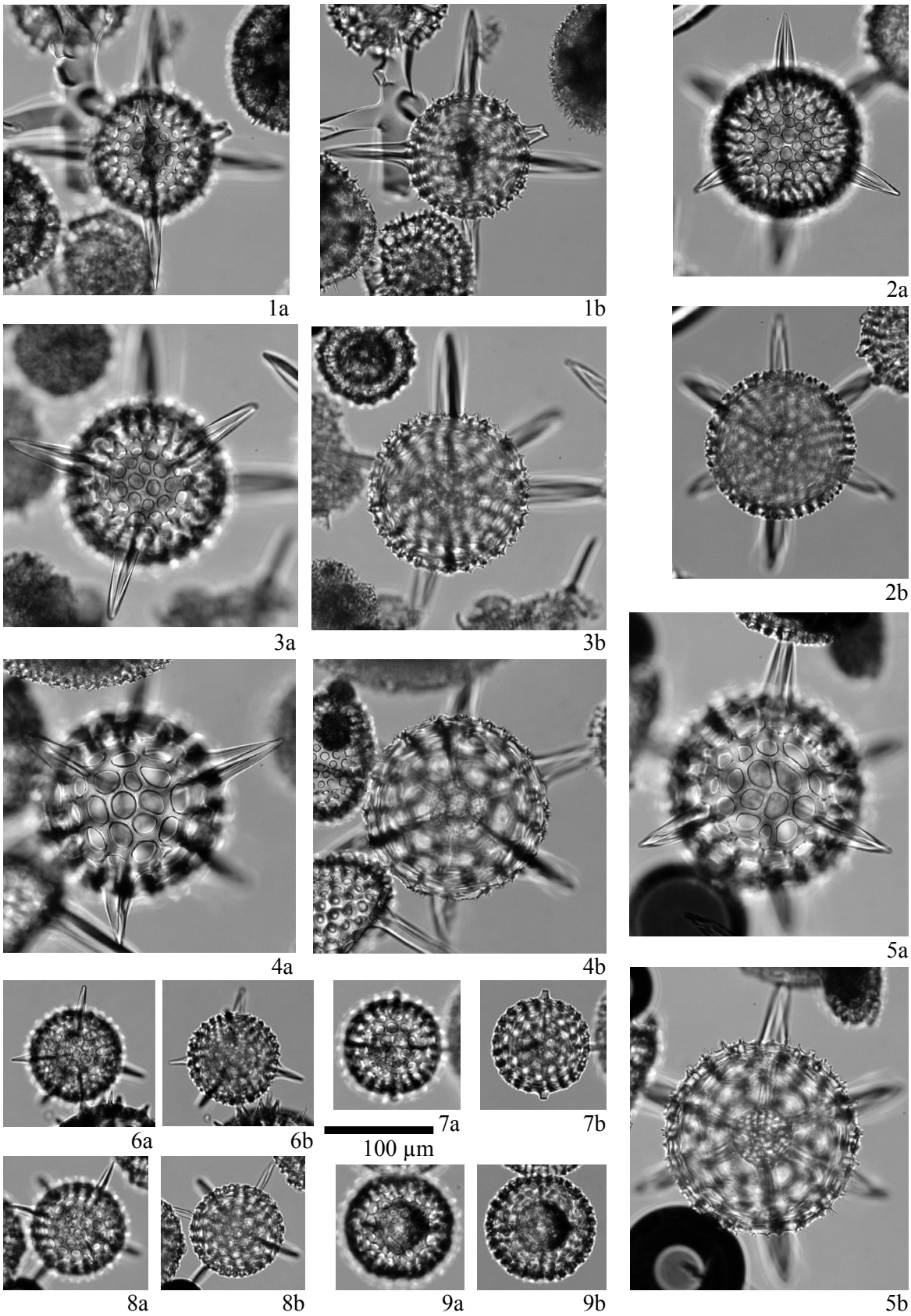


Plate 11 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Hexacontium* sp. A (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 2, 3: *Hexacontium* sp. B (2: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma; 3: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 4, 5: *Hexacontium* aff. *arachnoidale* Hollande and Enjumet (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 6–9: *Hexacontium minerva* Kamikuri (6, 8: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 7: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma; 9: Sample 1021B-29X-4, 70-72 cm, 10.2 Ma).

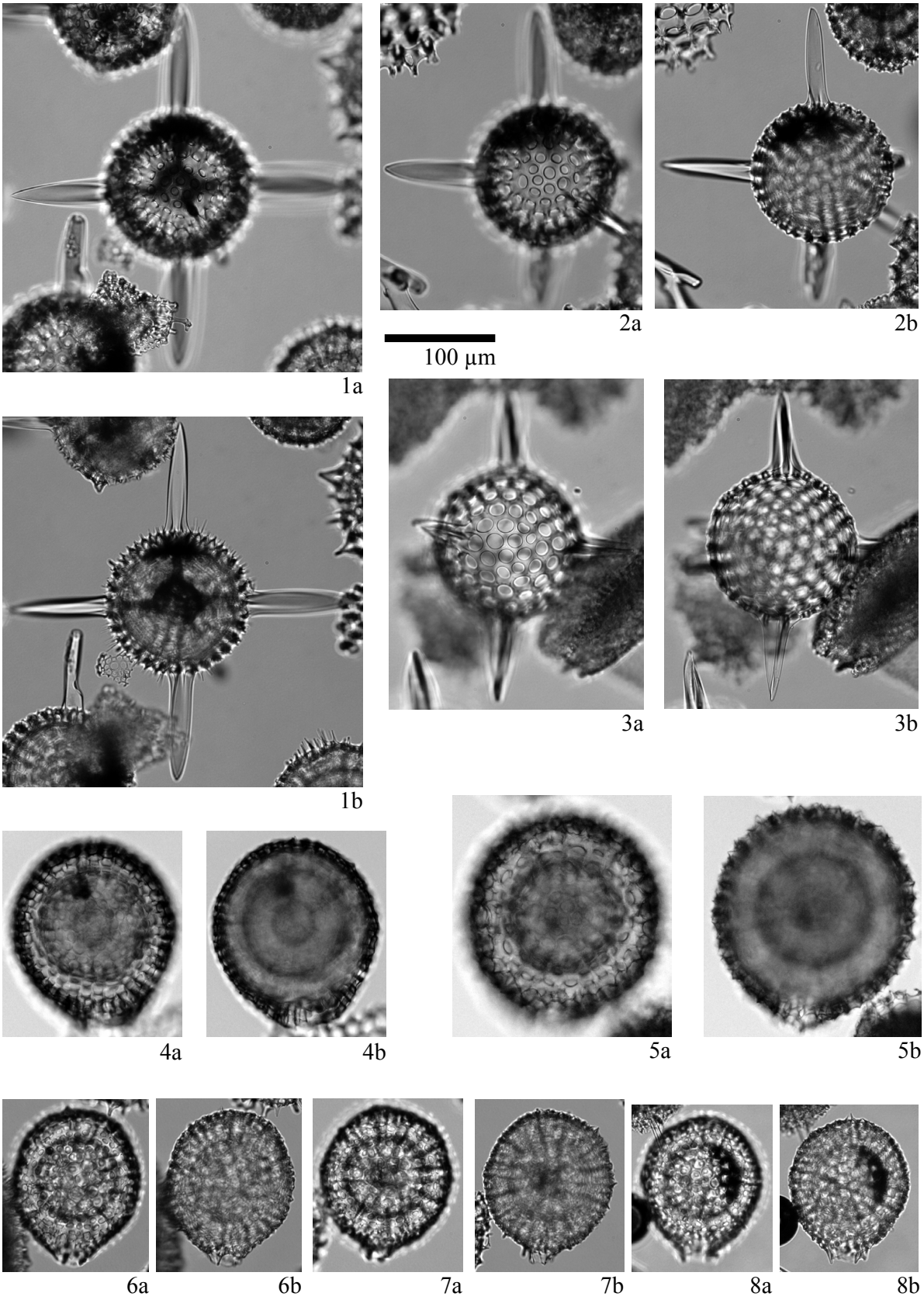


Plate 12 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Hexacontium* sp. E (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 2: *Hexastylus* sp. A (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 3: *Hexastylus aculeata* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 4–8: *Actinomma robusta* (Kling) (4, 7: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 5, 6: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma; 8: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

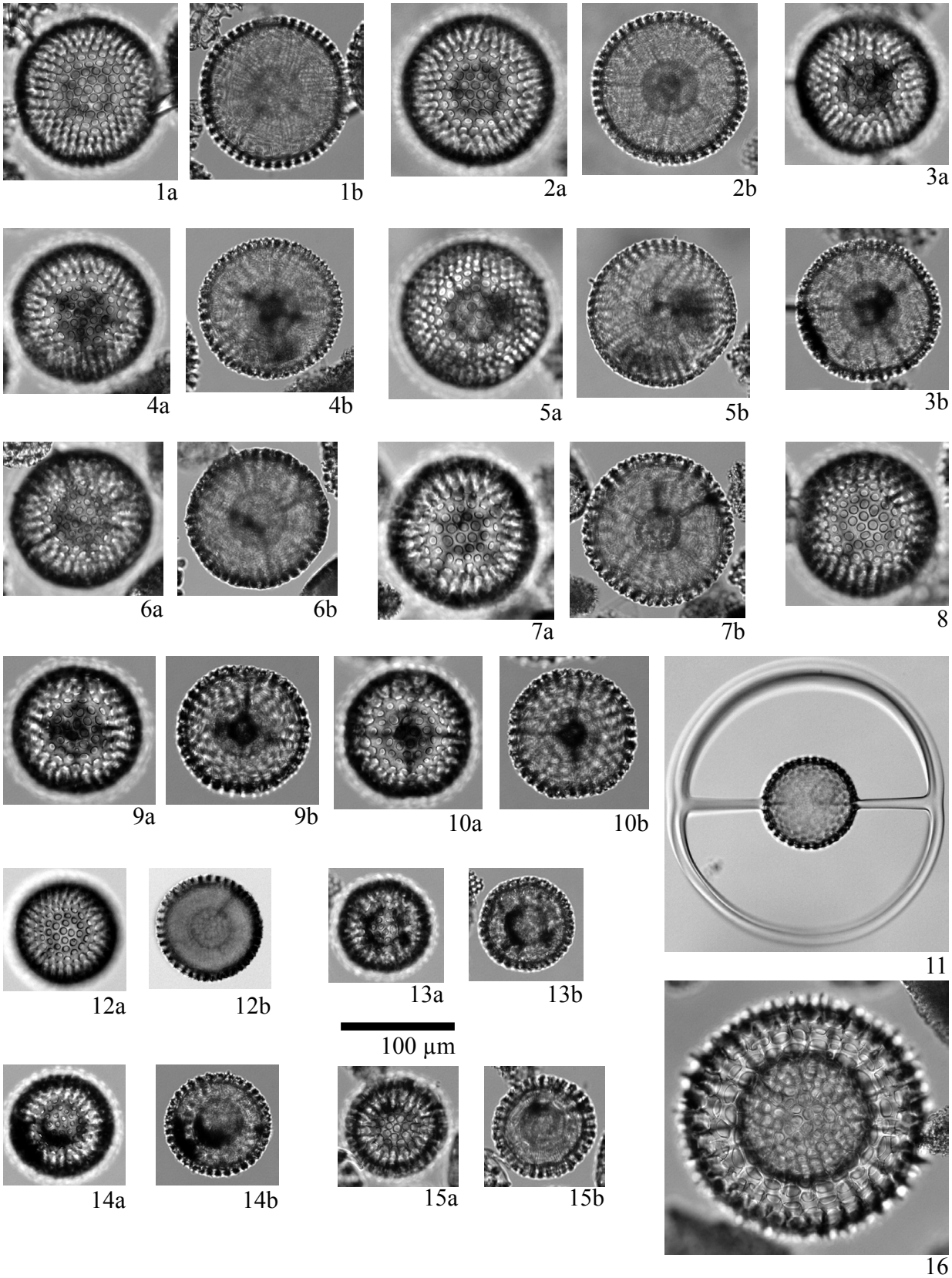


Plate 13 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–8: *Thecosphaera dedoensis* Nakaseko (1–5: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 6: 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma; 7, 8: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9, 10: *Thecosphaera* sp. A (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 11: *Saturnalis circularis* Haeckel (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 12–15: *Thecosphaera* sp. B (12, 13, 15: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 14: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 16: *Liosphaera hexagonia* Haeckel (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma).

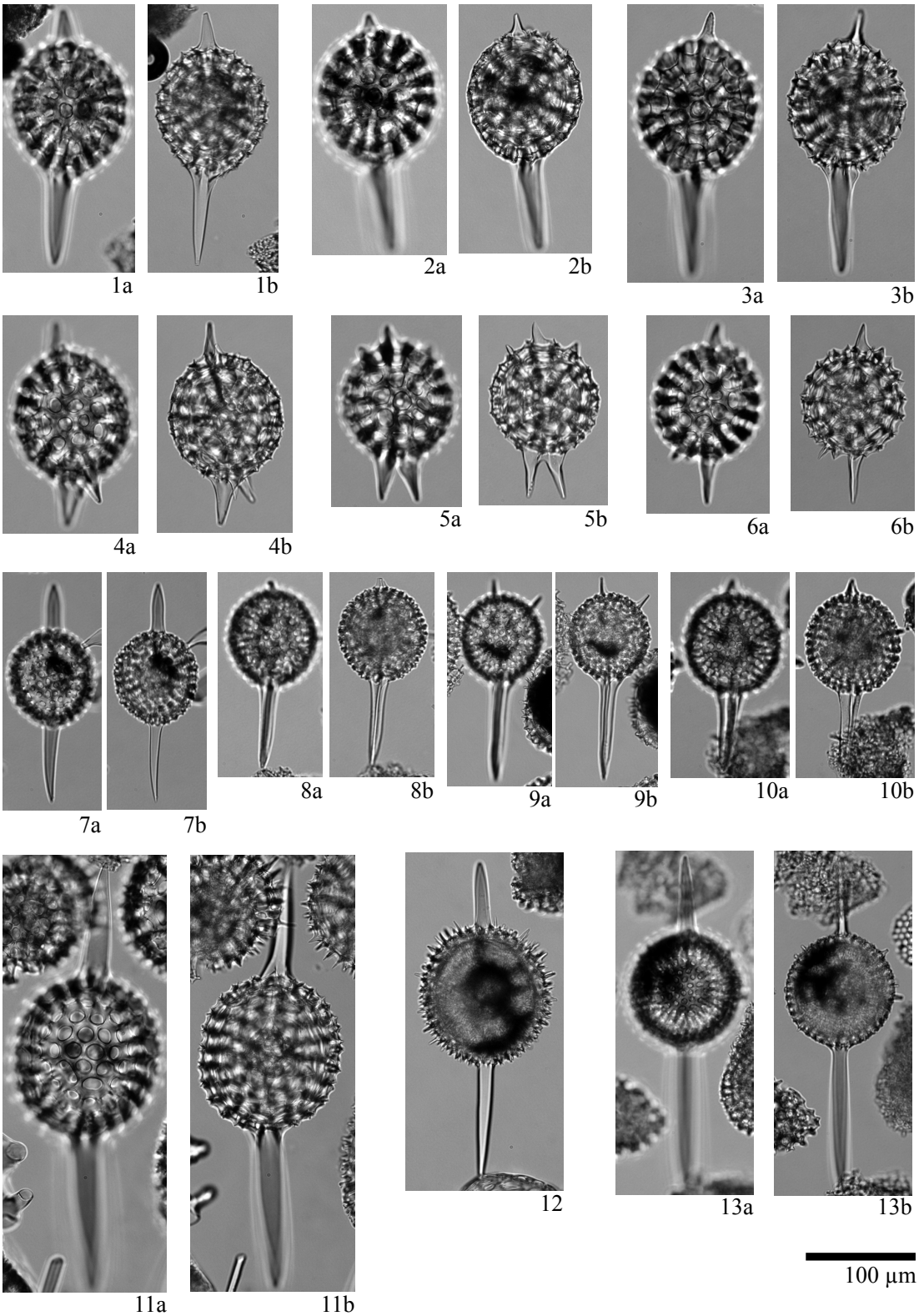


Plate 14 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–3: *Stylosphaera radiosa* Ehrenberg (1: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 2, 3: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 4–6: *Cromydruppocarpus esterae* Campbell and Clark (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 7: *Druppatractus hastatus* Blueford (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 8–10: *Stylosphaera timmsi* (Campbell and Clark) (8, 10: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 9: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 11: *Axoprunum bispiculum* (Popofsky) (Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 12: *Stylatractus universus* Hays (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13: *Amphistylus angelinus* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

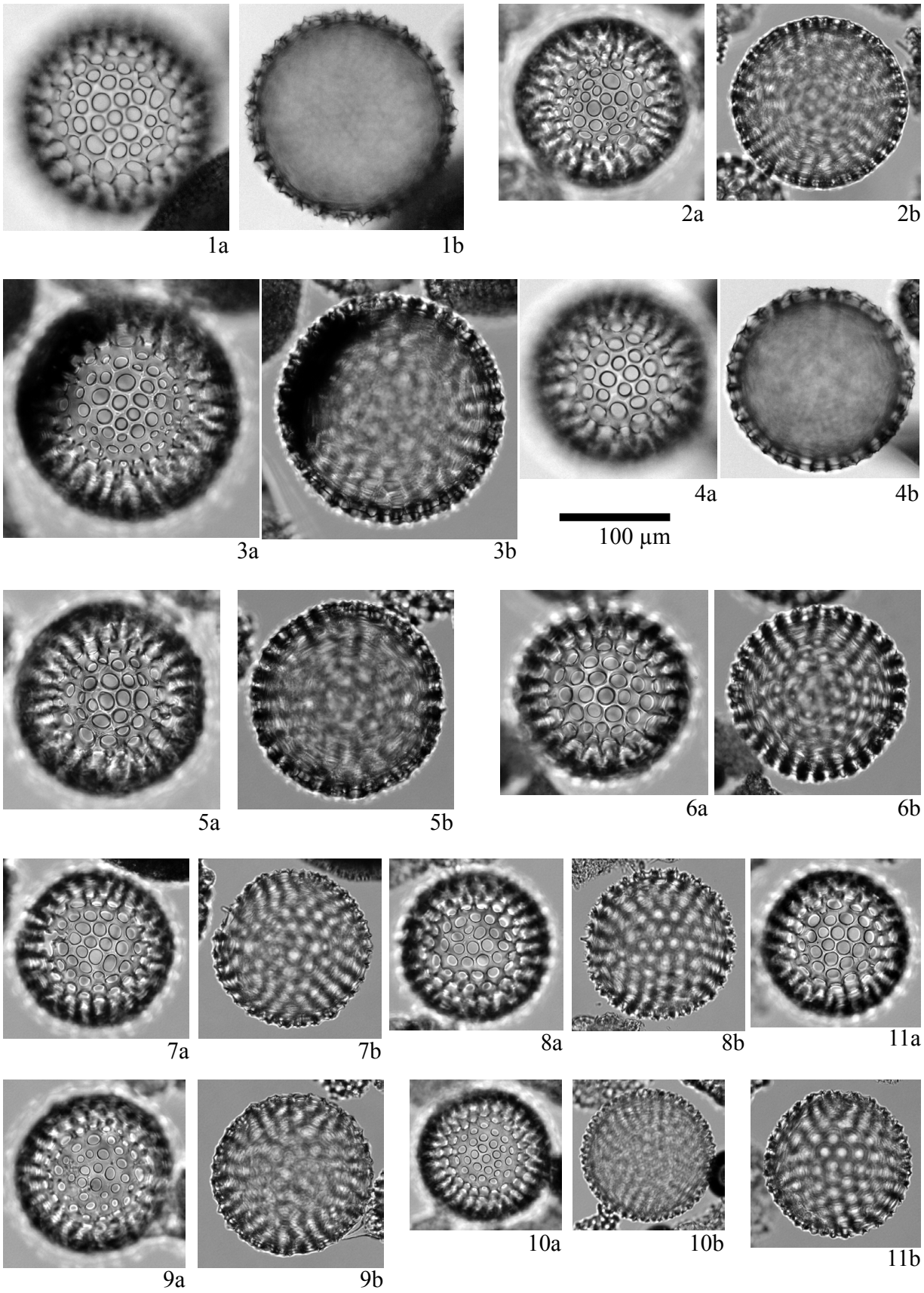


Plate 15 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–11: *Cenosphaera jenkinsi* Campbell and Clark group (1, 3, 5: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma; 2, 4, 6–11: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

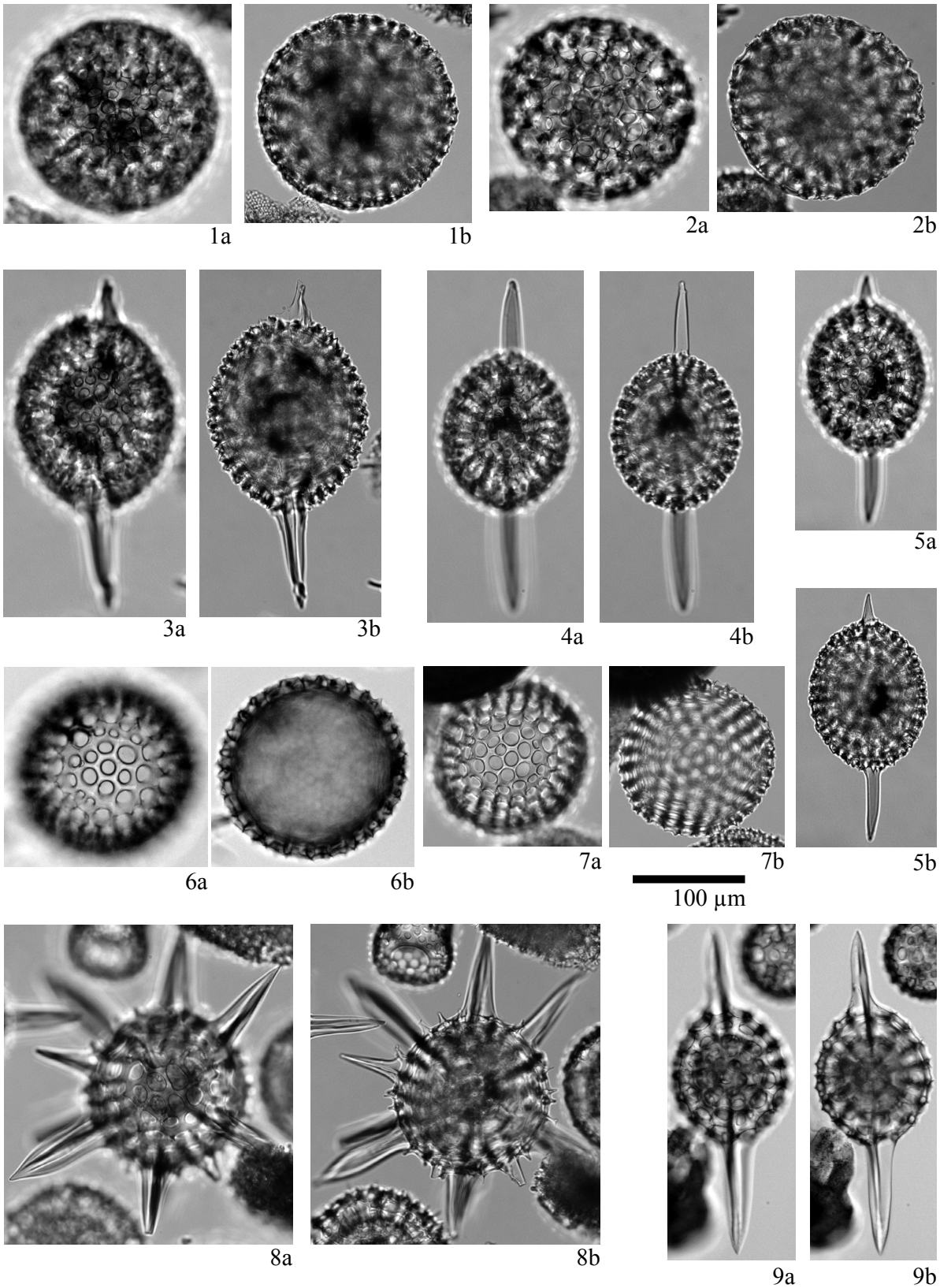


Plate 16 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Styptosphaera spumacea* Haeckel (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 3–5: *Stylatractus neptunus* Haeckel (3: Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma; 4: Sample 1021B-26X-6, 20-22 cm, 9.0 Ma; 5: Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 6, 7: *Cenosphaera jenkinsi* Campbell and Clark group (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma); 8: *Actinomma hootsi* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9: *Stylatractus santaeannae* (Campbell and Clark) (Sample 1021B-32X-6, 20-22 cm, 12.2 Ma).

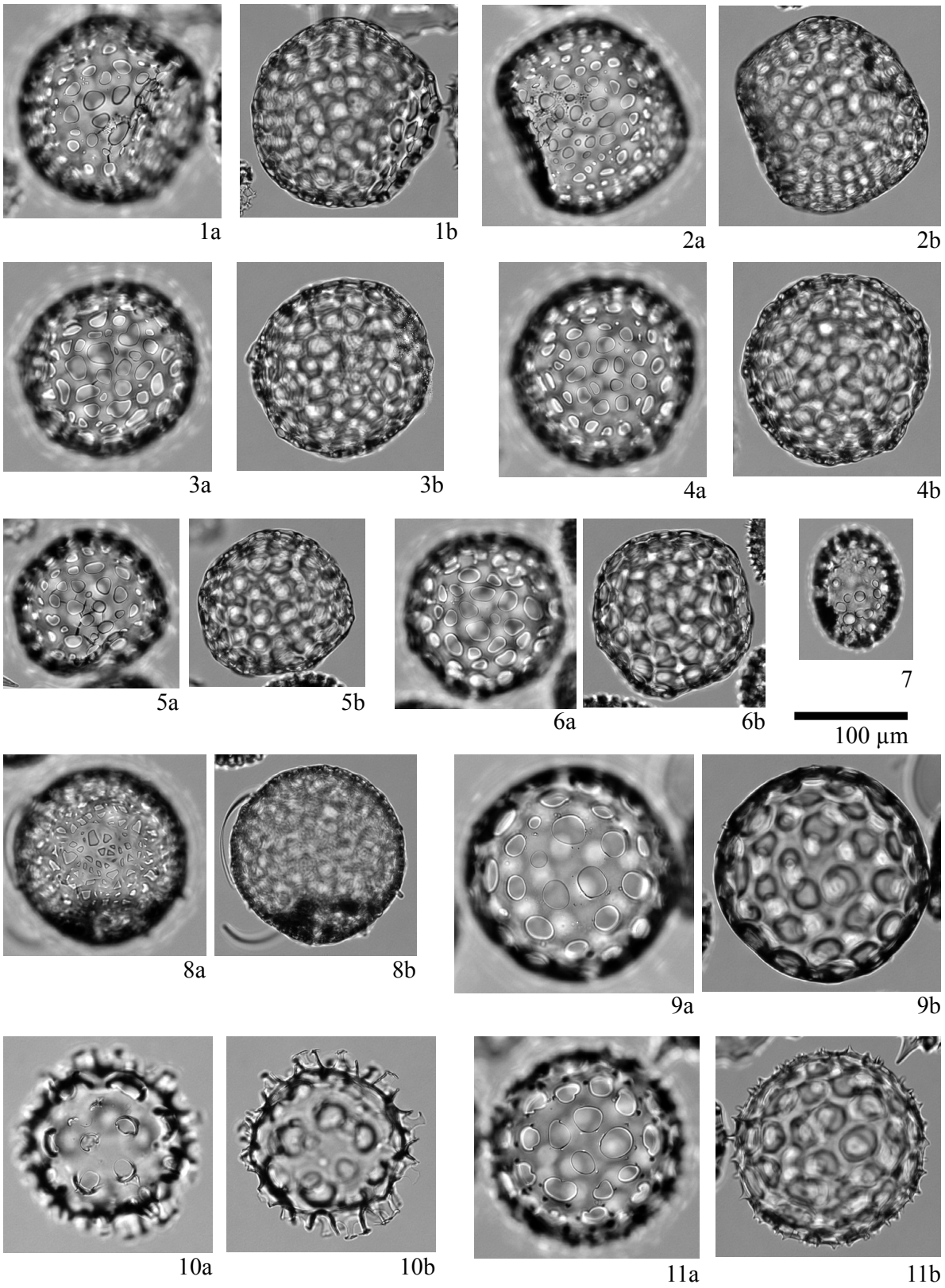


Plate 17 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–6: *Collosphaera glebulenta* Bjørklund and Goll (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 7: *Collosphaera reynoldsi* Kamikuri (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 8: *Collosphaera* sp. B (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9: *Collosphaera* sp. A (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 10: *Polysolenia pseudarktios* (Caulet) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 11: *Polysolenia murrayana* (Haeckel) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

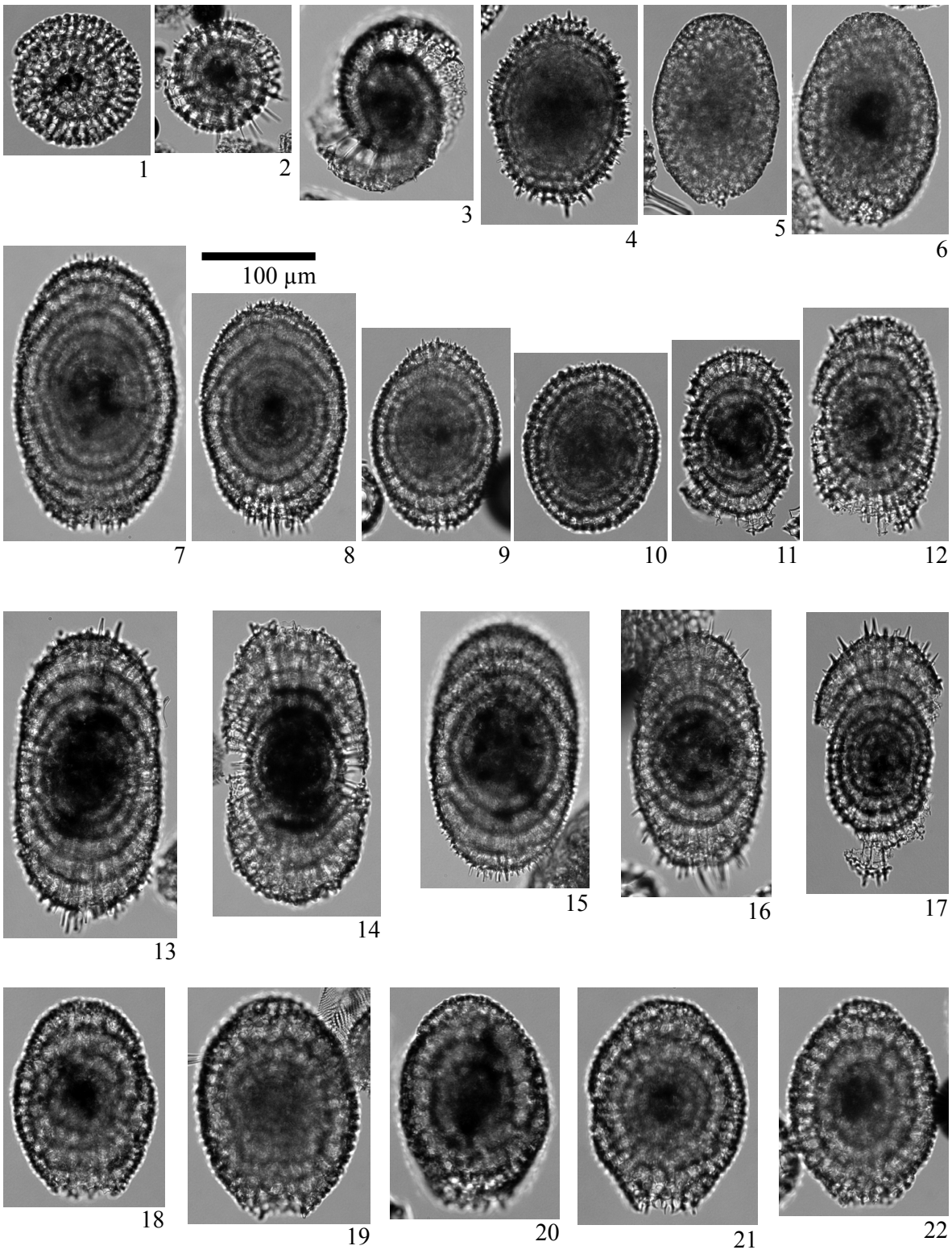


Plate 18 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Lithelius klingi* Kamikuri (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 2: *Lithelius minor* Jørgensen group (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 3: *Larcospira quadrangula* Haeckel group (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma), 4: *Lithelius* aff. *elliptica* (Ehrenberg) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5: *Larcopyle* aff. *pylomaticus* (Riedel) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 6: *Larcopyle* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 7–11: *Larcopyle polyacantha* (Campbell and Clark) type A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 12: *Larcopyle polyacantha* (Campbell and Clark) type B (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13–17: *Larcopyle polyacantha* (Campbell and Clark) type C (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 18–22: *Larcopyle buetschlii* Dreyer (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

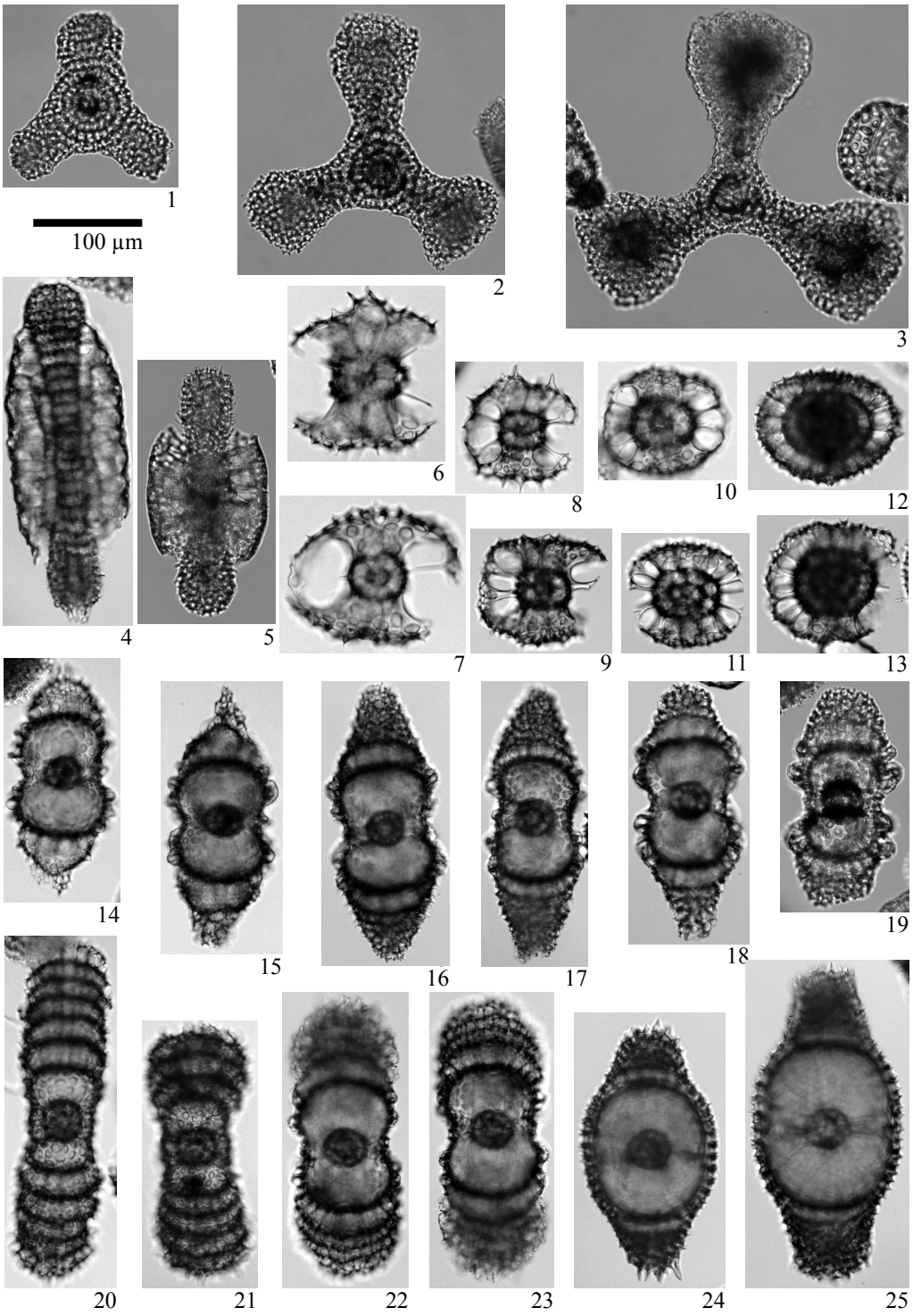


Plate 19 Illustrations of the encountered radiolarians. 1, 2: *Dictyocoryne malagaense* (Campbell and Clark) group (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 3: *Dictyocoryne* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 4: *Amphymenium amphistylium* Haeckel (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5: *Spongurus cylindricus* Haeckel (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 6, 7: *Tetrapyle circularis/fruticosa* group (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 8–10: *Phorticium* sp. A (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 11–13: *Phorticium clevei* (Jørgensen) (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 14: 15: *Didymocyrtis penultima* (Riedel) (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 16, 17: *Didymocyrtis laticonus* (Riedel) (Sample 1021B-33X-4, 70-72 cm, 12.7 Ma); 18, 19: *Didymocyrtis antepenultima* (Riedel and Sanfilippo) (Sample 1021B-32X-1, 20-22 cm, 11.7 Ma); 20, 21: *Diartus hughesi* (Campbell and Clark) (20: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 21: Sample 1021B-28X-6, 20-22 cm, 9.8 Ma); 22, 23: *Didymocyrtis* sp. C (Sample 1021B-31X-6, 20-22 cm, 11.6 Ma); 24, 25: *Didymocyrtis* sp. D (24: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 25: Sample 1021B-27X-1, 20-22 cm, 9.1 Ma).

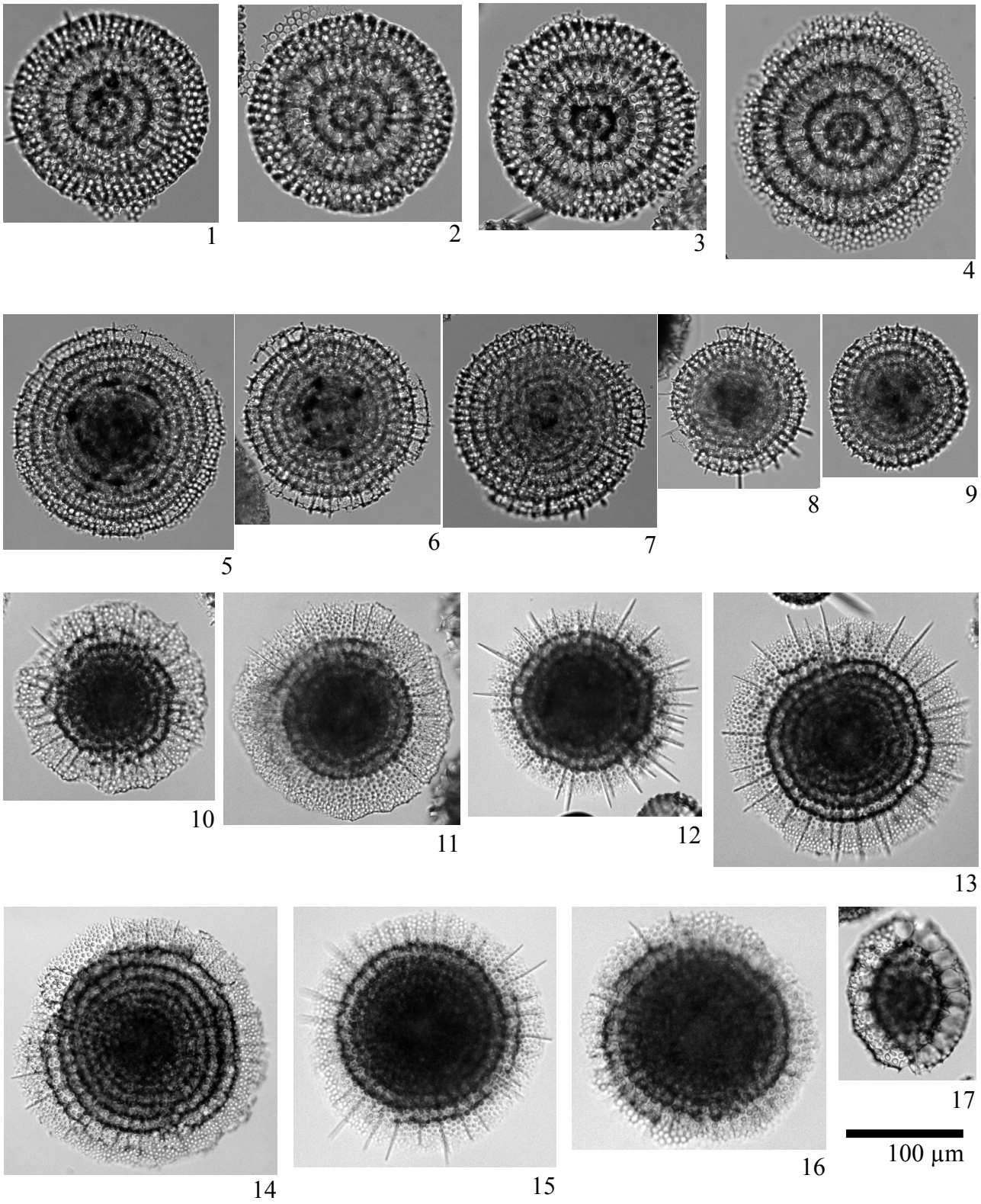


Plate 20 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–4: *Circodiscus circularis* (Clark and Campbell) (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 5–9: *Stylodictya* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 10–15: *Perichlamydium scutaeforme* Campbell and Clark type A (10, 14, 15: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 11–13: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 16: *Perichlamydium* sp. P (Sample 1021B-25X-4, 70-72 cm, 8.6 Ma); 17: *Larcospira moschkovskii* Kruglikova (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

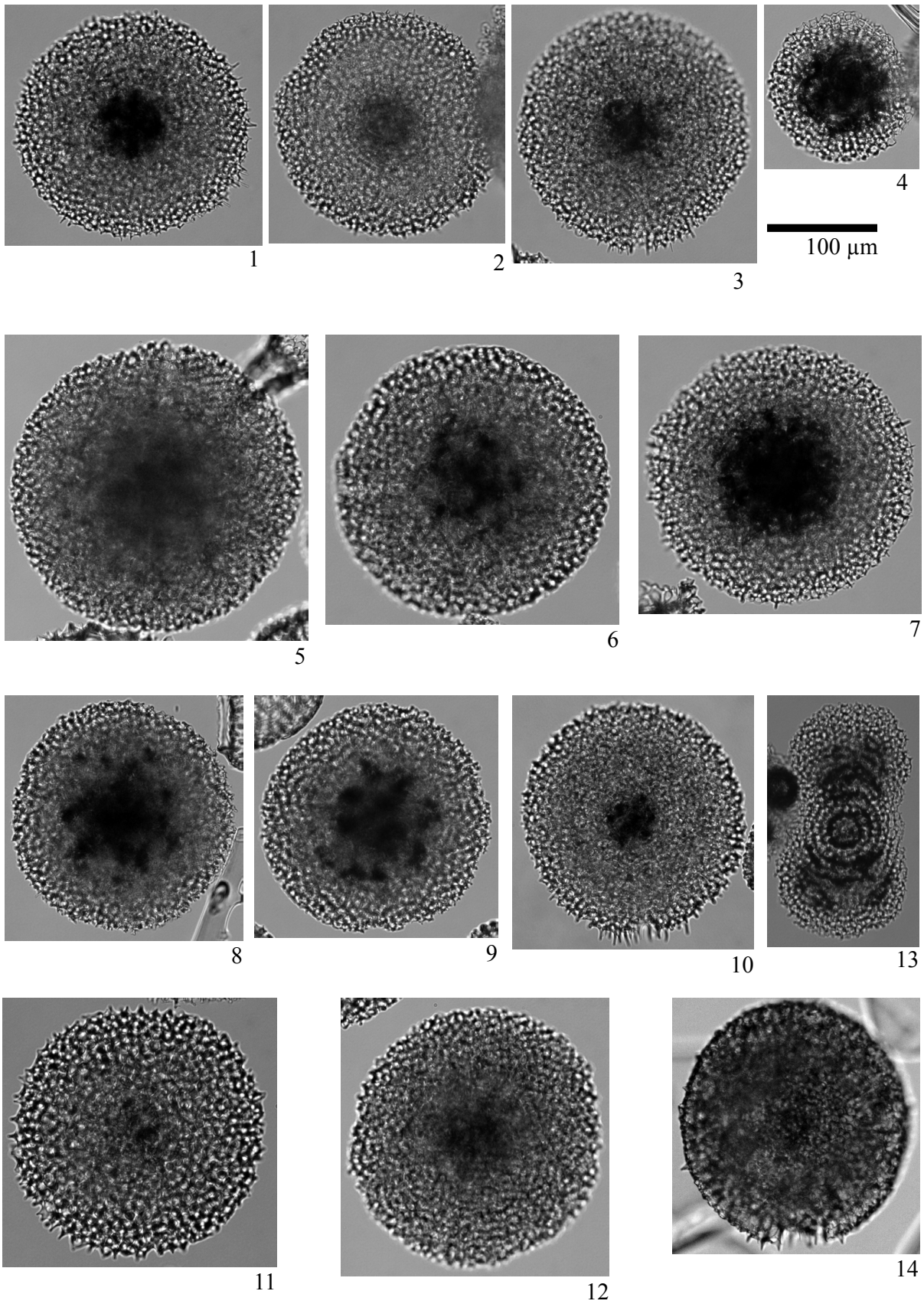


Plate 21 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–12: *Spongodiscus resurgens* Ehrenberg (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 13: *Spongaster* sp. A (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 14: *Spongodiscus* sp. D (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma).

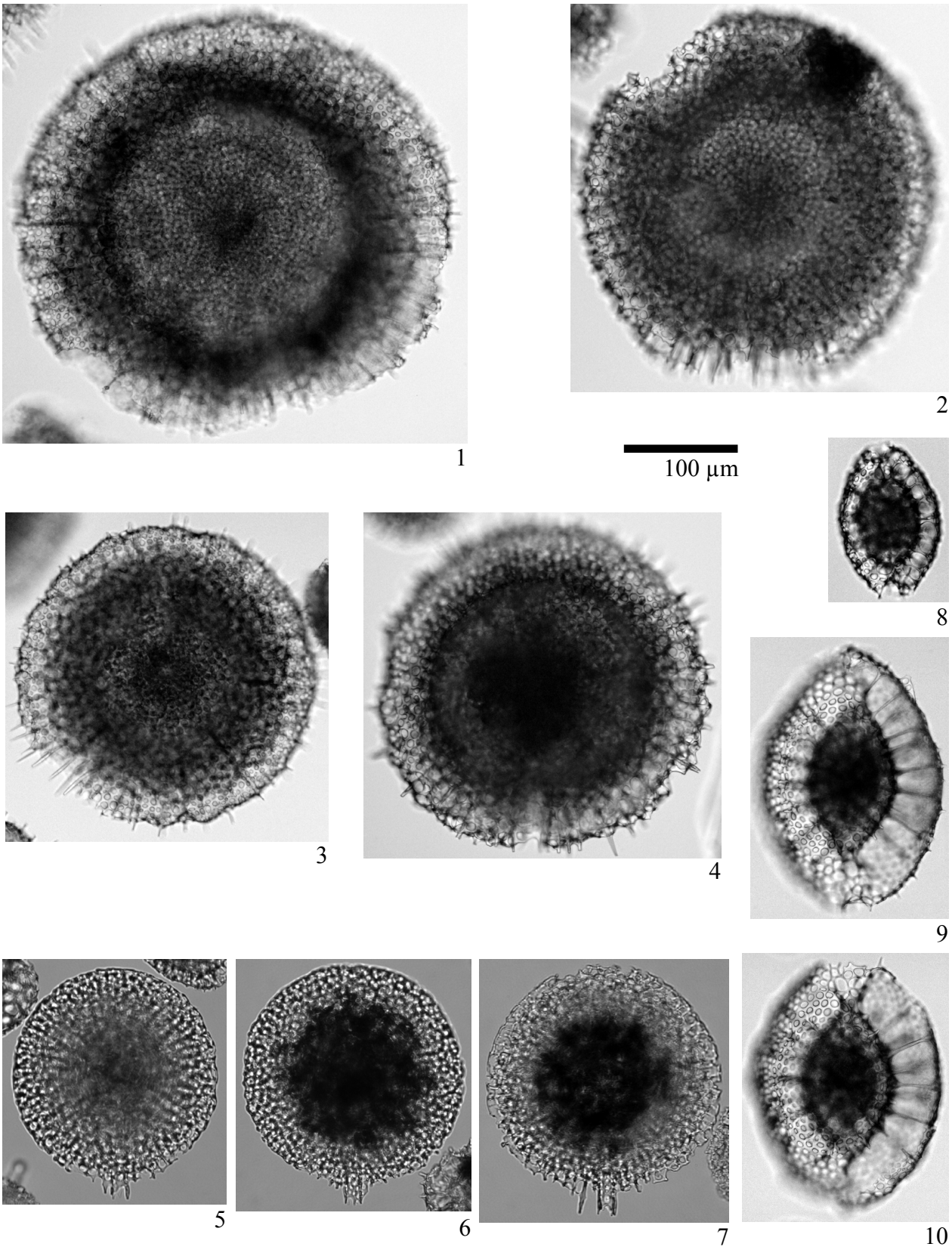


Plate 22 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Spongotrochus* sp. B (Sample 1021B-24X-4, 70-72 cm, 8.3 Ma); 2–4: *Spongotrochus* sp. C (Sample 1021B-24X-4, 70-72 cm, 8.3 Ma); 5–7: *Spongopyle osculosa* Dreyer (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 8: *Larcospira moschkovskii* Kruglikova (Sample 1021B-33X-2, 120-122 cm, 12.5 Ma); 9, 10: *Larcospira quadrangula* Haeckel group (9: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 10: Sample 1021B-27X-1, 20-22 cm, 9.1 Ma).

