



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

地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 74 No. 1 2023



 **産総研** 地質調査総合センター 

令和5年

論文

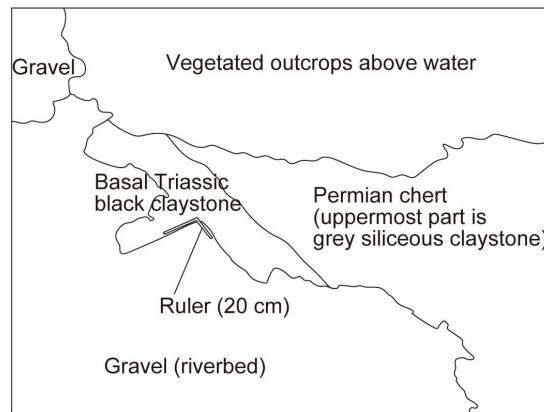
Geology and accretionary age of the Otori Unit, North Kitakami Belt

MUTO Shun, ITO Tsuyoshi and MURAYAMA Masafumi 1

講演要旨

第34回 地質調査総合センターシンポジウム「防災・減災に向けた産総研の地震・津波・火山研究
—東日本大震災から10年の成果と今後—」講演要旨集

第34回地質調査総合センターシンポジウム事務局 41



表紙の写真

大越沢サブユニット中の深海ペルム系—三畳系境界(上図は見取り図)

本報告で対象とした北部北上帯大鳥ユニットの構造的下部には、ペルム系—三畳系境界を含む遠洋深海堆積岩層が存在する。境界層準は黒色粘土岩や珪質粘土岩からなり変形が集中しやすいため、日本列島に広く分布するジュラ紀付加体の中でも数カ所しか露頭が確認されていない。大鳥ユニットでは、特異的にペルム紀—三畳紀境界の黒色粘土岩が広範囲に連続して観察され、写真中の折壁川沿いの露頭もその岩相が見られる例である(論文中の地質図からは南に外れる)。この地域に典型的なように沢岸でも植生などにより観察が妨げられる一方、水底ではペルム系チャートに三畳系基底の黒色粘土岩が整合的に累重する様子が見とれる。

(写真・文：武藤 俊)

Cover Figure

Deep-sea Permian–Triassic boundary in the Okoshizawa Subunit (Above figure is an outline sketch)

The Otori Unit of the North Kitakami Belt studied in this report includes in its structurally lower part pelagic deep-sea strata that includes the Permian–Triassic boundary. The boundary interval is composed of black claystone and siliceous claystone in which deformation of the deep-sea strata is typically concentrated. Therefore, this boundary is only known from several outcrops in Japan, despite the wide distribution of Jurassic accretionary complexes. The Otori Unit is an exceptional case, in which the Permian–Triassic boundary black claystone is traced laterally over a wide area. The outcrop along the Orikabe River in the photograph is one of the outcrops where this lithofacies is observed. As typical of this area, rock exposure is obscured by vegetation even by the streams, but a conformable relationship between Permian chert and basal Triassic black claystone is clearly seen underwater.

(Photograph and Caption by MUTO Shun)

Geology and accretionary age of the Otori Unit, North Kitakami Belt

MUTO Shun^{1,*}, ITO Tsuyoshi¹ and MURAYAMA Masafumi^{2,3}

MUTO Shun, ITO Tsuyoshi and MURAYAMA Masafumi (2023) Geology and accretionary age of the Otori Unit, North Kitakami Belt. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74(1), p. 1–40, 13 figs, 2 tables, 5 plates and 3 appendices.

Abstract: The North Kitakami Belt in Northeast Japan mainly comprises accretionary complexes formed during the Jurassic to earliest Cretaceous. The accretionary complex of the North Kitakami Belt is less studied compared to the age-equivalent accretionary complexes in Southwest Japan. Here, we provide additional data on the accretionary complex formerly classified as the Otori Unit, distributed in the northeastern part of the North Kitakami Belt in the upper reaches of the Akka River in Iwate Prefecture. Based on detailed field mapping, we clarified that the Otori Unit is composed of the structurally lower coherent facies of chert and siliceous mudstone (Okoshizawa Subunit) and the structurally upper mixed facies of mudstone, sandstone, chert and minor basaltic rocks (Osakamoto Subunit). Manganese nodules from siliceous mudstone within the Okoshizawa Subunit yielded radiolarians indicating the Bathonian (upper Middle Jurassic). Detrital zircon grains from sandstone in the Osakamoto Subunit has a youngest age of ~170 Ma (YC1 σ : 171.8 ± 2.4 Ma; YSG: 170.9 ± 3.8 Ma). Based on the radiolarian and detrital zircon ages, the accretionary age of the Otori Unit is estimated as the Bathonian. Our new data were also considered to discuss the correlation between the North Kitakami Belt and the Southern Chichibu Belt in Southwest Japan. The Otori Unit corresponds to the Ohirayama Unit of the Southern Chichibu Belt in structural position, and the two units are similar in being a mixed facies and have overlapping accretionary age. However, the Otori Unit lacks limestone and has a considerably younger age for siliceous mudstone, suggesting that the two units may not be strictly correlative.

Keywords: Akka River, Bathonian, conodont, detrital zircon, Jurassic accretionary complex, North Kitakami Belt, radiolarian

1. Introduction

The North Kitakami Belt in Northeast Japan mainly consists of an accretionary complex that was formed during the Jurassic to earliest Cretaceous (the term “Jurassic accretionary complex” is used hereafter) (Ehiro *et al.*, 2005; Kojima *et al.*, 2016). The accretionary complex of the North Kitakami Belt was at first regarded as deep-sea facies deposited during the Paleozoic based on fossils in limestone (Minato, 1950; Onuki, 1956; Yoshida and Katada, 1964). Following the finding of Mesozoic fossils from the eastern part of the northern Kitakami Mountains, the term “North Kitakami Belt” was used by some researchers to refer to the western “Paleozoic” part (e.g., Shimazu *et al.*, 1970). It was assumed that the

age of strata becomes younger towards the east, due to migration of the depocentre from west to east (Sugimoto, 1969, 1974, 1980; Yamaguchi *et al.*, 1979; Yamaguchi, 1981). However, Triassic conodonts discovered from throughout the northern Kitakami Mountains showed that the then adopted geological model was no longer plausible (Toyohara *et al.*, 1980; Murai *et al.*, 1981, 1983).

Subsequently, researchers attempted to reestablish the geology of the northern Kitakami Mountains as an accretionary complex based on the concept of plate tectonics (Minoura, 1985; Okami and Ehiro, 1988). Radiolarians obtained from mudstone and nodules therein indicated that the time of accretion was Jurassic to earliest Cretaceous (Fig. 1; Minoura and Tsushima, 1984; Matsuoka, 1987; Matsuoka and Oji, 1990; Nakae and Kamada, 2003; Suzuki and Ogane, 2004). Ehiro

¹ AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation

² Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, Kochi, Japan

³ Department of Marine Resource Science, Faculty of Agriculture and Marine Science, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, Kochi, Japan

* Corresponding author: MUTO, S., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: s-muto@aist.go.jp

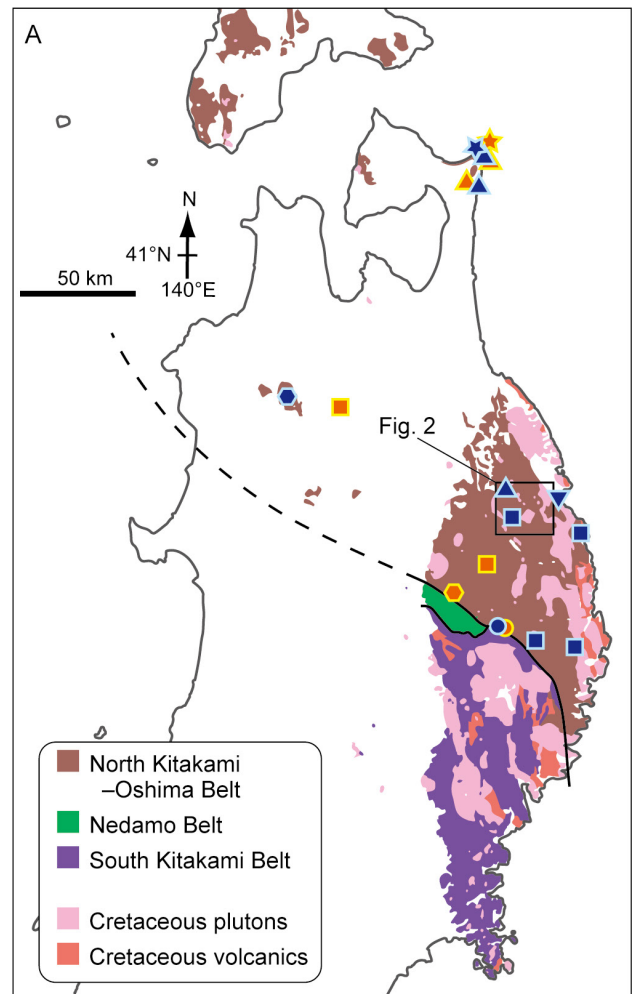
et al. (2005) redefined the North Kitakami Belt as the geotectonic division for the area where the Jurassic accretionary complex is distributed in the northern Kitakami Mountains, and this definition is widely used today (Isozaki *et al.*, 2010; Kojima *et al.*, 2016; Ehiro *et al.*, 2017) (Fig. 1A).

The Jurassic accretionary complex of the North Kitakami Belt has been compared with accretionary complexes in Southwest Japan, in particular, that of the Southern Chichibu Belt (Yamakita and Otoh, 2000; Otoh and Sasaki, 2003; Ehiro *et al.*, 2008; Takahashi *et al.*, 2016). While the lithofacies and age of the Southern Chichibu Belt has been extensively studied (Matsuoka *et al.*, 1998 and references therein), the North Kitakami Belt is less well studied. This is partly due to the difficulty of obtaining radiolarians from rocks of the North Kitakami Belt, which are generally affected by Cretaceous plutons that intrude throughout the Kitakami Mountains. Although detrital zircon chronology has recently been adopted to estimate the time of accretion (e.g., Uchino, 2017, 2019; Ueda *et al.*, 2018; Fig. 1), age data remain scarce compared to the Jurassic accretionary complex in Southwest Japan.

The first author (Muto, S.) has conducted surveys to produce the 1: 50,000 geological map of the “Kado” District for the Quadrangle Series of the Geological Survey of Japan, AIST. During the investigation, we obtained new age data of radiolarians and detrital zircons. In this study, we present new information on the lithology and age of the accretionary complex distributed in the northeast part of the North Kitakami Belt in the upper reaches of the Akka River. Based on field observation and mapping, we here update the tectonostratigraphic divisions in the study area. Furthermore, we attempt regional correlations between the North Kitakami Belt and the Southern Chichibu Belt on the basis of lithology and age data.

2. Geological outline

The studied area is in the upper reaches of the Akka River in Iwazumi Town, Iwate Prefecture, Japan. An area including part of the present study area was mapped by Sugimoto (1974) (Fig. 2). Subsequently, Takahashi *et al.* (2016) reassessed the geological division by Sugimoto (1974) based on the concept of subduction-accretion and recognized four tectonostratigraphic units bounded by thrusts. These are, in structurally descending order, the Otori Unit (coherent facies; chert and mudstone), the Seki Unit (coherent facies; chert, mudstone and sandstone), the Takayashiki Unit (mixed facies; mudstone, chert, sandstone, basalt and limestone) and the Akka Unit (coherent facies; basalt and limestone) (Fig. 2). Recently, as a result of surveys mainly in the Rikuchu-Seki District located north of our study area, Nakae *et al.* (2021) proposed that the Seki Unit should be divided into two tectonostratigraphic units; the upper Kassenba Complex (coherent facies; chert, mudstone and sandstone) and the lower Seki Complex (coherent facies; chert and mudstone)



B

Estimated accretionary age

		Rads	Zircon
Cretaceous	Early	★	★
	Late	▲	▲
Jurassic	Middle	■	■
	Early	●	●
Triassic	Late	●	●

Fig.1 Geology of the basement rocks of northern Tohoku Region (modified from Geological Survey of Japan, AIST, 2020). Age data of the accretionary complex are based on the compilation by Uchino and Suzuki (2020). Rads: radiolarian fossils.

(note that “Complex” in Nakae *et al.* (2021) is equivalent to “Unit” in Takahashi *et al.* (2016)) (Fig. 2). Nakae *et al.* (2021) also combined the Takayashiki and Akka units of Takahashi *et al.* (2016) as the Takayashiki Complex and defined an additional tectonostratigraphic unit, the Kayamori Complex, structurally below the Takayashiki Complex (Fig. 2).

The present study targets the Otori Unit, the Seki

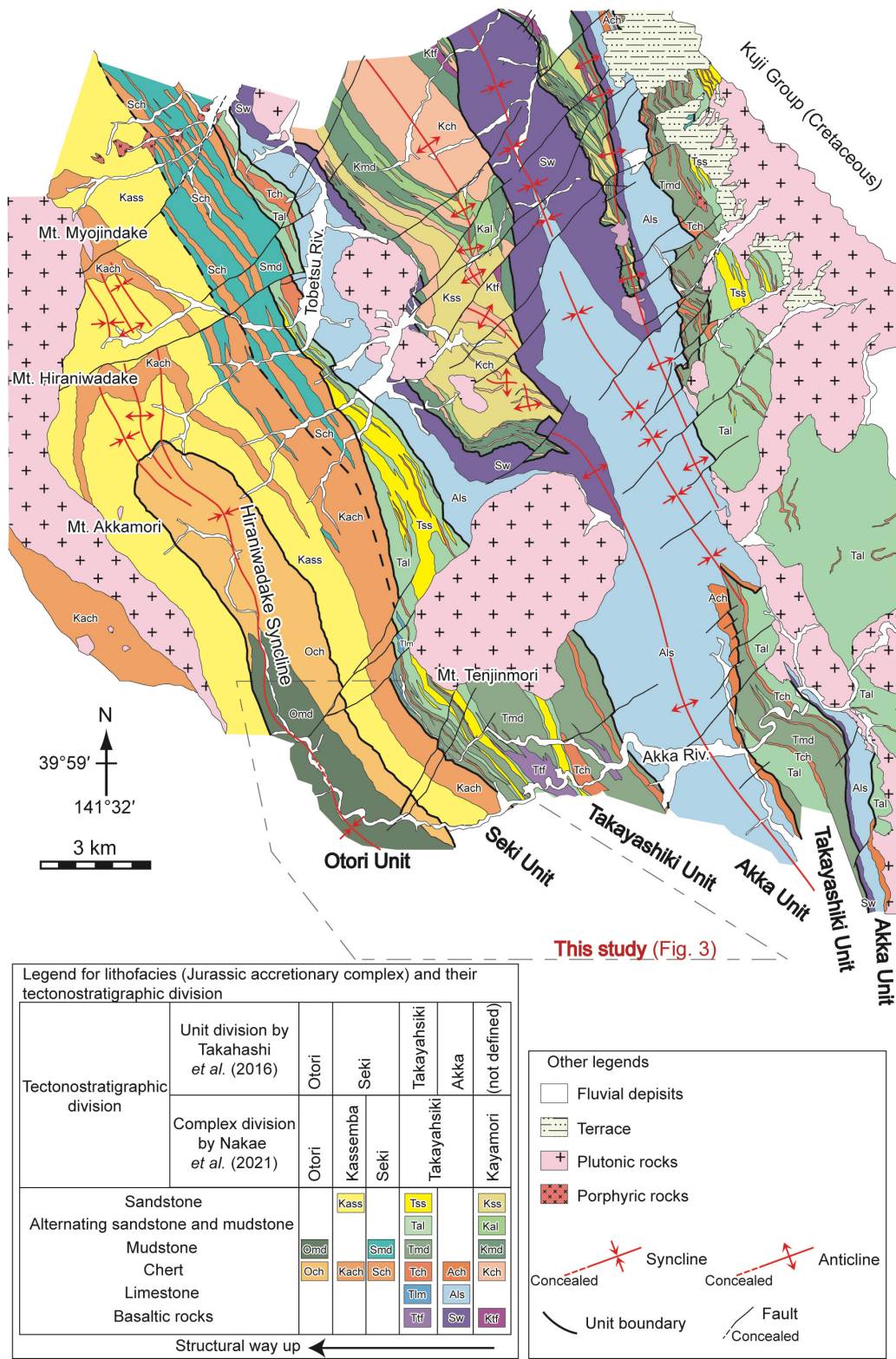


Fig.2 The geology of the North Kitakami Belt in the Akka–Kuji area (modified from Ehira *et al.*, 2008, a simplified version of Sugimoto, 1974; partly corrected according to the original figure in Sugimoto, 1974). Unit boundaries (thrust faults) are based on the tectonostratigraphic unit division by Takahashi *et al.* (2016). The boundary between the Seki and Kassemba complexes of Nakae *et al.* (2021) (not classified as a unit boundary in Takahashi *et al.*, 2016) is shown in broken thick lines. The Seki Formation east of the Akka Unit in the northeast part (sensu Sugimoto, 1974) is ascribed to the Takayashiki Unit according to Nakae *et al.* (2021). The study area of this paper is shown in broken lines. The tectonostratigraphy and the legend and labels for lithofacies of the Jurassic accretionary complex is explained in the bottom left diagram.

Unit and the western margin of the Takayashiki Unit of Takahashi *et al.* (2016) (corresponding respectively to the Otori Complex, the Kassenba and Seki complexes and the western margin of the Takayashiki Complex of Nakae *et al.*, 2021). Below, we will conform to the nomenclature by Takahashi *et al.* (2016), since the present study area overlaps with the area studied therein.

3. Methods

3.1 Microfossils

We investigated one mudstone sample, four siliceous mudstone samples and two manganese nodule samples for extraction of radiolarians (Table A1). Radiolarians were obtained by two different acid treatment depending on the lithology of the sample. Mudstones and siliceous mudstones were crushed into cm-size pieces and treated with 5 % hydrofluoric (HF) acid for 24 h. Manganese nodules were crushed in the same way and treated with 36 % hydrochloric (HCl) acid for 24 h. The residues were rinsed, dried and prepared into slides. Some radiolarians were picked from the residue for photography by a scanning electron microscope (SEM; JSM-6610LV, JEOL GmbH) at the Geological Survey of Japan, AIST.

We also obtained conodonts from chert by observation of cleaved rock pieces under a stereoscopic microscope (the “chip method”; Muto *et al.*, 2018). Well-preserved specimens were imaged by X-ray microtomography using an X-ray microscope (ZEISS Xradia 410 versa) equipped with a L8121-03 SEL X-ray source of Hamamatsu Photonics K.K. at the Center for Advanced Marine Core Research (Kochi Core Center), Kochi University, following the procedures in Muto *et al.* (2021).

3.2 Detrital zircon chronology

Detrital zircons were analyzed for two sandstone samples (Table A1). Zircons were obtained from sandstone samples by Kyoto Fission-Track Co. Ltd. Zircon U–Pb dating was conducted at the Hirata-Lab. of the University of Tokyo by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The LA part was CARBIDE (LIGHT CONVERSION) and the ICP-MS part was New Plasma II (Nu instruments). Ablation pit size was 10 μm , energy density was 3.2 J/cm², and pulse repetition rate was 10 Hz. Laser ablation was conducted on polished sections of zircons embedded in PFA Teflon sheets. Analyses were performed after one-shot cleaning. The details of the analysis are described in Iizuka and Hirata (2004) and Hirata *et al.* (2005). Primary standard was the Plešovice zircon with a ²³⁸U–²⁰⁶Pb age of 337.13 \pm 0.37 Ma (Sláma *et al.*, 2008). Secondary standard was the standard zircon 91500 with a ²³⁸U–²⁰⁶Pb age of 1062.4 \pm 0.4 Ma (Wiedenbeck *et al.*, 1995) and zircon OD-3 with a ²³⁸U–²⁰⁶Pb age of 33.04 \pm 0.10 Ma (Iwano *et al.*, 2013). U–Pb age data with ²³⁸U–²⁰⁶Pb age/²³⁵U–²⁰⁷Pb age ratio between 90 % and 110 % were regarded as concordant age data, following a preceding study on detrital zircons

from clastic rocks within a Jurassic accretionary complex (Tokiyama *et al.*, 2019). The weighted mean age of the youngest cluster comprising two or more grains (YC1 σ ; Dickinson and Gehrels, 2009) and the age of the youngest single grain (YSG) were considered for estimation of accretionary age.

4. Geology of the Otori Unit

The Otori Unit (Takahashi *et al.*, 2016) was recognized between the conspicuous chert–clastic sequence of the Seki Unit in the east and the western edge of the study area (Fig. 3). The western limit of the unit cannot be defined in the present study. Based on lithological assemblages, we subdivided the Otori Unit into two subunits: the Okoshizawa and Osakamoto subunits in structurally ascending order. These two subunits mostly correspond to the Otori and Osakamoto formations of Sugimoto (1974), respectively. Both Takahashi *et al.* (2016) and Nakae *et al.* (2021) regarded that these two formations compose a single tectonostratigraphic unit composed of stacked up slices of coherent strata. However, only a minor portion of the Osakamoto Formation (*sensu* Sugimoto, 1974) was mapped by the two studies. Our investigation showed that the Osakamoto Formation is a mixed facies and is structurally different from the mostly coherent Otori Formation. Therefore, we differentiate these two as subunits.

4.1 Okoshizawa Subunit

Definition—The Okoshizawa Subunit (named after “Okoshizawa”, Japanese for Okoshi Stream) is the dominantly coherent facies of mainly chert and siliceous mudstone that occupies the structurally lower part of the Otori Unit (Figs. 3–5). The structural base of the subunit is defined at the base of mudstone dominant lithofacies which lies structurally above the top of the bedded sandstone of the Seki Unit. The structural top of the subunit is defined at the top of the chert–siliceous mudstone sequence that can be traced laterally for over 10 km from Okoshi Stream to the Orikabe River. The mudstone-dominant lithofacies with a narrow distribution at the structural base of the Otori Unit and the mixed to broken facies of mudstone and sandstone in the north to southeast of Otori is included in this subunit. The Okoshizawa Subunit mostly corresponds to the Otori Formation of Sugimoto (1974).

Type locality—The upper reaches of Okoshi Stream (Fig. 4).

Lithofacies—This subunit is composed largely of structurally repeating chert and siliceous mudstone. Mixed to broken facies of mudstone and sandstone is present in the southeast part of the subunit. In addition, chert breccia, although limited in distribution, occurs characteristically around Okoshi Stream in the structurally lower part. Below, the lithology of the Okoshizawa Subunit is explained generally in the order of abundance.

Chert is bedded and is mainly grey (Fig. 6A). It is

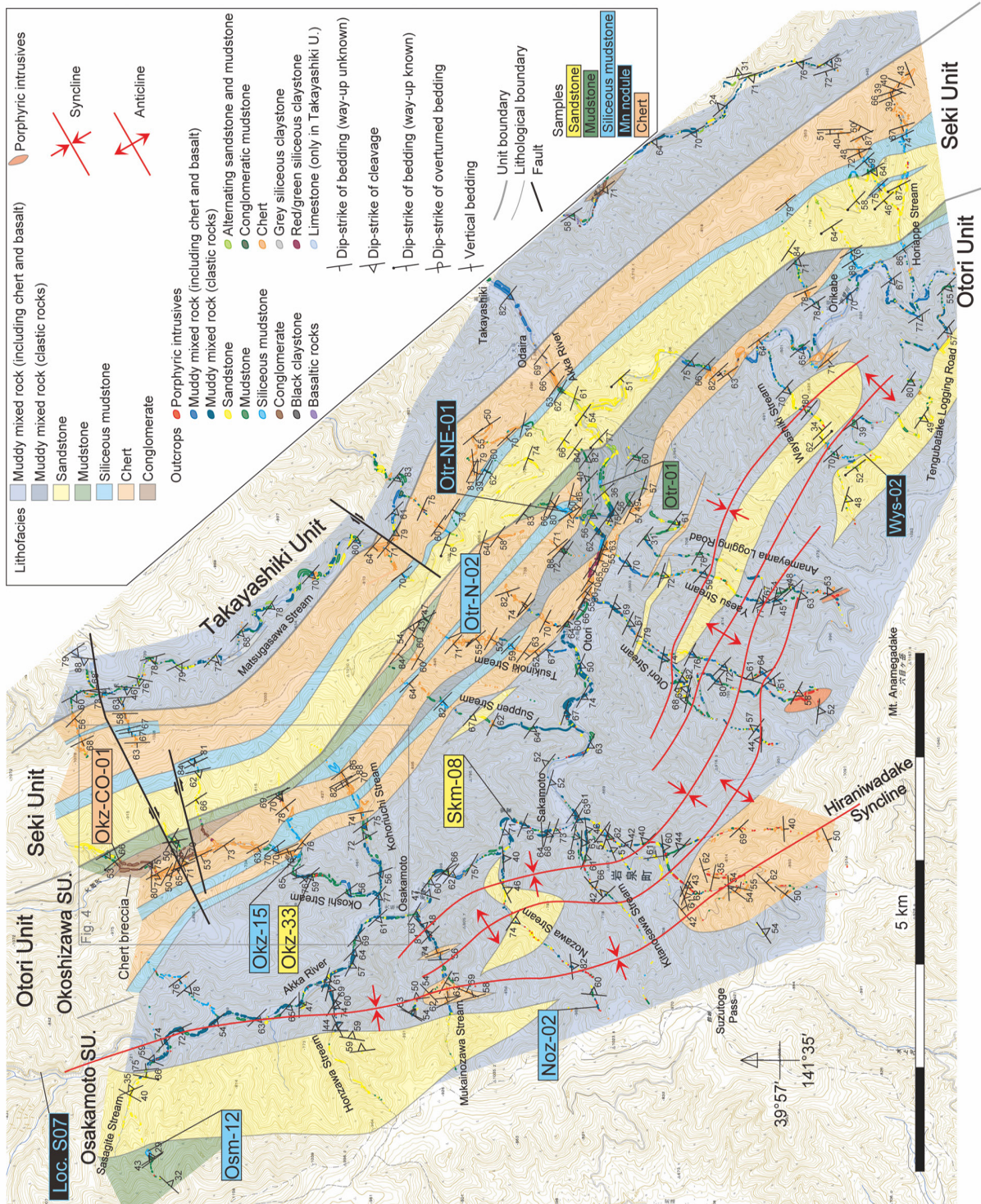


Fig. 3 Geological map of the studied area. Base map from 1: 25,000 topographic map “Akkamori”, “Rikuchū-Itsuikaichi”, “Hashigami” and “Akka” by the Geospatial Authority of Japan. SU.: Subunit.

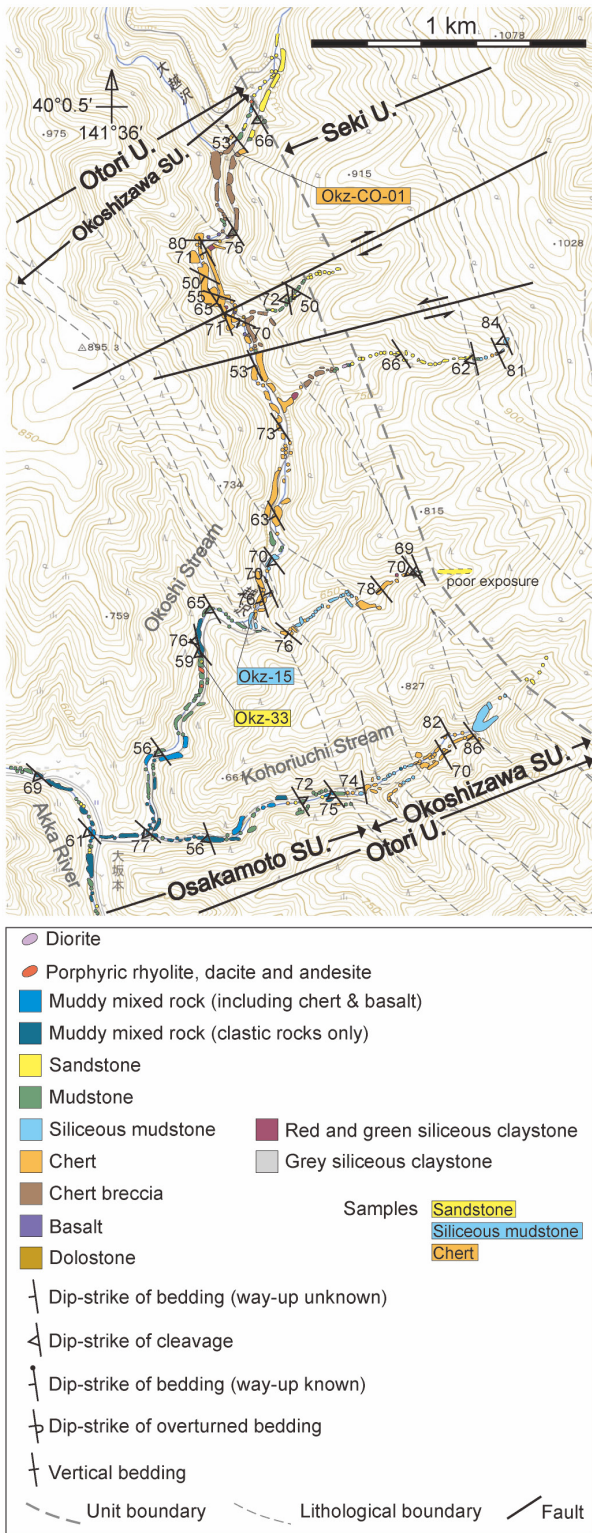


Fig. 4 Geological traverse map around Okoshi Stream. Base map from 1: 25,000 topographic map “Akkamori” and “Rikuchu-Itsukaichi” by the Geospatial Authority of Japan. U.: Unit; SU.: Subunit. Str.: Stream; Riv.: River.

accompanied at the basal part by basaltic volcanoclastics, dolostone partly interbedded with greenish grey chert (Fig. 6D), green siliceous claystone (Fig. 6E) and red siliceous claystone (Fig. 6F). Within the chert sequence, a characteristic horizon of black carbonaceous claystone is present (Fig. 6G), which is known to be the Permian–Triassic boundary (Ehiro *et al.*, 2008; Takahashi *et al.*, 2009). In some places, the black claystone is overlain by grey siliceous claystone. In thin section, chert is mostly made up of microcrystalline quartz matrix and radiolarian tests that are recrystallized to various degrees (Fig. 7A). Dolostone is composed of euhedral dolomite with minor microcrystalline quartz matrix (Fig. 7C, D). Dolostone also contains irregular-shaped basaltic rock fragments (Fig. 7D). Basaltic volcanoclastics are composed of basaltic rock fragments and tuff (Fig. 7E). The former partly shows chilled-margins and vesicular texture implying fragmented lava.

Siliceous mudstone is light grey and weakly to strongly bedded (Fig. 6B). It commonly forms steep and jagged cliffs like chert, but can be distinguished from the latter by the tendency to split parallel to or at a low angle to the bedding plane when struck with a hammer. In thin section, it is composed of clay minerals, microcrystalline quartz and abundant radiolarian tests (Fig. 7B). Silty laminae of quartz and micaceous minerals may occur.

Chert breccia is grey, completely consolidated and its jagged outcrop surface looks like that of chert. On fresh surfaces, angular and poorly sorted chert pebbles are evident. In some outcrops, chert breccia was found in contact with mudstone and conglomeratic mudstone without a slip plane or any apparent parting separating them (Fig. 6I). In thin section, chert breccia is composed almost entirely of poorly sorted angular chert pebbles and granules that are recrystallized to various degrees (Fig. 7F). The chert pebbles and granules are interlocked and no matrix is observed. Rare mudstone clasts may be present.

Ehiro *et al.* (2008) ascribed this chert breccia to the Kassenba Formation (Sugimoto, 1974), which corresponds to the upper part of the Seki Unit. However, it is included in the Otori Unit based on the following observations. First, the chert breccia is structurally underlain by mudstone in Okoshi Stream, which in turn is underlain by bedded sandstone of the Seki Unit (Figs. 3, 4, 5). Second, the chert breccia is associated with conglomeratic mudstone, which is separated from bedded sandstone of the Seki Unit by chert in the area north of Otori (Figs. 3, 5). In both cases, the Otori–Seki unit boundary should be placed at the top of the bedded sandstone, because the upper part of the Seki Unit is composed almost exclusively of bedded sandstone. Thus, the boundary is below the chert breccia.

Sandstone occurs in the southeast part of the subunit, and is either massive or bedded. It ranges from bodies that are 100 m thick to mm-size fragments in mudstone matrix.

