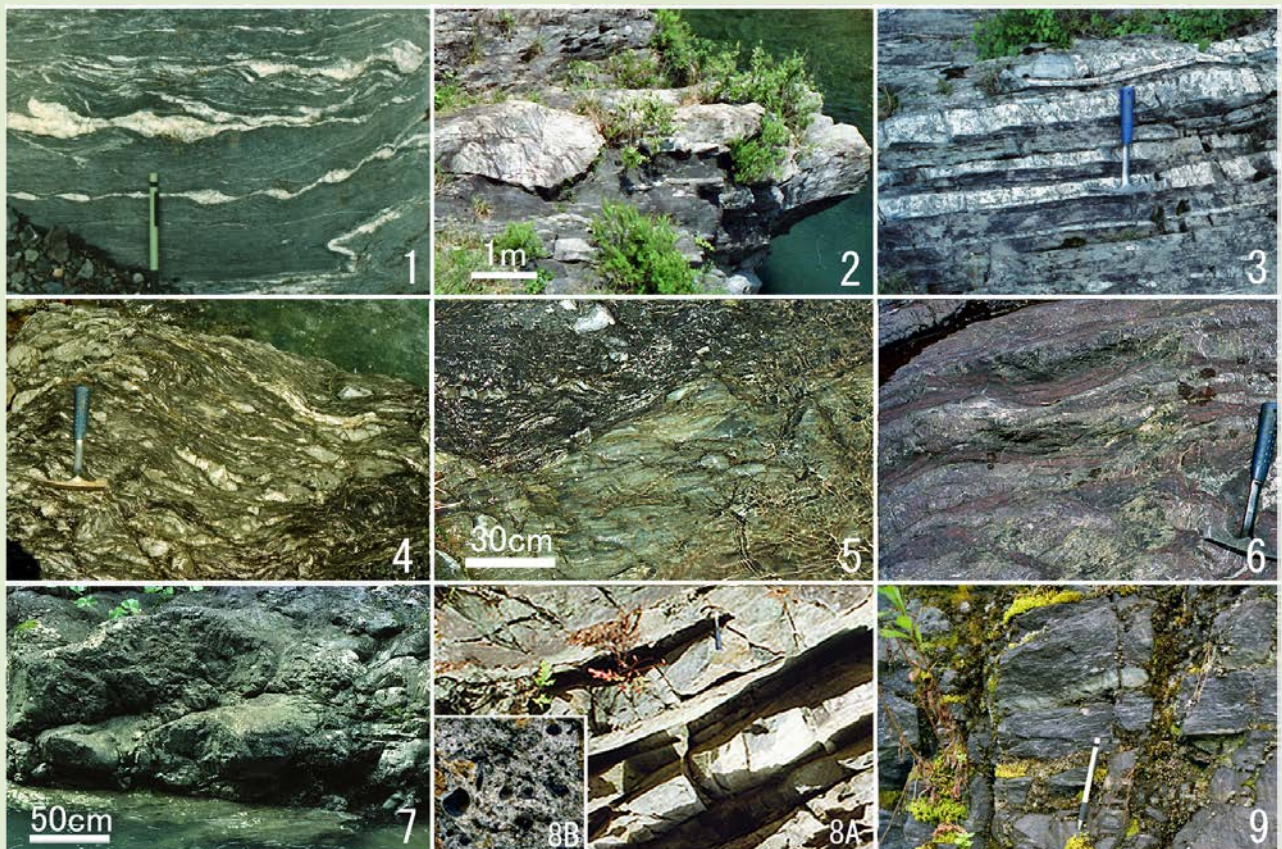


地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 66 No. 3/4 2015



論文

紀伊半島北西部, 高野山地域の上部白亜系花園層の地質と放散虫化石
栗本史雄・木村克己・竹内 誠 41

Elemental distribution of surface sediments around Oki Trough including adjacent terrestrial area: Strong
impact of Japan Sea Proper Water on silty and clayey sediments
Atsuyuki Ohta, Noboru Imai, Shigeru Terashima, Yoshiko Tachibana, Ken Ikehara and Hajime Katayama
..... 81

表紙の写真

紀伊半島北西部, 高野山地域の地質

1: 三波川変成岩類, 2-9: 四万十帯上部白亜系花園層 (2-3: Hn1 ユニット, 4-9: 花園層主部 Hn2 ~ Hn5 ユニット).

1. 有田川構造線北側の泥質片岩, 九度山.
2. 砂岩レンズを含む頁岩. 頁岩には面構造が観察される (Hn1), 東郷北.
3. 頁岩に挟在される白色層状チャート (Hn1), 北又.
4. 砂岩岩塊を含む混在岩 (Hn2), 湯子川・貴志川合流付近.
5. 黒色頁岩と灰緑色凝灰質頁岩を基質とする混在岩 (Hn2), 4 と同一地点.
6. 暗赤色層状チャート (Hn2), 湯川辻北西.
7. 枕状構造を示す玄武岩質溶岩 (Hn2), 4 と同一地点.
- 8A. 成層砂岩 (Hn3), 下筒香. 8B. 砂岩中の頁岩パッチ (長径 1cm).
9. 白色珪長質凝灰岩を挟在する頁岩 (Hn4), 池津川.

詳細は本文 41 ~ 79 頁参照.

(写真・文: 栗本史雄)

Cover photograph

Geology of the Koyasan area, northwestern part of Kii Peninsula, Southwest Japan

1:Sambagawa metamorphic rocks. 2-9:Upper Cretaceous Hanazono Formation of the Shimanto Belt (2-3:Hn1 Unit, 4-9:Main part, Hn2-Hn5 Units).

1. Pelitic schist. 2. Shale including big blocks of sandstone (Hn1). 3. White bedded chert intercalated in shale (Hn1). 4. Mixed rock including blocks of sandstone (Hn2). 5. Mixed rock made of black and grayish green tuffaceous shale matrix (Hn2). 6. Dark red bedded chert(Hn2).
7. Basaltic lava showing pillow structure (Hn2). 8A. Stratified sandstone (Hn3). 8B. Shale patch in the sandstone (maximum diameter is 1cm). 9. Shale including white felsic tuff (Hn4).

See text 41-79 pages for more information.

(Photograph and caption by Chikao Kurimoto)

紀伊半島北西部, 高野山地域の上部白亜系花園層の地質と放散虫化石

栗本史雄^{1*}・木村克己²・竹内 誠³

Chikao Kurimoto, Katsumi Kimura and Makoto Takeuchi (2015) Geology and radiolarian fossils of the Upper Cretaceous Hanazono Formation in the Koyasan area, northwestern part of Kii Peninsula, Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.66 (3/4), p.41-79, 5 figs, 3 tables, 9 plates.

Abstract: The western Kii Peninsula which is situated in the Outer Zone of the Southwest Japan, is generally characterized by E-W trend zonal structure of the Sambagawa, Chichibu and Shimanto Belts from north to south. However, the zonal structure is incomplete in the central part of Kii Peninsula and rocks of the Chichibu Belt are not cropped on the land surface. In this paper, geology of the Hanazono Formation in the Koyasan area where the rocks of the Chichibu Belt are absent is described, and radiolarian fossils from the Hanazono Formation and the adjacent Yukawa and Miyama Formations are reported.

The Hanazono Formation is in fault contact with the Sambagawa Metamorphic Rocks through the Aridagawa Tectonic Line to the north, and is in fault contact with the Yukawa or Miyama Formations through the Yanase Fault or the Yukawa Thrust to the south. The Hanazono Formation is divided into 5 units and they are called Hn1, Hn2, Hn3, Hn4 and Hn5 Units, respectively. Hn1 Unit is situated in the northern-most part of the Hanazono Formation, and characterized by obvious foliation as compared with Hn2 to Hn5 Units. Hn1 Unit is in fault contact with Hn2-Hn5 Units through the Kamiya Fault.

The Hanazono Formation mainly consists of shale with sandstone, felsic tuff, chert, red shale, limestone and basalt, and is characterized by mixed rock which includes the blocks of sandstone, chert and basalt in shale matrix.

Radiolarian fossils were obtained from chert, felsic tuff, shale and tuffaceous shale of the Hanazono, Yukawa and Miyama Formations, and 4 radiolarian fossil assemblages are recognized, that is, *Holocryptocanium barbui* Assemblage, *Dictyomitra formosa* Assemblage, *Dictyomitra koslovae* Assemblage and *Amphipyndax tylotus* Assemblage. According to the previous studies, *Holocryptocanium barbui* Assemblage is correlated to late Albian to Cenomanian, *Dictyomitra formosa* Assemblage to Turonian to Coniacian, *Dictyomitra koslovae* Assemblage to Santonian to early Campanian, and *Amphipyndax tylotus* Assemblage to late Campanian.

Judging from the lithologic characters and imbricated structure, the Hanazono Formation is considered to be constructed as an accretionary complex. The radiolarian fossils show that the construction age of the Hn1 Unit was Turonian to Coniacian, Hn2 Unit was Turonian to late Campanian, and Hn3 and Hn4 Units were Turonian to latest Campanian and Hn5 Unit was late Albian to latest Campanian.

Keywords: accretionary complex, radiolarian fossil, thrust, Late Cretaceous, Hanazono Formation, Yukawa Formation, Miyama Formation, Shimanto Belt, Koyasan, Wakayama, Nara, Kii Peninsula, Southwest Japan

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation) 現所属; 評価部 (Evaluation Department)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation) 現所属; 防災科学技術研究所 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

³ 名古屋大学大学院環境学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

*Corresponding author: C. Kurimoto, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: kurimoto-chikao@aist.go.jp

要 旨

紀伊半島西部において、三波川帯、秩父帯及び四万十帯は東西に延びた帯状配列を示すが、紀伊半島中央部において秩父帯の地質体が欠如し、三波川帯と四万十帯の地質体は有田川構造線を介して接する。秩父帯の地質体が欠如する紀伊半島中央北西部の高野山地域には、四万十帯の上部白亜系花園層と南に隣接して湯川層及び美山層が分布する。

花園層は、北は有田川構造線を介し三波川変成岩類と、南は梁瀬断層を介して湯川層、湯川スラストを介して美山層と接する。同層は岩相及び地質構造からみて、Hn1, Hn2, Hn3, Hn4, Hn5の5ユニットに区分される。Hn1ユニットは最も北に分布し、変形による面構造の発達認められる。一方、南側のHn2～Hn5ユニット(花園層主部と呼ぶ)は、Hn1ユニットと比較して面構造の発達が弱い。Hn1ユニットと花園層主部は東北東～西南西性の神谷断層で画される。

花園層は頁岩を主体とし、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、チャート、赤色頁岩、石灰岩、玄武岩及び混在岩を伴う。頁岩を基質とし、砂岩、チャート、玄武岩などの岩塊を含む混在岩が特徴的である。また、複数のユニットが衝上断層による覆瓦構造を示し、基質の頁岩はチャートよりも若い時代の放散虫化石を産出する。湯川層は、岩相の特徴により構造的上位からYk1, Yk2, Yk3の3ユニットに区分され、北側の花園層とは梁瀬断層で画される。美山層はMy1, My2, My3, My4の4ユニットに区分されるが、本地域ではMy1ユニットの北縁部が分布し、北側の湯川層とは湯川スラストによって画される。

花園層、湯川層及び美山層から得られた放散虫化石を検討し、群集Ⅰ：*Holocryptocanium barbui*群集、群集Ⅱ：*Dictyomitra formosa*群集、群集Ⅲ：*Dictyomitra koslovae*群集、群集Ⅳ：*Amphipyndax tylotus*群集の4群集を識別した。既報告等との比較から、群集Ⅰは後期アルビアン期～セノマニアン期、群集Ⅱはチューロニアン期～コニアシアン期、群集Ⅲはサントニアン期～前期カンパニアン期、群集Ⅳは後期カンパニアン期を指示すると考えられる。

花園層は岩相や覆瓦構造などの特徴から付加体であり、放散虫化石に基づいてHn1ユニットはチューロニアン期～コニアシアン期、花園層主部のHn2ユニットはチューロニアン期～後期カンパニアン期、Hn3～Hn4ユニットはチューロニアン期～最末期カンパニアン期、Hn5ユニットは後期アルビアン期～最末期カンパニアン期に形成されたと考えられる。湯川層及び美山層から産出した放散虫化石が示す地質時代は従来の報告と矛盾しない。

1. はじめに

紀伊半島西部において北から南に三波川帯、秩父帯及び四万十帯に所属する地質体が分布する。三波川帯と秩父帯の境界である御荷鉾構造線は、5万分の1地質図幅「海南」(平山・田中, 1956b)及び「動木」(平山・田中, 1956a)に示され、有田川中流域では有田川構造線(Hada, 1967)と呼ばれた。一方、秩父帯と四万十帯の境界である仏像構造線は、和歌山県紀伊由良地域や井谷地域では、秩父帯南帯の地質体と四万十帯美山層、寺杣層あるいは湯川層との境界に相当する(徳岡ほか, 1982; Yao, 1984; 岩橋, 1987)。しかし、紀伊半島中央部の広い範囲においては、三波川帯、秩父帯及び四万十帯の帯状配列が認められず、秩父帯の地質体が欠如し、三波川帯と四万十帯が接するとされた(大和大峯研究グループ, 1981など)。

栗本(1982)は、秩父帯欠如の西端に当たる高野山南西方において、従来の秩父古生層を花園層と命名し、混在岩の存在や岩相組み合わせの特徴から付加体と判断した。さらに放散虫化石の産出に基づいて花園層は四万十帯に属する上部白亜系と判断し、西方から分布する秩父帯の東限を画する断層を板尾断層と呼んだ。Kurimoto (1994)は、栗本(1982)の北東延長地域の花園層を面構造の発達した北部ユニットと発達の弱い南部ユニットに二分し、それぞれの岩相・構造・放散虫化石・K-Ar年代を報告するとともに、花園層が秩父帯の地質体や四万十帯の湯川層の構造的下に深く沈み込み、その後の上昇と剝削により地表に現れたモデルを提唱した。栗本ほか(1998)は20万分の1地質図幅「和歌山」において、花園層及びその相当層をH1～H4の4ユニットに区分した。

本論文では、栗本(1982)、Kurimoto (1994)及び栗本ほか(1998)の花園層のユニット区分と地質構造を見直し、放散虫化石に基づいて同層の付加体形成時代を述べる。また、南隣の湯川層・美山層から産出した放散虫化石についても報告する。

2. 研究史

平山・神戸(1959)は本地域の北半部を含む5万分の1地質図幅「高野山」において、秩父帯の古生層を秩父帯主部と北縁部の細川帯に区分し、御荷鉾構造線より北側の三波川帯について教良寺帯(点紋帯)と志賀帯(無点紋帯)に二分した。

志井田(1962, 1967)は、紀伊半島中央部の広範な地域を調査し、秩父帯・四万十帯の地質体区分を提示し、仏像構造線などの地帯区分境界を示した。のちに志井田ほか(1989)は、これらの成果の一部を5万分の1地質図幅「山上ヶ岳」としてとりまとめた。

大和大峯研究グループ(1981)は本論文の調査地域の東半分を含む辻堂・城戸地域において、三波川帯と四万十

帯の地質体が接し、秩父帯の地質体が欠如するとして、その後、同グループは一連の研究により、紀伊半島中央部に分布する秩父帯・四万十帯の地質体の層序・構造・地質時代を明らかにした(大和大峯研究グループ, 1989, 1992, 1994, 1998). 大和大峯研究グループ(2005)は、紀伊半島中央部の秩父帯・四万十帯の地質体が混在岩や衝上断層で画された覆瓦構造で特徴づけられる付加体であるとの判断から、各層を付加コンプレックスとして再定義した。大和大峯研究グループ(2012)は長年の研究に基づいて紀伊半島中央部の四万十帯の地質を総括した。

竹内(1996)は奈良県から三重県にかかる吉野地域と樺田川地域の三波川帯・秩父帯・四万十帯の地質を詳細に報告した。吉野地域は本調査地域の東に接する地域である。

山本・鈴木(2012)は5万分の1地質図幅「高野山」南縁から「伯母子岳」に分布する花園コンプレックスをHz1ユニット(国城山ユニット), Hz2(湯子川ユニット), Hz3(御殿川ユニット), Hz4(池津川ユニット)の4ユニットに区分し、放散虫化石の産出に基づいてHz2ユニット(サントニアン期～前期カンパニアン期), Hz3ユニット(後期カンパニアン期), Hz4ユニット(最末期カンパニアン期)へと、構造的上位から下位に向かって付加体の形成時代が若くなることを示した。また、花園コンプレックスの分布する地帯を日高川帯から除外し、高野山帯と命名した。

構造地質学的な視点の研究として、Awan and Kimura(1996)は、イライトの結晶度(IC)が三波川変成岩類から花園層にかけて北から南に徐々に高くなる傾向を明らかにし、熱構造と構造形成に言及した。またOnishi *et al.*(2001)は、花園層の北縁部を対象にして構造解析に基づいて沈み込み帯の変形史とその原因となるプレート運動について議論した。