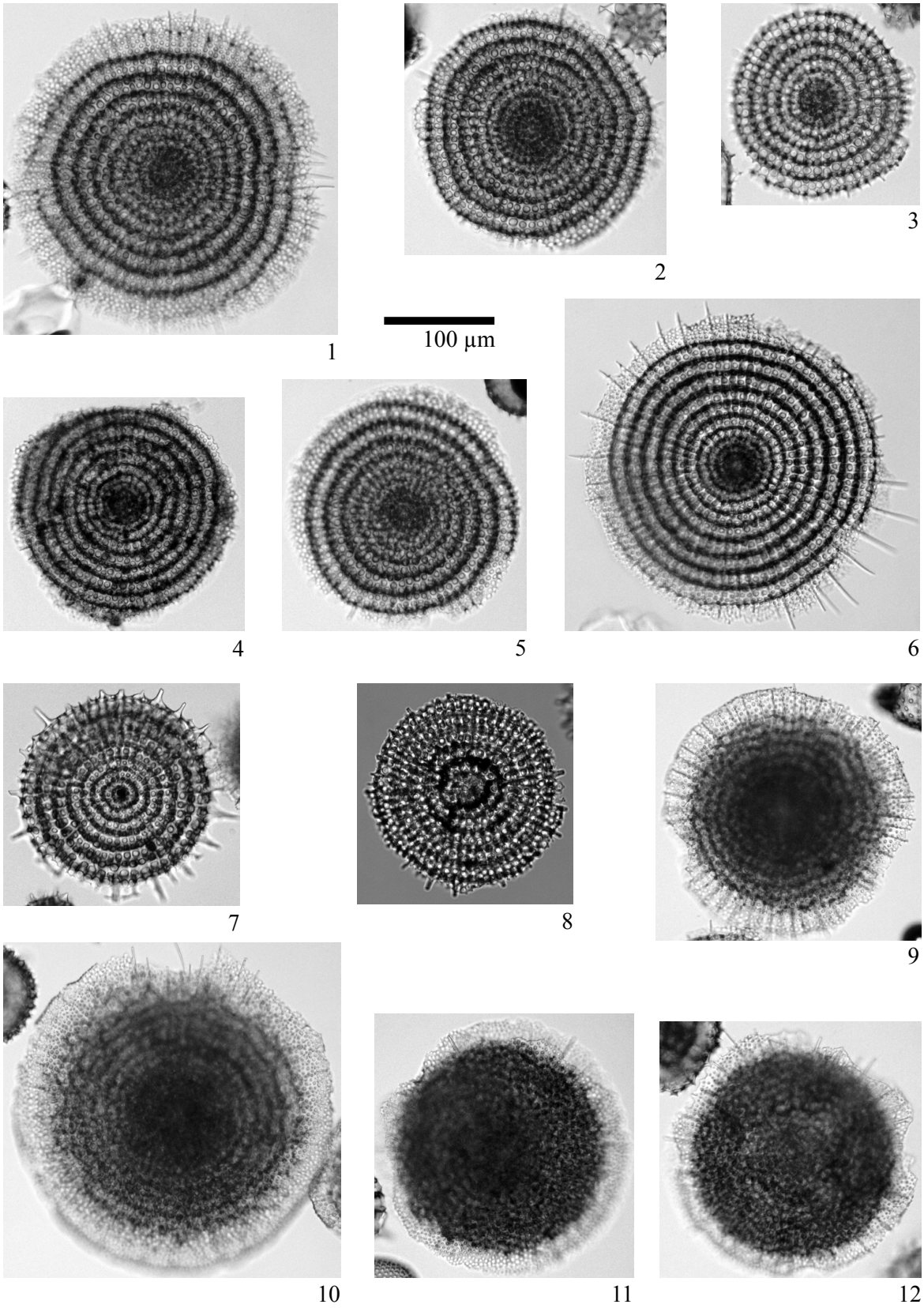


Plate 23 Illustrations of the encountered radiolarians. 1–6: *Stylodictya ornata* Campbell and Clark (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 7, 8: *Stylodictya tenuispina* Jørgensen (Sample 1021B-25X-4, 70-72 cm, 8.6 Ma); 9, 10: *Perichlamydium scutaeforme* Campbell and Clark type B (Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 11, 12: *Perichlamydium scutaeforme* Campbell and Clark type C (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma).

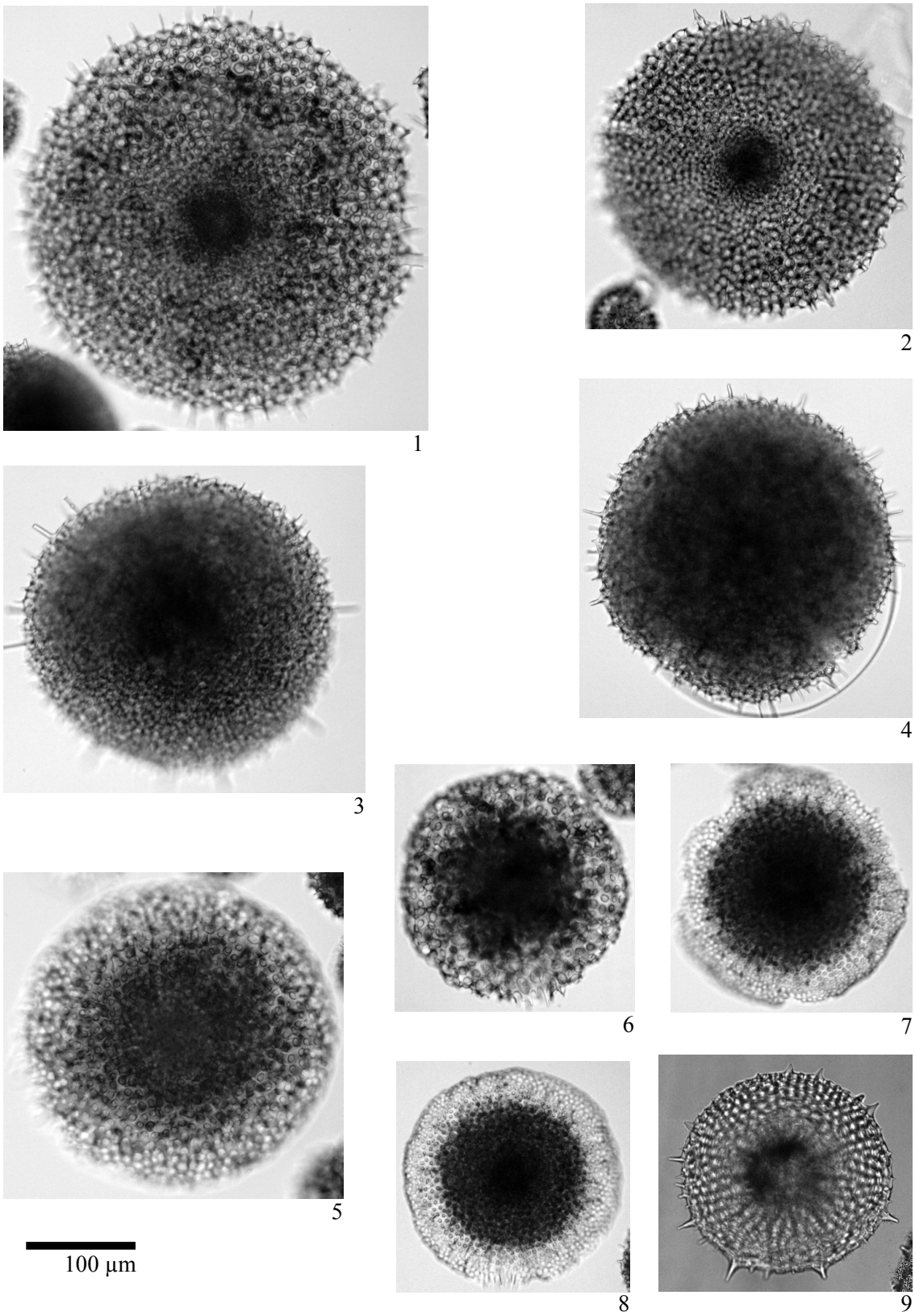


Plate 24 Illustrations of the encountered radiolarians. 1: *Spongotrochus sol* Campbell and Clark type A (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 2: *Spongotrochus sol* Campbell and Clark type B (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 3, 4: *Spongotrochus* sp. Z (Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma); 5, 6: *Spongodiscus cauleti* Kamikuri (5: Sample 1021B-31X-1, 20-22 cm, 11.1 Ma; 6: Sample 1021B-30X-4, 70-72 cm, 10.8 Ma); 7, 8: *Perichlamydium* sp. K (7: Sample 1021B-26X-2, 120-122 cm, 8.9 Ma; 8: Sample 1021B-26X-4, 70-72 cm, 9.0 Ma); 9: *Heliodiscus* sp. A (Sample 1021B-26X-6, 20-22 cm, 9.0 Ma).

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 195–209, 2019

Notes and Comments

Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425)

Kenji M. Matsuzaki[1,*] and Takuya Itaki[2]

Kenji M. Matsuzaki and Takuya Itaki (2019) Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425). *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 195–209, 1 figure, 2 tables, 9 plates.

Abstract: In this study, we have illustrated the 84 species/species group of polycystine radiolarians, which were commonly encountered in the upper Miocene sediments at the Site U1425 of the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) in the Japan Sea. The micro-photographs of these species/species group are illustrated in 9 plates.

Keywords: Integrated Ocean Drilling Program, late Miocene, Japan Sea, Polycystine radiolarians

1. Introduction

The Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 346 retrieved seven sites covering a wide latitudinal and depth range in the Japan Sea and the East China Sea. The sediment cores collected in the Japan Sea cover the Holocene to the middle Miocene (e.g. Tada *et al.*, 2015; Kamikuri *et al.*, 2017). Polycystine radiolarians are Protista bearing skeletons of amorphous silica and they are the unique microfossil group, which can inhabit intermediate and deep-water (Suzuki and Not, 2015). They are also usually used as a biostratigraphic and paleoceanographical index in the North Pacific, where the preservation of carbonates is low in the deep-sea sediments. In the deep-sea sediment of the Japan Sea, the preservation of carbonates is lower than those recorded in the North Pacific because of a calcite compensation depth about 2,000 m (e.g. Ujiie and Ichikura, 1973), whereas radiolarians are usually well-preserved in such carbonate-poor sediments in the Japan Sea. Therefore, polycystine radiolarians were examined at all sites recovered in the Japan Sea during the expedition 346 to define their local biostratigraphy and establish a preliminary depth-age model at each drilled site (Kamikuri *et al.*, 2017). In this study, we propose to show micro-photographs of the radiolarian species and/or species group, which often occurred from the upper Miocene of IODP Exp. 346 Site U1425.

2. Material and methods

In this study, we have analyzed radiolarians from 88 sediment core samples covering the late Miocene collected from Sites U1425 drilled during IODP Expedition 346. The Site U1425 is located at 39°29.44'N and 134°26.55'E (Fig. 1), in the central Japan Sea, at the middle of the Yamato Bank, where the water depths is 1,909 m water depth. The 88 samples were freeze-dried, and treated with diluted hydrogen peroxide (H_2O_2) (15%) (50 ml of H_2O_2 at concentration of 30% diluted in 100 ml of water) and hydrochloric acid (15%) (40 ml of HCl at concentration of 35–37% diluted in 100 ml of water) to remove organic and calcareous matter. The undissolved residue in each sample was sieved over a 45-μm screen following the method proposed in Tada *et al.* (2015). The examination of polycystine radiolarians was carried out under an optical microscope Nikon Eclipse E 200 at magnifications of 100× to 400×. The photomicrographs were taken under an optical microscope at magnifications of 400× using a digital camera Olympus SP-600UZ, with an optical zoom of 5.0–75.0 mm, which is set on the used optical microscope.

3. Radiolarian fauna

Totally 84 species and species group, including 1 collodarian, 44 spumellarians and 39 nassellarians were encountered during the late Miocene in the Japan Sea.

[1] Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, the University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan)
present address: Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo (5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564 Japan)
[2] AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation
[*] Corresponding author: K.M. Matsuzaki, Email: km.matsuzaki@aori.u-tokyo.ac.jp

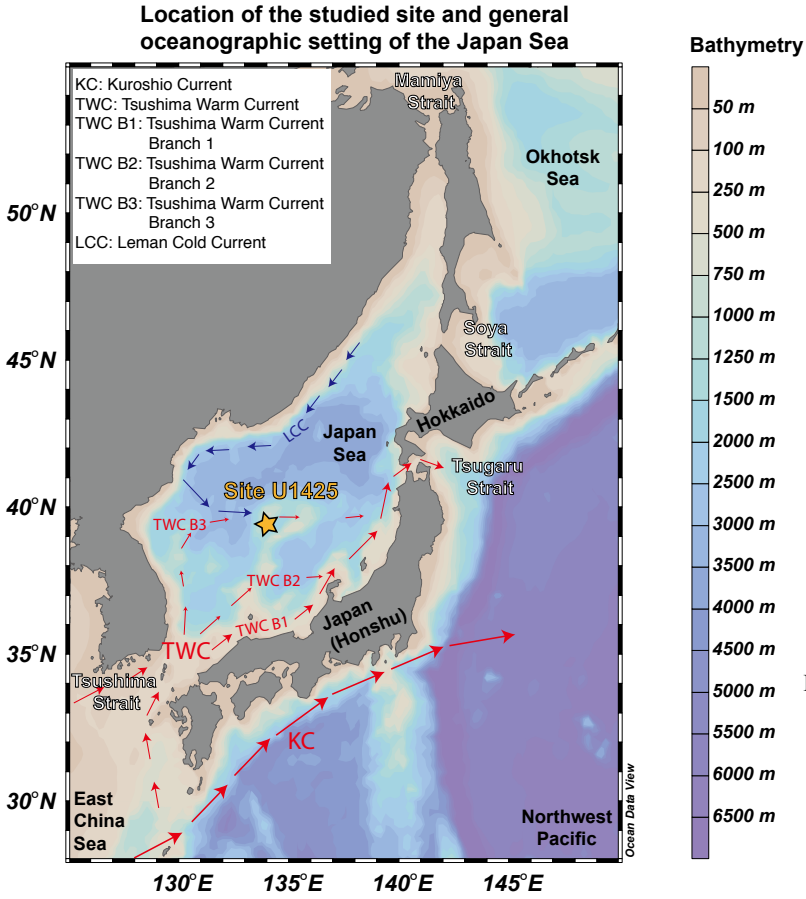


Fig. 1 This map has been modified from Matsuzaki *et al.* (2018) and shows the location of Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 346 Site U1425 and the majors paleoceanographic setting of the Japan Sea. The base map is from Ocean Data View 4 (Schlitzer, 2016).

Photomicrographs of all forms are shown from plate 1 to plate 9. For all these taxa, we have provided taxonomic names and its related taxonomic references (Tables 1 and 2).

Acknowledgement

We would like to thank Drs. Shin-ichi Kamikuri and Isao Motoyama for having reviewed our manuscript and providing us helpful suggestions. We also wish to thank Dr. Noritoshi Suzuki for providing us valuable taxonomic comments and remarks. We would like to thank the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 346 for provide us the samples. We also wish to thank the Kochi Core Center (KCC) and its curators for their sampling assistance. This work was supported by the JSPS Research Fellowship for Young Scientist grant 16J02142 (MKM). This work was also finally partially financed by the IODP Exp. 346 After Cruise Research Program, JAMSTEC.

References

Blueford, J. R. (1982) Miocene actinommid Radiolaria from the equational Pacific. *Micropaleontology*, 28, 189–213.

Campbell, A. S. and Clark, B. L. (1944) Miocene radiolarian faunas from southern California. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pa*p., no. 51, 1–76.

Dogiel, V. A. and Reshetnyak, V. V. (1952) Materialy po radiolyariyam severo-zapadnoy chasti tikhogo okeana. *Issledovanya Dalnevostochnykh Morei SSSR*, **3**, 5–36.

Ehrenberg, C. G. (1873) Mikrogeologische Studien uber das kleinste Leben der Meeres-Tiefgrunde aller Zonen und dessen geologischen Einfluss. *Abhandlungen der Koniglichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, **1872**, 131–399.

Funakawa, S. (1995) Lophophaeninae (Radiolaria) from the Upper Oligocene to Lower Miocene and intrageneric variation in their internal skeletal structures. *Jour. Geosci., Osaka City Univ.*, **38**, 13–61.

Gladenkov, Y. and Devyatkin, E. (1992) Detal'noe Raschlenenie Neogena Kamchatk. *Ordena Trudnovogo Krasnogo Znameni Geologicheskiy Institut, Rossiyskaya Akademiya Nauk*, **478**, 55–200.

Haeckel E. (1887) Report on the Radiolaria collected by H.M.S. Challenger during the years 1873–1876. *Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. Challenger during the year 1873–1876, Zoology*, **18**, 1–1803

Itaki T. (2009) Last Glacial to Holocene polycystine radiolarians from the Japan Sea. *News of Osaka Micropaleontol. (NOM), Spec. Vol.*, no. 14, 43–89.

Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Revue Micropaleontol*., **53**, 85–106.

Kamikuri, S. (2012) Evolutionary changes in the biometry of the fossil radiolarian Stichocorys peregrina lineage in the eastern equatorial and eastern North Pacific. *Marine Micropaleontol*., **90**, 13–28.

Kamikuri, S., Itaki, T., Motoyama, I. and Matsuzaki, K. M. (2017) Radiolarian biostratigraphy from middle Miocene to late Pleistocene in the Japan Sea. *Paleontol. Res.*, **21**, 397–421.

Kozlova, G. E. (1960) Radiolyarii srednego i verkhnego miotsena Severnogo Sakhalina. *In* Subbotina, N.N., ed., *Mikrofauna SSSR XI. Trudyi Vsesoyuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Geologicheskogo Instituta*, *Gosgortekhizdat,* **153**, 307–325.

Kruglikova, S. B. (1974) Kharakternye vidy radiolayriy v donnykh osadkakh voreal'noi zony Tikhogo okeana. *In* Zhuze, A. P., ed., *Mikropaleontologiya Okeanov i Morey*, Akaemiya Nauk SSSR, Okeanograficheskaya Komissiya, Nauka, Moskow (in Russian with English abstract), 187–196.

Lazarus, D., Faust, K. and Popova-Goll, I. (2005) New species of prunoid radiolarians from the Antarctic Neogene. *Jour. Micropalaeontol*., **24**, 97–121.

Matsuzaki, K. M., Suzuki, N. and Nishi, H. (2015) Middle to Upper Pleistocene Polycystine Radiolarians from Hole 902-C9001C, Northwestern Pacific. *Paleontol. Res*., **19**, no. s1, 1–77.

Matsuzaki, K. M., Itaki, T., Tada, R. and Kamikuri, S. (2018) Paleoceanographic history of the Japan Sea over the last 9.5 million years inferred from radiolarian assemblages (IODP Expedition 346 Sites U1425 and U1430), *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(54), 1–33. doi: 10.1186/s40645-018-0204-7.

Martin, G. C. (1904) Radiolaria, in Miocene. Maryland Geological Survey, The John Hopkins Press, 447–459.

Morley, J. J. and Nigrini, C. (1995) Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific Sites 881, 884, 885, 886 and 887. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., Scholl, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, 145, Ocean Drilling Program, College Station, 55–91.

Motoyama, I. (1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221–262.

Motoyama, I., Kurihara, T. and Itaki, T. (2017) Neogene biosiliceous sedimentary sequence and radiolarian biostratigraphy in the Tainai area, Niigata Prefecture. *Sci. Rep. Niigata Univ. (Geology)*, no. 22 (Supplement), 91–102.

Nakaseko, K. and Nishimura, A. (1971) A new species of Actinomma from the Neogene Formation, Japan. *Sci. Rep. Coll. General Educ., Osaka Univ*., **20**, 67–70.

Nigrini, C. (1977) Tropical Cenozoic Artostrobiidae (Radiolaria). *Micropaleontology*, **23**, 241–269.

Nigrini, C. and Lombari, G. (1984) A guide to Miocene Radiolaria. *Cushman Foundation for Foraminiferal Res., Spec. Publ*., no. 22, i-xvii; S1-S102; N1-N206, 33 plates.

Petrushevskaya, M. G. (1971) Radiolyarii Nassellaria v planktone Mirovogo okeana. *Trudyi Zoologicheskogo Instituta, Akademiya Nauk, SSSR*, **9**, 1–294. (in Russian)

Petrushevskaya, M. G. (1975) Cenozoic radiolarians of the Antarctic, Leg 29, DSDP. *Init. Rep. Deep-Sea Drilling Project*, U.S. Government Printing Office, **29**, 541–675. Washington, D. C.

Popofsky, A. (1908) Die Radiolarien der Antarktis (mit Ausnahme der Tripyleen). *Deutsche Südpolar-Expedition 1901–1903, Zoologie*, **10**, 185–305.

Popofsky, A. (1912) Die Sphaerellarien des Warmwassergebietes. *Deutsche Sudpolar-Expedition 1901-1903, Zoologie*, **5**, 73–159.

Popofsky, A. (1913) Die Nassellarien des Warmwassergebietes. *Deutsche Südpolar-Expedition 1901–1903, Zoologie,* **14**, 216–416.

Renaudie, J. and Lazarus, D. B. (2012) New species of Neogene radiolarians from the Southern Ocean. *Jour. Micropalaeontol*., **31**, 29–52.

Renaudie, J. and Lazarus, D. B. (2013) New species of Neogene radiolarians from the Southern Ocean–Part II. *Jour. Micropalaeontol*., **32**, 59–86.

Schlitzer, R. (2016) Ocean Data View, http://odv.awi.de, 2016.

Shilov, V. V. (1995) Miocene-Pliocene radiolarians from Leg 145, North Pacific. *In* Rea, D. K., Basov, I. A., School, D. W. and Allan, J. F., eds., *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, **145**, Ocean Drilling Program, College Station, 93–116.

Sugiyama, K. (1993) Skeletal structures of Lower and Middle Miocene Lophophaenids (Radiolaria) from central Japan. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan, New Ser*., no. 169, 44–72.

Suzuki, N. (2006) Ontogenetic growth and variation in the skeletal structure of two late neogene sphaeropyle species (polycystina radiolarians). *Jour. Paleontol*., **80**, 849–866.

Suzuki, N. and Not, F. (2015) Biology and ecology of Radiolaria. *In* Ohtsuka, S., Suzaki, T., Horiguchi, T., Suzuki, N. and Not, F., eds., *Marine Protists*, Springer, Tokyo, 179–222.

Tada, R., Murray, R. W., Alvarez Zarikian, C. A., Anderson, Jr. W. T., Bassetti, M. A., Brace, B. J., Clemens, S. C., da Costa, G. M. H., Dickens, G. R., Dunlea, A. G., Gallagher, S. J., Giosan, L., Henderson, A. C. G., Holbourn, A. E., Ikehara, K., Irino, T., Itaki, T., Karasuda, A., Kinsley, C. W., Kubota, Y., Lee, G. S., Lee, K. E., Lofi, J., Lopes, C., Peterson, L. C., Saavedra-Pellitero, M., Sagawa, T., Singh, R. K., Sugisaki, S., Toucanne, S., Wan, S., Xuan, C., Zheng, H. and Ziegler, M. (2015) Site U1425. *In* Tada, R., Murray, R. W., Alvarez Zarikian, C. A. and the Expedition 346 Scientists, *Proc. IODP, 346: College*

Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program). doi: 10.2204/iodp.proc.346.106.2015
Takahashi, K. (1991) Radiolaria: Flux, ecology, and Taxonomy in the Pacific and Atlantic. *Ocean and Biocoenosis Series*, Wood Hole Oceanographic Institutions, no. 3, 1–301.
Ujiie, H. and Ichikura, M. (1973) Holocene to uppermost Pleistocene in a piston core from off San'in District, Sea of Japan. *Trans. Proc. Paleontol. Soc. Japan*, no. 91, 137–150.
Vitukhin, V. S. (1993) Subdivision of the Russian Far East Cenozoic sediments based on Radiolaria. *Transactions*, *Geol. Inst., Russian Academy Sci*., **485**, 1–105.
Zhang, L. and Suzuki, N. (2017) Taxonomy and species diversity of Holocene pylonioid radiolarians from surface sediments of the northeastern Indian Ocean. *Palaeontologia Electronica*, no. 3, 1–68.

Recieved Feburuary 23, 2018
Accepted September 18, 2018
Published on-line January 18, 2019

IODP Exp. 346 Site U1425 から産出した日本海の後期中新世放散虫

松崎賢史・板木拓也

要　旨

本研究では，日本海で実施された国際深海掘削計画（IODP）Expedition 346の掘削サイトU1425で頻繁に産出した上部中新統の放散虫化石84種/種群について報告している．これらの顕微鏡写真を9図版に図示した．

Table 1 Taxonomic references of the encountered Collodarians and Spumellarians

Species name	**plate(s)-Figure(S)**	**Taxonomic references**
Rhizosphaera aff. *variabilium* (Nakaseko)	1.1-1.2	Gladenkov and Devyatkin, 1992, pl. 32, fig. 2
Hexaconthium minerva Kamikuri	1.3	Kamikuri, 2010, p. 97-98, figs. 12a-12b; 16a-16b
Rhizosphaera urumica Vituchin	1.4	Vitukhin, 1993, p. 87-88, pl. 30, fig. 5
Hexastylus spp. sensu Nigrini and Lombari	1.5	Nigrini, and Lombari, 1984, S 17, Pl. 3, figs. 1a-1c
Acrosphaera muse Kamikuri	1.6	Kamikuri, 2010, p. 96-97, figs. 4a-6
Rhizosphaera sp. A	1.7	this study
Cenosphaera cf. *compacta* Haeckel	1.8	Blueford, 1982, p. 193-194, pl. 1, figs. 3, 4
Actinomma robusta (Kling) juvenile form	1.9, 1.11	Suzuki, 2006, p. 863-865, figs. 11.1-11.28
Actinomma aff. *okurai* Nakaseko and Nishimura	1.10, 1.12	Nakaseko and Nishimura, 1971, p. 68, pl. 1, figs. 1-8
Axoprunum bispiculum (Popofsky)	1.13	Popofsky, 1912, p. 91, pl. 2, fig. 2
Druppatractus irregularis Popofsky	1.14	Blueford, 1982, p. 204, 206, pl. 6, figs. 7a, 7b
Stylosphaera pyriformis (Bailey)	1.15	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 12, Figs. 5.10
Perichlamydium scutaeforme Campbell and Clark	2.1	Campbell and Clark, 1944, Pl. 3, Fig. 15 only
Perichlamydium cf. *praetextum* (Ehrenberg)	2.2	Petrushevskaya, 1975, p. 575, pl. 6, fig. 10
Stylochlamydium cf. *venustum* (Bailey)	2.3-2.4	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 28, Figs. 4.2-4.4
Spongotrochus sp. A	2.5	This study
Spongodiscus cauletti group Kamikuri	2.6-2.7	Kamikuri, 2010, p. 94, Pl. 4, Figs. 1-4
Spongopyle osculosa Dreyer	2.9	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 23, Figs. 4.12-4.13
Flustrella spp. (young forms)	2.10-2.11	This study
Spongodiscus sp. A	2.14	This study
Flustrella sp. A	2.8, 2.12- 2.13, 2.15-2.19	This study
Spongodiscidae juveniles spp.	2.20-2.21	This study
Stylodictya tenuispina Jørgensen group	2.22-2.27	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 27-28, Figs. 4.20
Tetrapyle cf. *circularis* Haeckel	3.1	Zhang and Suzuki, 2017, p. 15-18, Figs. 8-9
Tetrapyle cf. *fruticosa* (Tan and Chen)	3.2	Zhang and Suzuki, 2017, p. 18-19, Fig. 10
Phorticium cf. *polycladum* Tan and Tchang	3.3-3.4, 3.8	Zhang and Suzuki, 2017, p. 43-45, Fig. 12
Prunulum coccymelia Haekcel group	3.5-3.6, 3.11, 3.14-3.18	Haeckel, 1887, p. 313, pl. 39, fig. 4
Phorticium sp. A	3.7	This study
Phorticium aff. *scitulum* Zhang and Suzuki	3.9-3.10, 3.12-3.13	Zhang and Suzuki, 2017, p. 45-47, Fig. 26
Sphaerolarnacillium sp. A	3.19-3.26	This study
Larcopyle aff. *polyacantha* (Campbell and Clark)	4.1-4.4	Motoyama *et al*., 2017, Fig. 9.12 only
Larcopyle weddellium Lazarus, Faust and Popova-Goll group	4.5-4.14	Lazarus *et al*., 2005, p. 117, 119, pl. 10, figs. 1-14
Larcopyle sp. A	4.15	This study
Larcopyle labyrinthusa Lazarus, Faust and Popova-Goll	4.16-4.17	Lazarus *et al*., 2005, p. 111, 119, pl. 5, figs. 14-24
Larcopyle sp. B	4.18	This study
Lithelius sp. A	4.19	This study
Lithelius cf. *nautiloides* (Popofsky)	4.20	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 37, Fig. 6.29
Lithelius sp. B	4.21	This study
Lithelius sp. C	4.22-4.23	This study
Lihelius barbatus Motoyama	5.1-5.4, 5.7	Motoyama, 1996, p. 243, pl. 3, figs. 11-14
Spiremaria cf. *decens* Kozlova	5.5-5.6, 5.8-5.11	Kozlova, 1960, p. 315-316, pl. 4, fig. 3
Lithelidae gen et sp. indet	5.12, 5.16-5.17	This study
Lithelius aff. *spiralis* (Ehrenberg) group	5.13-5.15	Matsuzaki *et al*., 2015, p. 38, Fig. 6.31
Phacodiscus aff. *calvertense* (Martin)	5.18-5.19	Martin, 1904, p. 456, pl. 30, fig. 17
Lithelius klingi Kamikuri	5.20-5.21	Kamikuri, 2010, p. 95-96, pl. 4, figs. 9-14

Table 2 Taxonomic references of the encountered Nassellarians

Species name	Plate (s)-Figure (s)	Taxonomic references
Dendrospyris sp. A	6.1	This study
Dendrospyris sp. B	6.2-6.3	This study
Dendrospyris sp. C	6.4, 6.6	This study
Dendrospyris sp. D	6.5	This study
Undet. Triospyridae	6.7	This study
Dendrospyris sp. E	6.8	This study
Dendrospyris cf. *eurus* Kamikuri	6.9-6.10	Kamikuri, 2010, p.100, Pl. 5, figs. 19-22 only
Zygocircus archicircus Popofsky	6.11-6.12	Popofsky, 1913, p. 285-286, text-fig. 13
Zygocircus ? sp. A	6.13	This study
Steganocubus sp. A	6.14-6.16	This study
Peridium sphaerum Funakawa	6.17-6.19	Funakawa, 1995, p. 21-22, pl. 2, figs. 1a-4b
Steganocubus ? sp.	6.20	This study
Cryptogyrus aff. *trachylobus* Sugiyama	6.21-6.22	Sugiyama, 1993, p. 65, 67-68, fig. 19.1a-19.5, 20.1a-20.2b
Lophophaenidae gen. et sp. indet.	6.23	This study
Botryopera? *gibbera* Renaudie and Lazarus	6.24-6.27	Renaudie and Lazarus, 2012, p. 47, pl. 7, figs. 3A-6B
Pseudodictyophimus cf. *elegans* Dogiel and Reshetnyak	6.28	Dogiel and Reshetnyak, 1952, p. 14-15, fig. 7
Pseudodictyophimus sp. A	6.29	This study
Siphocampe arachnea/lineata (Ehrenberg) group	6.30-6.31	Nigrini, 1977, p. 256, pl.3, figs. 7-8
Botryostrobus bramlettei Campbell and Clark) group	6.32-6.33	Nigrini and Lombari, 1984, N 175-N 176, Pl. 31, figs. 2a-2c
Botryocampe aff. *robusta* (Kruglikova)	6.34-6.35	Kruglikova, 1974, p. 194, pl. 2, figs. 15-19
Botryopera? daleki	6.36	Renaudie and Lazarus, 2013, p. 68, pl. 6, figs. 1A-1C, 4A-4B
Cycladophora nakasekoi Motoyama	7.1-7.14	Motoyama, 1996, p. 243-246, Pl. 4, figs. 1-3
Cycladophora cf. *nakasekoi* Motoyama	7.15-7.22	Motoyama, 1996, p. 243-246, Pl. 4, figs. 1-3
Cycladophora cf. *sphaeris* (Popova)	7.23	Popova 1989, p. 73, pl. 11, fig. 17, pl. 12, fig. 3
Cycladophora sphaeris (Popova)	7.24-7.26	Popova 1989, p. 73, pl. 11, fig. 17, pl. 12, fig. 3
Cycladophora cosma cosma Lombari and Lazarus	7.27-7.28	Morley and Nigrini, 1995, p. 81, pl. 4, fig. 2
Cycladophora aff. *cornuta* (Bailey)	7.29	Kruglikova, 1974, p. 193-194, pl. 2, figs. 12-14
Stichocorys delmontensis (Campbell and Clark)	8.1	Kamikuri, 2012, Pl. 1, figs. 4, 8 only
Stichocorys peregrina (Riedel) "equatorial form"	8.2-8.8, 8.11	Kamikuri, 2012, Pl. 2, figs. 1-9
Stichocorys peregrina (Riedel) "North Pacific form"	8.9-10, 8.12-8.21	Kamikuri, 2012, Pl. 3, figs. 1-12
Stichocorys sp. A	8.22-8.23	This study
Lychnocanoma magnacornuta Sakai	9.1	Motoyama, 1996, p. 248, pl. 5, figs. 10-11
Lychnocanoma parallelipes Motoyama	9.2	Motoyama, 1996, p. 248, 250, pl. 5, figs. 12a-14

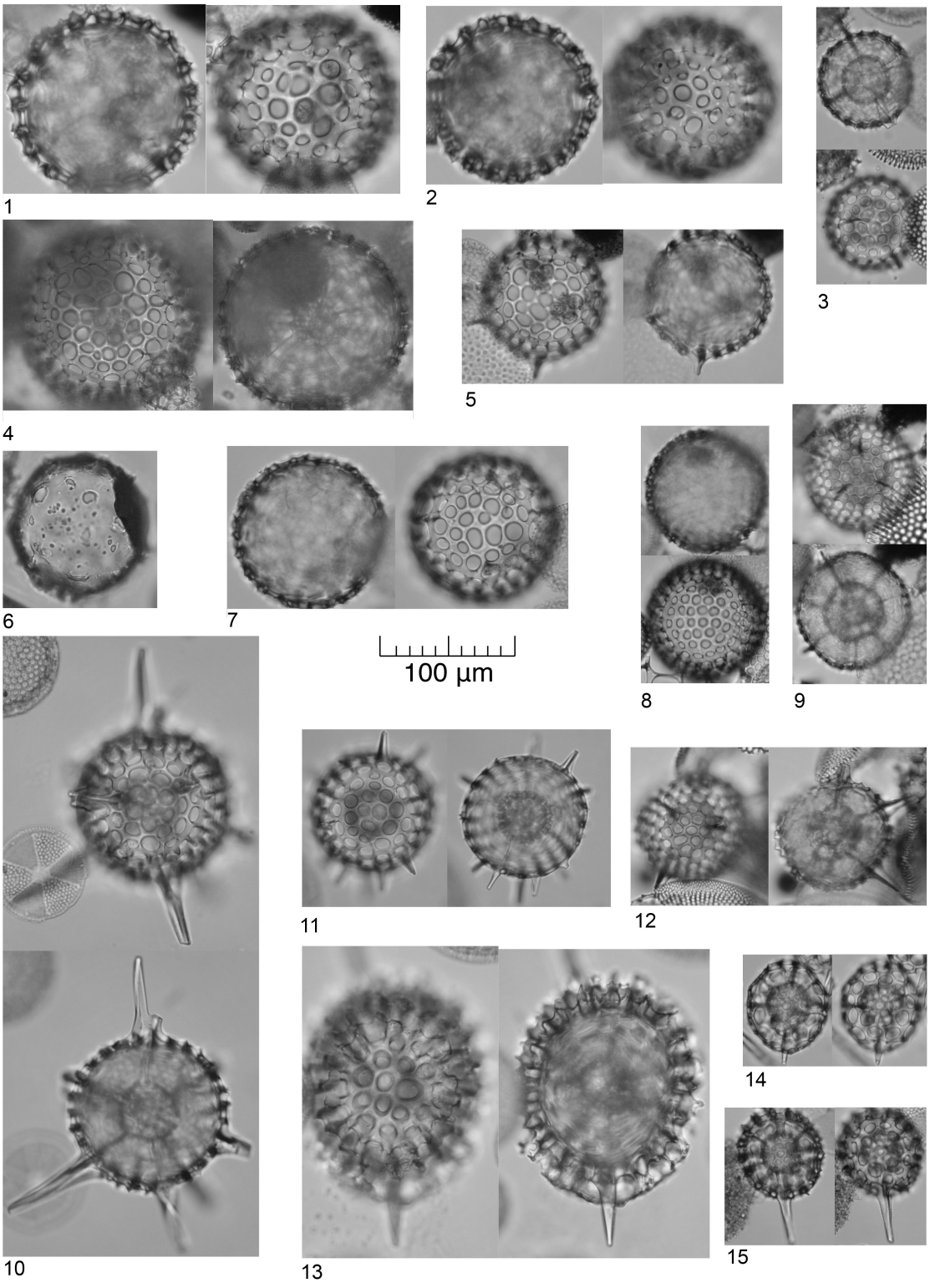


Plate 1 **1-2:** *Rhizosphaera* aff. *variabilium* (Nakaseko) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **3:** *Hexaconthium minerva* Kamikuri (346-U1425B-28H3-149-147 cm); **4:** *Rhizosphaera urumica* Vituchin (346-U1425B-CC-12-17 cm); **5:** *Hexastylus* spp. sensu Nigrini and Lombari (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **6:** *Acrosphaera muse* Kamikuri (346-U1425B-CC-12-17 cm); **7:** *Rhizosphaera* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **8**: *Cenosphaera* cf. *compacta* Haeckel (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **9, 11:** *Actinomma robusta* (Kling) juvenile form (9. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 11: 346-U1425B-28H3-147-149 cm); **10, 12:** *Actinomma* aff. *okurai* Nakaseko and Nishimura (10. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 12. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **13:** *Axoprunum bispiculum* (Popofsky) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **14:** *Druppatractus irregularis* Popofsky (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **15:** *Stylosphaera pyriformis* (Bailey) (346-U1425B-47H1-91-93 cm).

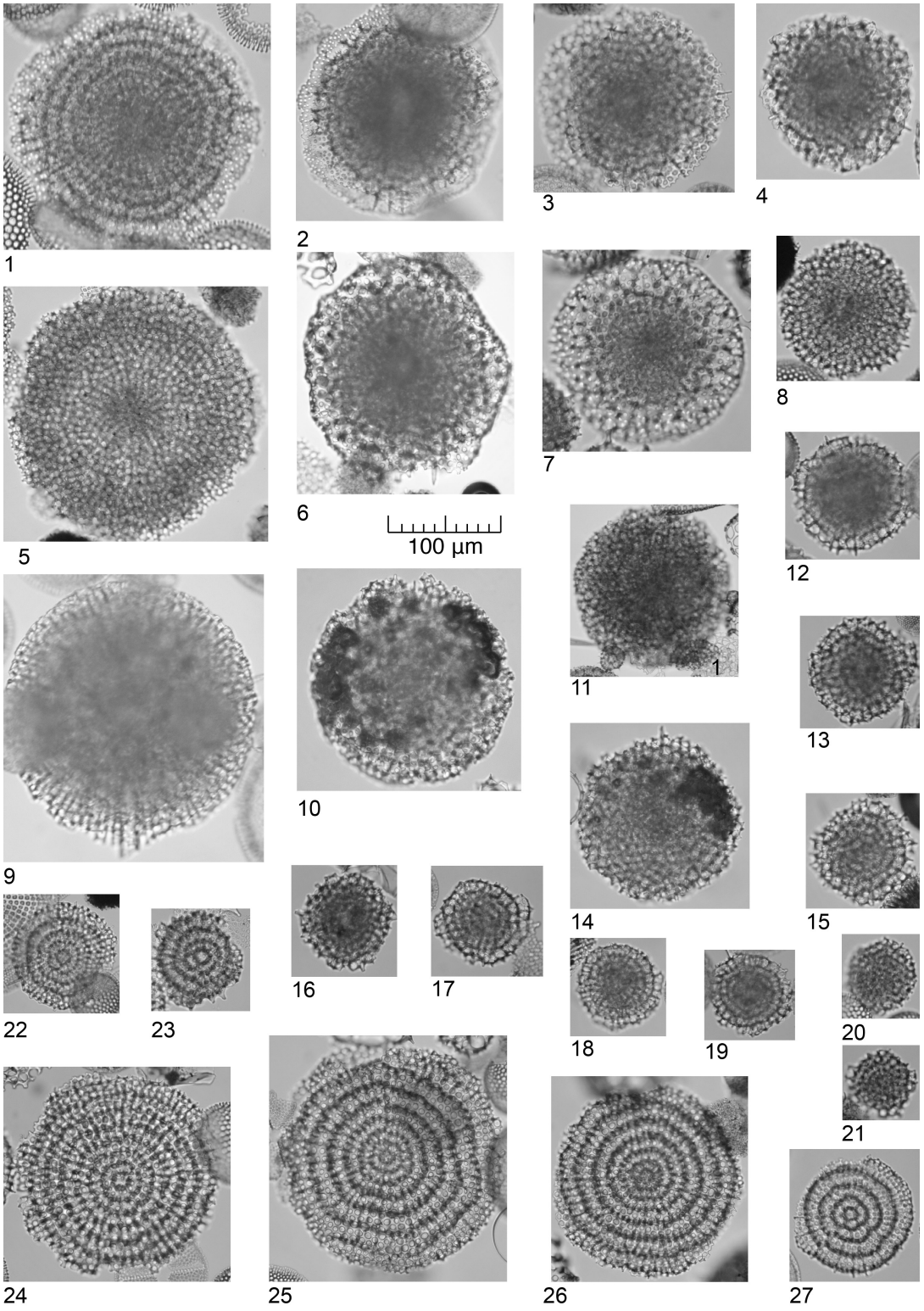


Plate 2 **1:** *Perichlamydium scutaeforme* Campbell and Clark (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **2:** *Perichlamydium* cf. *praetextum* (Ehrenberg) (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **3-4:** *Stylochlamydium* cf. *venustum* (Bailey) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **5:** *Spongotrochus* sp. A (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **6-7:** *Spongodiscus cauletti* group Kamikuri (6: 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 7: 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **8, 12-13, 15-19:** *Flustrella* sp. A (8. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 12,15-18. 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **9:** *Spongopyle osculosa Dreyer* (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **10-11:** *Flustrella* spp. (young forms) (10. 346-U1425B-28H3-147-149 cm; 11. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **14:** *Spongodiscus* sp. A (14: 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **20-21:** *Spongodiscidae juveniles* spp. (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **22-27:** *Stylodictya tenuispina* Jørgensen group (23-24. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 22, 25-27. 346-U1425B-47H1-91-93 cm).

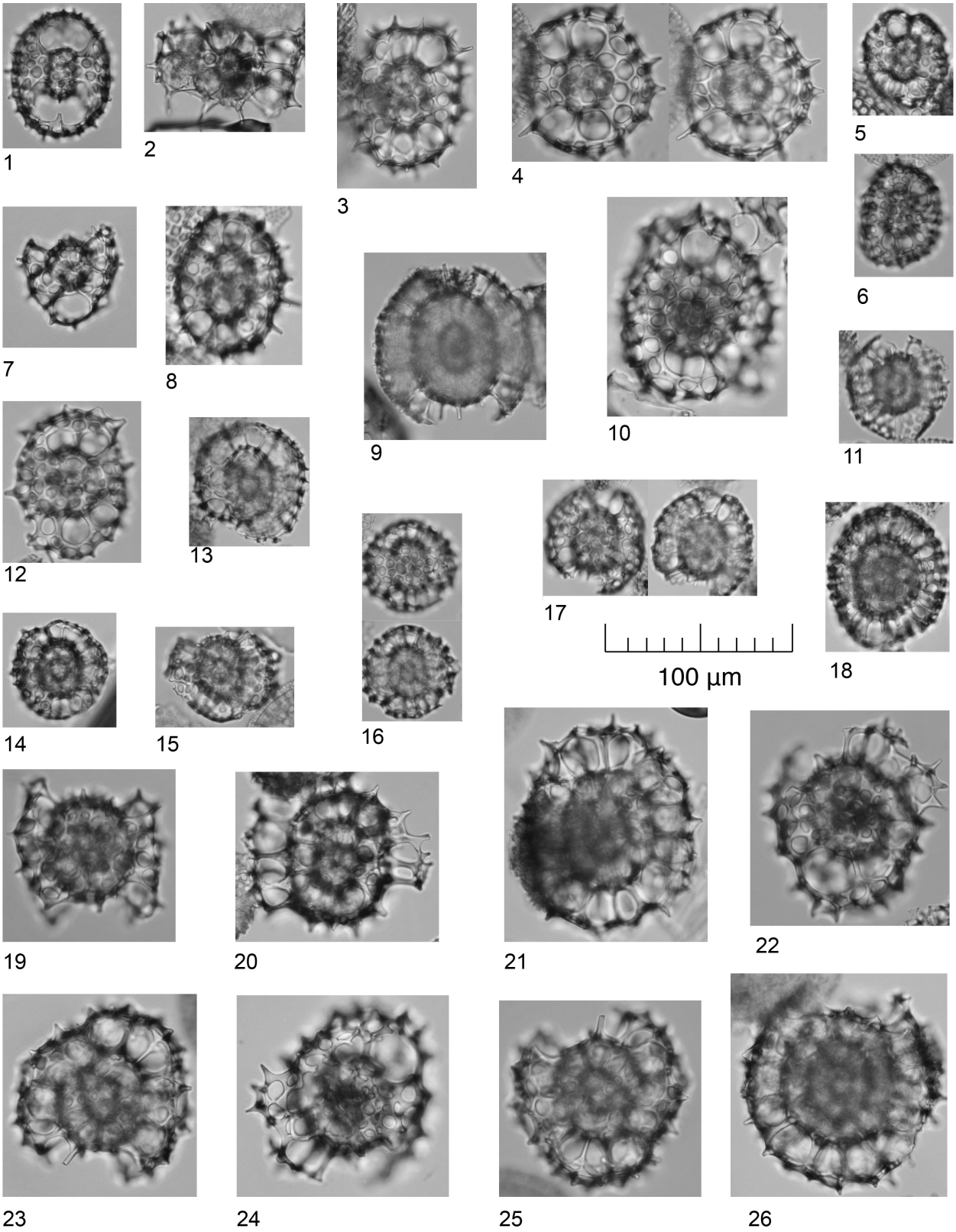


Plate 3 **1:** *Tetrapyle* cf. *circularis* Haeckel (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **2:** *Tetrapyle* cf. *fruticosa* (Tan and Chen) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **3-4, 8:** *Phorticium* cf. *polycladum* Tan and Tchang (3, 8. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 4. 346-U1425B-28H3-147-149 cm); **5-6, 11, 14-18:** *Prunulum coccymelia* Haekcel group (5,18. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 6,16,17. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 11. 346-U1425B-28H3-147-149 cm; 14. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 15. 346-U1425B-28H3-147-149 cm); **7:** *Phorticium* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **9-10, 12-13:** *Phorticium* aff. *scitulum* Zhang and Suzuki (9,10,12. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 13. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **19-26:** *Sphaerolarnacillium* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm).