Mudstone is black or dark grey and generally shows weak cleavage. It occurs mainly in two distributions: in the northern part of the subunit at its structural base

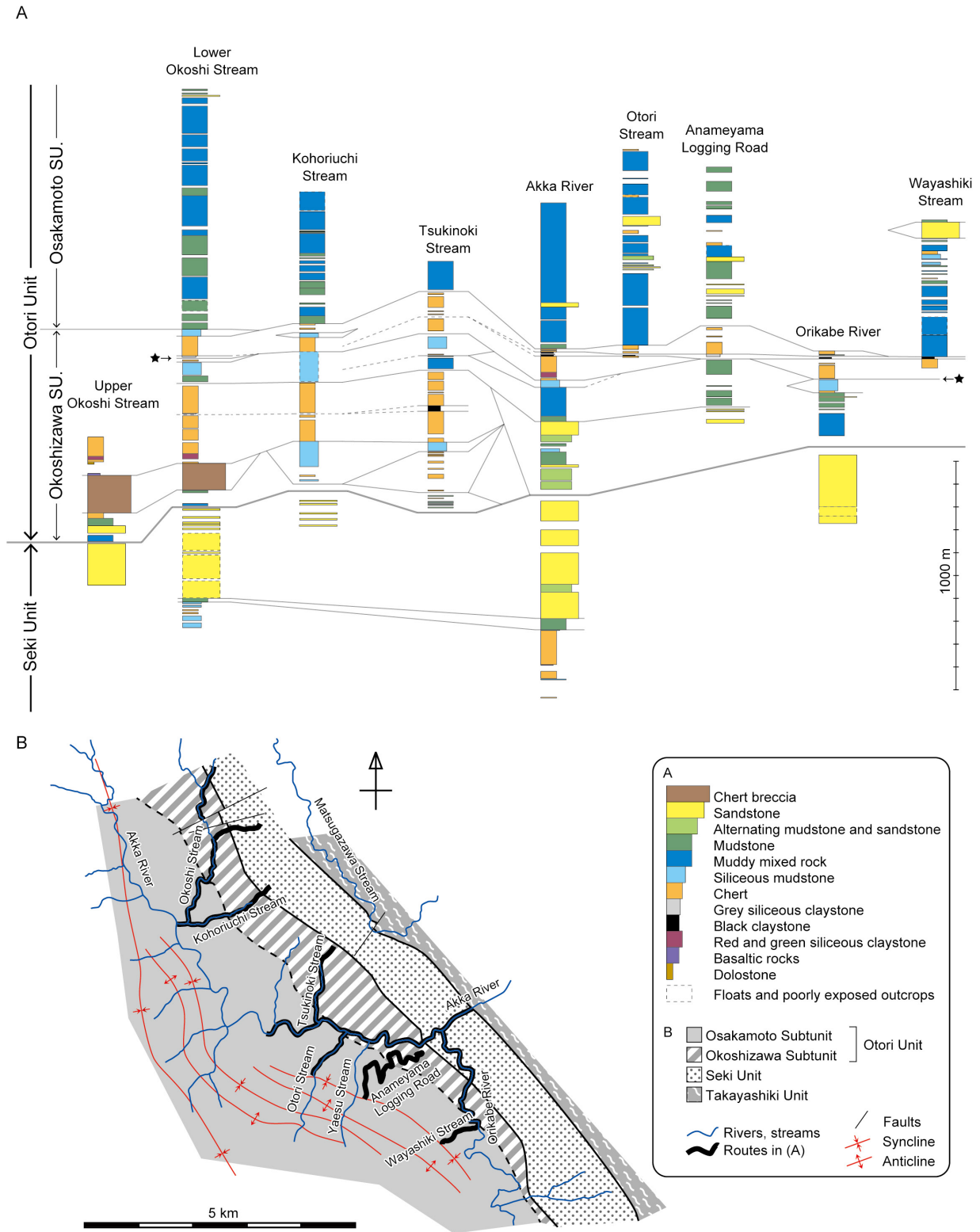


Fig. 5 (A) Tectonostratigraphic logs of the studied area and (B) index map (simplified version of Fig. 3). SU.: Subunit. The black star in A indicates the thrust referred to in p.10.

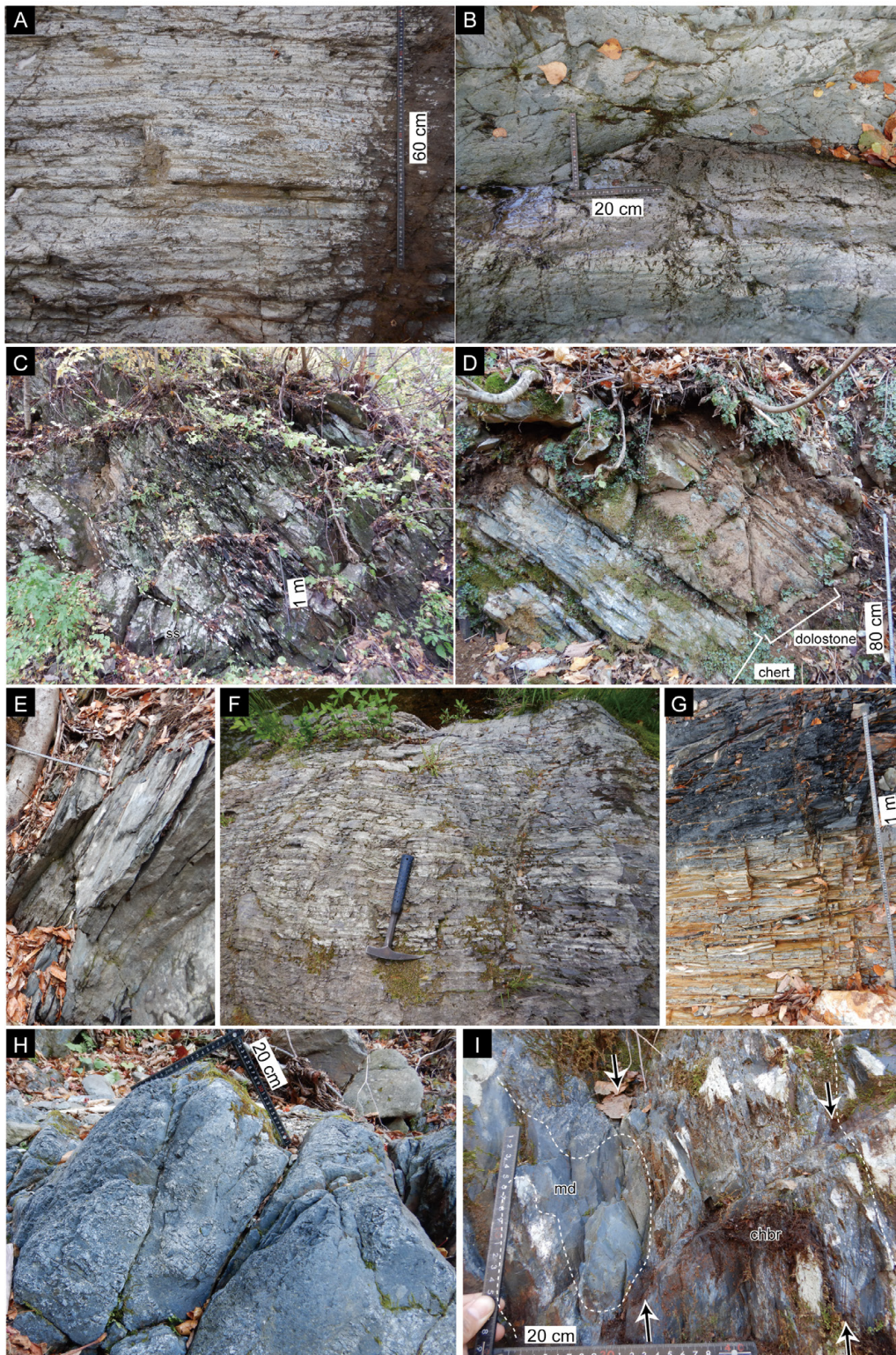


Fig. 6 Outcrop photographs of the main lithologies of the Okoshizawa Subunit. (A) Bedded chert. (B) Siliceous mudstone. (C) Mudstone with broken sandstone bed (ss). (D) Alternating chert and dolostone. (E) Green siliceous claystone. (F) Red to brownish red siliceous claystone. The hammer is 33 cm long. (G) Sequence of grey bedded chert, grey siliceous claystone and black carbonaceous claystone at the Permian–Triassic boundary. (H) Chert breccia. (I) Boundary between chert breccia (chbr) and mudstone (md) (thin broken line). Cleavage planes (partly parallel to lamination in the bottom right) are indicated by arrows. See Table A2 for location.

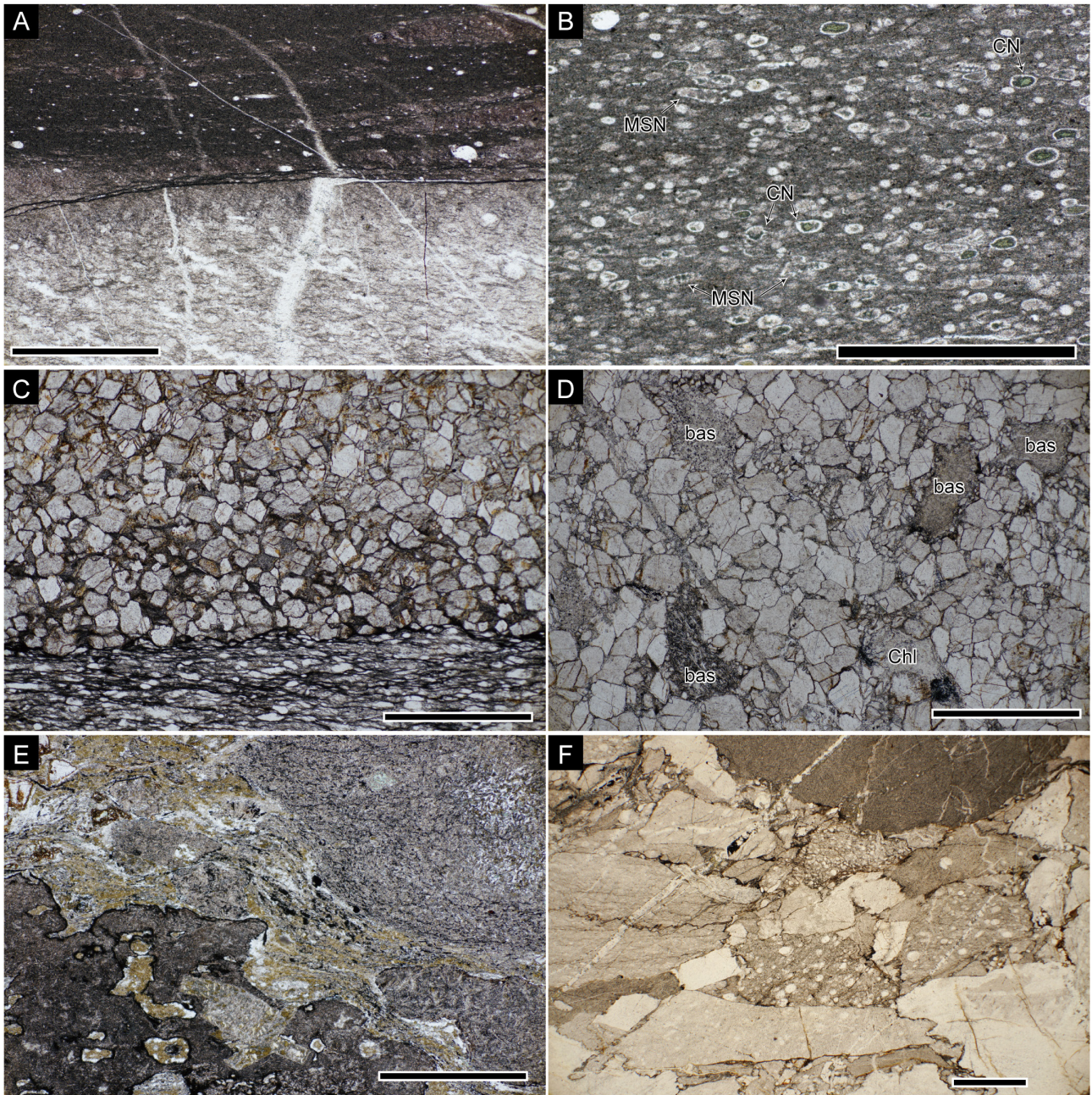


Fig. 7 Thin section micrographs of the main lithologies of the Okoshizawa Subunit. All pictures were taken with transmitted plane-polarized light. (A) Chert (bottom) and siliceous claystone (top) of bedded chert. (B) Siliceous mudstone including radiolarian fossils. CN: closed Nasselaria; MSN: multi-segmented Nasselaria. (C) Dolostone layer (top) with chert layer. (D) Dolostone with basaltic rock fragments (bas) and chlorite aggregates (Chl). (E) Basaltic volcanoclastic rock. (F) Chert breccia. Scale bars are 1 mm.

and in the southeast part of the subunit (Fig. 3). In the former, it is accompanied by fine sandstone and is partly conglomeratic. In the latter, it occurs as massive bodies, matrix including sandstone and beds alternating with sandstone.

Distribution—The Okoshizawa Subunit is distributed in a NW–SE trending area from Okoshi Stream to Oriabe settlement. It is thicker in the northwestern to central part

(800–950 m) compared to the southwestern part (400 m) (Fig. 5). According to Sugimoto (1974) and Nakae *et al.* (2021), this subunit extends further north for about 6 km, where it forms a syncline along with the Osakamoto Subunit (the Hiraniwadake Syncline).

Structure—Overall, the structure of the Okoshizawa Subunit deduced from orientation of bedding planes and cleavage planes is homoclinal with a NW–SE strike and

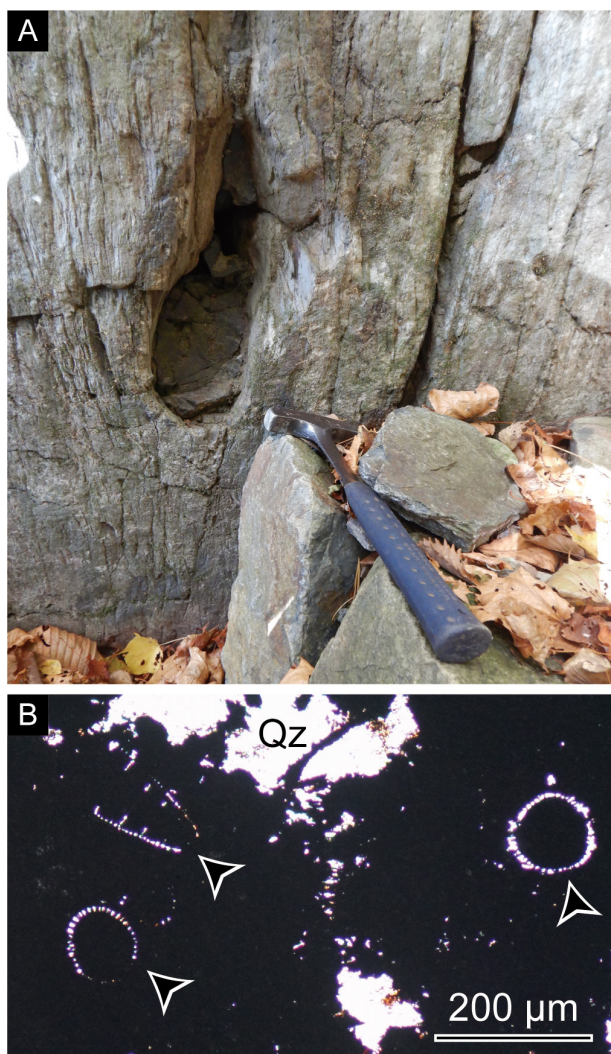


Fig. 8 Outcrop photograph (A) and thin section micrograph (B) of the nodule sample (Otr-NE-01) that yielded radiolarians. The hammer in the bottom right of (A) is 33 cm long. Arrows in (B) indicate well-preserved radiolarians. Scale bar in (B) is 200 μm . Qz: quartz cement.

50–70° dip to the SW. Chert and siliceous mudstone form a coherent sequence and is repeated by thrusts in the northern to central part of the subunit. The thrusts and related faults cut the bedding of the chert–siliceous mudstone sequence at low angles. For example, the thrust at the base of the structurally highest chert (denoted by the black star in Fig. 5) runs above the Permian–Triassic black claystone horizon in Okoshi Stream, is well below the black claystone horizon in Otori (Akka River in Fig. 5A), moves up above the black claystone horizon in the Aname-yama Logging Road and moves back below the black claystone in Orikabe River (Fig. 5A). Due to the nature of these faults, the apparent thickness of chert and siliceous claystone in the Okoshizawa Subunit is laterally variable (Fig. 3).

Age—Carboniferous to Triassic conodonts have been reported from chert (Toyohara *et al.*, 1980; Ehiro *et al.*, 2008; Takahashi *et al.*, 2016; Muto *et al.*, 2021), although not many specimens have been illustrated. Suzuki *et al.* (2007) reported radiolarians of the *Striatojaponocapsa plicarium* Zone (JR4 of Matsuoka and Ito, 2019; Bajocian to early Bathonian, Middle Jurassic) from manganese nodules within siliceous mudstone.

We obtained conodont fossils from chert (Okz-CO-01) in the lowermost part of the Okoshizawa Subunit. This chert is directly in contact with chert breccia, but their relationship was not clear due to poor outcrop condition. They are structurally below a chert-dominant sequence of Paleozoic age (Ehiro *et al.*, 2008; Muto *et al.*, 2021). The conodonts obtained in this study are *Misikella longidentata*, *Paragondolella cf. inclinata*, *Paragondolella polygnathiformis* and *Sephardiella mungoensis* (Fig. 11). The cooccurrence of these conodonts indicates that the chert is earliest Carnian in age (Chen *et al.*, 2016). Therefore, this chert and accompanying chert breccia form a thrust sheet structurally underlying Paleozoic chert exposed around Okoshi Stream. It is inferred that the chert breccia originated from the collapse of Triassic chert, possibly on the trench-slope.

We obtained well-preserved radiolarians from a black manganese nodule (sample Otr-NE-01) within grey siliceous mudstone (Fig. 8A). In thin section, the manganese nodule contains radiolarians that retain microscopic ornamentations (Fig. 8B). The radiolarians include *Diacanthocapsa? operculi*, *Eucyrtidiellum unumaense*, *Gongylothorax siphonifer*, *Japonocapsa fusiformis*, *Protunuma fusiformis* and *Striatojaponocapsa synconexa* (Plate 1). According to the detailed stratigraphic work by Hatakeda *et al.* (2007), *S. synconexa* occurs in the upper part of the *Striatojaponocapsa plicarium* Zone (JR4: Bajocian to lower Bathonian) to the lower part of the *Striatojaponocapsa conexa* Zone (JR5: upper Bathonian to Callovian) of Matsuoka and Ito (2019). Other species, such as *J. fusiformis* and *E. unumaense* occur in biozones JR4 and JR5 (Matsuoka, 1995; Matsuoka and Ito, 2019). Consequently, the radiolarian assemblage indicates the upper JR4 to lower JR5 (the Bathonian). Occurrences of *Diacanthocapsa? operculi*, *Gongylothorax siphonifer* and *Protunuma fusiformis* are consistent with the age assignment.

Two siliceous mudstone samples (Otr-N-02 and Okz-15) also yielded radiolarians, although preservation was rather poor (Plates 2, 3). Both samples yielded specimens that are possibly a species of Williriedellidae. According to O’Dogherty *et al.* (2017), the occurrence range of the family Williriedellidae is early Pliensbachian–Maastrichtian. Although the age of the siliceous mudstone samples cannot be determined in detail, it does not contradict with the age of the manganese nodule sample.

4.2 Osakamoto Subunit

Definition—The Osakamoto Subunit is the mixed

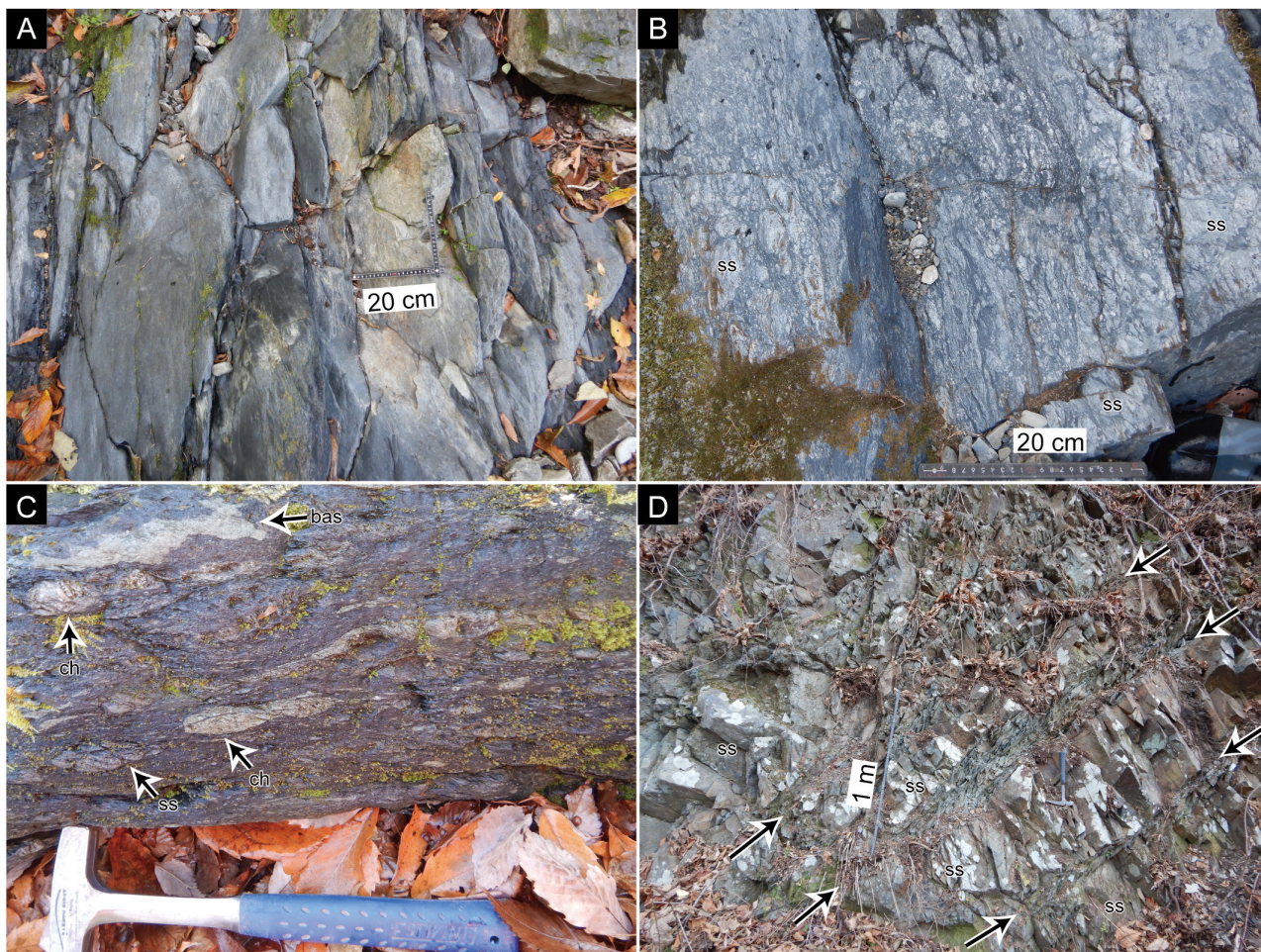


Fig. 9 Outcrop photographs of the main lithologies of the Osakamoto Subunit. (A) Mudstone with no visible rock fragments. (B) Mudstone with abundant sandstone fragments. (C) Muddy mixed rock including basaltic rocks (bas), chert (ch) and sandstone (ss) fragments. The hammer is 33 cm long. (D) Coherent sandstone (ss) with mudstone interbeds. Bedding planes are indicated by arrows. See Table A2 for location.

facies of mudstone, sandstone, siliceous mudstone, chert and rare basaltic rocks that occupies the structurally upper part of the Otori Unit. The structural base of the subunit is the same as the structural top of the Okoshizawa Subunit. The structural top of the subunit is not defined. This subunit includes the Osakamoto Formation of Sugimoto (1974). Sugimoto (1974) assigned the sandstone dominant lithofacies northwest of Osakamoto in the northwestern edge of the study area to the Kassenba Formation (i.e., the upper part of the Seki Unit in Takahashi *et al.*, 2016). However, the sandstone northwest of Osakamoto is mostly massive, while that of the Seki Unit is characterized by prominent bedding. In addition, we obtained radiolarians indicating the Bathonian (as detailed in the Age section) from siliceous mudstone in the northwest edge of the study area, structurally below the massive sandstone. Since the mudstone of the Seki Unit is likely to be the Kimmeridgian (middle Upper Jurassic) (Nakae and Kamada, 2003), it is more reasonable to include the massive sandstone and muddy rocks in the northwestern edge of the study area

in the Otori Unit.

Type locality—Along the Akka River near Osakamoto settlement and the lower reaches of Okoshi Stream (Fig. 4).

Lithofacies—The Osakamoto Subunit is a mixed facies dominantly composed of mudstone and muddy mixed rocks. Mappable bodies of sandstone and chert are present within this subunit. Below, the lithology of the Osakamoto Subunit is explained generally in the order of abundance.

Mudstone is black to dark grey and generally has weak scaly cleavage (Fig. 9A). Bedding planes and other sedimentary structures are usually not observed. In thin section, it is composed of clay minerals, quartz and feldspar grains and opaque matter (Fig. 10A). Sandstone fragments are present even in mudstone with no visible rock fragments at the outcrop. Opaque seams are developed within mudstone.

Two types of muddy mixed rocks are present within the Osakamoto Subunit. The first is composed of sandstone within mudstone matrix (Fig. 9B). The majority of the muddy mixed rock in the subunit is of this type. Sandstone

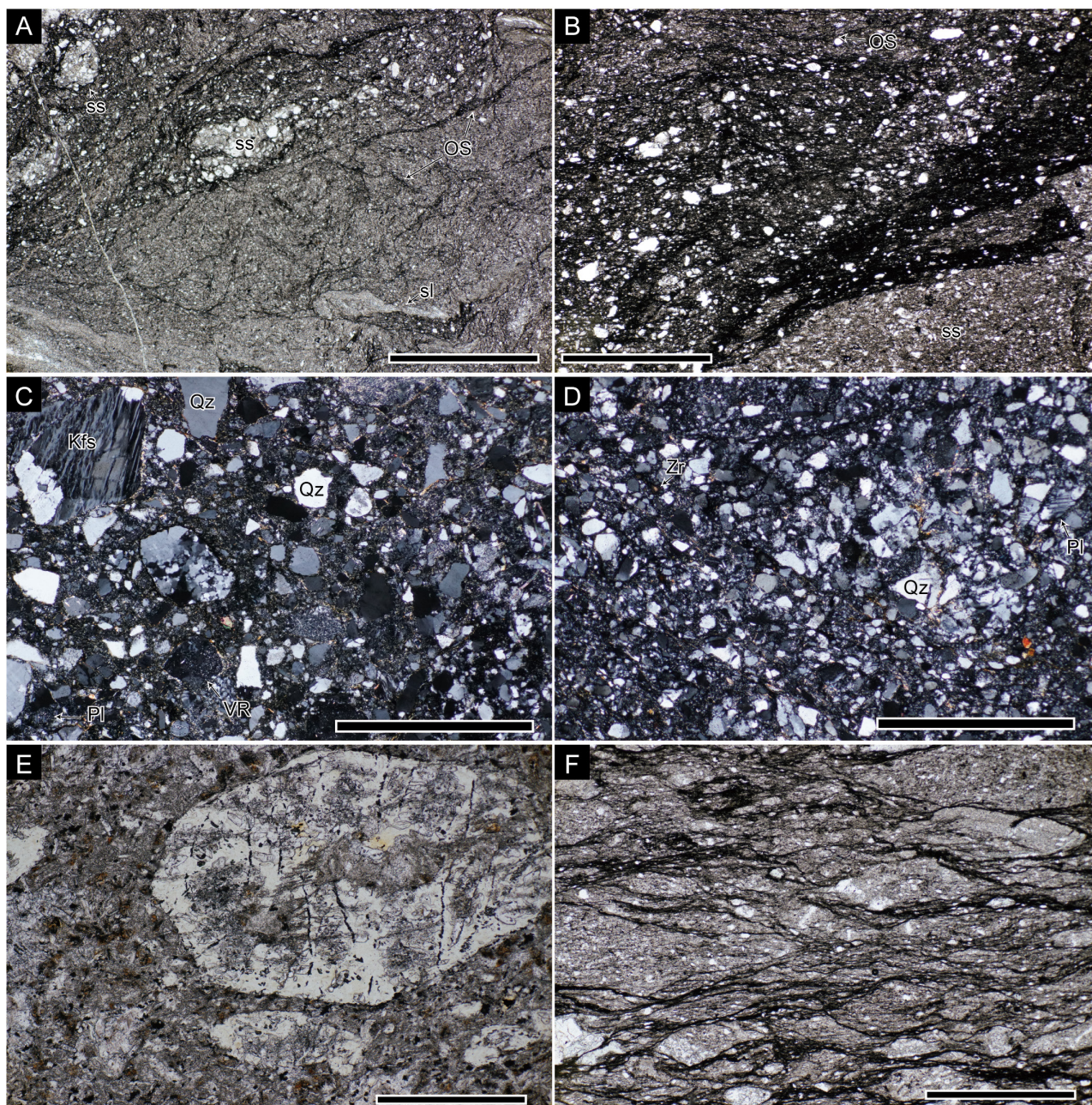


Fig. 10 Thin section micrographs of the main lithologies of the Osakamoto Subunit. (A) Mudstone with no observable rock fragments at the outcrop (same as Fig. 9A). OS: opaque seams; ss: sandstone; sl: fragmented sandstone laminae. (B) Mudstone with abundant sandstone fragments. (See above for abbreviations.) (C, D) Sandstone within muddy mixed rock. Kfs: K-feldspar in rock fragment; Qz: quartz; Pl: plagioclase; Zr: zircon; VC: volcanic rock fragment. (E) Altered basalt. A large octagonal section of a phenocryst (now replaced by chlorite and carbonate) occupies the top right of the picture. (F) Muddy mixed rock with sheared microstructures. (A), (B), (E) and (F) were taken with transmitted plane-polarized light. (C) and (D) were taken with cross-polarized light. Scale bars are 1 mm.

ranges from mm-size fragments to m-size blocks. The boundary between sandstone and mudstone matrix is either irregular or sharp and mixing may have occurred both before and after consolidation. In thin section, the components of this type of muddy mixed rock are the same as that of mudstone, except that the proportion of sandstone is much greater (Fig. 10B). The other type of

muddy mixed rock contains chert and minor basaltic rocks in addition to sandstone (Fig. 9C). However, chert and basaltic rocks are minor compared to sandstone. Asymmetric shear fabric was observed in thin section of a mixed muddy rock sample adjacent to a block of basaltic rock (Fig. 10F).

Sandstone is grey and occurs as mm-size fragments to

>200 m-thick bodies. It is generally massive with mud seams, but bedded varieties are present in the southeast part of the study area (Fig. 9D). In thin section, sandstone is composed of grains of quartz, plagioclase, K-feldspar, lithic fragments and other minor minerals such as zircons (Fig. 10C, D).

Chert is grey, white or black and occurs as mm-size fragments to m-size blocks or as m-thick to laterally traceable bodies that are mostly 10–50 m thick. In the southwest part of the study area, a mappable body of chert attains >400 m in apparent thickness around the Hiraniwadake Syncline axis (Fig. 3). Chert is generally bedded and sometimes recrystallized and massive. In thin section, it is composed of recrystallized radiolarian tests, microcrystalline quartz matrix and minor clay minerals.

Basaltic rocks are rare and were only found as <50 cm-thick blocks in a few localities. They are light green in colour and are composed of secondary minerals such as chlorite, other phyllosilicates such as talc and carbonate (Fig. 10E).

Siliceous mudstone is also present in the Osakamoto Subunit. It is black or grey and is either massive or bedded. The black massive varieties are very similar to mudstone and the two can be indistinguishable without observation of thin sections. Siliceous mudstone occurs as blocks within a muddy matrix, but it also appears to constitute a part of the matrix of the mixed facies.