本地域の花園層の南に分布する湯川層及び美山層については、以下の研究がある。紀州四万十帯団体研究グループ(1986)は、紀伊半島西部の中津村(現在の日高川町)の美山層について、層序と構造を明らかにし、コニアシアン期～サントニアン期を示す放散虫化石を報告した。紀州四万十帯団体研究グループ(1991)は花園村(現在のかつらぎ町)に分布する湯川層とその南の美山村(現在の日高川町)から龍神村(現在の田辺市)にかけて分布する美山層の層序と地質構造を報告した。湯川層については下位よりY1, Y2, Y3の3部層に区分し、岩相、地質構造及び浅海性二枚貝や放散虫化石の産出に基づいて、大陸棚外縁から上部大陸斜面で形成された後期アルビアン期～チューロニアン期の地質体であると判断した。一方、美山層については岩相の特徴や構造から付加体と判断し、構造的上位からM1, M2, M3の3部層に区分し、放散虫化石の産出に基づいてその形成時代をチューロニアン期～前期カンパニアン期とした。紀州四万十帯団体研究グループ

(2006)は和歌山県中西部の御坊市から田辺市にかけて広く分布する竜神層を再検討し、岩相と変形構造に基づいて竜神層の最北部を美山層の構造的最低位のM4に位置付け、後期カンパニアン期を示す放散虫化石の産出を報告した。紀州四万十帯団体研究グループ(2012a)は、紀州四万十帯団体研究グループ(1991)の湯川層を付加体として再定義し、放散虫化石の産出を追加した。紀州四万十帯団体研究グループ(2012b)は、紀州四万十帯団体研究グループ(1991)の美山層を美山コンプレックスと改称し、新たに産出した放散虫化石に基づいて上限の地質時代を前期マーストリヒチアン期に改訂した。

上記以外に5万分の1地質図幅「粉河」(牧本ほか, 2004)では、その南東端に花園層が図示されている。

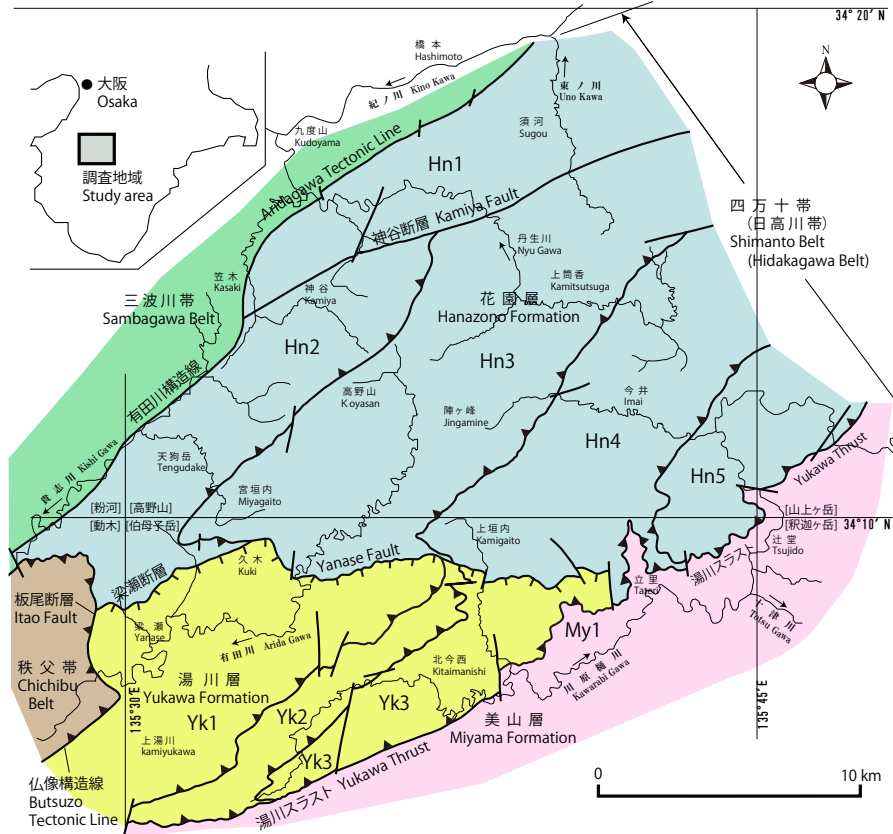
3. 地質概説

調査地域は、和歌山県と奈良県にまたがる5万分の1地質図幅「高野山」及びその南の「伯母子岳」の北半部に相当する。本地域は地質学的には有田川構造線、板尾断層及び仏像構造線により三波川帯、秩父帯、四万十帯の3帯に区分される。

有田川構造線以北は三波川帯に属し、三波川変成岩類が分布する。同岩類は泥質片岩、苦鉄質片岩を主体として、珪質片岩、砂質片岩、石英片岩を伴う。有田川構造線以南において、板尾断層以西は秩父帯に属し、北から南に北帯のジュラ紀付加体、黒瀬川帯の結晶片岩類の境川層とそれを覆う後期白亜紀前弧海盆堆積物の外和泉層群二川層、及び南帯のジュラ紀～前期白亜紀の付加体が分布する。秩父帯の南には仏像構造線を介して四万十帯の地質体が分布する。板尾断層以東では四万十帯の付加体が広く分布し、秩父帯の地質体は分布しない。四万十帯は紀伊半島において、北から日高川帯、音無川帯、牟婁帯の3帯に区分される。本調査地域には日高川帯に属する花園層、湯川層及び美山層が分布する(第1図)。

花園層は、岩相の組み合わせや構造的な特徴から、Hn1, Hn2, Hn3, Hn4, Hn5の5ユニットに区分され、東北東～西南西性の神谷断層(Kurimoto, 1994)により、北縁部に位置するHn1ユニットと南側のHn2～Hn5ユニット(花園層主部と呼ぶ)に二分される。栗本(1982)は、高野山南西方に分布する花園層を混在岩の存在や岩相組み合わせの特徴から付加体と判断した。本地域の花園層は栗本(1982)の花園層を含み、その延長に相当し、同様の特徴から花園層は付加体と判断される。

湯川層は、岩相の特徴に基づいて構造的上位からYk1, Yk2, Yk3の3ユニットが累重し、東西性の軸を持つ褶曲構造が存在する。Yk1ユニットは砂岩を主体とし、砂岩頁岩互層や頁岩を伴う。Yk2ユニットは頁岩や互層を主体とする。Yk3ユニットは砂岩を主体とし、砂岩頁岩互層や頁岩を伴う。紀州四万十帯団体研究グループ



第1図 高野山地域の地質体区分
 []は5万分の1地形図の範囲を示す
 Fig. 1 Geological division in the Koyasan area
 Brackets show 1:50,000 topographic maps

(2012a)は岩相及び地質構造の再検討により、同層が付加体であると判断した。

美山層は構造的上位からMy1, My2, My3, My4の4ユニットに区分される(紀州四万十帯団体研究グループ, 2012b)が、本報告地域においてMy1ユニットの北縁部が分布する。My1ユニットは砂岩、頁岩から構成され、東西性の走向を有し、北または南に傾斜する。紀州四万十帯団体研究グループ(1991)は、美山層が付加体の特徴である覆瓦構造や地質時代の極性を有することを示した。

4. 花園層

4.1 概要

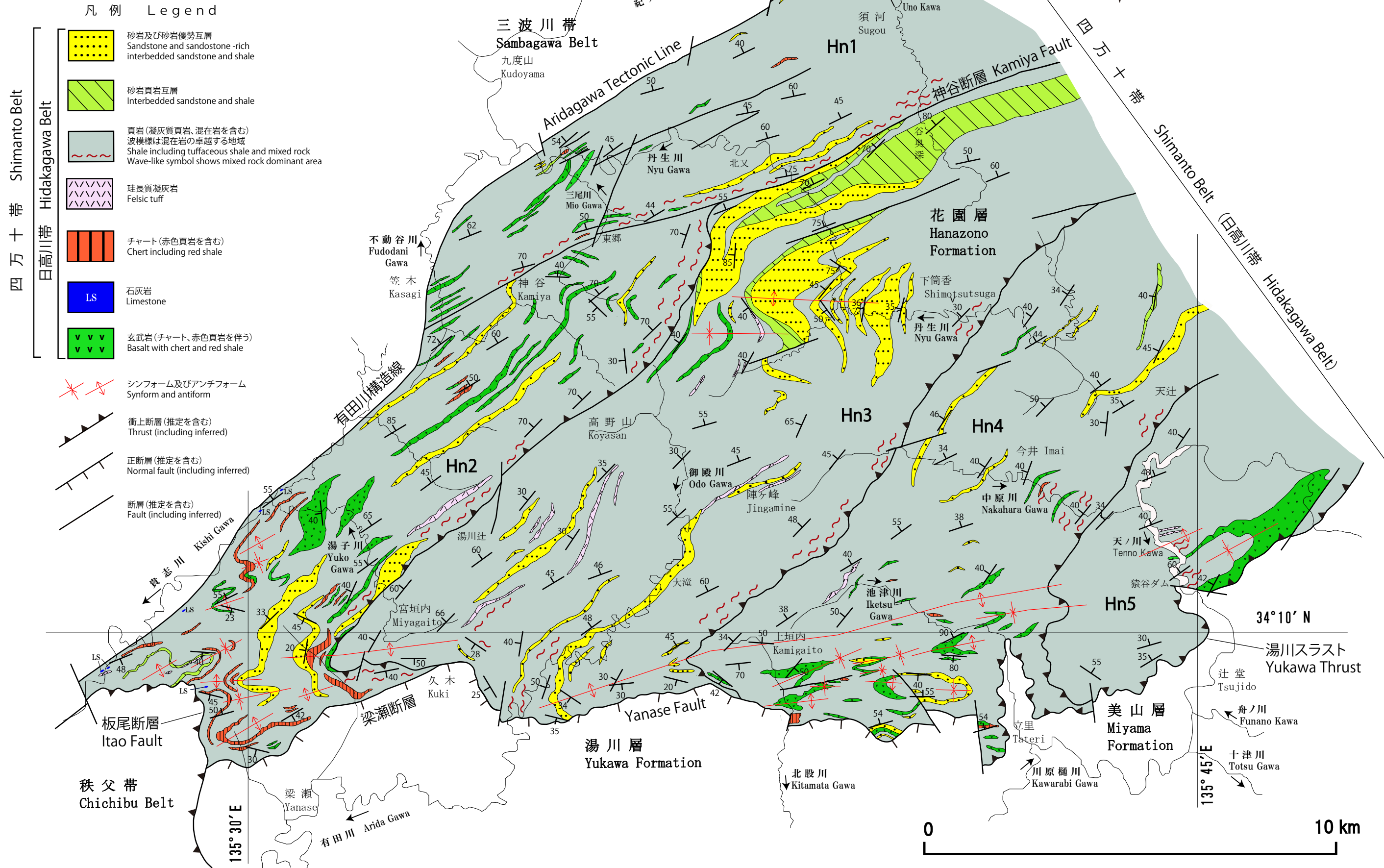
花園層は、最初に命名された和歌山県伊都郡花園村(現在のかつらぎ町)、高野町、かつらぎ町、海草郡美里町(現在の紀美野町)、有田郡清水町(現在の有田川町)に加えて、東方の伊都郡九度山町、橋本市及び奈良県吉野郡野迫川村に広く分布し、さらに大塔村(現在の五條市)と西吉野郡天川村に及ぶ。花園層は有田川構造線を介して

北側の三波川変成岩類と接し、西端は板尾断層で画される。本層の南限は、本地域中西部において南傾斜の梁瀬断層(紀州四万十帯団体研究グループ, 1991)によって湯川層と画され、東部においては湯川スラスト(紀州四万十帯団体研究グループ, 2012a)で美山層と接する(第1図, 第2図)。

花園層は全体に頁岩優勢で、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩などの陸源の堆積岩と、チャート、玄武岩などの海洋起源の岩石から構成される。砂岩、チャート、玄武岩などはレンズ状あるいは層状に分布し、一部に砂岩や砂岩頁岩互層が卓越する部分がある。頁岩を基質として砂岩、チャート、玄武岩などの岩塊を含む混在岩が特徴的である。花園層には、付加体に典型的な玄武岩・チャートの海洋性岩石から始まり、上位に頁岩・砂岩の陸源堆積岩が重なる海洋プレート層序は認められないが、海洋性岩石及び混在岩の存在から付加体であると判断した。

花園層は、岩相の組み合わせや構造的な特徴から、Hn1, Hn2, Hn3, Hn4, Hn5の5ユニットに区分

第2図 高野山地域の花園層の地質図
 Fig. 2 Geological map of the Hanazono Formation in the Koyasan area



され、東北東～西南西性の神谷断層 (Kurimoto, 1994)によって北縁部のHn1ユニットと花園層主部(Hn2～Hn5ユニット)に二分される。Hn1ユニットは頁岩を主体とし、チャートや玄武岩のレンズ状岩体を伴い、神谷断層に沿った見かけ最下位に混在岩が卓越する。Hn1ユニットは北に傾斜する同斜構造を呈する。花園層主部では構造的低位のHn5ユニットから上位のHn2ユニットにかけて累重する覆瓦構造を呈し、一般に東西性で西傾斜の軸を持つ褶曲構造を示す。Hn1ユニットの頁岩には変形による面構造が顕著に認められるが、花園層主部ではその発達弱く、両者には変形構造の差異が認められる。

本報告と従来報告との地質体区分の対応を述べると、本報告のHn1ユニットはKurimoto (1994)の北部ユニットに相当するが、今回、神谷断層の通過位置を西半分では北方に、東半分では南方に修正したため、Hn1の分布範囲に若干の変更が生じた。本報告のHn2ユニットとHn3ユニットの一部がKurimoto (1994)の南部ユニットに相当する。また、栗本ほか(1998)と比較すると、本報告のHn1、Hn2、Hn3の各ユニットは栗本ほか(1998)のH1ユニット、H2ユニット、H3ユニットにそれぞれ相当し、Hn4ユニットはH4ユニットの西端部に、Hn5ユニットはH4ユニットの東半部に相当する。なお、栗本(1982)の花園層分布域は本報告のHn2ユニットの南西端に当たる。

山本・鈴木(2012)の研究対象地域は本報告の花園層の南寄り3分の2を対象としている。本報告のHn1ユニットの西端部が山本・鈴木(2012)のHz1ユニットに、本報告のHn2ユニットが山本・鈴木(2012)のHz2ユニットにほぼ相当するが、神谷断層の通過位置の相違によりHn2ユニットの北端部がHz1に含まれる。本報告のHn3ユニットは山本・鈴木(2012)のHz3ユニットの西部4分の3を含む。本報告のHn4ユニットは山本・鈴木(2012)のHz3ユニット東部4分の1とHz4ユニットの西半部に合わせたものを含む。また、本報告のHn5ユニットは山本・鈴木(2012)のHz4ユニットの東半部に相当する。なお、山本・鈴木(2012)はHz4ユニットの南端にチャート・玄武岩に富むHz2ユニットが分布するとしたが、本報告では玄武岩の分布や地質構造からHn4ユニットに含めた。

4.2 岩相と地質構造

以下に花園層を構成するHn1～Hn5ユニットの岩相と地質構造を述べる。Hn1ユニットは花園層の北縁部に位置し、花園層の大部分を占めるHn2～Hn5ユニットは花園層主部に当たる。

4.2.1 Hn1ユニット

分布

本ユニットは花園層の一番北を占め、^{にゅう}丹生川下流域、不動谷川沿い及び東ノ川沿いに分布し、本調査地域内に

において南北方向に4～5 km、東西方向に約15 kmの分布範囲を有する。本ユニットの北限は有田川構造線でもって三波川帯変成岩類と画され、南は花園層主部のHn2ユニット及びHn3ユニットと神谷断層を介して接する。神谷断層は北に急傾斜する断層であり、直線状に追跡される。

岩相

本ユニットは主として頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、チャート、玄武岩、混在岩を伴う。Hn1ユニットの南限を画す神谷断層に沿って、混在岩が南北500 m～1 kmの幅で分布する。本ユニット西部において玄武岩のレンズ状岩体が多数認められ、ほかに砂岩頁岩互層、チャートが狭い範囲に分布する。東部では見かけ下半部に比較的連続する砂岩層が分布する。

頁岩は黒、灰色などを呈し、一部に凝灰質な部分が認められ、面構造や微褶曲がよく観察される。砂岩は一般に中粒～細粒であり、黒灰色や灰色を呈する。チャートは層状で、灰色、赤色などを呈する。赤色頁岩は赤褐色あるいは暗赤色を呈する。野外において、赤色チャートと赤色頁岩は漸移することがある。玄武岩は西半部の不動谷川や丹生川沿いで観察される。玄武岩は緑色や一部に赤紫色を呈し、溶岩、ハイアロクラスタイト、凝灰岩から構成され、前述の赤色チャート及び赤色頁岩と整合関係で接することがある。混在岩は、頁岩を基質として砂岩、チャート、玄武岩などの岩塊を含む。