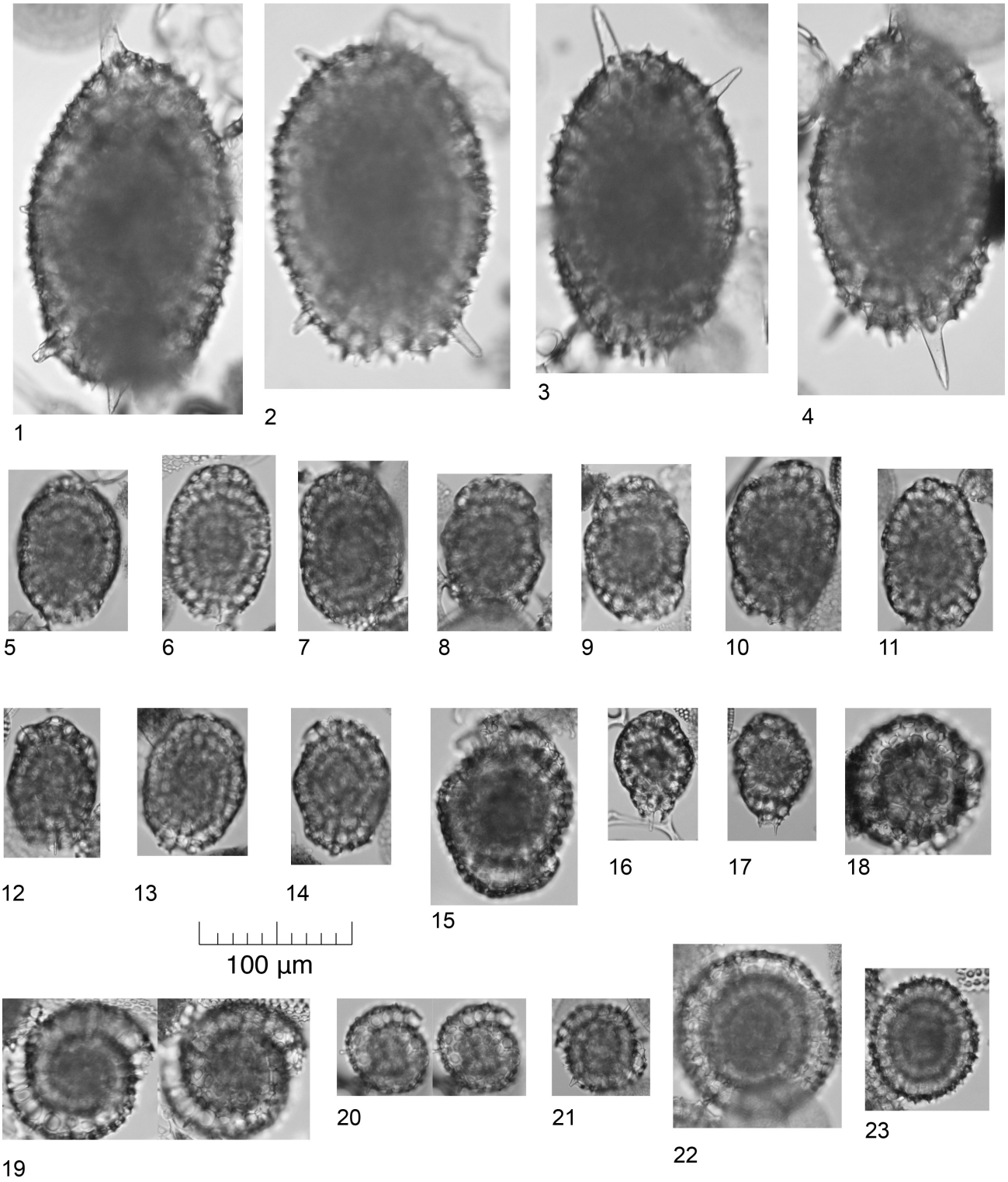


Plate 4 **1-4:** *Larcopyle* aff. *polyacantha* (Campbell and Clark) (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **5-14:** *Larcopyle weddellium* Lazarus, Faust and Popova-Goll group (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **15:** *Larcopyle* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **16-17:** *Larcopyle labyrinthusa* Lazarus, Faust and Popova-Goll (16. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 17. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **18:** *Larcopyle* sp. B (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **19:** *Lithelius* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **20:** *Lithelius* cf. *nautiloides* (Popofsky) (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **21:** *Lithelius* sp. B (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **22-23:** *Lithelius* sp. C (346-U1425B-34H4-46-48 cm).

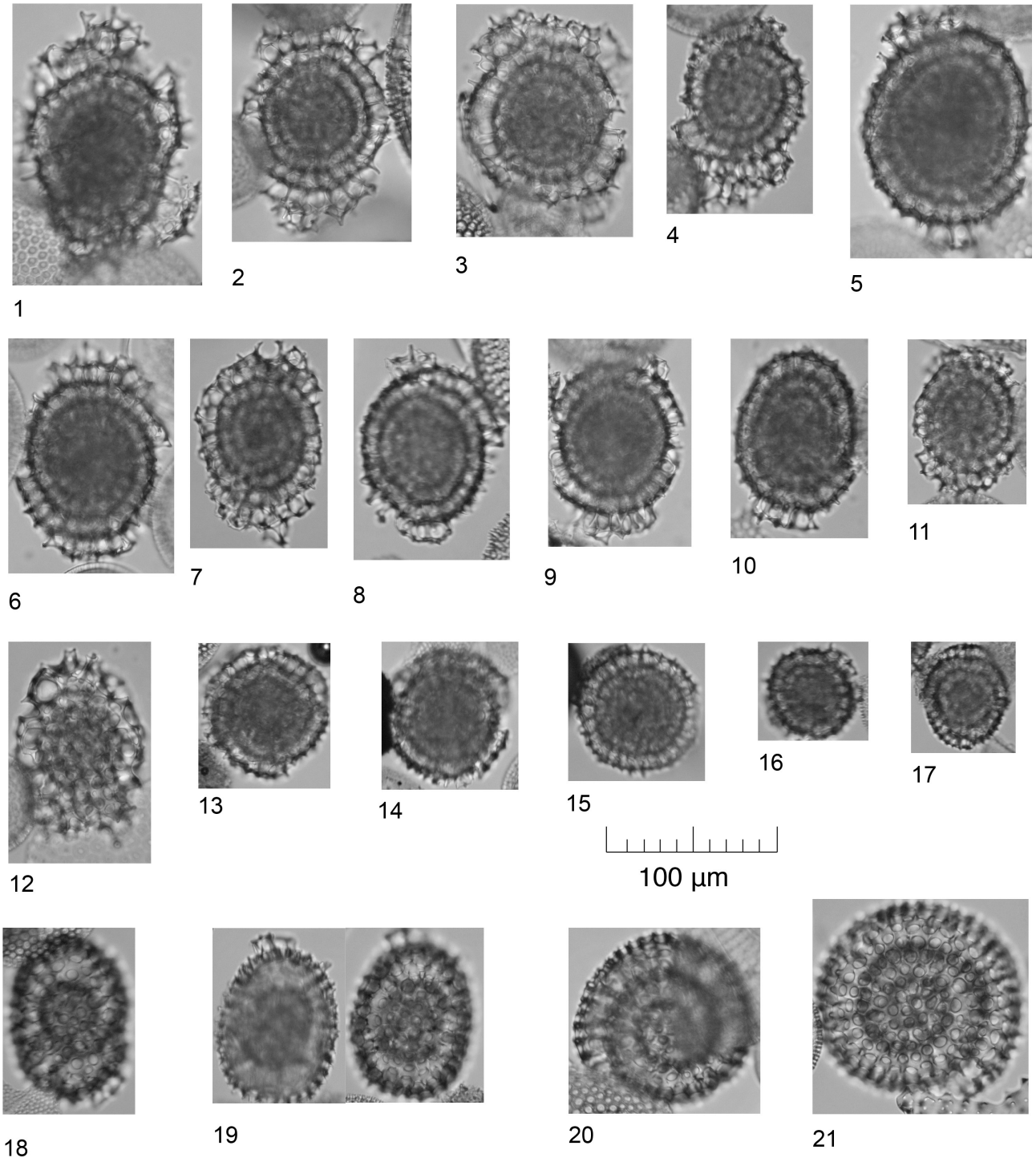


Plate 5 **1-4, 7:** *Lihelius barbatus* Motoyama (346-U1425B-28H3-147-149 cm). **5-6, 7, 8-11:** *Spiremaria* cf. *decens* Kozlova (346-U1425B-28H3-147-149 cm). **12, 16-17:** *Lithelidae* gen et sp. indet (12. 346-U1425B-28H3-147-149 cm; 16-17. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **13-15:** *Lithelius* aff. *spiralis* group (Ehrenberg) (13, 14. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 15. 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **18-19:** *Phacodiscus* aff. *calvertense* (Martin) (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **20-21:** *Lithelius* klingi Kamikuri (346-U1425B-47H1-91-93 cm).

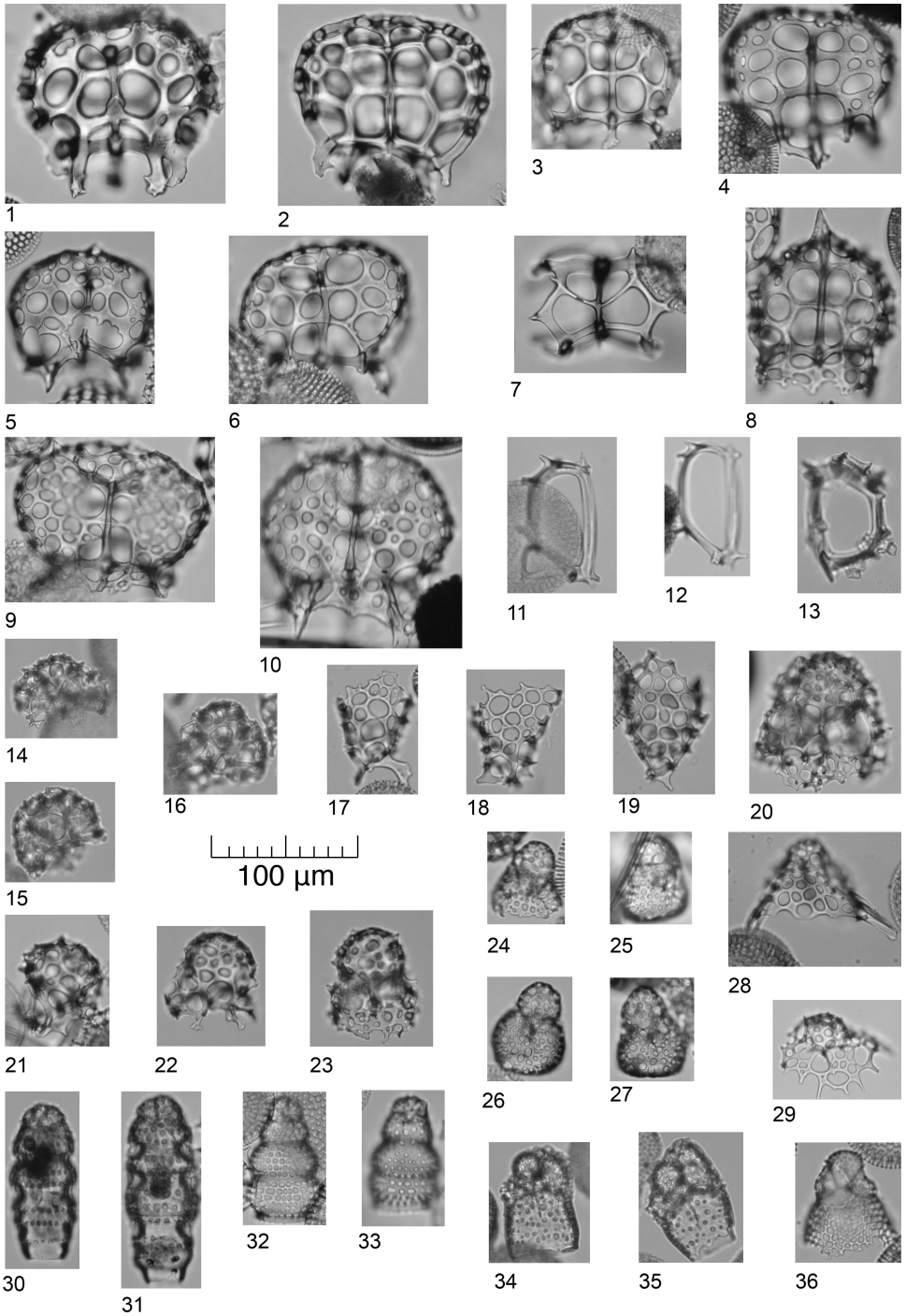


Plate 6 **1:** *Dendrospyris* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **2-3:** *Dendrospyris* sp. B (2. 346-U1425B-34H4-46-48 cm; 3. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **4, 6:** *Dendrospyris* sp. C (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **5:** *Dendrospyris* sp. D (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **7:** *Undet. Triospyridae* (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **8:** *Dendrospyris* sp. E (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **9-10:** *Dendrospyris* cf. *eurus* Kamikuri (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **11-12:** *Zygocircus archicircus* Popofsky (11-12. 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **13:** *Zygocircus*? sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **14-16:** *Steganocubus* sp. A (346-U1425B-30HCC-12-17 cm; 13. 346-U1425D-29H1-45-47 cm); **17-19:** *Peridium sphaerum* Funakawa (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **20:** *Steganocubus*? sp. (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **21-22:** *Cryptogyrus* aff. *trachylobus* Sugiyama (21. 346-U1425B-47H1-91-93 cm; 22, 346-U1425B-34H4-46-48 cm); **23:** *Lophophaenidae* gen. et sp. indet. (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **24-27:** *Botryopera*? *gibbera* Renaudie and Lazarus (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **28:** *Pseudodictyophimus* cf. *elegans* Dogiel and Reshetnyak (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **29:** Pseudodictyophimus sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **30-31:** *Siphocampe arachnea/lineata* (Ehrenberg) group (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **32-33:** *Botryostrobus bramlettei* Campbell and Clark) group (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **34-35:** *Botryocampe* aff. *robusta* (Kruglikova) (346-U1425B-30HCC-12-17 cm); **36:** *Botryopera*? *daleki* Renaudie and Lazarus (346-U1425B-28H3-147-149 cm).

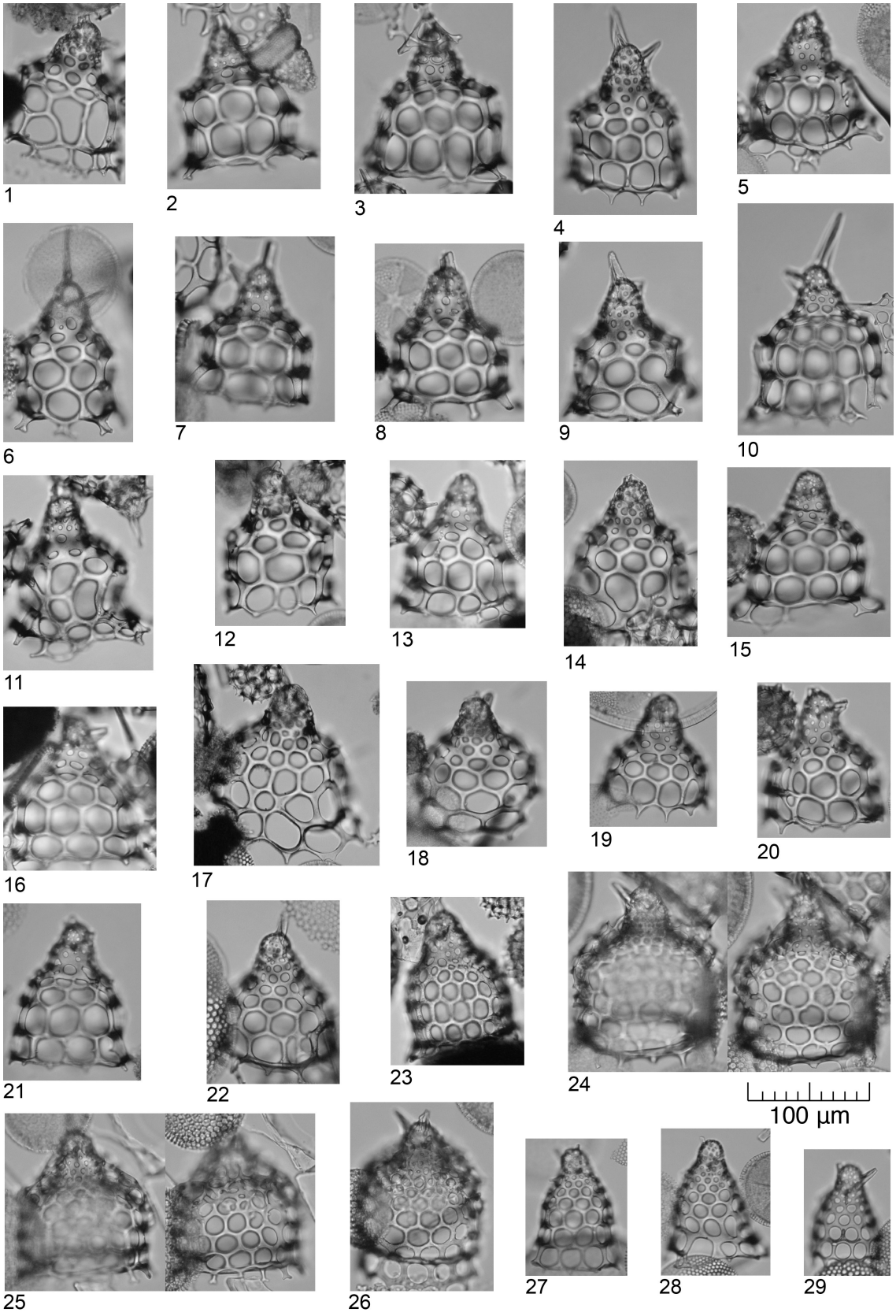


Plate 7 **1-14:** *Cycladophora nakasekoi* Motoyama (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **15-22:** *Cycladophora* aff. *nakasekoi* Motoyama (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **23:** *Cycladophora* cf. *sphaeris* (Popova) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **24-26:** *Cycladophora sphaeris* (Popova) (346-U1425B-28H3-147-149 cm); **27-28:** *Cycladophora cosma cosma* Lombari and Lazarus (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **29:** *Cycladophora* aff. *cornuta* (Bailey) (346-U1425B-47H1-91-93 cm).

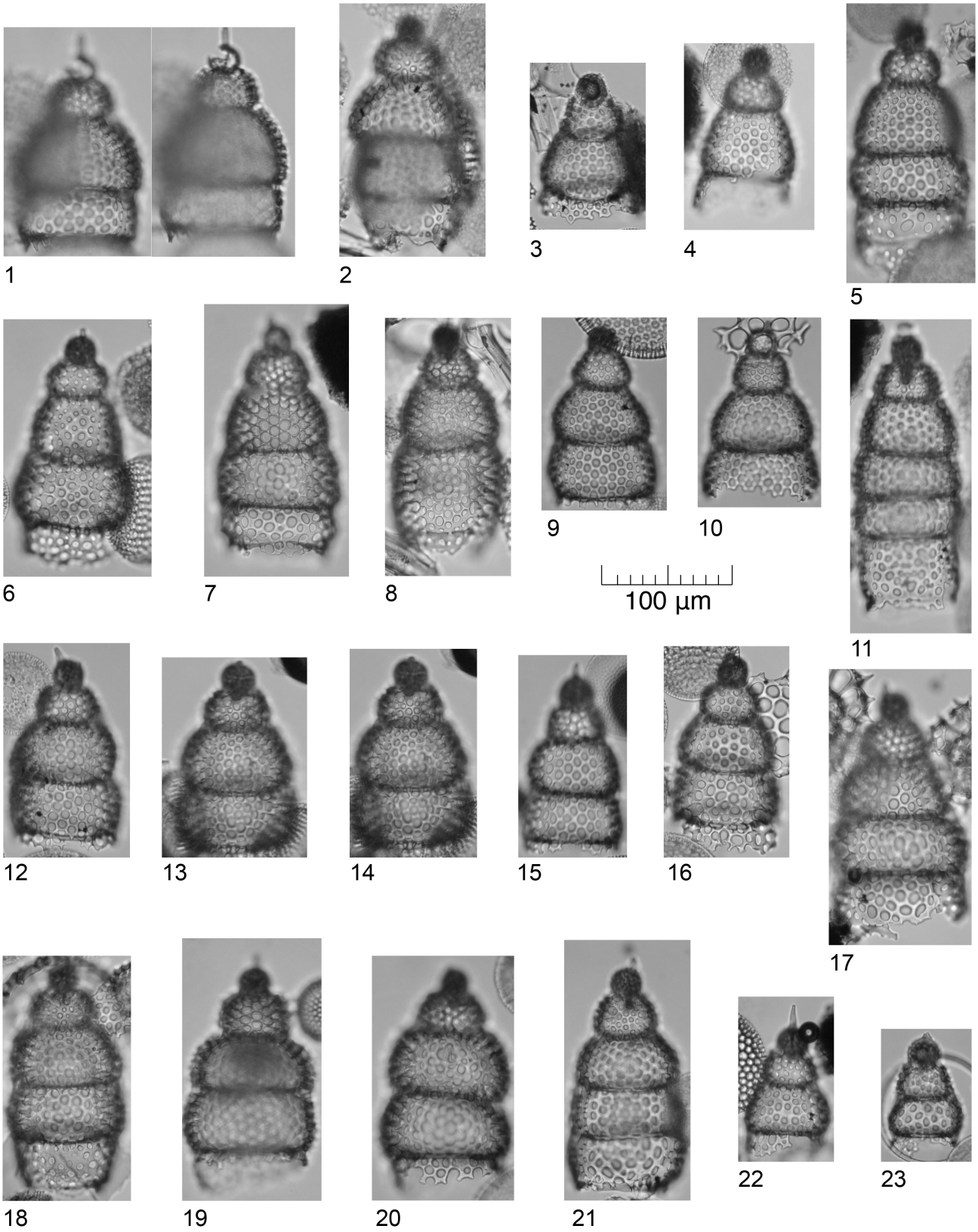


Plate 8 **1:** *Stichocorys delmontensis* (Campbell and Clark) (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **2-8, 11:** *Stichocorys peregrina* (Riedel) "equatorial form" (346-U1425B-34H4-46-48 cm); **9-10, 12-21:** *Stichocorys peregrina* (Riedel) "North Pacific form"(); **22-23:** *Stichocorys* sp. A (346-U1425B-34H4-46-48 cm).

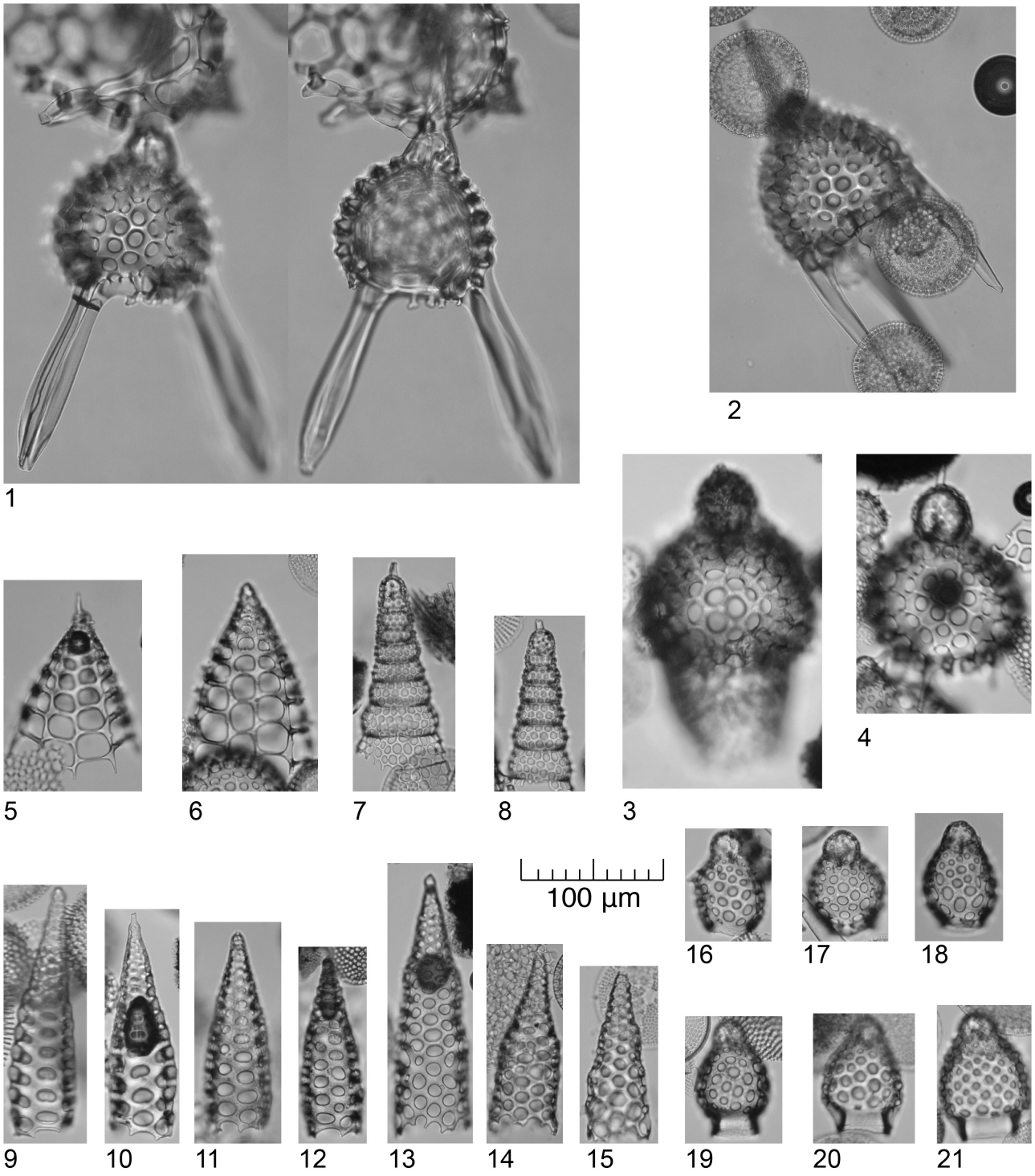


Plate 9 **1:** *Lychnocanoma magnacornuta* Sakai (346-U1425B-51HCC-24-29 cm); **2:** *Lychnocanoma parallelipes* Motoyama (346-U1425D-29H1-45-47 cm); **3-4:** *Lipmanella redondoensis* (Campbell & Clark) (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **5-6:** *Cinclopyramis quadrata* (Haeckel) comb. nov. (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **7-8:** *Cyrtolagena cuspidata* (Bailey) (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **9-12:** *Cornutella bimarginatus* (Haeckel) (9. 346-U1425B-28H3-147-149 cm; 10-12. 346-U1425B-47H1-91-93 cm); **13-15:** *Cornutella trochus* Ehrenberg (346-U1425B-47H1-91-93 cm); **16-21:** *Carpocanarium papillosum* (Ehrenberg) group (346-U1425B-47H1-91-93 cm).

地質調査研究報告，第 70 巻，第 1/2 号，p. 211–224, 2019

資料・解説 - Notes and Comments

半永久的な保存や展示のための柱状堆積物試料の樹脂包埋法

久保田好美 [1, *]・田尻理恵 [2]

Yoshimi Kubota and Rie Tajiri (2019) Resin-embedding procedure for marine sediment core samples for semi-permanent archives and the use of outreach. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p.211–224, 10 figs, 1 table.

Abstract: Recently, taking long-slab samples from marine/lake sediment cores and preserving them for research and outreach purposes has gained attention by researchers and educators. Epoxy resin is one of the ways to preserve the sediment materials permanently. Here, we report a procedure to make epoxy-resined samples with long and thin sediment samples, which were subsampled with aluminum sampling tools (long-slab samples). We used marine sediment cores retrieved from the Yamato Rise, Japan Sea during the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 346. The long-slab samples were dehydrated with acetone and impregnated with the Spurr resin, epoxy resin. The state of the curing of the resined samples was examined in the cross-section of one of the test samples after hardened by heating. The surface of the resined samples was hardened enough as expected. Although the inside of the long-slab samples was not enough hardened, the resined samples were good enough in quality for outreach purpose.

Keywords: Resin-embedding procedure, Deep sea core samples, Long-slab sample, Acetone dehydration, Japan Sea sediment

要　旨

近年，研究のためのアーカイブ，あるいは教育・普及用の展示物としての保存を目的とし，長尺のサンプリングツール（アルミ型枠）を用いて柱状堆積物試料を板状に長く採取する試みがなされている．一方，海底堆積物や湖底堆積物の柱状試料（コア試料）を半永久的に保存する方法として樹脂包埋法がある．本論は，半割されたコア試料からアルミ型枠を用いて採取した長尺試料（ロングスラブ）の樹脂包埋法について報告する．統合深海掘削計画で採取された日本海の堆積物試料を用い，アセトンでの試料の脱水，さらにエポキシ樹脂の置換を行い，熱重合させ試料を硬化させた．今回用いた堆積物試料は，1 mm厚のアルミ型枠で容易に採取できるほどの柔らかさであったが，堆積物を構成する粒子が小さくよく締まっていた．その結果，樹脂は完全には浸透せず，内部は未固結のままであった．内部の不均一性が影響を与えうるような研究に活用するためにはさらなる手法の改善が必要であるが，展示用としては十分な品質であった．

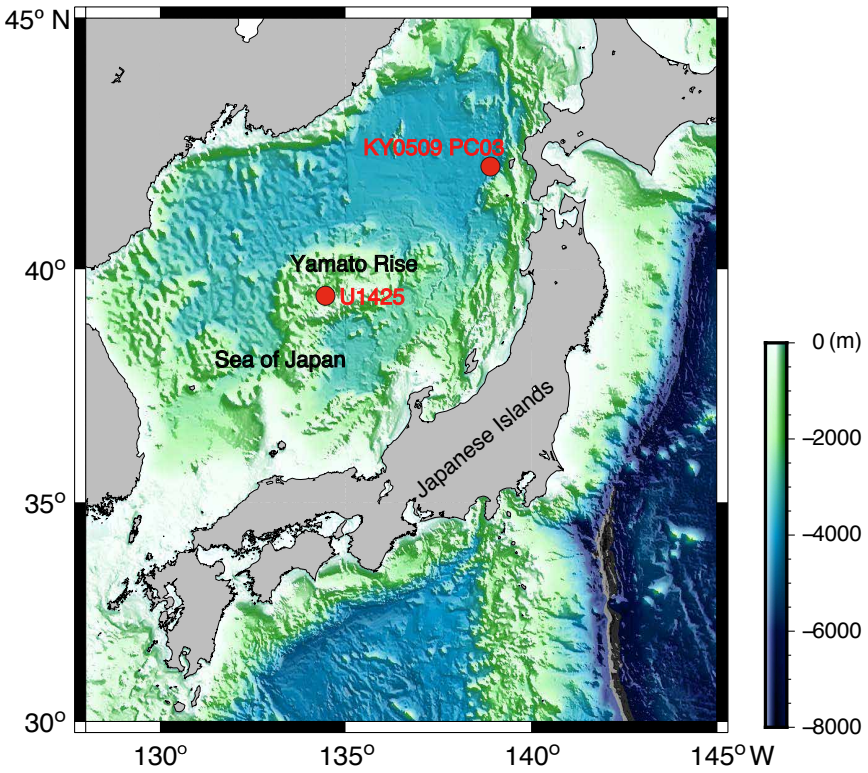
1．はじめに

水分を含んだ未固結堆積物を樹脂含浸などの方法で包埋し，採取当時の状態を半永久的に保存することは，研究面，教育・普及面の両方に需要がある．研究面では，滝沢ほか（1995）に記されたように，堆積物の組織を天然の状態で観察することにより，粒子のサイズや形態，配列といった観察事実から堆積環境や堆積物の間隙率，続成作用について有用な情報を得る事ができる．一方，教育・普及面では，博物館の展示物や教材として当時の環境変動をわかりやすく示す試料となる．最近では，セーレンプラネット（福井市自然史博物館分館）において，年縞の美しい水月湖（福井県）の堆積物の柱状試料（コア試料）から長さ 1 m，幅 5 cm 程度の 1 枚の巨大薄片を作成し展示物として活用する試みがなされるなど，ダイナミックな変化が見てとれる試料を多くの人に知ってもらいたいという研究者側の要望も増えつつある．こうした背景から，海底や湖底のコア試料から板状の長尺試料（ロングスラブ）（例：長さ 100 cm，幅 5 cm，厚み 1 cm）を採取する試みは近年増えてきている．滝沢ほか（1995）では，

[1] 国立科学博物館 (National Museum of Nature and Science, 4-1-1 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-0005, Japan)

[2] 田尻薄片製作所 (Tajiri Thin-section Lab, 3-1-11 Sannnose, Higashiosaka, Osaka, 577-0849, Japan)

[*] Corresponding author: Y. Kubota, Email: yoshimi @kahaku.go.jp



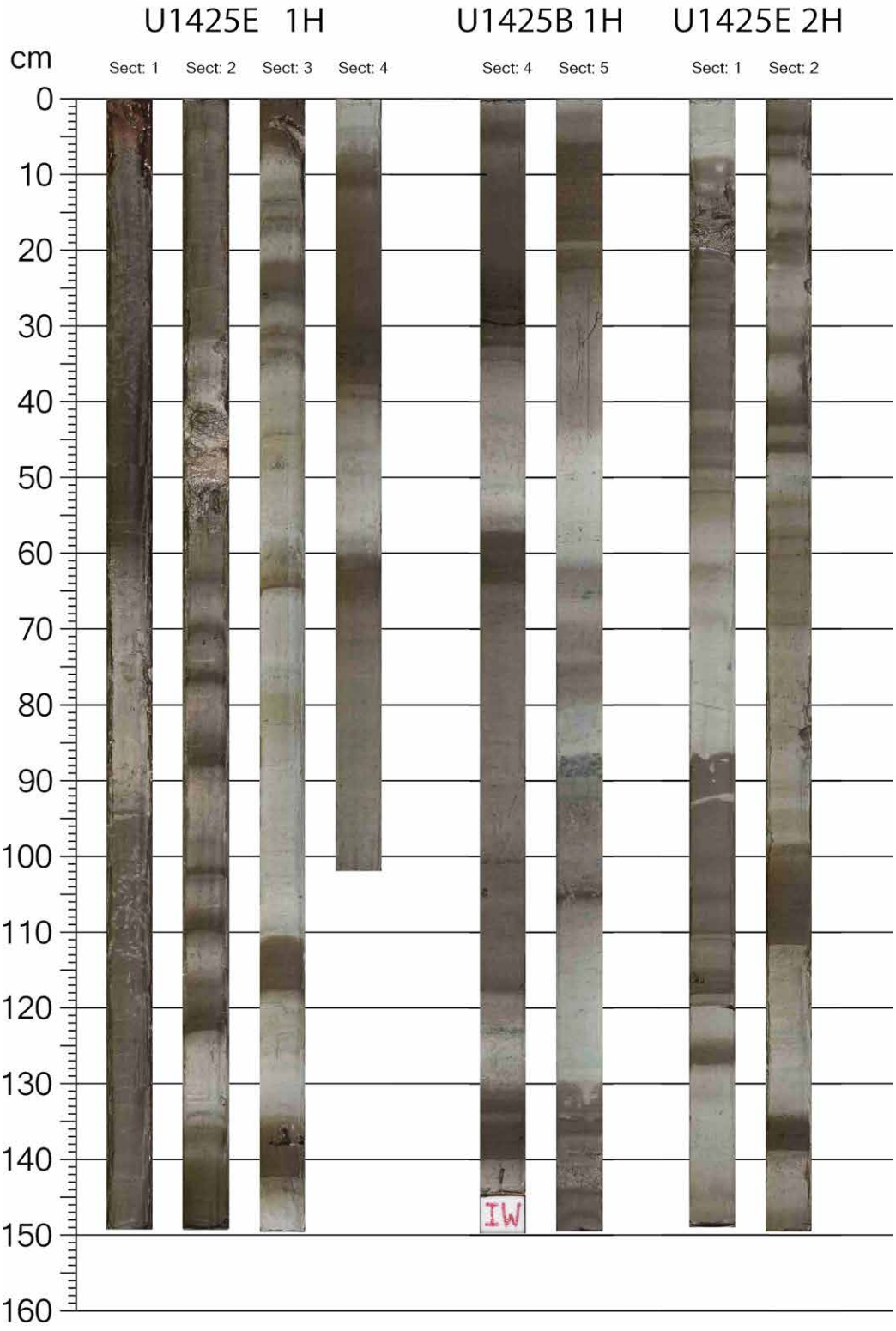
第 1 図　試料採取場所.
Fig. 1　A map of core sites.

各辺 1 cmの立方体の堆積物の樹脂包埋法が示されたが，長尺の試料を樹脂包埋するためにはサンプリングツールや容器等の細かな部分も含めてさらなる手法の工夫が必要である．筆者らは，2017 年 7 月~9 月に国立科学博物館（東京，上野）で開催された特別展「深海 2017」に合わせて日本海の海底堆積物を展示する試みを実施した．アルミ型枠でロングスラブ（長さ約 80 cm，幅 5.5 cm，厚み 1 cm）を採取し，樹脂で包埋し，展示に活用した．本論ではその手法について報告をおこなう．

2．　試料とアルミ型枠での試料採取方法

用いた試料は，2013 年 7 月末～ 9 月末に行われた統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program: IODP）Exp. 346 “Asian Monsoon”航海で採取された日本海中部，大和堆（やまとたい）の堆積物U1425（39º29.44′ N，134º26.55′ E，水深 1909 m）である（第 1 図）．日本海には，氷期–間氷期やそれより短い数万年～千年程度で起こる気候・海洋変動を記録した縞状の堆積物が見つかる（Tada *et al.*，1999）．この縞は日本海全体の環境変化によって形成されたもので，厚さにバリエーションがあるものの，日本海の中層以深では広範囲で類似したパターンを示す．こうした美しい縞模様の存在は，Exp. 346 以前のDSDP Leg 31（1973 年）や ODP Leg 127/128（1989 年）の日本海掘削ですでに認知されていたが，当時の掘削はシングルホールであったため約 10 mごとにコアギャップが存在し，厳密な意味での連続堆積物ではなかった（佐川ほか，2015）．2013 年に実施されたExp. 346 では，1 つのサイトで 2 つ以上の掘削孔から堆積物を採取し，すべてのサイトでほぼ完全な連続堆積物の回収に成功した．大和堆のサイトU1425 は最も古い時代（1,200 万年前）まで到達したサイトであるが，このうちの上部 10 m（岩相ユニット 1A に相当）を今回の樹脂包埋に用いた（第 2 図）．堆積速度が 40 m/m.y.程度と遅いため，10 mのコア試料で約 60 万年をカバーしている（Tada *et al.*，2015）．岩相ユニット 1A は珪藻や有孔虫を含む粘土で構成され，数十cmスケールで暗色層と明色層とが互層することが特徴である．暗色層は有機物に富み，明色層は有機物に乏しい（Tada *et al.*，1999）．また，数mm ～数cmの火山灰層も挟在する．今回サンプリングした試料では，U1425E 1H Sec. 2 約 40–50 cmにAT（姶良・丹沢）の火山灰が含まれる（Irino *et al.*，2018；Tada *et al.*，2018）．

アルミ製のサンプリングツールは，Nakagawa *et al.*（2012）でdouble-L（LL）channelとして紹介されているものを形状を変えて応用している．今回は，厚みが 1 mm のアルミ板でコの字型に成形されたアルミ型枠（長さ 85



第2図　樹脂包埋に用いたExp. 346 U1425試料の船上でのスキャン写真．International Ocean Discovery Program LIMS online Report http://web.iodp.tamu.edu/LORE/（2018年4月30日）よりダウンロードした．写真はPhotoshop上で明るさ(+100)とコントラスト(+30)を調整した．

Fig. 2　Scan images of Exp. 346 U1425. The images were downloaded from International Ocean Dis-covery Program LIMS online Report http://web.iodp.tamu.edu/LORE/（April 30, 2018). Brightness（+100) and Contrast (+30) was modified with Photoshop software.

第3図　a) 今回用いたアルミ型枠．　b) 海外製のアルミ型枠．
Fig. 3　a) Aluminum sampling tool used in this study. b) Another aluminum sampling tool used in abroad.

cm, 幅5.5 cm，高さ1 cm) を用いた(第3図a)．コの字型スラブはアセトンおよびエポキシ樹脂が底面からしみ込むように，底面に約4 mmの間隔で1 mm径のパンチング孔(開口率約5%) を開けた(第3図a)．アルミ板の加工は，株式会社ユビロン・ファクト(大阪府大阪市: http://www.yubiron.co.jp　2018年12月19日 確認) に依頼した．一方，海外では研究用として今回用いた型枠よりも粗い間隔でパンチング孔が開けられた物を使用する場合もある(第3図b)，海外製)．

ピストンコアラーあるいは，海底掘削で得られたコア試料は，通常，長軸方向に半割され，半分をワーキングハーフとして研究に用い，残りの半分をアーカイブハーフとして保存する．今回用いたコア試料を第1表に示す．これらは，高知大学海洋コア総合研究センターの冷蔵保管庫において保存されていたものである．コア試料からのアルミ型枠を用いてのサンプル採取は，2017年12月に高知大学海洋コア総合研究センターで行った．また，Exp. 346の試料処理を行う前に手順や様々な条件を試行するため，日本海から2009年8月に海洋調査船「かいよう」の航海によって日本海北部(42° 00.3139′ N 138 ° 49.0251′ E，水深3,509 m) で採取されたピストンコアKY09-05 PC-3 Sec. 5Aを用いた(第1図)．この堆積物は，オリーブ灰色～茶色の泥で構成され，火山灰を挟有する．KY09-05の2試料については，樹脂の浸透を調べるために短軸に沿って切断し断面を観察したが，U1425試料については，展示物として用いたため切断は行っていない．試行用のKY09-05のロングスラブも合わせて，本論では合計で17本の処理を行った(第1表)．

半割コア試料からアルミ型枠を用いてのサンプリング方法は，以下の通りである．まず，アルミ型枠2本を半割コアの上から並べて押し込む．IODP Exp. 346のコア試料(第4図) は，1セクションが150 cmであるため，その後の処理の容易さを考慮して，75 ～ 80 cmのロングスラブを2本取る方法でサンプリングを行った．この際，2本のロングスラブの境界に，堆積物の縞の境界が重ならないように注意した．アルミ型枠は長さが85 cmであるため，それぞれの端が10 cm程度余るように押し込んだ．今回の試料は，アルミ型枠が容易に押し込める程度の柔らかさであったが，より硬い堆積物の場合は，最初に堆積物にスパチュラや包丁などで切り込みを入れると押し込みやすい．しっかり押し込んだ後，試料の下部からアルミ型枠の下部に沿ってテグスを入れ，テグスに張力をかけながら堆積物を切るようにテグスを動かす．この際，弱い力でアルミ型枠を手で押さえながらテグスを動かすと失敗が少ない．ただし，未固結の堆積物の場合，テグスで切った後に強く押し込んだり時間が経ったりすると切れた箇所が再度結合してしまうため，注意が必要である．また，端の処理も気をつけるべきである．特に，端にかかり，テグスを抜く際に堆積物が削られることがあるため，テグスの位置を確認しながらゆっくりと動かすことが重要である．テグスで切った後，アルミ型枠が乗ったまま半割コア試料を少し斜めに傾け，アルミ型枠の上部からスパチュラを差し込み，コア試料を斜めにしながらロングスラブを抜く．この時，堆積物がきちんとアルミ型枠についた状態でコア試料から引き剥がしていくことが重要である．今回は，以下で述べるアセトン以降の処理を国立科学博物館(茨城県つくば市) で行ったため，サンプル採取直後の表面の整形は行っていない．テグスで堆積物を切る際に失敗することはあまりないが，ロングスラブを抜き出す際に堆積物が途中で切れたり，綺麗に剥がれなかったりする場合がある．また，締まった堆積物の場合，熟練してくればほとんどが綺麗に抜き出すことができるため，表面の整形はそれほど必要がないことが多い．採取後のロングスラブは，表面に同じ面積のアクリル板をかぶせ，端を緩衝材の上からテープで固定した．その後，厳重に食品用ラップフィルムで包

第1表　試料の情報と処理のスケジュール．
Table 1　Samples and dates of processing.

Sample No.	Exp.	Site	Hole	Core	Core Type	Section	Section Half	Top Interval (cm)	Bottom Interval (cm)
1	KY0905			PC3		5	A	0	50
2	KY0905			PC3		5	A	50	100
3	346	1425	E	1	H	1	W	0	70
4	346	1425	E	1	H	1	W	70	150
5	346	1425	E	1	H	2	W	0	70
6	346	1425	E	1	H	2	W	70	150
7	346	1425	E	1	H	3	W	0	75
8	346	1425	E	1	H	3	W	75	150
9	346	1425	E	1	H	4	W	0	50
10	346	1425	E	1	H	4	W	50	104
11	346	1425	E	2	H	1	W	0	75
12	346	1425	E	2	H	1	W	75	148
13	346	1425	E	2	H	2	W	0	75
14	346	1425	E	2	H	2	W	75	150
15	346	1425	B	1	H	4	A	75	144
16	346	1425	B	1	H	5	A	0	75
17	346	1425	B	1	H	5	A	75	150

Sample No.	アセトン 60%	アセトン 70%	アセトン 80%	アセトン 90%	アセトン 100%	アセトン 交換	アセトン 交換	アセトン 交換	樹脂 含浸	樹脂 交換	樹脂 交換	樹脂 交換	樹脂 交換	60℃で 硬化
1	2/24	2/27	2/28	3/1	3/6	3/8	3/10	3/13	3/15 AM	3/15 PM	3/16 AM	3/16 PM	3/17 AM	3/17
2	2/24	2/27	2/28	3/1	3/6	3/8	3/10	3/13	3/15 AM	3/15 PM	3/16 AM	3/16 PM	3/17 AM	3/17
3	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	5/25	5/26	5/29	-	-	5/31
4	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	6/1	6/2	6/5	6/6	-	6/6
5	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/2	5/8	5/12	6/14	6/15	6/16	6/19	-	6/19
6	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	6/8	6/12	6/13	-	-	6/13
7	3/17	3/21	3/22	3/23	3/27	3/28	3/31	4/3	4/17	4/18	4/19	4/21	4/24	5/9
8	3/17	3/21	3/22	3/23	3/27	3/28	3/31	4/3	4/17	4/18	4/19	4/21	4/24	5/9
9	3/17	3/21	3/22	3/23	3/27	3/28	3/31	4/3	4/17	4/18	4/19	4/21	4/24	5/9
10	3/17	3/21	3/22	3/23	3/27	3/28	3/31	4/3	4/17	4/18	4/19	4/21	4/24	5/9
11	4/17	4/18	4/20	4/25	4/27	5/1	5/8	5/12	5/25	5/26	5/29	-	-	5/31
12	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	6/14	6/15	6/16	6/19	-	6/19
13	4/17	4/18	4/19	4/25	4/28	5/2	5/9	5/12	5/25	5/26	5/29	-	-	5/31
14	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	6/8	6/12	6/13	-	-	6/13
15	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/1	5/8	5/12	5/25	5/26	5/28	-	-	5/31
16	4/17	4/18	4/19	4/25	4/27	5/2	5/9	5/12	5/25	5/26	5/30	-	-	5/31
17	4/17	4/18	4/20	4/25	4/28	5/2	5/9	5/12	6/1	6/2	6/5	6/6	-	6/6

第4図　Exp. 346 における日本海のコア試料．撮影：William Crawford, IODP/TAMU.
Fig. 4　Cores of Japan Sea sediment (Exp. 346). Photos credit: William Crawford, IODP/TAMU.