Distribution—The confirmed distribution of this subunit is a triangular area between Osakamoto, Suzutoge Pass and Orikabe (Fig. 3). The area to the south and west has not been mapped in detail and further studies are required to determine the southwest boundary of this subunit. The distribution of this subunit closes around the Hiraniwadake Syncline axis ~500 m north of the northern edge of our study area (Sugimoto, 1974). The apparent thickness of the Osakamoto Subunit is around 1,200 m in the east wing of the Hiraniwadake Syncline near Osakamoto. It is somewhat difficult to evaluate the thickness in the central to southeastern part of the distribution due to multiple folds (see below), but the apparent thickness is at least 850 m in Otori Stream and 600 m in Wayashiki Stream, respectively (Fig. 4).

Structure—The structure of this subunit is homoclinal in the northeastern part and folded in the southwestern part (Fig. 3). The homoclinal part has cleavage planes and bedding planes with NW–SE strikes and dips of 50–80° to the southwest (Fig. 3). Sugimoto (1974) recognized a syncline in the Osakamoto Subunit along the Akka River, which is the southern part of a major NNW–SSE-trending syncline named the Hiraniwadake Syncline that extends more than 14 km from Mt. Myojindake (Fig. 2). This syncline extends throughout the newly mapped distribution of the Osakamoto Subunit (Fig. 3). In addition, two sets of second-order syncline and anticline occur in the southwest part of the Osakamoto Subunit (Fig. 3). The axes of these folds are parallel and trend NNW–SSE to NW–SE.

Age—Previously, no age constraints had been obtained

from rocks of the Osakamoto Subunit. We obtained radiolarians from two black siliceous mudstone samples (Osm-12 and Noz-02) and analyzed detrital zircon U–Pb ages for two sandstone samples (Okz-33 and Skm-08).

Sample Osm-12 yielded *J. cf. fusiformis* and *S. synconexa* (Plate 4). As mentioned in the age section for the Otori Subunit, *S. synconexa* indicates the upper JR4 to lower JR5 (Bathonian). *Japonocapsa fusiformis* is known to co-occur with *S. synconexa* (e.g., O’Doherty *et al.*, 2006). Hence, the sample most likely indicates the upper JR4 to lower JR5 (Bathonian). Sample Noz-02 yielded *Praezhamoidellum? cf. japonicum* and *J. cf. fusiformis* (Plate 5). According to Matsuoka and Ito (2019), *J. fusiformis* indicates the upper JR3 to lowermost JR6 (upper Aalenian–Callovian).

Detrital zircon U–Pb age was analyzed for one sandstone sample from Okoshi Stream (Okz-33) and another from Akka River near Sakamoto (Skm-08). The number of grains with concordant U–Pb ages was 61 out of 62 for Okz-33 (Table 1) and 60 out of 60 for Skm-08 (Table 2). Okz-33 included a large number of Jurassic zircons, while Skm-08 contained no Jurassic zircons (Fig. 12). Abundant Permian and Triassic zircons and minor Precambrian zircons were obtained from both samples (Fig. 12). Sample Okz-33 had a YC1 σ of 171.8 ± 2.4 Ma and a YSG of 170.9 ± 3.8 Ma, while Skm-08 had a YC1 σ of 223.6 ± 4.2 Ma and a YSG of 221.4 ± 5.7 Ma.

As described above, the Otori Unit has a two-story-structure with the coherent Okoshizawa Subunit occupying the structurally lower part and the mixed Osakamoto Subunit occupying the structurally upper part. While the structure and proportion of rock components of the two subunits are different, the variety of the components are almost the same; the main components in both subunits are sandstone, mudstone, siliceous mudstone, chert and rare basaltic rocks and limestone is absent in both subunits. Hence, the two subunits may have formed by different grades of mixing from the same set of lithology on an oceanic plate. Minor differences between the two subunits are the apparent absence of the stratigraphically lower part of the pelagic chert sequence (black carbonaceous claystone, red and green claystone and dolostone) and the occurrence of black siliceous mudstone in the Osakamoto Subunit.

The boundary between the two subunits is represented by the lithological boundary between chert (Okoshizawa Subunit) and muddy mixed rocks (Osakamoto Subunit) or siliceous mudstone (Okoshizawa Subunit) and muddy mixed rocks (Osakamoto Subunit) (Figs. 3, 5). In the former case, the boundary is definitely a fault, but in the latter case, the lithological boundary may be partly conformable. For example, in the lower part of Okoshi Stream, siliceous mudstone of the Otori Subunit is structurally overlain by mudstone of the Osakamoto Subunit that includes broken tuffaceous beds and no other visible blocks.

Table 1 Zircon U–Pb isotopic data for Sample Okz-33 obtained by quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry.

No.	Isotopic ratios								U–Pb age (Ma)			
	Th	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ	
	U											
1	0.44	0.0513	0.0012	0.2934	0.0092	0.0415	0.0008	261.9	± 5.4	261.3	± 9.3	
2	0.72	0.0497	0.0013	0.1896	0.0063	0.0276	0.0006	175.7	± 3.6	176.3	± 6.4	
3	0.19	0.1137	0.0015	5.2859	0.1337	0.3370	0.0064	1872.5	± 41.2	1866.6	± 127.4	
4	0.38	0.0492	0.0013	0.1870	0.0063	0.0275	0.0006	175.2	± 3.6	174.1	± 6.4	
5	0.48	0.0497	0.0012	0.2089	0.0066	0.0305	0.0006	193.4	± 3.9	192.7	± 6.7	
6	0.38	0.1118	0.0015	5.1829	0.1332	0.3358	0.0065	1866.7	± 42.0	1849.8	± 126.9	
7	0.31	0.0512	0.0012	0.2836	0.0089	0.0401	0.0008	253.6	± 5.2	253.5	± 9.0	
8	0.51	0.0553	0.0018	0.2714	0.0107	0.0356	0.0009	225.4	± 5.5	243.8	± 10.8	
9	0.73	0.0517	0.0015	0.2961	0.0109	0.0415	0.0010	262.2	± 6.2	263.4	± 11.0	
10	0.74	0.0514	0.0019	0.2164	0.0091	0.0305	0.0007	193.8	± 4.8	198.9	± 9.2	
11	0.32	0.0509	0.0010	0.2860	0.0081	0.0407	0.0008	257.3	± 4.9	255.4	± 8.2	
12	0.44	0.0495	0.0016	0.1961	0.0076	0.0287	0.0007	182.4	± 4.2	181.8	± 7.7	
13	0.49	0.0490	0.0017	0.2066	0.0084	0.0306	0.0007	194.2	± 4.7	190.7	± 8.5	
14	0.53	0.0522	0.0017	0.2889	0.0116	0.0401	0.0010	253.4	± 6.4	257.7	± 11.7	
15	0.54	0.0488	0.0012	0.1995	0.0064	0.0296	0.0006	188.1	± 3.8	184.7	± 6.5	
16	0.54	0.0524	0.0014	0.2584	0.0089	0.0357	0.0008	226.3	± 4.9	233.4	± 9.0	
17	0.29	0.0537	0.0014	0.3228	0.0109	0.0436	0.0009	274.9	± 6.1	284.0	± 11.0	
18	0.62	0.0516	0.0013	0.2832	0.0093	0.0398	0.0008	251.6	± 5.3	253.2	± 9.4	
19	0.46	0.0494	0.0017	0.2023	0.0082	0.0297	0.0007	188.5	± 4.5	187.0	± 8.3	
20	0.70	0.0486	0.0013	0.2074	0.0071	0.0309	0.0006	196.2	± 4.1	191.4	± 7.2	
21	0.71	0.0490	0.0016	0.2025	0.0063	0.0299	0.0007	190.1	± 4.8	187.2	± 6.4	
22	0.16	0.1136	0.0018	5.2279	0.0671	0.3337	0.0074	1856.2	± 47.3	1857.2	± 65.9	
23	0.47	0.1140	0.0018	5.3233	0.0824	0.3384	0.0080	1878.8	± 51.1	1872.6	± 80.4	
24	0.44	0.1137	0.0019	5.2465	0.1010	0.3344	0.0086	1859.5	± 55.5	1860.2	± 97.7	
25	0.35	0.0500	0.0014	0.1998	0.0052	0.0290	0.0007	184.1	± 4.4	185.0	± 5.3	
26	0.51	0.0520	0.0014	0.2951	0.0073	0.0411	0.0010	259.9	± 6.3	262.6	± 7.4	
27	0.73	0.0493	0.0014	0.2055	0.0056	0.0302	0.0007	191.9	± 4.6	189.7	± 5.7	
28	0.56	0.0503	0.0015	0.2136	0.0059	0.0308	0.0007	195.5	± 4.8	196.6	± 6.0	
29	0.57	0.0505	0.0015	0.2157	0.0062	0.0310	0.0008	196.7	± 4.9	198.4	± 6.3	
30	0.60	0.0517	0.0014	0.2157	0.0054	0.0302	0.0007	192.1	± 4.6	198.3	± 5.5	
31	0.73	0.0519	0.0016	0.2896	0.0083	0.0405	0.0010	255.7	± 6.5	258.3	± 8.4	
32	0.54	0.0501	0.0012	0.1858	0.0040	0.0269	0.0006	170.9	± 3.8	173.0	± 4.0	
33	0.42	0.0520	0.0016	0.2956	0.0085	0.0412	0.0010	260.1	± 6.7	262.9	± 8.6	
34	0.59	0.0502	0.0020	0.2244	0.0088	0.0324	0.0009	205.4	± 5.9	205.6	± 8.9	
35	0.15	0.0536	0.0011	0.3879	0.0071	0.0524	0.0012	329.4	± 7.5	332.8	± 7.2	
36	0.26	0.1133	0.0017	5.3471	0.0657	0.3419	0.0074	1895.9	± 47.8	1876.4	± 64.6	

Continued.

Table 1 Continued.

No.	Th U	Isotopic ratios						U–Pb age (Ma)			
		^{207}Pb	Error 2 σ	^{207}Pb	Error 2 σ	^{206}Pb	Error 2 σ	^{206}Pb	Error 2 σ	^{207}Pb	Error 2 σ
		^{206}Pb		^{235}U		^{238}U		^{238}U		^{235}U	
37	0.61	0.0569	0.0013	0.5727	0.0118	0.0729	0.0017	453.9	± 11.0	459.8	± 11.9
38	0.57	0.0501	0.0011	0.1921	0.0034	0.0278	0.0006	176.7	± 3.8	178.4	± 3.4
39	0.27	0.0503	0.0014	0.2175	0.0056	0.0313	0.0007	198.8	± 4.8	199.8	± 5.7
40	0.36	0.0505	0.0009	0.2234	0.0031	0.0321	0.0007	203.5	± 4.3	204.7	± 3.2
41	0.62	0.0511	0.0018	0.2963	0.0107	0.0420	0.0012	265.5	± 7.5	263.5	± 10.8
42	0.56	0.0546	0.0016	0.4382	0.0139	0.0582	0.0016	364.6	± 10.2	369.0	± 14.0
43	0.28	0.1139	0.0014	5.2008	0.0799	0.3311	0.0074	1843.6	± 47.8	1852.7	± 78.1
44	0.15	0.1162	0.0014	5.5129	0.0859	0.3438	0.0078	1905.0	± 49.9	1902.6	± 83.7
45	0.60	0.0502	0.0024	0.1884	0.0092	0.0272	0.0009	173.1	± 5.5	175.3	± 9.3
46	0.63	0.0503	0.0010	0.1876	0.0037	0.0270	0.0006	172.0	± 3.8	174.6	± 3.8
47	0.44	0.0513	0.0022	0.2622	0.0119	0.0371	0.0012	234.7	± 7.5	236.5	± 12.0
48	0.33	0.0493	0.0009	0.1903	0.0034	0.0280	0.0006	177.7	± 3.8	176.9	± 3.5
49	0.61	0.0507	0.0023	0.2877	0.0135	0.0412	0.0013	260.0	± 8.6	256.8	± 13.6
50	0.77	0.0505	0.0015	0.2082	0.0061	0.0299	0.0007	189.7	± 4.7	192.1	± 6.2
51	0.51	0.0529	0.0018	0.3081	0.0110	0.0422	0.0012	266.7	± 7.6	272.7	± 11.1
52	0.58	0.0521	0.0012	0.2890	0.0072	0.0402	0.0009	254.2	± 6.1	257.7	± 7.3
53	0.42	0.0505	0.0012	0.2849	0.0069	0.0409	0.0010	258.3	± 6.1	254.6	± 7.0
54	0.62	0.0507	0.0030	0.2996	0.0188	0.0428	0.0017	270.3	± 11.1	266.1	± 18.9
55	0.47	0.0508	0.0014	0.2259	0.0062	0.0322	0.0008	204.6	± 5.0	206.8	± 6.3
57	0.67	0.0495	0.0013	0.2089	0.0054	0.0306	0.0007	194.1	± 4.6	192.6	± 5.4
58	0.09	0.0501	0.0012	0.2876	0.0071	0.0416	0.0010	262.6	± 6.3	256.6	± 7.2
59	0.67	0.0505	0.0011	0.2223	0.0047	0.0319	0.0007	202.6	± 4.5	203.8	± 4.8
60	0.60	0.0504	0.0014	0.2100	0.0061	0.0302	0.0007	191.7	± 4.7	193.6	± 6.2
61	0.75	0.0518	0.0020	0.3020	0.0123	0.0423	0.0013	266.9	± 8.1	268.0	± 12.4
62	0.86	0.0516	0.0015	0.2913	0.0087	0.0409	0.0010	258.3	± 6.7	259.6	± 8.8
Discordant data											
56	0.17	0.1103	0.0014	3.7336	0.0569	0.2453	0.0055	1414.4	± 35.2	1578.6	± 56.2
Standards											
91500 2-6	0.37	0.0745	0.0017	1.8184	0.0641	0.1769	0.00503	1050	± 32	1052	± 63
91500 2-7	0.39	0.0755	0.0018	1.8656	0.0657	0.1791	0.00510	1062	± 33	1069	± 65
91500 2-8	0.42	0.0746	0.0017	1.8679	0.0656	0.1814	0.00515	1075	± 33	1070	± 65
91500 3-1	0.39	0.0761	0.0016	1.8643	0.0536	0.1776	0.00533	1053.6	± 34.3	1068.5	± 53.0
91500 3-2	0.36	0.0764	0.0016	1.9173	0.0547	0.1818	0.00544	1076.7	± 35.0	1087.1	± 54.1
OD3 3-1	1.51	0.0485	0.0021	0.0352	0.0015	0.0053	0.00013	33.8	± 0.9	35.1	± 1.5
OD3 3-2	1.07	0.0484	0.0026	0.0345	0.0017	0.0052	0.00014	33.2	± 0.9	34.5	± 1.8
OD3 3-3	1.13	0.0475	0.0021	0.0332	0.0014	0.0051	0.00013	32.5	± 0.8	33.1	± 1.5

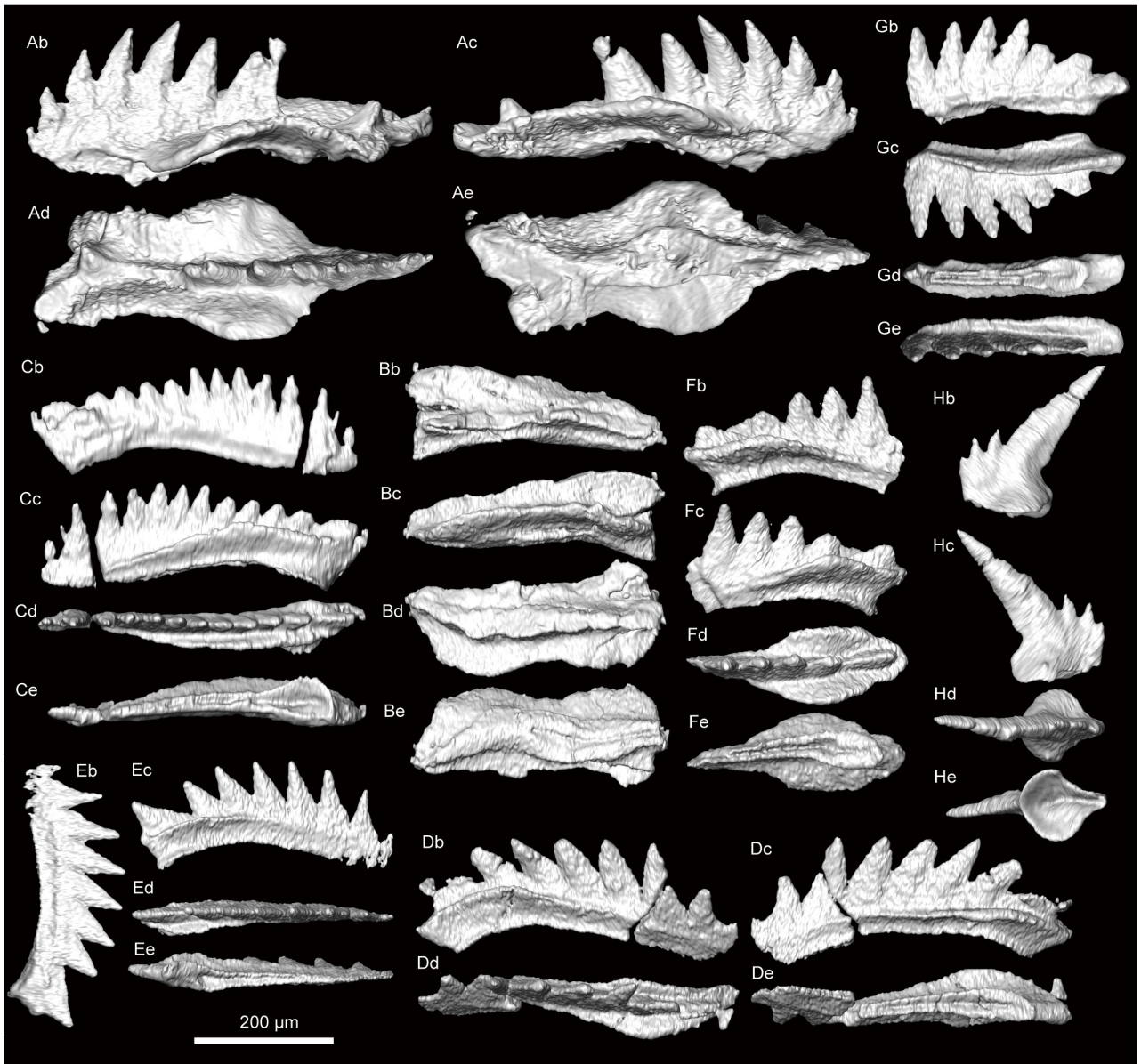
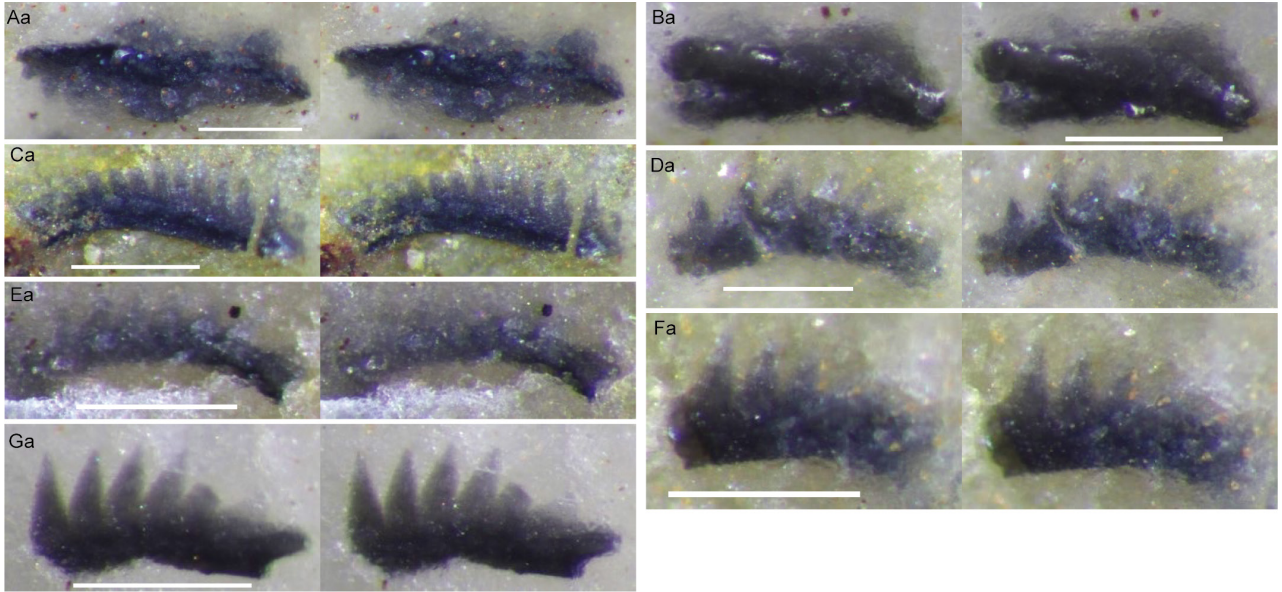
Table 2 Zircon U–Pb isotopic data for Sample Skm-08 obtained by quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry.

No.	Isotopic ratios						U–Pb age (Ma)					
	Th	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ	
	U											
1	0.89	0.0515	0.0015	0.2868	0.0090	0.0404	0.0011	255.2	± 7.2	256.1	± 9.1	
2	0.59	0.0515	0.0018	0.2888	0.0114	0.0407	0.0013	257.0	± 8.1	257.6	± 11.5	
3	0.98	0.0519	0.0015	0.3068	0.0101	0.0428	0.0012	270.4	± 7.8	271.7	± 10.2	
4	0.83	0.0518	0.0012	0.2908	0.0073	0.0407	0.0010	256.9	± 6.7	259.2	± 7.4	
5	0.68	0.0555	0.0014	0.3025	0.0082	0.0395	0.0010	249.6	± 6.7	268.4	± 8.3	
6	0.37	0.0506	0.0013	0.2669	0.0076	0.0382	0.0010	242.0	± 6.6	240.2	± 7.7	
7	1.53	0.0515	0.0013	0.2862	0.0079	0.0403	0.0011	254.7	± 6.9	255.5	± 7.9	
8	1.04	0.0517	0.0013	0.2901	0.0078	0.0406	0.0011	256.8	± 6.9	258.7	± 7.9	
9	1.04	0.0507	0.0013	0.2751	0.0079	0.0393	0.0011	248.8	± 6.8	246.7	± 8.0	
10	0.53	0.0520	0.0014	0.2900	0.0087	0.0404	0.0011	255.3	± 7.1	258.6	± 8.8	
11	0.80	0.0521	0.0012	0.2943	0.0078	0.0409	0.0011	258.5	± 6.9	261.9	± 7.9	
12	1.06	0.0535	0.0015	0.3014	0.0092	0.0408	0.0011	258.0	± 7.3	267.5	± 9.3	
13	0.53	0.0523	0.0014	0.2577	0.0075	0.0357	0.0010	226.1	± 6.2	232.8	± 7.6	
14	0.68	0.0523	0.0014	0.2966	0.0090	0.0411	0.0011	259.5	± 7.3	263.8	± 9.0	
15	0.74	0.0514	0.0011	0.2727	0.0065	0.0385	0.0010	243.4	± 6.3	244.8	± 6.5	
16	0.41	0.0713	0.0016	1.5394	0.0428	0.1565	0.0045	937.2	± 29.2	946.3	± 42.6	
17	0.65	0.0546	0.0020	0.3796	0.0161	0.0504	0.0017	316.8	± 10.8	326.8	± 16.3	
18	1.15	0.0509	0.0011	0.2454	0.0057	0.0349	0.0009	221.4	± 5.7	222.9	± 5.8	
19	1.30	0.0521	0.0015	0.3111	0.0102	0.0433	0.0012	273.2	± 7.9	275.0	± 10.3	
20	0.28	0.0525	0.0027	0.2971	0.0171	0.0410	0.0016	259.0	± 10.3	264.1	± 17.2	
21	0.53	0.0507	0.0013	0.2831	0.0104	0.0404	0.0009	255.6	± 5.6	253.1	± 10.5	
22	0.62	0.0511	0.0013	0.2968	0.0113	0.0421	0.0009	266.0	± 6.0	263.9	± 11.4	
23	0.63	0.0503	0.0013	0.2807	0.0107	0.0405	0.0009	255.7	± 5.8	251.2	± 10.9	
24	0.30	0.0513	0.0009	0.2685	0.0083	0.0380	0.0007	240.2	± 4.5	241.5	± 8.4	
25	0.62	0.0521	0.0014	0.2907	0.0114	0.0404	0.0009	255.6	± 5.9	259.1	± 11.5	
26	0.56	0.0517	0.0010	0.2869	0.0093	0.0402	0.0008	254.0	± 4.9	256.1	± 9.4	
27	0.75	0.0519	0.0018	0.3001	0.0136	0.0419	0.0011	264.7	± 7.1	266.5	± 13.7	
28	0.60	0.0503	0.0018	0.2765	0.0129	0.0399	0.0011	252.1	± 6.8	247.9	± 13.0	
29	0.67	0.0518	0.0012	0.3067	0.0109	0.0429	0.0009	270.8	± 5.7	271.6	± 11.0	
30	0.33	0.0502	0.0010	0.2874	0.0095	0.0415	0.0008	262.3	± 5.2	256.5	± 9.6	
31	0.54	0.0537	0.0015	0.3067	0.0122	0.0414	0.0010	261.7	± 6.2	271.6	± 12.3	
32	0.71	0.0508	0.0011	0.2945	0.0101	0.0420	0.0008	265.3	± 5.4	262.1	± 10.2	
33	1.09	0.1656	0.0025	11.2670	0.3693	0.4931	0.0114	2584.1	± 72.9	2545.5	± 319.1	
34	0.62	0.0510	0.0012	0.2928	0.0103	0.0416	0.0009	262.5	± 5.5	260.7	± 10.4	
35	1.37	0.0520	0.0012	0.3129	0.0108	0.0436	0.0009	275.1	± 5.7	276.4	± 10.9	
36	0.63	0.0570	0.0020	0.3278	0.0151	0.0417	0.0011	263.4	± 7.3	287.9	± 15.2	

Continued.

Table 2 Continued.

No.	Isotopic ratios						U-Pb age (Ma)				
	Th	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2 σ
	U										
37	0.15	0.1144	0.0017	5.3096	0.1630	0.3363	0.0067	1869.1	± 43.2	1870.4	± 153.3
38	0.58	0.0511	0.0009	0.2714	0.0083	0.0385	0.0007	243.3	± 4.5	243.8	± 8.4
39	0.67	0.0520	0.0011	0.2928	0.0097	0.0408	0.0008	257.9	± 5.1	260.8	± 9.8
40	0.63	0.0524	0.0012	0.2969	0.0103	0.0410	0.0008	259.2	± 5.4	263.9	± 10.4
41	0.67	0.0528	0.0014	0.3144	0.0103	0.0432	0.0009	272.4	± 5.9	277.6	± 10.4
42	0.84	0.0510	0.0010	0.2783	0.0076	0.0395	0.0007	250.0	± 4.7	249.3	± 7.7
43	0.61	0.0518	0.0011	0.2922	0.0079	0.0409	0.0008	258.5	± 4.8	260.3	± 8.0
44	0.64	0.0511	0.0012	0.2997	0.0090	0.0425	0.0008	268.2	± 5.4	266.2	± 9.1
45	0.12	0.0523	0.0008	0.3095	0.0071	0.0429	0.0007	270.8	± 4.6	273.8	± 7.1
46	0.78	0.0524	0.0011	0.3212	0.0093	0.0444	0.0009	280.1	± 5.5	282.8	± 9.4
47	0.57	0.0520	0.0019	0.2805	0.0120	0.0391	0.0010	247.1	± 6.5	251.0	± 12.1
48	0.42	0.1219	0.0015	6.0552	0.1458	0.3601	0.0074	1982.7	± 47.6	1983.8	± 138.2
49	0.40	0.0513	0.0009	0.2834	0.0069	0.0401	0.0007	253.2	± 4.4	253.3	± 7.0
50	0.67	0.0517	0.0009	0.2874	0.0072	0.0403	0.0007	254.5	± 4.5	256.5	± 7.3
51	0.78	0.0513	0.0008	0.2649	0.0061	0.0374	0.0006	236.7	± 3.9	238.6	± 6.1
52	0.63	0.0522	0.0011	0.2990	0.0083	0.0415	0.0008	262.2	± 5.0	265.6	± 8.4
53	0.46	0.0512	0.0018	0.3194	0.0134	0.0452	0.0012	285.2	± 7.6	281.5	± 13.5
54	0.69	0.0507	0.0010	0.2851	0.0074	0.0408	0.0007	257.6	± 4.7	254.7	± 7.4
55	0.68	0.0502	0.0018	0.3018	0.0131	0.0435	0.0012	274.8	± 7.4	267.8	± 13.3
56	0.88	0.0527	0.0011	0.3514	0.0099	0.0483	0.0009	304.2	± 6.0	305.7	± 10.0
57	0.72	0.0517	0.0011	0.2873	0.0079	0.0403	0.0007	254.7	± 4.8	256.4	± 7.9
58	0.17	0.1200	0.0014	5.7920	0.1245	0.3499	0.0062	1934.1	± 40.0	1945.2	± 119.2
59	0.60	0.0518	0.0014	0.2995	0.0100	0.0419	0.0009	264.9	± 5.8	266.0	± 10.1
60	0.39	0.0521	0.0017	0.3015	0.0119	0.0420	0.0010	265.0	± 6.6	267.6	± 12.0
Standards											
91500epo 4-1	0.41	0.0746	0.0016	1.8877	0.0637	0.1833	0.00560	1085	± 36	1077	± 63
91500epo 4-2	0.38	0.0745	0.0015	1.8759	0.0711	0.1826	0.00496	1081	± 32	1073	± 70
91500epo 4-3	0.38	0.0757	0.0013	1.8978	0.0591	0.1817	0.00469	1076	± 30	1080	± 58
OD3 4-1	1.09	0.0481	0.0017	0.0346	0.0013	0.0052	0.00012	33.5	± 0.8	34.5	± 1.4
OD3 4-2	1.16	0.0466	0.0012	0.0329	0.0012	0.0051	0.00009	32.9	± 0.6	32.9	± 1.2
OD3 4-3	1.30	0.0479	0.0017	0.0345	0.0013	0.0052	0.00009	33.5	± 0.6	34.4	± 1.3



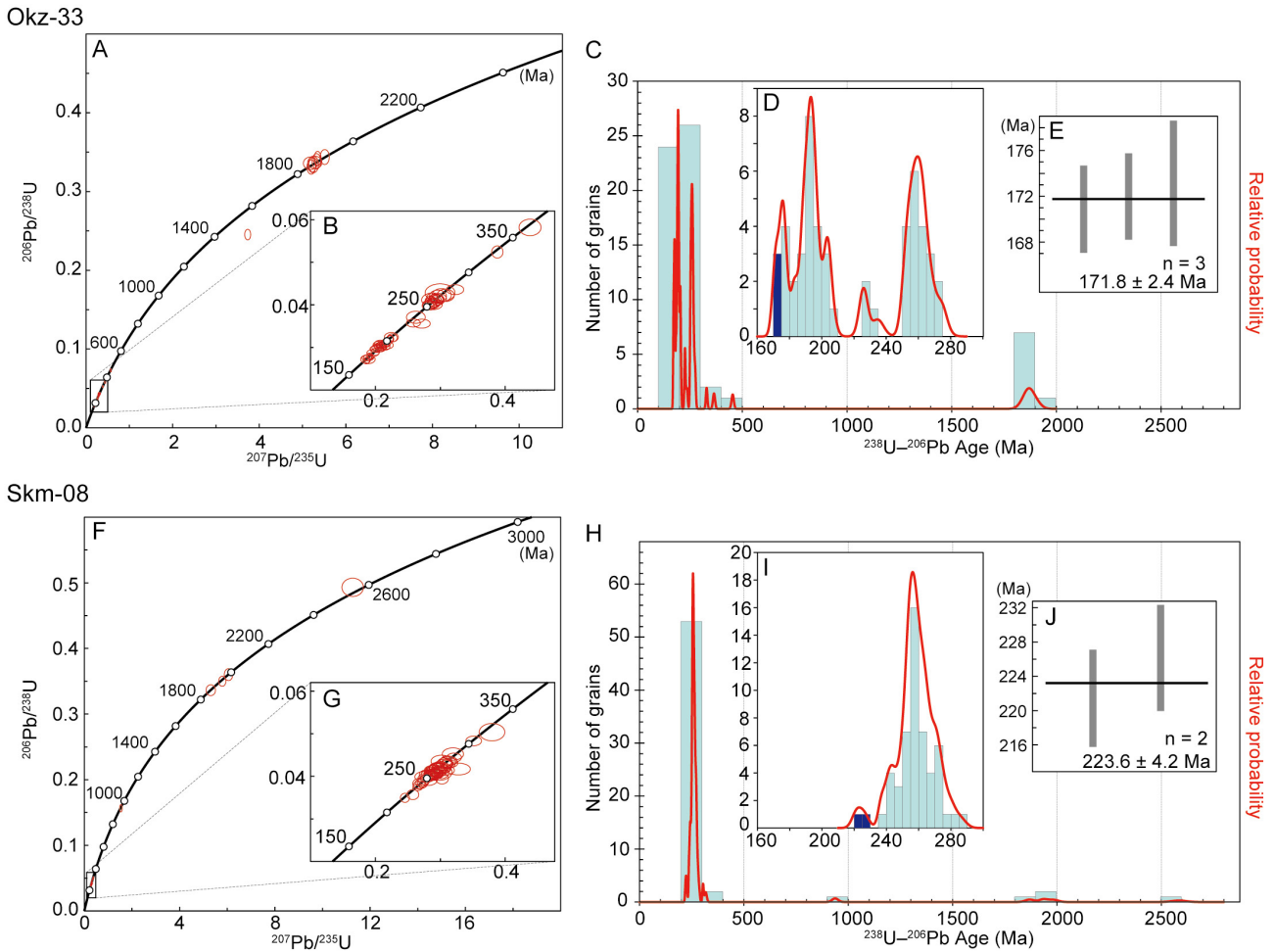


Fig. 12 (A, B, F, G) Concordia diagrams of zircon ages from sandstone. (A, B) Okz-33, Okoshi Stream. (A) All grains. (B) Phanerozoic grains. (F, G) Skm-08, Sakamoto. (F) All grains. (G) Phanerozoic grains. (C–E, H–J) Probability density plot and histogram of concordant zircon ages (C, D, H, I) and bar plots (E, J) of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the youngest cluster. The youngest cluster determined by overlaps of 1σ error in the histograms. (C–E) Okz-33. $n = 58$; $\text{YC}1\sigma$ ($n = 3$): 171.8 ± 2.4 Ma, $\text{MSWD} = 0.24$; Youngest single grain (YSG): 170.9 ± 3.8 Ma. (H–J) Skm-08. $n = 59$; $\text{YC}1\sigma$ ($n = 2$): 223.6 ± 4.2 Ma, $\text{MSWD} = 1.3$; YSG: 221.4 ± 5.7 Ma. Figures were produced by Isoplot/Ex 4.15 (Ludwig, 2012).