地質構造

一般に東北東～西南西の走向で、北に40～75度で傾斜する。本ユニットの地質構造はユニット西端において有田川構造線に断られる。不動谷川において有田川構造線の断層露頭は確認されていないが、花園層の玄武岩が東北東～西南西の走向で分布するのに対して、有田川構造線は南北性に走り、斜交関係にある。Hn1ユニット内には東北東～西南西性の断層が認められ、神谷断層及び面構造の走向とも一致する。

4.2.2 Hn2ユニット

分布

本ユニットは花園層の西端を占め、貴志川、不動谷川上流及び湯子川沿いに、北西～南東方向に4～5 km、北東～南西方向に約15 kmの分布を有する。北西は有田川構造線を介して三波川帯変成岩類と、南西は板尾断層を介して秩父帯の地質体と、南は梁瀬断層を介して湯川層とそれぞれ画される。花園層の他ユニットとの関係は、北は神谷断層でHn1ユニットと断られ、南東は構造的低位のHn3ユニットと衝上断層で接する。

岩相

本ユニットは主として頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、チャート、石灰岩、玄武岩、混在岩を伴う。南西端では全体的に混在岩の分布が卓越

し、多数の砂岩、砂岩頁岩互層、チャート、玄武岩がレンズ状岩体として分布する。中央部から東半分では、砂岩、珪長質凝灰岩、玄武岩が層状あるいはレンズ状に分布し、混在岩がHn3ユニットとの境界に沿って見かけ最下位に分布する。石灰岩は、有田川構造線沿いに長径数m大の岩塊として確認される。なお、石灰岩は地質図(第2図)では誇張して表現した。

頁岩はHn1ユニットの頁岩に比較して面構造の発達は認められず、黒色、黒灰色などを呈する。頁岩の一部には淡緑色や白色などを呈する凝灰質な部分があり、両者は漸移する。砂岩は一般に中粒～細粒であり、黒灰色ないし灰色を呈する。珪長質凝灰岩は灰白色や白色を呈し、頁岩中にレンズ状に分布する場合、あるいは層状に走向方向に比較的連続する場合がある。チャートは層状のものが多く、白色、灰色、赤色などを呈する。チャートは玄武岩に接して産出することがあり、一部には赤色頁岩に漸移することもある。地質図では白色、灰色、赤色などのチャートと赤色頁岩を合わせて図示した。玄武岩はレンズ状あるいは層状に分布し、湯子川沿いでは見かけの層厚が最大300 mに達する(第2図)。玄武岩は緑色、暗緑色を呈し、溶岩、ハイアロクラスタイト、凝灰岩などから構成される。頁岩を基質として砂岩、砂岩頁岩互層、チャート、玄武岩などの岩塊を含む混在岩が頻繁に認められる。なお、栗本(1982)は比較的広い分布幅を持つ珪長質凝灰岩を地質図に示したが、多くの場合は凝灰質頁岩であるので本論文では頁岩に含め、比較的連続が確認できる珪長質凝灰岩のみを図示した。

地質構造

一般に北東～南西の走向を有し、北あるいは南に30～60度程度で傾斜する。ユニット西端では、東西ないし東北東～西南西の走向で西にプランジする軸を持つ褶曲構造が認められ、その波長は500 mから2 km程度である。その褶曲構造は赤色頁岩、チャート、玄武岩などの分布から追跡される。ユニット北東端において同様の褶曲がわずかに認められるが、中央部の広い範囲では北東～南西の走向で北西に傾斜する。

4.2.3 Hn3ユニット

分布

本ユニットは花園層の中央部を占め、高野山周辺から丹生川及び御殿川沿いに分布する。本地域の花園層の中で最も広く、本調査地域内において東西ないし北西～南東方向に5～8 km、北東～南西方向に約20 kmの分布を有する。北を神谷断層で画され、南東は構造的な下位のHn4ユニットと衝上断層で接する。南は梁瀬断層を介して湯川層と接する。

岩相

本ユニットは頁岩を主とし、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、玄武岩、混在岩を伴う。チャートは地質図

に図示できる規模では分布しない。東半部において、見かけ下半部では頁岩が卓越し、中部から上半部では砂岩及び砂岩頁岩互層が卓越する。この砂岩及び砂岩頁岩互層は、丹生川から東ノ川沿いで最も広い分布を示すが、側方に急激に見かけの厚さが減少する。一方、西半部では、混在岩がHn4ユニットとの境界に沿って見かけ最下位に分布し、砂岩や珪長質凝灰岩が層状に分布する。

岩相の特徴はHn2ユニットと類似することから、記載の重複を避け、特筆すべき点に限って述べる。北部に分布する砂岩及び砂岩頁岩互層は走向方向への厚さの変化が著しく、丹生川沿いの砂岩は見かけの最大層厚は700 mに達する。珪長質凝灰岩はユニット中部から南半部において複数の層準に分布し、厚さ数10 m、走向方向に500 mから2～3 kmの連続を示す。産状は厚さ約3 cmの珪長質凝灰岩と厚さ2～3 cmの頁岩が互層する。玄武岩は高野山北東方に分布するのみで、見かけの厚さ数10 mで、走向方向に2～3 kmの連続を示す。

地質構造

ユニット北端と南端において、東西ないし東北東～西南西の走向で西にプランジする軸を持つ褶曲構造が認められ、その波長は3 kmから5 km程度である。地層の走向はこの褶曲構造に規制され、傾斜は一般に30～75度程度である。

4.2.4 Hn4ユニット

分布

本ユニットは中原川、池津川流域及び丹生川上流域に分布し、本調査地域内において北西～南東方向に約5 km、北東～南西方向に約13 kmの分布を有する。南東は構造的な下位のHn5ユニットと接する。河原樋川と池津川^{かわらび}の出会い西方の南北性断層の西側では、本ユニットは梁瀬断層を介して湯川層と接する。一方、南北性断層の東側では湯川スラストを介して構造的な下位の美山層と衝上断層で接する。

岩相

本ユニットは頁岩を主とし、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、チャート、玄武岩、混在岩を伴う。北部から中央部では頁岩が卓越し、砂岩、砂岩頁岩互層、チャート、玄武岩がレンズ状に分布する。一方、南端部の梁瀬断層に近傍では玄武岩のレンズ状岩体が多数分布する。

岩相の特徴はHn2ユニットと類似することから、Hn3ユニットと同様、要点を述べる。珪長質凝灰岩は池津川において厚さ20～30 mで走向方向に数kmの延長で分布する。また、小規模のため地質図には図示できないが、灰白色の珪長質凝灰岩が厚さ数cm～数10 cmで、頁岩中に岩塊として含まれる場合がある。チャートと玄武岩は野外において近接して産出する。本ユニット最南端において、地質図でチャートと図示したものは赤色頁岩を主体とし、向斜構造のため見かけ広い分布域を示す。この

赤色頁岩は暗赤色を呈し，緑灰色あるいは淡緑色の凝灰質頁岩と漸移する。

地質構造

北部から中央部にかけて，地層は北東～南西の走向で，北西に30～50度程度傾斜することが多い。一方，南端では玄武岩と砂岩が分布し，東西ないし東北東～西南西の走向で西にブランチする軸を持つ褶曲構造が認められ，その波長は500 mから1.5 kmである。

4.2.5 Hn5ユニット

分布

花園層の南東端を占め，天ノ川流域に分布し，本調査地域内において北西～南東方向に約4 km，北東～南西方向に約8 kmの分布を有する。本ユニットは花園層の構造的最低位に位置し，湯川スラストを介して構造的低位の美山層と接する。

岩相

本ユニットは頁岩を主とし，珪長質凝灰岩，玄武岩，混在岩を伴う。湯川スラストに沿って見かけ最低位に玄武岩や混在岩が分布する。

岩相の特徴はHn2ユニットと類似することから，要点を述べる。天ノ川沿いの猿谷貯水池付近では厚さ約10 mの珪長質凝灰岩が2層準認められる。これらは厚さ5～10 cmのチャート光沢をした白色珪長質凝灰岩と厚さ2～3 cmの灰色凝灰質頁岩の互層から構成される。この珪長質凝灰岩は走向方向への連続が未確認であるが，その分布は走向方向に数100 m連続する可能性がある。本ユニットには地質図に図示できる規模のチャートはないが，東端部の玄武岩は赤色チャートを伴う。その玄武岩の一部には枕状溶岩が認められ，見かけ上位に赤色チャートが重なり，玄武岩と赤色チャートの組み合わせが断層で2回繰り返す。

地質構造

東端では北東～南西の走向で西にブランチ軸を持つ褶曲構造が認められ，その波長は2～3 kmである。見かけ玄武岩の分布幅が広がっている。

4.2.6 花園層内のユニット境界

Hn1ユニットの南限は神谷断層に相当し，花園層主部のHn2～Hn3ユニットと画される。神谷断層は東北東～西南西の走向を有し，丹生川支流の三尾川沿いの東郷において東西性で北に70度に傾斜する断層が確認される。また，神谷断層に沿うHn1ユニットの南縁部において，西方の神谷から東郷，北又を経て，谷奥深に至るまで，混在岩が南北幅200～300 mに分布する。

花園層主部のHn2～Hn5ユニットは衝上断層によって画される覆瓦構造を示していると考えられるが，野外においてユニット境界の断層を確認することはできない。しかし，想定される境界に沿ってユニットの構造的最低

位に混在岩の存在が認められる。Hn2ユニットでは，宮垣内周辺から湯川辻，高野山を経て北又南方に至るまで，Hn3ユニットでは，上垣内西方から陣ヶ峰の東を経て丹生川沿いの下筒香に至るまで，Hn4ユニットでは，中原川沿いの今井東方から天辻において，またHn5ユニットでは野外での露出状態が悪いが，猿谷ダム周辺において混在岩の分布が確認される。

4.2.7 対比

花園層の主たる分布域の5万分の1地質図幅「高野山」（平山・神戸，1959）と比較すると，花園層主部（Hn2～Hn5ユニット）の大部分は平山・神戸（1959）の秩父帯主部に相当し，Hn2ユニットの北西端の狭い範囲が秩父帯細川帯に相当する。また，Hn1ユニットの北半部は志賀帯南縁部に，一方，Hn1ユニットの南半部のうち西半部は秩父帯細川帯に，東半部は秩父帯主部にそれぞれ対比される（第3図）。

本地域の南側において，紀州四万十帯団体研究グループ（2012a, b）は湯川層とその南に接する美山層の分布を示し，両層の境界を画する断層を湯川スラストと呼んだ。本地域南東端の立里より東方では湯川層が分布しないことから，花園層主部のHn4及びHn5ユニットが湯川スラストを介して美山層と接することになる（第1図，第2図，第3図）。

大和大峯研究グループ（1989，2005）は本地域の東に隣接する辻堂地域において，構造的上位の赤滝コンプレックスと下位の宇井コンプレックスの分布を示し，両層の境界を宇井スラストと呼んだ。赤滝コンプレックスは花園層の東方延長に位置し，花園層は赤滝コンプレックスに対比される（第3図）。なお，紀州四万十帯団体研究グループ（2012a, b）は美山層を宇井コンプレックスに，湯川スラストを宇井スラスト対比した。

5. 放散虫化石

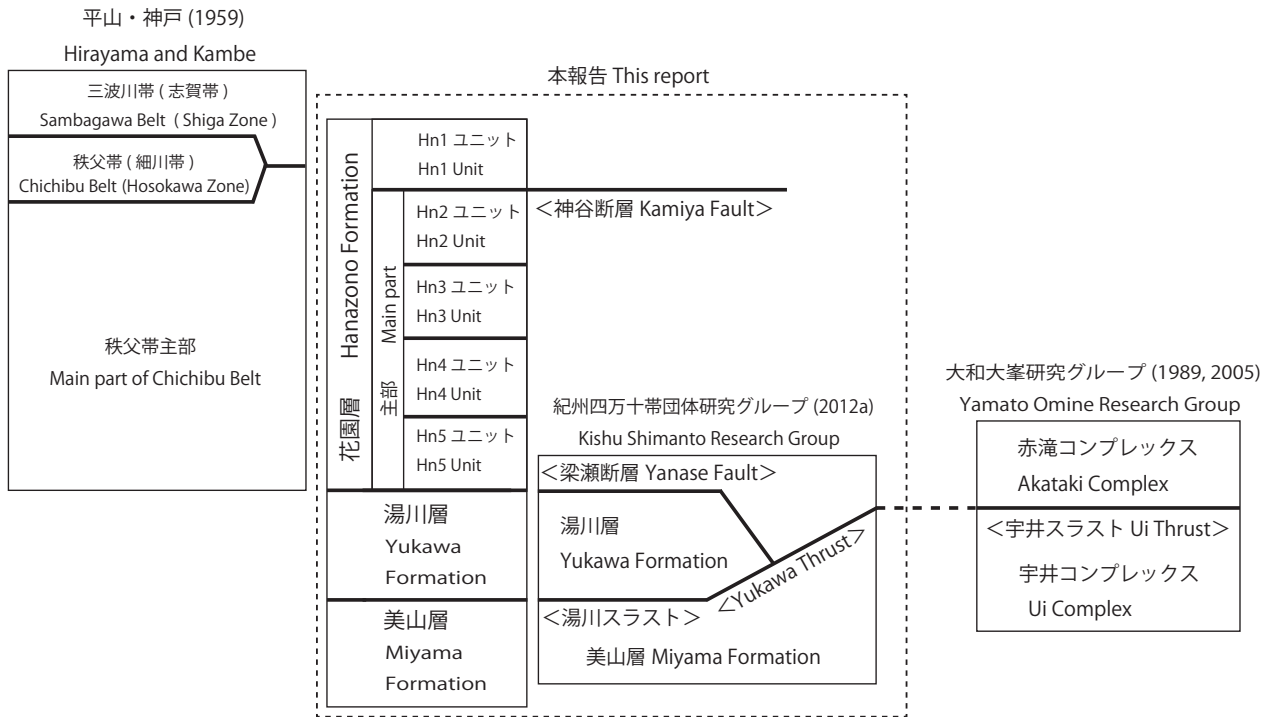
本論文では，花園層及び南に隣接する湯川層，美山層北縁部から頁岩，凝灰質頁岩，珪長質凝灰岩，チャートを採取し，フッ酸処理により放散虫化石を抽出した。走査型電子顕微鏡による観察に基づいて放散虫化石の同定と放散虫化石群集の設定を行い，各群集の指示する地質時代を考察した。化石産出地点を第4図，化石リストを第1表～第3表，化石写真を図版1～図版9に示す。

5.1 放散虫化石群集と地質時代

産出した放散虫化石の特徴と組み合わせから4つの放散虫化石群集を識別し，それぞれの群集を群集Ⅰ，群集Ⅱ，群集Ⅲ，群集Ⅳと呼ぶ。

群集Ⅰ：*Holocryptocanium barbui*群集

群集Ⅰは，*Pseudodictyomitra pseudomacrocephala*，*P.*



第3図 高野山及び周辺地域における対比
太線は断層を示す

Fig. 3 Correlation in the Koyasan and the adjacent area
Bold line shows a fault

leptoconica, *P. nakasekoi*などの*Pseudodictyomitra*属, *Thanarla brouweri*, *T. conica*, *T. elegantissima*, *T. praeveneta*, *T. veneta*などの*Thanarla*属, *Holocryptocanium barbui*, *H. geysersensis*, *H. astiensis*, *H. tuberculatum*などの*Holocryptocanium*属及び*Novixitus weyli*の産出が特徴的で、ほかに*Archaeodictyomitra*属や*Stichomitra*属などから構成される。

群集Ⅰは竹谷(1995)が本邦上部白亜系の放散虫化石を整理した中で、後期アルビアン期～セノマニアン期とした放散虫化石の構成種に、また公文ほか(1986)及び寺岡・栗本(1986)の*Holocryptocanium barbui*群集の構成種とよく一致する。山本・鈴木(2012)は花園層から、紀州四万十帯団体研究グループ(2012a)は湯川層から*H. barbui*群集に相当する放散虫化石を報告した。その他、*H. barbui*群集に相当する化石群集は数多く報告されている。以上のことから、群集Ⅰは後期アルビアン期～セノマニアン期を指示すると考えられる。