み，バキュームシーラーを用いてプラスチック袋内の空気を抜いた．さらに，光による変色を防ぐため，アルミ袋に入れ，冷蔵で国立科学博物館まで輸送した．今回は，幅のある型枠を用いたが，1 ～ 2 cm程度の幅のdouble-L (LL) channelを用いた長尺試料の採取方法については，Nakagawa *et al.* (2012)で紹介されている．また，そのサンプリング方法の詳細についても動画共有サイト，YouTube（https://www.youtube.com/watch?v=SsgYG6VNW5Q, 2018年4月30日 確認）で見ることができる．

3．アセトンでの脱水

試料は，次の処理までの間，国立科学博物館の冷蔵庫（5℃以下）で保管した．アセトンでの処理の前に，堆積物表面を整えるためカッターの刃を用いてロングスラブ

の表面を削った．その後のロングスラブの処理は，強度を保つため，また形を維持すためアルミ型枠をはめ込んだまま行っている．第5図にアセトン置換での装置および作業風景の写真をまとめた．

エポキシ系樹脂は，熱を加えることで一時的には流動性が生じるが次第に硬化しその後の変形がほとんどないという特徴を持つ(熱硬化性樹脂)．さまざまある樹脂のなかでも，エポキシ系樹脂は，一旦硬化すると靭性が高く岩石カッターでの切断や薄片試料のための研磨にも耐えうる強度を持つようになる．エポキシ系樹脂は，1分子中に2個以上のエポキシ基をもつ低分子化合物(主剤)が，硬化剤と熱により重合することでポリマーとなって硬化する．しかし，試料に水分が含まれていると重合不良を起こすことが知られており，樹脂の添加の前に脱水処理を行う必要がある(田尻・藤田，2013)．脱水処理には，エタノール(滝沢ほか，1995)やアセトンを用いる手法がある(Jim，1985；Lamoureux，1994；Pike and Kemp, 1996；Boës and Fagel，2005；田尻･藤田，2013)．エタノールを用いる脱水は，樹脂含浸の前にさらにもう一段階，揮発性の高いプロピレンオキサイドやn-ブチルグリシジルエーテルあるいはメチルグリシジルエーテルなどに置換する必要がある．一方，アセトンは揮発性が高いため，水分との置換後そのまま樹脂の含浸に移行できるという利点がある(田尻・藤田，2013)．したがって，本研究ではアセトンを脱水剤として用いた．本論は，基本的に田尻・藤田(2013)の樹脂固定の手法を踏襲しているが，堆積物を扱うにあたり若干の改良を加えている．

3. 1　アセトン置換用の容器

アセトンはエタノールに比べて脱水の手順を一段階省けるという利点がある一方，耐薬品性の観点からは保管する容器に制限があるという欠点がある．今回の樹脂試料の作成で最も困難であった点は，容器の選定である．安価に手に入るプラスチック容器のほとんどはアセトンの長期保管に適さない．プラスチックの中でも，食品の保管用などで一般に流通しているポリエチレン製やポリプロピレン製の容器は一時的な使用であれば耐えうるが，塩化ビニルやアクリルは耐性がない．85 cmの長い試料を浸しておく容器として，ポリエチレン製やポリプロピレン製は市販のもので見つけることができず，特注先も見つけることができなかったため，量販店で購入できる塩化ビニル製の雨樋を代用した(第5図a)．アセトンが漏れないようにするため，またアセトンによる雨樋の劣化を防ぐため，雨樋の上にポリエチレンシートを敷いた(第5図a，d，e)．試料を入れた雨樋は，アセトンが揮発しないように食品用ラップフィルムをかぶせ，デシケーターに入れる，または，コア試料を保管する際にも利用されるポリエチレンなどの袋に入れて保管した(第5図b，c)．デシケーターは，ロングスラブが4本程度入るように，成形が比較的簡単な塩化ビニル製で特注した(アズワン社製)(第5図b)．しかし，この雨樋は継続してアセトン溶液にさらされると2～3週間程度で大きく変形し使用できなくなった．デシケーターも，数週間後に大きく変形した(第5図h)．一般的には，アセトンの保管には，金属やガラスが良いとされる．また，ポリエチレン製のいわゆるタッパウェアは，数ヶ月程度は耐性を確認できた．小さく短い試料であれば，こうした市販のものが利用できるだろう．

3. 2　脱水(置換)方法

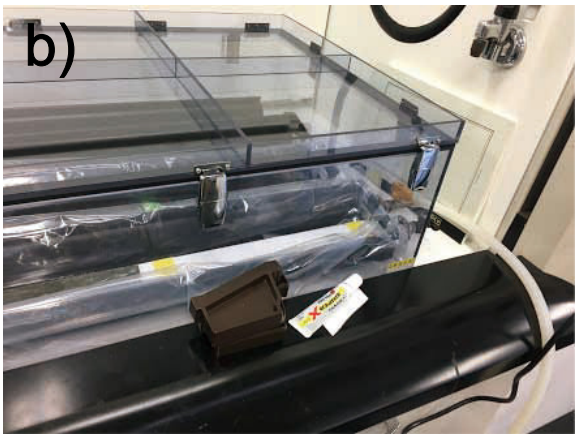
アセトンは，和光1級のグレードを使った．アセトンやアルコールでの脱水は，低濃度から徐々に濃度を上げていくのが良いとされる(滝沢ほか，1995；田尻・藤田，2013)．本研究では，60%から段階的に1日，10%ずつ濃度を上げていった．100%以降は，2日おきにアセトン溶液を交換し，アセトン置換開始後，約1ヶ月後に樹脂置換に移行した．スラブ試料は，アセトン溶液の交換ごとに肉眼での縞の観察と写真撮影を行った．アセトン置換開始後，10日程度で縞のコントラストが薄れてきたが，コントラストが最後まで消えることはなく，この方法でも十分，本来の堆積物の色の変化を保持できることが判明した．100%アセトン溶液以降は，交換時に溶液の色が黄色に変色しており(第5図f)，堆積物内の有機物が溶出していたことを示している．日本海堆積物の縞の変化は，L*(グレースケール)に最も強く表れる(e.g. Tada *et al.*，1999)．そして，堆積物の明暗の変化は，有機物含有量に関係していることが知られている(Tada *et al.*, 1999)．つまり，有機物含有量が多い層は暗くなり，逆に少ない層は明るくなる．アセトン溶液に浸している間は堆積物中の有機物が溶出することによって，暗い層が

(p. 217 →)

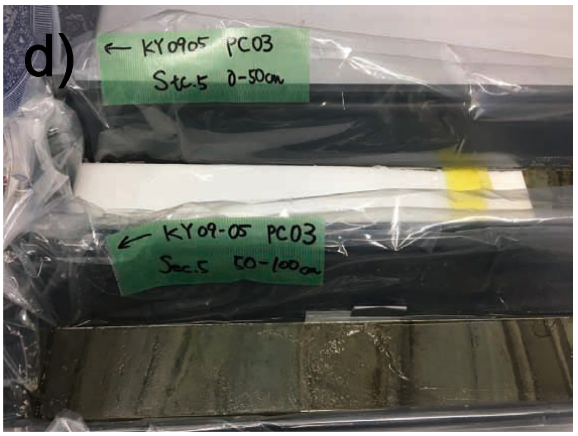
第5図　アセトン置換に関連する器具などの写真．a) アセトン置換の際に用いた雨樋．b)デシケーター．c)アセトンの揮発を防ぐため，雨樋をポリエチレン袋に入れている様子．d)とe) 雨樋の上にポリエチレンシートを敷き，アセトンとロングスラブを入れている様子．f) アセトン100%溶液の交換時に液が黄色に変色したもの．g)乾燥によりロングスラブの堆積物に亀裂が入ったもの．h) アセトンにより変形したa)のデシケーター．

Fig. 5　Photos regarding the process of dehydration by acetone. a) A gutter utilized as a container for acetone and long-slab samples. b) A vacuum desiccator. c) Long-slab samples impregnated with acetone in the containers covered by polyethylene bags. d) and e) Long-slab samples impregnated with acetone in the containers. f) Change in color of acetone after a long-slab samples is impregnated with acetone. g) A long-slab sample with cracks because of drying. h) Deformed desiccator because of acetone.

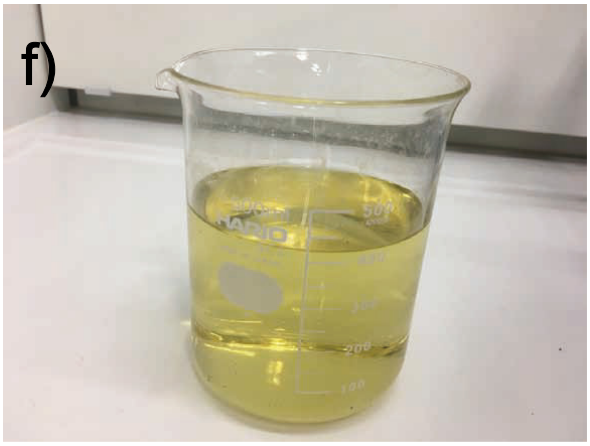
a)

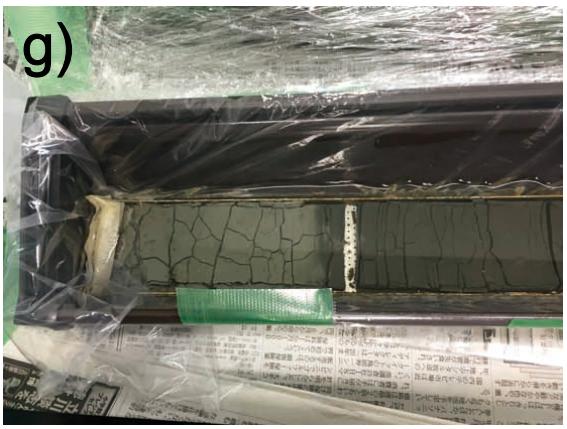

b)

c)


d)
KY09-05 PC03
Sec.5 0-50cm
KY09-05 PC03
Sec.5 50-100cm

e)


f)


g)

h)

より明るくなることによって色のコントラストが弱まっていくと考えられる．

一方で，密閉性の高くない容器の場合，揮発性の高いアセトンを用いる弊害に注意しなければならない．今回は，密閉性が不十分だったため，U1425の15本のうち2本が乾燥によって全体的にひびが入った（第5図g).

4．樹脂置換と硬化

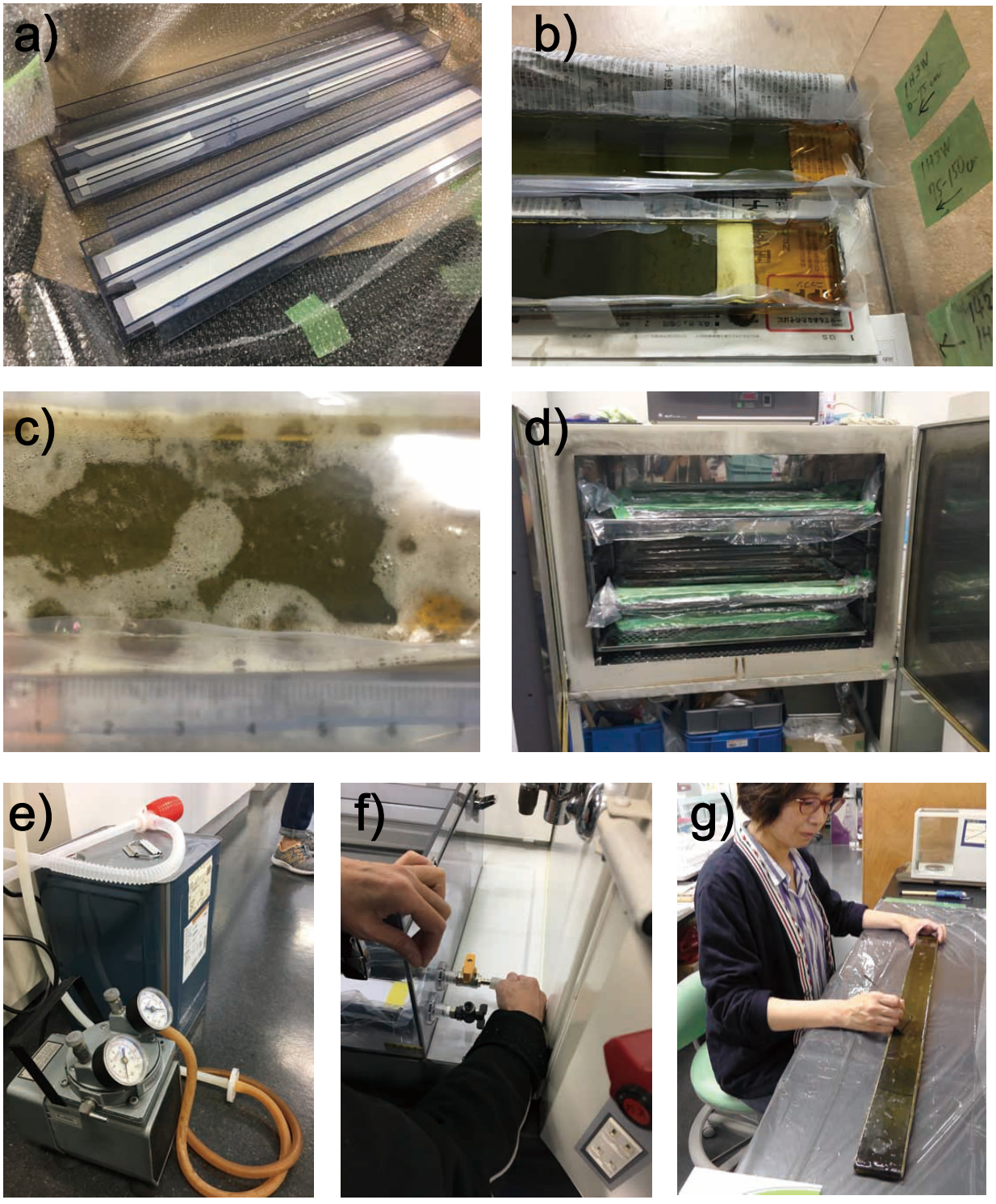
4.1　樹脂の配合

樹脂包埋試料の作製にはエポキシ系樹脂，アクリル系樹脂，ポリエステル系樹脂などが使われる（田尻・藤田, 2013）．田尻・藤田(2013）では，含水未固結標本のための樹脂の含浸固化の条件として，①硬化後の強度が十分であること，②硬化後の剛性が高いこと，③重合の際の収縮や膨潤が少ないこと，④組織への浸透性が良い（粘性が低い）こと，⑤無色透明であることが挙げられている．これらの条件すべてを満たす樹脂は現時点では存在しないが，エポキシ系樹脂は，硬化後に靱性があり，強度や扱いやすさという点で一般的に地質学の薄片製作で利用されている樹脂である．本論のように，サンプリングが容易にできる程度には柔らかいがシルトサイズ以下の粒子が細かく締まった堆積物を対象とする場合，樹脂の粘性が最も重要である．つまり，低粘性でないと樹脂が堆積物の中まで浸透せず，硬化に失敗する可能性がある．今回は粘性が低く，硬化後の強度が十分だと言われているSpurr樹脂を用いた（Jim，1985）．Spurr樹脂は4液，NSA（Nonenyl succinic anhydride），DER（Diglycidyl ether of polypropylene glycol），ERL（Vinylcyclohexene dioxide），DMAE（Dimethyla minoethanol）から構成されており，そのうち，DER が樹脂の硬度，DMAE が樹脂の固化時間を調整する役割を担っており，これらの配合を変えることにより粘性や色，また重合時の硬さや硬化時間を調節できる．Spurr樹脂は，樹脂自身に着色（薄黄色）があるという欠点があるが，4液の配合を変えることによって粘性や色，硬化時間等のパラメータを操作でき，利便性が高い．特にDMAEが最も着色作用が大きく，この配合が多いと黄色みが増す．本論ではDERとDMAE の割合を小さくした硬い樹脂の作成法（田尻・藤田，2013）の配合を基準として，ERL 100 g，DER 37 g，NSA 260 g，DMAE 2 gの割合で4液を調合した．調合は重量比で行った．まず，ERL，DER，NSAを容器に入れ，ガラス棒あるいは割り箸等でよく撹拌させる．良く混ざったら，DMAEを，シリンジを使って投入し再度撹拌させる．樹脂の調合での注意点は，DMAEを0.1 g の正確さで秤量すること，液同士を均等に混合させるため念入りに撹拌を行うことである．

4.2　樹脂の含浸と硬化

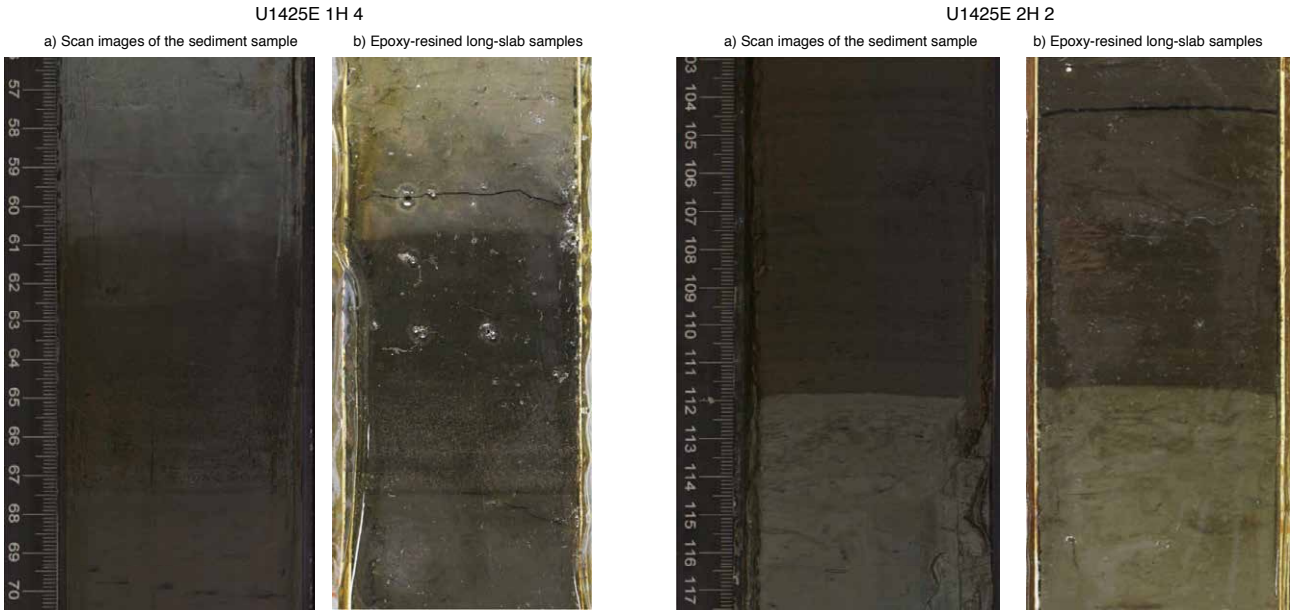
樹脂の含浸と硬化に関する写真は，第6図にまとめた．薄く長い今回のような試料は，樹脂硬化後に切断や研磨によって形を整えることが容易ではない．したがって，樹脂硬化時に展示に耐えうる程度の成形が必要である．そこで，今回は塩化ビニルで作成した箱型のケース（第6図a）を使って樹脂の含浸処理および硬化処理を行った．塩化ビニルは前述のようにアセトンへの耐性がないため，アセトンとの接触は最小限にする必要がある．また，塩化ビニルはエポキシ樹脂と接着するため，試料硬化後の取り外しが容易ではない．そこで，ここでもまたポリエチレンシートを塩化ビニルケースの上に敷き，その上にロングスラブを置いた（第6図b）．

樹脂を入れる際は，アセトンをすべて取り除いてから行う．アセトンは揮発性の高い有機溶媒なので，アセトン溶液から取り出すと数分で堆積物試料の表面にひび割れが起こる．したがって，樹脂注入の作業はアセトンを取り除いた後に迅速に行う必要がある．試料の表面からアセトンを揮発させ，底面あるいは横面から樹脂が浸透するように，試料が樹脂の表面から少し出る程度に樹脂を浸した．樹脂注入後は，樹脂の浸透を良くするため，減圧装置を用いることが好ましい．最初に行った試行用の2試料（試料番号1，2)は，デシケーター内で半日に１回程度の頻度で数十秒間減圧した（第5図b，第6図e，f).デシケーターを特別注文する場合は高額になるため，数千円～１万円程度で購入できる市販のアクリル製や塩化ビニル製の筒（既製品）を代用することも可能である．これらの筒を活用する際には，筒に両側にゴム栓をつけ，片側に真空ポンプのホースにつなぐコネクターをつければ安価で減圧装置を作成することができる．脱水時と同様，樹脂を浸透させるためには，樹脂浸透の過程においてもなるべく長い時間をかけることが望ましい．後述するが，樹脂硬化後に試行用のサンプル番号1,2の断面を観察すると，内部の硬化が不十分であったため，試料番号7~10以降は数日以上の時間をかけて樹脂を浸透させた．また，減圧時間も検討した．試料番号7~10までは，半日に１回程度の頻度で数十秒間減圧する方法を継続したが，その後，数十秒以上減圧すると第6図cのように気泡が発生することがわかった．この気泡はアセトンとエポキシ樹脂の交換が十分ではないことを示すと判断し，試料番号3以降は，最終的に気泡がある程度発生しなくなるまでポンプで減圧を行った．室温でも樹脂は１週間程度経過すると自然と硬化していくため，適度に交換や継ぎ足しを行う必要がある．今回は，アセトンがなるべく全て樹脂に置換されるように最低でも３回は樹脂を交換した．その後，60℃の恒温装置に48時間入れ，樹脂を硬化させた（第6図d）．熱重合させた後に気泡が目立つ試料については，室温に戻した後，気泡をマイクロスパチュラなどで潰し（第6図g），再度樹脂を流し込んだ．



第6図　エポキシ樹脂置換および硬化に関連する写真．a) エポキシ樹脂置換および硬化の際に使用した塩ビ製のケース． b) エポキシ樹脂含浸時のロングスラブ． c) エポキシ樹脂注入後，減圧する際に試料表面に発生した気泡．d)恒温器での硬化． e) 減圧の際に使用した真空ポンプ． f) デシケーターのコック．g) 硬化後に気泡をスパチュラで潰す様子．

Fig. 6　Photos regarding the process of epoxy resin. a) A PVC container to impregnate long-slab samples with epoxy resin. b) Long-slab samples with epoxy resin in PVC containers. c) Bubbles occurred under reduced pressure. d) Oven used to harden long-slab samples. e) A vacuum used to reduce the pressure. f) Valves of the desiccator. g) Crushing the bubbles on the surface after hardening long-slab samples.



第7図 船上でのスキャン写真と樹脂包埋後の比較.

Fig. 7 Comparison between the scan images of the sediment sample taken on the research vessel (a) and c)) and epoxy-resined long-slab samples (b) and d)). a) and b) for U1425E 1H4 and d) and e) for U1425E 2H2.

このプロセスによってほとんどの試料で表面の気泡は目立たなくなった.

樹脂の交換回数は，試料番号1-2では4回行ったが，樹脂は高価であり，また時間短縮のため回数を減らすことができないかを試した．試料番号1-2で用いた交換２回目の樹脂，および交換3回目の樹脂を60℃で硬化させたところ問題なく硬化したため，試料番号3以降の樹脂については，交換回数を少なくした．置換後の樹脂の様子を見て，粘性が原液よりも低く見える試料はアセトンが十分に置換できていないことを示すと考え，交換回数を多めにしたり，減圧時間を長くするなどの対応を行った．硬化後，試料番号7-10については気泡が多く発生した．気泡は，これら以外の試料でも発生したが，発生箇所は側面や堆積物に亀裂が入っている場所が多かった(第7図を参照).

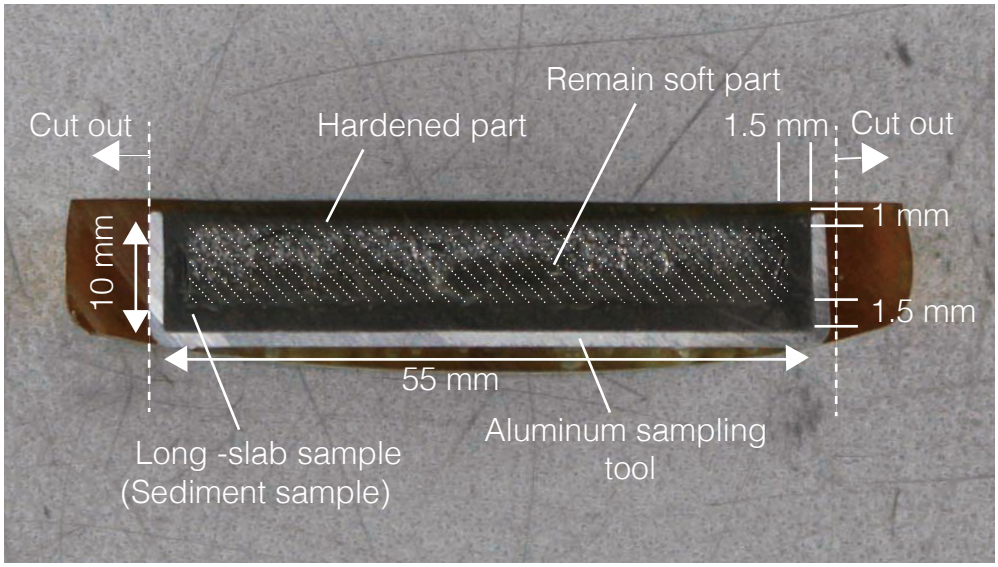
4.3 仕上げ

エポキシ樹脂は，硬度が高く硬化後に岩石カッター等での切断が容易である．今回は塩化ビニルの容器にポリエチレンシートを被せてその上に試料を置いて硬化させたため，硬化後の樹脂の形状が整わなかった．そこで，最後に岩石カッターで側面の余分な部分を切断した(第8図)．切断後の断面を観察すると，試料表面1 mm程度，底面および側面から2 mm程度の厚さで硬化は十分であるが，試料内部に硬化が不十分な部位があった(第8図)．樹脂そのものには黄色みがかかっているが，透明度が高く，そのままでも十分観察が可能である(第7図)．表面の研磨も試みたが，曇りが出るため観察しにくくなった．したがって，美しい樹脂試料を作成するためには樹脂をなるべく気泡がでないように硬化させることが重要である.

展示では，上位から下位への地層の重なりがわかるように縦に試料を並べた(第9図)．LEDのテープライトで斜め横から光を当てるようにし，樹脂表面での光の反射がなるべく少ない様に照明も工夫した．展示期間中の様子を第10図に示す.

5．考察

KY0509 PC03の試料について，硬化の程度を切断面から観察すると，試料の内部は硬化していない部分があることがわかった．この原因について，樹脂の方がアセトンよりも粘性が高く浸透しにくいことから，樹脂の浸透が不十分なためであると推察した．樹脂の浸透を改善するためには，①樹脂の粘性を低めること，②浸透面積，浸透時間を増やすことが考えられる．①について，それぞれの溶液の配合を変えると，粘性が低くなることがある．Spurr樹脂の配合の場合，DMAEの割合を多くすると粘性が若干低くなるが，同時に黄色味が増し，硬化にかかる時間や硬化の度合いが異なってくる．そのため，試料の見栄えや出来上がりの硬度を考慮して決める必要がある．②については，Spurr樹脂は室温でも長時間放置すると自然に硬化するため，樹脂への浸透時間をこれ以上長くすることは難しい．一方，アルミ型枠底面のパンチング孔の面積を2倍，3倍に増加させ，浸透面積を増

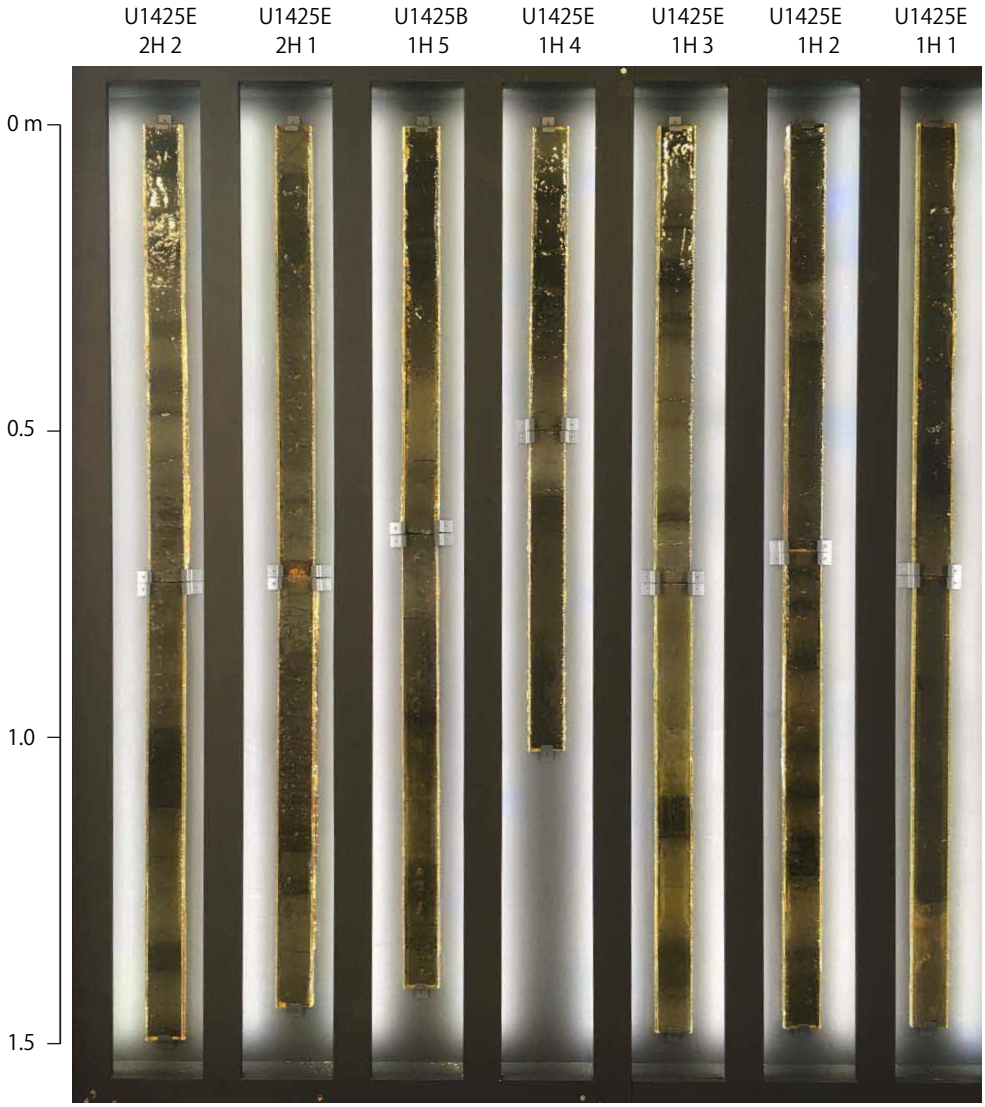


第8図　テスト用の試料KY0905 PC03 Sec.5の樹脂包埋後の横断面．アルミスラブの内部約1-2 mmは樹脂が硬化している．未硬化部を白斜線で示した．

Fig. 8　Cross section of epoxy-resined KY0905 PC03 Sec5. The 1-2 mm sediment from the surface was hardened, but center of the sample have not hardened yet, which is shaded area with white lines.

やすことは可能であると考える．ただし，孔を増やすとサンプリングの難易度が高まるため，堆積物試料の含水率，硬さに応じて最適な孔の数や面積を考慮すべきである．今回用いた中で最も含水率が高いコア試料は，最も浅い深度の試料（U1425 1H1W）である．この試料の半割コア試料からのサンプリングは最も難しかったが，堆積物がパンチング孔から漏れ出ることはなかったことを考えると，孔の面積を多少増量しても問題はないと考える．一方，内部の未硬化の原因は，水分が試料中に残っていたことが原因だとする可能性も否定できない．エポキシ樹脂の性質として，含浸対象標本の水分と反応して重合不良を起こし，脱水が十分でない場合に硬化しないことが知られている（例えば，田尻・藤田，2013）．滝沢ほか（1995）では，脱水にエタノールを用いているが，1 cm四方の堆積物に対し，1ヶ月程度を有している．この結果と，本研究で用いた堆積物のサイズ（厚み1 cm，長さ80 cm）を考慮し，少なくとも1ヶ月は必要であると考えた．今回は脱水に1ヶ月を要したが，堆積物の特徴が失われない程度にさらに長くすることは可能だろう．

樹脂が完全に浸透していないという問題点は，展示試料の出来映えにも関係してくる．浸透が不十分だと考えられる試料からは，加熱時にしばしば気泡が発生した（第7図）．気泡は，樹脂試料の見栄えを悪くし，試料表面の観察をしにくくするため，展示試料としては欠陥に当たる．気泡は，堆積物試料の亀裂が入っている箇所から多く発生し，気泡の周りは硬化が不十分になるという特徴があった．この気泡の発生は，内部に残っていたアセトンが高温になることで堆積物外に逃げようとして生じたことが原因であると考えられる．エポキシ樹脂は，一般に高温になると一時的に粘性が低下し，さらに重合が進むと硬化するという特徴がある．また，硬化前後で体積が変化しないことがエポキシ樹脂の利点であるため，温度変化による樹脂そのものの堆積の膨張・伸縮というのは考えにくい．実際，アルミ型枠の底面のパンチング孔には無数の気泡ができていて，高温時に内部に存在していたアセトンなどの物質が膨張して外に出ようとした現象を示していると考えることができる．減圧時間が短かった試料番号7～10で硬化後に気泡が多く発生したことからは，減圧時間を長くすることがある程度功を奏したことがわかる．さらに気泡をなるべく少なく，より良い出来映えにする方法は，徐々に温度を上げていくと同時に減圧することであると考える．U1425については，溶液が側面からも容易に入り込めるようにアルミ型枠の側面に沿って試料に切れ込みを入れた状態でアセトン置換，エポキシ樹脂置換を行った．切れ込みを入れた両端から気泡が多くでてきたことは，溶液の浸透と置換が試料側面を通して活発におこなわれていたことを示す（第6図c）．しかし，これらの切れ込みを入れた試料でも，数時間の減圧後に加熱をした際，側面から気泡が発生したため，切れ込みの効果は限定的であり，加熱しながら減圧を続けることがさらに重要であることを意味している．ただし，アセトンでの脱水が不完全だった場合は，水分が原因で気泡ができる場合も考えられることから，試料のサイズや表面積に応じて脱水に要する時間は十分に検



第9図　展示した試料.

Fig. 9　The long-slab samples on the special exhibition “Deep Sea 2017” held in National Museum of Nature and Science, Japan in summer of 2017.

第10図　展示期間中の様子.

Fig. 10　Visitors to the special exhibition “Deep Sea 2017” looking at the long-slab samples.

討されなければならない．一方，一度硬化した樹脂でも，気泡を潰し，再度樹脂を流し込むことで綺麗な表面を得ることができたことから，表面の見栄えだけに着目するなら気泡ができたとしても修正が可能であることを示している．

脱水について，今回は，作業手順を簡略化するためにアセトンで脱水を行った．アセトンはエタノールに比べて揮発性が高く，また耐薬品性の観点からは長期間の置換処理に際して容器の工夫が必要であるため，今回のような市販品の代用が難しい規格外の試料についてはエタノールでの脱水も考えられる．しかし，アルコールよりもアセトンの方が脱水効率が格段に良いことがわかり（田尻・江崎，2018），エタノールでの脱水には倍以上の時間がかかることが予想されるため，まずはアセトンでの脱水を検討すべきであろう．アセトンを使用してもシリコン樹脂のように成形が比較的容易な樹脂を用いて容器を作成すれば長尺試料にも対応できる可能性がある．さらにシリコン樹脂は，最後の硬化後にも試料と容器の剥離が容易であるという利点もあり，入手可能な容器に合わせて一つ一つの試料のサイズを調整するという視点も必要だろう．

U1425では，氷期にできる暗色層の中にしばしばミリメートルスケールのラミナが発達している．これらのラミナには有孔虫を多く含む層もしばしば見られるが，樹脂包埋後もこれらのラミナがよく保存されていた（第7図b，d）．照明の当て方を工夫すれば，樹脂包埋前よりも観察しやすく，樹脂包埋の一つの利点である．表面の約1 mmは硬化しているため，電子顕微鏡等で粒子の配列等を観察する場合は表面の研磨も可能である．また，船上でのコアのスキャン写真と樹脂包埋後の色の変化を比較してみると，コントラストも十分に保存されていることがわかる（第7図）．したがって，有機物含有量の多い日本海の試料であってもアセトン浸漬による色の変化への影響は限定的であると言える．

今回のような泥の堆積物の場合は間隙が少なく，脱水，樹脂の注入の際に溶液が浸透しにくい．内部が不均一な試料は，ソフトX線の撮影画像によって堆積構造を調べるような研究には適さない．一方で，試料表面にX線を照射し励起されて発生する蛍光X線を検出して元素分析を行う蛍光X線分析（XRF：X-ray Fluorescence）は，近年，半割コア試料をそのままでスキャンできる装置が活用されているが，水分含有量など保管に伴うコアの状態の変化をどのように補正すべきか課題もある．アセトンとエポキシ樹脂への含浸時の元素の溶出の評価をを含めて，XRFスキャナーの測定における樹脂包埋法の有効性評価は，今後の課題である．

謝辞：本研究に際し，筑波大学の金子剛志氏，久保貴旺氏，国立科学博物館の植田弥生氏，梅野多恵子氏，齋藤めぐみ氏，鈴木希実氏，柳下美佳氏にご助言，ご協力いただいた．東京大学の多田隆治氏，産業技術総合研究所の池原　研氏には，手法に関して有益なご助言をいただいた．本試料は，統合国際深海掘削（ODP）の試料を利用した．試料採取にご協力くださった高知コア研究所Lallan Gupta氏，阿波根直一氏をはじめとした高知コア研究所科学支援グループの皆様に心より感謝申し上げる．また，査読を行ってくださった産業技術総合研究所の兼子尚知氏に謝意を表する．

文　献

Boës, X. and Fagel, N. (2005) Impregnation method for detecting annual lamination in sediment cores: An overview. *Sediment. Geol*., **179**, 185–194.

Jim, C. Y. (1985) Impregnation of moist and dry unconsolidated clay samples using Spurr resin for microstructural studies. *Jour. Sediment. Petrol*., **55**, 597–599.

Irino, T., Tada, R., Ikehara, K., Sagawa, T., Karasuda, A., Kurokawa, S., Seki, A. and Lu, S. (2018) Con-struction of perfectly continuous records of physical properties for dark-light sediment sequences collect-ed from the Japan Sea during Integrated Ocean Drilling Program Expedition 346 and their potential utili-ties as paleoceanographic studies. *Prog. Earth. Planet. Sci*., **5**, 23.

Lamoureux, S.F. (1994) Embedding unfrozen lake sediments for thin section preparation. *Jour. Paleo-limnol.*, **10**, 141–146.

Nakagawa, T., Gotanda, K., Haraguchi, T., Danhara, T., Yonenobu, H., Brauer, A., Yokoyama, Y., Tada, R., Takemura, K., Staff, R.A., Payne, R., Bronk Ramsey, C., Bryant, C., Brock, F., Schlolaut, G., Marshall, M., Tarasov, P. and Lamb, H. (2012) SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Su-igetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and under-standing of late Quaternary climate changes. *Quat. Sci. Rev*., **36**, 164–176.

Pike, J. and Kemp, A.E.S. (1996) Preparation and analysis technique for studies of laminated sediments. In Kemp, A.E.S., ed., Palaeoclimatology and Palaeoceanography Laminated Sediments, *Geol. Soc., London, Spec. Publ*., **116**, 37–48, Geological Society, London.

佐川拓也・久保田好美・多田隆治・池原　研・入野智久・板木拓也・杉崎彩子・烏田　明・Murray, R.W.・Alvarez-Zarikian, C.A.・Exp. 346 Scientists（2015）アジアモンスーンの発達・変動史の解明～日本海と東シナ海に残された記録～．*J-DESC News*, **8**, 2.

Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (1999) Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales rec-

orded in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, **14**, 236–247.

Tada, R., Murray, R.W., Alvarez Zarikian, C.A. and the Expedition 346 Scientists (2015) *Proc. IODP*, **346**: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program). doi:10.2204/iodp.proc.346.2015

Tada, R., Irino, T., Ikehara, K., Karasuda, A., Sugisaki, S., Xuan, C., Sagawa, T., Itaki, T., Kubota, Y., Lu, S., Seki, A., Murray, R.W., Alvarez-Zarikian, C., Anderson, W.T., Bassetti, M.-A., Brace, B.J., Clemens, S.C., da Costa Gurgel, M.H., Dickens, G.R., Dunlea, A.G., Gallagher, S.J., Giosan, L., Henderson, A.C.G., Holbourn, A.E., Kinsley, C.W., Lee, G.S., Lee, K.E., Lofi, J., Lopes, C.I.C.D., Saavedra-Pellitero, M., Peter-son, L.C., Singh, R.K., Toucanne, S., Wan, S., Zheng, H. and Ziegler, M. (2018) High-resolution and high-precision correlation of dark and light layers in the Quaternary hemipelagic sediments of the Japan Sea recovered during IODP Expedition 346. *Prog. Earth. Planet. Sci*., **5**, 19.

田尻理恵・江崎洋一（2018）樹脂包埋薄片作成における脱水方法の比較．日本古生物学2018年会講演予稿集，55.

田尻理恵・藤田敏彦（2013）樹脂包埋と研磨による動物組織観察試料作製法一硬組織と軟組織の同時観察一．タクサ(日本動物分類学会)，no. 35，24–34.

滝沢　茂・川田多加美・大野良樹（1995）含水未固結堆積物の固結および凍結乾燥法．地質雑，**101**，941–944.

（ 受 付：2017年12月20日； 受 理：2018年9月18日 ）

Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol. 70 (1/2), p. 225–247, 2019

Notes and Comments

A report of Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian occurrences from the Ashio terrane in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan

Tsuyoshi Ito[1,*]

Tsuyoshi Ito (2019) A report of Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian occurrences from the Ashio terrane in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 225–247, 7 figs, 1 table, 6 plates.

Abstract: The Ashio terrane, which is a Jurassic accretionary complex, is exposed in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan. The Ashio terrane in the Hachioji Hills mainly comprises chert and muddy mixed rock with siliceous mudstone and sandstone. Early Permian (Sakmarian, Cisuralian), Late Triassic (Carnian–Norian), and Jurassic radiolarians occurred in the chert, whereas Middle Jurassic (Bajocian–Bathonian) radiolarians occurred in the siliceous mudstone.

Keywords: radiolaria, Permian, Triassic, Jurassic, Ashio terrane, Hachioji Hills, Kiryu, Ohta, Gunma Prefecture, Japan

1. Introduction

Mid-Mesozoic accretionary complexes, including the Tamba–Mino–Ashio and Chichibu composite terranes, are exposed in central Japan (e.g. Matsuoka *et al,* 1998; Nakae, 2000) (Fig. 1). The Ashio terrane is distributed over the Ashio Mountains and its adjacent regions. Many researchers have reported the presence of several fossil types, such as selachoid, brachiopod, fusulinid, conodont, radiolarian, and ammonoid, from the terrane (e.g. Yabe, 1903; Morikawa and Horiguchi, 1956; Hayashi, 1963; Aono, 1985; Kamata, 1996; Muto *et al.*, 2018).

The Hachioji Hills in the eastern Gunma Prefecture are geographically separated from the Ashio Mountains. The Ashio terrane is exposed on the northeastern side of the hills. As aforementioned, numerous fossil occurrences have been reported from the Ashio Mountains. Suzuki (1898a, b) first noted the presence of radiolarian remains within the siliceous rocks found within the Ashio Copper Mine of the Ashio Mountains. Since the 1960s, radiolarians and conodonts have been extracted from the Ashio terrane in the Ashio Mountains. However, despite numerous fossil occurrences in the Ashio Mountains, only a few brief reports have been written about the Ashio terrane in the Hachioji Hills. Masuda (1989) reported on the discovery of Middle Jurassic radiolarians from chert and manganese nodules within mudstone. Meanwhile, Hayashi *et al.* (1990) reported some possibly Triassic radiolarians from chert.

The author obtained Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian assemblages from the Ashio terrane in the Hachioji Hills. This article aims to briefly report the geology of the Ashio terrane in the Hachioji Hills with the radiolarian occurrences.

2. Brief research history of the Ashio terrane in the Ashio Mountains

Several researchers have investigated the Ashio terrane in the Ashio Mountains, and some geologic maps of the mountains have been presented (e.g. Harada, 1886; Kawada and Ozawa, 1955; Yoshida, 1956, 1957; Watanabe *et al.*, 1957; Fujimoto, 1961; Hatori, 1965; Yanagimoto, 1973; Igo *et al.*, 1976; Aono, 1985; Sato and Aono, 1985; Kamata, 1996). However, a few geologic maps have depicted the area of the mountains comprehensively (Hayashi and Hasegawa, 1981; Sudo *et al.*, 1991) because the Ashio Mountains they are distributed over a broad area surrounding both the Gunma and Tochigi prefectures. Figure 2 displays a simplified geologic map of the Ashio Mountains. Major previous studies with their geological divisions are summarized in Fig. 3.

The Ashio terrane had been considered a member of the Chichibu Paleozoic strata until the 1970s. Although Hayashi (1963, 1964, 1968a, b, 1971) discovered Triassic conodonts from the "Chichibu Paleozoic strata," he considered the possibility that the Triassic-type conodonts had appeared in the Permian. Koike *et al.* (1970, 1971,

[1] AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation

[*] Corresponding author: T. Ito, Central 7,1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email:ito-t@aist.go.jp

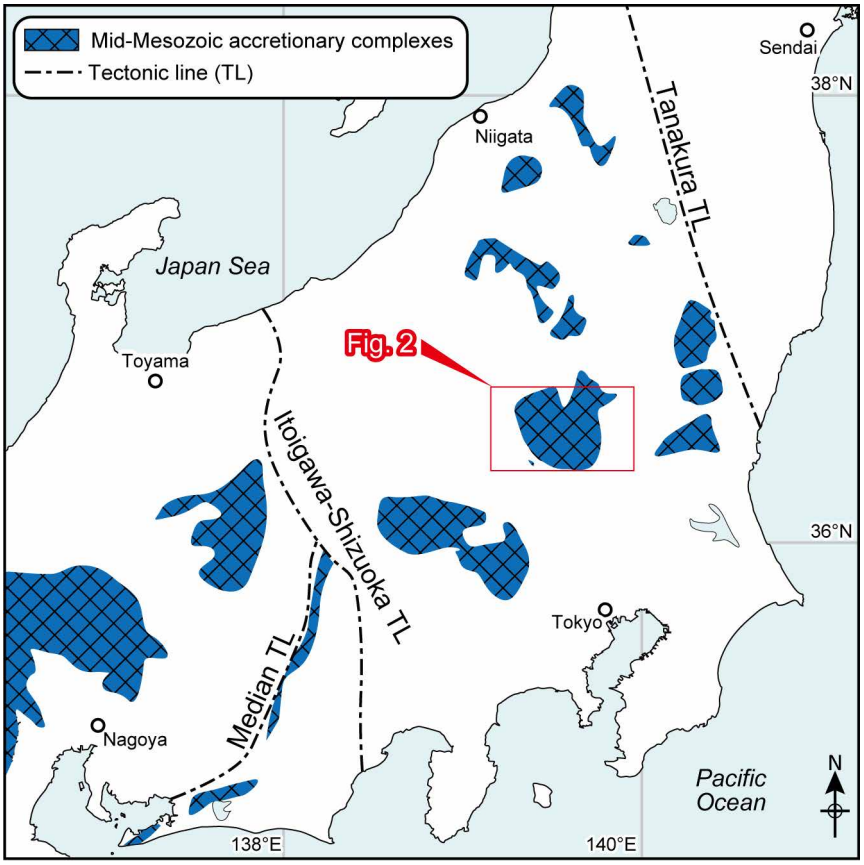


Fig. 1 Index map of the study area with distribution of mid-Mesozoic accretionary complexes in Kanto District, central Japan (based on Matsuoka *et al.*, 1998; Nakae, 2000).

1974) and Conodont Research Group (1972, 1974) similarly pondered whether or not the "Chichibu Paleozoic strata" contains Triassic strata based on the discovery of the Triassic conodonts. Hayashi and Hasegawa (1981) showed the geologic maps of the Ashio terrane in the Ashio Mountains and estimated their age to be Permian to Triassic.

From the viewpoint of an accretionary complex geology based on the plate tectonics, Aono (1985) surveyed the Ashio terrane in the southeast Ashio Mountains and obtained Triassic conodonts as well as Triassic and Jurassic radiolarians. Kamata (1996) later investigated a wide area of the south–southwest Ashio Mountains and defined three tectonostratigraphic units, namely the Omama, Kurohone–Kiryu, and Kuzu complexes. The former two complexes are characterized by mixed facies including some kind of blocks, such as chert, limestone, and sandstone. The Omama Complex contains large amounts of basalt and limestone, whereas the Kurohone–Kiryu Complex contains small amounts of such rocks. The Kuzu Complex is characterized by coherent facies, composed mainly of repeated chert-clastic sequences with basaltic-limestone blocks. Kamata (1997) subdivided the Kuzu Complex into three units.