5. Accretionary age of the Otori Unit

Previously, the accretionary age of the Otori Unit was constrained only by the late Bajocian to early Bathonian radiolarians from manganese nodules in siliceous mudstone (Suzuki *et al.*, 2007). The outcrop they investigated (Loc. S07 in Fig. 3) is an isolated one surrounded by mudstone outcrops, which led the authors to avoid making assumptions about which part of the oceanic plate stratigraphy the sample belongs to. In this study, we obtained Bathonian radiolarians from a manganese nodule within siliceous mudstone of the coherent Okoshizawa Subunit. The siliceous mudstone of the Okoshizawa Subunit is visibly different from mudstone matrix of mixed facies in that fragmented rock pieces and seams are absent (compare Figs. 7B, 9A, B). Hence, the radiolarians therein can be used as an indicator of the time of deposition

(← p. 18)

Fig.11 Conodonts obtained from chert in the lowermost part of the Okoshizawa Subunit (Okz-CO-01). Figures with subscripts a are stereographic pairs (parallel viewing) of photographs and those with subscripts b through e are 3D-images obtained by X-ray computed microtomography for the same specimen. Subscripts b and c show lateral views, d shows upper views and e shows basal views. (A) *Sephardiella mungoensis*. (B) *S. cf. mungoensis*. (C–E) *Paragondolella cf. inclinata* (juvenile). (F) *Paragondolella polygnathiformis* (juvenile). (G) *Paragondolella* sp. (juvenile). (H) *Misikella longidentata*.

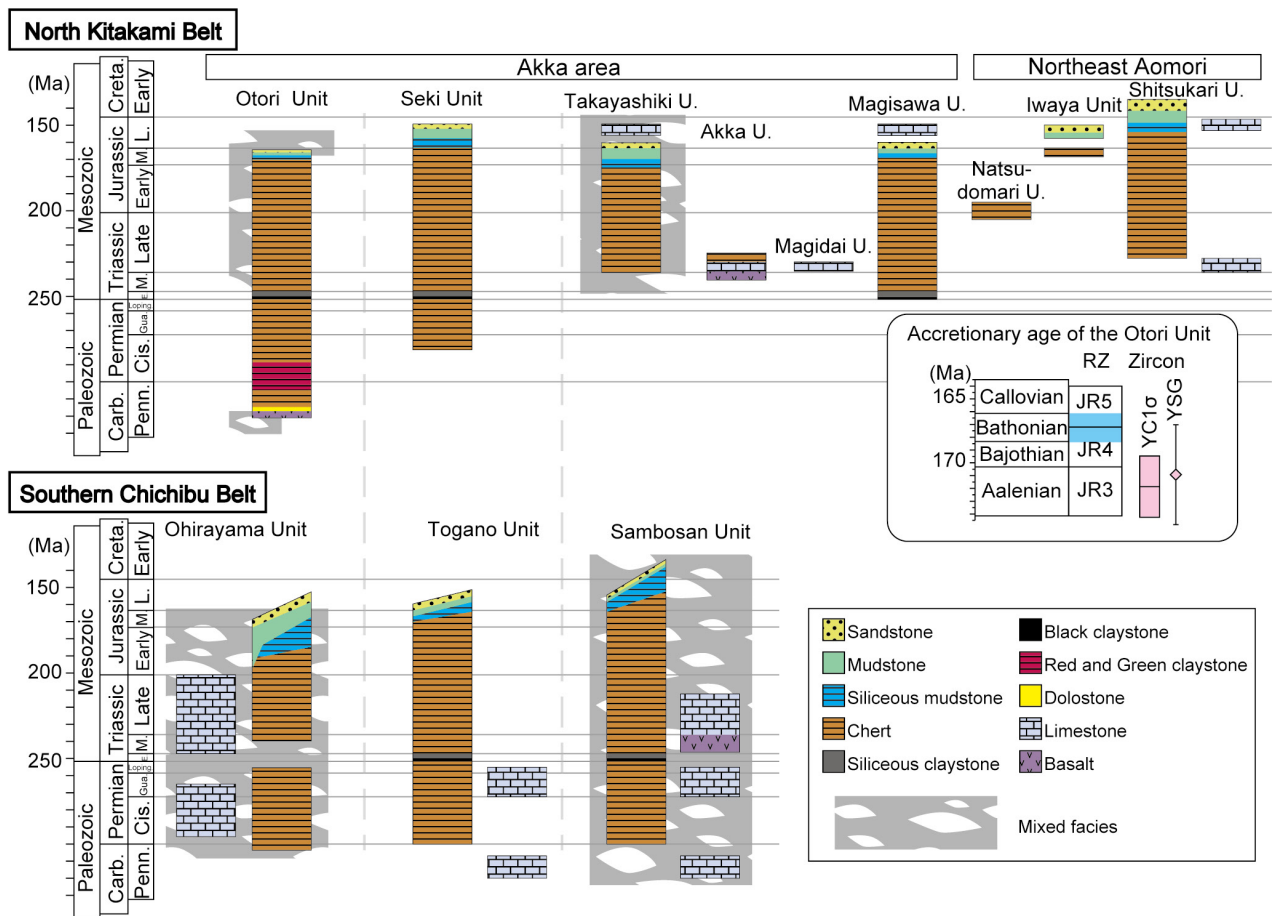


Fig. 13 Oceanic plate stratigraphy of the northeast part of the North Kitakami Belt (based on part of Fig. 7 of Uchino and Suzuki, 2020) and the Southern Chichibu Belt (Matsuoka *et al.*, 1998). U.: Unit; RZ: radiolarian zonation; Carb.: Carboniferous; Creta: Cretaceous; Penn.: Pennsylvanian; Cis.: Cisuralian; Gua.: Guadalupian; Loping.: Lopingian; E.: Early; M.: Middle; L.: Late.

of siliceous mudstone, and thus an approximation for the timing of accretion.

Detrital zircons of sample Okz-33 had a YC1σ of 171.8 ± 2.4 Ma and a YSG of 170.9 ± 3.8 Ma. Considering the occurrence of Bathonian radiolarians from the Otori Unit, it is expected that the depositional age of sandstone of this unit is Bathonian or younger. Therefore, the U–Pb age of Okz-33 is considered to be close to the accretionary age. The youngest zircon grains in sample Skm-08 were Late Triassic zircons, but there is no reason to assume that the two samples belong to different tectonostratigraphic units. In fact, the main components of detrital zircons in Skm-08, the Late Triassic grains, the overwhelmingly dominant Permian–Triassic grains and the Paleo-proterozoic grains, are also present in Okz-33, suggesting that they had a similar provenance (Fig. 12). Therefore, we interpret that Skm-08 and Okz-33 are both components of a middle Jurassic accretionary complex, and that the Late Triassic zircons in Skm-08 are zircons that crystallized long before transportation to the trench. A similar example of detrital zircon age trends from two closely located sandstones

has been reported from the Middle Jurassic accretionary complex in the Okawa area, ~30 km southwest of our study area (Uchino, 2021). This implies that sandstones apparently lacking detrital zircon ages close to the depositional age may not be uncommon, at least in the Middle Jurassic accretionary complex of the North Kitakami Belt. Consequently, the accretionary age of the Otori Unit is estimated as the Bathonian.

6. Regional correlations

The North Kitakami Belt has been regarded as the northern extension of the Southern Chichibu Belt and correlations of their internal tectonostratigraphic divisions have been discussed (Yamakita and Otoh, 2000; Otoh and Sasaki, 2003; Ehiro *et al.*, 2008; Takahashi *et al.*, 2016). Presently available data is not sufficient to determine a correlative counterpart of the Otori Unit in the Southern Chichibu Belt. However, below is a comparison of the North Kitakami and Southern Chichibu belts incorporating our new information of lithology and age.

The most striking similarity between the North Kitakami Belt and the Southern Chichibu Belt is the occurrence of large (> km scale) Triassic basalt–limestone bodies in the structurally lower part (Fig. 13). Such massive Triassic basalt–limestone bodies are not seen in the Jurassic accretionary complex of the Tamba–Mino–Ashio Belt in the inner zone of Southwest Japan (e.g., Nakae, 2000). In the North Kitakami Belt, the basalt–limestone bodies are represented by the Akka Unit (Yoshida *et al.*, 1987; Toyohara *et al.*, 1980) and Triassic limestone in Shiriya, northeast Aomori (Sano *et al.*, 2009). In the Southern Chichibu Belt, the Triassic basalt–limestone bodies characterize the Sambosan Unit (Matsuoka *et al.*, 1998). In both the North Kitakami and Southern Chichibu belts, the unit including the basalt–limestone bodies are structurally overlain by a tectonostratigraphic unit composed of coherent chert–clastic sequences; the Seki Unit in the former and the Togano Unit in the latter (Otoh and Sasaki, 2003; Takahashi *et al.*, 2016).

The Otori Unit structurally overlies the Seki Unit. Based on this, the Otori Unit was correlated with the Ohirayama Unit, which structurally overlies the Togano Unit in the Southern Chichibu Belt (Otoh and Sasaki, 2003; Takahashi *et al.*, 2016). Takahashi *et al.* (2016) also argued that the occurrence of Carboniferous to Triassic chert was an important similarity. Previous studies regarded the Otori Unit as a coherent facies of chert and mudstone (Ehiro *et al.*, 2008; Takahashi *et al.*, 2016), while the Ohirayama Unit is characterized by a mixed facies including blocks of Permian limestone, sandstone and chert (Matsuoka *et al.*, 1998). This difference was an unexplained issue in Takahashi *et al.* (2016), but our geological survey clarified that a large part of the Otori Unit is composed of mixed facies rather than coherent facies. Thus, the mixed facies is another similarity between the Otori and Ohirayama units. However, a significant difference in lithology remains between the two: Permian limestone blocks that are characteristic of the Ohirayama Unit is completely absent in the Otori Unit.

Regarding the accretionary age of the Ohirayama Unit, Matsuoka *et al.* (1998) summarized radiolarian fossil occurrences mainly in Shikoku and regarded the age of mudstone of this unit as Pliensbachian to Toarcian. Later reports of radiolarians from correlative units in west Kyushu are consistent, indicating a Sinemurian to early Toarcian age for mudstone (Saito *et al.*, 2005). In the Kii Peninsula, radiolarians from mudstone indicate a wider age range from the Pliensbachian to Kimmeridgian (Yamato Omine Research Group, 1992, 2002, 2005, 2007, Kashiwagi *et al.*, 2005). The U–Pb age of detrital zircons in the Kii Peninsula is consistent with the radiolarian-based age (Tokiwa *et al.*, 2019). In the Kanto Mountains, radiolarians indicate a Pliensbachian to Bathonian age for siliceous mudstone and a Hettangian to Bathonian age (mostly Aalenian to Bathonian) for mudstone (Hisada and Kishida, 1986; Hisada *et al.*, 1992; Takahashi, 2000; Yoshida and Matsuoka, 2003; Matsuoka, 2011; Ito and

Matsuoka, 2018). The accretionary age of the Otori Unit is within the range of accretionary age of the Ohirayama Unit in the Kii Peninsula and Kanto Mountains (Fig. 13). However, the age of siliceous mudstone is significantly older in the Ohirayama Unit in some regions, resulting in the apparently longer age range for mudstone in the Ohirayama Unit (Fig. 13). However, it should be noted that the age of siliceous mudstone in the Otori Unit is controlled only by a few samples and its entire age range may be longer.

To summarize, the Otori Unit has the same tectonostratigraphic position and mixed facies as the Ohirayama Unit, while they differ in that the Otori Unit lacks limestone blocks and appears to have a younger age of siliceous mudstone. Matsuoka *et al.* (1998) noted that the distribution of the Ohirayama Unit in the type locality in Shikoku is much narrower compared to areas such as the Kanto Mountains and suggested that a part of the Jurassic accretionary complex of the Southern Chichibu Belt in the Kanto Mountains may be lacking in Shikoku. Similarly, the correlative counterpart of the Otori Unit may not be present in the type locality of the Ohirayama Unit, which could explain the discrepancies between the two units.

7. Conclusions

We investigated the lithology, structure and accretionary age of the Otori Unit, distributed in the northeastern part of the North Kitakami Belt. The Otori Unit is composed of two subunits: the structurally lower Okoshizawa Subunit composed of coherent facies of chert and siliceous mudstone and the structurally upper Osakamoto Subunit composed of mixed facies of mudstone, sandstone, chert and minor basaltic rocks. A manganese nodule in the siliceous mudstone of the Okoshizawa Subunit yielded radiolarians indicating the upper JR4 to lower JR5 biozone (Bathonian, Middle Jurassic). Radiolarians from siliceous mudstone of both the Okoshizawa and Osakamoto subunits can be interpreted to be of the same age. Detrital zircon grains from sandstone in the Osakamoto Subunit has a youngest age of ~170 Ma (YC1σ: 171.8 ± 2.4 Ma; YSG: 170.9 ± 3.8 Ma). Based on the radiolarian and detrital zircon ages, the accretionary age of the Otori Unit is estimated as the Bathonian. The Otori Unit has formerly been compared with the Ohirayama Unit of the Southern Chichibu Belt, but there are significant differences in the lithofacies and age of the two.

8. Palaeontological notes

Conodonts (by MUTO Shun)

Misikella longidentata Kozur and Mock
(Fig. 11H)

1974 *Misikella longidentata* — Kozur and Mock, p. 136–137, pl. 1, figs. 4, 5.

Remarks: This species is distinguished by a short segminate element with a terminal, posteriorly curved cusp more than twice as high (measured from the base of element) and thick as the other denticles, which decrease size away from the cusp. The basal cavity is laterally expanded.

Paragondolella cf. inclinata (Kovács)

(Fig. 11C, D, E)

1983 *Gondolella foliata inclinata* — Kovács, p. 110–111, pl. 1, figs. 1–4, pl. 3, figs. 2–4.

Remarks: Juvenile forms of this species possess a narrow platform forming in the posterior part of the element. In our specimens, the denticles gradually recline and decrease height in the posterior to a thick terminal cusp. Our specimens are most likely to be assigned to this species. *Paragondolella bulgarica* (Budurov & Stefanov) is similar but has a uniformly high carina. Detailed synonymy is given by Chen and Lukeneder (2017).

Paragondolella polygnathiformis (Budurov and Stefanov)
(Fig. 11F)

1965 *Gondolella polygnathiformis* — Budurov and Stefanov, p. 118–119, pl. 3, figs. 3–7.

Remarks: Ontogenetic development of this species is clearly demonstrated by Koike (1982, 1991). From the early stages, like our specimen, it has a platform with a constriction beside the cusp running almost to the anterior end and a geniculation point at mid-length where the platform margin steps down towards the anterior in lateral view. Detailed synonymy is given by Chen and Lukeneder (2017).

Sephardiella mungoensis (Diebel)

(Fig. 11A)

Sephardiella cf. mungoensis (Diebel)

(Fig. 11B)

1956 *Polygnathus mungoensis* — Diebel, p. 431–432, pl. 1, figs. 1–20, pl. 2, figs. 1–4, pl. 3, fig. 1, pl. 4, fig. 1.

Remarks: This species is distinguished by a free blade, a sinuous platform with ornamentations on the lateral edge and a well-developed posterior process. The specimen in Fig. 11B is rather poorly imaged and broken at the anterior, but the platform outline and posteriorly extended keel matches the characters of *S. mungoensis*.

Plasencia *et al.* (2007, 2018) argued that the genus name *Sephardiella* proposed by March *et al.* (1988) and described by March *et al.* (1990) has priority over the more commonly used *Budurovignathus*, which was established without diagnosis or description by Kozur (1988). Both *Sephardiella* (March *et al.*, 1988) and *Budurovignathus* (Kozur, 1988) were proposed as replacement names for *Carinella* Budurov. According to ICZN Article 13.1.1 to 13.1.3, new names are required to be accompanied by a description or definition, or by bibliographic reference to such a statement, or to be proposed as a new replacement name. The third case applies to both *Sephardiella* (March

et al., 1988) and *Budurovignathus* (Kozur, 1988), and thus both are available and have equal priority, contrary to the statements in Plasencia *et al.* (2018). However, as Plasencia *et al.* (2007) mentioned, Sudar (1989) selected *Sephardiella* as the first reviser six months prior to Kozur (1989) that preferred *Budurovignathus*, and the former is the valid name.

Radiolarians (by ITO Tsuyoshi)

Order **NASSELLARIA** Ehrenberg, 1875

Family **DIACANTHOCAPSIDAE** O’Dogherty, 1994

Genus ***Diacanthocapsa*** Squinabol, 1903

Type species ***Diacanthocapsa euganea*** Squinabol, 1903

Diacanthocapsa? operculi Yao

(Plate 1, fig. 5)

1979 *Diacanthocapsa? operculi* — Yao, pl. 2, figs. 16–27

Remarks: The specimen has a fusiform shell with four segments. The segmentation is closely similar to the species (Yao, 1979).

Subfamily **JAPONOCAPSINAE** Kozur, 1984

Genus ***Japonocapsa*** Kozur, 1984

Type species ***Tricolocapsa? fusiformis*** Yao, 1979

Japonocapsa fusiformis (Yao)

(Plate 1, fig. 1)

1979 *Tricolocapsa fusiformis* — Yao, p. 33, pl. 4, figs. 12–18, pl. 5, figs. 1–4.

1984 *Japonocapsa fusiformis* (Yao) — Kozur, 1984, p. 33, Plate 7, Fig. 2.

Remarks: The specimen has a fusiform shell with four segments. The fourth segment is dish-like and possesses large pores. These characteristics are closely similar with the species (Yao, 1979).

Japonocapsa cf. fusiformis (Yao)

(Plate 4, fig. 5; Plate 5, fig. 1)

Remarks: The specimens possess the large fourth segment. The outline of the shell is similar to *Japonocapsa fusiformis*, although the preservation is poor.

Genus ***Striatojaponocapsa*** Kozur, 1984

Type species ***Tricolocapsa plicarum*** Yao, 1979

Striatojaponocapsa synconexa O’Dogherty *et al.*, 2006.

(Plate 1, fig. 6; Plate 4, fig. 1)

2006 *Striatojaponocapsa synconexa* — O’Dogherty *et al.*, pl. 10, figs. 9–17.

Remarks: The specimens possess a small basal appendage with a circular porous depression. They closely resemble the species (O’Dogherty *et al.*, 2006; Hatakeda *et al.*, 2007).

Family **WILLIRIEDELLIDAE** Dumitrica, 1970
Genus ***Praezhamoidellum*** Kozur, 1984
Type species ***Praezhamoidellum yaoi*** Kozur, 1984

Praezhamoidellum?* cf. *japonicum (Yao)

(Plate 5, fig. 2)

1979 *Stichocapsa japonica* Yao, 1979, Plate 6, figs. 8–12.

Remarks: The specimen has a truncate–conical thorax–abdomen with a flat base. Large opening is recognized in the basal part. These characteristics are similar to *Praezhamoidellum?* *japonicum* (Yao, 1979).

Family **Unumidae** Kozur, 1984

Genus ***Protunuma*** Ichikawa and Yao, 1976

Type species ***Protunuma fusiformis*** Ichikawa and Yao, 1976

Protunuma fusiformis Ichikawa and Yao

(Plate 1, fig. 3)

1976 *Protunuma fusiformis* Ichikawa and Yao, pl. 2, figs. 1–4.

Remarks: The specimen has a fusiform shell composed of multi-segments. No spine is observed on the surface, but circular pores aligned in longitudinal rows are recognized. These characteristics are closely similar to the species (Yao, 1979).

Family **Gongylothoracidae** Bak, 1999

Genus ***Gongylothorax*** Foreman, 1968

Type species ***Dicolocapsa verbeeki*** Tan Sin Hok, 1927

Gongylothorax siphonifer Dumitrica

(Plate 1, fig. 2)

1970 *Gongylothorax siphonifer* — Dumitrica, pl. 1, figs. 2–5.

Remarks: The specimen has a sub-spherical shell of two segments. The shell outline and inner structure is closely similar to the species reported from Japan (Yao, 1979).

Family **EUCYRTIDIELLIDAE** Takemura, 1986

Genus ***Eucyrtidiellum*** Baumgartner, 1984

Type species ***Eucyrtidium?* *unumaensis*** Yao, 1979

Eucyrtidiellum unumaense (Yao, 1979)

(Plate 1, figs. 7, 8)

1979 *Eucyrtidium?* *unumaensis* — Yao, pl. 9, figs. 1–11.

1984 *Eucyrtidiellum unumaensis* (Yao) — Baumgartner, pl. 4, fig. 6.

Remarks: The specimens have a small cephalis with apical horn and truncate–conical thorax. They closely resemble the species (Yao, 1979).

Acknowledgements

The manuscript benefited from attentive comments from Uchino T. and Nagamori H. We are sincerely grateful

to Yagyu, S. for operating the X-ray microscope at Kochi University. The authors thank Iwano, H. and Danhara, T. of Kyoto Fission-Track Co. Ltd. For extraction and analysis of detrital zircons. We are grateful to Suzuki, N. of the Tohoku University for sharing information about the treatment of manganese nodules, to Dr. S. Takahashi for providing us the illustrations of Ehiro et al. (2008) and to Shimura, Y. of the Geological Survey of Japan and Danhara, Y. of Kyoto Fission-Track Co. Ltd. For teaching us the analytical procedures of Isoplot 4.15.

References

- Bak, M. (1999) Uppermost Maastrichtian Radiolaria from the Magura Nappe deposits, Czech Outer Carpathians. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, **69**, 137–159.
- Baumgartner, P. O. (1984) A Middle Jurassic–Early Cretaceous low latitude radiolarian zonation based on unitary associations and age of Tethyan radiolarites. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, **77**, 729–841.
- Budurov, K. and Stefanov, S. (1965) Gattung Gondolella aus der Trias Bulgariens. *Trudove Byrkhru Geologiyata na Bylgariya, Seriya Paleontologiya [Travaux Géologiques de Bulagrie Série Paléontologie]*, **7**, 115–121. (in German)
- Chen, Y. and Lukeneder, A. (2017) Late Triassic (Julian) conodont biostratigraphy of a transition from reefal limestones to deep-water environments on the Cimmerian terranes (Taurus Mountains, southern Turkey). *Papers in Palaeontology*, **3**, 441–460.
- Chen, Y., Krystyn, L., Orchard, M. J., Lai, X. L. and Richoz, S. (2016) A review of the evolution, biostratigraphy, provincialism and diversity of Middle and early Late Triassic conodonts. *Papers in Palaeontology*, **2**, 235–263.
- Dickinson, W. R. and Gehrels, G. E. (2009) Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**, 115–125.
- Diebel, K. (1956) Conodonten in der Ober Kreide von Kamerun. *Geologie*, **5**, 424–450. (in German)
- Dumitrica, P. (1970) Cryptocephalic and cryptothoracic Nassellaria in some Mesozoic deposits of Romania. *Revue roumaine de Géologie, Géophysique et Géographie (série Géologie)*, **14**, 45–124.
- Ehiro, M., Kawamura, M. and Kawamura, T. (2005) 1.1 Summary and Tectonostratigraphic divisions. In The Publishing Committee of the Geology of Japan, ed., *The Geology of Japan*. The Supplement. 49–50. (in Japanese)
- Ehiro, M., Yamakita, S., Takahashi, S. and Suzuki, N. (2008) Jurassic accretionary complexes of the North Kitakami Belt in the Akka-Kuji area. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **114** (Supplement), 121–139. (in Japanese)
- Ehiro, M., Suzuki, N., Takahashi, S. and Yamakita, S.

- (2017) 4.4 North Kitakami Belt. In The Geological Society of Japan ed., *Tohoku District*. 244–260.
- Ehrenberg, C. G. (1875) *Fortsetzung der mikrogeologischen Studien als Gesamt-Uebersicht der mikroskopischen Palaontologie gleichartig analysirter Gebirgsarten der Erde, mit specieller Rücksicht auf den Polycystinen-Mergel von Barbados*. Abhandlungen der königlichen preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1–225. (in German)
- Foreman, H. P. (1968) Upper Maestrichtian Radiolaria of California. *Special Papers in Palaeontology*, no. 3, 1–82.
- Geological Survey of Japan, AIST (2020) Seamless digital geological map of Japan 1: 200,000. Geological Survey of Japan, AIST. <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2full/> (Accessed: 2021-10-08)
- Hatakeda, K., Suzuki, N. and Matsuoka, A. (2007) Quantitative morphological analyses and evolutionary history of the Middle Jurassic polycystine radiolarian genus *Striatojaponocapsa* Kozur. *Marine Micropaleontology*, **63**, 39–56.
- Hirata, T., Iizuka, T. and Orihashi, Y. (2005) Reduction of mercury background on ICP-mass spectrometry for in situ U–Pb age determinations of zircon samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **20**, 696–701.
- Hisada, K., Ueno, H. and Igo, H. (1992) Geology of the Upper Paleozoic and Mesozoic sedimentary complex of the Mt. Ryokami area in the Kanto Mountains, central Japan. *Science reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section B, Geological sciences*, **13**, 127–151.
- Hisada, K. and Kishida, Y. (1986) The Hamadaira Group in the western Kanto Mountains, central Japan—the developmental process of the Jurassic–lower Cretaceous accretionary prism—. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **92**, 569–590. (in Japanese with English abstract)
- 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, Special Publication*, Micropaleontology Press, The American Museum of Natural History, New York, 110–117.
- Iizuka, T. and Hirata, T. (2004) Simultaneous determinations of U–Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation-ICPMS. *Geochemical Journal*, **38**, 229–241.
- 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. *Chigaku Zasshi (Journal of Geography)*, **119**, 999–1053. doi:10.5026/jgeography.119.235 (in Japanese with English abstract)
- Ito, T. and Matsuoka, A. (2018) Lithology and radiolarian age of the Ryokami-yama Chert Formation in eastern Mt. Ryokami: Possible décollement zone in Permian pelagic sequence in mid-Mesozoic accretionary complexes of Southwest Japan. *Island Arc*, **27**, e12273.
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y. and Yamamoto, K. (2013) An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. *Island Arc*, **22**, 382–394.
- Kashiwagi, K., Niwa, M. and Tokiwa, T. (2005) Early Jurassic radiolarians from the Chichibu Composite Belt in the Sannokou area, central Kii Peninsula, Southwest Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **111**, 170–181.
- Koike, T. (1982) Review of some platform conodonts of the Middle and Late Triassic in Japan. *Science reports of the Yokohama National University. Section II, Biological and geological sciences*, **29**, 15–27.
- Koike, T. (1991) Triassic conodonts from exotic blocks of limestone in northern Kuzuu, the Ashio Mountains. *Science reports of the Yokohama National University. Section II, Biological and geological sciences*, **38**, 53–69.
- Kojima, S., Hayasaka, Y., Hiroi, Y., Matsuoka, A., Sano, H., Sugamori, Y., Suzuki, N., Takemura, S., Tsujimori, T. and Uchino, T. (2016) 2b Pre-Cretaceous accretionary complexes. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T. and Gibbons, W. eds., *The Geology of Japan*. Geological Society of London, London, 61–100.
- Kovács, S. (1983) On the evolution of excelsa-stock in the upper Ladinian–Carnian (Conodonts, genus *Gondolella*, Triassic). *Schriftenreihe der erdwissenschaftlichen Kommission – Österreichische Akademie der Wissenschaften*, **5**, 107–120.
- Kozur, H. W. (1984) New radiolarian taxa from the Triassic and Jurassic. *Geologisch Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **13**, 49–88.
- Kozur, H. W. (1988) Division of the gondolellid platform conodonts. In: Ziegler, W. ed., *1st International Senckenberg Conference and 5th European Conodont Symposium (ECOS V). Part 2: Abstracts of Meeting*, Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt, 244–245.
- Kozur, H. W. (1989) The taxonomy of the gondolellid conodonts in the Permian and Triassic. *1st international Senckenberg conference and 5th European conodont symposium (ECOS V); Contribution III, Papers on Ordovician to Triassic conodonts*, **117**, 409–469.
- Kozur, H. W. and Mock, R. (1974) Zwei neue Conodonten-Arten aus der Trias des Slowakischen Karstes. *Casopis pro Mineralogii a Geologii*, 135–139. (in German)
- Ludwig, K. R. (2012) User’s Manual for Isoplot 3.70: Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*, **5**, 1–75.
- March, M., Budurov, K., Hirsch, F. and Marquez-Aliaga,

