

日本における過去 20 年間の新第三系放射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射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射虫化石層序の研究が進んだこと、そして、第三に、改訂された放射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射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射虫化石層序学は、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系放射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射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射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射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; 曾野ほか, 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。これは示帯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

Standard ages	Japan Sea		Northwest Pacific		California margin	
	Period	Stage	CK95	ATNTS 2012	ATNTS 2012	Primary events
Quaternary	Holocene	Late	0	0	0	<i>Botryostrobus aquilonaris</i>
		Middle	0.43	0.43	0.4	<i>Sylatractus universon</i>
		Early	1.03	1.03	1.0	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>
	Pleistocene	Calab.	1.98	1.98	1.98	<i>Hexaconitium minerva</i>
		Colab.	2.7	2.7	2.7	<i>Cycladophora sphaeris</i>
		Early	3.9	3.9	3.9	<i>Dicyophimus bullatus</i>
		Middle	4.3	4.3	4.3	<i>Larcopele pylomaticus</i>
		Late	4.4	4.4	4.4	<i>Axoprurum acquilonium</i>
			4.5	4.5	4.5	<i>Lithelus barbatus</i>
			5.1	5.1	5.1	<i>Lychnocanoma parallelipes</i>
Neogene	Pliocene	Zanclan	5.3	5.3	5.4	<i>Collosphaera reynoldsi</i>
			6.0	6.1	6.1	<i>Cyrtocapsella japonica</i>
			6.8	7.0	6.9	<i>Eucyrtidium inflatum</i>
	Miocene	Messinian	7.3	7.4	7.4	<i>B. L. magnacornuta</i>
			9.0	9.0	9.1	<i>T. L. japonica</i>
			10.0	10.1	10.1	<i>B. L. magnacornuta</i>
			11.7	11.8	11.8	<i>RD C. tetrapera</i>
			12.5	12.5	12.6	<i>B. E. inflatum</i>
			15.3	15.3	15.3	<i>Dendrospyrus sakaii</i>
Miocene	Tortonian		9.0	9.0	9.1	<i>Collosphaera reynoldsi</i>
			10.0	10.1	10.1	<i>Cyrtocapsella japonica</i>
			11.7	11.8	11.8	<i>Eucyrtidium inflatum</i>
	Late		12.5	12.5	12.6	<i>B. L. magnacornuta</i>
			15.3	15.3	15.3	<i>RD C. tetrapera</i>
						<i>B. E. inflatum</i>
Neogene	Messinian		5.3	5.3	5.4	<i>Collosphaera reynoldsi</i>
			6.0	6.1	6.1	<i>Cyrtocapsella japonica</i>
			6.8	7.0	6.9	<i>Eucyrtidium inflatum</i>
	Late		7.3	7.4	7.4	<i>B. L. magnacornuta</i>
			9.0	9.0	9.1	<i>T. L. japonica</i>
			10.0	10.1	10.1	<i>B. L. magnacornuta</i>
			11.7	11.8	11.8	<i>RD C. tetrapera</i>
			12.5	12.5	12.6	<i>B. E. inflatum</i>
			15.3	15.3	15.3	<i>Dendrospyrus sakaii</i>
Neogene	Messinian		5.3	5.3	5.4	<i>Collosphaera reynoldsi</i>
			6.0	6.1	6.1	<i>Cyrtocapsella japonica</i>
			6.8	7.0	6.9	<i>Eucyrtidium inflatum</i>
	Late		7.3	7.4	7.4	<i>B. L. magnacornuta</i>
			9.0	9.0	9.1	<i>T. L. japonica</i>
			10.0	10.1	10.1	<i>B. L. magnacornuta</i>
			11.7	11.8	11.8	<i>RD C. tetrapera</i>
			12.5	12.5	12.6	<i>B. E. inflatum</i>
			15.3	15.3	15.3	<i>Dendrospyrus sakaii</i>
Neogene	Messinian		5.3	5.3	5.4	<i>Collosphaera reynoldsi</i>
			6.0	6.1	6.1	<i>Cyrtocapsella japonica</i>
			6.8	7.0	6.9	<i>Eucyrtidium inflatum</i>
	Late		7.3	7.4	7.4	<i>B. L. magnacornuta</i>
			9.0	9.0	9.1	<i>T. L. japonica</i>
			10.0	10.1	10.1	<i>B. L. magnacornuta</i>
			11.7	11.8	11.8	<i>RD C. tetrapera</i>
			12.5	12.5	12.6	<i>B. E. inflatum</i>
			15.3	15.3	15.3	<i>Dendrospyrus sakaii</i>