3. Geologic outline of the Hachioji Hills

In the Hachioji Hills, the Ashio terrane is exposed in the northeastern side of the hills (Fig. 4). The Ashio terrane in the Hachioji Hills consists mainly of chert and muddy mixed rock with siliceous mudstone and sandstone.

The chert is mostly gray, dark-gray, and bright-gray in color (Fig. 5A). Red chert, which yielded Permian radiolarians, is observed at only one outcrop (Fig. 5B). The chert is generally well-bedded (bed thickness: 3–10 cm) (Figs. 5A, 5B) and is composed mainly of siliceous microfossils (possibly radiolarian remains) and cryptocrystalline quartz with a few clay minerals (Fig. 6A).

The siliceous mudstone is dark-gray (Fig. 5C) and weakly-bedded (bed thickness: 3–10 cm). Most siliceous mudstone occurs within the muddy mixed rock (Fig. 5D). The siliceous mudstone comprises scattered microfossils (possibly radiolarian remains) with clay materials (Fig. 6B).

The sandstone is medium to fine-grained, gray or brown lithic arenite (Fig. 6C). The sandstone is generally included within muddy mixed rocks as blocks.

The muddy mixed rock comprises a dark-gray mudstone

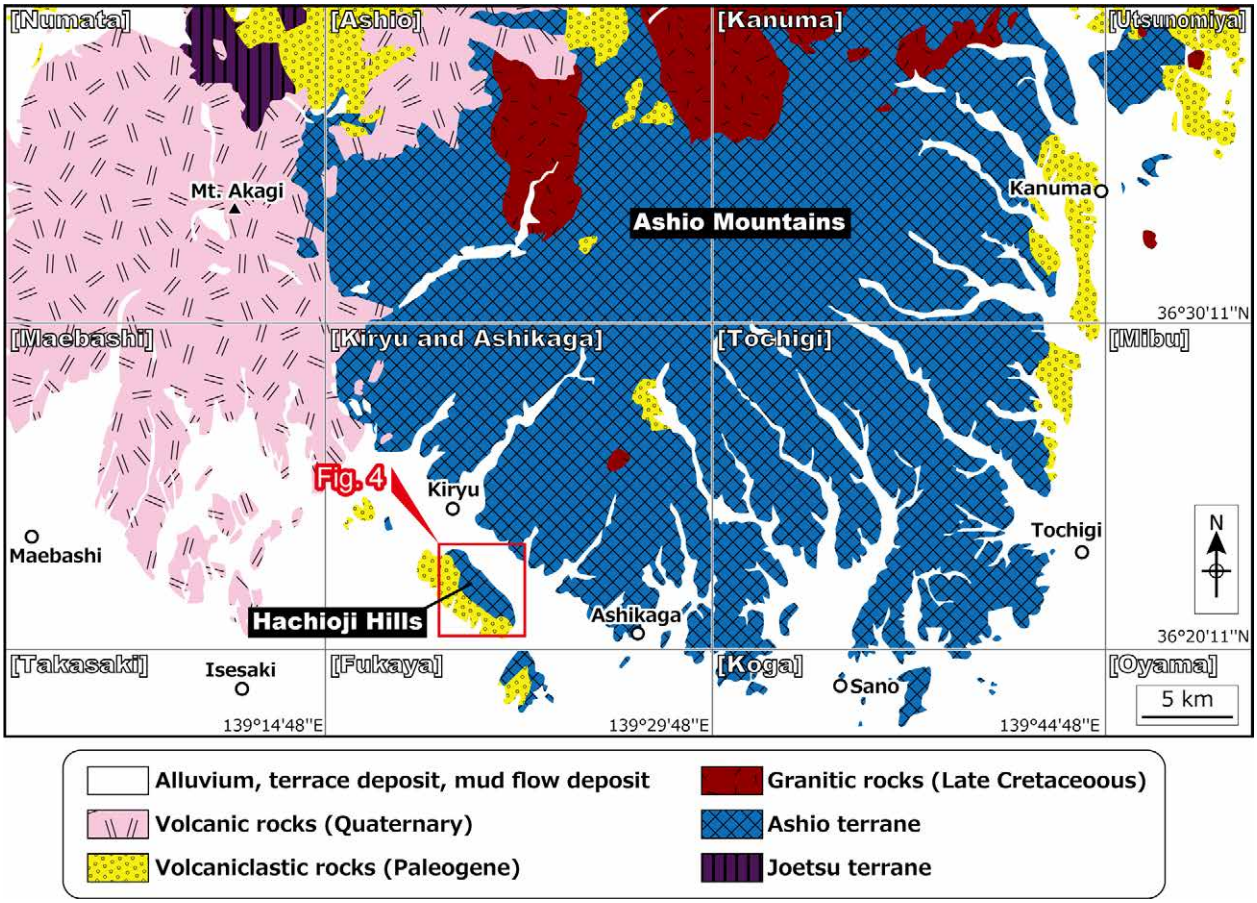


Fig. 2 Simplified geologic map of the Ashio Mountains (modified after from Sudo *et al.*, 1991; Geological Survey of Japan, AIST, 2018). Geographical names in brackets indicate 1:50,000 topographic maps published by Geospatial Information Authority of Japan.

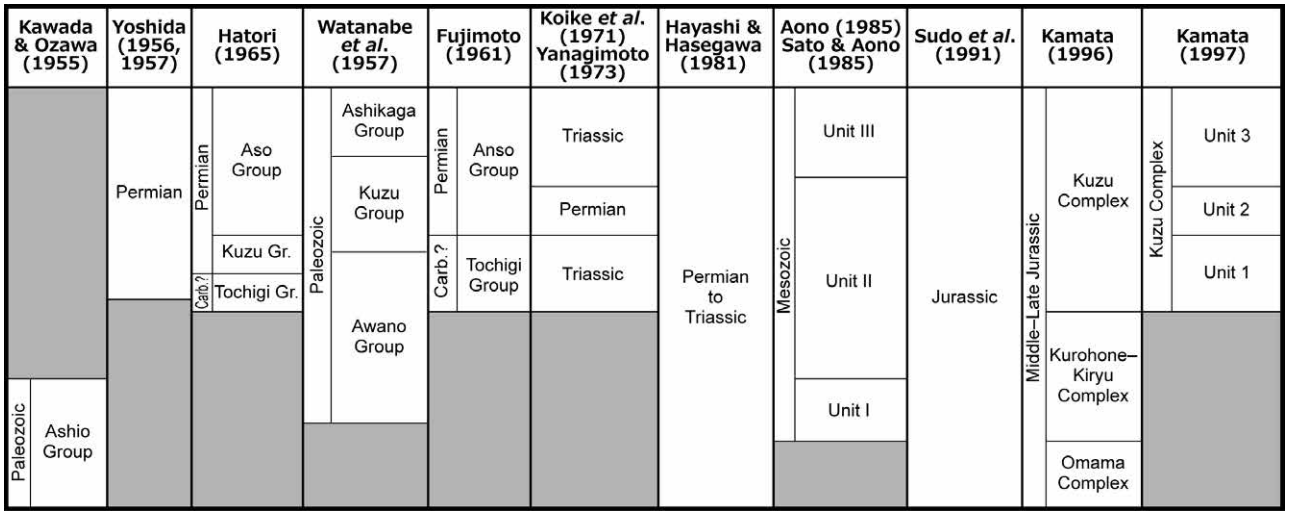


Fig. 3 Stratigraphy of the Ashio terrane in the Ashio Mountains in the major previous studies. Stratigraphic divisions in levels of the formations are omitted. Gr.: Group. Carb.: Carboniferous.

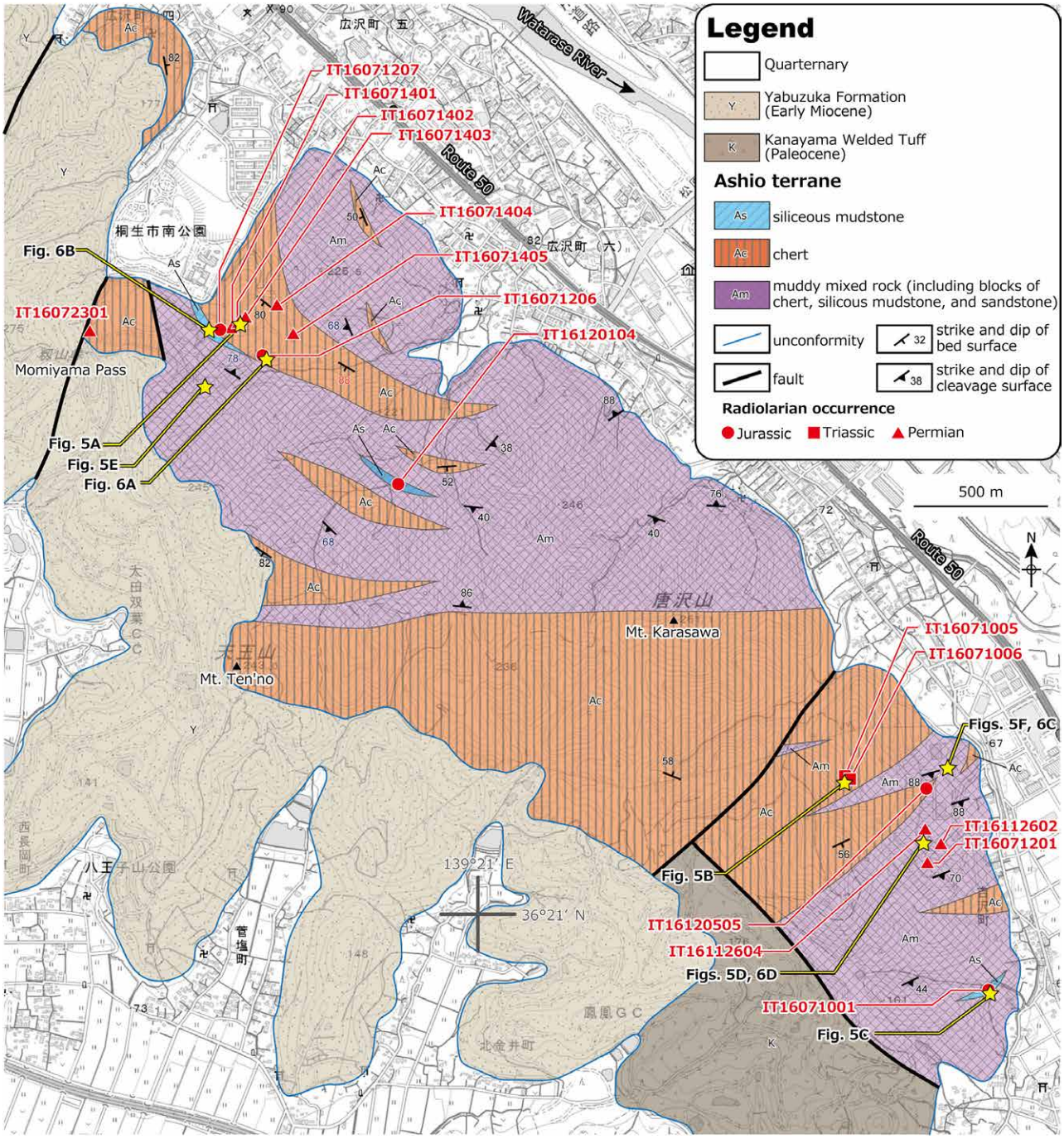


Fig. 4 Geologic map of the Ashio terrane in the Hachioji Hills. The Paleogene is based on Takahashi and Yanagisawa (2003).

matrix with blocks of chert, siliceous mudstone, and sandstone (Figs. 5D, 5E, 5F). The size of the blocks of each rock is as follows: the chert blocks range from several meters to more than 100 m (Fig. 4); the siliceous mudstone blocks, a few micrometers (Fig. 6D) to several meters (Fig. 5C); the sandstone blocks, several centimeters (Fig. 5E) to a few meters (Fig. 5F).

On the southwestern side of the hills, the Paleogene covers the Ashio terrane. According to Takahashi and Yanagisawa (2003), the Kanayama Welded Tuff unconformably overlies the Ashio terrane; the Yabuzuka Formation unconformably overlies the Kanayama Welded Tuff and the Ashio terrane. The Kanayama Welded Tuff and the Yabuzuka Formation can correlate to the Paleocene and the lower Miocene, respectively (Takahashi *et al.*, 1991; Takahashi and Yanagisawa, 2003; Nomura *et al.*, 2017). The unconformity boundaries between the Ashio terrane and the Yabuzuka Formation are observable near the Momiyama Pass.

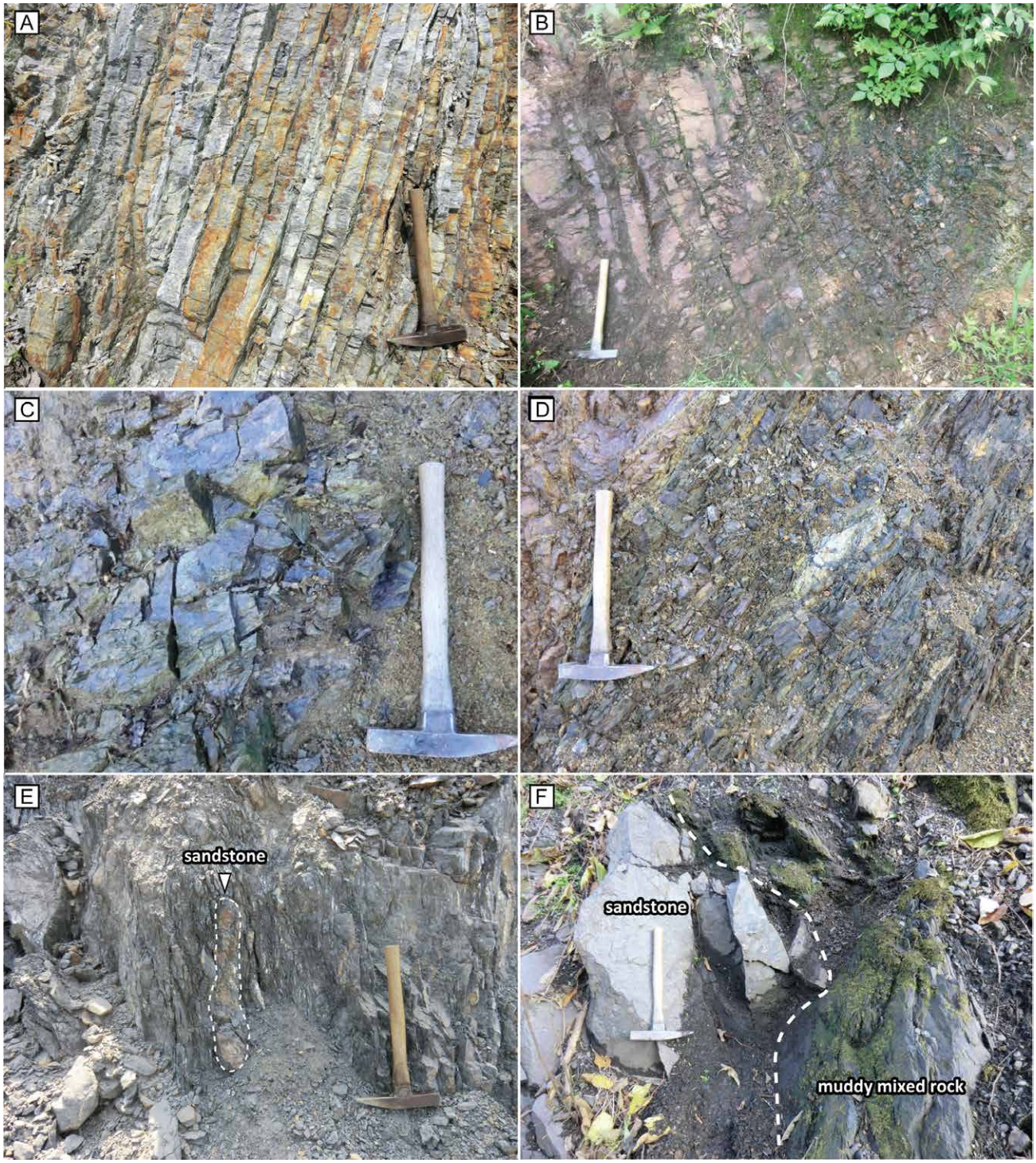


Fig. 5 Field occurrences. A: Triassic gray bedded chert in a quarry of Meisei Kousan Co. Ltd.; B: Permian red bedded chert along a forest road; C: Jurassic siliceous mudstone along a forest road; D: Muddy mixed rock including small siliceous mudstone blocks in a quarry of Meisei Kousan Co. Ltd.; E: Muddy mixed rock including sandstone block in a quarry of Meisei Kousan Co. Ltd.; F: Muddy mixed rock and sandstone block in a quarry of Meisei Kousan Co. Ltd.

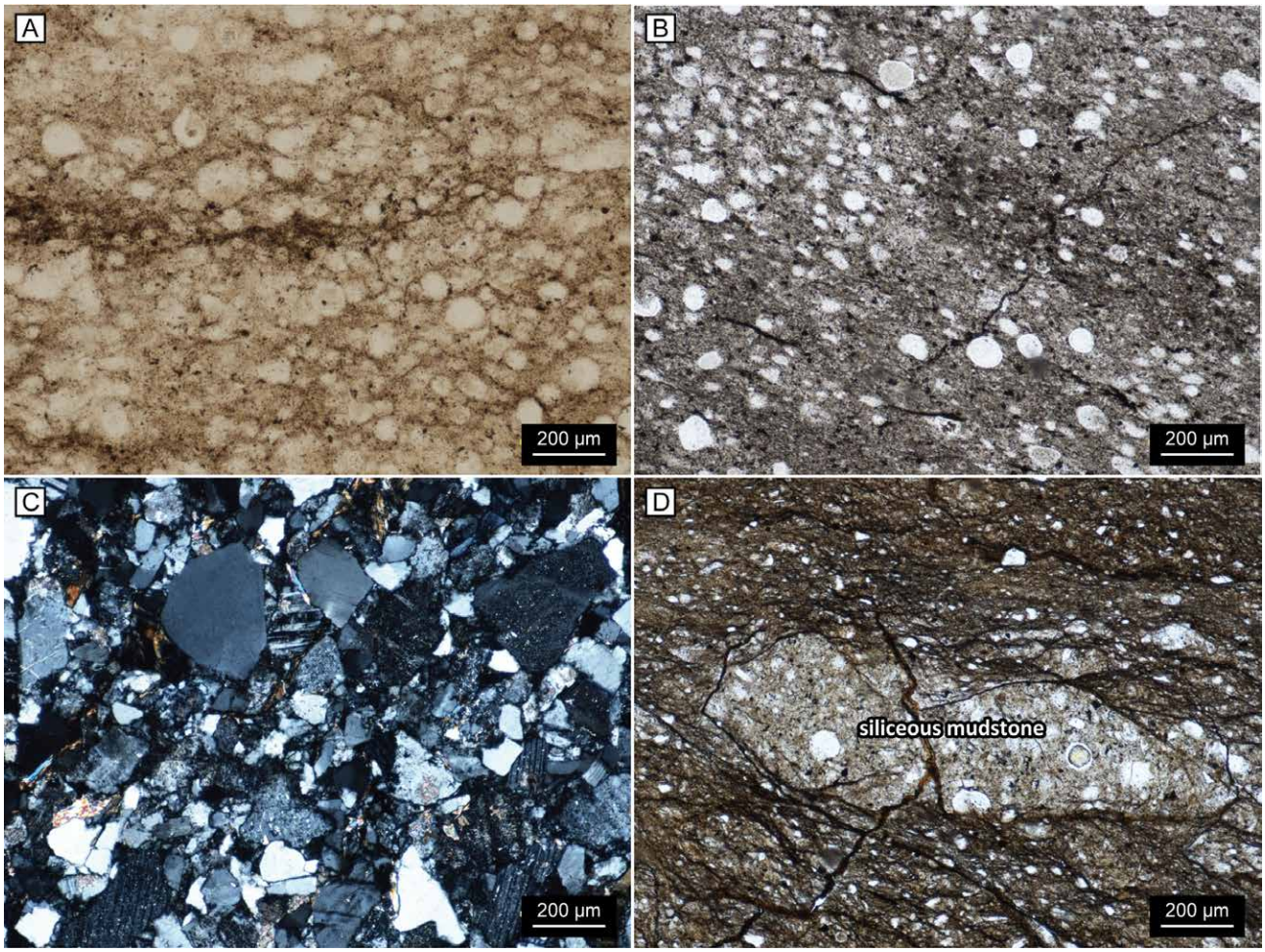


Fig. 6 Photomicrographs of thin sections. A: Lower Jurassic dark-gray bedded chert; B: Dark gray siliceous mudstone; C: Sandstone included in muddy mixed rock; D: Muddy mixed rock including siliceous mudstone fragment.

4. Radiolarian occurrences and age assignments

4. 1 Materials and methods

A total of 46 samples of chert and siliceous mudstone were collected from the Ashio terrane in the Hachioji Hills. The samples were crushed into ca. 1 cm fragments and were then soaked in a hydrofluoric acid (HF) solution (ca. 5%) at ca. 20°C–25°C room temperature for 24 hours. Residues, which were collected through a sieve with a mesh diameter of 0.054 mm, were enclosed within a slide prepared with a photocrosslinkable mounting medium (GJ-4006, Gluelabo Ltd.). These slides were observed using a transmitted light microscope and were photographed. Among the samples, 16 samples yielded radiolarians (Table 1).

4. 2 Permian radiolarians from chert

Two chert samples yielded Permian radiolarians (Plates 1, 2). Spicules were also discovered from both samples.

Samples IT16071006 and IT16071005 yielded abundant *Pseudoalbaillella sakmarensis*. This species occurs in the *Pseudoalbaillella lomentaria* Assemblage Zone and lower *Pseudoalbaillella rhombothoracata* Assemblage Zone (Ishiga, 1986). Although characteristic species of the *Pseudoalbaillella rhombothoracata* Assemblage Zone (i.e. *Pseudoalbaillella rhombothoracata*) have never been found from the both samples, *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth and Jones and *Pseudoalbaillella postscalprata* Ishiga, the ancestors of *Pseudoalbaillella rhombothoracata* Ishiga (Ishiga, 1983), were obtained from the both samples and either sample, respectively. Consequently, both samples can be correlated to the upper *Pseudoalbaillella lomentaria* Assemblage Zone (middle Cisuralian, lower Permian).

4. 3 Triassic radiolarians from chert

Triassic radiolarians were obtained from eight chert samples (Plates 3, 4). Among these samples, one sample (IT16071201) yielded an age-undeterminable conodont fragment and one sample (IT16072301) yielded certain sponge spicules.

Table 1 Fossil occurrences from the Ashio terrane in the Hachioji Hills. sl. md.: siliceous mudstone.

Sample no.	IT16071005	IT16071006	IT16071201	IT16071401	IT16071402	IT16071403	IT16071404	IT16071405	IT16072301	IT16112602	IT16112604	IT16071206	IT16071207	IT16120505	IT16071001	IT16120104
Lithology	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	sl. md.	sl. md.
Spumellaria gen. et sp. indet.			+	+	+		+	+	+			+				
Nassellaria gen. et sp. indet.				+	+										+	+
Closed-end Nassellaria												+	+	+	+	+
Striatojaponocapsa synconexa O'Dogherty, Goričan and Dumitrica															+	
Praeparvicingula sp.														?		?
Dictyomitrella ? *kamoensis* Mizutani and Kido																+
Minocapsa sp.																?
Hsuum ? *matsuokai* Isozaki and Matsuda												+				
Zhamoidellum sp.															+	
Spinosicapsa sp.														?		
Pantanellium sp.													?	+		
Paronaella sp.														?		
Protunuma sp.												?				
Parahsuum sp.												+				
Eucytidiellum sp.													+		+	+
spine B5 of Sugiyama (1997)			+													
spine A2 of Sugiyama (1997)			+													
spine D1 of Sugiyama (1997)			+				+									
spine D2 of Sugiyama (1997)			+													
spine C of Sugiyama (1997)							+									
spine of *Capuchnosphaera* sp.									?							
Pseudostylosphaera japonica (Nakaseko and Nishimura)						+				+						
Pseudostylosphaera longispinosa Kozur and Mostler										+						
Pseudostylosphaera sp.			?			+				+						
Tritortis kretaensis (Kozur and Krahl)											+					
Tritortis sp.									?							
Mesosaturnalis octospinus Sugiyama								+								
Mesosaturnalis sp.				?												
Praehexasaturnalis tenuispinosus (Kozur and Mostler)					cf.											
Muelleritortis sp.																
Capnodoce sp.					?	?		?								
Hozmadia sp.									?							
Triassocampe sp.						?				?						
Sarla sp.										?						
Pseudoalbaillella sakmarensis (Kozur)	+	+														
Pseudoalbaillella lomentaria Ishiga and Imoto		cf.														
Pseudoalbaillella scalprata Holdsworth and Jones	+	+														
Pseudoalbaillella postscalprata Ishiga		+														
Pseudoalbaillella sp.	+	+														
Polyfistula sp.		+														
arm of *Quadriremis gracilis* (De Wever and Caridroit)		+														
Entactinia sp.	?	?														
Latentifistula texana Nazarov and Ormiston	+	+														
Latentifistula sp.	?	?														
Quadriremis sp.		?														
Pseudotormentus kamigoriensis De Wever and Caridroit	+	+														
Pseudotormentus sp.	+	+														
Quadricaulis inflata (Sashida and Tonishi)	+															
Conodont fragment			+													
Sponge spicule	+	+								+						

Sample IT16071201 yielded some type of spines shown by Sugiyama (1997). According to the range of the radiolarian zonation displayed by Sugiyama (1997), spines B5, D1, and D2 co-occur in TR6A–TR6B. Spine A2 occurs in the TR3A–TR6A. Based on the co-occurrence, it is possible that the sample corresponds to TR6A, uppermost Carnian–lowermost Norian, Upper Triassic.

From sample IT16071401, some satunalids were observed. The Family Satunalidae appeared in the Carnian and occurs abundantly in the Upper Triassic (e.g. De Wever *et al.*, 2001). Therefore, the sample tentatively corresponds to the Upper Triassic.

Sample IT16071402 yielded satunalids appearing to possess six spines, identified as *Praehexasaturnalis* cf. *tenuispinosus* (Kozur and Mostler). The *Praehexasaturnalis tenuispinosus* group occurs in TR7–JR0A, middle Norian–lower Hettanginian, Upper Triassic–lowermost Jurassic (Sugiyama, 1997).

Samples IT16071403 and IT16112602 yielded *Pseudostylosphaera japonica* (Nakaseko and Nishimura). The *Pseudostylosphaera japonica* group occurs in the TR2B–TR5A, middle Anisian–lower Carnian, Middle–Upper Triassic (Sugiyama, 1997).

Sample IT16071404 yielded spines C and D1 of Sugiyama (1997). The former and latter occur in TR4B–TR5A and TR5A–TR7, respectively (Sugiyama, 1997). The co-occurrence range of these two types is restricted in TR5A, Carnian.

Sample IT16071405 yielded *Mesosaturnalis octospinus* Sugiyama. The occurrence range of this species is restricted in TR7–TR8A, middle Norian.

Sample IT16072301 yielded spines of *Capuchnosphaera*? sp. *Capuchnosphaera* occurs in the Carnian–lower Norian (O'Dogherty *et al.*, 2009b).

Sample IT16112604 yielded *Tritortis kretaensis* (Kozur and Krahl). This species occurs in TR4A–TR5A, upper Ladinian–lower Carnian, Middle–Upper Triassic (Sugiyama, 1997).

4. 4 Jurassic radiolarians from chert

Three chert samples yielded possibly Jurassic radiolarians (Plate 5). However, fossil preservation is generally poor and hence the detailed ages are uncertain. All samples yielded closed-end Nassellaria. This type of Nassellaria appeared in the Early Jurassic (O'Dogherty *et al.*, 2009a). Sample IT16071206 yielded *Parahsuum* sp. The occurrence range of this genus is the Hattanginian–Kimmeridgian, Jurassic (O'Dogherty *et al.*, 2009a). Here it is tentatively considered that all samples are Jurassic, although the occurrence range closed-end Nassellaria reaches the Cretaceous (O'Dogherty *et al.*, 2009a).

4. 5 Jurassic radiolarians from siliceous mudstone

Two siliceous mudstone samples yielded Middle Jurassic radiolarians (Plate 6).

Sample IT16071001 yielded *Striatojaponocapsa synconexa* O'Dogherty, Goričan and Dumitrica. These species abundantly occur in the upper *Striatojaponocapsa plicarum* zone and lower *Striatojaponocapsa conexa* zone (Hatakeda *et al.*, 2007), Bajocian–lower Bathonian (Matsuoka, 1995).

One specimen of closed-end Nassellaria (Plate 6.39) from sample IT16120104 resembles to *Tricolocapsa* cf. *rüsti* Tan Sin Hok sensu Yao (1979). This specimen co-occurred with *Striatojaponocapsa plicarum*. Here, it is tentatively considered that the sample is correlated with the *Striatojaponocapsa plicarum* zone.

5. Implication

In this study, Permian, Triassic, and Jurassic radiolarians were discovered from the chert and Jurassic radiolarians were obtained from the siliceous mudstone. Previously, Masuda (1989) reported *Eucyrtidiellum unumaense* (Yao) and *Unuma echinatus* Ichikawa and Yao from the chert of the Hachioji Hills. According to Matsuoka (1995), *Eucyrtidiellum unumaense* occurs mainly in the *Striatojaponocapsa plicarum* zone to *Striatojaponocapsa conexa* zone, Bajocian–lower Callovian. *Unuma echinatus* occurred *Laxtorum*? *jurassicum* zone to *Striatojaponocapsa conexa* zone, Aalenian–Bathonian (Matsuoka and Yao, 1986). Masuda (1989) stated that a similar radiolarian assemblage was obtained from the manganese nodule within the mudstone, although their images were not shown.

Combined with this previous study, the primary ocean plate stratigraphy of the Ashio terrane in the Hachioji Hills is summarized below. The chert contains Sakmarian (Cisuralian, Permian), Carnian–Norian (Upper Triassic), parts of the Anisian–Ladinian, possibly Early Jurassic, and Bajocian–lower Bathonian (Middle Jurassic) (Fig. 7). Furthermore, the siliceous mudstone and the manganese nodule within the mudstone contain Bajocian–lower Bathonian (Middle Jurassic).

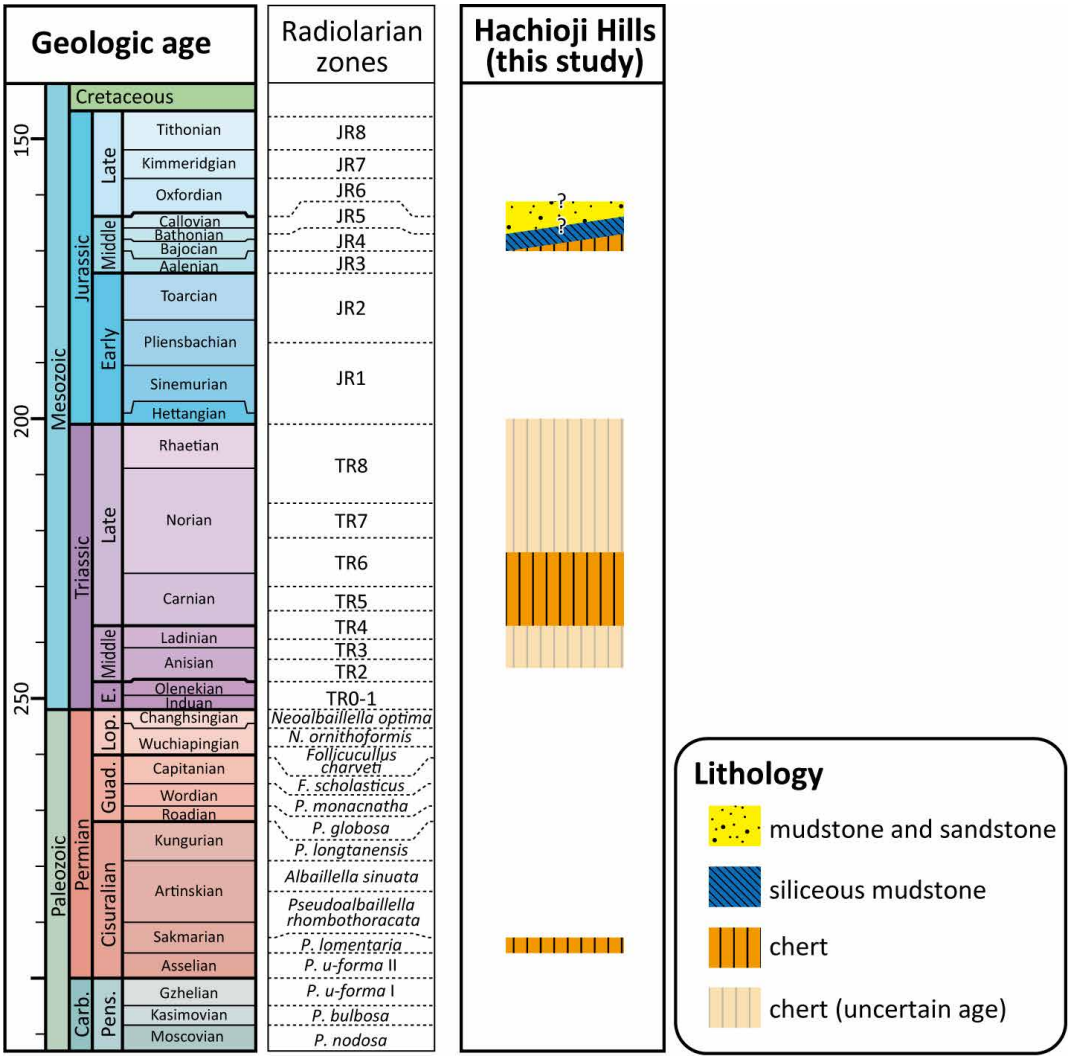
Acknowledgement

This study is based on part of the ongoing study of the quadrangle series, 1:50,000 "Geology of the Kiryu and Ashikaga," conducted by the Geological Survey of Japan, AIST. The author is grateful to Meisei Kousan Co. Ltd. for giving the permission to research on the company's property. Comments given by a reviewer, Takayuki Uchino (Geological Survey of Japan, AIST), have improved greatly this manuscript.

References

Aono, H. (1985) Geologic structure of the Ashio and Yamizo Mountains with special reference to its tectonic evolution. *Sci. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **6**, 21–57.

Conodont Research Group (1972) Conodonts at the Permian–Triassic boundary in Japan. —Conodonts from the basal part of the Adoyama formation—. *Jour.*



Fug. 7 Reconstructed ocean plate stratigraphy of the Ashio terranes in the Hachioji Hills and South-Southwest Ashio Mountains, and their correlation. Geologic age is after Ogg *et al.* (2016); radiolarian zones are based on Ishiga (1986), Matsuoka (1995), Sugiyama (1997), Kuwahara *et al.* (1998) and Zhang *et al.* (2014).
E.: Early; Lop.: Lopingian; Guad.: Guadalupian; Carb.: Carboniferous. Pens.: Pennsylvanian.

Geol. Soc. Japan, **78**, 355–368. (in Japanese with English abstract)

Conodont Research Group (1974) Conodonts at the Permian–Triassic boundary in Japan. —Stratigraphy and faunas of the Nabeyama and Adoyama formations in Karasawa area, southeast Ashio Mountains—. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **28**, 86–98. (in Japanese with English abstract)

De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., Nigrini, C. and Caridroit, M. (2001) *Radiolarians in the Sedimentary Record*. Gordon and Breach Science Publishers, Singapore, 533p.

Fujimoto, H. (1961) *Explanatory text of the Geological map of Japan, Scale 1:50,000, Tochigi*. Geol. Surv. Japan. 62p. (in Japanese with English Summary 6p.)

Geological Survey of Japan, AIST (2018) Seamless digital geological map of Japan 1: 200,000. January 10, 2018 version. Geol. Surv. Japan, AIST. https://gbank.gsj.jp/seamless/v2full/ (accessed 2018-2-1)

Harada, S. (1886) Geologic outline of the Ashio Copper Mine*. *Briefing Report of Geology* (Chishitsu Gaiho)*, 192–197. (in Japanese)

Hatakeda, K., Suzuki, N. and Matsuoka, A. (2007) Quantitative morphological analyses and evolutionary history of the Middle Jurassic polycystine radiolarian genus *Striatojaponocapsa* Kozur. *Marine Micropaleont.*, **63**, 39–56.

Hatori, H. (1965) Stratigraphic studies in the southeastern part of the Ashio Massif, Tochigi Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **71**, 247–256. (in Japanese with

English abstract)
Hayashi, S. (1963) On the Conodonts newly discovered from the Ashio Mountains, central Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **68**, 9–12. (in Japanese with English abstract)
Hayashi, S. (1964) Discovery of conodonts from "Narutakite". *Jour. Geol. Soc. Japan*, **70**, 596. (in Japanese)
Hayashi, S. (1968a) The Permian conodonts in chert of the Adoyama Formation, Ashio Mountains, central Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **22**, 63–77. (in Japanese with English abstract)
Hayashi, S. (1968b) Redescription of the new forms proposed in "The Permian conodonts in chert of the Adoyama Formation, Ashio Mountains, central Japan," 1968 by Shingo HAYASHI. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **22**, 305. (in Japanese with English abstract)
Hayashi, S. (1971) Conodonts from the Nabeyama Formation, Kuzuu District, Tochigi Prefecture, Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **25**, 251–257. (in Japanese with English abstract)
Hayashi, S. and Hasegawa, Y. (1981) Chichibu System in the Ashio Belt: Macrofossil- and conodont-based age (Part 2)*. *Studies on Late Mesozoic Tectonism in Japan*, no. 3, 233–249. (in Japanese with English abstract)
Hayashi, S., Iijima, S., Ishii, I., Nakajima, T., Sawaguchi, H., Tanaka, H. and Yoshida, T. (1990) Late Paleozoic to Mesozoic formations in the southwestern Ashio Mountains. *Bull. Gunma Pref. Museum History*, no. 11, 1–34. (in Japanese with English abstract)
Igo, H., Aoki, R. and Hosoi, S. (1976) On the Boundary between the Permian and Triassic Formations in the Eastern Part of the Kuzu Area, Tochigi Prefecture. *Bull. Tokyo Gakugei Univ. Sec. IV*, **28**, 226–236. (in Japanese with English abstract)
Ishiga, H. (1983). Morphological change in the Permian radiolaria, *Pseudoalbaillella scalprata* in Japan. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, New Ser*., no. 129, 1–8.
Ishiga, H. (1986). Late Carboniferous and Permian radiolarian biostratigraphy of southwest Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **29**, 89–100.
Kamata, Y. (1996) Tectonostratigraphy of sedimentary complex in the southern part of the Ashio Terrane, central Japan. *Sci. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba. Sec. B, Geol. Sci*., **17**, 71–107.
Kamata, Y. (1997) Reconstruction of chert–clastic sequence of the Ashio Terrane in the Kuzu area, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 343–356. (in Japanese with English abstract)
Kawada, K. and Ozawa, A. (1955) *Explanatory text of the Geological map of Japan, Scale 1:50,000, Ashio*. Geol. Surv. Japan. 57p. (in Japanese with English Summary 7p.)
Koike, T., Watanabe, K. and Igo, H. (1970) New evidence of Triassic conodont biostratigraphy in Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **76**, 267–269. (in Japanese with English abstract)
Koike, T., Kinoshita, T., Igo, H. and Takizawa, S. (1971) Conodonts from the Tochigi Group and the discovery of the thrust fault in the vicinity of Kuzuu, Tochigi Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **77**, 221–222. (in Japanese with English abstract)
Koike, T., Igo, H., Igo, H. and Kinoshita, T. (1974) Geological significance of the unconformity between the Permian Nabeyama and Triassic Adoyama Formations in the vicinity of Kuzuu, Tochigi Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **80**, 293–306. (in Japanese with English abstract)
Kuwahara, K., Yao, A. and Yamakita, S. (1998) Reexamination of Upper Permian radiolarian biostratigraphy. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **52**, 391–404.
Masuda, S. (1989) Jurassic radiolarian fossils in the Hachioji Hill. *Res. Rep., Ashikaga Inst. Technol*., no. 15, 207–214. (in Japanese with English abstract)
Matsuoka, A. (1995) Jurassic and Lower Cretaceous radiolarian zonation in Japan and in the Western Pacific. *Island Arc*, **4**, 140–153.
Matsuoka, A., Yamakita, S., Sakakibara, M. and Hisada, K. (1998) Unit division for the Chichibu Composite Belt from a view point of accretionary tectonics and geology of western Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **104**, 634–653. (in Japanese with English abstract)
Matsuoka, A. and Yao, A. (1986) A newly proposed radiolarian zonation for the Jurassic of Japan. *Marine Micropaleont*., **11**, 91–105.
Morikawa, R. and Horiguchi, M. (1956) *Parafusulina nakamigawai* n. sp. from the Adoyama formation in the Neighborhood of Kuzu City, Tochigi Prefecture. *Saitama Univ., Sci. Rep., Sec. B*, **2**, 261–264.
Muto, S., Takahashi, S., Yamakita, S., Suzuki, N., Suzuki, N. and Aita, Y. (2018) High sediment input and possible oceanic anoxia in the pelagic Panthalassa during the latest Olenekian and early Anisian: Insights from a new deep-sea section in Ogama, Tochigi, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*., **490**, 687–707.
Nakae, S. (2000) Regional correlation of the Jurassic accretionary complex in the Inner Zone of Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 55, 73–98. (in Japanese with English abstract)
Nomura, M., Ohira, H. and Mita, T. (2017) Fission track ages of the tuffs around the Hachioji Hills, southeast Gunma Prefecture, central Japan. *Bull. Gunma Museum Natural History*, **21**, 43–48. (in Japanese with English abstract)
O'Dogherty, L., Carter, E. S., Dumitrica, P., Goričan, Š., De Wever, P., Bandini, A. N., Baumgartner, P. O. and Matsuoka, A. (2009a) Catalogue of Mesozoic radiolarian genera. Part 2: Jurassic–Cretaceous. *Geodiversitas*, **31**, 271–356.

O'Dogherty, L., Carter, E. S., Dumitrica, P., Goričan, Š., De Wever, P., Hungerbuhler, A., Bandini, A. N. and Takemura, A. (2009b) Catalogue of Mesozoic radiolarian genera. Part 1: Triassic. *Geodiversitas*, **31**, 213–270.

Ogg, J. G., Ogg, G. M. and Gradstein, F. M. (2016) *A Concise Geologic Time Scale 2016*. Elsevier, Amsterdam, 234p.

Sato, T. and Aono, H. (1985) Geologic structure of the Ashio Mountains and Yamizo Mountains*. *A comprehensive research on the Joetsu and Ashio belts* (Sogo Kenkyu, Joetsu-Tai, Ashio-Tai)*, no. 2, 85–96. (in Japanese)

Sudo, S., Makimoto, H., Hata, M., Unozawa, A., Takizawa, F. and Sakamoto, T. (1991) *Geological map of the Utsunomiya district*. Quadrangle Series, 1:200,000, Geol. Surv. Japan.

Sugiyama, K. (1997) Triassic and Lower Jurassic radiolarian biostratigraphy in the siliceous claystone and bedded chert units of the southeastern Mino terrane, central Japan. *Bull. Mizunami Fossil Museum*, 24, 79–193.

Suzuki, H. (1898a) Ashio Copper Mine*. *Jour. Geogr*., **10**, 183–195. (in Japanese)

Suzuki, H. (1898b) An investigative report of the Ashio Copper Mine*. *Jour. Mining Inst. Japan*, **14**, 318–324. (in Japanese)

Takahashi, M. and Yanagisawa, Y. (2003) Stratigraphy and geochronology of the Miocene marine sequence in the Ota area, Gunma Prefecture, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **109**, 648–660. (in Japanese with English abstract)

Takakashi, M., Otomo, I. and Saito, K. (1991) K–Ar dating of welded tuffs in the Kanayama area, eastern Gunma Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 167–173. (in Japanese with English abstract)

Watanabe, T., Mukaiyama, H., Kanehira, K. and Hamada, T. (1957) *Geological map of the Ashio Massif and explanatory text*. Tochigi Prefecture. 40p. (in Japanese)

Yabe, H. (1903) On fusulina-limestone with Helicoprion in Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **10**, 1–13.

Yanagimoto, Y. (1973) Stratigraphy and geological structure of the Paleozoic and Mesozoic formations in the vicinity of Kuzuu, Tochigi Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **79**, 441–451. (in Japanese with English abstract)

Yao, A. (1979) Radiolarian fauna from the Mino Belt in the northern part of the Inuyama area, central Japan. *Jour. Geosci. Osaka City Univ*., **22**, 21–72.

Yoshida, S. (1956) Stratigraphical and tectonical studies in the district neighboring Kuzu Machi, Tochigi Prefecture, Part 1. *Bull. Geol. Commit. Hokkaido*, no. 32, 1–10. (in Japanese with English abstract)

Yoshida, S. (1957) Stratigraphical and tectonical studies in the district neighboring Kuzu Machi, Tochigi Prefecture, Part 2. *Bull. Geol. Commit. Hokkaido*, no. 33, 1–5. (in Japanese)

Zhang, L., Ito, T., Feng, Q. L., Caridroit, M. and Danelian, T. (2014) Phylogenetic model of *Follicucullus* lineages (Albaillellaria, Radiolaria) based on high-resolution biostratigraphy of the Permian Bancheng Formation, Guangxi, South China. *Jour. Micropalaeont*., **33**, 179–192.

*Translated by the author.

Recieved May 9, 2018
Accepted January 18, 2019

群馬県東部八王子丘陵の足尾テレーンから産出したペルム紀，三畳紀及びジュラ紀放散虫の報告

伊藤　剛

要　旨

群馬県東部の八王子丘陵にはジュラ紀付加体足尾テレーンが露出する. この足尾テレーンは, チャートと泥質混在岩を主体とし, 珪質泥岩, 泥岩, 砂岩を伴う. ペルム紀前期 (シスウラリアン世サクマーリアン期) , 後期三畳紀 (カーニアン期～ノーリアン期) 及びジュラ紀の放散虫化石がチャートから産出し, 中期ジュラ紀 (バッジョシアン期～バトニアン期) 放散虫が珪質泥岩から産出した.

Plate 1 Permian radiolarians and spicules from chert.