- A. (1988) *Sephardiella* nov. gen (Conodonta), emendation of *Carinella* (Budurov, 1973), Ladinian (Middle Triassic). In: Ziegler, W. ed., *1st International Senckenberg Conference and 5th European Conodont Symposium (ECOS V). Part 2: Abstracts of Meeting*, Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt, 247.
- March, M., Budurov, K. and Hirsch, F. (1990) *Sephardiella* nov. gen. (Conodonta), emendation of *Carinella* (Budurov, 1973) from the Ladinian (Middle Triassic) type area in Catalonia (N. E. Spain), Sephardic Province. Papers on conodonts and Ordovician to Triassic conodont stratigraphy. *1st International Senckenberg Conference and 5th European Conodont Symposium (ECOS V), Contributions IV*, **118**, 197–202.
- Matsuoka, A. (1987) Radiolarian age of the Shiriya Group in Aomori Prefecture, northeast Japan. *Fossils*, no. 42, 7–13. (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. and Ito, T. (2019) Updated radiolarian zonation for the Jurassic in Japan and the western Pacific. *Science reports of Niigata University (Geology)*, no. 34, 49–57.
- Matsuoka, A. and Oji, T. (1990) Middle Jurassic radiolarian fossils from the Magisawa Formation in the Taro Belt, North Kitakami Mountains. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **96**, 239–241. (in Japanese)
- 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. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **104**, 634–653. (in Japanese with English abstract)
- Matsuoka, K. (2011) The radiolarians of the Ryokami Unit of the Southern Chichibu Belt in Otaki of Chichibu City, Saitama Prefecture, central Japan. *Bulletin of the Saitama Museum of Natural History New series*, **5**, 111–114. (in Japanese)
- Minato, M. (1950) The geology of the Kitakami Mountains (Part 2). *Monograph of the Association for Geological Collaboration in Japan*, **5**, 1–28. (in Japanese)*
- Minoura, K. (1985) Where did the Kitakami and Abukuma massifs come from?—the genesis of the geological structure of Northeast Japan—. *Kagaku*, **55**, 14–23. (in Japanese)*
- Minoura, K. and Tsushima, M. (1984) Geology of the Omoto district in the eastern margin of the North Kitakami Massif. *Science reports of the Hirosaki University*, **31**, 93–107.
- Murai, T., Okami, K. and Kudo, H. (1981) *Report on Silica Stone Resources of Iwate Prefecture for the 1980 Fiscal Year*. The Commerce, Industry, and Labor Relations Division of Iwate Prefecture, 13p. (in Japanese)
- Murai, T., Okami, K. and Kudo, H. (1983) *Report on Silica Stone Resources of Iwate Prefecture for the 1982 Fiscal Year*. The Commerce, Industry, and Labor Relations Division of Iwate Prefecture, 43p. (in Japanese)
- 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **490**, 687–707.
- Muto, S., Yagyu, S., Takahashi, S. and Murayama, M. (2021) Identification of conodont fossils in pelagic deep-sea siliceous sedimentary rocks using laboratory-based X-ray computed microtomography. *Lethaia*, **54**, 687–699.
- Nakae, S. (2000) Regional correlation of the Jurassic accretionary complex in the Inner Zone of Southwest Japan. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, no. 55, 73–98. (in Japanese with English abstract)
- Nakae, S. and Kamada, K. (2003) Late Jurassic radiolarians from the Rikuchu-Seki district in the North Kitakami Belt, Northeast Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **109**, 722–725. (in Japanese with English abstract)
- Nakae, S., Kamada, K., Kubo, K. and Kudo, T. (2021) *Geology of the Rikuchu Seki District*. Quadrangle Series, 1:50,000, Geological Survey of Japan, AIST. (in Japanese with English abstract)
- O’Dogherty, L. (1994) Biochronology and paleontology of mid-Cretaceous radiolarians from Northern Apennines (Italy) and Betic Cordillera (Spain). *Mémoires de Géologie (Lausanne)*, **21**, 1–415.
- O’Dogherty, L., Bill, S., Goričan, Š., Dumitrica, P. and Masson, H. (2006) Bathonian radiolarians from an ophiolitic mélange of the Alpine Tethys (Gets Nappe, Swiss-French Alps). *Micropaleontology*, **51**, 425–485.
- O’Dogherty, L., Goričan, Š. and Gawlick, H. J. (2017) Middle and Late Jurassic radiolarians from the Neotethys suture in the Eastern Alps. *Journal of Paleontology*, **91**, 25–72.
- Okami, K. and Ehiro, M. (1988) Review and recent progress of studies on the Pre-Miyakoan sedimentary rocks of the Northern Kitakami Massif, Northeast Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **42**, 187–201. (in Japanese with English abstract)
- Onuki, Y. (1956) Geology of the Kitakami Mountains. In Iwate Prefecture (ed.) *Explanatory Notes on the Geology of Iwate Prefecture. Part 2*. 1–189. (in Japanese)
- Otoh, S. and Sasaki, M. (2003) Tectonostratigraphic division and regional correlation of the sedimentary complex of the North Kitakami Belt. *Journal of Geography*, **112**, 406–410. (in Japanese)

- Plasencia, P., Hirsch, F. and Márquez-Aliaga, A. (2007) Sephardiellinae, a new Middle Triassic conodont subfamily. *Journal of Iberian Geology*, **33**, 163–172.
- Plasencia, P., Kiliç, A.M., Baud, A., Sudar, M. and Hirsch, F. (2018) The evolutionary trend of platform denticulation in middle triassic acuminate gondolellidae (Conodonta). *Turkish Journal of Zoology*, **42**, 187–197.
- Saito, M., Miyazaki, K., Toshimitsu, S. and Hoshizumi, H. (2005) *Geology of the Tomochi District*. Quadrangle Series, 1:50,000, Geological Survey of Japan, AIST, 218p. (in Japanese with English abstract)
- Sano, S., Sugisawa, N. and Shimaguchi, T. (2009) Discovery of megalodontoid bivalves in the Shiriya area, northern Honshu, northeast Japan, and its geological implications. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, no. 8, 51–57. (in Japanese)
- Shimazu, M., Tanaka, K. and Yoshida, T. (1970) *Geology of the Taro District*. Quadrangle Series, 1:50,000, Geological Survey of Japan, Kawasaki, 54p.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowler, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N. and Whitehouse, M. J. (2008) Plešovice zircon - A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, **249**, 1–35.
- Squinabol, S. (1903) Le Radiolarie dei noduli selciosi nella Scaglia degli Euganei. Contribuzione I. *Rivista Italiana di Paleontologia*, **9**, 105–151.
- Sudar, M. (1989) Revision of conodont genera Sephardiella March, Budurov, Hirsch & Marquez-Aliaga, 1988, and *Budurovignathus* Kozur, 1988. *Geologica Balcanica*, **9**, 1989.
- Sugimoto, M. (1969) Geology of the Omoto-Tanohata District, Outer Kitakami Belt, Northeast Japan. *Tohoku University, Institute of Geology and Paleontology Contributions*, **70**, 1–22. (in Japanese with English abstract)
- Sugimoto, M. (1974) Stratigraphical study in the outer belt of the Kitakami Massif, Northeast Japan. *Tohoku University, Institute of Geology and Paleontology Contributions*, **74**, 1–48. (in Japanese with English abstract)
- Sugimoto, M. (1980) Geological structure (outline) of the Akka-Iwaizumi area, Northern Kitakami Mountains. In: Kimura, T. ed., *Report on the Multidiscipline Research Project A with 1979 Foundation of Grant-in-Aid for Scientific Research by the Education Ministry of Japan*, Tokyo Print Insatsu, Ltd., Tokyo 37–44. (in Japanese)*
- Suzuki, N. and Ogane, K. (2004) Paleogeographic affinities of radiolarian faunas in late Aalenian time (Middle Jurassic) recorded in the Jurassic accretionary complex of Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **23**, 343–357.
- Suzuki, N., Yamakita, S., Takahashi, S. and Ehiro, M. (2007) Middle Jurassic radiolarians from carbonate manganese nodules in the Otori Formation in the eastern part of the Kuzumaki-Kamaishi Subbelt, the North Kitakami Belt, Northeast Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **113**, 274–277. doi:10.5575/geosoc.113.274 (in Japanese with English abstract)
- Tahahashi, O. (2000) Tectonostratigraphic study of the Chichibu and Shimanto Belts in the Kanto Mountains, central Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **106**, 836–852.
- Takahashi, S., Ehiro, M., Suzuki, N. and Yamakita, S. (2016) Subdivisional scheme of the North Kitakami Belt, Northeast Japan and its tectonostratigraphic correlation to the Oshima and South Chichibu belts: an examination of the Jurassic accretionary complex in the west Akka area. *Journal of the Geological Society of Japan*, **122**, 1–22. doi:10.5575/geosoc.2015.0034 (in Japanese with English abstract)
- Takahashi, S., Yamakita, S., Suzuki, N., Kaiho, K. and Ehiro, M. (2009) High organic carbon content and a decrease in radiolarians at the end of the Permian in a newly discovered continuous pelagic section: A coincidence? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **271**, 1–12.
- Takemura, A. (1986) Classification of Jurassic Nassellarians (Radiolaria). *Palaeontographica. Abteilung A: Palaeozoologie-Stratigraphie*, **195**, 29–74.
- Tan Sin Hok (1927) Over de samenstelling en het ontstaan van krijt- en mergel-gesteenten van de Molukken. *Jaarboek van het mijnwezen in Nederlandsch Oost-Indie, jaargang 55, 1926, verhandelingen*, 3rd gedeelte, 5–165.
- Tokiwa, T., Shimura, Y., Takeuchi, M., Shimosato, S., Yamamoto, K. and Mori, H. (2019) Provenance of trench-fill deposits of the Jurassic Chichibu accretionary complex, Southwest Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **184**, 103970.
- Toyohara, F., Uyesugi, K., Kimura, T., Ito, T., Murata, A. and Iwamatsu, A. (1980) Geosyncline in the northern Kitakami Massif and the Oshima Peninsula. In: Kimura, T. ed., *Report on the Multidiscipline Research Project A with 1979 Foundation of Grant-in-Aid for Scientific Research by the Education Ministry of Japan*, Tokyo Print Insatsu, Ltd., Tokyo 27–36. (in Japanese)*
- Uchino, T. (2017) Late Triassic U–Pb–zircon age from tuffaceous mudstone in the Kadoma Complex, North Kitakami Belt, Northeast Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **123**, 977–982.
- Uchino, T. (2019) Detrital zircon U–Pb ages of sandstone within the Jurassic accretionary complex in the North Kitakami Belt of the Sotoyama District, Iwate Prefecture. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **70**, 357–372. (in Japanese with English abstract)
- Uchino, T. (2021) Middle Jurassic zircon age from

- sandstone within the accretionary complex in the North Kitakami Belt, Kamatsuda area in Iwaizumi Town, Iwate Prefecture, Northeast Japan: Verifying the age of the accretionary complex containing the Okawa Sample. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **72**, 99–107. (in Japanese with English abstract)
- Uchino, T. and Suzuki, N. (2020) Late Jurassic radiolarians from mudstone near the U–Pb-dated sandstone of the North Kitakami Belt in the northeastern Shimokita Peninsula, Tohoku, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **71**, 313–330. doi:10.9795/bullgsj.71.313
- Ueda, H., Kimura, S., Saito, T., Takano, Y., Iizuka, N. and Orihashi, Y. (2018) Material recycling in a sediment-starved trench recorded in the Early Cretaceous Shiriya accretionary complex, Northeast Japan. *Island Arc*, **27**, 1–20. doi:10.1111/iar.12272
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Quadt, A., Roddick, J.C. and Spiegel, W. (1995) Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, **19**, 1–23.
- Yamaguchi, Y. (1981) Geological structure of the eastern part of the North Kitakami Mountains, Japan—with special reference to structural subdivision. *Tohoku University, Institute of Geology and Paleontology Contributions*, **83**, 1–19. (in Japanese with English abstract)
- Yamaguchi, Y., Tsushima, H. and Kitamura, N. (1979) Geologic development of the Southern part of ‘Taro Belt’ and ‘Iwaizumi Belt’ in the Kitakami Massif, Northeast Japan. *Tohoku University, Institute of Geology and Paleontology Contributions*, **80**, 99–117. (in Japanese with English abstract)
- Yamakita, S. and Otoh, S. (2000) Cretaceous rearrangement processes of pre-Cretaceous geologic units of the Japanese Islands by MTL–Kurosegawa left-lateral strike-slip fault system. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, no. 56, 23–38. (in Japanese with English abstract)
- Yamato Omine Research Group (1992) Mesozoic and Paleozoic Systems in the Central Area of the Kii Mountains, Southwest Japan (Part IV)—Mesozoic of the Takaharagawa District in Nara Prefecture—. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **46**, 185–198. (in Japanese with English abstract)
- Yamato Omine Research Group (2002) Mesozoic and Paleozoic Systems in the central area of the Kii Mountains, Southwest Japan (Part VII)—Mesozoic of the Shionoha area in Nara Prefecture—. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **56**, 11–26. (in Japanese with English abstract)
- Yamato Omine Research Group (2005) Mesozoic and Paleozoic Systems in the central area of the Kii Mountains, Southwest Japan (Part 9)—Reexamination of the Tsujido, Omine, Daiko and Kunimiyama areas—. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **59**, 287–300. (in Japanese with English abstract)
- Yamato Omine Research Group (2007) Mesozoic and Paleozoic Systems in the central area of the Kii Mountains, Southwest Japan (Part 10)—The Mesozoic of the Osugi area in Mie Prefecture—. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **61**, 33–47. (in Japanese with English abstract)
- Yao, A. (1979) Radiolarian fauna from the Mino Belt in the northern part of the Inuyama Area, Central Japan, Part II: Nassellaria 1. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, **22**, 21–72.
- Yoshida, K. and Matsuoka, A. (2003) Pile-nappe structure of the Ryokami-yama chert unit in the Chichibu composite terrane of the Kanto Mountains, central Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **109**, 324–335. (in Japanese with English abstract)
- Yoshida, T. and Katada, M. (1964) *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1: 50,000 ‘Otsuchi and Karodake’ Akita, Nos. 35 and 36*. Geological Survey of Japan, Kawasaki, 30p.
- Yoshida, T., Yoshii, M., Katada, M., Tanaka, K., Sakamoto, T. and Satoh, H. (1987) *Geology of the Rikuchu-Ono district*. With Geological Sheet Map at 1: 50,000. Geological Survey of Japan, Tsukuba, 70p.
- *English translation from the original written in Japanese
- Received March 18, 2022
Accepted October 4, 2022

Plate 1 Photomicrographs and SEM photographs of radiolarians obtained from Otr-NE-01 (Manganese nodule of the Okoshizawa Subunit).

1 *Japnocapsa fusiformis* (Yao)

2 *Gongylothorax siphonifer* Dumitrica

3 *Protunuma fusiformis* Ichikawa and Yao

4 *Striatojapnocapsa* sp.

5 *Diacanthocapsa? operculi* Yao

6 *Striatojaponocapsa synconexa* O'Dogherty, Goričan and Dumitrică

7 *Eucyrtidiellum unumaense* (Yao)

8 *Eucyrtidiellum unumaense* (Yao)

9 Multi-segmented nassellarian

10 *Pantanellium?* sp.

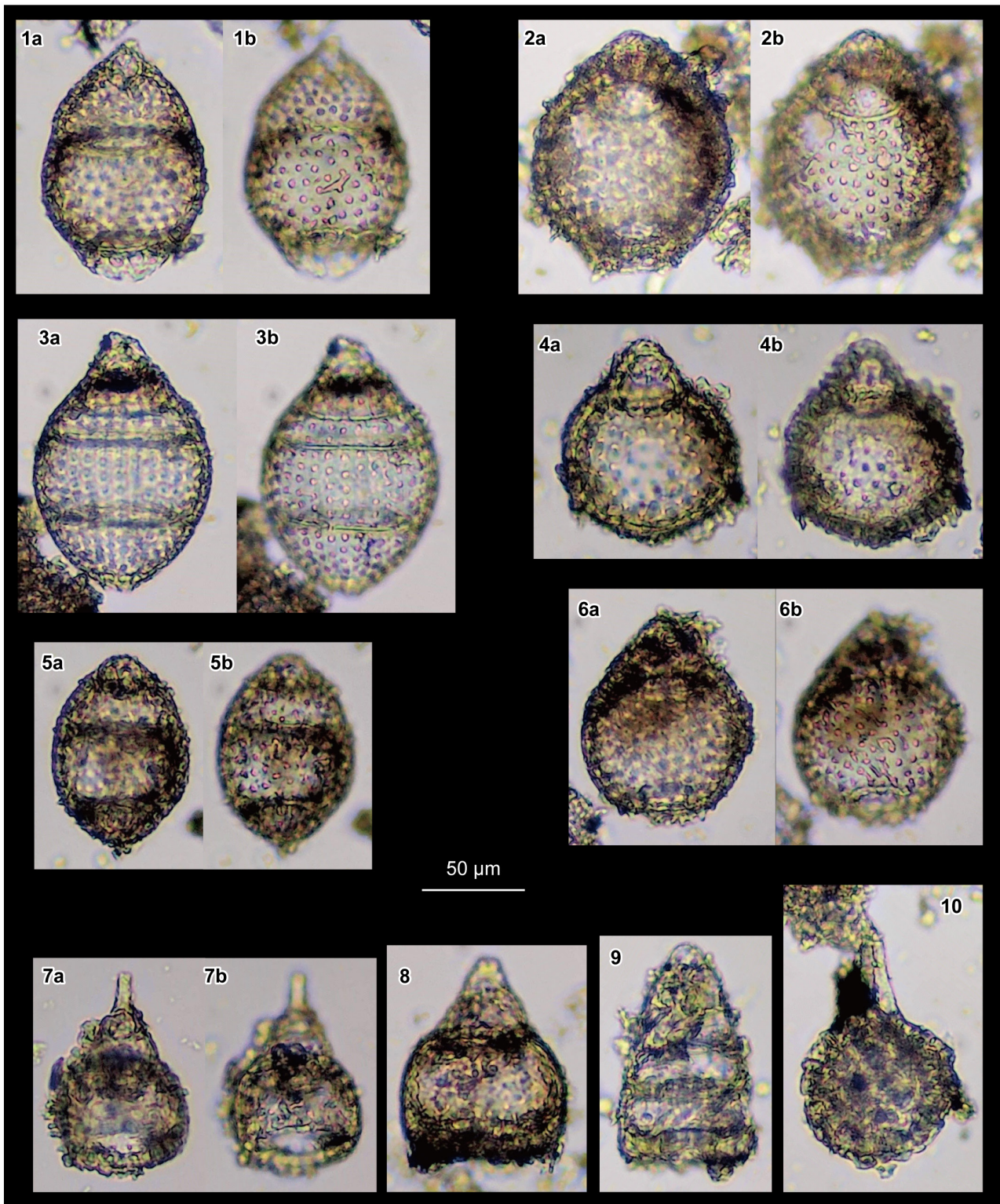


Plate 2 Photomicrographs and SEM photographs of radiolarians obtained from Otr-N-02 (Siliceous mudstone of the Okoshizawa Subunit).

- 1 Closed nassellarian
- 2 Three-segmented closed nassellarian
- 3 Closed nassellarian
- 4 Williriedellidae gen. et sp. indet.
- 5 Williriedellidae gen. et sp. indet.
- 6 Closed nassellarian
- 7 Nassellaria gen. et sp. indet.
- 8 Nassellaria gen. et sp. indet.
- 9 Nassellaria gen. et sp. indet.
- 10 Multi-segmented nassellarian

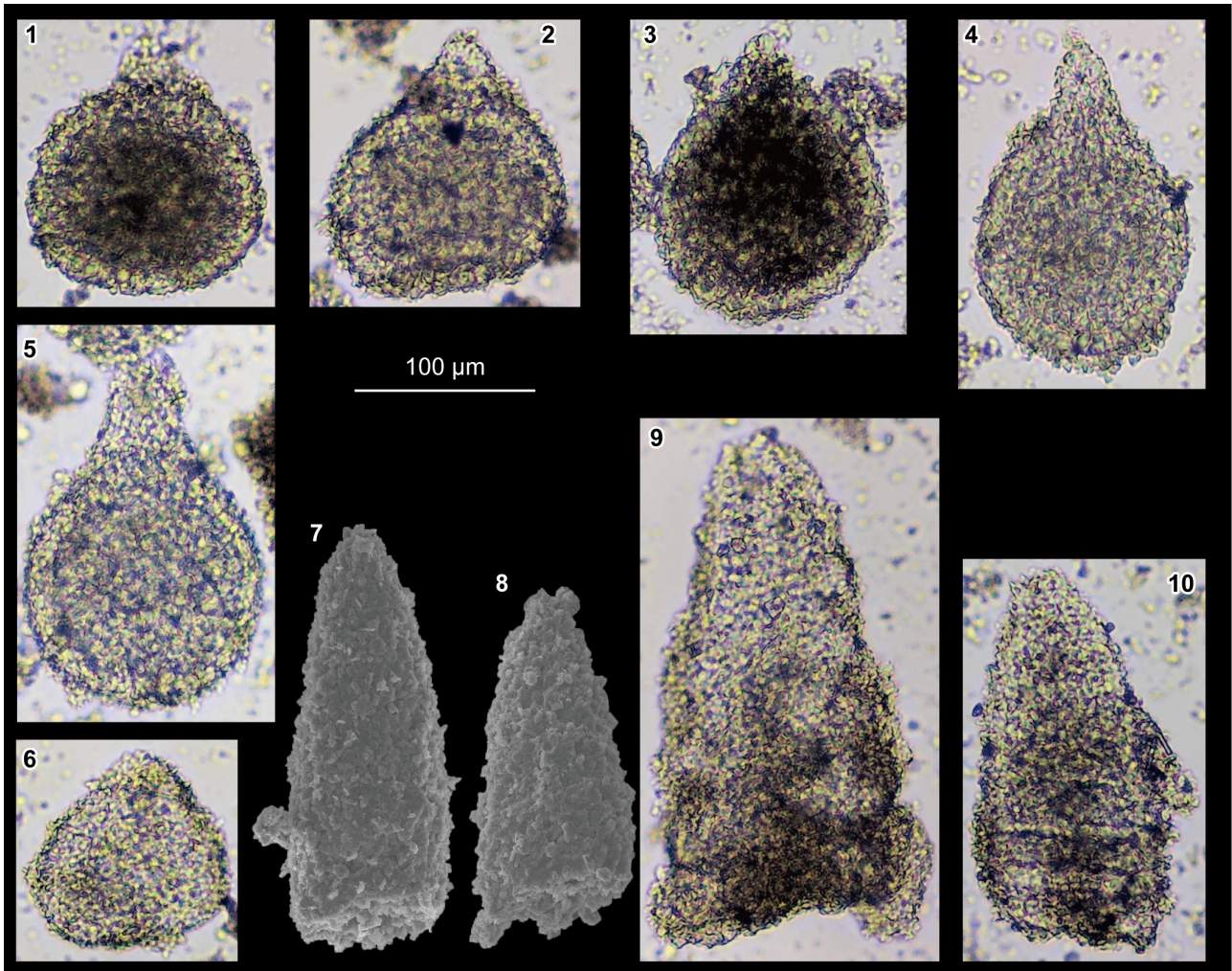


Plate 3 Photomicrographs and SEM photographs of radiolarians obtained from Okz-15 (Siliceous mudstone of the Okoshizawa Subunit).

- 1 Williriedellidae gen. et sp. indet.
- 2 Williriedellidae gen. et sp. indet.
- 3 Closed nassellarian
- 4 Closed nassellarian
- 5 Closed nassellarian
- 6 Closed nassellarian
- 7 Closed nassellarian
- 8 Williriedellidae gen. et sp. indet.
- 9 Closed nassellarian
- 10 Closed nassellarian
- 11 Closed nassellarian
- 12 Closed nassellarian
- 13 Multi-segmented nassellarian
- 14 Nassellaria gen. et sp. indet.
- 15 Nassellaria gen. et sp. indet.
- 16 Spherical radiolarian

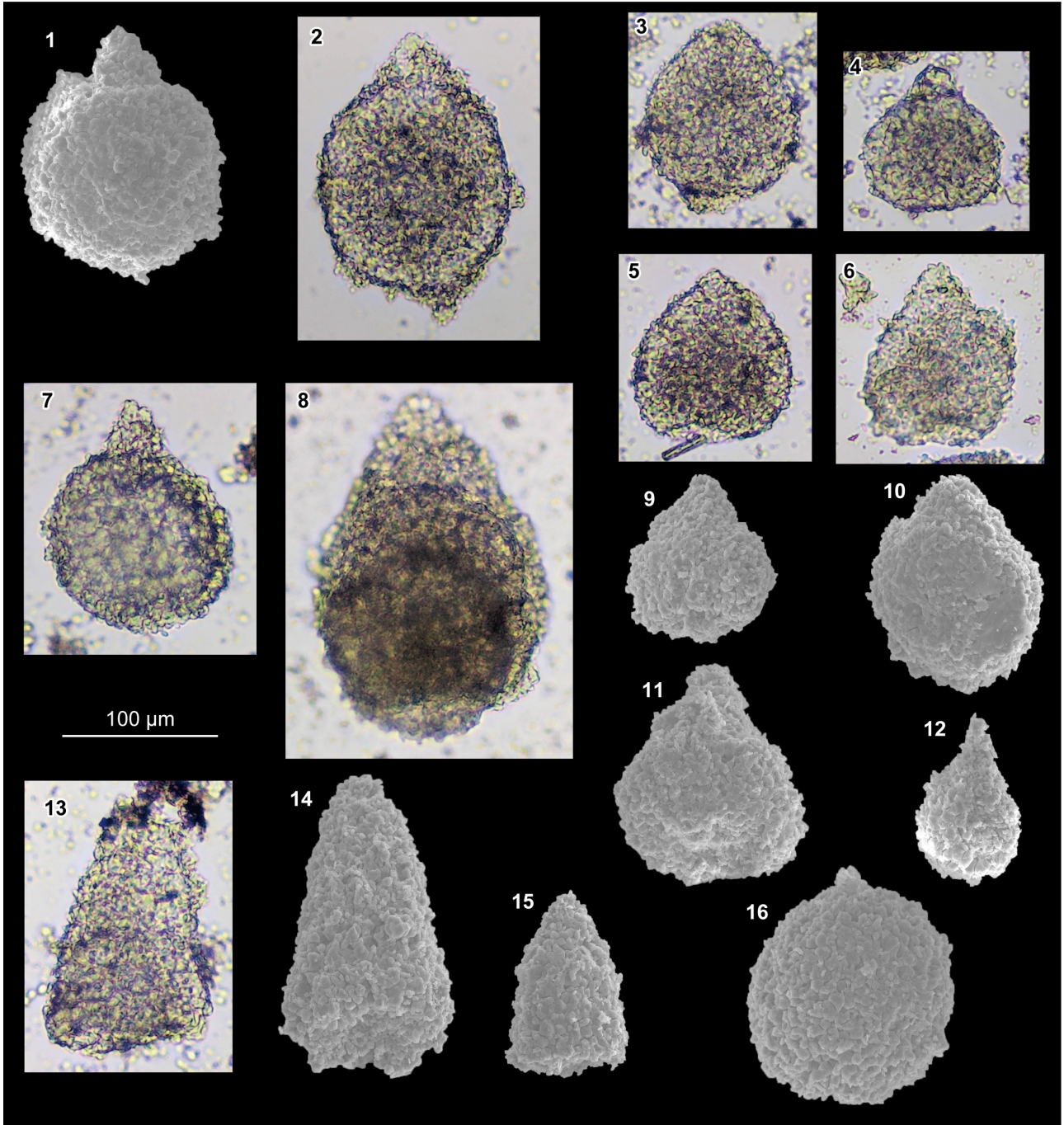


Plate 4 Photomicrographs and SEM photographs of radiolarians obtained from Osm-12 (Siliceous mudstone of the Osakamoto Subunit).

1 *Striatojaponocapsa synconexa* O'Dogherty, Goričan and Dumitrică

2 Williriedellidae gen. et sp. indet.

3 Closed nassellarian

4 Closed nassellarian

5 Williriedellidae gen. et sp. indet.

6 Closed nassellarian

7 Closed nassellarian

8 Closed nassellarian

9 Closed nassellarian

10 *Eucyrtidiellum* sp.

11 *Eucyrtidiellum?* sp.

12 Nassellaria gen. et sp. indet.

13 Nassellaria gen. et sp. indet.

14 *Archaeodictyomitra* sp.

15 Nassellaria gen. et sp. indet.

16 *Charlottea?* sp.

17 *Hagistrum?* sp.

18 *Archaeospongoprunum?* sp.

19 *Archaeospongoprunum?* sp.

20 *Paronaella?* sp.

21 Eptingiidae gen. et sp. indet.

22 Spumellaria gen. et sp. indet.

23 Spumellaria gen. et sp. indet.

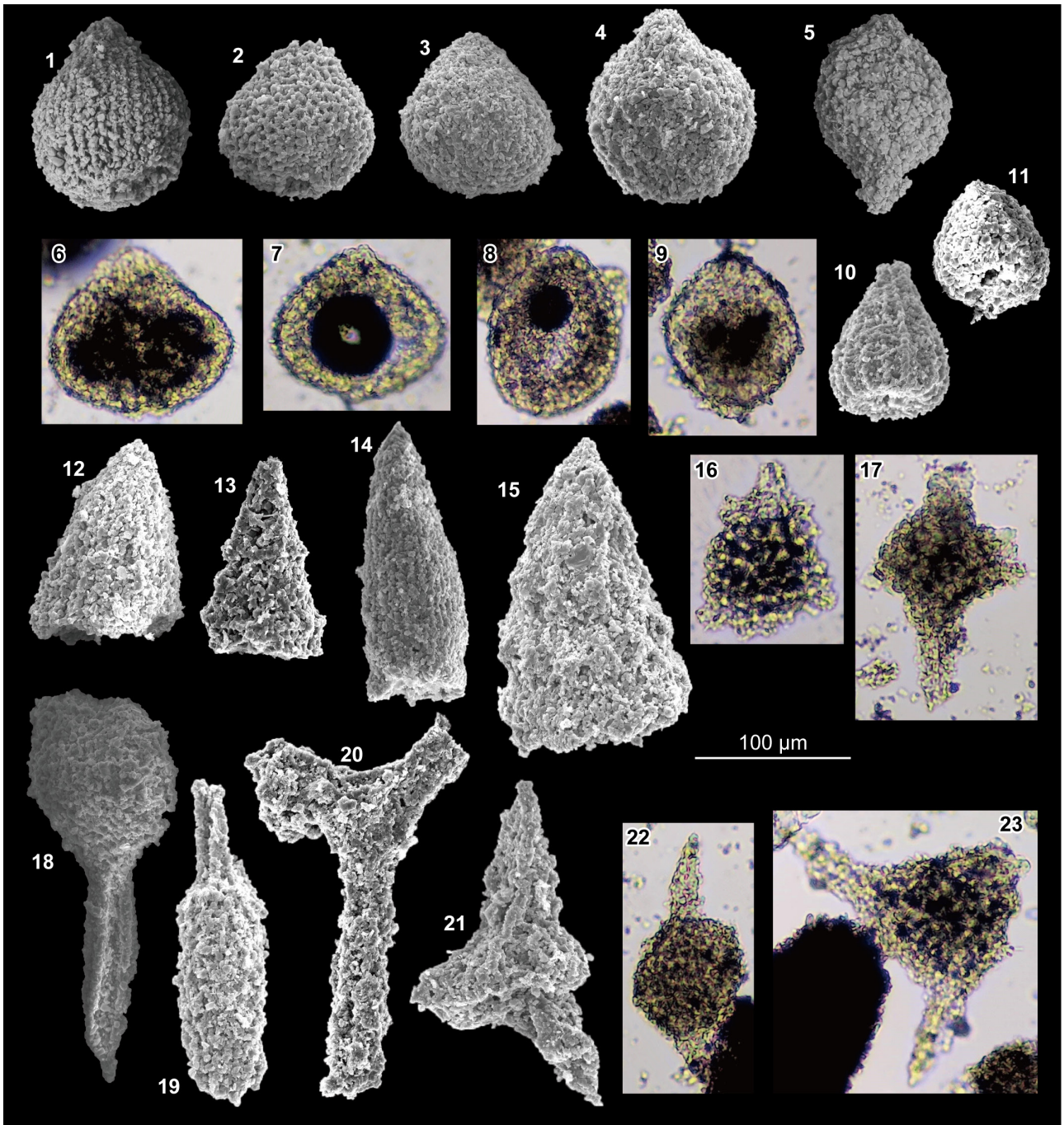


Plate 5 Photomicrographs and SEM photographs of radiolarians obtained from Noz-02 (Siliceous mudstone of the Osakamoto Subunit).

1 *Japonocapsa* cf. *fusiformis* (Yao)

2 *Praezhamoidellum?* cf. *japonicum* (Yao)

3 Closed nassellarian

4 Closed nassellarian

5 Closed nassellarian

6 Closed nassellarian

7 Closed nassellarian

8 Closed nassellarian

9 Closed nassellarian

10 *Nassellaria* gen. et sp. indet.