第1図 北太平洋地域の新第三紀放射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). 北西太平洋の放射虫イベントの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の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 tetrapera*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(*Calocyclus motoyamai*, *Cycladophora funakawai*, *Cycladophora teocalli*, *Dendrospyrus eurus*, *Dendrospyrus 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パ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 weddellium*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系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降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降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。

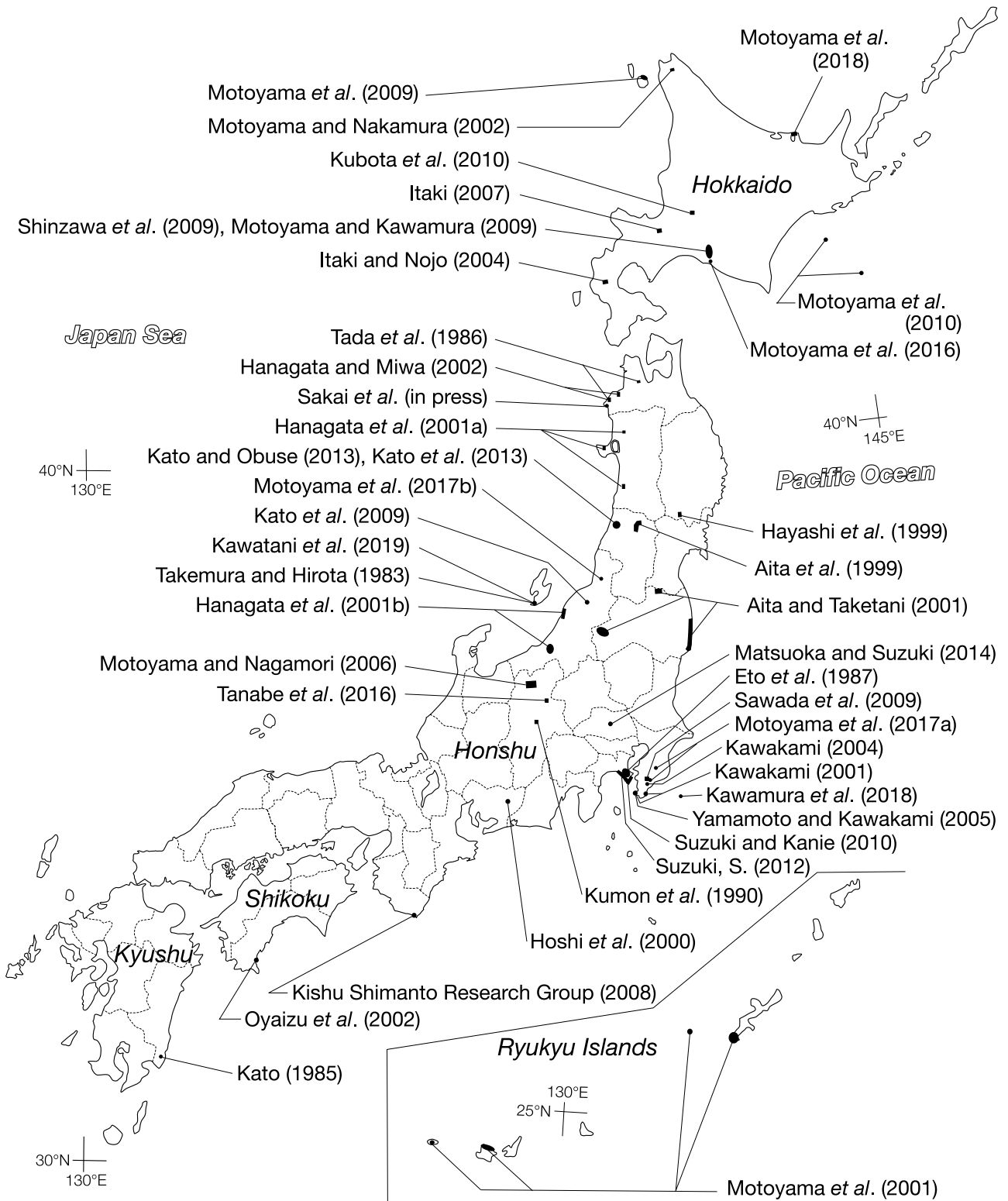
7. その他

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 Swedish 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*Spirosigmoinella 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垂層群の地質, 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) 放散虫学のススム. 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 Björklund, 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 Micropaleontology*, **67**, 191–215.
- Kamikuri, S. (2010) New late Neogene radiolarian species from the middle to high latitudes of the North Pacific. *Rev. Micropaleontology*, **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 Micropaleontology*, **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 synchronicity 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 polycystine 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 biostratigraphy, 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・五十嵐滯・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) 四国西部の四十十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.
- 曾野明洋・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, シャッキークライズ). *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)