1–6, 21–24: *Pseudoalbaillella sakmarensis* (Kozur)
7, 8: *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth and Jones
9, 10, 19, 30, 34, 41: *Latentifistula* spp.
11–14: *Latentifistula texana* Nazarov and Ormiston
15, 29, 35, 36, 40, 46: Sponge spicule
16–18, 31–33, 37, 39, 43, 45: *Pseudotormentus* spp.
20, 44: *Quadricaulis* sp.
25: *Pseudoalbaillella* sp.
26–28: *Entactinia*? sp.
38: *Polyfistula* sp.
42: *Quadricaulis inflata* (Sashida and Tonishi)

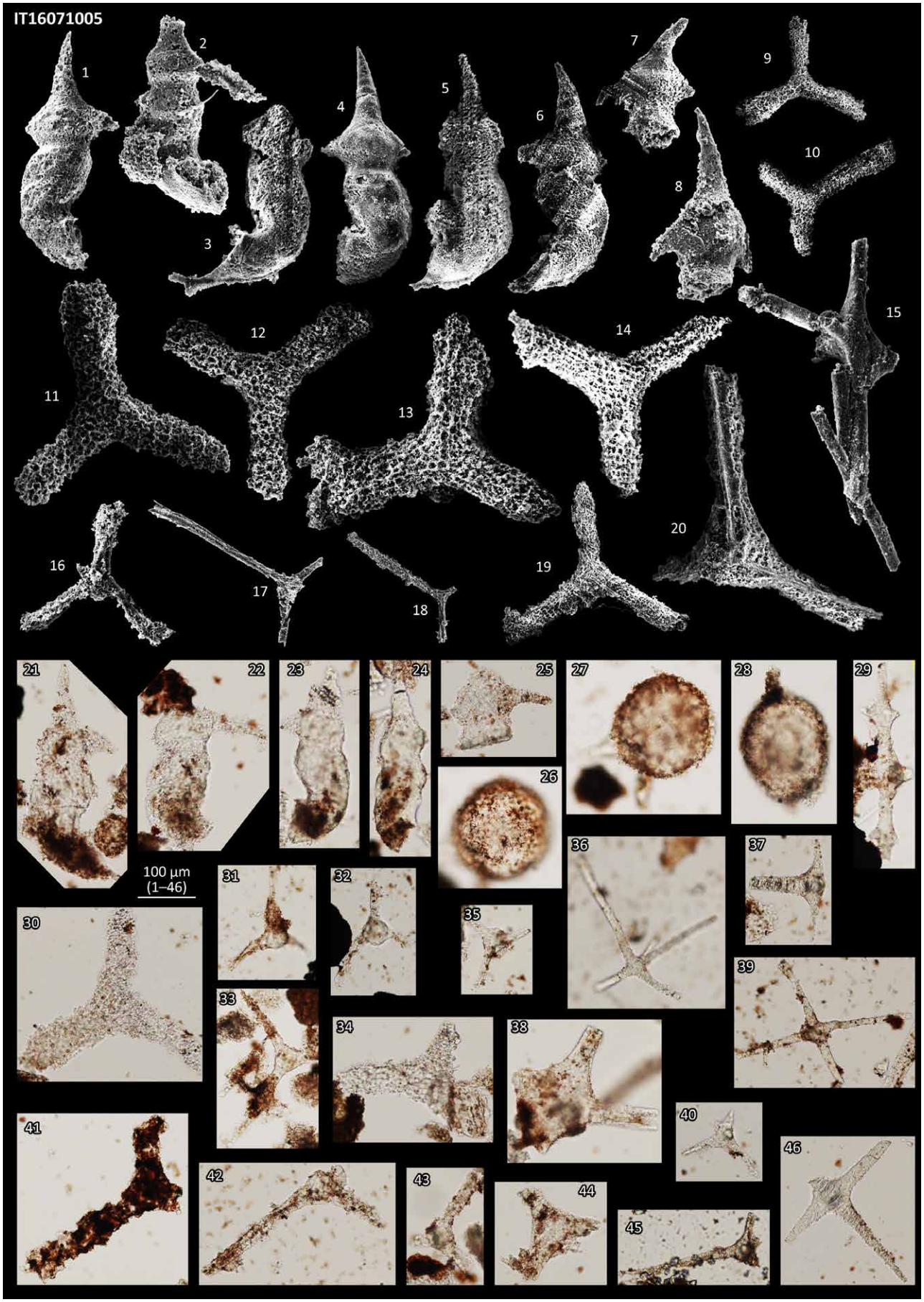

IT16071005
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
100 µm
(1–46)
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46

Plate 2 Permian radiolarians and spicules from chert.

1–7, 26–36: *Pseudoalbaillella sakmarensis* (Kozur)
8: *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth and Jones
9: *Pseudoalbaillella postscalprata* Ishiga
10: *Entactinia*? sp.
11, 13: *Latentifistula texana* Nazarov and Ormiston
12, 22, 41: *Pseudotormentus kamigoriensis* De Wever and Caridroit
14: *Quadricaulis* sp.
15, 16, 47, 48: arm of *Quadriremis gracilis* (De Wever and Caridroit)
17: arm of *Quadricaulis inflata* (Sashida and Tonishi)
18–21, 23–25, 45: *Latentifistula*? spp.
37: *Pseudoalbaillella* cf. *lomentaria* Ishiga and Imoto
38, 39: *Pseudoalbaillella* sp.
40: *Entactinia*? sp.
42–44: *Quadriremis*? spp.
46: *Polyfistula* sp.

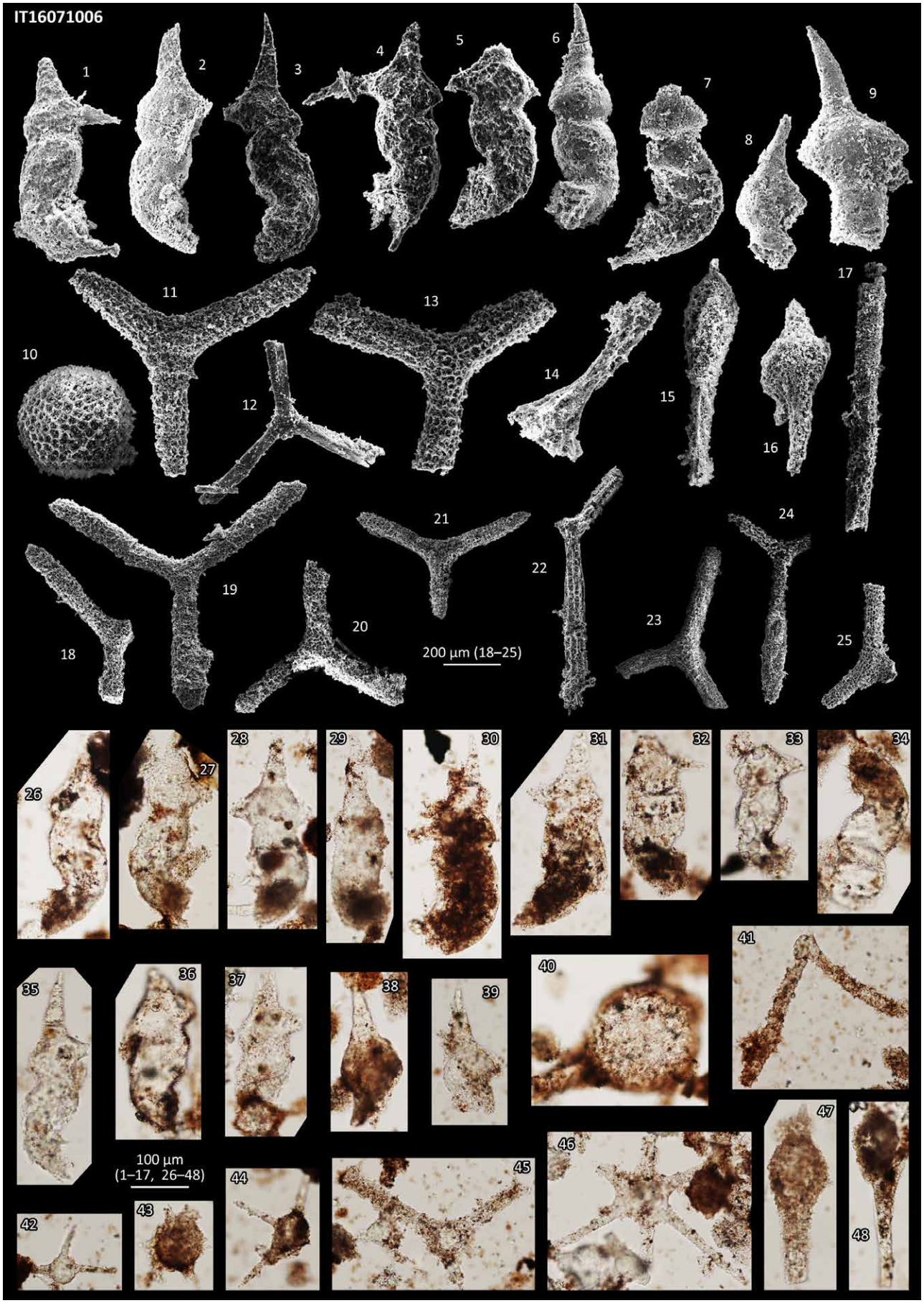

IT16071006
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
200 µm (18–25)
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
100 µm
(1–17, 26–48)

Plate 3 Triassic radiolarians and conodont fragments from chert.

1: Spine B5 of Sugiyama (1997)
2: Spine A2 of Sugiyama (1997)
3, 4, 28, 30, 31, 33: Spine D1 of Sugiyama (1997)
5: Spine D2 of Sugiyama (1997)
6: *Pseudostylosphaera*? sp.
7, 9, 17, 20, 21, 23, 29, 51, 54–57: Spumellaria gen. et sp. indet.
8: Conodont fragment
10–16: *Mesosaturnalis*? sp.
18, 19, 22, 38: Nassellaria gen. et sp. indet.
24: *Capnodoce*? sp.
25–27: *Praehexasaturnalis* cf. *tenuispinosus* (Kozur and Mostler)
32: spine C of Sugiyama (1997)
34–37: *Triassocampe*? spp.
39–43: *Pseudostylosphaera japonica* (Nakaseko and Nishimura)
44–46: *Pseudostylosphaera* sp.
47, 48: *Pseudostylosphaera*? spp.
49: *Muelleritortis* sp.
50, 52, 53: *Capnodoce*? spp.

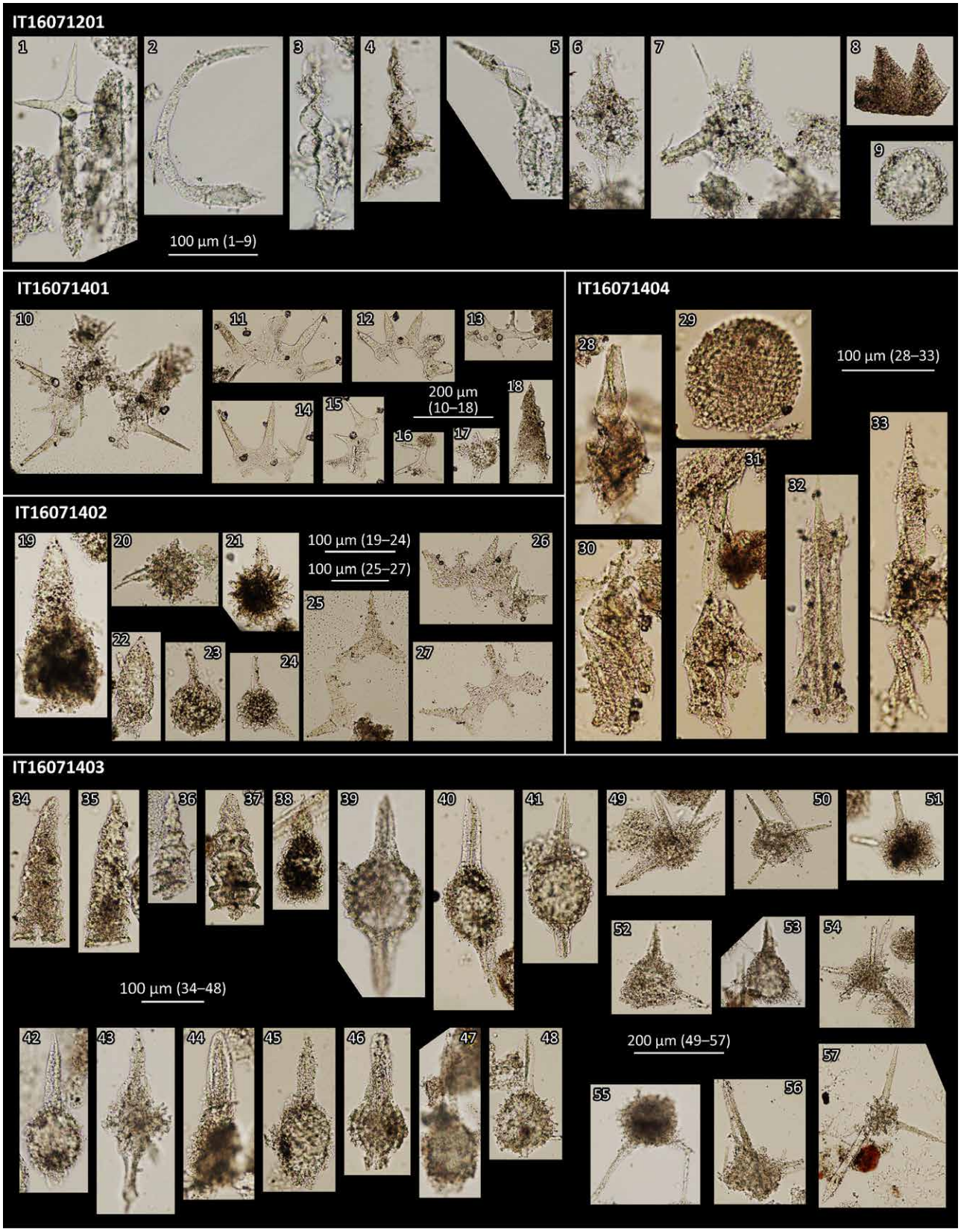

IT16071201
1
2
3
4
5
6
7
8
9
100 µm (1–9)
IT16071401
10
11
12
13
14
15
16
17
18
200 µm (10–18)
IT16071402
19
20
21
22
23
24
25
26
27
100 µm (19–24)
100 µm (25–27)
IT16071404
28
29
30
31
32
33
100 µm (28–33)
IT16071403
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
100 µm (34–48)
200 µm (49–57)

Plate 4 Triassic radiolarians and sponge spicules from chert.

1–3, 5–10: *Mesosaturnalis octospinus* Sugiyama
4, 14–16: Spumellaria gen. et sp. indet.
11: *Capnodoce*? sp.
12: *Hozmadia*? sp.
13: *Tritortis*? sp.
17: *Spine of Capuchnosphaera*? sp.
18–21: *Triassocampe*? sp.
22: *Sarla*? sp.
23–26: *Pseudostylosphaera japonica* (Nakaseko and Nishimura)
27: *Pseudostylosphaera* sp.
28–30: *Pseudostylosphaera longispinosa* Kozur and Mostler
31, 32: sponge spicules
33: spicule
34: *Tritortis kretaensis* (Kozur and Krahl)

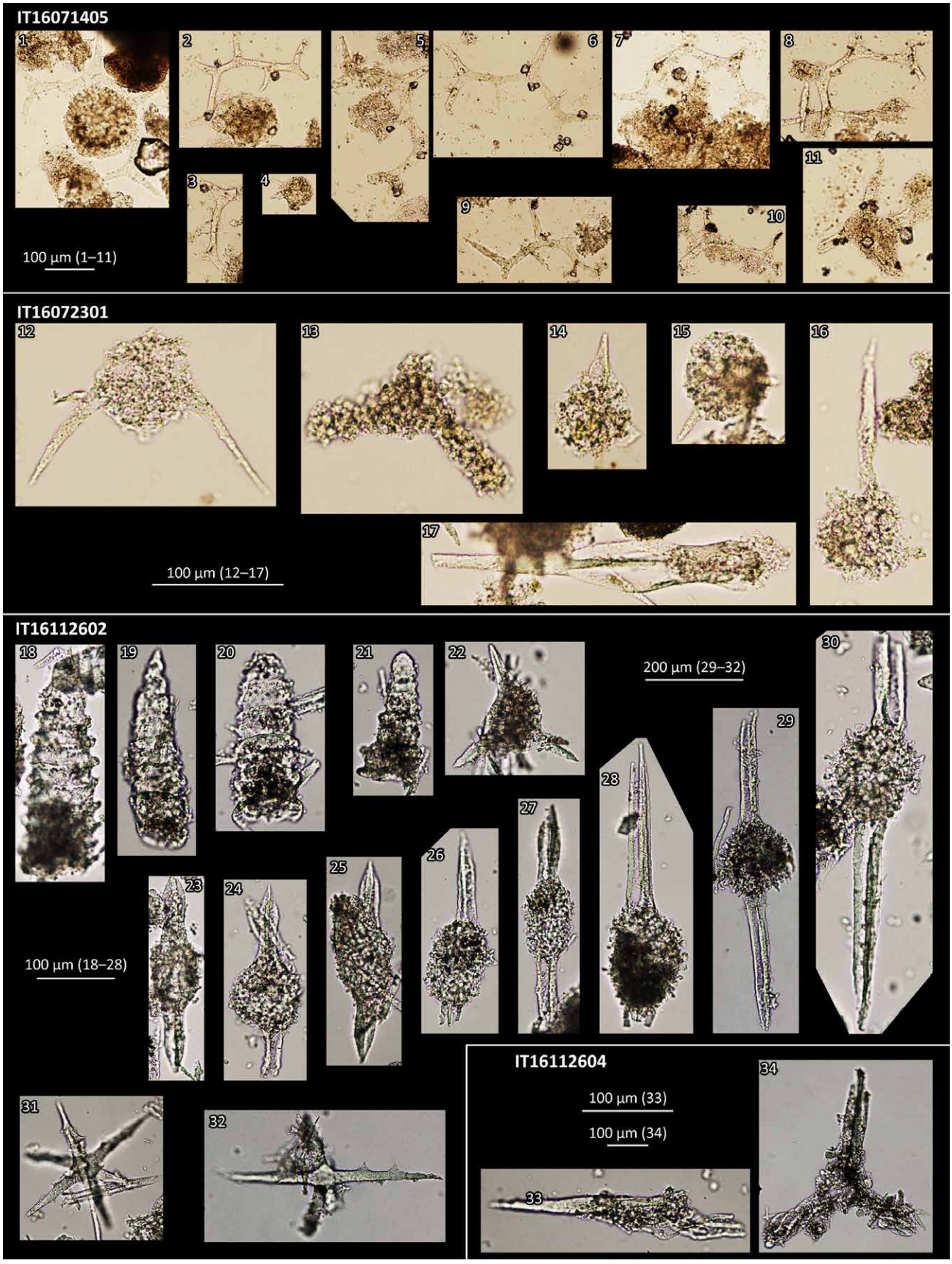

IT16071405
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
100 µm (1–11)
IT16072301
12
13
14
15
16
17
100 µm (12–17)
IT16112602
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
200 µm (29–32)
100 µm (18–28)
IT16112604
31
32
33
34
100 µm (33)
100 µm (34)

Plate 5 Jurassic radiolarians from chert.

1–9, 12–19, 32–37, 39, 41–44, 50: Closed-end Nassellaria
20: *Protunuma*? sp.
10, 11, 21, 22, 26, 28–30, 38, 45, 48, 51, 58, 59: Nassellaria gen. et sp. indet.
23, 24: *Hsuum*? *matsuokai* Isozaki and Matsuda
25: *Parahsuum* sp.
27: *Parahsuum*? sp.
31, 46, 57: Spumellaria gen. et sp. indet.
40: *Eucytidiellum* sp.
47: *Pantanellium*? sp.
49: *Spinosicapsa*? sp.
52–56: *Praeparvicingula*? sp.
60: *Pantanellium* sp.
61: *Paronaella*? sp.

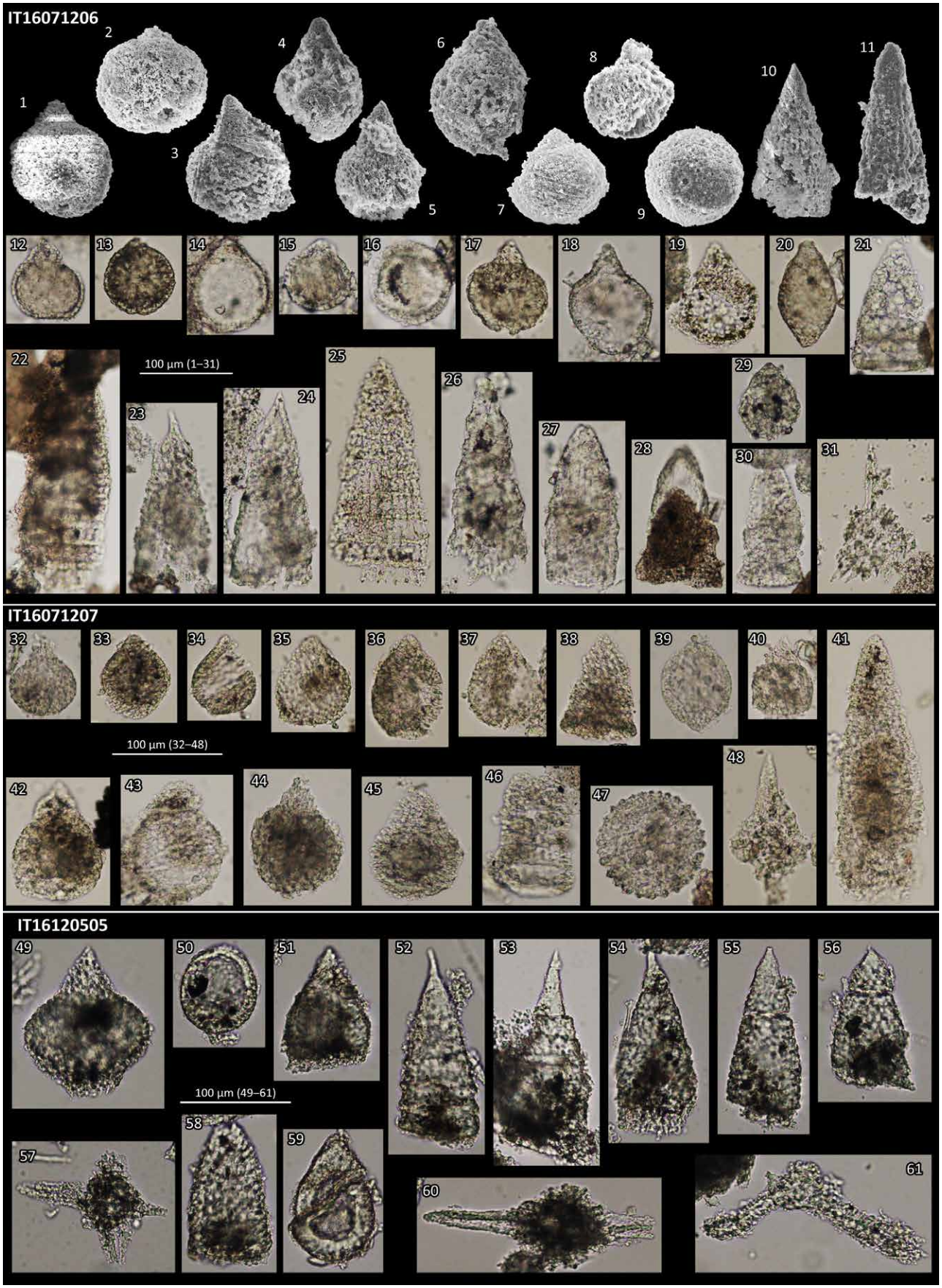
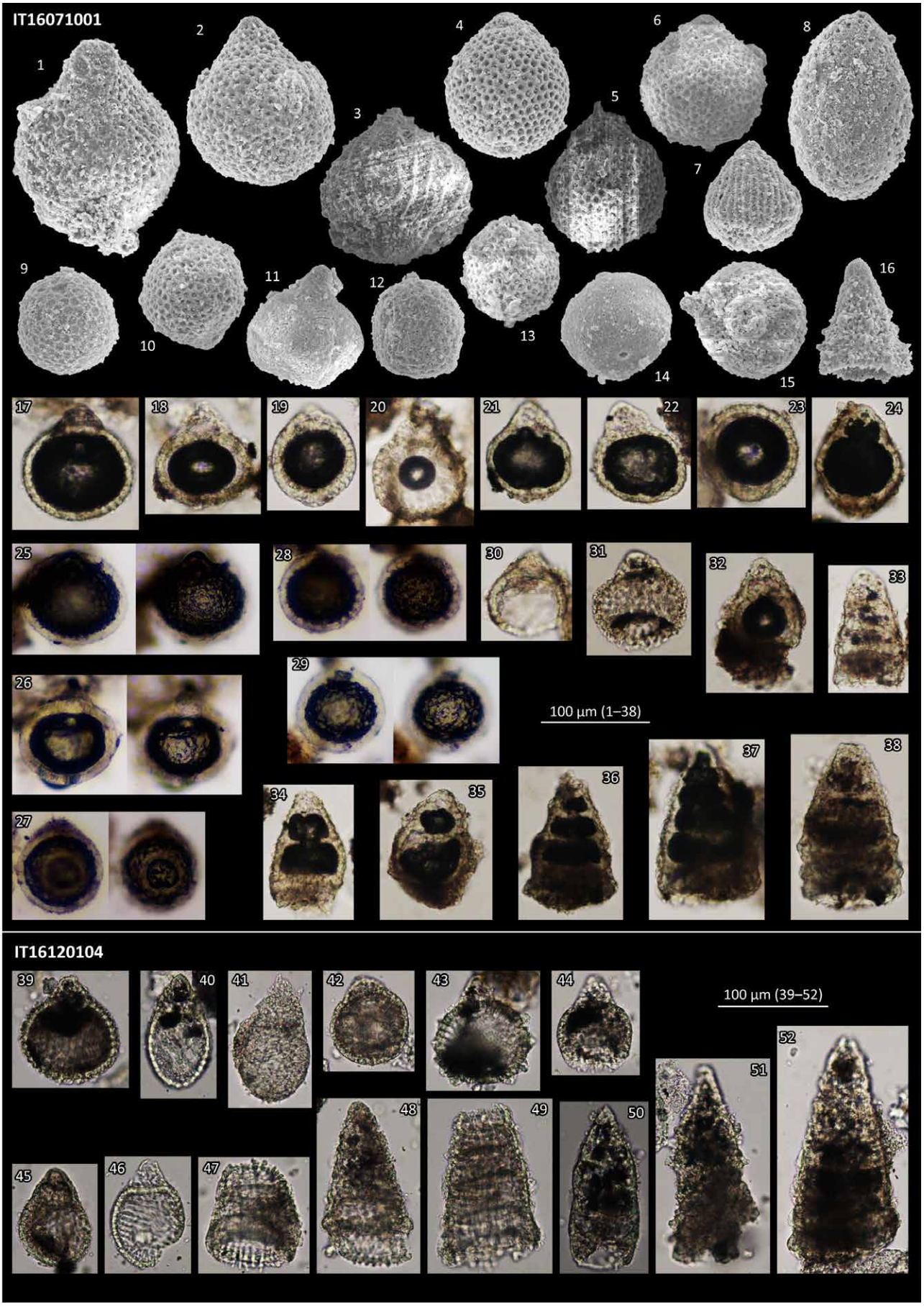

IT16071206
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
100 µm (1–31)
23
24
25
26
27
28
29
30
31
IT16071207
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
100 µm (32–48)
42
43
44
45
46
47
48
IT16120505
49
50
51
52
53
54
55
56
100 µm (49–61)
57
58
59
60
61

Plate 6 Jurassic radiolarians from siliceous mudstone.

1, 2, 4–6: *Stichocapsa*? sp.
3, 51: Nassellaria gen. et sp. indet.
7: *Striatojaponocapsa synconexa* O'Dogherty, Goričan and Dumitrica
8, 14: *Gongylothorax siphonofer* Dumitrica
32: *Eucytidiellum* sp.
9–13, 15, 17–31, 33, 39, 41–44, 47: Closed-end Nassellaria
16, 34–38: Nassellaria gen. et sp. indet.
40, 45, 46: *Minocapsa*? spp.
48: *Dictyomitrella*? *kamoensis* Mizutani and Kido
49, 50, 52: *Praeparvicingula*? spp.


IT16071001
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
28
30
31
32
33
26
29
100 µm (1–38)
27
34
35
36
37
38
IT16120104
39
40
41
42
43
44
100 µm (39–52)
45
46
47
48
49
50
51
52

地質調査研究報告, 70 巻, 第 1/2 号 , p. 249–260, 2019

特別寄稿：20 世紀後半における日本の中・古生代放散虫研究の進展

八尾　昭*

Akira Yao (2019) Development of Paleozoic - Mesozoic radiolarian research in the latter half of the 20th century in Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 249–260.

Abstract: Paleozoic-Mesozoic radiolarian research developed rapidly in the latter half of the 20th century in Japan. Based on passage of the author's research, the development process of radiolarian research in Japan is divided into 4 periods: (1) before 1968: Paleozoic-Mesozoic radiolarians were not admitted the biostratigraphical validity, (2) 1969–1978: Mesozoic-type radiolarian fossils have begun to be found from non-limestone facies "Paleozoic", (3) 1979–1988: Paleozoic-Mesozoic radiolarian biostratigraphy developed rapidly, and the reality as sedimentary complex of "Paleozoic-Mesozoic strata" was elucidated, and (4) after 1989: based on the analysis of radiolarian fossil assemblage, approach to paleo-environmental reconstruction has started.

Next factors existed as background of rapid development of radiolarian research: (1) radiolarian characteristics (high diversity and variability of species, high population, comparatively stable shell component, stratigraphically continuous occurrence), (2) spread of modernization of research method such as hydrofluoric acid (HF) treatment, scanning electron microscope (SEM) and computer, (3) organization of research system (Grants-in-Aid Co-operative Research (A), International Cooperation Research Project, International Collaborative Research etc.) and (4) organization and internationalization of information exchange (Radiolarian Symposium, International Conference etc.)

Keywords: Paleozoic, Mesozoic, Japan, radiolaria, biostratigraphy, development

要　旨

日本の中・古生代放散虫化石の研究は，20世紀後半に急速に進展した．筆者の研究の経過に基づけば，その進展過程は，(1) 1968年以前：中・古生代放散虫化石に生層序学的有効性が認められていなかった時期，(2) 1969年–1978年：非石灰岩相"古生界"から中生代型放散虫化石が発見されだした時期，(3) 1979年–1988年：中・古生代放散虫生層序学が急速に進展し，それに基づく検討によって"中・古生界"の堆積岩コンプレックスとしての実態が解明された時期，(4) 1989年以降：放散虫化石の群集解析に基づく古環境復元へのアプローチが始まった時期，の4時期に区分される．

放散虫化石研究の急速な進展の背景には，(1) 放散虫化石の特性(種の多様性と変異性の高さ，産出個体数の多さ，比較的安定な殻成分，層序学的に連続した産出など)，(2) 研究手法の近代化(フッ化水素酸(HF)法，走査型電子顕微鏡(SEM)，コンピュータの普及)，(3) 研究体制の組織化(科学研究費補助金総合研究(A)，国際協力研究事業，国際共同研究など)，及び，(4) 情報交換の組織化と国際化(放散虫研究集会，国際研究集会など)という要素があった．

1．はじめに

2017年3月5日の2016年度微古生物学リファレンスセンター研究集会・第13回放散虫研究集会合同山形大会(MRC・NOM in Yamagata)の表彰式において，筆者は光栄にも水谷伸治郎先生と同時に「NOM功労賞」を授与された．表彰状には，「あなたは永年にわたり放散虫研究のため尽力しその発展に貢献するところ誠に大なるものがありました．よってここにその功績を称えるとともに深い感謝の意を表し記念品を添えて表彰いたします．放散虫研究集会一同　MRC・NOM in 山形　実行委員長　本山　功」とある．この受賞を機に，筆者のこれまでの研究経過を中心にして，20世紀後半において日本の古生代–中生代放散虫研究が進展した経緯を振り返りたい．

筆者が放散虫化石の研究に初めて携わったのは1967年であり，それ以来50年が経過した．この間，特に1960年代末から1990年代にかけて，日本の古生代–中生代(以降，中・古生代と表記)の放散虫化石の研究が急展開した．これと連動して古生界–中生界(以降，中・古生界と表記)の実態が急速に解明され，日本列島地質発達史の捉え方が劇的に変化したことは周知の通りである．この急速な解明･変化は，"放散虫革命"と称された(石垣･八尾，1982)．

* Corresponding author: A. Yao, Okushiba-cho 8, Nara City, Nara 630-8256, Japan. Email: yao-a @kcn.jp

筆者及び共同研究者は，目まぐるしく展開した放散虫化石研究及び中・古生界研究の状況を折々に報告してきた（例えば，中世古ほか，1983；市川ほか，1985；Mizutani and Yao, 1991；八尾・水谷，1993）．研究状況が平穏化した現在，改めて20世紀後半の研究経緯を振り返ることは有意義と思われる．本小論では，筆者が中・古生代放散虫化石の研究とどのように関わってきたかを軸にして，研究の経緯を1968年以前，1969年–1978年，1979年–1988年，1989年以降の4時期に区分して振り返る．また，中・古生代放散虫化石の研究が急展開した背景について，「放散虫化石の特性」，「研究手法の近代化」，「研究体制の組織化」，「情報交換の組織化と国際化」という視点で触れる．

2．20 世紀後半の中・古生代放散虫研究の経緯

2. 1　1968年以前

日本の中・古生代放散虫化石の本格的な研究は，古くは1920年代にさかのぼり，以降1960年代までの間に，数年に1編ないし数編の論文が出されてきた（八尾ほか，2001b）．これらの論文の多くは放散虫化石の発見を報じたものであり，当時の既存資料の少なさや限られた研究手法のため，産出層の年代論などに寄与した研究例はそれほど多くない．

筆者は奈良教育大学の1966年度卒業研究の課題として「京都府南部鷲峰山地域の丹波帯の地質学的研究」を設定し，野外地質調査と微化石の探査を行った．その結果，当初もくろんだコノドント化石の発見には至らなかったが，紡錘虫化石と花粉・胞子化石の発見という幸運に恵まれた（八尾，1968；Takahashi and Yao, 1969）．これらの微化石が，後に明らかとなった丹波帯の実態（堆積岩コンプレックス）を示唆していることに気付けなかったが，研究を次のステップに進める大きな契機となった．

筆者は1967年に大阪市立大学大学院修士課程に入学し，市川浩一郎先生の指導を受けることとなった．市川先生は，東京帝国大学（現，東京大学）の小林貞一先生の門下生として学部生当時（1944年）に岩石薄片法による放散虫化石の研究を開始し，関東山地御嶽山地域の珪質頁岩（“古生界上部–三畳系ないしジュラ系”）から日本で初めて放散虫化石を新種記載した（Ichikawa, 1950）．市川先生のこの研究経験を受け継ぎ，筆者の卒業研究での微化石処理技術を活かして，大学院での研究目的として“放散虫化石に基づく日本の中・古生界の実態解明”を設定した．第一段階の研究として，様々な岩相から構成される含放散虫“古生界”が好露出しているルート，つまり秩父南帯（秩父帯の南の地体）の和歌山県由良地域（以降，紀伊由良地域と表記）の白崎–大引海岸を間縄測量で詳細に調査し，ルートマップ・柱状図を作成した．さらに，採集した岩石試料を対象にして，放散虫化石の個体分離・摘出法の開発及び化石放散虫殻の観察法を検討した．

2. 2　1969年–1978年

中・古生代放散虫化石の研究にとって，1969年–1978年の時期は，1979年からの急激な進展時期の前段階に当たる．この前段階でどのような研究が行われ，どのような成果が出され，どのように次の段階へ移行したかを，筆者の研究を中心にして以下に記述する．

2. 2. 1　紀伊由良地域での研究

筆者の修士課程での最初の研究成果は，紀伊由良地域の秩父南帯“ペルム系”の珪質泥岩から混酸・アルカリ液による化学的処理によって，放散虫化石を個体分離・摘出したことである．更に，その産出個体を光学顕微鏡だけでなく，走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope: SEM）で観察・撮影を行った（八尾・市川，1969）．SEMは当時まだ大学に設置されておらず，実際の観察・撮影は株式会社島津製作所の科学計測工場（京都）で行った．古期放散虫化石のSEM像が日本で公表されたのは，八尾・市川（1969）が最初であり，世界的にも最初期である．

修士課程における更なる重要な成果は，紀伊由良地域の“ペルム系”から摘出した放散虫化石が古生代型ではなく，中生代型であり，産出層が中生界である可能性を示唆した（八尾・市川，1969）ことである．この当時の放散虫化石による年代論は，主に19世紀後半から20世紀初頭に出版された資料との比較に基づいており，“中生代の可能性”を推定するレベルであった．しかしながら，従来想定された年代とは異なり，より新しい年代の可能性のある放散虫化石を発見したことは，“放散虫革命”への導入のきっかけとなった．

筆者は1969年に博士課程に進学し，放散虫化石及び中・古生界の研究を続行した．紀伊由良地域の秩父南帯“古生界”（白崎石灰岩や立厳石灰岩などの含紡錘虫石灰岩体を除く）は，放散虫化石だけでなく，後に発見された大型化石（六射サンゴ化石・材化石など）からも中生界であることが明らかになった（八尾，1970）．中生代型放散虫化石の産出については，日本古生物学会1971年年会・総会（東京大学，1971年1月）で“Mesozoic Radiolaria from the Chichibu belt in the Yura district, Wakayama Prefecture”と題して講演した.含紡錘虫石灰岩体の産状については，中生界間の“スラスト岩体”である場合と，中生界中の“スライド岩体”である場合とを識別した（市川ほか，1971；八尾，1971）．含紡錘虫石灰岩体は，いずれの産状であっても中生界とは起源を異にした異質岩体であることが判明した．つまり，付加体の特性の一つであるメランジュの特徴が認識されたわけである．

2. 2. 2　犬山地域での研究

日本の中・古生代放散虫化石の多くは，一般的に保存が悪い．化石として残された放散虫殻の形態的・構造的特徴を詳細に検討するには，保存の良い個体の観察が必要である．そのため，1969年から愛知県犬山市北方の岐阜県各務原市鵜沼（以降，犬山地域と表記）の木曽川河岸に露出する美濃帯“ペルム系”中のマンガンノジュールを，橋本　正（当時，大垣第一女子高等学校）氏の協力を得て検討を開始した．珪質泥岩層の数層準に含まれるマンガンノジュールを採集し，酸液で処理した．マンガンノジュールは容易に溶け，非常に保存の良い多種多様な放散虫化石が得られた．この放散虫化石群は，中生代以降にしか知られていない属や種に類縁なものを多数含むのに対し，古生代のものと類縁な種は全く見当たらない．この中生代型放散虫化石の発見の第一報を，日本古生物学会1971年年会・総会（東京大学，1971年1月）で“Radiolarian fossil from the so-called Permian of Unuma, north of Inuyama, Gifu Prefecture”と題して講演し，日本地質学会関西支部例会でも発表した（八尾ほか，1971）．さらに中生界上部にしか知られていなかった分類群の一つであるSpongosaturnalidに特化して，日本古生物学会第107回例会（奈良教育大学，1971年6月）で“岐阜県犬山市北方鵜沼産の後期中生代型Spongosaturnalin Radiolariaについて”と題して講演した．

上記の中生代型放散虫化石の発見と時を同じくして，犬山地域の“ペルム系”層状チャートから三畳紀後期を示すコノドント化石が報告された（Koike *et al.*, 1971）．それ以前に，犬山地域から正確な産地・産状は不明であるが，ジュラ紀アンモナイト化石が知られていた（Mizutani, 1964）．このように1970年代初頭には，美濃帯“古生界”の年代論に関して，いくつもの問題点が指摘された．これらの問題が解決されるまでは，あと約10年近くを要した．

1972年，大阪市立大学市川研究室にSEM（JEOL SEM S-1）が導入され，一段と放散虫化石の研究が進んだ．なかでも犬山地域のマンガンノジュールや層状チャート層からの放散虫化石は，いくつかの分類群についてSEMによる入念な形態的検討がなされ，新種記載された（Yao, 1972, 1979, 1982; Ichikawa and Yao, 1976）．ここで新種記載された内のいくつかの種は，*Unuma echinatus*や*Striatojaponocapsa plicarum*のように，化石群集の代表種や化石帯の指標種となった．また，SEMによって殻組織の特徴が解析され（Ichikawa and Yao, 1973），放散虫化石に特化したSEM使用法が解説された（八尾，1975）．

2. 2. 3　葛生地域での研究

筆者は，1970年3月に発足したコノドント団体研究グループに加わり，足尾山地葛生（くずう）地域の足尾帯“ペルム系”の野外調査に参加した．そこで採集された珪質岩・泥質岩はHF法で処理され，得られた残渣中の放散虫化石を検討した．その結果，層状チャート層（見かけ上位）と緑色・赤色頁岩層（見かけ下位）から中生代型放散虫化石を見出し，それぞれActinommid群集とTheoperid群集を識別した（コノドント団体研究グループ，1974）．緑色・赤色頁岩層からの放散虫化石には*Spongosaturnalis*? sp. などのSaturnalinae が含まれることから，ジュラ紀を示す可能性を示唆したが，1970年代初期当時の放散虫年代論としては，「中生代と推定しておくのが妥当であろう」（コノドント団体研究グループ，1974）とせざるを得なかった．しかし，それまでの年代論が，紡錘虫化石及びコノドント化石に基づいていたが，葛生地域の“ペルム系”から中生代型放散虫化石を検出したことによって，チャートと砕屑岩中の放散虫化石が注目されるきっかけとなった．

2. 2. 4　“中・古生界”の年代再検討の開始

1960年代末から1970年代前半にかけて，前述のように紀伊由良地域（秩父南帯），犬山地域（美濃帯），葛生地域（足尾帯）の“古生代”泥質岩類から中生代型放散虫化石の産出が明らかになった．これらの放散虫化石群には，年代論的に明言できなかったにしてもジュラ紀型の放散虫化石が含まれる．一方，美濃帯や足尾帯の“古生代”チャートからは，三畳紀コノドント化石が産出することも明らかになった．紀伊由良地域や葛生地域の“古生界”は，含紡錘虫石灰岩体を伴っている．このことは，“古生界”を構成する各岩相が，岩相毎に堆積年代を異にすることを示している．

筆者は，1970年から大和大峯研究グループの一員として，紀伊半島中央部の秩父帯・四万十帯及び高知県下の秩父南帯・四万十帯北縁部の調査を開始した．1970年代後半からは，“中・古生界”を構成するチャート，砕屑岩類（珪質泥岩，泥岩，砂質岩），珪長質凝灰岩の放散虫年代，及び石灰岩・緑色岩類を含めた各岩相間の地質関係を検討してきた．その初期の成果として，ペルム紀放散虫チャート，三畳紀後期放散虫チャート，含ジュラ紀放散虫泥質岩，含白亜紀放散虫チャート・泥質岩を識別し，一見整合関係に見える地層間に層序的逆転や地層の構造的繰り返しを見出した（八尾，1979; 大和大峯研究グループ，1981）．

放散虫化石による年代検討は，それまで大型化石の産出が少なく，年代未詳層が大半を占める四万十帯においても開始された．中川・中世古（1977）は，徳島県下の四万十帯チャートからジュラ紀後期・白亜紀放散虫化石の産出を予報した．その後，中世古ほか（1979）は，紀伊半島・四国の四万十帯において，数百地点からの岩石試料をHF処理し，ジュラ紀末から白亜紀後期までの6つの放散虫化石群集を識別した．放散虫年代論は，おもにヨーロッパや北米の白亜系から報告された資料や1968年から始まった深海掘削計画（DSDP）の成果（*Initial Reports of*

the Deep Sea Drilling Project）などとの比較に基づいている．

以上のように，1970年代後半に入って丹波－美濃－足尾帯・秩父帯・四万十帯において，幾人もの研究者によって“中・古生界”の放散虫化石による年代検討が本格的に始まった．そこから得られたデータに基づいて，次項で記すように放散虫生層序が設定されるようになり，化石帯の年代対比が行われ，結果として日本列島の“中・古生界”の実態解明へと急速に繋がっていった．

2. 3　1979年–1988年

1979年–1988年は，日本の中・古生代放散虫化石の研究が最も精力的に行われた時期であり，その結果，日本列島に“放散虫革命”が起った時期でもある．この時期の研究の実状として，生層序学的研究が進み，主として放散虫化石群集による化石帯の設定がなされ，化石帯の年代層序学的対比の大綱が出来上がった．これと同時進行で“中・古生界”の年代検討が行われ，“中・古生界”の多くが堆積岩コンプレックスであるという実態が，急速に明らかになった．堆積岩コンプレックスの形成機構・形成過程は，プレート造構論的に説明された．

2. 3. 1　中・古生代放散虫研究の急速な展開

1970年代末以降，日本の中・古生代放散虫化石の研究及びそれを用いた“中・古生界”の検討が，急速に展開した．この様子は，日本の放散虫研究文献数の急激な増加として見て取れる（八尾ほか，2001b）．ちなみに八尾ほか（2001b）によれば，1977年から1982年の中・古生代放散虫関連の文献数は，1977年：1編，1978年：0編，1979年：12編，1980年：19編，1981年：26編，1982年：85編である．本小論では，中・古生代放散虫に関連した学会講演数の変化を以下に示す．対象としたのは1977年から1982年の日本地質学会学術大会講演要旨集と日本地質学会関西支部報（支部総会・例会講演の要旨を掲載）であり，「古生代放散虫化石」ないし「中生代放散虫化石」を記述した講演要旨が何編あるかをカウントした．日本地質学会学術大会講演要旨集でのカウント結果は，1977年：0編，1978年：2編，1979年：9編，1980年：10編，1981年：26編，1982年：39編である．日本地質学会関西支部報でのカウント結果は，Nos.79-81（1977）：0編，Nos.82-84（1978）：0編，No.85（1979）：2編，Nos.86-87（1980）：9編，Nos.88-90（1981）：9編，Nos.91-92（1982）：7編である．日本地質学会学術大会及び日本地質学会関西支部総会・例会においても，1979年以降，中・古生代放散虫に関連する発表件数が急増していることは確かである．

中・古生代放散虫研究の急速な増加に関して，その研究分野を「第1回放散虫研究集会論文集」（中世古編，1982）に収録された中・古生代放散虫関連の29論文で検討した．結果は，放散虫化石の産出・年代：12編，生層序：11編，化石群集：2編，古生物地理：1編，形態：1編，分類：1編，系統・進化：1編である．このことから分かるように，急速に展開した主な研究分野は，放散虫生層序学と年代論であった．この研究動向の背景には，日本の“中・古生界”の実態解明という要請があったからであり，中・古生代放散虫研究がその要請に答え得る態勢を持っていたといえる．

2. 3. 2　放散虫生層序学的研究の開始

大阪市立大学市川研究室には，1970年代後半から1987年にかけて，放散虫化石・コノドント化石を扱う多数の大学院生が在籍した．松田哲夫・栗本史雄・磯崎行雄・中谷登代治・松岡　篤・石賀裕明・大塚　勉・Caridroit, M.・堀　利栄・中江　訓氏らである．筆者は，1979年から松田哲夫・磯崎行雄両氏と共に，美濃帯犬山地域の鵜沼においてコノドント化石・放散虫化石による生層序学的検討を開始した．その検討結果をYao *et al.*（1980）に基づいて，以下に記述する．

木曽川右岸に露出する層状チャート層の連続層序断面（層厚約120 m）から岩石試料（39個）を採集し，HF法で処理し，残渣中のコノドント化石と放散虫化石を手分けして同定した．その結果，層序断面の最下部（0 m層準）から104 m層準まで，三畳紀中期–後期を示すコノドント化石が順次産出し，その産出順序はヨーロッパ・北米における産出順序と調和的であった．コノドント化石産出層から2つ，それより上位から1つの放散虫化石群集を識別した．前2者は三畳紀中期–後期，後者はジュラ紀初期の放散虫化石群集であり，層序断面の104 m 層準付近に三畳系／ジュラ系境界が存在する．さらに，木曽川河岸の*Unuma echinatus*で代表される放散虫化石群を産する泥質岩層はジュラ系中部，その層序的上位の砂質岩層はジュラ系上部と推定した．以上の三畳系中部–ジュラ系上部は，地層面にほぼ平行な断層（スラスト）によって繰り返し重なるという実態を明らかにした．

Yao（1982）は，上記の連続層序断面から産出する放散虫化石をより詳細に検討して，1新属3新種を含む46種を識別し，4つの放散虫化石群集（*Triassocampe deweveri*群集，*Triassocampe nova*群集，*Canoptum triassicum*群集，*Parahsuum simplum*群集）を識別した．前3者が三畳紀中期–後期，後者がジュラ紀初期の放散虫化石群集である．これまで三畳系中–上部チャート層の年代論には，共産するコノドント化石が必須であったが，コノドント化石を共産しないチャートにおいて，放散虫化石のみで年代論が行える可能性が見えてきた．

筆者は，上記の検討に引き続いて松岡　篤・中谷登代治氏らと共にチャート層とその上位の砕屑岩層における放散虫生層序の検討を行った．その結果を八尾ほか（1982）に基づいて以下に略記する．検討地域は，美濃帯の犬山地域，秩父南帯の紀伊由良地域・佐川地域・

黒瀬川地域である．その結果，三畳紀中期からジュラ紀初期の4群集（前記）に加えて，ジュラ紀前期中頃の“*Parahsuum* sp. D”群集，ジュラ紀中期の*Hsuum* sp. B群集，*Unuma echinatus*群集, *Lithocampe*(?) *nudata*群集，ジュラ紀後期の*Gongylothorax sakawaensis – Stichocapsa* sp. C群集，“*Tricolocapsa* sp. O”群集，*Dictyomitra* sp. A – *Dictyomitra* sp. B 群集を識別した．ジュラ紀中期－後期のいくつかの放散虫化石群集の年代論は，1970年代及び1980年代初頭にヨーロッパや北米のジュラ系中部統–上部統から報告された資料に基づいている．

以上のように，1980年代の早い段階で三畳系–ジュラ系から11の放散虫化石群集が識別された．時を同じくして，岸田・菅野（1982）は，四国・九州の秩父帯チャート層・砕屑岩層を放散虫生層序学的に検討して，三畳系中部–ジュラ系に10帯の放散虫化石帯を設定した．また，西園ほか（1982）は，九州球磨川流域の秩父南帯において，ペルム系–白亜系から16の放散虫化石群集を識別した．Ishiga *et al.*（1982）は，丹波帯の石炭系上部–ペルム系チャート層に9帯の放散虫化石群集帯を設定した．なお，上記で引用した1982年の論文は，全て「第1回放散虫研究集会論文集」（中世古編，1982）に収録されたものである．