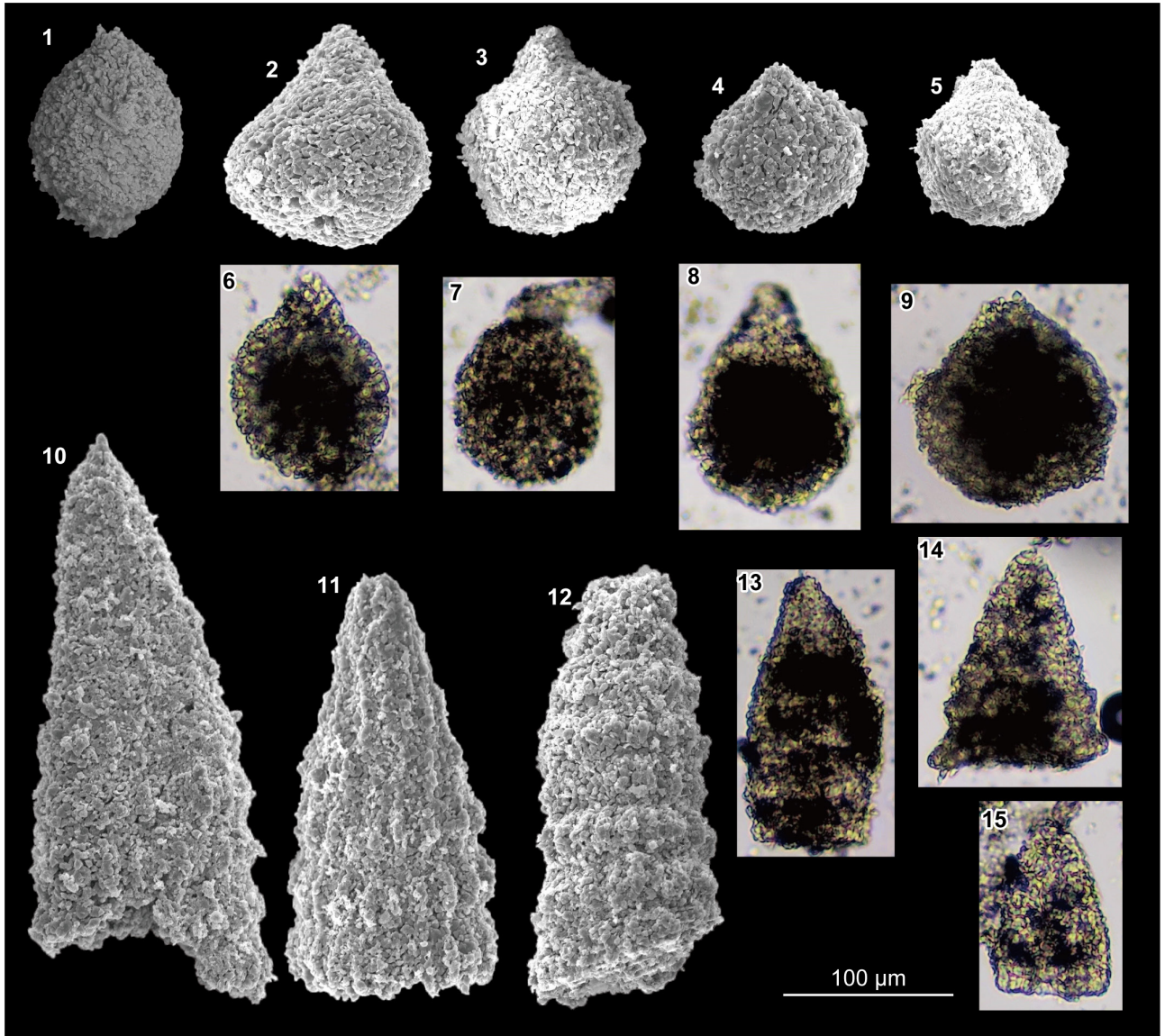
11 *Hsuum* sp.

12 Multi-segmented nassellarian

13 Multi-segmented nassellarian

14 Multi-segmented nassellarian

15 Multi-segmented nassellarian



Appendix

Table A1 Sample list.

Sample ID	Lithology	Locality		Subunit	Note
		°N	°E		
Okz-CO-01	Chert	40.007	141.606	Okoshizawa	Conodonts.
Otr-NE-01	Mn nodule	39.969	141.645	Okoshizawa	HCl treatment for radiolarians.
Otr-N-02	Siliceous mudstone	39.978	141.630	Okoshizawa	Dilute HF treatment for radiolarians.
Okz-15	Siliceous mudstone	39.992	141.606	Okoshizawa	Dilute HF treatment for radiolarians.
Noz-02	Siliceous mudstone	39.965	141.589	Osakamoto	Dilute HF treatment for radiolarians.
Osm-12	Siliceous mudstone	40.004	141.573	Osakamoto	Dilute HF treatment for radiolarians.
Wys-02*	Mn nodule	39.943	141.651	Osakamoto	HCl treatment for radiolarians.
Otr-01*	Mudstone	39.965	141.648	Osakamoto	Dilute HF treatment for radiolarians.
Okz-33	Sandstone	39.990	141.604	Osakamoto	Zircon U–Pb dating.
Skm-08	Sandstone	39.973	141.610	Osakamoto	Zircon U–Pb dating.

*no identifiable radiolarians were obtained.

Table A2 List of outcrops shown in the figures.

Figure	Geographic name	Locality		Subunit	Note
		°N	°E		
Figure 6A	Otori	39.966	141.638	Okoshizawa	Bedded chert
Figure 6B	Okoshi Stream	39.992	141.606	Okoshizawa	Siliceous mudstone
Figure 6C	Ananeyama Logging Road	39.962	141.651	Okoshizawa	Mudstone with broken sandstone
Figure 6D	Okoshi Stream	40.007	141.605	Okoshizawa	Dolostone and chert
Figure 6E	Otori	39.966	141.639	Okoshizawa	Green siliceous claystone
Figure 6F	Otori	39.966	141.639	Okoshizawa	Red siliceous claystone
Figure 6G	Orikabe	39.952	141.664	Okoshizawa	Chert, grey siliceous claystone, black carbonaceous claystone (Permian–Triassic Boundary)
Figure 6H	Okoshi Stream	40.006	141.605	Okoshizawa	Chert breccia
Figure 6I	Okoshi Stream	40.007	141.606	Okoshizawa	Chert breccia and mudstone
Figure 8A	Northeast of Otori	39.968	141.645	Okoshizawa	Siliceous mudstone with Mn nodule
Figure 9A	Okoshi Stream	39.987	141.602	Osakamoto	Mudstone
Figure 9B	Orikabe	39.947	141.663	Osakamoto	Mixed mudstone and sandstone
Figure 9C	Sakamoto	39.967	141.618	Osakamoto	Mixed rock
Figure 9D	Tengubatake Logging Road	39.943	141.650	Osakamoto	Bedded sandstone

Table A3 Occurrence list of radiolarians.

Sample	Okoshizawa Subunit			Osakamoto Subunit	
	Otr-NE-01	Otr-N-02	Okz-15	Osm-12	Noz-02
	Mn nodule	si. md.	si. md.	si. md.	si. md.
<i>Archaeodictyomitra</i> sp.				x	
<i>Diacanthocapsa</i> ? <i>operculi</i> Yao	x				
<i>Eucyrtidiellum unumaense</i> (Yao)	x				
<i>Eucyrtidiellum</i> sp.				x	
<i>Eucyrtidiellum</i> ? sp.				x	
<i>Gongylothorax siphonifer</i> Dumitrica	x				
<i>Hsuum</i> sp.					x
<i>Japnocapsa fusiformis</i> (Yao)	x				
<i>Japnocapsa</i> cf. <i>fusiformis</i> (Yao)					x
<i>Praezhamoidellum</i> ? cf. <i>japonicum</i> (Yao)					x
<i>Protunuma fusiformis</i> Ichikawa and Yao	x				
<i>Striatojapnocapsa synconexa</i> O'Dogherty, Goričan and Dumitrică	x			x	
Williriedellidae gen. et sp. indet.		x	x	x	
Nassellaria gen. et sp. indet.		x	x	x	x
Multi-segmented nassellarian	x	x	x		x
Three-segmented closed nassellarian		x			
Closed nassellarian		x	x	x	x
<i>Archaeospongoprunum</i> ? sp.				x	
<i>Charlottea</i> ? sp.				x	
<i>Hagistrum</i> ? sp.				x	
<i>Pantanellium</i> ? sp.	x				
<i>Paronaella</i> ? sp.				x	
Eptingiidae gen. et sp. indet.				x	
Spumellaria gen. et sp. indet.				x	
Spherical radiolarian			x		

北部北上帯大鳥ユニットの地質と付加年代

武藤 俊・伊藤 剛・村山 雅史

要 旨

東北日本の北部北上帯に属するジュラ紀から白亜紀初期に形成された付加体は、同時代に形成された西南日本の付加体と比較して研究が少ない。本論文では、北部北上帯北東部、安家川上流に分布するジュラ紀付加体大鳥ユニットについての調査結果を報告する。詳細なマッピングに基づき、大鳥ユニットが、構造的低位を占めチャートと珪質泥岩の整然相が構造的に繰り返す大越沢サブユニットと、構造的上位を占め泥質岩に砂岩、チャート、微量の玄武岩類が含まれる混在相の大坂本サブユニットからなることを明らかにした。大越沢サブユニットの珪質泥岩中のマンガンノジュールから中期ジュラ紀バトニアン期を指示する放散虫化石が得られた。また、大坂本サブユニットの砂岩試料から抽出された碎屑性ジルコンは、約 170 Ma の最若年代を示す。放散虫および碎屑性ジルコンの年代から、大鳥ユニットの付加年代はバトニアン期と推定される。本研究のデータを用いて、北部北上帯と西南日本の南部秩父帯との対比について検討した。大鳥ユニットは構造的には南部秩父帯の大平山ユニットに対応し、両者は混在相からなる点で類似し、付加年代も重なっている。しかし、大鳥ユニットが石灰岩を欠く点と珪質泥岩の年代が若い点は大きな相違点であり、両者は厳密には対比できない可能性がある。

難読・重要地名

Kitakami 北上 Otori 大鳥 Akka 安家 Okoshizawa 大越沢 Osakamoto 大坂本 Kassenba 合戦場 Hiraniwadake 平庭岳

第34回地質調査総合センターシンポジウム
「防災・減災に向けた産総研の地震・津波・火山研究
—東日本大震災から10年の成果と今後—」講演要旨集

第34回地質調査総合センターシンポジウム事務局^{1,*}

Secretariat of the 34th GSJ Symposium (2023) Abstracts of the 34th GSJ symposium “Research of Earthquake, Tsunami, and Volcano at AIST toward disaster prevention and mitigation: Achievements of 10 years since the Great East Japan Earthquake and future research”. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74(1), p. 41–60.

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、国土強靱化が強く意識されるようになった。令和2年度からスタートした産総研第5期中長期計画でも、社会課題解決に向けて最も重要な目標の一つとして「強靱な国土と社会の構築に資する地質情報の整備と地質の評価」が掲げられている。また、令和2年12月に閣議決定された「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」の中でも活断層・火山情報の解析・評価、集約・情報提供が重要施策の一つとして取り上げられている。さらに、令和3年5月31日公表された第3期知的基盤整備計画においても、国土強靱化に向けて活断層・火山情報の収集・評価と情報提供が重点化・加速化すべき政策とされている。活断層・火山研究部門は、産総研において国土強靱化に関する研究を行う主要な組織である。今回のシンポジウムでは、こうした社会の流れと当部門が2011年以降に進めてきた地震・火山に関する研究をふまえ、今後の研究の方向性について紹介する第34回GSJシンポジウム「防災・減災に向けた産総研の地震・津波・火山研究—東日本大震災から10年の成果と今後—」を、令和3年11月12日に、オンラインで開催した。全国39都道府県から609名(内、産総研120名)の登録があり、当日は常時400名程度の視聴者数であった。活発な質問もあり、開催後のアンケートにおいても概ね好評であった。

以下では、2名の招待講演を含む口頭発表9件およびポスター発表9件(第1表)の講演要旨を報告する。

Keywords:The 34th GSJ symposium, Earthquake, Tsunami, Volcano, Disaster prevention and mitigation

第1表 講演プログラム

口頭発表

10:00-10:05	開会挨拶	地質調査総合センター長 中尾信典
10:05-10:15	趣旨説明	活断層・火山研究部門長 伊藤順一
10:15-10:45	活断層の古地震調査の進展と活断層データベースの高精度化	活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ主任研究員 吾妻 崇
10:45-11:05	長大活断層の連動性評価の研究—活断層調査と断層変位計算—	活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ主任研究員 近藤久雄
11:05-11:25	長大活断層の連動性評価の研究—地殻応力場と数値シミュレーション—	活断層・火山研究部門 地震災害予測研究グループ主任研究員 加瀬祐子
11:25-11:45	地形・地質・史料に基づく海溝型巨大地震の評価	活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ長 宍倉正展
11:45-12:05	南海トラフ地震の短期予測研究の現状と産総研の役割	活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ 松本則夫
12:05-13:00	休憩	

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

^{*} Corresponding author: Secretariat of the 34th GSJ Symposium, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: M-gsj-symposium34-ml@aist.go.jp

第1表 講演プログラム(続き)

13:00-13:20	ポスターショートトーク	
13:20-13:50	火山地質図の整備と国土強靱化のための新たな取り組み	活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ長 古川竜太
13:50-14:20	大規模噴火はどのようににはじまり進行するか：地質学的事例研究から見る噴火推移パターンの多様性	活断層・火山研究部門 大規模噴火研究グループ長 下司信夫
14:20-14:30	休憩	
14:30-15:00	地震・火山防災対策におけるGSJへの期待	気象庁地震火山部 管理課長 加藤孝志
15:00-15:30	桜島の火山防災対策と大量軽石火山灰対応に必要な研究・対策	鹿児島市危機管理課 課長 児玉博史
15:30-15:35	閉会挨拶	地質調査総合センター研究戦略部長 光畑裕司

ポスター発表

東京都区部の3次元地質地盤図	地質情報研究部門 都市域の3次元地質地盤図プロジェクト
長大活断層の運動性評価の研究	活断層・火山研究部門 近藤久雄 ^{#1} ・加瀬祐子 ^{#2} ・今西和俊・内出崇彦 ^{#3} ・ 椎名高裕 ^{#3} ・竿本英貴 ^{#2} ・浦田優美 ^{#3} (#1：活断層評価研究グループ、#2：地震災害予 測研究グループ、#3：地震テクニクス研究グ ループ)
産総研における活断層調査研究の進展と課題	活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ
物理モデルに基づく大地震の規模・時期予測手法の確立に向けて	活断層・火山研究部門 地震テクニクス研究グループ
産総研の南海トラフ巨大地震観測ネットワークーゆっくりすべりの観測と 気象庁による常時監視への貢献ー	活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ
東京湾にも津波は来る	活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ
火山噴火履歴調査と火山活動の時空間分布把握のためのK-Ar、Ar/Ar年代測 定の高精度化・高効率化	活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ
噴火発生や活動推移の予測に向けた火山現象のモデル化	活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ
大規模噴火データベース・噴火推移データベースから読む大規模噴火の推 移と前駆活動	活断層・火山研究部門 大規模噴火研究グループ

活断層の古地震調査の進展と 活断層データベースの高精度化

吾妻 崇[†]

([†]活断層・火山研究部門)

1. はじめに

地質調査総合センターでは、前身の地質調査所時代である1970年代から活断層に関する調査を実施してきた。1995年兵庫県南部地震(M 7.3)発生後に国の活断層調査事業が開始すると、全国の活断層調査が急加速して進められた。調査の基礎情報となる活断層図については、国土地理院や大学の研究者によって作成・出版された。古地震調査については、都道府県には活断層調査のための委員会が設置され、数多くの活断層においてトレンチ調査、ボーリング調査、反射法地震探査、海域における音波探査などが実施された。当時の地質調査所でも地震発生直後から近畿圏を中心に、全国の主要な活断層の活動履歴調査を実施した。これらの活断層調査の成果は、報告書や論文という形で記録が残されている。しかし、それらは散在していることが多く、とくに電子媒体が普及する以前の紙資料については、入手や閲覧が困難なものも多かった。地質調査情報センターでは、2000年代前半からこれらの調査資料をデータベース化する必要性を感じて開発作業を進め、2005年に活断層データベースを公開した。

本講演では、これまでに地質調査所及び地質調査総合センターが実施してきた活断層調査について紹介するとともに、その成果を集約する活断層データベースの今後の更新計画について紹介する。

2. 地質調査総合センターにおける活断層調査

地質調査総合センターでは、活断層に関連する地質図類として、全国をカバーする活構造図や主要な活断層のストリップマップを発行してきた。1995年兵庫県南部地震発生以前から活断層の古地震トレンチ調査を実施していた。1974年伊豆半島沖地震や伊豆大島近海地震では、地表地震断層の調査を実施した。1995年兵庫県南部地震が発生し、国の活断層調査事業が開始されると、1995年と1996年には約15の活断層調査を緊急的に実施し、その後も2005年度まで年間7～10断層の活断層調査が行われた。

2005年になり、全国に分布する主要活断層の活動履歴調査とそれらの長期評価が一通り完了し、地震調査研究推進本部から全国地震動予測地図が公表された後には、活断層の追加・補完調査、内陸及び沿岸域の活断層調査、地域評価のための活断層調査、活断層評価の高度化・効率化のための調査を受託し、全国地震動予測地図の改善

に貢献してきた。そのほかに、長大な活断層から発生する連動型地震に関する研究や孤立した短い活断層に関する研究などを受託研究として実施した。

大地震発生時の緊急調査としては、1998年岩手県内陸北部の地震、2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年福島県浜通りの地震、2014年長野県北部の地震、2016年熊本地震などの直後に地表地震断層の分布調査や古地震トレンチ調査を実施した。海外で発生した地震については、1999年イズミット地震・デュズェ地震(トルコ)、1999年集集地震(台湾)、2003年バム地震(イラン)、2005年カシミール地震(パキスタン)などの現地調査に地質調査総合センターの研究員が参加した。

3. 活断層の評価

活断層の評価においては、位置形状、平均変位速度、地震時の変位量、平均活動間隔、過去の活動時期を明らかにして、活断層から発生する大地震の規模と近い将来に大地震が発生する可能性を推定する。位置形状について、活断層データベースでは断層線と断層線の隔離距離が2 km以内のときには、活動時に一連の断層破壊を生じる活断層(活動セグメント)として考えている。平均変位速度は活断層の活動性を表すパラメータであり、変位基準となる地層や地形で認められる変位量をそれらの形成年代で除した値である。活断層データベースでは、地質年代などに基づく具体的な平均変位速度が不明な活断層については、地形表現等に基づいて活動性をA級からC級に分類し、それぞれの活動性に対応した仮置き値を与えている。地震時変位量は、野外調査で計測される変位量のほか、活断層の長さや地震時変位量に関する経験式によって算出されている。平均活動間隔は、野外調査によって明らかにされた複数の活動時期に基づいて算出されるほか、平均変位速度を地震時変位量で除した値が評価値として用いられている。

4. 活断層データベースの更新

地質調査総合センターで公開している活断層データベースについては、インターネットによる情報表示技術の向上と活断層調査の進展に合わせて、利用者が使いやすい表示形式を目指して改変を進めてきた。これまでの活断層の活動確率を議論する段階においてはインデックスとしての活断層図があれば十分であったが、活断層の横切る構造物の断層変位に対する対策を考えるためには詳細な活断層図が必要となる。地震動の評価に対しても、2016年熊本地震で記録されたような活断層のごく近傍で発生する強い揺れを考慮するためにも詳細な活断層図は不可欠である。このような状況を鑑み、これまで活断層

データベースで表示してきた縮尺20万分の1程度の活断層図を縮尺5万分の1程度に改善することを目指している。

また、活断層の評価に関して、これまで評価対象としていなかった活動度C級や長さ10 km未満の活断層につ

いても活動確率を算出できるような評価システムを構築する。平均変位速度については、仮置き値のままになっている活断層について地質調査を実施して具体的な評価値を得ることを継続的に行う必要がある。

長大活断層の連動性評価の研究 —活断層調査と断層変位計算—

近藤 久雄[†]

([†]活断層・火山研究部門)

産業技術総合研究所・地質調査総合センターでは、(旧)活断層研究センター及び(旧)活断層・地震研究センターの時代から継続する重要課題として、国内外の長大な活断層から生じる連動型地震の発生予測や可能性評価の調査研究を実施してきた。長大な活断層は、複数の活断層ないし断層区間(以下、セグメント)により構成され、セグメント単独でもM7程度を超える大地震を生じるが、複数セグメントが連動してさらに大規模な大地震/巨大地震を生じる場合もあるという複雑な概念が定着しつつある。

複数の活断層やセグメントが連動した場合の地震規模は、事前に連動範囲を仮定した推測が可能ではある一方で、具体的な発生可能性や発生確率については評価手法がないのが現状である。この難題に対して、かつては活断層・古地震調査に基づく歴史時代の連動型イベントに伴う活動範囲の把握や、動的破壊のシミュレーションに基づく複数セグメントの連動性評価をそれぞれの分野が独立して実施してきた。一方、主に2017年以降では、それらを融合させつつ発展を図り、複雑な断層形状をモデル化した3次元有限要素法(FEM)による断層モデルの高度化や、微小地震解析による精密なメカニズム解・応力場推定の分野も協働して、分野横断的な融合研究として同課題に取り組んでいる。本シンポジウムの近藤の発表では、活断層・古地震調査と3次元FEMの断層モデル高度化、引き続き加瀬の発表では微小地震解析と動的破壊シミュレーションのそれぞれを中心に最近の進展と課題について報告する。なお、2017年以降は、文科省・地震調査研究推進本部の委託研究の一部として実施している。

活断層・古地震学的なアプローチからは、これまで未解明であった過去の連動型地震イベントの判別と変位履歴の解明に基づく連動確率の試算に取り組んでいる。従来は、トレンチ調査等による活動時期の解明や大地震発生頻度の把握が主眼であったが、イベント毎の連動や非連動の峻別はできなかった。そのため、新たに地震時の変位量(イベント毎のずれ量)を調査して考慮すること

により、連動イベントと非連動イベントの判別が可能となった。その結果、連動イベントの発生頻度が推定可能となり、ポアソン過程に基づく連動確率の試算が初めて可能となりつつある(近藤ほか, 2020)。例えば、糸魚川-静岡構造線断層帯での試算では、4つの活動区間のうち北部区間と中北部区間が30年以内に連動する確率は0.9~1.0%、全体の4つの区間が連動する確率は0.3%未満と試算されている。

3次元FEMの断層モデル高度化では、複雑な断層形状のモデル化、連動時/非連動時それぞれの3次元的な変位量分布の把握が可能となった(竿本, 2020)。従来は、矩形の断層面を設定してすべり量を予め入力し、その断層がずれ動いた場合の周辺の変位場を推定する断層モデルが主流であった。そのため、複数セグメントの連動/非連動時の変位量分布や変位場を差別化して模擬することができなかった。これに対して近年では、地表から地下での断層面の折れ曲がりや湾曲など、詳細な断層形状を3次元FEMによってモデル化が可能となった。さらに周辺の応力場を設定することにより、断層面上とその周辺でどのような変位が生じるかを数値計算で推定可能とした。その結果、これまでは断層面をセグメント毎に分割してモデル化せざるを得なかったものが、地下では滑らかに連続する断層面として表現可能となり、それらの断層が連動した場合の変位量分布が地表から地下深部まで推定可能となった。連動時の変位量分布は、上述の活断層・古地震調査により復元された連動/非連動の地震時変位量が妥当であるかを数値計算から検証する重要な位置づけにもなっている。

また、このような複雑な断層形状を合理的にモデル化するため、新たな視点から断層形状のモデル化に取り組んでいる。これまでは地表から地震発生層下端付近までの断層形状については、様々な関連分野のそれぞれが得意とする時間軸の地形や地層の変位・変形を拘束条件として推定され、専門家間でも議論が分かれる場合も多かった。一方、本研究では、地震学・測地学、地形学、地質学的な時間軸の中で生じた地殻変動、断層変位・変形を拘束条件として、特に第四紀中期以降、現在までの変位基準を重視した。例えば、糸魚川-静岡構造線断層帯の北部区間では、2014年長野県北部の地震に伴う余震分布や震源となった神城断層の地表分布、浅部の断層形

状、地質断層としての小谷-中山断層や鮮新-更新統の地質分布との関係を精査し、それらの調査観測事実と矛盾しない合理的な断層形状モデルを設定した。

参考文献

近藤久雄・木村治夫・杉戸信彦(2020)変位履歴に基づく連動性評価のための地形地質調査。文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向け

た活断層調査研究」平成29～令和元年度成果報告書, 3-200.

竿本英貴(2020)三次元有限要素法(FEM)による断層モデルの高度化。文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」平成29～令和元年度成果報告書, 241-336.

長大活断層の連動性評価の研究 —地殻応力場と数値シミュレーション—

加瀬 祐子[†]

([†]活断層・火山研究部門)

長大な活断層は、複数の活断層ないし断層区間によって構成され、各区間単体で活動する場合もあれば、複数の区間が連動して、より大きな地震となる場合もある。しかし、内陸活断層の活動間隔は長いので、ごく最近に活動した活断層以外では、実際に連動したことがあるのか、具体的にどのような組み合わせで連動するのかについての詳細はわからない。この問題に対して、古地震学的調査による活動履歴の把握、有限要素法解析による断層モデルの高度化、微小地震解析による詳細な応力場の推定、動的破壊シミュレーションによる連動性評価という複数分野で取り組んでいる。本シンポジウムひとつ前の近藤の講演に引き続いて、微小地震解析と動的破壊シミュレーションを中心に報告する。

地震は地殻にはたらく応力が断層面に沿って解放される現象であるから、地殻を構成する物質を支配する方程式と断層面にはたらく応力の分布、および、断層面に作用する摩擦則を適切に与えられれば、断層面上の破壊の進展を物理的に求めることができる。現実には、これらすべての値を得ることは難しいが、近年では、地震観測網の充実、地震波形解析技術の発展、計算機能力の向上により、実際の地震の破壊過程をおおよそ再現できるようになった(例えば、2014年長野県北部の地震についてはAndo *et al.* (2017)、2016年熊本地震についてはUrata *et al.* (2017)など)。しかし、古地震学について得られる情報は限られている。そこで、古地震学的調査で得られる活動履歴(過去の情報)を、地震学的観測と有限要素法解析で得られる断層モデルと応力場(現在の情報)に基づく動的破壊シミュレーションと結びつけることによって、起こり得る連動のパターンを調べる(過去の再現と未来の予測)という流れで研究を進めている。活動履歴と断層モデルに関しては、ひとつ前の近藤の発表を参照されたい。

微小地震解析によって応力場を求める過程では、大量の微小地震の震源を決定し、メカニズム解を推定したデータを用いて、応力場のパラメータを求める。同時に、震源決定のための速度構造モデルの検討や、決定された震源分布から断層形状や断層下限深度についての考察も行われる。糸魚川-静岡構造線断層帯においては、2017年長野県中部の地震(Mj5.3)とその余震、2018年長野県北部の地震(Mj5.2)とその余震を用いて、北部区間南端部付近の応力場が北西-南東圧縮の横ずれ応力場、糸魚川-静岡構造線断層帯北部区間の応力場が北西-南東圧縮の逆断層と横ずれの共存する応力場であると推定した(今西・内出, 2020)。中央構造線断層帯においても、同様の検討を行っているところである。

このようにして得られた断層モデルと応力場モデルを用いて動的震源モデルを構築し、動的破壊シミュレーションを行う。ただし、このままでは拘束できないパラメータが存在するため、多数のパラメータ・スタディを行い、その結果を古地震学的調査で得られる活動履歴やすべり量と比較することで、妥当なパラメータの範囲を絞り込んでいく。そうして残ったシミュレーション結果が、起こり得た/起こり得る連動パターンである。また、古地震学的情報と調和的な計算結果を得られるパラメータの値から、動的震源モデル構築の対象外とした領域を含めた連動可能性について考察することもできる。糸魚川-静岡構造線断層帯では、中北部区間と中南部区間を対象として検討を行い、中北部区間から中南部区間への連動が起こり得ること、北部区間も含めた連動を考慮する必要があることを示した(加瀬, 2020)。また、中央構造線断層帯では、讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間の4区間を対象とした検討を行っており、それぞれの区間単独の活動、複数区間の連動など、様々な活動パターンが再現されている(加瀬・浦田, 2021)。今後、詳細な応力モデルへの更新や活動履歴との照合を進めることで、起こりうる連動パターンを絞り込めることが期待される。

参考文献

- Ando, R., Imanishi, K., Panayotopoulos, Y. and Kobayashi, T. (2017) Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake. *Earth, Planets and Space*, **69**, 130. doi:10.1186/s40623-017-0715-2
- 今西和俊・内出崇彦 (2020) 速度構造不均質を考慮した精密震源決定. 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」平成29～令和元年度成果報告書, 201–240.

- 加瀬祐子 (2020) 動的破壊シミュレーションによる連動性評価. 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」平成29～令和元年度成果報告書, 337–370.
- 加瀬祐子・浦田優美 (2021) 動力学的震源モデルに基づく中央構造線断層帯の連動性の検討. 日本地震学会2021年度秋季大会予稿集, S08P-08.
- Urata, Y., Yoshida, K., Fukuyama, E. and Kubo, H. (2017) 3-D dynamic rupture simulations of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake. *Earth, Planets and Space*, **69**, 150. doi:10.1186/s40623-017-0733-0

地形・地質・史料に基づく海溝型巨大地震の評価

宍倉 正展[†]

(† 活断層・火山研究部門)

海溝型地震は2011年東北地方太平洋沖地震のようにまれに巨大化し、大きな津波を発生させることがある。そのような巨大地震は数百年以上の長いくり返し間隔を持つため、正確な規模や長期的な発生時期を予測するには、過去にどのような地震や津波が起きていたのかを数千年オーダーで遡って解明する必要がある。産業技術総合研究所の海溝型地震履歴研究グループ(以下、グループと略す)では、歴史記録や地形・地質に記録された痕跡の調査から、過去の海溝型巨大地震の発生時期や規模を解明し、地球物理学的な検討を通して震源域・波源域を復元する研究を行っている。対象となる地域は日本列島沿岸各地に広がるが、知的基盤整備計画の下では、特に千島海溝南部、日本海溝南部、相模トラフについて重点的に調査を行っている。また南海トラフについては、おもに文部科学省の委託事業である「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」(海洋研究開発機構より再委託)の一環として調査を実施している。このほかいわゆる科研費の基盤研究や他機関との共同研究という形で、上記の地域に加えて日本海沿岸や海外も調査対象となっている。ここではグループが各地で行っている調査研究の成果とその防災・減災上のねらいについて説明する。

【千島海溝】

千島海溝では北海道東部沿岸での堆積物調査から、17世紀に大きな津波と余効変動による隆起を伴う超巨大地震が発生していたことが明らかになっている(Nanayama *et al.*, 2003; Sawai *et al.*, 2004など)。またその断層モデルについても検討が続けられている(Ioki and Tanioka,

2016など)。これらの成果は政府の地震調査研究推進本部の長期評価に反映されており、超巨大地震の将来の発生が「切迫している」と評価されている。グループは現在も津波堆積物や海岸地形の調査を行い、より正確な過去の津波浸水域の復元に向けた努力を続けており(中村ほか, 2019など)、これらのデータに基づいた断層モデルの再構築を行うことで、より正確な津波想定等へ利活用されることを目指している。

【日本海溝】

日本海溝沿いは2011年に東北地方太平洋沖地震が発生している。グループはこの地震の前から、仙台平野を中心に869年貞観地震をはじめとした巨大地震の履歴を解明し、宮城沖から福島沖のプレート境界で断層モデルを提案していた(Sawai *et al.*, 2012など)。これらの成果は、津波堆積物研究が防災・減災の面からも注目されるきっかけとなった。一方、貞観地震の推定断層の南にあたる茨城沖から房総沖は、歴史的に1677年延宝房総沖地震の存在が知られているものの、履歴がよくわかっておらず、千葉県は2011年の地震の割れ残りともみなして津波被害想定の対象波源としている。この地域では最近、産総研とカナダ・サイモンフレイザー大学等の海外研究機関との共同による九十九里浜での津波堆積物調査から、約1000年前にも大きな津波浸水があったことが明らかになった(Pilarczyk *et al.*, 2021)。その波源の候補の1つとして、従来の想定では考慮されていなかった房総沖直下のフィリピン海プレートと太平洋プレートの境界の断層が新たに提案できる。

【相模トラフ】

相模トラフ沿いでは歴史的に1923年大正関東地震や1703年元禄関東地震の発生が知られ、さらに海岸段丘などの調査研究から同様の地震が過去から繰り返し発生し

ていることが明らかになっている(Shishikura, 2014など)。これらの履歴情報は地震調査研究推進本部の長期評価に反映され、発生確率算定の根拠となっている。最近、産総研と東京大学との共同研究により、房総半島南部沿岸の海岸段丘について見直しが行われ、高解像度DEMの地形解析や、構成する堆積物の集中的な年代測定と統計解析から、高度分布と離水年代が再評価された(Komori *et al.*, 2017, 2020, 2021)。その結果、いわゆる元禄型の地震は、ほぼ同じ変動パターンでくり返すものの、再来間隔は1270～2460年とばらつくことが明らかになっている。これらの成果は今後の長期評価の見直しの際に重要な情報となる。

【南海トラフ】

南海トラフ地震は、歴史的におおよそ100～200年間隔で発生し、近い将来の発生確率が高いことがすでに明らかになっている。そこで防災・減災上で履歴の調査研究に求められるのは、おもに破壊域の多様性や規模の評価である。グループは、トラフ東端の駿河湾沿岸から西端の足摺岬周辺まで各地で調査を行っている。各地で明らかになった履歴を見ると、1地点で複数のイベントが検出されたケースの多くは、再来間隔が数百～千年程度で、歴史地震の再来間隔よりも長いという特徴がある。これらはくり返す地震のうち、比較的規模の大きい津波や地殻変動を伴った場合に地形や地質に記録、保存されやすいと解釈することができる。今のところ推定年代値の幅が大きいと、地域間の厳密な対比が難しいものの、これらの地質学的に検出されたイベントは、東海・東南海のセグメントと南海セグメントとで必ずしも一致しないように見える。これは瀬野(2012)が示した安政型と宝永型が交互に発生するモデルのような発生パターンを示している可能性もある。

このほか津波石やイベント砂層の分布から過去最大規模の津波を評価する試みも行っているが、今のところ内閣府が示す最大クラスの想定モデルのような事象が、実際に起こった証拠は見つかっていない。次の南海トラフ地震の長期的な予測に向けて、引き続き規模の評価を試みていくとともに、各地点間のイベント年代のより精緻な対比が必要である。

参考文献

Ioki, K. and Tanioka, Y. (2016) Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data. *Earth and Planetary Science Letters*, **433**, 133–138. doi:10.1016/j.epsl.2015.10.009

Komori, J., Ando, R. and Shishikura, M. (2020) Cluster analysis of marine terraces and quantitative seismotectonic

interpretation of the Boso Peninsula, central Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB019211. doi:10.1029/2019JB019211

Komori, J., Shishikura, M., Ando, R., Yokoyama, Y. and Miyairi, Y. (2017) History of the great Kanto earthquakes inferred from the ages of Holocene marine terraces revealed by a comprehensive drilling survey. *Earth and Planetary Science Letters*, **471**, 74–84. doi:10.1016/j.epsl.2017.04.044

Komori, J., Shishikura, M., Ando, R., Yokoyama, Y. and Miyairi, Y. (2021) A Bayesian approach to age estimation of marine terraces and implications for the history of the great Kanto earthquakes, central Japan. *Quaternary Science Reviews*, **272**, 107217. doi:10.1016/j.quascirev.2021.107217

中村淳路・澤井祐紀・松本 弾・谷川晃一朗・伊尾木圭衣(2019)北海道霧多布湿原一番沢における津波堆積物の分布, 第四紀研究, **58**, 303–312. doi:10.4116/jaqua.58.303

Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Atwater, B. F., Shigeno, K. and Yamaki S. (2003) Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, **424**, 660–663. doi:10.1038/nature01864

Pilarczyk, J. E., Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Tanigawa, K., Matsumoto, D., Shinozaki, T., Fujiwara, O., Shishikura, M., Shimada, Y., Dura, T., Horton, B. P., Parnell, A. C. and Vane, C. H. (2021) A further source of Tokyo earthquakes and Pacific Ocean tsunamis. *Nature Geoscience*, **14**, 796–800. doi:10.1038/s41561-021-00812-2

Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M. (2012) Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophysical Research Letters*, **39**, L21309. doi:10.1029/2012GL053692

Sawai, Y., Satake, K., Kamataki, T., Nasu, H., Shishikura, M., Atwater, B. F., Horton, B. P., Kelsey, H. M., Nagumo, T. and Yamaguchi, M. (2004) Transient Uplift After a 17th-Century Earthquake Along the Kuril Subduction Zone. *Science*, **306**, 1918–1920. doi:10.1126/science.1104895

瀬野徹三(2012)南海トラフ巨大地震. 地震 第2輯, **64**, 2号, 97–116.