群集Ⅱ：Dictyomitra formosa 群集

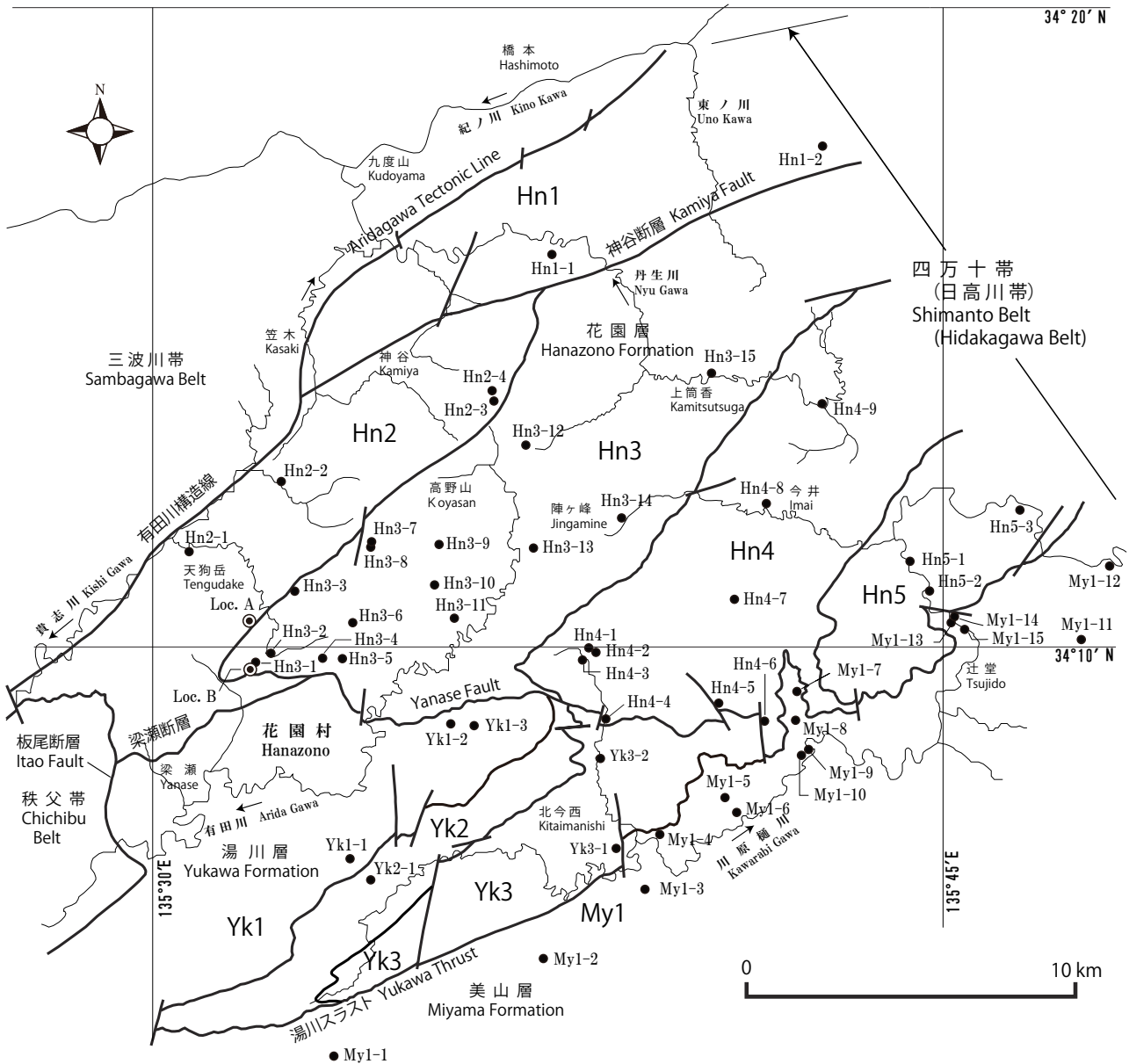
群集Ⅱは*Dictyomitra formosa*, *D. multicostata*, *D. napaensis*などの*Dictyomitra*属, *Archaeodictyomitra vulgaris*, *A. simplex*などの*Archaeodictyomitra*属, *Amphipyndax stocki*, *A. ellipticus*などの*Amphipyndax*属, 及び*Stichomitra*属などの多節 *Nassellaria* から構成される。群集Ⅱを構成する

Dictyomitra 属, *Archaeodictyomitra*属, *Amphipyndax*属は一般に産出レンジが長いものが多く、地質時代を限定する特徴種は見当たらない。しかし群集Ⅰを特徴づける*Pseudodictyomitra*属, *Thanarla*属, *Holocryptocanium*属が産出しなことから、群集Ⅰと群集Ⅱとは種構成が大きく異なり、群集Ⅱは群集Ⅰよりも若い時代を示しチューロニアン期以降であると考えられる。また、後述の群集Ⅲの指標となる*Dictyomitra koslovae*が産出しなことから、それよりも古い時代と判断できるため、群集Ⅱはチューロニアン期～コニアシアン期を指示すると考えられる。群集Ⅱの構成種は、公文ほか(1986)の*Dictyomitra formosa* 群集, 寺岡・栗本(1986)の*Dictyomitra formosa* 群集 - *Dictyomitra densicostata* 群集のものと類似する。

群集Ⅲ：Dictyomitra koslovae 群集

群集Ⅲは*Dictyomitra formosa*, *D. multicostata*, *D. koslovae*などの*Dictyomitra*属, *Archaeodictyomitra vulgaris*, *A. simplex*などの*Archaeodictyomitra* 属, *Amphipyndax stocki*などの*Amphipyndax* 属から構成され、*D. koslovae*及び*D. aff. koslovae*の産出で特徴づけられる。

群集Ⅲを特徴づける*D. koslovae*について、竹谷(1995)はその産出をサントニアン期～カンパニアン期とした。群集Ⅲの構成種は公文ほか(1986)の*Artostrobium urna*群



第4図 高野山地域の放散虫化石産出地点
 Fig. 4 Localities of radiolarian fossils in the Koyasan area

集及び寺岡・栗本(1986)の*D. koslovae*群集の構成種と類似する。一方、*Nassellaria*以外の放散虫化石として、本群集に含まれる*Alievium gallowayi*の産出レンジは前期サントニアン期～後期カンパニアン期とされた(Pessagno, 1976)が、上記群集の時代と矛盾しない。したがって、後述の*Amphipyndax tylotus*, *A. pseudoconulus*を特徴とする群集Ⅳが後期カンパニアン期と考えられることから、群集Ⅲはサントニアン期～前期カンパニアン期を指示すると考えられる。

ここで*D. koslovae*について若干言及する。Foreman

(1975)によると*D. koslovae*は第4殻室あるいは第5殻室の幅が広く、次の1～2室は幅が狭くなり直線的な形状を呈する。本報告の*D. aff. koslovae*は*D. koslovae*と比較して、幅の広がりやその下の殻室の幅の狭まり方が弱く、全体に丸みを帯びた形態を示す。本報告の*D. aff. koslovae*は、淡路島の和泉層群から産出する*D. aff. koslovae*(山崎, 1987)に類似する。山崎(1987)は*D. aff. koslovae*の産出を前期カンパニアン期から前期マーストリヒチアン期とした。また、本報告の*D. aff. koslovae*は、山本・鈴木(2012)が花園層から報告した*D. aff.*

第1表-1 花園層から産出した放射虫化石

Table 1-1 Radiolarian fossils from the Hanazono Formation

ch: チャート, chert ft: 珉長質凝灰岩, felsic tuff sh: 頁岩, shale ts: 凝灰質頁岩, tuffaceous shale

サブユニット区分		Hn1		Hn2			
地点番号		Hn1-1	Hn1-2	Hn2-1	Hn2-2	Hn2-3	Hn2-4
岩石の種類		sh	sh	ts	sh	sh	ts
岩石試料登録番号 (GSJ R)		107867	107868	107869	107870	107871	107872
化石試料登録番号 (GSJ F)		18235	18236	18237	18238	18239	18240
放射虫化石群集		群集II	群集II	群集II	群集III	群集II	群集II
1	<i>Alievium gallowayi</i>						
2	<i>Alievium</i> sp.				●		
3	<i>Amphipyndax ellipticus</i>						
4	<i>Amphipyndax pseudoconulus</i>						
5	<i>Amphipyndax stocki</i>						
6	<i>Amphipyndax tylotus</i>						
7	<i>Amphipyndax</i> cf. <i>tylotus</i>						
8	<i>Amphipyndax</i> sp.						
9	<i>Archaeodictyomitra simplex</i>						
10	<i>Archaeodictyomitra</i> cf. <i>simplex</i>						
11	<i>Archaeodictyomitra sliteri</i>						
12	<i>Archaeodictyomitra</i> cf. <i>squinaboli</i>						
13	<i>Archaeodictyomitra vulgaris</i>						
14	<i>Archaeodictyomitra</i> cf. <i>vulgaris</i>						
15	<i>Archaeodictyomitra</i> sp.	●	●	●	●		
16	<i>Archaeospongoprunum</i> sp.						
17	<i>Cornutella</i> sp.						
18	<i>Cryptamphorella</i> sp.		●				
19	<i>Diacanthocapsa</i> sp.					●	●
20	<i>Dictyomitra densicostata</i>						
21	<i>Dictyomitra formosa</i>	●					●
22	<i>Dictyomitra</i> cf. <i>formosa</i>			●			
23	<i>Dictyomitra koslovae</i>						
24	<i>Dictyomitra</i> cf. <i>koslovae</i>				●		
25	<i>Dictyomitra</i> aff. <i>koslovae</i>						
26	<i>Dictyomitra multicostata</i>						
27	<i>Dictyomitra</i> cf. <i>multicostata</i>						
28	<i>Dictyomitra</i> sp.	●	●		●	●	
29	<i>Holocryptocanium geysersensis</i>						
30	<i>Holocryptocanium</i> sp.						
31	<i>Mita</i> sp.						
32	<i>Novixitus weyli</i>						
33	<i>Orbiculiforma</i> sp.						
34	<i>Parvicingula</i> sp.						
35	<i>Praeconocaryomma californiense</i>						
36	<i>Pseudoaulophacus</i> sp.		●	●	●		
37	<i>Pseudodictyomitra pseudomacrocephala</i>						
38	<i>Pseudodictyomitra</i> sp.						
39	<i>Stichomitra asymbatos</i>			●			
40	<i>Stichomitra</i> cf. <i>asymbatos</i>						
41	<i>Stichomitra communis</i>						
42	<i>Stichomitra</i> cf. <i>communis</i>						
43	<i>Stichomitra</i> sp.			●	●	●	
44	<i>Thanarla conica</i>						
45	<i>Thanarla elegantissima</i>						
46	<i>Thanarla praeveneta</i>						
47	<i>Thanarla</i> sp.						
48	<i>Xitus</i> sp.						

第1表-2 花園層から産出した放散虫化石

Table 1-2 Radiolarian fossils from the Hanazono Formation

	Hn3														
	Hn3-1	Hn3-2	Hn3-3	Hn3-4	Hn3-5	Hn3-6	Hn3-7	Hn3-8	Hn3-9	Hn3-10	Hn3-11	Hn3-12	Hn3-13	Hn3-14	Hn3-15
	sh	sh	sh	sh	ts	ft	sh	ft	ft	sh	sh	sh	sh	sh	sh
	107873	107874	107875	107876	107877	107878	107879	107880	107881	107882	107883	107884	107887	107888	107889
	18241	18242	18243	18244	18245	18246	18247	18248	18249	18250	18251	18252	18255	18256	18257
	群集Ⅲ	群集Ⅲ	群集Ⅲ	群集Ⅳ	群集Ⅱ	群集Ⅱ	群集Ⅱ	群集Ⅱ	群集Ⅲ	群集Ⅳ		群集Ⅲ	群集Ⅱ	群集Ⅱ	群集Ⅱ
1	●														
2			●	●						●	●			●	
3															
4										●					
5	●				●	●						●	●		
6				●											
7															
8	●		●	●	●					●				●	
9									●						
10														●	
11										●					
12												●			
13						●	●		●						●
14														●	●
15	●			●	●				●		●	●		●	●
16			●	●									●		
17													●		
18															
19				●						●	●			●	
20										●					
21	●							●		●		●			
22							●	●							
23			●							●					
24				●								●			
25	●	●		●					●	●					
26	●									●					
27				●											
28	●		●	●	●	●		●	●	●			●	●	●
29															
30															
31												●			
32															
33	●		●											●	
34															
35			●												
36			●												
37															
38															
39															
40				●											
41			●	●								●	●		
42															
43	●			●		●	●		●	●		●		●	
44															
45															
46															
47															
48															

第1表-3 花園層から産出した放射虫化石

Table 1-3 Radiolarian fossils from the Hanazono Formation

	Hn4									Hn5		
	Hn4-1	Hn4-2	Hn4-3	Hn4-4	Hn4-5	Hn4-6	Hn4-7	Hn4-8	Hn4-9	Hn5-1	Hn5-2	Hn5-3
	ft	sh	ft	ft	sh	ch	ts	sh	sh	ft	sh	ch
	107890	107891	107892	107893	107894	107895	107896	107897	107898	107899	107900	107901
	18258	18259	18260	18261	18262	18263	18264	18265	18266	18267	18268	18269
群集IV	群集III		群集I			群集III	群集II	群集IV	群集I	群集II	群集I	
1												
2		●										●
3	●											
4	●											
5	●			●			●				●	
6												
7	●								●			
8				●			●	●	●	●		
9				●								
10												
11												
12												
13				●								
14												
15		●		●	●	●		●			●	
16	●										●	
17												
18												
19	●											
20												
21	●						●		●			
22		●									●	
23	●								●			
24		●					●					
25	●								●			
26												
27							●					
28	●						●	●	●			
29												●
30					●							
31				●		●						
32												●
33		●										
34												●
35												
36		●	●									
37												●
38				●								
39												
40												
41	●										●	
42												
43	●	●		●							●	●
44				●								
45												●
46				●					●			
47				●					●			
48				●								

第2表 湯川層から産出した放散虫化石

Table 2 Radiolarian fossils from the Yukawa Formation

ft: 珉長質凝灰岩, felsic tuff sh: 頁岩, shale ts: 凝灰質頁岩, tuffaceous shale

サブユニット区分	Yk1			Yk2	Yk3	
地点番号	Yk1-1	Yk1-2	Yk1-3	Yk2-1	Yk3-1	Yk3-2
岩石の種類	sh	sh	ts	ft	sh	ts
岩石試料登録番号(GSJ R)	107902	107885	107886	107903	107904	107905
化石試料登録番号(GSJ F)	18270	18253	18254	18271	18272	18273
放散虫化石群集		群集 I	群集 I	群集 I	群集 I	群集 I
<i>Alievium</i> sp.				●		●
<i>Amphipyndax</i> cf. <i>stocki</i>				●		
<i>Amphipyndax</i> sp.			●	●		●
<i>Archaeodictyomitra simplex</i>			●	●		
<i>Archaeodictyomitra vulgaris</i>		●	●	●		●
<i>Archaeodictyomitra</i> sp.		●	●	●		
<i>Cryptamphorella</i> cf. <i>conara</i>						●
<i>Dictyomitra</i> sp.	●			●		
<i>Hemicryptocapsa polyhedra</i>						●
<i>Holocryptocanium barbui</i>				●		
<i>Holocryptocanium</i> sp.					●	
<i>Mita</i> sp.				●		●
<i>Novixitus weyli</i>		●				●
<i>Novixitus</i> sp.				●		
<i>Parvicingula</i> sp.		●				●
<i>Praeconocaryomma</i> sp.						●
<i>Pseudoaulophacus</i> sp.		●				
<i>Pseudodictyomitra pseudomacrocephala</i>						●
<i>Pseudodictyomitra</i> cf. <i>pseudomacrocephala</i>				●		
<i>Pseudodictyomitra</i> sp.				●		●
<i>Squinabollum</i> cf. <i>fossilis</i>						●
<i>Stichomitra</i> cf. <i>communis</i>	●			●		●
<i>Stichomitra</i> sp.		●		●		●
<i>Thanarla brouweri</i>		●		●	●	
<i>Thanarla conica</i>			●			
<i>Thanarla elegantissima</i>				●		●
<i>Thanarla praeveneta</i>		●	●	●		
<i>Thanarla veneta</i>			●			●
<i>Thanarla</i> sp.		●				