1980年代前半までの化石帯は，主に特徴種の組み合わせによる群集帯（assemblage zone）として設定されてきたが，Matsuoka and Yao（1986）は，生層準（biohorizon: 種の出現・消滅層準）で規定された間隔帯（interval zone）としてジュラ系に8帯の放散虫化石帯を設定した．その後，日本の中・古生界の放散虫生層序学的研究は，着実に進んだ．八尾（2004）は，それまでの日本の顕生累界放散虫生層序に関する研究成果を通覧し，放散虫化石帯としてシルル系に9帯，デボン系に8帯，石炭系に13帯，ペルム系に12帯，三畳系に18帯，ジュラ系に12帯，白亜系に16帯を示した．

2. 3. 3　“中・古生界”の実態解明への適用

1970年代から中・古生代放散虫化石が中・古生界の年代決定に有効であることが判明したため，非石灰岩相“古生界”や“年代未詳中生界”の年代検討に放散虫化石が用いられるようになった．その結果，1980年代前半には，丹波–美濃–足尾帯・秩父帯・北部北上帯の非石灰岩相“古生界”の多くは，三畳系–ジュラ系下部チャート層とジュラ系砕屑岩層からなることが明らかになった．これら中生界と古生代石灰岩・緑色岩体は，異なる堆積場で形成された地質体であり，全体として堆積岩コンプレックスをなすことが判明した．同様に，四万十帯北半も白亜紀堆積岩コンプレックスで構成されることが分かった．

堆積岩コンプレックスは，層序的・構造的特徴に基づいてメランジュとチャート・砕屑岩シークエンスに区分される．メランジュは細粒の基質と様々なサイズのブロックからなり，基質とブロックの堆積年代の相違は，放散虫化石などによって確かめられる．メランジュの大半は，海洋プレートが海溝域で沈み込む際に，堆積的ないし構造的に形成されたと解釈される．チャート・砕屑岩シークエンスは下部がチャート層，上部が砕屑岩層で構成される一連整合の地層であり，上方粗粒化を示す．その層序学的連続性は放散虫生層序によって確かめられる．このシークエンスの岩相変化は，遠洋域深海底から海溝域までの堆積環境の遷移を示すものと解釈される．

チャート・砕屑岩シークエンスは，地層面に平行な断層（スラスト）によって繰り返し重なった構造（スラストパイル構造）を呈することがある．堆積岩コンプレックスは，それを構成する岩相の組み合わせと形成年代の相違に基づいてユニット区分される．各ユニットはスラストで境され，構造的上位から下位のユニットに向かって形成年代が若くなるという極性を示す．

以上のように放散虫化石の研究によって明らかにされた“中・古生界”の実態から，地層の堆積場・コンプレックスの形成機構・形成過程に関して，プレート造構論的に説明されるようになった．筆者は，1967年以来研究を続けてきた紀伊由良地域の秩父南帯・四万十帯北縁部の“中・古生界”について，放散虫年代論と構造層序学的視点から地質構造発達史を論じ，それを学位論文としてまとめ，公表した（Yao，1984）．

2. 4　1989年以降

1980年代での生層序学的研究が一段落した段階で，筆者は1989年以降，中・古生代放散虫化石の群集解析を開始した．化石群集を解析する目的は，多様な種で構成される化石群集の実態や，産出層準間の化石群集の相違（経時変化）などを明らかにし，変化の要因を考察することである．最終的には，当時の古環境ひいては地球環境変動の復元にアプローチできるのではないかと考えられる．以下に筆者らが行った化石群集解析の例を示す．

2. 4. 1　ジュラ紀前期—中期の放散虫化石群集の解析

八尾・松岡（1981）は，美濃帯犬山地域の鵜沼セクションから産する放散虫化石群集（*Unuma echinatus*群集：以降，*Ue*群集と略記）に150種以上が含まれることを指摘した．筆者は，1989年以降，犬山地域の鵜沼セクション(層厚約30 mの珪質泥岩層，年代：ジュラ紀中期のバッジョシアン期)のIN-10，IN-7，IN-3，IN-1層準（下位から上位へ：各位置はYao，1972のText-fig.1-cを参照）のマンガンノジュール，及び，美濃帯のより古い年代のマンガンノジュール（ジュラ紀中期のアーレニアン期のMKM(GH)-1とHK-140，及びジュラ紀前期のトアルシアン期のNJ-12: 各位置は八尾，1997の第1図を参照）の放散虫化石群集を解析した．検討手法として，マンガンノジュールの酸処理後の残渣から化石個体をピックアップし，SEM

で観察・同定した．化石群集の解析項目は，構成種数，Spumellaria種数/Nassellaria種数比（S/N比），層準間の種構成の類似度，層準間の出現種数と絶滅種数などである．

八尾（1989）はIN-7層準の*Ue*群集の構成種数を二百数十種以上としたが，その後の検討で種数は増加した．八尾（1991a）は，5層準（NJ-12，HK-140，GH-1，IN-7，IN-1）間の種構成の類似度を算出して，その数値と層準間の年代幅とがほぼ調和的なことを示した．八尾（1991b）は，上記5層準を通しての種産出状況を検討し，3 ～ 5層準にわたって産出する長期間種（生存期間：千数百万年）と1層準にのみ産出する短期間種（生存期間：数百万年以内）に大別し，短期間種が各群集の24 ～ 32％を占めることを明らかにした．八尾（1997）は，各層準の構成種数を再検討し，NJ-12:206種，HK-140:201種，MKM(GH)-1:282種，IN-7:303種，IN-1:280種，5層準全体で745種を識別し，745種全てをSEM写真で示した．この5層準間（年代幅：トアルシアン期からバッジョシアン期までの約1500万年間）の放散虫群集の変遷は，群集を構成する各種の生存期間の長短と，新種の出現率･既存種の絶滅率によって規制されているとした．

その後，八尾・西原（2004）は，次の検討結果を示した．鵜沼セクションの4層準（IN-10, IN-7, IN-3, IN-1）の構成種数はそれぞれ300種強であり，S/N比から判断してIN-10からIN-3層準までは定常的に群集変遷した．しかし，IN-3からIN-1層準に向かってSpumellaria種数の減少・Nassellaria種数の増加という下位分類群（亜目以下）で相当な消長があった．八尾ほか（2008）は，上記4層準に最下位層準のIN-16を加えて，鵜沼セクションにおける最終的な検討を次のように行った．各層準における全構成種数，Spumellaria種数，Nassellaria種数と，Pantanellidae・Hagiastridae・Xiphostylidae・Saturnalidaeのそれぞれの種数と種ごとの個体数をカウントし，特定種群の部位のサイズ（*Tripocyclia southforkensis*のスパイン長と殻直径，*Acanthocircus suboblongus*のリング横長と縦長）を計測した．その結果，種数と個体数の変化から当時の古海流（古黒潮と古親潮）の混合程度が推定され，サイズ変化から上位層準にむかって放散虫生息水塊の海水温が低下していったことが想定された．

2. 4. 2　ペルム紀後期－三畳紀中期の放散虫化石群集の解析

筆者は，大学院研究生の桑原希世子氏と共同でペルム紀後期から三畳紀中期にかけての放散虫化石群集の変遷を検討した．検討セクションは，美濃帯の郡上八幡セクション（ペルム系上部）と犬山地域の6セクション（三畳系下部–中部）である．検討方法として，HF処理後の残渣をスライドグラスに封入し，光学顕微鏡下で種の同定を行い，構成種数をカウントした．その結果，八尾・桑原（1997）によれば，ペルム紀後期を通じて群集の多様性が高く，種数の大きな変化はみられないが，三畳紀前期の前期–中期では多様性は大きく減少し，三畳紀前期の後期には急速に多様性が回復した．ただし，ペルム紀と三畳紀の放散虫化石群集の間にはほとんど共通種が見られず，P/T境界を介して放散虫群集は急激に変換したといえる．

桑原・八尾（2001）は，ペルム系上部に特化して放散虫化石群集の多様性を検討した．検討対象は郡上八幡セクションの5層準であり，HF処理後の残渣から放散虫個体をピックアップし，SEMで撮影して種区分を行った．その結果，5層準を通して化石群集は70 ～ 100種で構成され，多様性の比較的高い状態を維持していたが，最上位層準で出現種数の減少，絶滅種数の増加が認められ，ペルム紀後期末に放散虫類の生息環境が急速に悪化した可能性が考えられる．以上のペルム紀後期－三畳紀中期の放散虫化石群集の解析を行う途上で，群集変遷様式を検証するためのモデル化の手法を提示した（桑原・八尾. 2004）．提示した「定常的群集変遷モデル」を用いて，実際のデータに基づくペルム紀後期とジュラ紀中期の群集変遷を検証すると，モデルと調和的な結果を得た．

3．中・古生代放散虫研究の進展の背景

3. 1　放散虫化石の特性

中・古生代放散虫化石の研究が急速に進展した背景には，放散虫が持つ生物学的な特性や，放散虫殻が地層中に残される環境，地層中での残存状況などが重要な要素として存在している．

3. 1. 1　種類の多様性と変異性

放散虫は，海洋性プランクトンの単細胞原生生物である．その多くは珪質の殻をもち，Polycystina亜門に分類され，カンブリア紀から現世まで存続している．Polycystina亜門には，Albaillellaria, Spumellaria, Nassellariaなどの目が含まれ，殻の長径は数十～数百μmで，球形・回転楕円形・円盤形・釣鐘形・紡錘形・円錐形など様々な形をしている．それ故，種区分において，Polycystinaに約15,000種という多様な種が知られている．犬山地域のマンガンノジュール（ジュラ紀中期のバッジョシアン期）から産する*Ue*群集は，日本における最も多様な例（511種：八尾ほか，2008）の一つである．一般的な層状チャートや珪質泥岩の1試料においても，放散虫化石は少なくとも数十種以上が識別される．

放散虫化石の特性として，種の多様性だけでなく，種構成の経時的変化が顕著である．最も大きな変化は，八尾・桑原（1997）で示したように，P/T境界から三畳紀前期の前期を介してペルム紀群集と三畳紀前期の後期群集とは総入れ替えに近い変化を起こしている．また，八尾（1997）で示したように，トアルシアン期からバッジョシ

アン期までの約1500万年間における各層準の種構成において，短期間種（生存期間数百万年以内）が各層準の約3割を占め，経時的に種構成が変化した．このことは，示準化石と成りうる放散虫化石が，どの層準においても多数存在することを示している．

3. 1. 2　殻の組成と堆積環境

現生の放散虫（Polycystina）の殻は，オパール（非晶質シリカ）で構成されるが，続成過程でオパールCTを経て石英に転移する．中・古生界中に含まれる放散虫殻は，炭酸塩や硫化鉄で置換されている場合を除いて，全て石英で構成される．殻を構成する石英の粒径が，細粒であればあるほど殻形態は良く保存されているが，変成・変質作用をうけた場合，殻の石英粒径は大きくなり，殻形態の保存は悪くなる．

珪質殻は化学的に比較的安定であり，地層中に化石として保存されやすい．遠洋性深海底堆積物と考えられる層状チャート層やそれに重なる珪質泥岩層から放散虫化石が多産する理由は，当時の海洋水塊中に多数の放散虫が生息し，その遺骸が炭酸塩補償深度（CCD）での溶解作用を受けず，海洋底では珪質の放散虫殻のみが残り，他の粒子がほとんど供給されないためである．

3. 1. 3　層序学的産状

放散虫化石は，古生代以降の大洋底深海堆積物をはじめとして，さまざまな環境の海底に堆積した珪質岩・泥質岩・炭酸塩岩・凝灰岩中に含まれる．その産状は，層序学的に連続して産出する場合が多い．特に層状チャート層やそれに連続する珪質泥岩層は，堆積速度が遅く，長期間にわたって安定した堆積環境下で形成され，放散虫化石が層序学的に連続して含まれるに至ったと考えられる．

このような放散虫化石の産出の特徴は，前述したように放散虫の生体群集における種の多様性の高さ，個体数の多さ，浅海から深海に至る生息域の広さ，珪質殻の化学的安定性などにその要因がある．このような放散虫化石の特性を活かした古生物学的研究が1960年代末以降に急速に進み，放散虫化石が中・古生界においても示準化石として，また，生層序区分や対比の基準として有効であることが明らかになってきた．また，放散虫化石が古生物地理学的及び古環境学的指標としても有効であることも明らかになりつつある．

3. 2　研究手法の近代化

中・古生代放散虫化石の研究が急速に進展した背景には，含放散虫岩の処理法の新たな開発や工夫（HF法），及び観察や記録のための新しい機器（SEM，コンピュータ）の導入・普及があった．

3. 2. 1　HF法の工夫と普及

筆者が学部生であった1966年当時，中・古生代放散虫化石は，生層序学的に“役立たずの化石”という認識が一般的であった．その原因は，放散虫化石の多くがチャートや珪質泥岩といった硬質の岩石に含まれ，個体分離・摘出が容易でなく，もっぱら岩石薄片を光学顕微鏡下で観察していたため，放散虫化石の有用な形態的特徴が見出せていなかったからである．1960年代までは珪質岩から放散虫化石を個体分離・摘出する方法は開発されていなかった．筆者は，混酸・アルカリ液処理によって，珪質泥岩から放散虫化石を摘出した（八尾・市川，1969）が，この処理法は，チャートには不適合であった．

1960年代後半に，日本ではコノドント化石が注目されだし，“古生界”の研究に有用と考えられた．そのため，チャート中のコノドント化石を研究するためにフッ化水素酸（フッ酸：HF）法が用いられ始めた（林，1969）．コノドント団体研究グループは，1970年からチャートのHF処理を開始し，残渣中の副産物としての放散虫化石に注目した．また，泥質岩（泥岩・頁岩）をHF処理し，放散虫化石を個体分離した．以降，様々な研究者･グループが，フッ化水素酸の濃度や処理時間等の工夫を行い，HF法は様々な地質年代の様々な岩石種に適用され，広範に普及していった．

3. 2. 2　SEMの普及

放散虫化石は様々な形態の立体的な殻を持ち，放射棘や複雑な立体構造の骨針を持つものもある．そのため，岩石薄片法による殻断面の観察では，殻全体，殻表面の形態，骨格構造などの特徴をつかみづらい．放散虫殻の形態的特徴を明らかにするためには，光学顕微鏡と比較して，より解像度がよく，低倍率から高倍率まで連続的に観察でき，焦点深度が深いという特性をもつSEMが有用となる．

1972年に大阪市立大学市川研究室に導入されたSEM S-1は，日本電子株式会社が手近な試料を手軽に観察できるように開発した初期の小型走査型電子顕微鏡であり，価格は200 〜 300万円であった．放散虫化石研究におけるSEMの使用は，1970年代以降，急速に普及し，1980年代では一般化した．

3. 2. 3　コンピュータの普及

放散虫生層序学的研究や放散虫化石の群集解析が進むにつれ，扱うデータ量は膨大になっていった．これらデータを記録し，まとめ，解析するツールとしてコンピュータが必須となった．なかでも手元において即利用できるパーソナルコンピュータ（PC）は，1980年代に普及しだし，1990年代に急速に広まった．また，放散虫文献データベースの構築及びインターネットを通しての公表には，大学の大型コンピュータが用いられ，大量の文献情報の

検索に供されるようになった.

3. 3　研究体制の組織化

放散虫化石の研究において，各研究者による個別の研究が最も基本になることは確かであるが，その研究をより大きな課題の中に位置づけて，研究者間で情報交換が密に行える場を組織することも重要である．中・古生代放散虫の研究に重要な役割を果たした組織化を以下に取りあげる.

3. 3. 1　科学研究費補助金総合研究(A)

放散虫研究の高まりと時を同じくして，以下の4つの科学研究費補助金総合研究(A)が継続的に組織された.「本邦中・古生界の放散虫生層序に関する総合研究」(代表者：名古屋大学　水谷伸治郎，1982–1983),「西南日本の中生代含放散虫地帯の形成過程」(代表者：大阪市立大学　市川浩一郎，1984–1985),「放散虫生層序の国際対比」(代表者：名古屋大学　水谷伸治郎，1989–1990),「放散虫による顕生代海域環境の地史的変動の研究」(代表者：大阪市立大学　八尾　昭，1992–1994)である．上記の総合研究のタイトルは，その当時の放散虫研究の主要課題がどこにあったかをよく反影している.

以上の総合研究(A)は，研究代表者と二十数名の研究分担者で組織された．研究分担者は，日本全国の大学で放散虫及び関連の研究を行っている主だった研究者から選ばれた．実施期間が2年ないし3年で，掲げた研究課題や関連課題に関してそれぞれ研究を進めた．その間，互いに情報交換を密に行い，最終年度には研究集会を持つなどして研究成果がまとめられた．総合研究(A)は，個人研究の枠を超えて広く情報交換する場を提供し，広く利用が望める放散虫文献データベースの構築を課題に含めるなど，放散虫研究の進展に大きく貢献した.

3. 3. 2　国際協力研究事業

国際連合教育科学文化機関(UNESCO)と国際地質学連合(IUGS)の国際協力研究事業として，国際地質対比計画(International Geological Correlation Programme: IGCP)がある．そのProject No.115 (IGCP115: “Siliceous Deposits in the Pacific Region”)の第2回国際研究集会が，1981年8月21–27日に日本で開催された．その際，犬山地域の中生界が野外巡検の対象となり，多くの外国人研究者に木曽川河岸の三畳系—ジュラ系層状チャート層・砕屑岩層が紹介された(Mizutani *et al.*, 1981).

1985年から1990年にかけて，Project No.224 (IGCP224)が，市川浩一郎先生をリーダーとして組織された．IGCP224の課題は，“Pre-Jurassic Geologic Evolution of Eastern Continental Margin of Asia”であり，この課題のもとに13ヶ国の研究者が参加した．毎年，アジアの要地の持ち回りでシンポジウムが開催された．日本国内では，1970年代末からの中・古生界における放散虫生層序学的研究，古地磁気測定，変成岩の同位体年代測定などの急速な進展に基づいて，各地体(テレーン)の見直しが行われた．その成果をまとめて“Pre-Cretaceous Terranes of Japan”(Ichikawa *et al.* eds., 1990)が出版された．この冊子は、日本列島の基盤を構成する先白亜紀地質体を，新しい視点で地体区分した最初の成果である.

3. 3. 3　国際共同研究

筆者は，中国の北京大学及び中国地質科学院との共同研究を1991年から2007年まで，17年間にわたって実施した．共同研究のきっかけは，北京大学のAn Taixiang教授が1982年に大阪市立大学を訪れた際，コノドント化石と放散虫化石を含めた共同研究実施の可能性を話し合ったことにある．1986年に国際学術研究「内モンゴル・吉林地帯のペルム–トリアス紀変動の地質学的研究」(代表：石井健一，期間：1986–1989)の研究分担者として北京を訪れた際，An教授から北京大学地質学系で集中講義「放散虫古生物学」を行うよう依頼を受けた．1987年に集中講義を実施すると同時に，南中国の中・古生界を予察的に調査した．その後，科学研究費補助金国際学術研究「揚子地塊における古生代後期–中生代初期の環境変遷と古生代型生物群の大量絶滅過程」(代表 八尾　昭)が採択され，1991年度に現地調査を実施した．これが共同研究の始まりであり，それ以降，毎年，国際学術研究の研究課題にそって南中国における共同研究を実施してきた．共同研究への参加者は，日本側が八尾のほか2 〜 3名，中国側がAn 教授のほか2 〜 3名とYao Jianxin (中国地質科学院)である．現地での野外地質調査には中国各省地質鉱産局の研究者が研究協力者として加わった．1999年に，共同研究の成果の一部をまとめて論文集(Yao *et al.* eds., 1999)を出版した．また，2000年までの共同研究の概要は，八尾ほか(2001a)にまとめた．2001年以降の南中国における現地調査は，年2回(3月と11–12月)実施し，3月は中国地質科学院，11–12月は北京大学がおもなカウンターパートであった.

松岡編(2001)は，中・古生代放散虫関連の国際共同研究として，上記の八尾ほか(2001a)以外に，相田吉昭ほかによるニュージーランドの中・古生界，指田勝男によるタイ・インドネシアの中・古生界，松岡　篤によるフィリピンのジュラ紀付加体及びチベットのジュラ系–白亜系，角和善隆・夏　文臣による南中国のデボン系–三畳系，久田健一郎ほかによる韓国の白亜系(礫中の放散虫化石)，小嶋　智ほかによるロシア沿海州の中・古生界を収録している．これら以外にも，筆者と韓国慶北大学Chang Ki-Hong教授との共同研究(Chang *et al.*, 1990)や水谷伸治郎先生と中国科学院南京地質古生物研究所Yang Qunとの共同研究など，多数の国際共同研究が実施された.

国際共同研究において，日本で急速に進展した中・

古生代放散虫研究，及び中・古生界研究を基礎にして，海外においても精力的な調査・研究が実施され，学術的に重要な成果を挙げてきた．また，共同研究を通して，若手研究者の育成や研究手法の普及という面においても，重要な役割を果たしてきた．

3. 4　情報交換の組織化と国際化

放散虫研究において，実際の野外調査や室内研究を伴う総合研究(A)や海外共同研究は重要であるが，より広範に研究成果や研究手法について情報交換する場も必要である．そのような情報交換の場として日本国内で組織された「放散虫研究集会」と，より広範な国際研究集会の組織やそれへの参加状況を以下に記す．

3. 4. 1　放散虫研究集会

1970年代末から1980年代初頭の放散虫研究への熱い思いと高揚感みなぎる中で，中世古幸次郎先生が中心となって「第1回放散虫研究集会」（1981年10月14–15日，大阪）が開催された．研究集会には，120名もの参加があった．この研究集会のまとめの冊子として「第1回放散虫研究集会論文集」（中世古編，1982）が出版され，その中には中・古生代放散虫関連の29編の論文が収録されている．その後，放散虫研究集会は，第2回：1985年6月15–16日大阪市立大学（市川浩一郎），第3回：1990年9月30日–10月1日 宇都宮大学（酒井豊三郎・相田吉昭），第4回：1992年1月29日大阪市立大学（八尾　昭），第5回:1996年1月26–28日大阪市立大学（八尾　昭），第6回:1997年6月13–15日新潟大学（松岡　篤），第7回：2000年6月3–4日 兵庫県立人と自然の博物館（竹村厚司・古谷裕），第8回：2003年6月7–8日 筑波大学（指田勝男），第9回：2006年2月28日–3月3日 東北大学（鈴木紀毅），第10回：2009年3月20–21日 山口大学（鎌田祥仁），第11回：2011年10月29–30日 愛媛大学（堀　利栄），第12回：2014年11月29–30日 福島県立博物館(竹谷陽二郎)，第13回：2017年3月2–5日 山形大学（本山　功）というように，ほぼコンスタントに開催されてきた．なお，上記開催場所に付記されたカッコ内の人名は主催者名である．放散虫研究集会では，若手研究者を中心に多くの研究発表がなされ，研究集会後に発行される「放散虫研究集会論文集」に出来る限り多くの論文原稿を投稿するよう促してきた．また，第3回以降，放散虫研究集会の開催時期を，InterRad（後記）の開催時期の前に設定するなど，国際研究集会との連携を考慮しながら実施されてきた．これら一連の活動は，日本の放散虫研究のポテンシャル維持に役立ってきたといえる．

3. 4. 2　国際研究集会

日本の放散虫研究の情報交換が，1980年以降，国際的になっていった経緯を知るために，InterRadやその他の国際研究集会（万国地質学会議IGCなど）とどのように関わって来たかを振り返りたい．InterRad（The International Association of Radiolarists）は，放散虫関連の国際学術組織である．InterRadは，ヨーロッパを中心にEuroRadとしてスタートした．第1回EuroRad研究集会が，1978年4月18–21日にフランス北部のリールで開かれた．第2回研究集会は，1980年7月28日–8月1日にスイス西部のバーゼルで開かれた．参加者は，欧米5カ国の8名と日本からの3名（中世古幸次郎，西村明子，八尾　昭）であり，少人数での中身の濃い研究集会となった．時をほぼ同じくして，1980年7月7–17日にフランスのパリで第26回IGCが開かれ，放散虫関連のシンポジウムで筆者らも発表を行った．第3回EuroRad研究集会は，1982年7月19–24日にノルウェー西岸のベルゲンで開かれ，参加者16名のうち日本人は4名であった．1983年4月15–16日に米国テキサスのダラスでAAPG/SEPMを機に「放散虫ワークショップ」が開かれ，約100名の参加者のうち日本人は若手5名であった．第4回EuroRad研究集会は，1984年10月10–19日にロシア（当時ソ連）のレニングラードで開かれ，参加者44名（ソ連31名）のうち日本からは2名であった．1987年にEuroRadの名称がInterRadに変更された．第5回InterRad研究集会は，1988年7月21–24日にドイツのマールブルグで開かれ，参加者79名のうち日本からは6名であった．この集会のビジネスミーティングにおいて，ヨーロッパ側から次々回の第7回を日本で開くよう要請があった．その理由は，第2回以降，日本から複数名が参加し，名称がInterRadへ変更されたこともあって，一度，ヨーロッパ以外で開催してはどうかというものである．第6回研究集会は，1991年9月30日–10月5日にイタリアのフィレンツェで開かれ，参加者72名のうち日本からは10名であった．この集会のビジネスミーティングにおいて第7回研究集会を日本で開催することが正式に決定された．1992年8月24日–9月3日に，第29回IGCが京都で開かれ，その中で放散虫関連のシンポジウム“Radiolarian events”が組まれた．

以上のように，1980年から1990年代初めまで，放散虫関連の国際研究集会には，日本から常に複数名の参加があった．参加者からは研究集会の様子がフィードバックされた．日本において，1980年代に放散虫研究に携わる人数が急増し，しかも若手が多いという状況下で，InterRad研究集会を日本で開催しようという機運が高まった．InterRad Ⅶを日本で開催するにあたって，日本国内では1989年から「InterRad準備委員会」が組織され，研究集会の規模・開催時期・開催場所・費用の見積などに関する検討が始まった．1991年に日本開催が正式決定され，「InterRad Ⅶ組織委員会」が組織された．

InterRad Ⅶ OSAKAは，1994年10月20–24日に関西地区大学セミナーハウス（神戸市）において開催され，96名（海外18ヶ国44名，日本52名）の参加のもと，108編の

論文が発表された．参加者規模は，それまでのInterRad研究集会の中で最大となり，大盛会となった．この研究集会の野外巡検として3コースが組まれたが，そのうちの2コースは，「丹波帯の古生界上部の層状チャート層」と「美濃帯の三畳系–ジュラ系の含放散虫層」であり，1980年代に放散虫生層序が明らかにされた代表的なセクションが海外の研究者に紹介された．

InterRadは，国際研究集会を開催するだけでなく，古生代・中生代・新生代のワーキンググループを組織しており，研究者はいずれかに加わって情報交換を行っている．1989年にスイスのBaumgartnerが中心になって“InterRad Jurassic-Cretaceous Working Group”を結成し，日本から紀藤典夫と松岡　篤が加わった．このワーキンググループは，精力的にテチス域のジュラ系中部―白亜系下部放散虫カタログの作成，生層序・年代の検討を行い，それをまとめて1172ページにも及ぶ大著（Baumgartner *et al.* eds.，1995）を出版した．放散虫カタログには，日本から新種記載された多くの種が含まれており，年代論的にも多く利用されている．

1997年のInterRad Ⅷ（フランス）以降の研究集会にも，日本から多数の参加者があり，InterRadの中で日本は一大勢力となっている．この流れを受けて，再び日本でInterRad XV in Niigata 2017が2017年10月22–27日に開催された．

4．おわりに

筆者は，2008年3月末に大阪市立大学大学院を定年（63才）で退職して以来，自宅に生物顕微鏡を設置して中・古生代放散虫化石の検鏡を中心とした研究を続けてきた．現在，退職して10年が経過したが，その間，出来る限り放散虫化石研究の動向に注意を払ってきた．本小論は，「20世紀後半における日本の中・古生代放散虫研究の進展」を筆者の研究を軸にレビューしたものであり，21世紀に入ってからどのような進展があったかについては，少し間を置いて冷静にレビューする必要がある．しかしながら，2017年10月22–27日に日本で開催されたInterRad XV in Niigata 2017に参加して感じた最新の動向を若干取りあげたい．なお，InterRad XV in Niigata 2017がどのような国際研究集会であったかについての概要は，中川ほか（2018）で報告されている．また，InterRad XVのProgram & Abstractsは，InterRadのNewsletter（The International Association of Radiolarists，2017）として発行されている．

InterRad XV in Niigata 2017は，日本で初めて開催されたInterRad Ⅶ OSAKA（1994）と比較すると，シンポジウムの内容が実に多様であり，24セッションが組まれた．そのうち中・古生代放散虫研究の成果が発表されたのは，18セッションに及んでいる．以前，研究の中心であった放散虫生層序は当然にして，それを前提とした次のステップの研究（放散虫化石を用いての地質系統境界，古海洋，古生物地理，テクトニクス，個体発生，進化などの研究）が進んでいることが実感された．また，筆者は本文で“20世紀後半における研究手法の近代化”に言及したが，最近，それを凌駕する更なる近代化が進んでいることも知らされた．さらに，若手研究者が堂々と研究発表を行い，いきいきとコミニュケーションをとっている様を見て，実にたのもしく感じられた．今後も放散虫研究が更に進み，様々な分野で大きく貢献することを強く願う次第である．

謝辞：この小論を書くきっかけをくださった本山　功氏を初めとする2016年度微古生物学リファレンスセンター研究集会・第13回放散虫研究集会合同山形大会関係者及び水谷伸治郎先生に，まずお礼を申し上げます．筆者の放散虫研究を初歩からご指導下さった今は亡き市川浩一郎先生（大阪市立大学），中世古幸次郎先生（大阪大学）に深く謝意を表します．また，1970年代後半から1987年まで市川研究室に籍を置いて共に放散虫研究にいそしんだ大学院生各氏（本文に列記）や，1988年以降，筆者の研究室で放散虫研究に携わって成果をあげた大学院生各氏（桑原希世子・山本光一・福富孝義・岡本省吾・柏木健司・石本秀亀・平石美樹子・Yu Jie・舟川　哲・竹村静夫・山田昌史・梅田真樹・Liu Jianbo・谷口雅章・西原ちさと・山中雅之・後藤　隆・松永昌治・角谷直俊・大岡弘一・前川　淳・渡部　聡・藤田麻悠子・奥田　尚・菅森義晃・藤原武史・嶋川未来子・Vaziri.S.H.・都筑　宏），及び卒業研究で放散虫化石に携わった学部学生の皆さんに感謝いたします．さらに，野外調査や室内処理等で苦楽を共にした大和大峯研究グループの各氏や，総合研究及び個別の共同研究でお世話になった大勢の方々にもお礼を申し上げます．最後に，本小論原稿を査読くださった栗本史雄氏及び編集担当者に感謝いたします．

文　献

Baumgartner, P. O., O’ Dogherty, L., Gorican, S., Urquhart, E., Pillevuit, A. and De Wever, P., eds.(1995) Middle Jurassic to Lower Cretaceous Radiolaria of Tethys: Occurrences, Systematics, Biochronology. *Memoires de Geologie (Lausanne),* **23**,1172p.

Chang, K. H., Woo, B. G., Lee, J. H. and Yao, A.(1990) Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, S. Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea,* **26**(5), 471–487.

コノドント団体研究グループ（1974）本邦二畳系と三畳系の境界におけるコノドントについて　―唐沢地域における鍋山層とアド山層の層序とフォーナ―．地球科学，**28**，86–98.

林　信悟（1969）HF法によるコノドントの抽出．化石研究会会誌，**2**，1–9.

Ichikawa, K. (1950) A study on the radiolarian fauna of Mt. Mitake in the southern part of the Kwanto Mountainland, Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II,* **7**, pt.5, 281–315.

Ichikawa, K. and Yao, A.(1973)Scanning electron microscope studies of pores of some cyrtoid radiolarians. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **16**, 125–144.

Ichikawa, K. and Yao, A.(1976)Two new genera of Mesozoic cyrtoid radiolarians from Japan. *In* Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., *Progress in Micropaleontology, Micropaleontology Press*, The American Museum of Natural History, 110–117.

市川浩一郎・石井健一・八尾　昭（1971）和歌山県白崎地方の後期古生代石灰岩体の地質産状．地質学論集, no.6，176.

市川浩一郎・波田重熙・八尾　昭（1985）中・古生界微化石層序と西南日本の中生代造構史の最近の諸問題. 地質学論集，no.25，1–18.

Ichikawa, K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A., eds.（1990）*Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. Publication of IGCP Project No.224 Pre-Jurassic Evolution of Eastern Asia, 413p.

Ishiga, H., Kito, T. and Imoto, N. (1982) Permian radiolarian biostratigraphy. *News of Osaka Micropaleontologists, Spec. Vol*., no.5, 17–26.

石垣　忍・八尾　昭（1982）放散虫革命―放散虫研究者と現場教師の対話―．地学教育と科学運動，no.11, 93–102.

岸田容司郎・菅野耕三（1982）西南日本外帯における三畳紀・ジュラ紀放散虫化石分帯．大阪微化石研究会誌, 特別号，no.5，271–300.

Koike, T., Igo, H., Takizawa, S. and Kinoshita, T. (1971) Contribution to the geological history of the Japanese Islands by the conodont biostratigraphy. Part II. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **77**, 165–168.

桑原希世子・八尾　昭（2001）美濃帯層状チャートにみられるペルム紀新世の放散虫群集の変遷．大阪微化石研究会誌，特別号，no.12，33–49.

桑原希世子・八尾　昭（2004）「定常的群集変遷モデル」を用いた放散虫化石群集の解析．情報地質，**15**, 151–157.

松岡　篤編（2001）パンサラサ―テチスの古海洋学　グローバル・フィールド・サイエンスへの招待．古生物学トピックス，no.2，100p.

Matsuoka, A. and Yao, A.(1986) A newly proposed radiolarian zonation for the Jurassic of Japan. *Marine Micropaleontol*., **11**, 91–105.

Mizutani, S. (1964) Superficial folding of the Palaeozoic system of Central Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ*., **12**, 17–83.

Mizutani, S. and Yao, A.(1991) Radiolarians and terranes. Mesozoic geology of Japan. *Episodes*, **14**, 213–216.

Mizutani, S., Imoto, N., Yao, A., Ichikawa, K., Ishida, K., Nakazawa, K., Otsuka, T., Shimizu, D. and Suyari, K.(1981) Triassic bedded chert and associated rocks in the Inuyama area, Central Japan. *The Second International Conference on Siliceous Deposits in the Pacific Region, IGCP Project 115*, 156–210.

中川衷三・中世古幸次郎（1977）四万十層群の放散虫化石（予報）―四国東部の四万十帯の研究　その2―. 徳島大学芸紀要（自然），**27**，17–25.

中川孝典・冨松由希・伊藤　剛（2018）第15回国際放散虫研究集会 ―InterRad XV in Niigata 2017― 参加報告．日本地質学会News，**21**，9–10.

中世古幸次郎編（1982）第1回放散虫研究集会論文集．大阪微化石研究会誌，特別号，no.5，485p.

中世古幸次郎・西村明子・菅野耕三（1979）四万十帯の放散虫化石の研究（白亜系放散虫を中心にして）．大阪微化石研究会誌，特別号，no.2，1–44.

中世古幸次郎・水谷伸治郎・八尾　昭（1983）放散虫化石と日本列島の中生代．科学，**53**，177–183.

西園幸久・大石　朗・佐藤　徹・村田正文（1982）球磨川中流域における中・古生代放散虫化石群集について．大阪微化石研究会誌，特別号，no.5，311–326.

Takahashi, K. and Yao, A. (1969) Plant microfossils from the Permian sandstone in the southern marginal area of the Tanba belt. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N. S*., no.73, 41–48.

The International Association of Radiolarists (2017) RADIOLARIA. Newsletter of the International Association of Radiolarists, **40**, 1–324.

大和大峯研究グループ（1981）紀伊山地中央部の中・古生界．第35回地団研総会巡検案内書，88p.

八尾　昭（1968）京都府宇治田原町より紡錘虫化石の発見．地質雑，**74**，399–400.

八尾　昭（1970）和歌山県由良地域の地質，とくに由良層について．日本地質学会第77年学術大会　講演要旨，215.

八尾　昭（1971）和歌山県由良地域の秩父累帯，とくに古生代石灰岩体と中生層の関係について．地学関係５学会連合学術大会　講演要旨，487.

Yao, A.（1972）Radiolarian fauna from the Mino belt in the northern part of the Inuyama area, Central Japan. Part I Spongosaturnalids. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **15**, 21–64.

八尾　昭（1975）放散虫と走査型電子顕微鏡．大阪微化

石研究会誌, no.3, 16–19.

Yao, A. (1979) Radiolarian fauna from the Mino belt in the northern part of the Inuyama area, Central Japan. Part II Nassellaria 1. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **22**, 21–72.

八尾　昭(1979) 本州地向斜のトリアス紀・ジュラ紀放散虫化石. 日本地質学会第86年学術大会　講演要旨, 148.

Yao, A.(1982) Middle Triassic to Early Jurassic radiolarians from the Inuyama Area, Central Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **25**, 53–70.

Yao, A.(1984) Subdivision of the Mesozoic complex in Kii-Yura area, Southwest Japan and its bearing on the Mesozoic basin development in the Southern Chichibu Terrane. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **27**, 41–103.

八尾　昭(1989) ジュラ紀中期放散虫化石 (*Unuma echinatus*群集)の群集組成. 日本古生物学会1989年年会　講演予稿集, 74.

八尾　昭(1991a) *Unuma echinatus* 群集(ジュラ紀中世放散虫)の群集組成[その7]. 日本地質学第98年学術大会　講演要旨, 281.

八尾　昭(1991b) *Unuma echinatus* 群集(ジュラ紀中世放散虫)の群集組成[その8]. 日本古生物学会第 140回例会　講演予稿集, 28.

八尾　昭(1997) ジュラ紀古・中世放散虫群集の変遷. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no.10, 155–182.

八尾　昭(2004) 第4章 放散虫生層序. 鎮西清高・植村和彦編, 地球環境と生命史, 古生物の科学5, 朝倉書店, 60–68.

八尾　昭・市川浩一郎(1969) 古期(中・古生代)放散虫化石の研究　—個体分離と表面形態の観察—. 化石研究会会誌, no.2, 15–19.

八尾　昭・桑原希世子(1997) ペルム紀新世から三畳紀古・中世にかけての放散虫群集の変遷. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no.10, 87–96.

八尾　昭・松岡　篤(1981) 美濃帯犬山地域のジュラ紀放散虫 *Unuma echinatus* 群集. 日本地質学会関西支部報, no.90, 5–6.

八尾　昭・水谷伸治郎(1993) 放散虫化石の研究と中・古生界層序の再検討. 日本地質学会編, 日本の地質学100年, 131–137.

八尾　昭・西原ちさと(2004) *Unuma echinatus* 群集(ジュラ紀中世放散虫)の群集組成[その13]. 日本地質学会第111年学術大会　講演要旨, 35.

八尾　昭・市川浩一郎・橋本　正(1971) 岐阜県犬山地方のいわゆるペルム系からの中生代型放散虫化石群. 日本地質学会関西支部報, no.70, 11.

Yao, A., Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1980) Triassic and Jurassic radiolarians from the Inuyama area, Central Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ*., **23**, 135–154.

八尾　昭・松岡　篤・中谷登代治(1982) 西南日本のトリアス紀・ジュラ紀放散虫化石群集. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no.5, 27–43.

Yao, A., Ezaki, Y., Hao, W. C. and Wang, X. P., eds. (1999) *Biotic and Geological Development of the Paleo-Tethys in China*, Peking University Press, 168p.

八尾　昭・江崎洋一・桑原希世子・はお 維城・劉　建波(2001a) 南中国のデボン－三畳系　—P/T 境界での大量絶滅の真相と日本列島の起源を求めて—. 松岡　篤編, パンサラサーテチスの古海洋学　グローバル・フィールド・サイエンスへの招待. 古生物学トピックス, no.2, 45–52.

八尾　昭・水谷伸治郎・桑原希世子(2001b) 日本の放散虫文献データベースからみた放散虫研究の動向. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no.12, 375–382.

八尾　昭・西原ちさと・高田瑠美子・飯田啓紀・井下見苗 (2008): *Unuma echinatus*群集(ジュラ紀中世放散虫)の群集組成[その14]. 日本古生物学会2008年年会, 講演予稿集, 35.

(受 付：2017年9月29日； 受 理：2018年9月18日)

地質調査研究報告, 70 巻, 第 1/2 号 , p. 261–265, 2019

特別寄稿：放散虫化石の研究を始めた頃

水谷伸治郎*

Shinjiro Mizutani (2019) Personal history of my study on radiolarian biostratigraphy. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 261–265.

Abstract: I have started to study the recent radiolarian biostratigraphy, when I have met Prof. E.F.Pessagno of UTD (University of Texas at Dallas), who presented an excellent view of a radiolarian body extracted from a Mesozoic siliceous sedimentary rock, June 4, 1976, at International Meeting of IGCP 115 (Siliceous deposits of the Circum-Pacific region) held at USGS, Menlo Park, California. During my stay in Canada and US, I informed to Prof. Pessgno, where I was, and asked to teach me how to separate the fossils from siliceous rocks, and how to examine them. I moved from Canada, to Harvard and finally to UT at Austin. February 16, 1977, I flied from Austin to Dallas-Fortworth, Prof. Pessagno kindly sent a guide who can understand Japanese in order to bring me from the airport to the campus of his lab. Prof. Pessagno demonstrated how to treat the rock-specimen and to separate the fossils and how to observe under SEM (Scanning Electoron Microscope), and suggested me what kind of literature is good for us to study the radiolarian biostratigraphy.

After my sabbatical leave, I return to Nagoya; fortunately, I have got a budget for the scientific study in the fall of 1978 in order to purchase an inexpensive SEM (JM-T20) in our lab. The first discovery of a Jurassic radiolaria had been made by a student (Sakai, 1979). Thereafter, we have worked for the evidence of wide distribution of Jurassic formations in the Mino area, central Japan. The results have been published as an authorized paper in Proceedings of Japan Academy (Mizutani *et al*., 1981).

This paper, entitled “Personal history on my study of radiolarian biostratigraphy”, as noted above, has outlined the memories of my own study on the radiolarian biostratigraphy particularly in relation to the Pessagno’s school of UTD.