Shishikura, M. (2014) History of the paleo-earthquakes along the Sagami Trough, central Japan: Review of coastal paleoseismological studies in the Kanto region. *Episodes*, **37**, 246–257. doi:10.18814/epiugs/2014/v37i4/004

南海トラフ地震の短期予測研究の現状と 産総研の役割

松本 則夫[†]

([†]活断層・火山研究部門)

1. はじめに

南海トラフ沿いでは今後30年にマグニチュード(M) 8～9クラスの地震が70～80%の確率で発生されるとされ(地震本部, 2021), 最大169兆円を超える被害が推計されている(内閣府, 2013). 本講演では, 気象庁が発表する「南海トラフ地震に関連する情報」と, 産総研の貢献について述べる.

2. 国が発表する「南海トラフ地震に対する情報」

気象庁は, 内閣府が2019年3月に発表した「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドラ

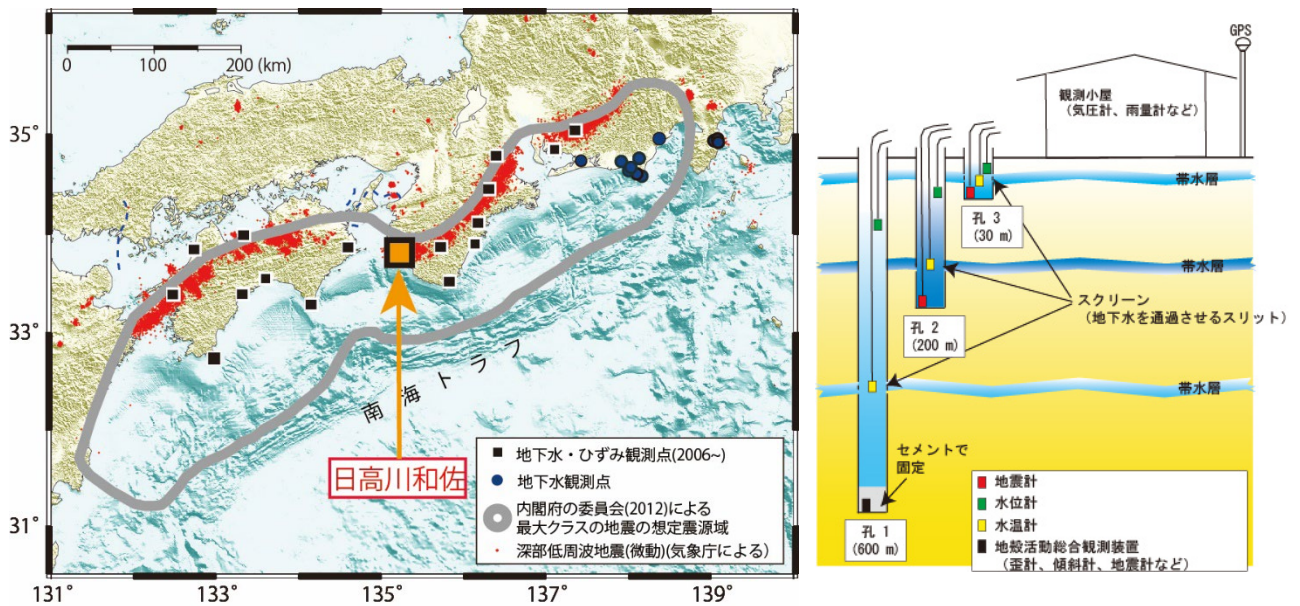
イン(第1版)」に基づき, 2019年5月から第1表に代表される「南海トラフ地震臨時情報」を発表することとなった(気象庁, 2019).

3. 産総研の南海トラフ地震の短期予測研究

産総研では, 2006年から南海トラフ地震の短期・中期予測の研究のために地下水等総合観測施設の設置を開始した. この施設では地下水位観測のほか, ひずみ計や地震計を設置しており, 2021年9月現在で16点の整備を完了し, 1点を整備中である(第1図). さらに, 産総研では共同研究契約に基づき気象庁のひずみデータおよび防災科学技術研究所Hi-net高感度加速度計の傾斜データをリアルタイムでデータ交換を行い, 2011年から南海トラフ沿いの深部ゆっくりすべりの解析を継続している. 同すべりの解析結果は「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会(月1回開催)」で報告し, 産総研の解析

第1表 気象庁が発表する南海トラフ地震臨時情報の内容の一部(気象庁, 2019を改変)

情報およびキーワード	各キーワードを付記する条件
南海トラフ地震臨時情報(巨大地震警戒)	想定震源域内のプレート境界において, モーメントマグニチュード8.0以上の地震が発生したと評価した場合
南海トラフ地震臨時情報(巨大地震注意)	○監視領域内において, モーメントマグニチュード7.0以上の地震が発生したと評価した場合(巨大地震警戒に該当する場合は除く) ○想定震源域内のプレート境界面において, 通常と異なるゆっくりすべりが発生したと評価した場合



第1図 (左)産総研の地下水等総合観測施設(地下水・ひずみ観測点)■と今年度整備中の日高川和佐観測点. 1970年代～2005年に整備した静岡・愛知県内の地下水観測点●も示す. (右)地下水等総合観測施設の構成図. 3本の孔井と観測小屋から構成される.

結果に基づき評価が行われているとともに、通常の同すべりの発生状況の解明に貢献している。

気象庁はゆっくりすべりの解析に産総研の方法を利用している。また、気象庁は2020年6月から産総研の12点のひずみ計の常時監視を開始した。気象庁は、南海トラフ全域でゆっくりすべりを監視することが可能となり「南海トラフ地震臨時情報」を発表することが可能となった(気象庁・産総研, 2020)。

4. 今後について

産総研では南海トラフ周辺で20点の地下水等総合観測施設の整備を目標としており、未整備3点の整備をめざす。また、現在は手動で行われているゆっくりすべり解析について、客観的な解析が実施できるよう研究開発を行う。

参考文献

地震本部(2021)今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧, <https://www.jishin.go.jp/main/>

choukihyoka/ichiran.pdf(閲覧日:2022年3月22日).
気象庁(2019)「南海トラフ地震臨時情報」等の提供開始について(報道発表資料), https://www.jma.go.jp/jma/press/1905/31a/20190531_nteq_name.pdf(閲覧日:2022年3月22日)。

気象庁・産総研(2020)南海トラフ沿いにおける地殻変動監視の強化について(報道発表資料), https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20200623/pr20200623.html(閲覧日:2022年3月22日)。

内閣府(2013)南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)のポイント～施設等の被害及び経済的な被害～, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_kisha.pdf(閲覧日:2022年3月22日)。

内閣府(2019)南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン(第1版), <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/index.html>(閲覧日:2022年3月22日)。

火山地質図の整備と国土強靱化のための 新たな取り組み

古川 竜太[†]

([†]活断層・火山研究部門)

活動的火山の噴火履歴を取りまとめた火山地質図の整備は国の知的基盤整備の一環であり、火山地域の防災、減災対策の基礎資料としての活用が期待される。通商産業省地質調査所時代から続けられてきた火山地質図は21火山で整備され、5万分の1地質図幅でも19の活動的火山がカバーされている。現在は社会的要請の高い伊豆大島において、陸域だけでなく海域とも連続した地質図として改訂を目指し、調査を開始している。また、御嶽山、日光白根山、雌阿寒岳、秋田焼山で調査を実施している。アウトカムの例として、富士火山地質図を2016年に刊行したことにより、ハザードマップで想定する噴火口の位置と噴火規模が見直され、新たに11市町村(山梨県2市、静岡県2市1町、神奈川県2市4町、総人口約79万人)、合計27市町村に火山災害想定影響範囲が設定されることとなった。火山地質図等の調査による成果は産総研GSJ火山データベースとして、複数のデータセットで公開されている。第四紀火山データベース(DB)は約450の第四紀火山(約260万年前以降に活動)を網羅した国内唯一のデータセットであり、日本列島の火山に関する

地質情報を最新の知見に基づいて収集・整理している。活火山については詳細情報と噴火イベントを記載している。火山噴火時はアクセス数が急上昇し、DBの総アクセス数は月あたり平均70万ヒットである。20万分の1「日本火山図」は2020年度から公開を開始した地図上に第四紀火山を表示するDBである。各火山とその噴出物の分布、噴火年代などの属性情報を閲覧、検索することができる。

これまで実施してきた火山情報の解析・評価に加えて、集約・情報提供対策を進めることが求められている。政府の「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」(令和2年12月閣議決定)において、災害に強い都市計画作り、防災計画策定等に貢献するため、過去の火山噴火の履歴・活動推移・規模を解析・評価し、その結果のデータベース化、情報提供の推進に取り組むこととなった。ハザードマップ策定等に特に影響を与える噴火口の位置情報に特化したデータベース化を進め、2万5千分の1地形図上に表現可能な精度を持つ火口位置情報を提供する「噴火口図」の開発を開始した。防災対策上の重要な活火山について、国の政策と整合的に火口位置情報を加速的に整備することで、火山監視のための基礎情報、ハザードマップや防災計画策定のための基礎情報として活用されることが期待される。

大規模噴火はどのようにはじまり進行するか：
地質学的事例研究から見る噴火推移パターンの
多様性

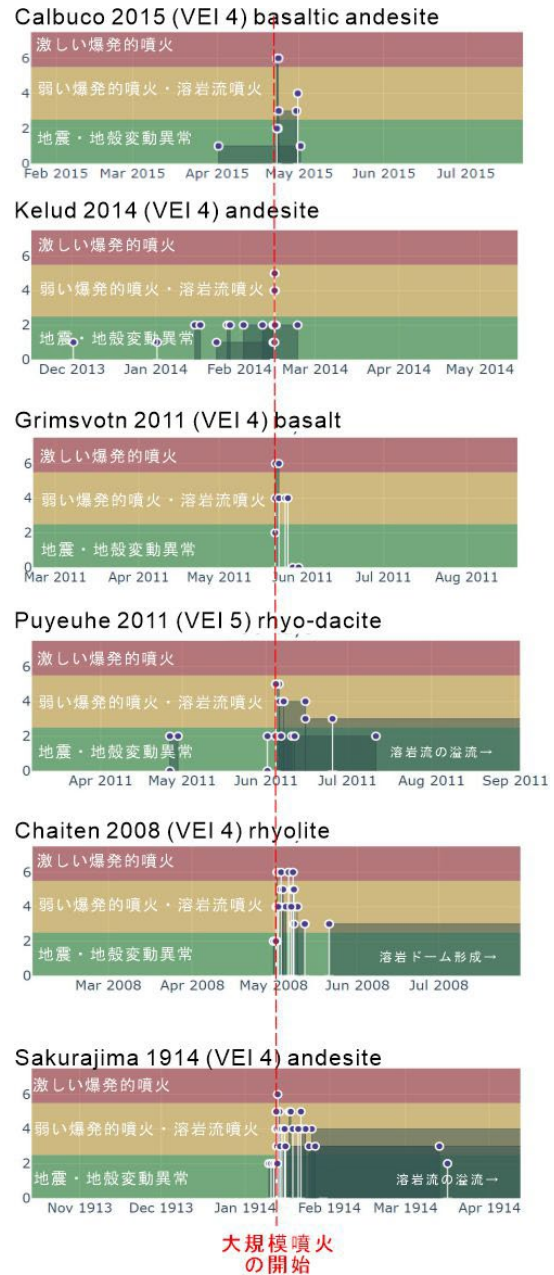
下司 信夫[†]

([†]活断層・火山研究部門)

プリニー式噴火と呼ばれる大量の火砕物(軽石や火山灰)を爆発的に噴出する大規模噴火は、火山周辺のみならず風下の広範囲に軽石や火山灰による甚大な災害を生じる。幸いにも過去約100年の間このような大規模な噴火は日本国内で発生していないが、火山周辺に残された噴出物の地質調査からこのような規模の噴火は国内の多くの火山で“頻繁”に発生していることが明らかにされている。従って、このような大規模な噴火の噴火推移やその影響範囲を予測しておくことは、短期的な対応としての噴火発生時の適切な災害対策のみならず、噴火災害を未然に防止・低減するための長期的な取り組みとして平時からの適切な土地利用計画などにとっても不可欠である。

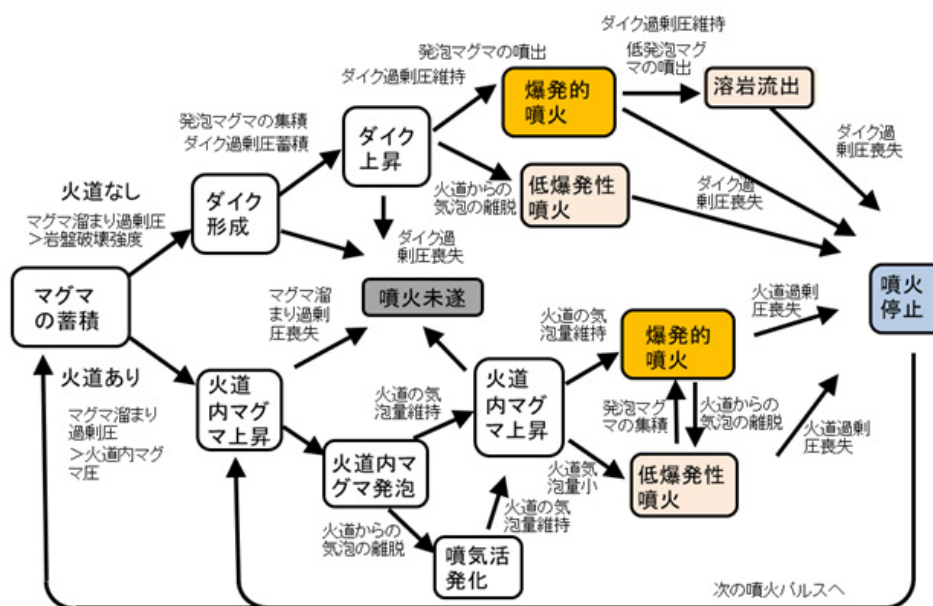
大規模噴火はさまざまな噴火推移パターンをたどることが知られている(第1図)。このような大規模噴火にみられる様々な噴火推移のバリエーションは、大量のマグマが上昇し地表に噴出する地下のマグマ溜まり-火道システムの構造やその発達過程を反映していると考えられる(第2図)。従って、地下でのマグマ溜まりへのマグマの蓄積状況や、火道へのマグマの注入・上昇プロセスを理解することが噴火推移のバリエーションを理解するためには必要である。特に、長期間にわたるマグマ溜まりへのマグマの蓄積から、比較的短時間で進行するマグマの上昇への移行プロセス、すなわち大規模噴火の“引き金”の理解は、噴火の直前予測には不可欠である。しかし、このような地下のマグマ溜まりや火道の活動をリアルタイムで把握・理解することはさまざまな火山活動の観測体制がとられている火山においても容易ではない。

また、特定の火山における大規模噴火の頻度はそれほど高くないため、歴史記録や地質記録を用いてもその活動の特性を統計的に明らかにすることは困難である。比較的大規模な噴火が頻発している桜島火山でも、過去2万年以上にわたるその活動を通して大正噴火規模以上のプリニー式噴火の発生は10回程度であり、そのほかの火山では事例数はもっと少ないことが多い。そのため、特定の火山において将来の噴火パターンを予測するためにはその火山の噴火履歴のみならず、類似した環境にあるほかの多くの火山における噴火事例を俯瞰し、その火山では過去に知られていないような活動の可能性も考慮する必要がある。第1図にその一部を紹介した噴火推移データベースは、噴火直前の前兆活動から、噴火推



第1図 21世紀に発生した代表的なプリニー式噴火5事例と、桜島大正噴火(1914年)の、噴火開始前後90日間の噴火推移図。大規模噴火推移データベースより抜粋。赤破線は噴火開始タイミングを示す。Puyeuhe 2011年、Chaiten 2008年噴火は、短く激しいプリニー式噴火の後、溶岩流出噴火に移行するなど、桜島1914噴火と類似した推移をたどっている。

移、あるいは噴火後の火山活動のパターンについて、信頼できる目撃・観測情報を整理し世界各地で発生したプリニー式噴火の時間推移を一つのデータセットとして取



第2図 想定される火道内のマグマ上昇のパターンの違いがもたらす噴火様式の多様性と噴火事象推移の違い、既存の火道を利用してマグマが上昇するか、新たな割れ目火道を形成するかによって異なる噴火事象推移が予想される。実際には、火道内のマグマの発泡状態やその時間変化などにより噴火推移はさらに複雑に進化し得る。

りまとめ、噴火推移のパターンを抽出するための試みである。多くの噴火推移事例をとりまとめた結果、大規模噴火の推移にはいくつかの特徴的なパターンがあることが明らかになりつつある。

より規模の大きな大規模火砕流を噴出するような巨大噴火は、有史以来わが国では発生事例がなく、また全世界で見てもその噴火推移が記録された噴火事例はごく少数である。しかし九州や北東北・北海道を中心として多数の大規模火砕流の存在が知られており、将来にもこのような巨大噴火が繰り返すと考えられる。巨大噴火についても推移のパターンや噴火メカニズムの知見の蓄積が必要である。

噴火推移データベースについては、以下を参照ください。

参考文献

下司信夫・池上郁彦・西原 歩 (2020) 大規模火砕噴火推移時系列データ集. 産総研地質調査総合センター研究資料集. no. 700, 産総研地質調査総合センター, 60p.
 下司信夫・池上郁彦・西原 歩 (2021) 大規模火砕噴火推移時系列データ集 その2. 産総研地質調査総合センター研究資料集. no. 722, 産総研地質調査総合センター, 25p.

地震・火山防災対策における GSJ への期待

加藤 孝志[†]

([†]気象庁 地震火山部管理課)

1. はじめに

気象庁は、地震や津波、全国の活火山、次の大規模地震発生の切迫性が高まっていると考えられている南海トラフ沿いの地震・地殻活動を24時間体制で監視し、予測や観測結果に基づく予警報・情報を迅速に発表している。これらは防災関係機関の初動対応などに活用されて

おり、東日本大震災をはじめとする近年の地震・津波・火山災害での経験も踏まえ、技術向上・改善を図ってきているところである。

これらの業務は関係機関の協力のもとでの確かな遂行が成り立っており、特に産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下「産総研」)との連携・協力は必要不可欠なものとなっている。本講演では、具体的な連携・協力の事例、それらの成果とともに、今後さらに国の防災対策により活かせるよう産総研へ期待したいことを紹介したい。

2. 産総研と気象庁の連携・協力の事例

産総研と気象庁の連携・協力の主な事例として、以下に2点挙げる。

(1) 南海トラフ沿いの地震・地殻活動の監視・評価

地震分野での連携で代表的なものは、南海トラフ地震の地殻変動監視である。産総研におかれては、昭和の時代から気象庁で開催する地震防災対策強化地域判定会において地下水位観測結果を、2000年代からはひずみ観測結果とこれに基づいたゆっくりすべりの解析・結果を報告いただいている。また、従来から気象庁での当該地域の地殻活動の解析には、産総研から提供されるリアルタイムのひずみ計データを使用しており、2020年6月からは気象庁の24時間常時監視の対象観測点となり、気象庁のひずみ計が設置されていない紀伊半島、四国地域でのゆっくりすべりの監視能力が大幅に向上した。気象庁で行うゆっくりすべりの解析(すべりの規模および断層モデルの推定)は、産総研から解析技術の指導が大きいものでもある。2019年5月10日日向灘の地震(M6.3)後に発生したわずかなゆっくりとした変化のような普段観測されない現象が見られた際、共にリアルタイムで推移を監視した事例もある。

(2) 全国に活火山に対する観測・活動評価

火山分野でも、産総研におかれては、昭和50年代から「火山噴火予知連絡会」に地質学・岩石学、火山化学の専門家として参画され、噴火時には噴出物の分析による噴火の特徴やメカニズムの解明、平時には活火山の選定作業やボーリングコアの解析、日本活火山総覧の取りまとめ等での議論の中心を担っていただいている。今般話題となっている福徳岡ノ場の噴火による軽石の分析はその一例であり、日々発生する桜島の噴火による火山灰についても定常的に分析を依頼しており、その分析結果は気象庁や火山噴火予知連絡会が行う火山活動評価に還元・活用されている。また、御嶽山噴火後に、気象庁では、水蒸気噴火の前兆把握手法として産総研が開発したマルチガス観測装置を4火山に整備しており、今後本格的に

観測業務へ導入するための検討にあたり多大な技術協力をいただいている。

3. 今後産総研へ期待したいこと

上記の例などの連携・協力に対し、気象庁において地震火山業務に携わる者として、改めて産総研の関係各部署の皆様へ感謝の意を表したい。今後とも、産総研におかれては、

- ・第一に引き続き、発生した事象についての日常的な情報交換等、気象庁担当との緊密なコミュニケーションの継続
 - ・ひずみ計データ等の気象庁へのリアルタイム提供協力の継続
 - ・GNSSなどに比べ高精度、高分解能のひずみ計でのゆっくりすべりの解析を進めた近年地震学界でも研究が盛んなスロー地震の解明。それらも合わせた、大地震(南海トラフ地震)とスロー地震との関係についての解明(これらにあたっては、気象庁や気象研究所も協力させていただきたい)
 - ・気象庁で有する、海洋潮汐の影響除去、複数観測点データを用いたノイズ低減手法などのゆっくりすべり解析技術の高度化への指導
 - ・気象庁で運用する噴火警戒レベルの判定基準への地質学や火山化学の知見の検討にあたっての指導・助言
 - ・今後実施予定である、新たな活火山の選定に係る検討やそれらの成果を反映した日本活火山総覧の改定にあたり、地質調査結果の提供やとりまとめにあたっての指導・助言
 - ・富士山等の大規模噴火時に関係機関が連携し速やかに降灰調査を実施する枠組における研究機関の取りまとめ役として、事務局を務める気象庁と協同した業務の推進
 - ・気象庁との人的な交流
- などについて行っていただきたく、よろしく願いしたい。

桜島の火山防災対策と

大量軽石火山灰対応に必要な研究・対策

児玉 博史[†]

([†] 鹿児島市危機管理課)

1. はじめに

鹿児島市は、人口約60万人を擁する南九州最大の都市で、その市街地から錦江湾を隔てて約4kmの地点に活火山桜島は位置しており、周囲55km、面積77km²、高さ1,117mの麓に約3,500人が生活している。

桜島は有史以来、歴史的な大噴火を繰り返してきた。20世紀には、1914年の溶岩流を伴う大正噴火、1946年の昭和噴火、1955年以降は頻繁にブルカノ式の山頂噴火等が発生している。

近年では、令和2年6月4日の爆発に伴い、大きな噴石(推定50cm～100cm)が34年ぶりに火口から3kmを超えて、民家から150m付近に飛散するなど、活発な活動が継続している。

2. 鹿児島市の火山防災対策



第1図 噴火前の避難指示の発令のイメージ

桜島は、60年以上の長きにわたって火山活動を続けており、本市では、これまでハード・ソフトの両面から火山防災対策に取り組み、その充実に努めてきた。

桜島と共生していくためそれらの取組を、市民と地域、事業者、研究機関・行政が一体となって向上させながら、火山防災のモデル都市として、国内外の火山地域の被害軽減のために世界貢献を行う火山防災トップシティを目指しているところである。

3. 大量軽石火山灰対応計画

大正噴火から100年以上経過した現在、始良カルデラ下のマグマの蓄積は、2020年代には大正噴火が起こる前のレベルまでほぼ戻ることが推定されており、次なる大規模噴火に備えて、桜島住民の避難対応はもとより、市街地側への大量の軽石火山灰の降下・堆積を想定した対策に、平成29年度から取り組んでいる。

気象研究所による大規模噴火の降灰予測シミュレーション結果等によると、東の風の場合、中心市街地に軽石火山灰が最大1m堆積するおそれがあり、住民等の生命だけではなく生活への影響は計り知れないことから、市街地側の地域をゾーン分けし、噴火前に避難情報発令対象地域を決め、近隣の市町へ広域避難する大量軽石火山灰対応計画を令和元年度に策定し、その後も継続して実効性を高めるための検討を進めている(第1図)。

令和2年度においては、大正噴火時の事例を参考に、市街地側の避難勧告(※現在は避難指示、以下、同じ)発令から噴火発生までの30時間以内に住民が広域避難を完了、または避難勧告の対象地域を離脱できることを目標に、避難シミュレーションを実施した(第2図)。

その結果等を踏まえ、同計画を見直すとともに、大規模噴火時の市街地側への大量の軽石・火山灰の降下等の

リスクや、市街地側住民の広域避難の必要性などを掲載した火山防災リーフレットを令和3年7月に作成し、町内会や企業の勉強会など、さまざまな集まりで説明を行う市政出前トークで活用することで意識啓発を図っている。

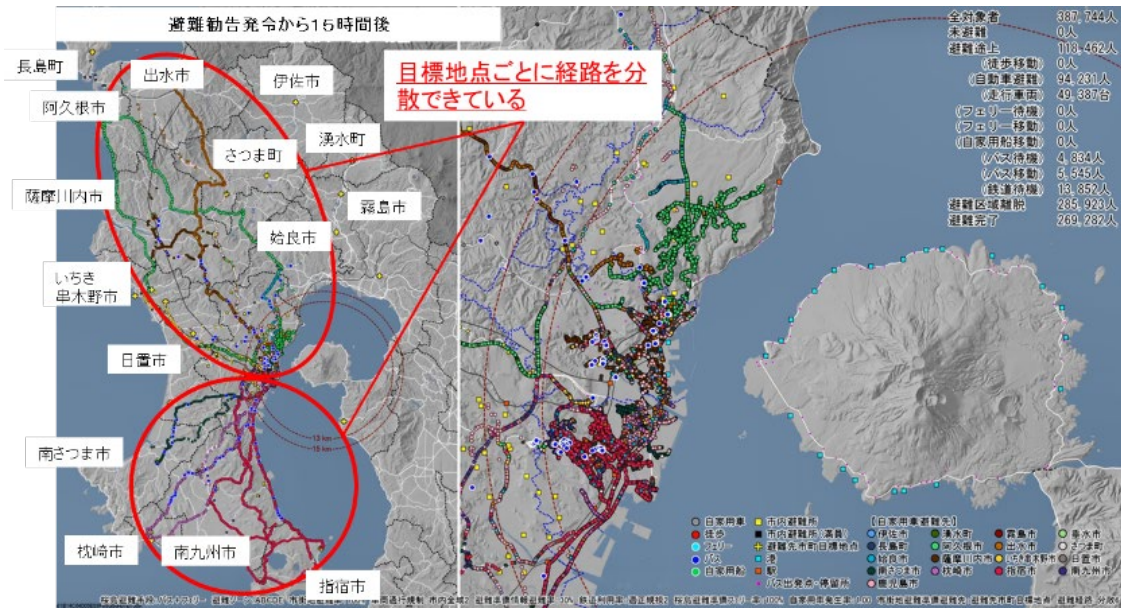
4. 大量軽石火山灰対応に必要な研究・対策

大量軽石火山灰対応計画では、東の風(市街地方向への風)の場合、桜島島内に対する噴火警戒レベル5(警戒範囲：全島)への引上げ等の状況を受けて高齢者等避難を発令し、その後、市街地側でも有感地震が発生するなど大規模噴火が切迫した状況を受けて避難指示を発令し、市街地側住民の広域避難等を行うことを想定している。

軽石火山灰の降下の範囲は、風向きの影響を大きく受けることから、噴火前に地域を限定して避難情報を発令するにあたっては、大規模噴火が迫った際の噴火の日時の推定とともに、噴火の一定時間前(直近の大規模噴火である大正噴火時の事例では、42・30時間前の想定)に避難情報を発令する根拠となる大量軽石火山灰の降下方向の推定が必要となる。

また、噴火前の広域避難に際しては、市街地側住民が大量軽石火山灰の降下によって引き起こされる影響についての理解が不可欠であると考えられるため、避難対象地域に留まることに対するリスクとなる要素等を専門的見地から明らかにする必要があるとともに、医療機関等やむを得ず避難できない施設等におけるハード面・ソフト面の対策を検討する必要がある。

さらに、噴火後においても大量軽石火山灰の降下状況が把握できれば、道路啓開やライフライン等の重要施設における降灰除去などに活用し、早期の復旧・復興につなげることができると考えられる。



第2図 令和2年度避難シミュレーション結果(避難勧告発令から15時間後の避難状況)

以上のようなことについて対応を進めるにあたって、自治体のみでの研究・対策は困難であることから、防災関係機関をはじめ、いろいろな機関と連携・協力しなが

ら、今後とも大規模噴火でも「犠牲者ゼロ」を目指して火山防災対策に取り組んでまいりたい。

東京都区部の3次元地質地盤図

都市域の地質地盤図プロジェクト[†]

([†]地質情報研究部門)