第3表 美山層から産出した放射虫化石

Table 3 Radiolarian fossils from the Miyama Formation

ft: 珉長質凝灰岩, felsic tuff sh: 頁岩, shale ts: 凝灰質頁岩, tuffaceous shale

サブユニット区分	My1														
	My1-1	My1-2	My1-3	My1-4	My1-5	My1-6	My1-7	My1-8	My1-9	My1-10	My1-11	My1-12	My1-13	My1-14	My1-15
地点番号	sh	sh	sh	sh	ft	at	sh	ft	sh	sh	sh	ft	ts	sh	sh
岩石種	sh	sh	sh	sh	ft	at	sh	ft	sh	sh	sh	ft	ts	sh	sh
岩石登録番号GSJ R	107906	107907	107908	107909	107910	107911	107912	107913	107914	107915	107916	107917	107918	107919	107920
化石登録番号GSJ F	18274	18275	18276	18277	18278	18279	18280	18281	18282	18283	18284	18285	18286	18287	18288
放射虫化石群集			群集 I	群集 II	群集 I & II	群集 II		群集 I		群集 I		群集 I	群集 II	群集 II	
<i>Alievium</i> sp.					●			●		●		●			
<i>Amphipyndax ellipticus</i>				●	●	●		●			●				
<i>Amphipyndax stocki</i>		●		●		●		●			●			●	
<i>Amphipyndax</i> sp.			●		●		●								●
<i>Archaeodictyomitra simplex</i>												●			
<i>Archaeodictyomitra vulgaris</i>			●									●			
<i>Archaeodictyomitra</i> sp.				●	●	●	●					●			
<i>Archaeospongoprunum</i> sp.			●	●	●	●			●	●		●			
<i>Cornutella</i> sp.				●	●										
<i>Crucella</i> sp.												●			
<i>Cryptamphorella</i> sp.															●
<i>Diacanthocapsa</i> sp.				●									●		
<i>Dictyomitra formosa</i>				●	●	●								●	
<i>Dictyomitra multicostata</i>				●											
<i>Dictyomitra napaensis</i>				●		●									
<i>Dictyomitra</i> sp.	●			●	●	●						●	●	●	
<i>Hemicryptocapsa polyhedra</i>												●			
<i>Holocryptocanium astiensis</i>												●			
<i>Holocryptocanium geysersensis</i>								●							
<i>Holocryptocanium tuberculatum</i>								●							
<i>Holocryptocanium</i> sp.					●										
<i>Immersothorax</i> sp.	●								●						
<i>Mita gracilis</i>								●							
<i>Mita</i> sp.					●	●		●				●	●		
<i>Novixitus weyli</i>												●			
<i>Novixitus</i> sp.												●			
<i>Orbiculiforma</i> sp.			●		●										
<i>Parvicingula</i> sp.								●							
<i>Praeconocaryomma</i> sp.					●	●				●	●				
<i>Pseudoaulophacus</i> sp.		●				●		●	●	●		●			
<i>Pseudodictyomitra leptoconica</i>					●							●			
<i>Pseudodictyomitra nakasekoi</i>					●							●			
<i>Pseudodictyomitra pseudomacrocephala</i>								●				●			
<i>Pseudodictyomitra</i> sp.										●					
<i>Squinabollum fossilis</i>						●									
<i>Squinabollum</i> cf. <i>fossilis</i>							●	●							
<i>Stichomitra asymbatos</i>						●						●		●	
<i>Stichomitra communis</i>			●	●	●	●		●				●			
<i>Stichomitra</i> cf. <i>communis</i>													●		
<i>Stichomitra</i> sp.			●	●	●	●	●			●		●		●	
<i>Thanarla brouweri</i>					●					●					
<i>Thanarla</i> cf. <i>brouweri</i>			●												
<i>Thanarla veneta</i>												●			
<i>Thanarla</i> sp.			●												
<i>Spongotripus</i> sp.							●					●			
<i>Xitus</i> sp.												●			

koslovae や *Archaeodictyomitra lamellicostata* (*Dictyomitra lamellicostata*) に類似する。山本・鈴木(2012) は、*D. koslovae* と *A. lamellicostata* が産出する群集を *D. koslovae* 間隔帯(サントニアン期～前期カンパニアン期)と判断し、*A. lamellicostata* や随伴種の産出から見て前期カンパニアン期の可能性を指摘した。

群集Ⅳ： *Amphipyndax tylotus* 群集

群集Ⅳは *Dictyomitra formosa*, *D. multicostata*, *D. koslovae*, *D. densicostata* などの *Dictyomitra* 属, *Amphipyndax tylotus*, *A. pseudoconulus*, *A. stocki*, *A. ellipticus* などの *Amphipyndax* 属から構成され、*A. tylotus* や *A. pseudoconulus* の産出が特徴的である。ほかに *Stichomitra* 属, *Alievium* 属が産出する。

群集Ⅳを特徴づける *Amphipyndax* 属について、竹谷(1995) は *A. tylotus* の産出をカンパニアン期以降、*A. pseudoconulus* の産出を後期カンパニアン期以降とした。また群集Ⅳは、公文ほか(1986)の *Amphipyndax tylotus* 群集の構成種に類似する。最近、山本・鈴木(2012) は花園層から、紀州四万十帯団体研究グループ(2012b) は美山層から *A. tylotus* や *A. pseudoconulus* を含む放散虫化石群集を報告している。本群集は特徴種である *A. tylotus*, *A. pseudoconulus* の産出からみて、後期カンパニアン期を指示すると考えられる。

5.2 化石産出試料

5.2.1 花園層

花園層の33試料から放散虫化石を抽出し、そのうち群集を識別できたのは29試料である。

群集ⅠはHn4ユニット、Hn5ユニットから産出し、Hn4-4, Hn5-1, Hn5-3の3試料である。Hn4-4は厚さ約10 cmの珪長質凝灰岩で、頁岩中の岩塊である。Hn5-1は珪長質凝灰岩で、厚さ約10 mで地質図では走向方向に数100 mの規模を示す。Hn5-3は玄武岩の見かけ上位に重なる赤色チャートである。この玄武岩と赤色チャートは頁岩中の厚さ約10数mの岩塊であり、地質図に図示できる規模を有しない。

群集Ⅱは花園層の全ユニットから産出し、全部で14試料である。Hn1-1は混在岩中の成層した黒色頁岩、Hn1-2は砂岩頁岩互層中の頁岩である。Hn2-1, Hn2-4及びHn3-5は凝灰質頁岩で、一部に珪質あるいは砂質部分がある。Hn3-6及びHn3-8は層状の珪長質凝灰岩である。Hn2-3, Hn3-7, Hn3-13, Hn3-14, Hn3-15, Hn4-8, 及びHn5-2は黒灰色頁岩である。

群集ⅢはHn2ユニット、Hn3ユニット、Hn4ユニットの合計8試料から産出した。Hn2-2は砂岩頁岩互層中の頁岩である。Hn3-1, Hn3-2, Hn3-3は黒色ないし黒灰色の頁岩である。Hn3-9は淡緑色あるいは白色の珪長質凝灰岩で、硬質部と軟質部の互層を呈する。Hn3-12は一部に凝灰質部分を含む頁岩で、頁岩優勢な砂岩頁岩互層中のものである。Hn4-2は頁岩優勢な砂岩頁岩互層

中の頁岩である。Hn4-7は灰色の凝灰質頁岩で、玄武岩の見かけ上位に位置する。

群集ⅣはHn3ユニット、Hn4ユニットの合計4試料から産出した。Hn3-4は成層頁岩で、周囲には混在岩が分布する。Hn3-10は頁岩優勢な砂岩頁岩互層中の頁岩である。Hn4-1は緑色あるいは白色でチャート光沢の珪長質凝灰岩で、周囲は凝灰質頁岩である。Hn4-9はややしルト質で凝灰質部分を含む頁岩である。

さらに今回、栗本(1982)において後期白亜紀の放散虫化石を産出したLoc. 12(珪長質凝灰岩、本論文Hn2ユニットのLoc. A)とLoc. 15(凝灰質頁岩、本論文Hn3ユニットのLoc. B)の試料を再検討し、*Dictyomitra koslovae*, *Dictyomitra formosa*に加えて、群集Ⅳに特徴的な *Amphipyndax pseudoconulus* 及び *Amphipyndax tylotus* の産出を確認した。なお、*Amphipyndax pseudoconulus* は栗本(1982)の *Amphipyndax enesseffi* に相当する。

5.2.2 湯川層

湯川層の6試料から放散虫化石を抽出し、それらのうち5試料から群集Ⅰを識別した。Yk1-2及びYk3-1は砂岩頁岩互層中の黒色頁岩である。Yk1-3及びYk3-2は凝灰質頁岩で、前者は層状の黄土色ないし緑色を呈し、後者は褐色を帯びた灰色でやしルト質である。Yk2-1は灰緑色の細粒な硬質部と淡緑色の極細粒な軟質部の互層からなる珪長質凝灰岩である。湯川層から産出した放散虫化石群集は紀州四万十帯団体研究グループ(1991, 2012a)の結果と調和的である。

なお、紀州四万十帯団体研究グループ(2012a)は、紀州四万十帯団体研究グループ(1991)が報告した *Dictyomitra formosa* の産地を再調査し、保存の良い *Holocryptocanium barbui* 群集を得たことから、*Dictyomitra formosa* 群集の産出は誤りであったとした。しかし本論文のYk1-1(頁岩)からは、群集Ⅰを特徴づける種が産出せず、*Dictyomitra* 属や *Stichomitra* 属が産出した。保存状態が悪いため化石群集の認定には至らなかったが、チューロニアン期以降の可能性があると考えられ、検討の余地があると思われる。

5.2.3 美山層

美山層のMy1ユニットの15試料から放散虫化石を抽出し、そのうち群集を識別できたのは9試料である。

群集ⅠはMy1-3, My1-8, My1-10, My1-12の4試料から産出する。My1-3及びMy1-10は砂岩優勢な砂岩頁岩互層中の頁岩である。My1-8及びMy1-12は珪長質凝灰岩で、前者は淡緑色を呈し、厚さ30～50 cmで黒色頁岩中に挟まれる。群集ⅡはMy1-4, My1-6, My1-13, My1-14の4試料から群集Ⅱの放散虫化石が産出する。My1-4及びMy1-14は頁岩で、前者は砂岩優勢な砂岩頁岩互層の頁岩、後者は頁岩優勢な砂岩頁岩互層中の頁岩

で、珪長質凝灰岩の岩塊を含む。My1-6は珪長質凝灰岩、My1-13は凝灰質頁岩である。さらにMy1-5の珪長質凝灰岩からは群集Ⅰと群集Ⅱの混在群集が産出する。

なお、紀州四万十帯団体研究グループ(2012b)は、美山層の構造的最上位のM1ユニット(近井ユニット)をチューロニアン期～コニアシアン期としたが、上記のようにMy1ユニット北縁部の頁岩及び珪長質凝灰岩から群集Ⅰ(後期アルビアン期～セノマニアン期)の放散虫化石が産出した。

6. 考察

6.1 花園層の付加体形成時代

花園層は全体に頁岩優勢で、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩などの陸源の堆積岩と、玄武岩、チャートなどの海洋起源の岩石から構成され、岩相の組み合わせや地質構造の特徴から海洋プレートの沈み込みに伴って形成された付加体であると判断される。一般に付加体においては、チャートなどの海洋起源の岩石は頁岩などの基質よりも古い地質時代を示す。

本報告と山本・鈴木(2012)に基づいて、花園層の地質時代と付加体としての形成時代を考察し(第5図)、周辺の白亜紀付加体との比較を試みる。なお、本報告と山本・鈴木(2012)では花園層のユニット区分が異なるため、山本・鈴木(2012)の放散虫化石を本報告のユニット区分に当てはめた。

Hn1ユニット

本ユニットの頁岩から群集Ⅱ(チューロニアン期～コニアシアン期)の放散虫化石が産出するが、変形のため放散虫化石の保存が悪く、現時点ではこれ以上詳細に地質時代は限定できない。したがって、Hn1ユニットの構成岩類はチューロニアン期～コニアシアン期であり、付加体の形成も頁岩の地質時代に基づいて同様にチューロニアン期～コニアシアン期と考えられる。

Hn2ユニット

本ユニットの頁岩及び凝灰質頁岩からは群集Ⅱ(チューロニアン期～コニアシアン期)、頁岩からは群集Ⅲ(サントニアン期～前期カンパニアン期)、珪長質凝灰岩からは群集Ⅳ(後期カンパニアン期)の放散虫化石がそれぞれ産出する。

一方、山本・鈴木(2012)の報告によると、Hn2ユニットに相当するHz2ユニットの地点①のチャートから*Holocryptocanium barbui*群集の放散虫化石が産出し、アルビアン期～前期セノマニアン期を示すとされた。地点③の黒色頁岩は構成種から中期サントニアン期～前期カンパニアン期とされた。このチャートは山本・鈴木(2012)の地質図において、北西～南東方向によく連続するチャート・玄武岩のすぐ近くに位置し、レンズ状岩体の一部の可能性がある。地点②の緑灰色頁岩からは*D. koslovae*が産出するが、*A. tylotus*が産出しないこと

から最末期コニアシアン期～前期カンパニアン期とされた。しかし*Archaeodictyomitra lamellicostata*(あるいは*Dictyomitra lamellicostata*)の産出を考慮すると、後述のHz3ユニットの地点⑥と同様に前期カンパニアン期として良いと考えられる。

両者を総合すると、Hn2ユニットの構成岩類はアルビアン期～後期カンパニアン期に及ぶ。そのうち頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩はチューロニアン期～後期カンパニアン期、チャートはアルビアン期～前期セノマニアン期であり、チャートは頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩よりも古い時代を示す。したがって、付加体の基質と判断される頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩の地質時代に基づいて、付加体の形成はチューロニアン期～後期カンパニアン期と考えられる。

Hn3ユニット

本ユニットの頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩からは群集Ⅱ(チューロニアン期～コニアシアン期)、頁岩及び珪長質凝灰岩からは群集Ⅲ(サントニアン期～前期カンパニアン期)、頁岩及び凝灰質頁岩からは群集Ⅳ(後期カンパニアン期)の放散虫化石が産出する。

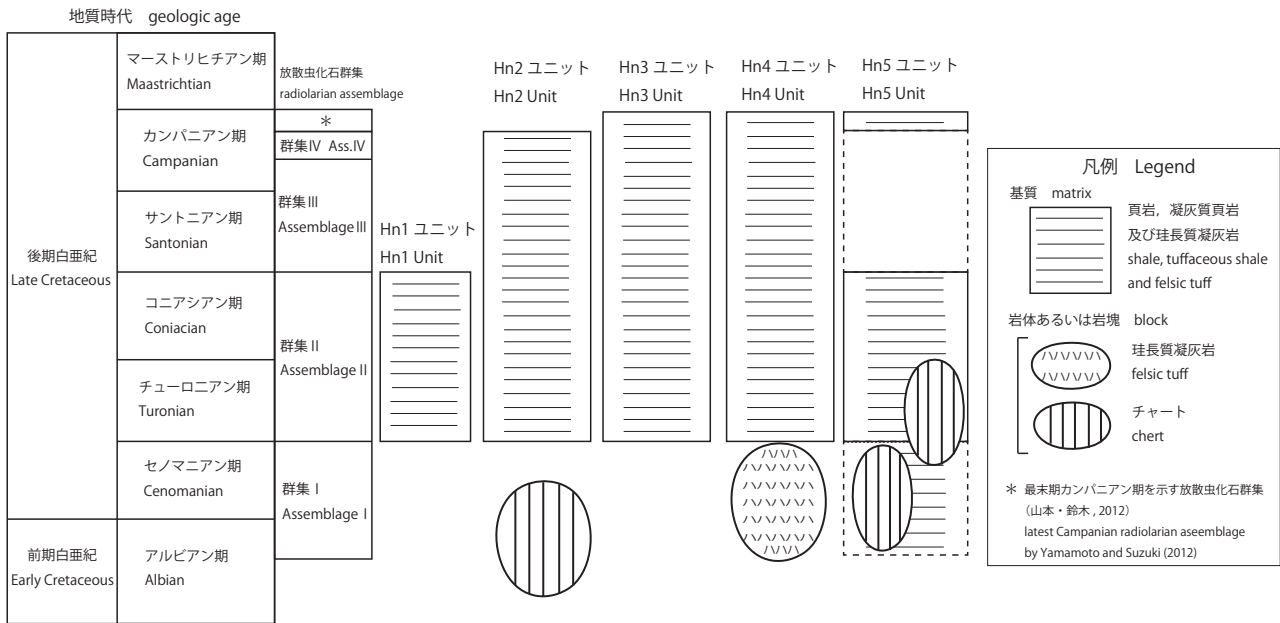
一方、山本・鈴木(2012)の報告によると、Hz3ユニットの地点⑥の緑灰色頁岩の放散虫化石は*D. koslovae*間隔帯(サントニアン期～前期カンパニアン期)に相当するが、*A. lamellicostata*を伴うことから同間隔帯上部の前期カンパニアン期を示すとされた。地点⑦、⑧、⑨、⑩の緑灰色頁岩からは*D. koslovae*、*A. tylotus*が産出し、*A. lamellicostata*も共産することから*A. tylotus*間隔帯に相当し、後期カンパニアン期とされた。地点⑪の緑灰色頁岩からは*A. tylotus*、*A. lamellicostata*を産出するが、*D. koslovae*を産出しないことから、最末期カンパニアン期と判断された。

両者を総合すると、頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩から産出した放散虫化石に基づいて、Hn3ユニットの構成岩類はチューロニアン期～最末期カンパニアン期に及ぶ。チャートの地質時代は不明である。したがって、付加体の基質と判断される頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩の地質時代に基づいて、付加体の形成はチューロニアン期～最末期カンパニアン期と考えられる。

Hn4ユニット

本ユニットの珪長質凝灰岩からは群集Ⅰ(後期アルビアン期～セノマニアン期)、頁岩からは群集Ⅱ(チューロニアン期～コニアシアン期)、頁岩及び凝灰質頁岩からは群集Ⅲ(サントニアン期～前期カンパニアン期)、頁岩及び珪長質凝灰岩からは群集Ⅳ(後期カンパニアン期)の放散虫化石が産出する。後期アルビアン期～セノマニアン期の放散虫化石を産出する珪長質凝灰岩(Hn4-4)は頁岩中の岩塊である(5.2.1参照)。