Keywords: microfossil, Radiolaria, scanning electron microscope, Mesozoic, Paleozoic, international correlation

要　旨

国際会議IGCP115（研究課題：“太平洋地域における珪質堆積物”）の会合はカリフォルニアの Menlo Parkに在る米国地質調査所Menlo Park 支所で開かれた．1976年6月4日，参加者の一人，テキサス大学ダラス分校（University of Texas at Dallas: UTD）のPessagno教授は，中生代珪質堆積岩から分離した一匹の放散虫化石の実に見事な写真を，発表し，映写していた．私の放散虫生層序学的研究は，その写真を見た時から始まった．私は，カナダからハーヴァード大学，そして，テキサス大学オースチン校（University of Texas at Austin）へと移動するが，その間に，必ずUTDへ行くから，化石の分離の方法，その調べ方などを教えて欲しい，とPessagno教授に頼んだ．

1977年2月16日，私は，オースチンからダラス空港へ飛んだ．Pessagno教授は，日本語の分かる人を迎えに出してくれた．彼は，空港から，Pessagno教授の研究室がある教育・研究棟へ，私を連れて行ってくれた．そして，Pessagno教授は，岩石試料の扱い方や化石分離の方法，さらに，走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope）を用いた化石個体の観察法などを教えてくれた．

私は，北米の遊学から帰国して，すぐ，名古屋大学で，1978年秋，比較的値段の安いSEM（JSM-T20）を購入するための研究費を獲得するために努力した．最初のジュラ紀放散虫化石は，当時，卒業論文の研究をしていた4年生の学生，酒井正男君によって発見された．彼の研究は，卒論として，名古屋大学理学部図書室に（Sakai, 1979；として）保存されている．その後，美濃地域には，広くジュラ紀層が分布していることが明らかになり，その結果は，日本学士院に報告され，印刷された（Mizutani *et al.*, 1981）．

本報告，すなわち，“放散虫生層序学研究についての個人的回想”は，北米のPseeagno学派に関係をもった私の体験をまとめたものである．

* Corresponding author: S.Mizutani, 2-21, Daiman-cho, Meito-ku, Nagoya City, Aichi, 465-0086, Email: jiro @sd.starcat.ne.jp

1．はじめに

この度，私は，八尾　昭先生と揃って，「ＮＯＭ功労賞」という名誉ある賞をいただいた．2017年3月5日付である．いただいた賞状には，“MIC・NOM in山形”の実行委員長本山　功の名が最後に記されている．副賞として，*Pantanellium* のレプリカが付いている．私は，今回の集会には，出席していなかったので，たまたま共同研究者の永井ひろ美さんが，ガラス瓶に，丁重に，保管されているレプリカを，私の代わりになって，預かって，帰名された．彼女の好意によって，私は，この受賞のことを知った．それを眺め，私は，新種，*Pantanellium foveatum* を，共同研究者の木戸　聡君と記載し，発表した（Mizutani and Kido, 1983）ことがあるので，そのレプリカを見て，それが何であるか，すぐにわかった．それにしても，実によくできていて，それを眺めながら，嬉しさがこみあげてきた．

私は，この機会に，私が，微化石放散虫の研究を始めた頃のことを，思い出し，それを記録しておこうと考え，筆をとることにした．個人的な記録ではあるが，しかし，我が国において，当時，どのような環境や雰囲気にあったかを知るために，参考になる．学問というのは，ある時期に，急激に発展し，その流れが変ることがよくある．そのような変化が，予告もなく，半年か1年のうちに起こる．それには，ある程度の蓄積があり，また，その当時，陰になって研鑽を積んでおられた先人たちの努力も必要であった．幸にして，私は，その頃の記録を，日付単位で残しているので，以下，その記録をみながら，思い出を書くことにする．

2．思い出

名古屋大学を卒業し，大学院に進んだ私は，当然，近くの山岳地帯の地質を選んで，地質学的研究を進めていた．当時，この地域，すなわち，『秩父古生層』と呼ばれていた地域は，主として，石灰岩の中に含まれている化石の研究を中心に行われていた．しかし，私は，実に不可解な印象を持ち続けていた．それは，実体として，そこには，石灰岩よりも，チャートや砂岩・頁岩が量的に多いからであった．何故，石灰岩の研究だけをするのであろうか？私は実際に，野外の調査をしながら，考えた．その結果は，明らかであった．石灰岩には，化石が，しかも，はっきりと肉眼やルーペで分かる化石が含まれているからであった．多くの研究者は，そのような化石を探していたのであった．化石が大切であるならば，化石（まだ，みつからないけれども，実際に見つかるかもしれない化石）のことを考えてもいいと，私は考えるようになった．

私は，すべての採取した岩石を薄片にして，偏光顕微鏡で観察するよう心がけていた．野外で，肉眼で，観察して，さらに，鏡下で調べると，多くの事実が見つかることがしばしばあった．また，それ以外にまだわからないことを示唆する事実が見つかることも少なくなかった．そのなかの新しいことの一つは，小さな過去の生物体であろうと思われた，今でいうところの放散虫であった．

3．経　過

私は，その頃，すでにMizutani（1966）を書いていた．そして，そこに書いたことを話の種にして，国際地質対比計画IGCP115 の会合に出ようと思い，それに出席することを，IGCP 115 の関係者に連絡しておいた．私が，この微化石放散虫の研究を本気になって，真剣に取り組もうとしたのは，この時からであった．

19760604：私は，Pessagno, E. F. Jr. 教授（UTD，Univ. Texas at Dallas）に会った．私は，IGCP 115（siliceous deposits in the circum-Pacific region）の国際集会に出席するために，アメリカの地質調査所（USGS）Menlo Park, Californiaに居た．そして，その会合で，Pessagno教授が，我々の前で，2 m ×1 mもの大きさのデイライト・スクリーン一杯に，走査型電子顕微鏡（SEM）で撮った，“一匹の放散虫化石の写真”を映写し，彼の研究について語っていたのであった．彼が示した放散虫の骨格の細かな組織・構造がその隅々まで明瞭に認識できた．その解像力のすばらしさに，私は驚いた．

その日，会合が終わってから，私は，彼をつかまえて，必ず，UTDの研究室に行くから，放散虫の研究について，教えてほしい，と頼んだ．私のお願いの口ぶりが真剣であり，また，具体的であったこともあり，彼は，私の熱意がわかったのであろう，彼は，私に約束してくれた．私は，その後，カナダからハーヴァードへ移り，さらに，テキサスのオースチン へ移った．その都度，私は，彼に手紙を書いて，自分が何時，UTDへ行くかを連絡した．その予定どおり，私は，UTDへ行き，彼から，詳しく，技術と知識とを学んだ．

19770216：手紙で連絡しておいたUTDのPessagno教授のところへ行った．体験のあるかたは御存じだと思うが，この空港，すなわち，Dallas-Fortworth（DFW）というのは実に大きな空港である．二つの空港が一つになっていて，その間に，連絡のために，電車が走っている．

私は，DFW空港に着き，バスに乗って，North Central Bus Terminalに着いた．親切にも，日本語の分かる人が迎えにきてくれていた．彼は，私を認め，車に乗せてくれて，空港からPessgno教授の居る教育・研究棟へ送ってくれた．

とにかく，挨拶をして，翌日から，彼の実験室へ行き，そこで，⑴まず，珪質岩からHFを使って，化石体の分離をする．その方法を，Pessagno教授は，実際に，安全

眼鏡をかけ，ヴィニールの実験着を着て，私の眼の前で，実演してくれた．(2) 近くには走査型電子顕微鏡(SEM)があった．彼は，かつて，有孔虫の研究をしていたが，一念発起して，放散虫の研究をすることに，方針を変えた．そのために，必要不可欠なのは，SEMであった．それを手に入れるために，彼は，いかに奔走したか，そして，何度，アメリカ東部の研究所などへ出張したかなど，その頃の苦労話を，私に語ってくれた．(3) そして，分離された化石体，つまり，放散虫を，乾燥し，それを双眼顕微鏡の下で，観察して，考える．(4) 次いで，普通の光学顕微鏡を使い，その鏡下で，面相筆を使って，化石体を，一匹ずつ，拾いあげて，SEM用の試料台に並べてゆく．縦に5 ～ 10匹くらい並べて，(5) SEM観察のための処理を行い，観察・撮影となり，研究用の試料ができあがる．

Pessagno教授は，すでに，かなりのデータを集めていて，彼独特の放散虫の分類とそれに基づく生層序の案をもっていた．大学院でそれを講義しているので，それを勉強しなければならないと，私に教えてくれた．

私のフィールドノートには，Feb. 18，1977に，その時，観察して，印象に残った「放散虫の本体から外に伸びた spines が捻じれているスケッチ」が記されている．そして，メモとして，“この種の twisting spine：Triassic - Jurassicの特色”と書かれている．

その日，夕刻，論文の別刷などいただき，また空港の North Central Bus Terminal へ送っていただき，ブラニフ航空 Boeing 727で，オースチンへ戻った．

19810206：私は，その後も，彼と交流を続けた．そして，原稿や資料を送って，彼の意見を求めた．何度も，私の考えを伝え，また，彼の意見を訊いた．

19820312：彼に求めた手紙によって，私は，その当時の，少なくともアメリカにおける放散虫化石の生層序について知識を得ることができた．その頃の極めて重要な動きは，いわゆるDeep Sea Drilling Project (DSDP) というアメリカ中心で進められていた海洋底掘削計画であった．これについては，地球科学の歴史で，すでに多くの解説がなされていると考えて，ここでは，割愛する．

1978秋：私は，帰国して，すぐに，この研究に取り組んだ．さしあたり，絶対に必要なものはSEMであった．私は，八方手をつくして，情報を集めた．そして，さしあたって必要なSEMは高性能なものではなく，初心者用の機器でよいことを知り，科学研究費を得るために書類を作成した．

その時期は，すでに，半年をすぎていた1978年秋ではあったが，私は，運よく，欲しい小型のSEM（日本電子株式会社のJSM-T20）を購入することができた．

19790113：その日，私と二人で，SEM の像を観察して，帰宅した酒井正男君から，電話があった．彼は，卒業研究として，岐阜県飛騨金山地域の調査をしていた．彼は，云った「ジュラですよ！今日みた放散虫は」(Sakai, 1979)．

その後，私は，まず，その頃，地質調査所で，放射年代測定の研究を続けていた柴田　賢（その後，名古屋大学教授）先生にお願いして，その化石がでた地層の放射年代を測定してもらった．同時に，大学院生の岡村行信君と一緒に，その露頭付近を精査しなおした．

19791020：私は，名古屋大学において，開催された日本古生物学会，第124回例会で，これらの結果を口頭発表した．その内容は，実に大きな問題をはらんだ事実であったが，しかし，私が新しい古生物の研究をしていることは，誰も知らなかったこともあり，私の発表についての反応は，ほとんど，無かった．

しかし，私は，問題の重要性を考え，この研究をとにかく，発表しておきたかった．①新しい微化石放散虫の新種の記載，また，②放射年代の測定結果，そして，③美濃帯の地質，などについて，いろいろな新事実と新しい考えを述べた総合的な内容の作品をどこが快く，出版を引き受けてくれるであろうか？それぞれ3編の論文にして，別々に投稿しなさい，と言われるのではないか，などと思っていた．

私は，自分でも困った．そして，いろいろ悩んだ末，その頃，名古屋大学で，地史学講座の助教授であった糸魚川淳二先生に相談し，お願いして，彼が中心になって編集・出版している「瑞浪市化石博物館研究報告」に投稿することにした．

19811001：糸魚川先生の御厚意もあって，私の原稿は，受理され，印刷・発行された（水谷，1981）．私の書いた最初の化石についての論文であった．この報告は，化石の新種の記載もあり，Appendixとして，後半は，英文で書かれた．最後に，Pessagno教授に謝辞が述べられている．もちろん，その論文は，原稿の段階から，その別刷まで，Pessagno教授に送った．

私は，化石に限らず，いわゆる地域地質の報告は，多くは，地方誌やそれぞれの地域の雑誌に投稿され，報告されることが多いことを知っていた．しかし，私たちが問題にしたこの美濃地域でのジュラ紀層の産出については，もっと多くの研究者の眼に触れるような出版物に出す必要があると考えた．それで，東京で地質学会があったときに，ついでに，学士院会員である小林貞一先生に，私たちの研究成果を話してみようと考えた．私は，学会の講演が終わってから，小林貞一先生宅に電話した．先生は，快く，会ってくださるという．そして，先生宅の地図を，浜田隆士さんに書いてもらった．

19810403：小林先生宅に，私は，15：40から18：00まで，お邪魔して，実に，様々なことを教わった．先生は，放散虫に関する私の考えをすぐ理解された．そして，私に学士院記事に投稿するように言われた．それについては，原稿の長さや内容について解説された．同時に，先生が学士院の会議で，その原稿を紹介し，受理・出版する

同意を得る必要がある．小林先生は，そのために，『幻灯器』で映すための図を数枚準備することを強く，要求された．

もちろん，私は，歓んで，先生の注意事項を守って，原稿を書き，東京へ送った．それは，すぐ出版された（Mizutani *et al.*, 1981）．

19790122–24：名古屋大学へ集中講義をお願いした岡田博有先生が来られたが，彼から，国内でも，微化石放散虫の持つ意義とその結果の重要性が認識されはじめており，その研究が，大阪大学の中世古幸次郎先生のところで進められていることを教えてもらった．私は，早速，大阪へ出かけ，中世古先生にお会いした．

19811014・15：大阪で，研究集会が開かれた．私達は30名くらいと考えていた参加者は，なんと，その４倍，120名もの研究者が手弁当で，参加した（中世古，1982）．この時の参加者の熱気あふれる熱意を，私は，今でも忘れることができない．

私は，幸いにして，岩波書店の編集部に（岩波講座：地球科学の編集に参加していたので）顔ができていた．そのつてを使って，この微化石放散虫の研究をもっと，広く，詳しく，具体的に，関係者に紹介することを考えた．さっそく，中世古先生と八尾先生に連絡して，私が原稿を書き，八尾先生に年代区分と化石の関係図を描いて下さいとお願いした．

19830301：その原稿は，「放散虫化石と日本列島の中生代」と題して印刷・出版された（中世古ほか，1983）．

19860515：これが公刊された直後，小川勇二郎先生らが編集・出版する高等学校の地学の教科書が出た．注目すべきことに，その教科書の中に，上記の八尾先生がまとめた年代と化石の関係図がそのまま採用されて，印刷，出版された（力武ほか，1986，p.137，図87）．

私は，これを知って，いずれ，この放散虫化石は，これまでのいわゆる紡錘虫と同じように，入学試験の問題に取り上げられ，話題になるであろうと思った．そうすれば，もう自動的にこの放散虫化石は，より多くの人達によって，話題になるであろう，と感じたのであった．

４．その頃の動き

上記のように，1979 〜 1982には，我が国において，とくに，中古生代の地質に関しては，大きな変化が起こった．そのさなか，中世古先生を中心として，『JRS81Osaka』（Japanese Radiolarian Symposium，1981，大阪』大阪微化石研究会誌特別号No.5，大阪微化石研究会編，1982）が出版発行された（以下，ここでは赤本“アカホン”と記す）．この本は，その頃の放散虫研究のバイブルであった．我が国のほとんどの中古生層の研究者は，この本を座右において，新事実を述べた論文を読み，また，自分の研究対象とする地域の地史を再検討するために使った．このアカホンの中に記載されている放散虫化石とその年代は，何度も，検討され，各地のそれと比較された．最初は，あまりにもその生層序学的位置づけがこれまでの通説とは異なっていたため，全く，その結果を信じない人もいた．しかし，よく考えなおしてみると，矛盾もなく，新しい知見として，受け入れた人も居た．これを，分かりやすく“放散虫革命”と呼んだ人も居た．

19880227：この日，私は，重要な手紙を受け取っている．私は，その後も，しばしばUTDのPessagno教授と交信を続けていたが，この手紙は，UTDに，中国から大学院留学生として勉学を続けていたYang Qun（楊　群）氏からの便りであった．彼は，私とUTDで会っていて，すでに，仲が良かった．

私は，彼と共同研究をするため，名古屋大学博物館に招いていて，微化石放散虫の研究を始めていた（Yang and Mizutani，1991）．楊　群氏は，訪日する機会には，必ず，拙宅に寄り，私や家内とお喋りする間柄になっていた．

私は，名古屋大学 – 南京大学の国際交流の一環として，何度も南京にでかけたが，その時，有名な中国科学院南京地質古生物研究所（Nanjing Institute of Geology and Palaeontolgy, Chinese Academy of Sciences = NIGPAS）にも出かけて，我が国における放散虫化石の研究の進歩について，話してきたこともあった．驚いたことに，彼等は，すでに，アカホンを入手し，読んでいた．

なお，私と仲よくなった楊　群氏は，2008年から，このNIGPASの所長を務めるようになっている．昨年，松岡　篤先生との共同研究のために来日した．私は，久し振りに，旧交を温めた．何しろ，NIGPASの初代の所長（1950–1953）は，有名な李　四光博士であり，この研究所の中国における地位は，極めて高い．

私は，この日本の国内の熱狂的な動きを見ながら，正式に，文部省科学研究費を頭において，総合研究を実施しようと考えていた．その組織には，すでに，放散虫化石の研究を始めていた多くの人達に加わってもらった．そして，会計年度1982年度は560万円，1983年度は250万円の研究費を得ることができた．そして，中世古先生らを中心にして，20名の研究者からなる総合研究が始まった．

19840331：この成果は“Report of Co-Operative Research on Radiolarian Biostratigraphy of Mesozoic and Paleozoic Groups in Japan.”と題して，出版された．この報告書は，次のような構成になっている．

Part 1: Titles of Reports（この総研に関して，発表された論文の題名の一覧），

Part 2: News and Info.（この総研に関しては，分担者を集めて，その運営･会計などについて，相談したことは無かった．われわれは，とても忙しかった．時間は貴重であった．だから，そのような相談をすることを一切やめて，連絡紙として，新聞を作り，それを分担者に配布した．それ

を集めて，Part 2としてまとめた.）一方，

Part 3: Collected Papers（この総研に関係して，発表された論文を集めたもの），ならびに

Part 4: List of papers（この総研が行われる以前に，公表されていた放散虫に関する論文の全リストを集めて，印刷した）を付けた.

実際の会計処理のまとめなどは，事務を通して，文部省に送られていたが，それらを研究者に，具体的に報告などはしていなかった.

しかし，上記のPart 1 ～ 4からなる総研報告書は，我が国の地質学者の多くの人が参考にしたいと考えて，内容を知った方から，私のところへ直接，請求が次々と来た. その結果, われわれの研究が実に多くの研究者によって，強い関心がもたれていることが分かった．この総研は，実に，我が国において，時期を得た実績として，好評を博した仕事であった.

しかし，上のような最新のデータを座右において考えている研究者と違って，大きな悲劇を起した例もあった. 私たちが，独自に，微化石とSEMという近代兵器を用いて，世界的なレベルで，時代と化石という視点から，我が国の中・古生層の再検討を進めている一方で，このグループから見放された人達は，実に，悲劇的であった．時期は，1980年2月に発行された岩波講座：第15巻（第16回配本）「日本の地質」である．とくにその中の中古生層の部分は，実際には大きく，変わっていたのに，それに合わせて，新しく，矛盾なく地史を組むことができず，古い知識のまま，発行されてしまったのであった. 私は，もちろん，新しい事実を知っていたので，この巻の中古生層の原稿を書いていた九州大学の勘米良先生に，放散虫化石研究のことを逐一，お知らせしていた．しかし，その新しい生層序が何を物語るかについてまでの議論はとても，まだ，できなかったので，仕方なく，この巻は，古い，伝統的なモデルのまま，出版されたのであった.

いわゆる日本列島全体についての構想は，その頃から，新しい地史の組み立てを考えておられた市川浩一郎先生の登場まで，待たなければならなかった（Ichikawa *et al.*, 1990）. それについては，また，別の機会に，別の研究者によってなされるであろうから，ここでは，割愛する.

謝辞：私は，今，88歳になった．このような老人になって，昔のことを思い出して，私を，この名誉ある功労賞に推薦して頂いた方にまず，お礼を言いたい．本当に，私にとっては，身に余る，予期もしなかったことであり，それだけに，こみあげてくる嬉しさも大きかった. また，賞状には，放散虫研究集会一同，とある．実際には，“MRC・NOM in 山形”の実行委員長　本山　功先生には，お世話になった．特に，深く謝意を表したい．この原稿を書くに際しては，かつての共同研究者であった山口大学の脇田浩二先生にも相談した．もちろん，八尾　昭先生にも，連絡をとり，相談しながら，書いた．永井ひろ美さんは，私の代わりになって，副賞の*Pantanellium* のレプリカを持って来て下さった．いうまでもなく，私が昔，一緒になって研究した酒井正男君ほか，多くの名大の当時の大学院生の諸君には，お世話になっている．それらの努力が，私独りに功労賞として，結晶したのだと，私にはみえる．その点，私は，数々の幸運に恵まれたと思う．それらすべてを大切にし，今後も，気力が続く限り，勉強を続けるつもりである．それが，私の謝意を示す最も良い方法だと信じ，この謝辞の項の結びとする.

文　献

Ichikawa, K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A. edits. (1990) Pre-Cretaceous Terranes of Japan. IGCP 224, publication, Osaka, 413pp.

Mizutani, S. (1966) Transformation of silica under hydrothermal conditions. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **14**, 56–88.

水谷伸治郎（1981）飛騨金山のジュラ紀層について，瑞浪市化石博物館　研究報告，No.8，147–190.

Mizutani, S. (1984) Report of Co-operative Research on radiolarian Biostratigraphy of Mesozoic and Paleozoic groups in Japan. (Part 1A:published papers, 5pp.), (Part 1B: orally presented papers 5pp.), (Part 2:no.1–no.21.), (Part 3: twenty papers), (Part 4A: alphabetical order of authors, 22pp.), (Part 4B: chronological order of published year of papers, 22pp.)

Mizutani, S., Hattori, I., Adachi, M., Wakita, K., Okamura, M., Kido, S., Kawaguchi, I. and Kojima, S. (1981) Jurassic formations in the Mino area, central Japan. *Proc. Japan Acad.*, **57**, ser.B, no.6, 194–199.

Mizutani, S. and Kido, S. (1983) Radiolarians in middle Jurassic siliceous shale from Kamiaso, Gifu Prefecture, central Japan. *Trans. Proc. Paleoot. Soc. Japan*, N.S., No.132, 253–262.

中世古幸次郎（1982）発刊にあたって，NOM特別号，No.5, I–II.

中世古幸次郎・水谷伸治郎・八尾　昭（1983）放散虫化石と日本列島の中生代，科学，**53**，177–183.

大坂微化石研究会編（1982）第一回放散虫研究集会論文集，大阪微化石研究会誌　特別号，No.5．485pp.

力武常次・小坂丈予・永田　豊・萩原幸男・小川勇二郎（1986）高等学校地学，教研出版，東京，287pp.

Sakai, M. (1979) Geology of the northwestern part of Kanayama-cho, Mashita-gun, Gifu Prefecture, *B.Sci., Dess., Dept. Sci., Nagoya Univ.*, T267, 36pp.

Yang, Q. and Mizutani, S. (1991) Radiolaria from the Nadanhata terrane, Northeast China. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **38**, 49–78.

（ 受 付：2017年5月15日； 受 理：2018年9月18日 ）

地質調査研究報告, 70 巻, 第 1/2 号 , p. 267–272, 2019

特別寄稿：大阪微化石研究会と放散虫研究集会

竹村厚司[1, *]

Atsushi Takemura (2019) Historical review of NOM (News of Osaka Micropaleontologists), Japanese Radiolarian Symposium and InterRad Meeting. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (1/2), p. 267–272, 4 tables.

Abstract: More than ten volumes of Proceedings of the Japanese radiolarian symposiums had been published for 25 years as Special Volumes of News of Osaka Micropaleontologists (NOM). The term, NOM is an abbreviation of these publications and had also been used as a name of the meetings of micropaleontologists around the Kansai area, including Osaka, Kyoto, Kobe and Nara. The histories of NOM and both Japanese and international radiolarian symposiums are briefly reviewed in this paper.

Keywords: historical review, News of Osaka Micropaleontologists, NOM, Japanese radiolarian symposium, InterRad meeting

要　旨

NOMは大阪微化石研究会機関紙(News of Osaka Micropaleontologists)の略語であるが，一部で大阪微化石研究会そのものの呼び名としても用いられてきた．日本の放散虫研究集会は2017年までに13回を数えるが，最近ではこの集会がNOMと呼ばれることもある．これは各回の放散虫研究集会論文集がNOM特別号として刊行されてきた経緯による．本論では，大阪微化石研究会について，その概要や刊行物について説明し，日本の放散虫研究集会やInterRad（国際放散虫研究集会）についても簡単に紹介した．

1．はじめに

大阪微化石研究会は1972年に関西地域の微化石研究者が中心となって結成された研究会である．現在は関西では研究会の開催はないが，最近の日本の放散虫研究集会では，NOMの名が使われることもある．日本の放散虫研究集会の論文集は1982年以降，大阪微化石研究会誌(NOM)特別号として出版されてきた．これらの論文集は国内のみでなく海外の研究者にもよく知られているため，NOMは広くその名を知られるようになった．

2017年3月2日から5日にかけて，第13回放散虫研究集会が山形大学において開催された．これは2016年度微古生物標本・資料センター(MRC)研究集会との合同集会で，MRC-NOM in Yamagataと呼ばれている．しかし現在では，元々の大阪微化石研究会やNOMについて知る人が少なくなっている．そこで，MRC-NOM in Yamagataの主催者であった本山　功氏から，NOMとは何かや，放散虫研究集会との関係について説明してほしいという依頼を受けた．本論では，この合同集会の場で発表した大阪微化石研究会とNOMの概略について説明したい．

また，国内の放散虫研究集会も1981年の第1回より13回を数え，ほぼそのたびに論文集が出版されてきた．さらに2017年には，国際放散虫研究集会(InterRad)が松岡篤氏の主催により，新潟大学で開催された．InterRadは1978年から84年までのEuroRadを含め，今回で15回目を迎えている．日本では1994年の第7回に次いで2度目の開催で，1988年にInterRadが発足してから2度目を開催するのは日本が初めてである．本論ではこれらの研究集会の経緯についても概説する．

2．大阪微化石研究会の発足と活動

NOMとは大阪微化石研究会機関紙（または機関誌）(News of Osaka Micropaleontologists)の略称で，また大阪微化石研究会の呼び名としても用いられてきた．大阪微化石研究会は1972年に発足している．その頃の様子を，大阪微化石研究会機関紙第１号に収録された池辺(1974)や両角(1974)より知ることができる．

当時，世界的に微古生物学研究が興隆しつつあり，関西(京阪神，奈良周辺)の大学，博物館などに微化石研究者が多く在籍していた．また大阪市立大学や大阪教育大学，京都大学，奈良教育大学などには，微化石を研究する大学院生，学部生も育ちつつあった．それらの研究は，有孔虫，放散虫，珪藻，渦鞭毛藻，花粉，石灰質ナノ化石など多岐にわたり，それぞれの分野の専門家の参加した勉強会の必要性が痛感されていた(池辺，1974)．

[1] 兵庫教育大学

[*] Corresponding author: A.Takemura, Hyogo University of Teacher Education, Kato, Hyogo 673-1494, Japan, Email: takemura@hyogo-u.ac.jp

そこで，池辺展生氏(大阪市立大学)や千地万造氏，両角芳郎氏(共に当時大阪市立自然科学博物館，現在の大阪市立自然史博物館)らが中心となり，大阪や京都，奈良の微化石研究者に呼びかけて，1972年9月に準備会が持たれた．その場で「大阪微化石研究会」の発足が決められたが，それ以前に大阪で「化石懇談会」という会が行われたが3回で終了したことから，長続きさせるためにおよそ以下のことが決められた(両角，1974)．

・研究情報の交換や標本を見ながらの議論など，何でも話せる気さくな会にする．
・大阪市立自然科学博物館，大阪市立大，大阪大，大阪教育大，京都大，奈良教育大で幹事を出し，会場を回り持ちして２ヶ月に１度程度例会を行う．
・会員，会費など堅苦しく考えず，必要に応じて会費を集める．

このような例会は1987年ごろまで約15年間にわたり年に5～6回程度行われた．第1回例会は1972年11月18日に大阪市立自然科学博物館で開催され，参加者は18名であった．その後，大阪大学，大阪市立大学，奈良教育大学，大阪教育大学，京都大学の会場を回り持ちして例会は開催されていった．また，各例会の終了後にはしばしば「NOM会」が開かれ，大阪微化石研究会＝NOMという図式が定着していったようである．

発足当初の参加者の詳細は定かではないが，八尾　昭先生が所持されている発足当初の名簿には20人程度が記載されている．そして，後述する1974年に創刊された大阪微化石研究会誌(NOM)第1号に名前が記されている方々は，所属別に以下の通りである(敬称略，順序は登場順)．

大阪市立大学：池辺展生・松岡数充・八尾　昭・市川浩一郎
大阪市立自然史博物館：千地万造・両角芳郎・那須孝悌・山田清子
大阪大学：西村明子・小泉　格・中世古幸次郎
大阪教育大学：菅野耕三
京都大学：原田憲一・堤　久雄・瀬戸口烈司・野上裕生・西村　昭・西脇二一・大野照文
同志社大学：中川要之助
神戸市立楠高校：前田保夫
奈良教育大学：西田史朗・池田　正・糸数洋子
奈良県立奈良高校：紺田　功

筆者が大阪微化石研究会に参加し始めたのは，大学の4年生であった1979年頃からである．当時もまだ年に5回程度は例会が開催されており，主に参加される研究者として，大阪自然史博物館の千地万造・両角芳郎，大阪市立大学の池辺展生・八尾　昭，大阪大学の中世古幸次郎・小泉　格・西村明子，大阪教育大学の菅野耕三，京都大学の石田志朗，奈良教育大学の西田史郎らの先生方が主要メンバーであった．

関西地域の微化石研究者間の情報・意見交換という目的のため，研究会の内容としては多くが上記の研究者による研究報告や，各大学の学生・院生による研究発表が当初から中心となっていた．筆者らも卒業論文の内容等を研究会で発表し，他大学の先生方や院生・学生と交流できたことは大いに勉強になり励みともなった．

当初からの例会の特徴としては，内容は主に微古生物学が中心であるが，特に微化石に限らず古生物学，地質学等に関する様々な話題が提供されていたことが挙げられる．例えば，研究会でよく話題提供があったのは大阪層群を始めとする近畿地方の第四系の研究で，関西国際空港の地盤調査など，関西地域の応用地質に関する発表もよく行われた．また，発表者も関西の研究者に限らず，関西以外の方々に話題提供をお願いすることもよくあり，多くの方々と交流することができた．

また，大阪微化石研究会の設立当初の方針もあって，当時はその組織なども大まかなものであった．会員や会費，会長などもあえて決められておらず，単に有志の持ち回りで例会を開き，後述する研究会機関紙や特別号を発行するものであった．余談であるが，1981年に第1回放散虫研究集会が開催され，82年にその論文集が刊行されて全国的にNOMが有名になってから，大阪微化石研究会に入会したいので手続きを教えてほしい，という手紙が来て関係者一同が困惑したことがあった．

３．大阪微化石研究会機関紙（NOM）及び特別号

大阪微化石研究会機関紙は，研究会の発足のおよそ1年半後の1974年4月に第1号が発刊された．これは放散虫研究集会論文集などの特別号(NOM Special Volume)とは異なり，元々の研究会の機関紙で，1986年の第14号まで刊行された(第1表)．現在，この機関紙はTerrapubのウェブサイトに公開されており，特別号も2004年の第13号まで公開されている．

当初の機関紙は微化石に関する研究の情報交換等の内容が多く，国際会議や研究航海の報告，各大学・研究機関の紹介や卒論・修論の紹介なども掲載されている(第1表)．第2号から第4号は特集記事が組まれ，第2号(1974年)では日本人も多く参加した西ドイツ，キールでのプランクトン会議，第3号(1975年)では当時普及が進み一般的に使用され始めた走査型電子顕微鏡，第4号(1975年)では「日本の微古生物学界の批判的展望」という特集で，様々な側面からの微古生物学全般の問題点や今後の展望などが議論されている．

また，大阪微化石研究会というローカルな名称にもかかわらず，著者は大阪近辺に限らず全国にわたっている．例えば第2号のキール，プランクトン会議の特集号では，高柳洋吉(東北大)，Hsin Y. Ling (林　信一，ワシントン大学)，的場保望(秋田大)，新妻信明(東北大)，米谷盛

第1表　大阪微化石研究会機関紙(News of Osaka Micropaleontologists: NOM)全号の主な内容. Terrapubのウェブサイトで公開されている．(http://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/nom/index.html　2019年2月5日参照)

Table 1　Main contents of all the numbers of News of Osaka Micropaleontologists (NOM). All numbers are made public at the website of Terrapub.

No.	主な内容	刊行年
1	大阪微化石研究会の発足，研究航海，技術ノート，学園だよりなど	1974
2	特集：“海洋プランクトンと堆積物”シンポジウム，第３回プランクトン会議報告	1974
3	特集：微古生物学と走査型電子顕微鏡，池辺論文，卒論修論紹介，航海報告など	1975
4	特集：日本の微古生物学界の批判的展望，国際会議報告，航海報告など	1975
5	原著論文３編，学園紹介，総説：珪藻，技術ノート，国際会議報告など	1976
6	原著論文２編，国際会議報告，技術ノート，卒論修論紹介，文献抄録など	1977
7	原著論文３編，例会報告	1979
8	原著論文４編，技術ノート，例会報告	1980
9	原著論文４編，技術ノート，航海報告，国際会議報告，例会報告	1982
10	原著論文３編，短報１編，技術ノート，例会報告	1983
11	原著論文３編，短報１編	1983
12	原著論文４編，短報１編，技術ノート，博物館紹介，例会報告	1984
13	原著論文３編，例会報告	1985
14	原著論文５編，技術ノート，例会報告	1986

寿郎(石油資源開発)，栗原謙二(東京教育大学)らの方々も記事を執筆されている(敬称略，所属は当時)．

第5号からはおよそ年に1号程度の頻度となり，複数の原著論文が掲載されるようになる．これらは主に関係研究機関の研究者による種々の論文や，各大学の大学院生，学部生らの修士論文，卒業論文などである．第1表でもわかるように，当初は関西における微化石研究者の研究連絡誌という位置付けであったが，徐々に原著論文中心の内容に変化していった．

この正規の機関紙(NOM)のほか，特別号(NOM Special Volume)も1974年から出版されている(第2表)．1990年代以降はこの特別号のみが刊行され，NOMの本体のようになっているが，当初は各テーマにおけるモノグラフ的論文や総説などが出版されていた．その後はほとんどが放散虫研究集会の論文集となり，NOMといえば放散虫と思われる向きもあるが，実際には放散虫研究者以外の方々もNOMに関係している．2017年には，特別号第17号で「大阪平野の地下構造ー物理探査データに基づく全体像と今後の課題」(竹村・伊藤，2017)が刊行されている．

４．日本の放散虫研究集会と論文集

1970年代末からの放散虫研究者の増加に伴い，中世古幸次郎先生の呼びかけで1981年10月14，15日に第1回放散虫研究集会が大阪で開催された．参加者は日本全国から放散虫や関連分野の研究者を合わせて120名に達し，熱心な討論が行われた．その成果として，40論文，485ページの第1回放散虫研究集会論文集が，大阪微化石研究会誌(NOM)特別号第5号として1982年に出版された(中世古編，1982)．これ以降，放散虫研究集会が開催されるたびにほぼ毎回，論文集がNOM特別号として出版されてきた(第2表)．

その後，放散虫研究集会は2～5年の間隔で開催されてきた(第3表)．当初は大阪での開催が多く，特に第2回と第5回は大阪市立大学における日本古生物学会の例会や年会のシンポジウムとして開催された．1997年の第6回集会(新潟大学)以後は日本各地でほぼ3年に一度開催され，昨年2017年3月の山形集会までで13回を数えている．これは3年ごとに開催されるInterRad(国際放散虫研究集会)に合わせ，その開催の半年から１年前に日本の研究集会を開いているからである．毎回の参加者はほぼ50人以上で，世界中でも放散虫研究者数は最も多いと思われる．

当初の放散虫研究集会は，大阪微化石研究会とは別の集会である．しかし，ほぼ毎回NOM特別号として論文集が出版され，また関西地方以外の研究者が増えたこと，大阪微化石研究会自体の活動が休止状態となったことなどから，最近では今回の「NOM in Yamagata」のように，放散虫研究集会にもNOMの名称が使われていることがある．

第2表　大阪微化石研究会誌特別号(NOM Special Volume)全号の主な内容．現在，第1号から第13号までTerrapubのウェブサイトで公開されている．(http://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/nom/index.html　2019年2月5日参照)

Table 2　Main contents of all the numbers of News of Osaka Micropaleontologists (NOM), Special Volume. Numbers 1 to 13 are made public at the website of Terrapub.

No.	特別号表題	著者または編者	刊行年
1	Dinoflagellata と Acritarcha の概説	原田憲一・松岡数充	1974
2	四万十帯の放散虫化石の研究（白亜系放散虫を中心として）	中世古幸次郎・西村明子・菅野耕三	1979
3	Atlas of Pacific Nannoplanktons	西田史郎	1979
4	近畿の第四系の文献目録とデータベース	竹村恵二・林田明・西脇二一	1980
5	JRS 81 Osaka 第 1 回放散虫研究集会論文集	中世古幸次郎（編）	1982
6	Radiolarians from the Nankai Trough in the Northwest Pacific	西村明子・山内守明	1984
7	放散虫および含放散虫地帯研究の最近の進歩 日本古生物学会第 134 回例会「化石放散虫」シンポジウム論文集	市川浩一郎（編）	1986
8	第 3 回放散虫研究集会論文集	酒井豊三郎・相田吉昭（編）	1992
9	第 4 回放散虫研究集会論文集	八尾　昭（編）	1993
10	第 5 回放散虫研究集会論文集	八尾　昭（編）	1997
11	第 6 回放散虫研究集会論文集	松岡　篤（編）	1998
12	第 7 回放散虫研究集会論文集	竹村厚司・古谷　裕（編）	2001
13	第 8 回放散虫研究集会論文集	指田勝男（編）	2004
14	第 9 回放散虫研究特集号	鈴木紀毅（編）	2009
15	第 11 回放散虫研究集会－中世古幸次郎先生追悼集会特別号	堀　利栄・竹村厚司（編）	2015
16	第 12 回放散虫研究集会論文集	松岡　篤（編）	2016
17	大阪平野の地下構造ー物理探査データに基づく全体像と今後の課題	竹村恵二・伊藤康人	2017

第3表　日本で行われた放散虫研究集会の一覧.

Table 3　List of the Japanese Radiolarian Symposiums.

	開催年	場所	主催者	合同開催
第 1 回	1981	大阪市	中世古幸次郎	
第 2 回	1985	大阪市立大学	市川浩一郎	日本古生物学会
（日本古生物学会第 134 回例会「化石放散虫」シンポジウム）				
第 3 回	1990	宇都宮大学	酒井豊三郎・相田吉昭	
第 4 回	1992	大阪市立大学	八尾　昭	
第 5 回	1996	大阪市立大学	八尾　昭	日本古生物学会
（日本古生物学会年会シンポジウム「海洋環境変動 とプランクトンフォーナの変遷」）				
第 6 回	1997	新潟大学	松岡　篤	
第 7 回	2000	兵庫県立人と自然の博物館	竹村厚司・古谷　裕	
第 8 回	2003	筑波大学	指田勝男	
第 9 回	2006	東北大学	鈴木紀毅	有孔虫研究会
第 10 回	2009	山口大学	鎌田祥仁	
第 11 回	2011	愛媛大学	堀　利栄	
第 12 回	2014	福島県立博物館	竹谷陽二郎	
第 13 回	2017	山形大学	本山　功	MRC
第 14 回	2020（予定）			

MRC: Micropaleontological Reference Center（微古生物標本・資料センター）

第4表　EuroRad（ヨーロッパ放散虫研究集会），InterRad（国際放散虫研究集会）の一覧．アメリカ合衆国のRadiolarian Workshopを含む．日本人参加者数での約とあるのは筆者の記憶によるため，確実ではない．

Table 4　List of EuroRad and InterRad Meeting including Radiolarian Workshop of USA in 1983. Some numbers of Japanese participants may be doubtful.

Meeting	Year	City	Country	Organizer	Numbers of Japanese participants
EuroRad I	1978	Lille	France	De Wever, Patrick	0
EuroRad II	1980	Basel	Switzerland	Baumgartner, Peter O.	3
EuroRad III	1982	Bergen	Norway	Bjørklund, Kjell R.	4
Rad Workshop	1983	Dallas	USA	Pessagno, Emile A. Jr.	4
EuroRad IV	1984	Leningrad	USSR	Petrushevskaya, Maria G.	2
InterRad V	1988	Marburg	Germany	Schmidt-Effing, Reinhard	4
InterRad VI	1991	Firenze	Italy	Marcucci, Marta	Approx.15
InterRad VII	1994	Osaka	Japan	Yao, Akira	52
InterRad VIII	1997	Paris	France	Caulet, Jean-Pierre	Approx.20
InterRad IX	2000	Reno	USA	Noble, Paula J.	Approx.20
InterRad X	2003	Lausanne	Switzerland	Baumgartner, Peter O.	Approx.20
InterRad XI	2006	Wellington	New Zealand	Hollis, Christopher J.	Approx.30
InterRad XII	2009	Nanjing	China	Luo, Hui	Approx.30
InterRad XIII	2012	Cadiz	Spain	O'Dogherty, Luis	Approx.30
InterRad XIV	2015	Antalya	Turkey	Tekin, U. Kagan	Approx.20
InterRad XV	2017	Niigata	Japan	Matsuoka, Atsushi	78
InterRad XVI	2020	Ljubljana	Slovenia	Gorican, Spela	?

5．国際放散虫研究集会（InterRad）

最後にInterRadについても簡単に触れておく．国際的な放散虫研究者の組織としては，ヨーロッパの研究者が集まって会合を開いたEuroRadが最初で，1978年にリール（フランス）で第１回研究集会が開かれている（EuroRad I）．それ以降，1984年のEuroRad IV（レニングラード）まで2年ごとに開催された（第4表）．第2回のEuroRad II（バーゼル，1980年）には中世古幸次郎・西村明子・八尾昭の各氏が参加され，以後の各会には日本人が全て参加している．

EuroRadの写真のいくつかは，第11回放散虫研究集会ー中世古幸次郎先生追悼集会特別号（堀・竹村編，2015）に掲載されている．それらを見てもわかるように，当初のEuroRadの集会の参加者は20人以下で，大学のゲストハウスなどに宿泊し，そこで研究会を行っていた．筆者が初めて参加した1982年のEurorad III（ベルゲン）でも，街から離れたベルゲン大学の施設に隔離され，食事は国別に担当を決めて自炊し，発表もほとんど時間制限なしであった．

ただし1984年のEurorad IVはレニングラード（現，サンクトペテルブルグ）での開催ということもあって，ロシア人の参加者が多く，それまでとは違った公式的で多人数の学会だった．日本からは松岡　篤氏と私が参加したが，冷戦時代のソビエト連邦への訪問は大変印象的であった．その間，1983年にはアメリカでの放散虫研究集会が一度だけダラスで開催されている（第4表）．この集会には，岡村　真氏，相田吉昭氏，松岡　篤氏と私が日本から参加し，アメリカの多くの研究者と交流できた．

現在組織され，3年に一度研究集会が開催されているInterRadは，このEuroRadが母体として発展したものである．研究集会の回数はEuroRadから続けて数えられ，1988年にドイツのマールブルグで開催された第1回は，InterRad Vと呼ばれている（第4表）．InterRadに改組されてからは集会への参加者も50 ～ 100人程度に増え，日本人も多数参加するようになり，ほぼ毎回，国別の参加者数では日本人が一番多数を占めている．

このような日本における放散虫研究の隆盛もあって，1994年にはInterRad VII，Osaka（第7回国際放散虫研究集会）が開催された．これは大阪市立大学の八尾　昭先生

を代表とし，国外からの42名を含む94名の参加者を集めて神戸市の関西地区大学セミナーハウス（現，神戸市セミナーハウス）で集会を行った（堀・竹村編，2015; p.vi, 写真11）．筆者はこのInterRad VIIの事務局長であったが，神戸市北区の山中のセミナーハウスに全員が宿泊し，酒を飲みながら毎晩遅くまで議論・談笑していたのをよく覚えている．

2017年には，松岡　篤氏を代表としてInterRad XV, Niigataが開催された．1988年のInterRadへの改組以降で，2度目の研究集会を開催したのは日本が初めてである．InterRad XVは新潟大学の五十嵐キャンパス及び駅南キャンパスで開催され，研究集会へは国外からの46名を含む124名が参加した．また今回のInterRadでは一般向けのイベントもいくつか行われ，参加者の総数は186名であった（中川ほか，2018）．次回は2020年にスロベニアで開催の予定である．

謝辞：この大阪微化石研究会に関する紹介は，2017年3月の2016年度微古生物学リファレンスセンター研究集会・第13回放散虫研究集会合同山形大会（略称：MRC・NOM in 山形）において発表したものである．この発表及び執筆の機会を与えていただいた研究集会の代表者である本山　功氏に深く感謝する．八尾　昭先生には投稿原稿を査読していただき，大阪微化石研究会の名称や発足からの状況などについて，数多くのご教示・ご助言をいただいた．編集委員の板木拓也氏にも本論文の発表に関しお世話いただいた．地質調査研究報告編集委員の鈴木淳氏ならびに内野隆之氏には本論文について多くのコメントをいただいた．また，当日の研究集会では，新潟大学の松岡　篤氏にご助言をいただき，松岡氏及びRC GEAR代表の横山　隼氏との共同で発表を行った．以上の方々に深く感謝する次第である．

文　献

堀　利栄・竹村厚司編（2015）第11回放散虫研究集会－中世古幸次郎先生追悼集会（松山）特別号．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 15，232p.

池辺展生（1974）ニュース発刊のあいさつ．大阪微化石研究会機関紙，no. 1，1.

両角芳郎（1974）大阪微化石研究会の発足とこの1年の経過．大阪微化石研究会機関紙，no. 1，1–3.

中川孝典・冨松由希・伊藤　剛（2018）第15回国際放散虫研究集会－InterRad XV in Niigata 2017－参加報告．日本地質学会News，**21**，5–6.

中世古幸次郎編（1982）JRS 81 Osaka, 第1回放散虫研究集会論文集．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 5, 485p.

竹村恵二・伊藤康人（2017）大阪平野の地下構造－物理探査データに基づく全体像と今後の課題．大阪微化石研究会誌，特別号，no. 17，74p.

（ 受 付：2018年3月15日； 受 理：2019年2月5日 ）

地質調査総合センター研究資料集

665	地殻応力測定用坑井掘削、地下水等観測施設・設備工事及び付帯観測報告書	木口　努（編）
666	東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設整備工事（愛媛県新居浜市地区）報告書	佐藤 隆司・佐藤　努・木口　努・小泉 尚嗣・渡辺　寛・酒井 誠志
667	世界の震源域の分布 – G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 1/7 –	石川 有三
668	東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設整備工事（三重県熊野市地区）報告書	北川 有一・高橋　誠・小泉 尚嗣・木口　努・水落 幸広・長谷 和則
669	東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設設備工事（和歌山県田辺市地区）報告書	板場 智史・高橋　誠・小泉 尚嗣・木口　努・千葉 明彦・長谷 和則
670	東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設設備工事（三重県紀北町地区）報告書	重松 紀生・小泉 尚嗣・木口　努・水落 幸広・長谷 和則
671	房総半島東部における上総層群下部の地質調査・鍵層柱状図及びルートマップ	中嶋 輝允・宇都宮 正志
672	断層微細構造調査用坑井掘削工事および付帯観測（平林）報告書	木口　努（編）
673	地殻応力測定用坑井掘削および付帯観測、設備工事 その１（宝塚）報告書	木口　努（編）
674	地殻応力測定用坑井掘削および付帯観測、設備工事 その２（育波）報告書	木口　努（編）
675	活断層モニタリング施設整備工事（跡津川断層跡津川・宮川地区）報告書	木口　努（編）
676	活断層モニタリング施設整備工事（阿寺断層王滝地区）報告書	木口　努（編）
677	地震予知地下水観測施設及び設備工事　報告書	木口　努（編）
678	静岡県浜岡町水位ラドン観測井工事　報告書	木口　努（編）

地質調査総合センターの最新出版物

5 万分の 1 地質図幅	網走・吾妻山・糸魚川・身延	
20 万分の 1 地質図幅	大分（第 2 版）・松山（第 2 版）・高知（第 2 版）	
200 万分の 1 地質編集図	No. 4	日本地質図（第 5 版）
	No. 11	日本の火山（第 3 版）
特殊地質図	No. 12	富士火山地質図（第 2 版）
	No. 33	日本周辺海域鉱物資源分布図（第 2 版）
	No. 41	栃木県シームレス地質図
海洋地質図	No. 90	沖縄島南部周辺海域海洋地質図（1:20 万）
火山地質図	No. 20	八丈島火山地質図（1:2.5 万）
水文環境図	No. 9	富士山
空中磁気図	No. 46	養老断層地域高分解能空中磁気異常図
	No. 47	富士火山地域高分解能空中磁気異常図
重力図	No. 33	金沢地域重力図（ブーゲー異常）
	S3	甲府地域重力構造図（ブーゲー異常）
海外地球科学図	アジア鉱物資源図（1:500 万）	
	東アジア地域地震火山災害情報図（1:1000 万）	
海陸シームレス地質図	S-6	海陸シームレス地質情報集「房総半島東部沿岸域」
燃料資源図	FR-3	燃料資源地質図「関東地方」
土壌評価図	E-7	表層土壌評価基本図「高知県地域」
数値地質図	G-16	20 万分の 1 日本シームレス地質図　DVD 版
	G-17	九州地質ガイド
	V-3	口永良部島火山地質データベース
	G20-1	20 万分の 1 数値地質図幅集「北海道北部」第 2 版
	G20-2	20 万分の 1 数値地質図幅集「北海道南部」第 2 版
その他	日本の熱水系アトラス	
	海と陸の地球化学図	
	関東の地球化学図	

Middle to late Miocene radiolarians from ODP Site 1021 in the eastern North Pacific
Shin-ichi Kamikuri ····· 163

Late Miocene polycystine radiolarians of the Japan Sea (IODP Exp. 346 Site U1425)
Kenji M. Matsuzaki and Takuya Itaki ····· 195

Resin-embedding procedure for marine sediment core samples for semi-permanent archives and the use of outreach
Yoshimi Kubota and Rie Tajiri ····· 211

A report of Permian, Triassic, and Jurassic radiolarian occurrences from the Ashio terrane in the Hachioji Hills, eastern Gunma Prefecture, central Japan
Tsuyoshi Ito ····· 225

Development of Paleozoic - Mesozoic radiolarian research in the latter half of the 20th century in Japan
Akira Yao ····· 249

Personal history of my study on radiolarian biostratigraphy
Shinjiro Mizutani ····· 261

Historical review of NOM (News of Osaka Micropaleontologists), Japanese Radiolarian Symposium and InterRad Meeting
Atsushi Takemura ····· 267

地質調査研究報告編集委員会

委員長　鈴木　淳
副委員長　佐々木宗建
委員　石塚　治
松本　弾
宮越昭暢
川辺能成
大谷　竜
長森英明
内野隆之
高橋　浩
工藤　崇
板木拓也
森尻理恵
加瀬　治

Bulletin of the Geological Survey of Japan Editorial Board

Chief Editor: Atsushi Suzuki
Deputy Chief Editor: Munetake Sasaki
Editors: Osamu Ishizuka
Dan Matsumoto
Akinobu Miyakoshi
Yoshishige Kawabe
Ryu Ohtani
Hideaki Nagamori
Takayuki Uchino
Yutaka Takahashi
Takashi Kudo
Takuya Itaki
Rie Morijiri
Osamu Kase

事務局
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
地質情報基盤センター　出版室
https://www.gsj.jp/inquiries.html

Secretariat Office
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geoinformation Service Center Publication Office
https://www.gsj.jp/en/

地質調査研究報告 第70巻 第1/2号
平成31年3月29日　発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒305-8567
茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

Bulletin of the Geological Survey of Japan
Vol. 70 No. 1/2 Issue March 29, 2019

Geological Survey of Japan, AIST

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi,
Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan

©2019 Geological Survey of Japan, AIST
https://www.gsj.jp/

AIST16-G68699-70-1

Online ISSN : 2186-490X
Print ISSN : 1346-4272

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 70 No. 1/2 2019

CONTENTS

Special Issue: Proceedings of the joint meeting of Micropaleontological Reference Center Meeting 2016 and 13th Radiolarian Symposium

Special issue on micropaleontological study: Scientific results from the joint meeting of Micropaleontological Reference Center Meeting 2016 and 13th Radiolarian Symposium
Isao Motoyama and Takuya Itaki 1

Paleoenvironmental analysis from fossil ostracod assemblages of the Middle Pleistocene Naganuma Formation in the Sagami Group, central Japan
Hirokazu Ozawa and Gengo Tanaka 5

Integrated chronostratigraphy of the Miocene sedimentary sequence in the northeastern area of Sendai City, Miyagi Prefecture, Northeast Honshu, Japan
Takuma Suzuki, Hiroki Hayashi, Yukio Yanagisawa, Osamu Fujiwara and Toru Danhara 17

Conodont-based age calibration of the Middle Triassic Anisian radiolarian biozones in pelagic deep-sea bedded chert
Shun Muto, Satoshi Takahashi, Satoshi Yamakita, Katsuhito Soda and Tetsuji Onoue 43

Radiolarian fossils from the Miocene Tsurushi Formation distributed in Sado Island, Niigata Prefecture, Japan
Ayako Kawatani, Katsuo Sashida, Sachiko Agematsu and Naoki Kohno 91

Summer surface water polycystine radiolarians in the eastern margin of the Japan Sea
Naoto Ishida 101

Middle Devonian–early Carboniferous radiolarian fossils extracted from the conglomerate in the Nedamo Complex, Nedamo Terrane, Northeast Japan
Takayuki Uchino and Toshiyuki Kurihara 109

Radiolarians from chert of the Cretaceous Shimanto accretionary complex in the Umaji district, Kochi Prefecture, Southwest Japan
Hidetoshi Hara and Kousuke Hara 117

A review of Neogene radiolarian biostratigraphy in Japan during the last two decades
Isao Motoyama 125

Radiolarian assemblages from the lower to middle Miocene at IODP Site U1335 in the eastern equatorial Pacific
Shin-ichi Kamikuri 137

continued on inside back cover

Geological Survey of Japan, AIST

地 調 研 報
Bull. Geol. Surv. Japan
Vol. 70, No. 1/2, 2019