産総研地質調査総合センターでは、東京都心部の地下数十メートルまでの地質構造を可視化する次世代地質図「3次元地質地盤図～東京23区版～」を作成し、2021年5月にウェブ公開した(都市域の地質地盤図, <https://gbank.gsj.jp/urbangeol/>)。

3次元地質地盤図の作成にあたっては、多数のボーリングデータを用いて、東京都心部の地下の地質構造を3次元解析した。解析に使用したデータは東京都土木技術支援・人材育成センターから提供を受けた土木・建築工事のボーリングデータで、数万地点に及ぶ。また、産総研は要所で独自にボーリング調査を実施し、地質構造解析の基準となる詳細な地質データを取得した。この両者のデータを結びつけることで、信頼性の高い地下地質構造の解析が可能になった。解析では、産総研のボーリングデータを軸として、土木・建築工事のボーリングデータへと地層を対比することで地層の境界面を割り出した。続いて、地層の境界や分布状況を基に、独自開発の3次

元モデリング技術によって地層の3次元形状を明らかにした。

東京下町の低地の地下には従来から、沖積層と呼ばれる軟弱な泥層を主体とする地層が、最終氷期(最盛期は約2万年前)に形成された谷を埋めるように分布することが知られていた。今回のボーリングデータの解析により、この沖積層が埋積する埋没谷の3次元形状を、詳細に描き出すことができた。山の手の武蔵野台地の地下についても、堆積年代や堆積環境などをもとに地層の区分を見直し、同様の3次元解析を行ったところ、一般に地盤が固いとされていた台地の地下にも、一部に沖積層に類似した軟弱な泥層が昔の谷を埋めるように分布していることが明らかになった。この谷は低地の地下の谷よりもさらに古い、14万年前頃の氷期に形成されたもので、その後の約13万～12万年前の間氷期に海が侵入し、内湾の軟弱な泥層によって埋められた。

3次元地質地盤図に示されるこのような地下の地質地盤情報は、地震ハザード予測や都市インフラ整備などへの活用が期待される。産総研のウェブサイト「都市域の地質地盤図」では、東京都心部の地下の地層の3次元的な広がりや分布状況をパソコン画面上で立体図として、だれでも簡

単に閲覧することができる。また従来の2次元の地質図ではできなかった任意の箇所の地質断面図の表示も可能である。

長大活断層の連動性評価の研究

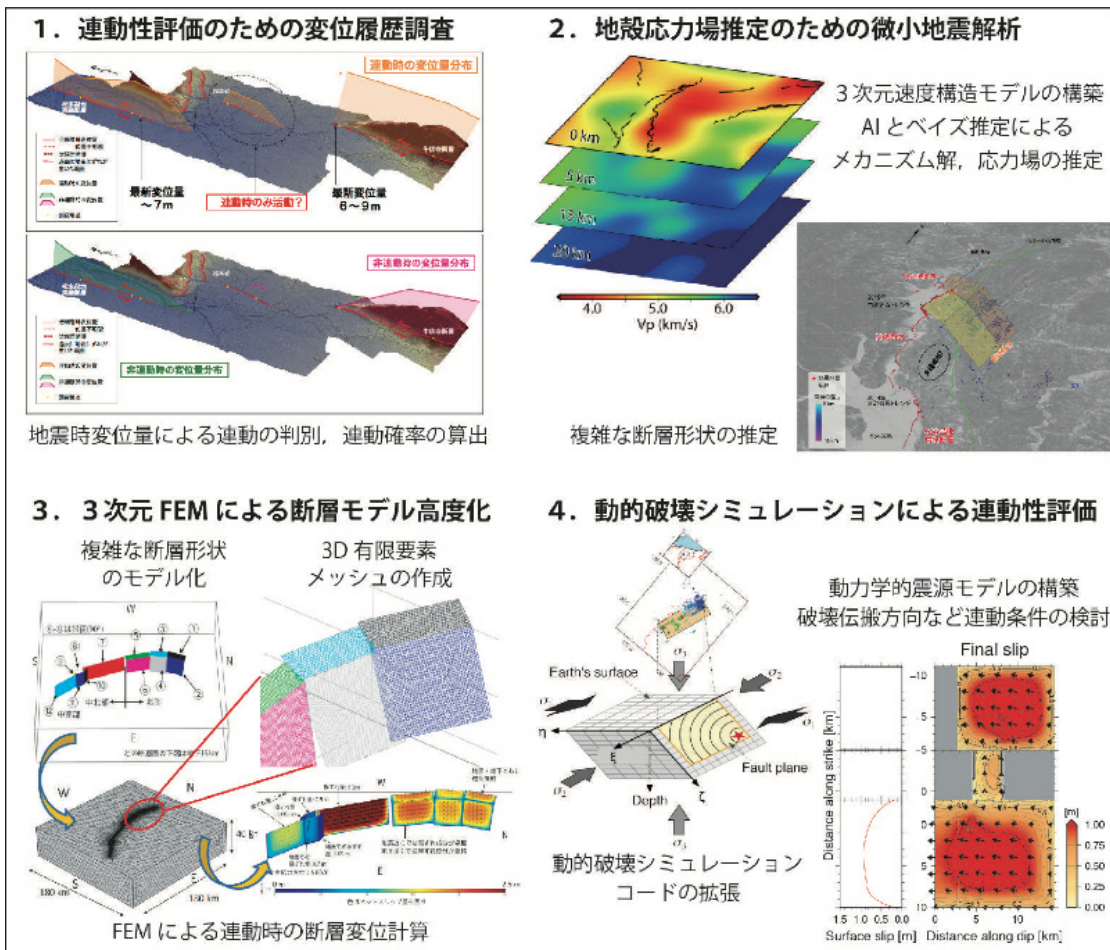
近藤 久雄[†]・加瀬 祐子[†]・今西 和俊[†]・
内出 崇彦[†]・椎名 高裕[†]・竿本 英貴[†]・
浦田 優美[†]

([†]活断層・火山研究部門)

このポスターでは、近藤と加瀬が口頭発表する長大活断層の連動性評価について、その流れを第1図に示す。詳細は近藤、加瀬の要旨を参照いただきたい。

複数の活断層やセグメントが連動した場合の地震規模は、事前に連動範囲を仮定すれば推測可能ではある。一

方で、具体的な発生可能性や発生確率については評価手法がないのが現状である。この難題に対して、古地震学的調査による活動履歴の把握、有限要素法解析による断層モデルの高度化、微小地震解析による詳細な応力場の推定、動的破壊シミュレーションによる連動性評価という複数分野で取り組んでいる。本シンポジウムの近藤の発表では、活断層・古地震調査と3次元FEMの断層モデル高度化、引き続き加瀬の発表では微小地震解析と動的シミュレーションのそれぞれを中心に最近の進展と課題について報告する。



第1図 複数グループの連携による調査研究の枠組み

産総研における活断層調査研究の進展と課題

活断層評価研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

活断層評価研究グループでは、陸域および沿岸海域に分布する活断層について、将来の大地震発生予測に資するデータの取得を目的として、過去の活動の解明を中心課題としている。とくに、地震調査委員会が進める主要活断層帯の長期評価や活断層の地域評価に関する事業課題を文部科学省から受託し、所内外の研究者と連携して、継続的に調査を実施している(吾妻, 近藤, 本講演)。東北地方太平洋沖地震発生翌年度にあたる2011年度以降の10年間で約50断層(帯)について調査を実施し、活動履歴や平均変位速度など地震発生確率の算出のための基礎データを着実に取得してきた。調査に際しては、宇宙線生成核種年代測定など新しい年代測定法や調査手法を積極的に導入している。一方、これまでの調査では活動履歴に主眼を置いてきたが、最近発生した内陸の大地震に伴い出現した地表地震断層のずれによる顕著な被害を踏まえ、今後は将来の地震発生予測に加えて、地震時の地表の変形様式や変形の出現位置、規模の予測についても重要な課題として取り組んでいきたいと考えている。

東北地方太平洋沖地震発生後、国内では、2011年福島県浜通りの地震、2014年長野県北部の地震および2016年熊本地震などの活断層による甚大な被害を伴う大地震

が発生した。産総研ではこれらの地震について、活断層評価研究グループが中心となり緊急現地調査を実施して、地表地震断層の出現状況の確認、ずれの量の計測、被害と地表地震断層や地形・地質との関係の検討などを行った。調査結果は、地震調査委員会へ資料提供するとともに、GSJウェブサイト等で速やかに発信した。内陸地震で実際に出現した地表地震断層の全体的な特徴を解明することは、自然および人的作用により位置や分布が不明確な活断層の活動像を推定する上で重要である。活断層評価研究グループでは、将来被害を伴う内陸の大地震が発生した際には、これまで同様に発生直後に現地調査を実施する体制を維持していく所存である。

活断層の調査・研究結果は、活断層データベースに収録している(吾妻, 本講演)。活断層データベースは、2005年の公開以来、全国の活断層調査研究成果を網羅的に収集・収録し、速やかな更新・公開に努めている。活断層データベースでは、専門家向けに「起震断層・活動セグメント」の各パラメータ、調査地点や各調査地点で取得された情報を充実させるだけでなく、活断層図に気象庁の地震情報を表示したり、産総研内外の関連情報のウェブサイトと相互にリンクしたりするなど、幅広く活用していただくことを念頭に改善を続けている。その一環として、活断層データベースで表示する活断層図を、これまでの縮尺20万分の1程度から縮尺5万分の1程度に大縮尺化することを目指している。

物理モデルに基づく大地震の規模・時期予測手法の確立に向けて

地震テクトニクス研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

内陸大地震の従来規模・時期の予測は、活断層の活動履歴、地表断層の長さに基づき、経験的手法により行われている。しかし、活動履歴の情報については、ばらつきや決定精度が数百年程度と大きく、防災策定等、社会が求めるものとは乖離している。また、規模の予測においても、隣接する断層の配置関係を基にした経験則により連動して破壊しうる活断層の最大長を推定しているが、破壊が連動して規模が大きくなるか、途中で停止するかを、現状では正確に決定することはできない。このように、防災策定等の課題に対し、従来の経験的手法には限界がある。地震の規模・時期の予測という社会課題の解決に向けて、従来の経験的手法だけではなく、断層に働く応力の蓄積過程など、物理モデルに基づく規

模・時期予測手法の確立が必要である。活断層・火山研究部門・地震テクトニクス研究グループは、断層のレオロジー等を含む地震発生の物理に基づいた、大地震の規模評価ならびに切迫度評価の手法開発を行うことで、この社会課題解決に貢献したい。

当研究グループは、断層岩の地質調査、室内岩石変形実験、数値シミュレーション、地震観測・解析を専門とする研究者により構成されている。地震が発生する場や発生にいたるプロセスを解明することを共通の研究課題とし、得られた成果を総合的に検討し、断層に働く応力の蓄積から破壊の進展過程などの物理モデルに基づく規模・時期予測手法の確立を目指している(今西, 2014)。

最近の成果では、地殻深部から地表付近までの断層運動を記録する中央構造線の詳細な調査により、大地震発生域である脆性塑性遷移領域とその下部での差応力が200MPaもあったことを明らかにした(Katori *et al.*, 2021)ことや、深層学習を用いたP波初動極性の自動検出により、日本列島内陸部で発生した11万個もの大量の小地震

の震源メカニズム解の推定を実現し、日本列島に働く背景応力場の分布を稠密に示したこと (Uchide, 2020) などが挙げられる。また、実験室での断層岩の強度測定、応力の増加に自発的不安定変形への移行過程の再現実験室や、日本列島内陸部の3次元地震波速度構造の解明ならびに背景応力場の空間変化の成因についての研究、さらには、空間非一様な応力・摩擦下での断層破壊の開始・停止の条件や、連動型巨大地震への成長の条件を明らかにするための数値シミュレーション研究など、地震発生の物理過程を明らかにするための研究を実施している。本発表ではこれら我々の取り組みについて紹介する。

参考文献

今西和俊 (2014) 地震テクトニクス研究グループの研究紹

介. GSJ地質ニュース, **3**, 100–101.

- Katori, T., Shigematsu, N., Kameda, J., Miyakawa, A. and Matsumura, R. (2021) 3D fault-zone architecture across the brittle–plastic transition along the Median Tectonic Line, SW Japan: Fault-rock characterization. *Journal of Structural Geology*, **153**, 104446. doi:10.1016/j.jsg.2021.104446
- Uchide, T. (2020) Focal mechanisms of small earthquakes beneath the Japanese islands based on first-motion polarities picked using deep learning. *Geophysical Journal International*, **223**, Issue 3, 1658–1671. doi:10.1093/gji/ggaa401

産総研の南海トラフ巨大地震観測ネットワーク — ゆっくりすべりの観測と気象庁による常時監視 への貢献 —

地震地下水研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

産総研では、南海トラフ巨大地震の予測研究の鍵となる「ゆっくりすべり」や観測に用いるひずみ計、気象庁への貢献をわかりやすく解説するためにビデオを作成した。ビデオの内容は以下の通り。

- ・南海トラフ巨大地震の発生のメカニズムとゆっくりすべりとの関係について
- ・ゆっくりすべりを観測する「高感度ひずみ計」を地質標本館にある展示用ひずみ計と現場におけるひずみ計の設置写真によって解説
- ・ひずみ計のデータをリアルタイムで格納するサーバと

ゆっくりすべりの解析数について

- ・産総研のひずみ計の南海トラフ沿岸での分布、および2020年6月に開始した気象庁による産総研のひずみ計を用いた常時監視について

地質標本館では、産総研の南海トラフ巨大地震観測ネットワークを解説する展示を今春にリニューアルした(活断層・火山研究部門, 2021)。パネル展示による観測方法などの解説とともに、実際のひずみ観測で使っている「高感度ひずみ計」のデモ機を展示している。機会があればご覧いただきたい。

参考文献

- 活断層・火山研究部門編 (2021) 地質標本館の展示リニューアルのご紹介：南海トラフ巨大地震の短期予測, IEVGニュースレター, **8**, 2号, 4.

東京湾にも津波は来る

海溝型地震履歴研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

海溝型地震履歴研究グループでは、日本列島各地で地形・地質や歴史記録の調査により過去数千年以上におよぶ海溝型巨大地震の履歴を解明している。その1つとして、相模トラフ沿いにおける調査研究結果とそのアウトカムとなる国や自治体の防災施策における利活用事例について紹介する。

相模トラフ沿いでは、歴史的に1923年大正関東地震や

1703年元禄関東地震などの巨大地震が過去から繰り返し発生している。これらの地震は、強い揺れをもたらすだけでなく、実は大きな津波を発生させ、関東地方沿岸域を襲っていた。津波の到達は東京湾においても例外ではない。例えば1703年元禄関東地震による津波の高さは、歴史記録の記述から、東京湾奥で場所により2 m程度と推定されている(羽鳥, 2006など)。

元禄関東地震のように江戸時代以前は器械による観測記録が存在しないので、歴史記録の記述が貴重なデータとなる。しかし歴史記録のみでは、被害を受けた場所やそこでの事象に関する情報は限定的である。このた

め、沿岸部の地形や地質を調査することで津波や地殻変動について定量的に評価することが重要である。元禄関東地震による突発的な隆起で離水した海岸地形や生物遺骸を調査した結果、房総半島の南端で6 m程度の隆起、中部で1 m程度の沈降があったことが明らかになった(宍倉, 2000)。

これらの隆起や沈降のデータと、九十九里浜に浸水した津波の情報をもとに、相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートとその上盤の陸側プレートがどのように動いたかを示す断層モデルを構築した(行谷ほか, 2011)。元禄関東地震の影響を大きく受けた東京都や千葉県、静岡県などでは、この断層モデルを活用し、コンピューター上で津波をシミュレートすることで、津波浸水想定やそれに基づいたハザードマップの作成などの防災施策を実施している。例えば東京都が行った津波被害想定では、港区・中央区・江東区で津波の高さが2.5 mにも及ぶと推定されている。

このような地震と津波は将来再び起こると考えられるが、隆起した地形と堆積物を詳細に調べると、関東地震が200–400年程度に一回発生していることもわかってい

る(Shishikura, 2014など)。この情報は政府の地震調査研究推進本部による海溝型地震の長期評価において、発生確率の算定根拠にもなっており、長期的な発生予測にも貢献している。

参考文献

- 羽鳥徳太郎(2006) 東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東(1703)、安政東海(1854)津波とその他の津波の遡上状況, 歴史地震, **21**, 37–45.
- 行谷佑一・佐竹健治・宍倉正展(2011) 南関東沿岸の地殻上下変動から推定した1703年元禄関東地震と1923年大正関東地震の断層モデル, 活断層・古地震研究報告, **11**, 107–120.
- 宍倉正展(2000) 離水海岸地形からみた1703年元禄関東地震における房総半島の地殻上下変動, 歴史地震, **16**, 113–122.
- Shishikura, M. (2014) History of the paleo-earthquakes along the Sagami Trough, central Japan: Review of coastal paleoseismological studies in the Kanto region. *Episodes*, **37**, 246–257. doi:10.18814/epiugs/2014/v37i4/004

火山噴火履歴調査と火山活動の時空間分布把握のための K-Ar, Ar/Ar 年代測定の高精度化・高効率化

火山活動研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

火山活動の履歴を解明することは地質学的な時空間スケールでの火山活動の特性を把握することに役立つだけでなく、火山地域における防災、減災対策にとって重要な基礎情報となる。活動的な火山について高い分解能での噴火履歴を得るために、従来測定が困難だった若い(数万～数十万年前)岩石試料を対象としたK-Arおよび⁴⁰Ar/³⁹Ar年代測定システムの開発と性能評価を実施している。九重火山及び蔵王火山の比較的若い岩石試料を対象に、産業技術総合研究所で測定した感度法K-Ar年代とオレゴン州立大学Ar年代学研究室において測定した⁴⁰Ar/³⁹Ar年代を比較研究した。若い試料の年代を測定しようとするときには岩石生成時に含まれるArの初生値の補正の影響が大きく現れる。また、感度法K-Ar年代測定では、初期Ar同位体の質量分別を補正することで、特に

若い(<0.5 Ma) 試料に対してより正確な年代値を得ることを強みとしているものの、その若い試料では、補正のための³⁸Ar/³⁶Arの誤差や大気混入率が大きくなることにより年代値の誤差が大きい。一方、⁴⁰Ar/³⁹Ar年代測定では、インバースアイソクロンを用いて初期Ar同位体を評価可能であるが、初期値を補正せず、より誤差の小さいプラト年代のみが用いられることもある。比較研究で得られたデータについて補正の有無や試料の層序関係に基づき検討した結果、年代算出における補正法について、より正確な年代値を得るためには初期値補正が重要であることを確認した。現在は白山火山、御嶽火山、秋田焼山試料等を対象としたK-ArとAr/Ar年代測定による高い分解能での噴火履歴復元に取り組んでいる。またガラス質火山噴出物や火山灰試料の年代測定結果の信頼度評価手法の確立についても成果が出ており、多様な火山噴出物(溶岩、軽石、火山灰等)の幅広い年代レンジ(特に数千年～数万年前)について、世界トップレベルの高精度年代データを生産するラボを確立しつつある。

噴火発生や活動推移の予測に向けた火山現象のモデル化

マグマ活動研究グループ[†]

([†]活断層・火山研究部門)

噴火による災害を軽減し、災害に強い社会を作っていくためには、どのような規模・様式の噴火が生じ、それが時間とともにどのように推移するかを的確に予測する事が重要である [https://unit.aist.go.jp/ievg/group/magma/index.html (閲覧日:2022年3月22日)]. 近年の観測機器の発達・充実により、噴火前兆現象を検知した例は増えたが(例えば有珠火山2000年噴火)、噴火の様式やその変化を予測する事は未だ非常に困難である。そのため、過去の噴火を調べて噴火開始過程や推移の特徴を明らかにすること、そして噴火様式や推移過程を支配している物理化学過程を明らかにすることが、火山活動の推移予測を実現するために必要である。

マグマ活動研究グループでは、火山噴出物の地球化学的・岩石学的分析、火山ガス・電磁気・地殻変動の観測や室内・数値実験など様々な研究手法を用いて火山現象

のモデル化の研究を進めることにより、噴火活動推移予測手法の開発を目指している。

本発表では、以下の研究の紹介をする。

- 1)内熱式ガス圧装置を用いて地下深部(数km~30km)の高温高压条件におけるマグマの発生・貯留・上昇過程を実験的に再現し、噴火過程の理解と予測に貢献
- 2)火山岩の岩石学的解析や微小領域化学分析を行い、噴火に関与したマグマの物理・化学的特徴(化学組成・温度・圧力・結晶量・密度等)を明らかにし、マグマ供給系の実態とマグマの上昇・噴火過程の解明を推進
- 3)Multi-GAS(携帯型噴煙組成観測装置)を用いた火山ガス組成の繰返し観測・連続観測や、紫外分光法を用いた火山ガス放出率の遠隔観測による、脱ガス過程や噴火発生機構のモデル化に関する研究と最新の成果(桜島、霧島硫黄山などの事例)
- 4)熱学的・電磁気学的観測、数値シミュレーションによる、マグマの放熱過程やマグマ-熱水系の形成メカニズムの研究(阿蘇カルデラの高密度電磁探査3次元インバージョンと伊豆大島火山の自然電位変動観測の事例)

大規模噴火データベース・噴火推移データベースから読む大規模噴火の推移と前駆活動

大規模噴火研究グループ[†]

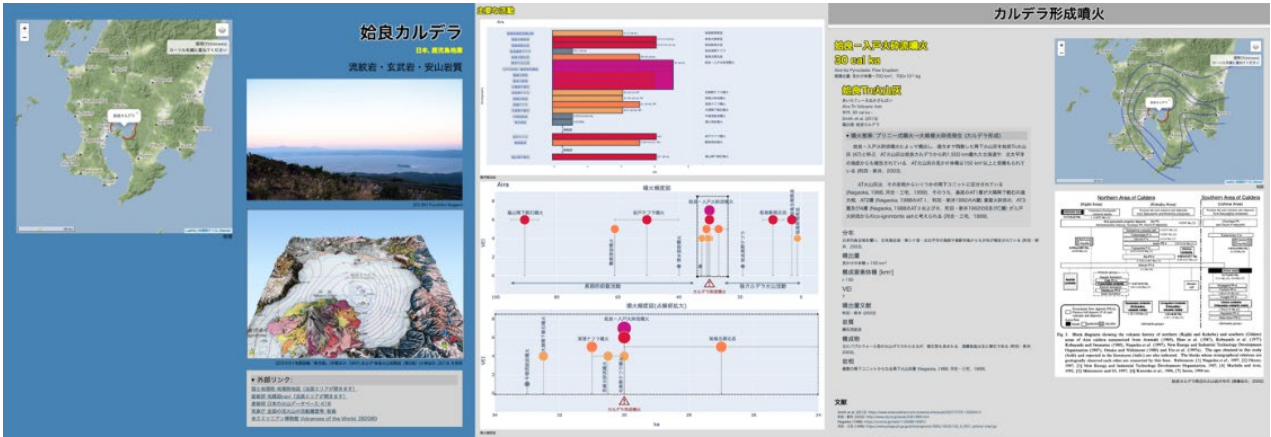
([†]活断層・火山研究部門)

VEI 5~8クラスの大規模火山噴火では、大規模火砕流や降下テフラ等により火山周辺地域から数1,000 km離れた地域まで被害が及ぶ可能性がある。このため、過去の大規模噴火の推移、長期的・短期的前駆活動について詳細を明らかにすることは、火山防災の観点からも重要である。大規模噴火の推移、長期的・短期的前駆活動には、様々な多様性が見られ、必ずしも一様のシナリオを辿るわけではない。そこで、産総研地質調査総合センターでは、大規模噴火による噴出物の特徴、噴火推移、長期的・短期的前駆活動、後カルデラ火山活動を取りまとめ、大規模噴火データベースとして公開するプロジェクトを数年前から進めている。ここでは、本プロジェクトの内容と構築中の大規模噴火データベース、噴火推移データベースについて紹介する。

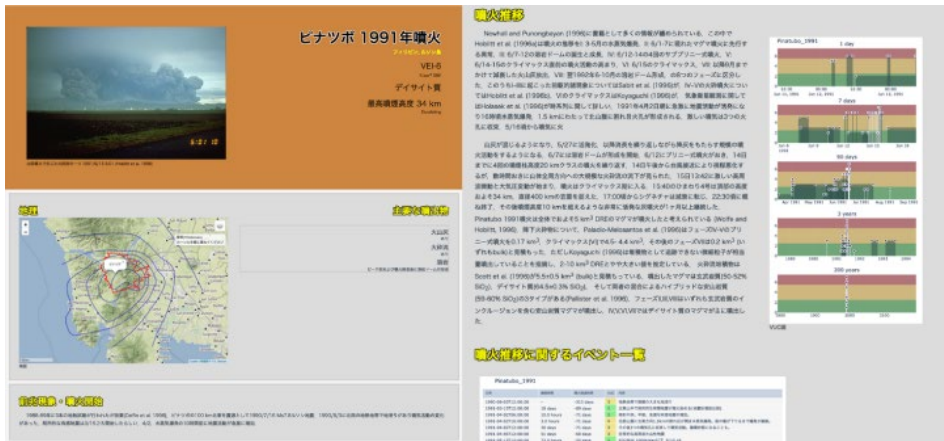
大規模噴火データベースでは、これまでに、18の大規模噴火について、各噴火の短期的・長期的前駆活動、本噴火の推移、後カルデラ活動の詳細を取りまとめている(西野ほか, 2019; 金田ほか, 2020)。大規模噴火に至る

直前(5,000年間)に着目すると、12の噴火で堆積物として残る噴火活動が認められた。大規模噴火に至る直近の活動は、(1)火砕噴火(降下火砕物、火砕流の噴出)、(2)珪長質溶岩の流出に大別でき、多くがVEI 4以下と小規模な傾向にある。一方、長期的(50,000年間)に見ると全噴火中16噴火で何らかの噴火活動が認められた。これらの前駆の活動は、平均噴出率の変化から増加、一定、減少の3タイプに細分できる。また、長期的前駆活動の噴出量は、大規模噴火のそれと反比例する傾向にある。つまり、大規模噴火に至るまで、長期的に噴出量が高かった火山に比べ、低い噴出量の火山の方が、より大きな大規模噴火を発生させる可能性が高い。構築中の大規模噴火データベースのウェブサイトでは、各大規模噴火の長期的前駆活動、短期的前駆活動、本噴火の推移、後カルデラ噴火活動を自在に閲覧、検索できるようになる予定である(第1図)。各大規模噴火の主要噴出物の分布は、WebGIS機能によりサイト上で拡大縮小しながら閲覧できる。降下テフラ、大規模火砕流の分布、カルデラ縁の形状はGIS化を行い、システム上で分布を表示できるようになっている。

噴火推移データベースでは、国内外のプリニー式噴火の推移について、前兆現象、噴火開始イベント、プリニー式噴火の推移、イベント一覧、活動推移、降下テフラや



第1図 大規模噴火データベース。始良カルデラにおける中長期的前駆活動・噴火推移を示す。



第2図 噴火推移データベース。ピナツボ火山1991年噴火の噴火推移を示す。

火砕流堆積物の分布，参考文献を取りまとめている(第2図)。また，7日間，90日間，3年間，200年間の活動度と活動推移の内容について，図を使い分かりやすく表示している(下司ほか，2020，2021)。ここでは，これまでに23の噴火を取り上げている。噴火推移データベースにおいては，コンパイルした大規模噴火は減衰型・多峰型・エスカレート型の3種類に大別される。減衰型と多峰型は過半数で高強度噴火の開始からクライマックスに至るまでの時間が1時間以内と非常に短く，結果として短時間で終息するため規模もVEI 4程度にとどまる事が多い。一方，エスカレート型はVEI 5~6クラスの噴火の多くが属し，月~年単位の前駆的活動ののち，最大100時間程度の高強度噴火によりその大規模な噴出が発生する。したがって，長い前駆的噴火活動を伴ったのちに起こる高強度噴火と，始まって数時間以内にピークを超えない高強度噴火は，より大規模に発展する危険性が高いといえる。このことは噴火推移のリアルタイム評価が防災上の意思決定に決定的に重要であることを意味する。

参考文献

下司信夫・池上郁彦・西原 歩(2020)大規模火砕噴火推移時系列データ集。産総研地質調査総合センター研究資料集，no. 700，産総研地質調査総合センター，60p.

下司信夫・池上郁彦・西原 歩(2021)大規模火砕噴火推移時系列データ集 その2。産総研地質調査総合センター研究資料集，no. 722，産総研地質調査総合センター，25p.

金田泰明・後藤義瑛・西野佑紀・宝田晋治・下司信夫(2020)支笏・洞爺・濁川・大山火山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移。産総研地質調査総合センター研究資料集，no. 699，産総研地質調査総合センター，75p.

西野佑紀・宝田晋治・下司信夫(2019)始良・鬼界・阿多・屈斜路・十和田・摩周・池田火山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移。産総研地質調査総合センター研究資料集，no. 680，産総研地質調査総合センター，1-126.

(受付：2022年3月31日； 受理：2022年10月4日)
 (早期公開：2023年1月26日)

地質調査総合センター研究資料集

- 731 磐梯・吾妻・安達太良火山周辺の中期更新世～完新世テフラ層序 山元 孝広
- 732 富士火山の完新世テフラ層序 山元 孝広
- 733 富士火山の火口位置情報 石塚 吉浩・山元 孝広・中野 俊・宝田 晋治
- 734 第36回地質調査総合センターシンポジウム「3次元で解き明かす東京都
部の地下地質」講演要旨集 中澤 努・野々垣 進・小松原
純子・宮地 良典(編)
- 735 葛根田花崗岩の石英の岩石学的組織 佐々木 宗建・佐脇 貴幸・藤本 光
一郎・笹田 政克
- 736 20万分の1日高変成帯地質図 高橋 浩
- 737 遺跡発掘調査において記載された桜島テフラ その1 西原 歩・下司 信夫・成尾 英仁
- 738 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構解のデジタル
データ 内出 崇彦・椎名 高裕・今西 和俊
- 739 熊本、阿蘇およびくじゅう地域の地下水および河川水の化学・同位体組成 高橋 正明・稲村 明彦・高橋 浩・
森川 徳敏・東郷 洋子・風早 康平・
佐藤 努・半田 宙子・仲間 純子・
中村 有理・大和田 道子・宮越 昭
暢・戸崎 裕貴・富島 康夫・大丸
純・清水 日奈子・大沢 信二・網
田 和宏・堀口 桂香・柴田 智郎・
小泉 尚嗣・川端 訓代・安原 正也
- 740 第2白嶺丸重力異常データ 石原 丈実・小田 啓邦
- 741 津波堆積物の研究手法 澤井 祐紀・田村 明子

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	桐生及足利 和気
20 万分の 1 地質図幅	宮津 (第 2 版)
海洋地質図	No. 92 久米島周辺海域海洋地質図 No. 93 野間岬沖海底地質図
火山地質図	No. 21 恵山火山地質図 No. 22 日光白根及び三岳火山地質図
海陸シームレス地質図	S-7 海陸シームレス地質情報集「相模湾沿岸域」
大規模火砕流分布図	No. 2 支笏カルデラ支笏火砕流堆積物分布図
重力図 (ブーゲー異常)	No.35 伊勢地域重力図
その他	東・東南アジア磁気異常図 改訂版 (第 3 版) 中部地方の地球化学図

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 宮城 磯 治
松本 弾
東郷 洋子
持丸 華子
藤井 孝志
大谷 竜明
長森 英明
納谷 友規
天野 敦子
細井 淳
森尻 理恵

Bulletin of the Geological Survey of Japan Editorial Board

Chief Editor: SUZUKI Atsushi
Deputy Chief Editor: SASAKI Munetake
Editors: MIYAGI Isoji
MATSUMOTO Dan
TOGO Yoko
MOCHIMARU Hanako
FUJII Takashi
OHTANI Ryu
NAGAMORI Hideaki
NAYA Tomonori
AMANO Atsuko
HOSOI Jun
MORIJI Rie

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74巻 第1号
令和5年2月10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. 74 No. 1 Issue February 10, 2023

Geological Survey of Japan, AIST

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi,
Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan

BULLETIN
OF THE
GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 74 No. 1 2023

CONTENTS

Geology and accretionary age of the Otori Unit, North Kitakami Belt
MUTO Shun, ITO Tsuyoshi and MURAYAMA Masafumi 1

Abstracts of the 34th GSJ symposium “Research of Earthquake, Tsunami, and Volcano at AIST toward disaster prevention and mitigation: Achievements of 10 years since the Great East Japan Earthquake and future research”
Secretariat of the 34th GSJ Symposium 41