一方、山本・鈴木(2012)の報告では、地点④及び地点⑤はHz2ユニットとされたが、本報告のHn4ユニットの



第5図 放散虫化石に基づく花園層の地質時代

Fig. 5 Geologic age of the Hanazono Formation based on the radiolarian fossils

分布域に含まれる。両地点の緑灰色頁岩から産出した放散虫化石はサントニアン期～前期カンパニアン期とされた。地点⑫の緑灰色頁岩はHn3ユニットに所属するとされたが、本報告のHn4ユニットの分布域に含まれる。本試料では *A. tylotus*, *A. lamellicostata*, *D. koslovae* が産出することから後期カンパニアン期とされた。地点⑭の緑灰色頁岩及び地点⑰の黒色頁岩からは、Hn3ユニットの地点⑪と同様に *A. tylotus* や *A. lamellicostata* を産出するが、*D. koslovae* は産出しないことから、最末期カンパニアン期と判断された。

両者を総合すると、Hn4ユニットの構成岩類は後期アルビアン期～最末期カンパニアン期に及ぶ。そのうち岩塊の珪長質凝灰岩は後期アルビアン期～セノマニアン期であり、それ以外の頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩はチューロニアン期～最末期カンパニアン期である。したがって、付加体の基質と判断される後者の頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩の地質時代に基づいて、付加体の形成はチューロニアン期～最末期カンパニアン期と考えられる。

Hn5ユニット

本ユニットの珪長質凝灰岩 (Hn5-1) 及びチャート (Hn5-3) からは群集 I (後期アルビアン期～セノマニアン期)、頁岩からは群集 II (チューロニアン期～コニアシアン期) の放散虫化石が産出する。一方、群集 I を産出するチャートは、野外において玄武岩の見かけ上位に重なる赤色チャートである (5.2.1 参照)。

一方、山本・鈴木 (2012) の報告によると、地点⑬

のチャートから産出した放散虫化石は、群集 I の *Holocryptocanium barbui* 群集の特徴種である *H. barbui* を含まず、*Pseudodictyomitra pseudomacrocephala* や *Novixitus weyli* を産出することから、群集 I よりも若い後期セノマニアン期～チューロニアン期と判断された。このチャートは山本・鈴木 (2012) の地質図において図示されておらず、小規模なレンズ状岩体あるいは混在岩中の岩塊と考えられる。地点⑮の緑灰色頁岩及び地点⑯の黒色頁岩は *A. tylotus*, *A. lamellicostata* を産出し、*D. koslovae* を含まないことから、最末期カンパニアン期とされた。

両者を総合すると、Hn5ユニットの構成岩類は後期アルビアン期～最末期カンパニアン期に及ぶが、サントニアン期～後期カンパニアン期は確認されていない。後期アルビアン期～セノマニアン期を示す珪長質凝灰岩は、地質図において走向方向に連続する層として分布することから周囲の頁岩と整合関係にあり (5.2.1 参照)、混在岩中の岩塊ではなく基質である可能性が考えられる。この珪長質凝灰岩は第5図において後期アルビアン期～セノマニアン期の基質として表示した。一方、チャートには後期アルビアン期～セノマニアン期と後期セノマニアン期～チューロニアン期の2種類があり、レンズ状岩体あるいは岩塊として産出する。したがって、サントニアン期～後期カンパニアン期は未確認ではあるが、付加体の基質と判断される頁岩、凝灰質頁岩及び珪長質凝灰岩の地質時代に基づいて、付加体の形成は後期アルビアン期～最末期カンパニアン期の可能性が考えられる。

付加体形成の時代極性

花園層主部のHn2～Hn5ユニットの付加体形成時代のうち、最も若い地質時代に着目すると、Hn2ユニットよりもHn3～Hn5ユニットの方がやや若い地質時代を示すものの、構造的上位から下位に向かって順次若くなる明瞭な極性は認められない。また、付加体形成の開始時期に注目すると、構造的最低位のHn5ユニットが最も古く、後期アルビアン期に開始した可能性がある。

6.2 放散虫化石時代から見た周辺の地質体との関係

本地域周辺の四万十帯白亜系の形成時代を概観すると、北から花園層、湯川層、美山層、竜神層に区分され(第2章参照)、湯川層から竜神層に向けて付加時代が順次若くなる極性を示すが、最も北に位置する花園層は湯川層よりも時代が若く、この極性を乱している(栗本, 1982; 山本・鈴木, 2012)。Kurimoto (1994)は、花園層が沈み込みの過程で付加体として形成され、その後、梁瀬断層(紀州四万十帯団体研究グループ, 1991)の活動により湯川層の北側に配置されるに至ったと考えた。紀州四万十帯団体研究グループ(2012b)は、美山層を構造的上位からM1～M4の4ユニットに区分し、岩相の組み合わせと見かけの層序の特徴、覆瓦構造を示すこと、基質の頁岩の時代が構造的上位から下位に向かって、M1ユニット(チューロニアン期～コニアシアン期)、M2ユニット(サントニアン期～前期カンパニアン期)、M3ユニット(サントニアン期～前期カンパニアン期)、M4ユニット(後期カンパニアン期～前期マーストリヒチアン期)と順次若くなる極性を有することから、美山層は典型的な付加体であると判断した。美山層の各ユニットの上限の地質時代に注目すると、花園層主部の付加体形成の上限の時代は後期カンパニアン期～最末期カンパニアン期であり、前期マーストリヒチアン期は含まないが、美山層M4ユニットの時代に近い。

7. まとめ

紀伊半島北西部の高野山地域の花園層は、岩相と地質構造に基づいてHn1～Hn5の5ユニットに区分される。北縁部のHn1ユニットと花園層主部(Hn2～Hn5ユニット)は東北東～西南西性の神谷断層により画される。Hn1ユニットは、主として頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、チャート、玄武岩、混在岩を伴う。面構造や微褶曲がよく観察され、頁岩を基質として砂岩、チャート、玄武岩などの岩塊を含む混在岩を伴う。花園層主部は構造的上位からHn2～Hn5の各ユニットが衝上断層によって画された覆瓦構造をなす。Hn2ユニットは主として頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、玄武岩、混在岩を伴う。Hn3ユニットは主として頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、チャート、石灰岩、玄武岩、混在岩を伴う。Hn4ユニットは主として

頁岩からなり、砂岩、砂岩頁岩互層、珪長質凝灰岩、チャート、玄武岩、混在岩を伴う。Hn5ユニットは主として頁岩からなり、珪長質凝灰岩、玄武岩、混在岩を伴う。

花園層に加えて隣接する湯川層及び美山層から産出した放散虫化石の群集組成を検討し、放散虫化石群集I、II、III、IVを識別した。群集I：*Holocryptocanium barbui*群集は後期アルビアン期～セノマニアン期を、群集II：*Dictyomitra formosa*群集はチューロニアン期～コニアシアン期を、群集III：*Dictyomitra koslovae*群集はサントニアン期～前期カンパニアン期を、群集IV：*Amphipyndax tylotus*群集は後期カンパニアン期を示すと考えられる。

花園層は岩相組み合わせや地質構造の特徴から付加体であり、本報告及び山本・鈴木(2012)による放散虫化石の産出に基づいてHn1ユニットはチューロニアン期～コニアシアン期、花園層主部のHn2ユニットはチューロニアン期～後期カンパニアン期、Hn3～Hn4ユニットはチューロニアン期～最末期カンパニアン期、Hn5ユニットは後期アルビアン期～最末期カンパニアン期に形成されたと考えられる。

謝辞:本研究にあたり、山本俊哉氏(和歌山県立田辺高校)には野外調査及び放散虫化石に関して重要な情報を頂戴した。査読者の地質情報研究部門の斎藤 眞博士及び編集委員の内野隆之博士には有意義なご指摘と議論を頂戴した。厚く御礼申し上げます。

文 献

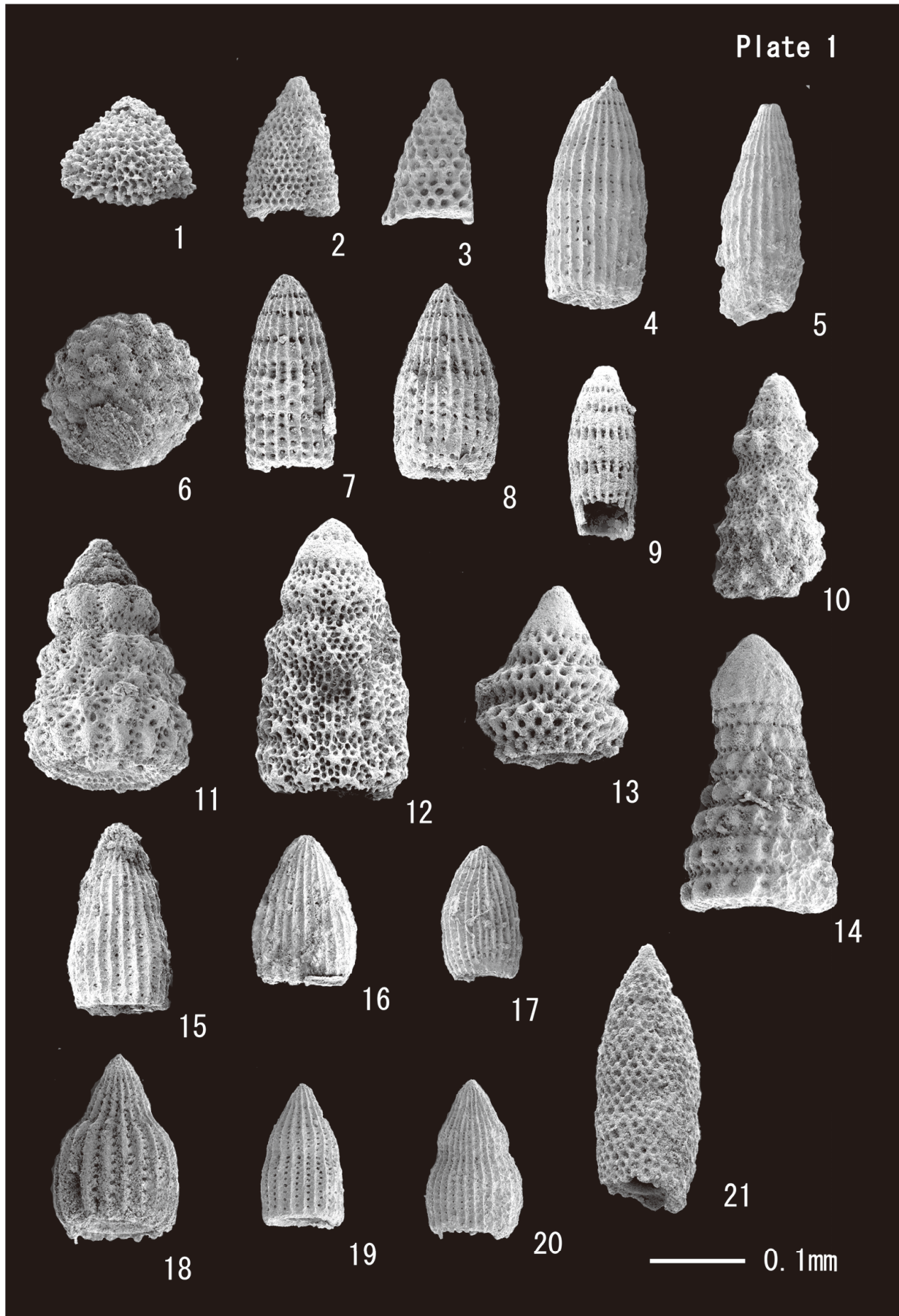
- Awan, M. A. and Kimura, K. (1996) Thermal structure and uplift of the Cretaceous Shimanto Belt, Kii Peninsula, Southwest Japan: An illite crystallinity and illite b0 lattice spacing study. *The Island Arc*, **5**, 69-88.
- Foreman, H. (1975) Radiolaria from the North Pacific, Deep Sea Drilling Project, Leg 32. In Larson, R.L., Moberly, R., et al., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **32**, 579-676.
- Hada, S. (1967) Geology of Middle-Aritagawa district, Wakayama Prefecture, with special reference to the relationship between the Chichibu belt and Sambagawa belt. *Bull. Osaka Museum Natural History*, no. 20, 39-60.
- 平山 健・神戸信和(1959) 5万分の1地質図幅「高野山」および同説明書. 地質調査所, 41p.
- 平山 健・田中啓策(1956a) 5万分の1地質図幅「動木」および同説明書. 地質調査所, 37p.
- 平山 健・田中啓策(1956b) 5万分の1地質図幅「海南」および同説明書. 地質調査所, 62p.
- 岩橋豊彦(1987) 井谷地域. 中沢圭二・市川浩一郎・市原

- 実(編)，日本の地質6「近畿地方」，86-87，共立出版。
- 紀州四万十帯団体研究グループ(1986) 紀伊半島西部中津村周辺の日高川層群美山累層－紀伊半島四万十累帯の研究(その11)－。地球科学，**40**，274-293。
- 紀州四万十帯団体研究グループ(1991) 和歌山県中東部の日高川層群湯川累層－紀伊半島四万十累帯の研究(その12)－。地球科学，**45**，19-38。
- 紀州四万十帯団体研究グループ(2006) 和歌山県中西部の日高川帯の地質－紀伊半島四万十累帯の研究(その13)－。地球科学，**60**，355-374。
- 紀州四万十帯団体研究グループ(2012a) 湯川付加コンプレックスの提唱。地団研専報，no.59，25-34。
- 紀州四万十帯団体研究グループ(2012b) 美山付加コンプレックスの再定義－チューロニアン～下部マーストリヒチアンの付加体－。地団研専報，no.59，25-34。
- 公文富士夫・松山尚典・中条健次(1986) 紀伊半島四万十累帯日高川層群の改訂ジュラ紀後期－白亜紀放散虫化石群集。化石，no.41，17-27。
- 栗本史雄(1982) 和歌山県高野山南西方のいわゆる秩父系－上部白亜系花園層－。地質雑，**88**，901-914。
- Kurimoto, C. (1994) Geology of the Kudoyama area in the western Kii Peninsula, Southwest Japan, with reference to disappearance of the Chichibu terrane. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **45**, 235-255.
- 栗本史雄・牧本 博・吉田史郎・高橋裕平・駒澤正夫(1998) 20万分の1地質図幅「和歌山」。地質調査所。
- 牧本 博・宮田隆夫・水野清秀・寒川 旭(2004) 粉河地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，産総研地質調査総合センター，89p。
- Onishi, C. T., Kimura, G., Hashimoto, Y., Ikehara-Ohmori, K. and Watanabe, T. (2001) Deformation history of tectonic mélange and its relationship to the underplating process and relative plate motion: An example from the deeply buried Shimanto Belts, SW Japan. *Tectonics*, **20**, 376-393.
- Pessagno, E. A. Jr. (1976) Radiolarian zonation and stratigraphy of the Upper Cretaceous portion of the Great Valley Sequence, California Coast Ranges. *Micropaleont. Spec. Pub.*, no. 2, 95p.
- 志井田 功(1962) 紀伊半島中央部における秩父累帯および日高(四万十)累帯の層位的構造地質学的研究。名古屋大教養紀要，**6**，1-58。
- 志井田 功(1967) 十津川沿線の地質。付記；紀伊半島における“仏像構造線”の問題。奈良県地理学会編奈良県文化論叢，35-51。
- 志井田 功・諏訪兼位・梅田甲子郎・星野光雄(1989) 山上ヶ岳地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，地質調査所，100p。
- 竹谷陽二郎(1995) 本邦上部白亜系の放散虫化石層序の再検討－特に国際対比上有効な層準について－。地質雑，**101**，30-41。
- 竹内 誠(1996) 紀伊半島三波川帯・秩父帯・四万十帯の地質－奈良県吉野地域及び三重県橿田川地域。地調月報，**47**，223-244。
- 寺岡易司・栗本史雄(1986) 宇和島地域の四万十帯白亜系層序－大型化石と放散虫化石の層序的分布に関連して－。地調月報，**37**，417-453。
- 徳岡隆夫・原田哲朗・鈴木博之・八尾 昭・須田芳朗(1982) 20万分の1地質図幅「田辺」。地質調査所。
- 山本俊哉・鈴木博之(2012) 花園付加コンプレックスの地質と放散虫化石。地団研専報，no. 59，1-14。
- 山崎哲司(1987) 四国・淡路島西部の和泉層群の放散虫化石。地質雑，**93**，403-417。
- 大和大峯研究グループ(1981) 紀伊山地中央部の中・古生界。地学団体研究会第35回総会巡検案内書，88p。
- 大和大峯研究グループ(1989) 紀伊半島中央部の中・古生界(その3)－御吉野地域－。地球科学，**43**，119-128。
- 大和大峯研究グループ(1992) 紀伊山地中央部の中・古生界(その4)－高原川地域－。地球化学，**46**，185-198。
- 大和大峯研究グループ(1994) 紀伊山地中央部の中・古生界(その5)－新子地域－。地球科学，**48**，163-118。
- 大和大峯研究グループ(1998) 紀伊山地中央部の中・古生界(その6)－辻堂地域－。地球科学，**52**，275-291。
- 大和大峯研究グループ(2005) 紀伊山地中央部の中・古生界(その9)－辻堂・大峯・台高・国見山地域の再検討－。地球科学，**59**，287-300。
- 大和大峯研究グループ(2012) 紀伊半島中央部の四万十帯。地団研専報，**59**，15-23。
- Yao, A. (1984) Subdivision of the Mesozoic complex in Kii-Yura area, Southwest Japan and its bearing on the Mesozoic basin development in the Southern Chichibu Terrane. *J. Geosci., Osaka City Univ.*, **27**, 41-103.

(受 付：2014年10月23日 受 理：2015年6月30日)

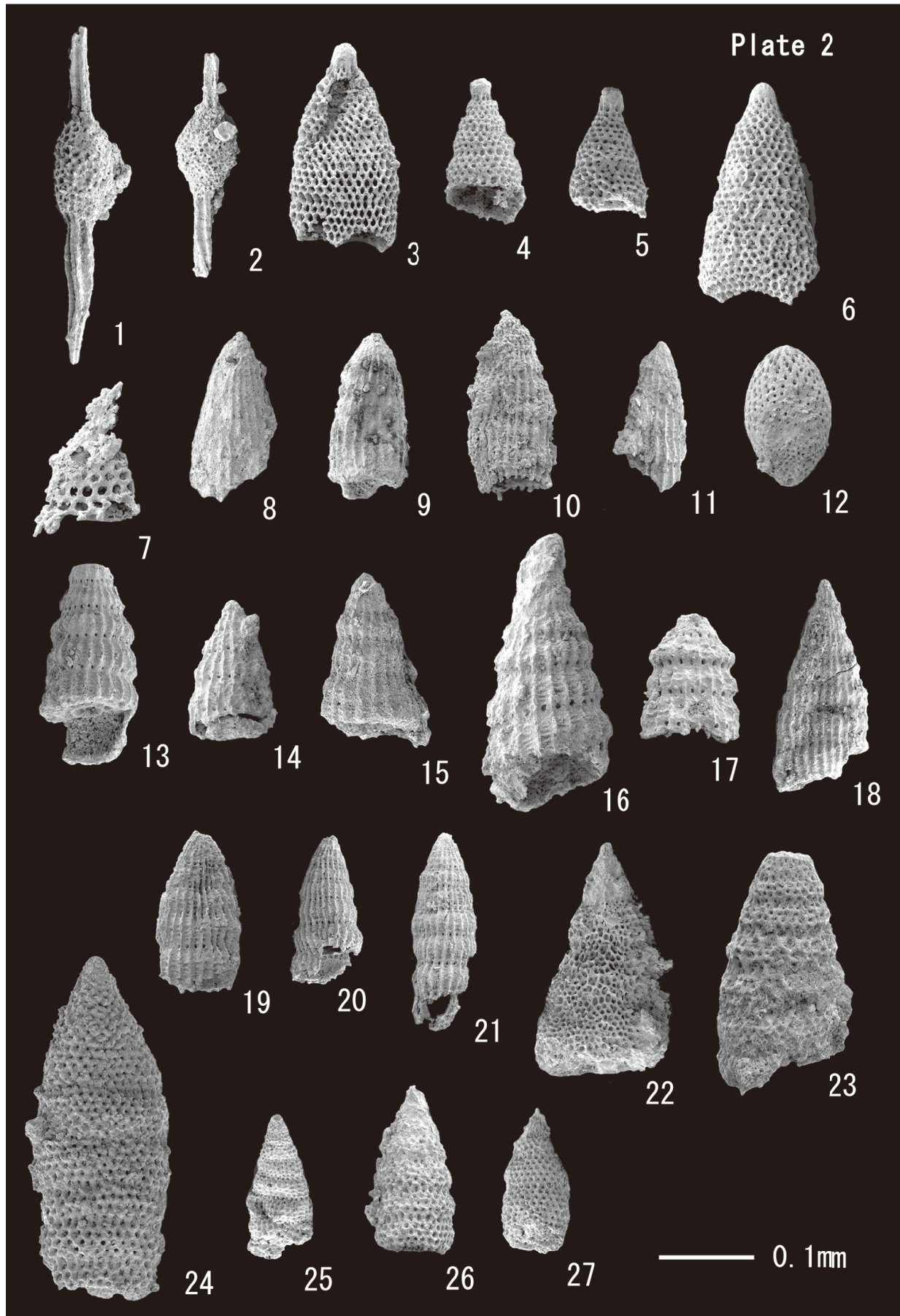
図版1 花園層の群集 I : *Holocryptocanium barbui*群集
Plate 1 *Holocryptocanium barbui* Assemblage of the Hanazono Formation

1. *Alievium* sp. Loc. Hn5-3, GSJ F18269-2
2. *Amphipyndax* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-62
3. *Amphipyndax* sp. Loc. Hn5-1, GSJ F18267-17
4. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Hn4-4, GSJ F18261-113
5. *Archaeodictyomitra simplex* Pessagno Loc. Hn4-4, GSJ F18261-110
6. *Holocryptocanium geysersensis* Pessagno Loc. Hn5-3, GSJ F18269-11
7. *Mita* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-15
8. *Mita* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-18
9. *Mita* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-49
10. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. Hn5-3, GSJ F18269-8
11. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. Hn5-3, GSJ F18269-12
12. *Xitus* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-42
13. *Parvicingula* sp. Loc. Hn5-3, GSJ F18269-15
14. *Pseudodictyomitra pseudomacrocephala* (Squinabol) Loc. Hn5-3, GSJ F18269-14
15. *Thanarla* sp. Loc. Hn4-4, GSJ F18261-23
16. *Thanarla conica* (Aliev) Loc. Hn4-4, GSJ F18261-38
17. *Thanarla conica* (Aliev) Loc. Hn4-4, GSJ F18261-88
18. *Thanarla elegantissima* (Cita) Loc. Hn5-3, GSJ F18269-17
19. *Thanarla praeveneta* Pessagno Loc. Hn4-4, GSJ F18261-115
20. *Thanarla praeveneta* Pessagno Loc. Hn4-4, GSJ F18261-61
21. *Stichomitra* sp. Loc. Hn5-3, GSJ F18269-7



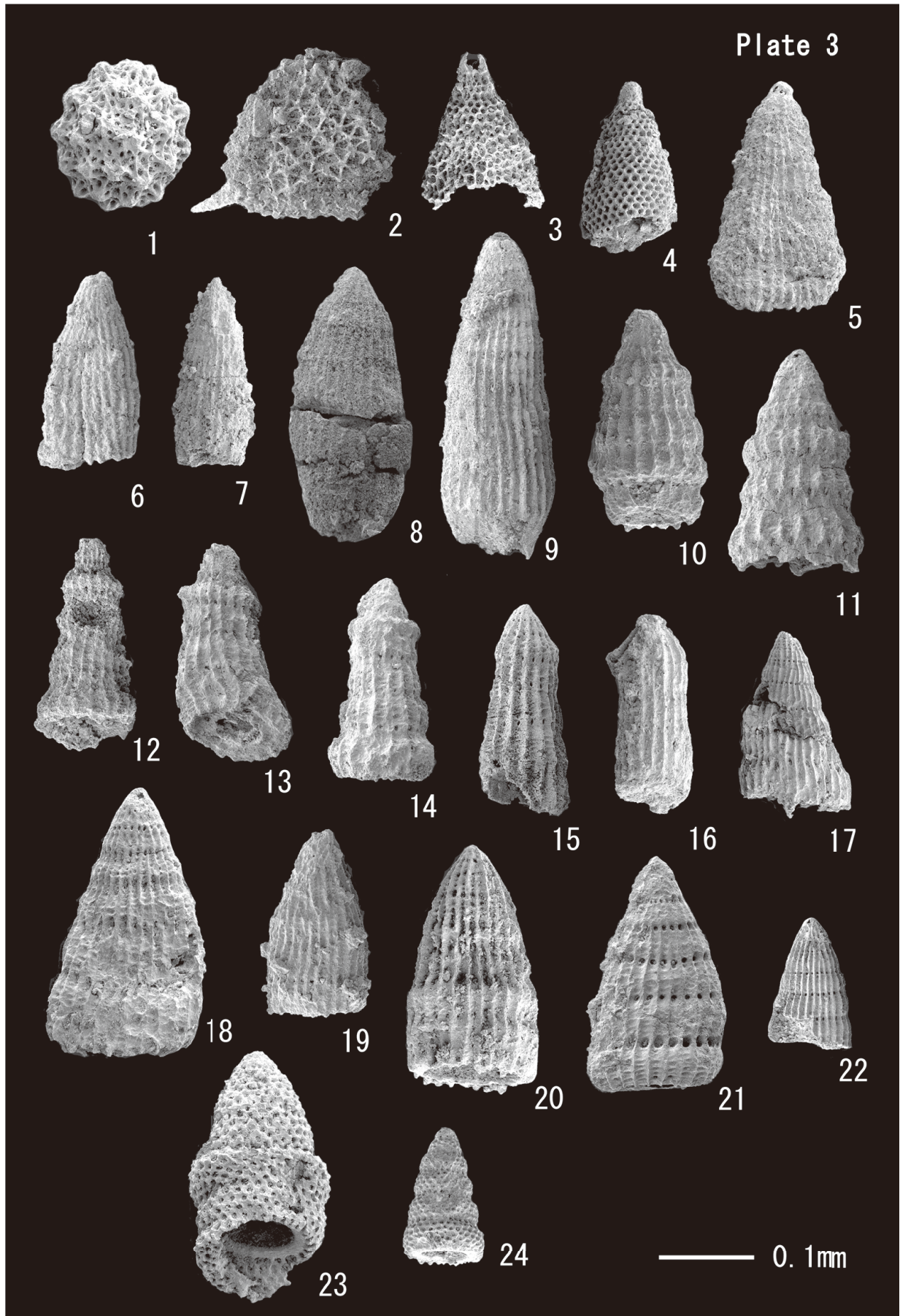
図版2 花園層の群集Ⅱ : *Dictyomitra formosa*群集
Plate2 *Dictyomitra formosa* Assemblage of the Hanazono Formation

1. *Archaeospongoprunum* sp. Loc. Hn3-13, GSJ F18255-7
2. *Archaeospongoprunum* sp. Loc. Hn3-13, GSJ F18255-5
3. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. Hn3-13, GSJ F18255-1
4. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. Hn5-2, GSJ F18268-7
5. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. Hn3-5, GSJ F18245-1
6. *Amphipyndax* sp. Loc. Hn3-5, GSJ F18245-2
7. *Cornutella* sp. Loc. Hn3-13, GSJ F18255-2
8. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Hn3-15, GSJ F18257-7
9. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Hn3-7, GSJ F18247-1
10. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Hn3-6, GSJ F18246-4
11. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Hn5-2, GSJ F18268-16
12. *Diacanthocapsa* sp. Loc. Hn2-4, GSJ F18240-2
13. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn2-4, GSJ F18240-4
14. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn3-8, GSJ F18248-4
15. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn1-1, GSJ F18235-1
16. *Dictyomitra cf. formosa* Squinabol Loc. Hn5-2, GSJ F18268-13
17. *Dictyomitra cf. formosa* Squinabol Loc. Hn3-8, GSJ F18248-1
18. *Dictyomitra cf. multicostata* Zittel Loc. Hn3-5, GSJ F18245-4
19. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-6, GSJ F18246-6
20. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-6, GSJ F18246-7
21. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-6, GSJ F18246-5
22. *Stichomitra asymbatos* Foreman Loc. Hn2-1, GSJ F18237-2
23. *Stichomitra cf. asymbatos* Foreman Loc. Hn3-5, GSJ F18245-9
24. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. Hn3-5, GSJ F18245-11
25. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. Hn3-13, GSJ F18255-6
26. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. Hn5-2, GSJ F18268-8
27. *Stichomitra* sp. Loc. Hn5-2, GSJ F18268-14



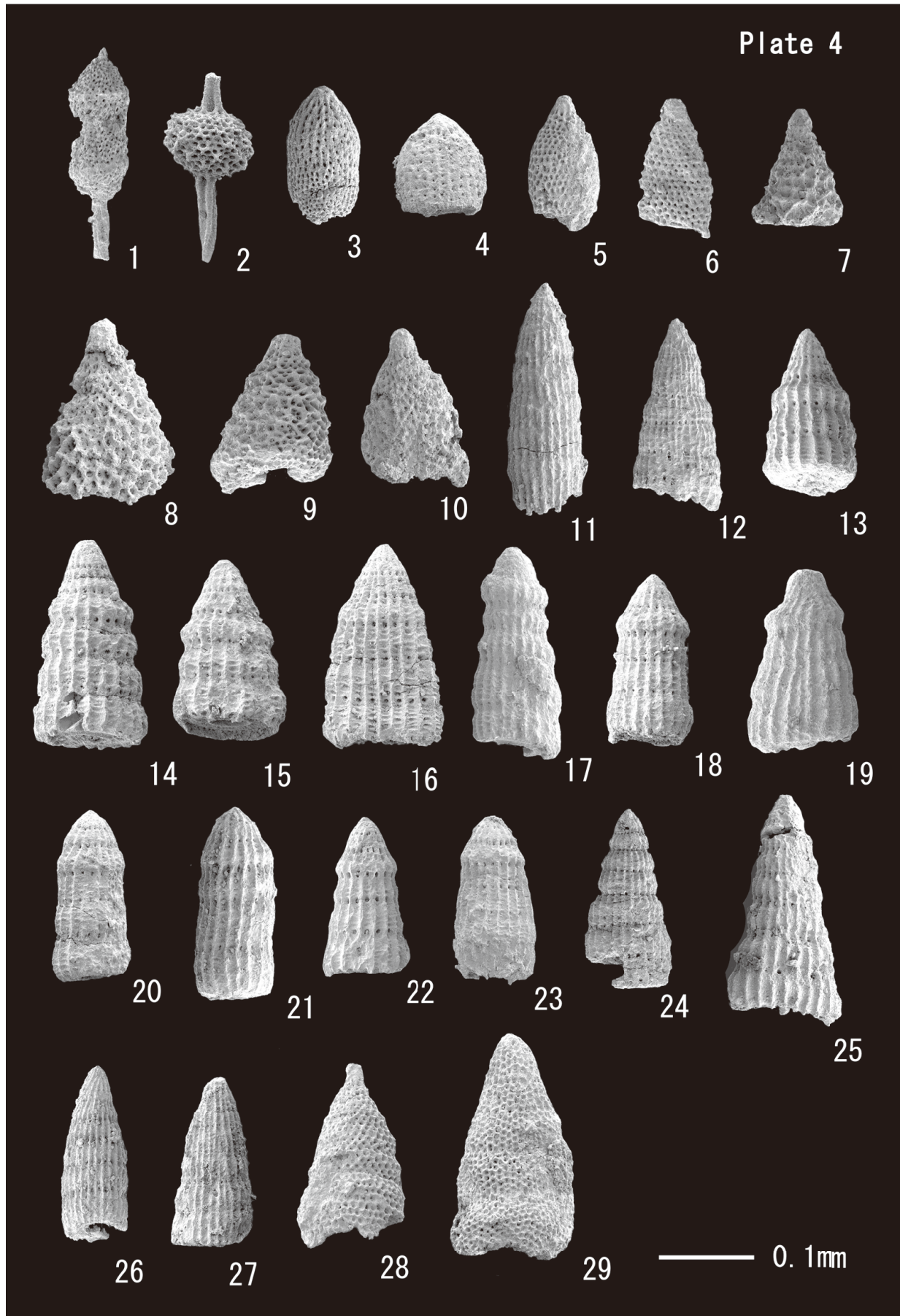
図版3 花園層の群集Ⅲ : *Dictyomitra koslovae*群集
Plate 3 *Dictyomitra koslovae* Assemblage of the Hanazono Formation

1. *Praeconocaryomma californiense* Pessagno Loc. Hn3-3, GSJ F18243-1
2. *Alievium gallowayi* (White) Loc. Hn3-1, GSJ F18241-15
3. *Amphipyndax* sp. Loc. Hn3-1, GSJ F18241-24
4. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. Hn4-7, GSJ F18264-6
5. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Hn3-12, GSJ F18252-6
6. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Hn3-9, GSJ F18249-9
7. *Archaeodictyomitra simplex* Pessagno Loc. Hn3-9, GSJ F18249-5
8. *Archaeodictyomitra* cf. *squinaboli* Pessagno Loc. Hn3-12, GSJ F18252-24
9. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Hn3-1, GSJ F18241-2
10. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn4-7, GSJ F18264-7
11. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn3-12, GSJ F18252-15
12. *Dictyomitra* cf. *koslovae* Foreman Loc. Hn2-2, GSJ F18238-2
13. *Dictyomitra* cf. *koslovae* Foreman Loc. Hn2-2, GSJ F18238-3
14. *Dictyomitra koslovae* Foreman Loc. Hn3-3, GSJ F18243-9
15. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn3-1, GSJ F18241-17
16. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn3-9, GSJ F18249-6
17. *Dictyomitra multicostata* Zittel Loc. Hn3-1, GSJ F18241-23
18. *Dictyomitra multicostata* Zittel Loc. Hn3-1, GSJ F18241-16
19. *Dictyomitra* cf. *multicostata* Zittel Loc. Hn4-7, GSJ F18264-5
20. *Dictyomitra multicostata* Zittel Loc. Hn3-1, GSJ F18241-10
21. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-1, GSJ F18241-21
22. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-1, GSJ F18241-19
23. *Stichomitra* sp. Loc. Hn3-1, GSJ F18241-14
24. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. Hn3-3, GSJ F18243-8



図版4 花園層の群集IV : *Amphipyndax tylotus*群集
Plate 4 *Amphipyndax tylotus* Assemblage of the Hanazono Formation

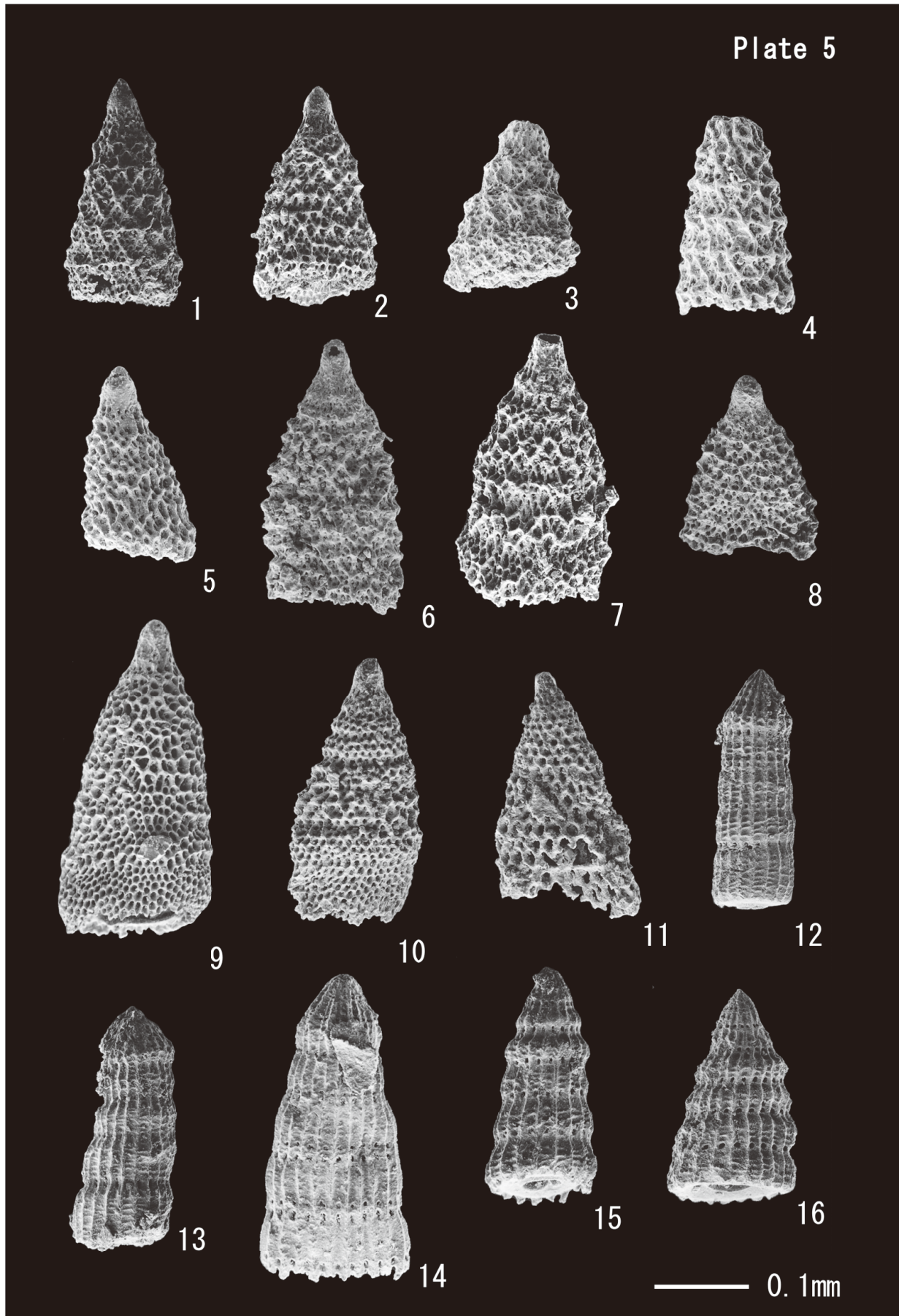
1. *Archaeospongoprimum* sp. Loc. Hn4-1, GSJ F18258-98
2. *Archaeospongoprimum* sp. Loc. Hn3-4, GSJ F18244-16
3. *Diacanthocapsa* sp. Loc. Hn3-10, GSJ F18250-2
4. *Diacanthocapsa* sp. Loc. Hn3-10, GSJ F18250-7
5. *Amphipyndax ellipticus* Nakaseko and Nishimura Loc. Hn4-1, GSJ F18258-87
6. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. Hn4-1, GSJ F18258-8
7. *Amphipyndax pseudoconulus* (Pessagno) Loc. Hn3-10, GSJ F18250-1
8. *Amphipyndax tylotus* Foreman Loc. Hn3-4, GSJ F18244-5
9. *Amphipyndax* cf. *tylotus* Foreman Loc. Hn4-1, GSJ F18258-34
10. *Amphipyndax* sp. Loc. Hn4-9, GSJ F18266-8
11. *Archaeodictyomitra sliteri* Pessagno Loc. Hn3-10, GSJ F18250-21
12. *Dictyomitra densicostata* Pessagno Loc. Hn3-10, GSJ F18250-31
13. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn3-10, GSJ F18250-36
14. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn3-10, GSJ F18250-34
15. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. Hn3-10, GSJ F18250-40
16. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-4, GSJ F18244-8
17. *Dictyomitra koslovae* Foreman Loc. Hn4-1, GSJ F18258-17
18. *Dictyomitra koslovae* Foreman Loc. Hn3-10, GSJ F18250-35
19. *Dictyomitra koslovae* Foreman Loc. Hn4-9, GSJ F18266-14
20. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn3-10, GSJ F18250-30
21. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn3-4, GSJ F18244-3
22. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn4-1, GSJ F18258-75
23. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. Hn4-1, GSJ F18258-11
24. *Dictyomitra multicostata* Zittel Loc. Hn3-10, GSJ F18250-26
25. *Dictyomitra multicostata* Zittel Loc. Hn3-10, GSJ F18250-33
26. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-4, GSJ F18244-13
27. *Dictyomitra* sp. Loc. Hn3-10, GSJ F18250-19
28. *Stichomitra* sp. Loc. Hn4-1, GSJ F18258-57
29. *Stichomitra* sp. Loc. Hn3-10, GSJ F18250-27



図版5 花園層(栗本, 1982)の放射虫化石の再検討—群集IV : *Amphipyndax tylotus*群集—
Loc. A及びLoc. Bは栗本(1982)の化石産出地点Loc. 12及びLoc. 15に相当する。

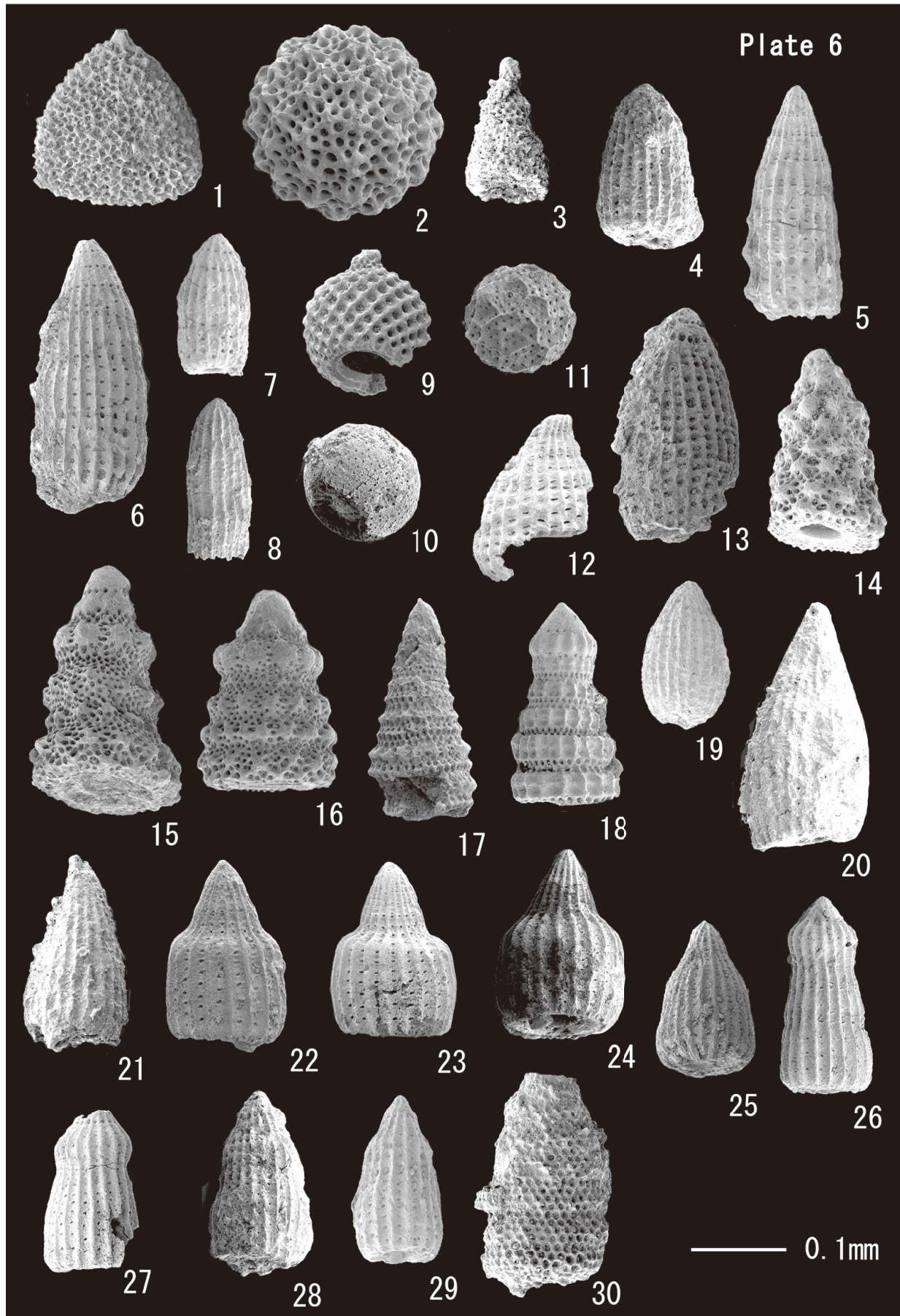
Plate 5 Re-examination of radiolarians of the Hanazono Formation (Kurimoto, 1982)—*Amphipyndax tylotus* Assemblage—
Locs. A and B are corresponding to Loc. 12 and 15 of Kurimoto (1982), respectively.

1. *Amphipyndax pseudoconulus* (Pessagno) Loc. A (Hn2)
2. *Amphipyndax pseudoconulus* (Pessagno) Loc. B (Hn3)
3. *Amphipyndax pseudoconulus* (Pessagno) Loc. A (Hn2)
4. *Amphipyndax pseudoconulus* (Pessagno) Loc. A (Hn2)
5. *Amphipyndax tylotus* Foreman Loc. A (Hn2)
6. *Amphipyndax tylotus* Foreman Loc. B (Hn3)
7. *Amphipyndax tylotus* Foreman Loc. B (Hn3)
8. *Amphipyndax tylotus* Foreman Loc. B (Hn3)
9. *Amphipyndax* aff. *tylotus* Foreman Loc. B (Hn3)
10. *Amphipyndax* aff. *tylotus* Foreman Loc. B (Hn3)
11. *Amphipyndax* sp. Loc. B (Hn3)
12. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. A (Hn2)
13. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. A (Hn2)
14. *Dictyomitra* aff. *koslovae* Foreman Loc. A (Hn2)
15. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. A (Hn2)
16. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. A (Hn2)



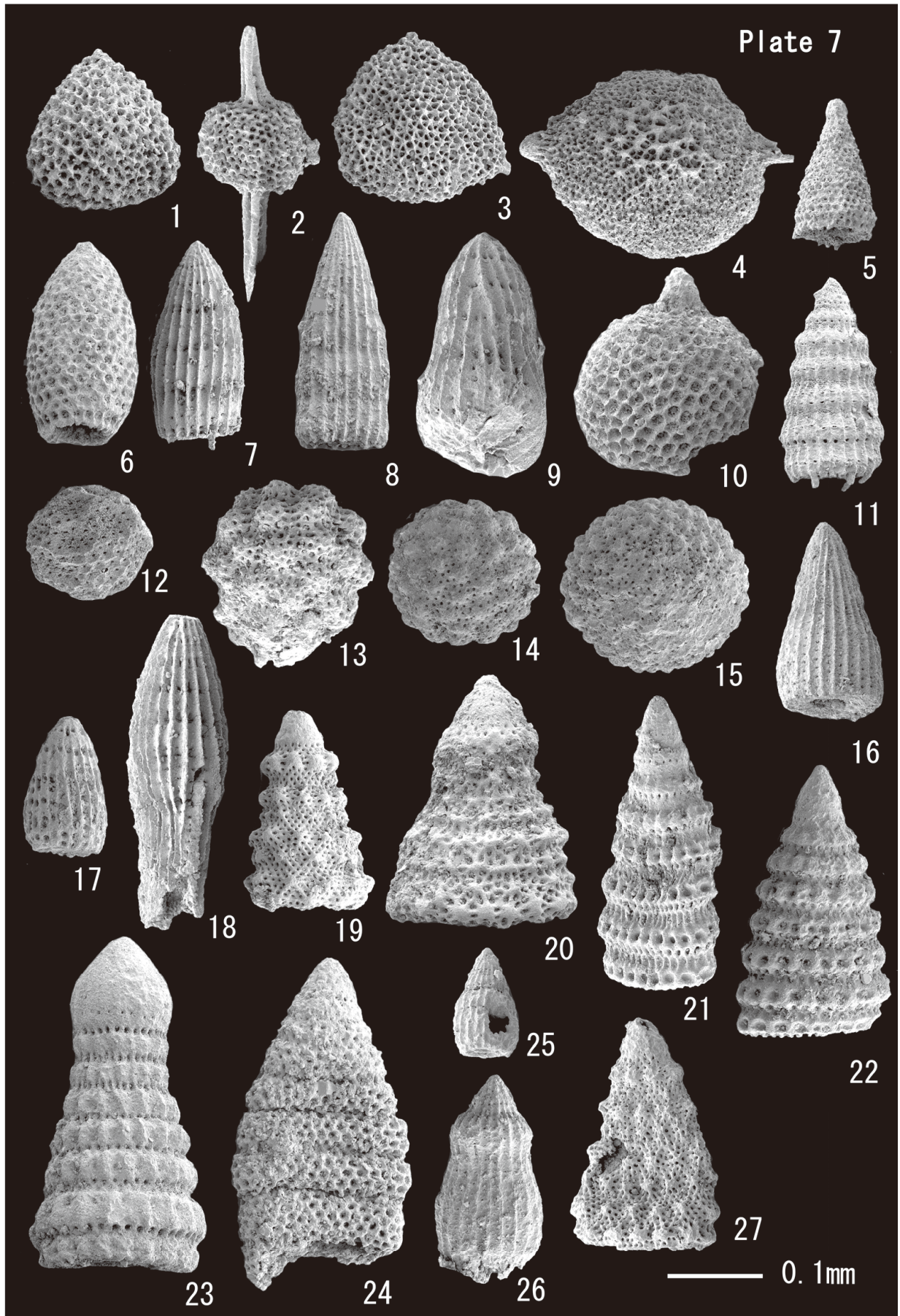
図版6 湯川層の群集 I : *Holocryptocanium barbui*群集
Plate 6 *Holocryptocanium barbui* Assemblage of the Yukawa Formation

1. *Alievium* sp. Loc. Yk3-2, GSJ F18273-24
2. *Praeconocaryomma* sp. Loc. Yk3-2, GSJ F18273-29
3. *Amphipyndax* cf. *stocki* (Campbell and Clark) Loc. Yk2-1, GSJ F18271-2
4. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Yk2-1, GSJ F18271-83
5. *Archaeodictyomitra simplex* Pessagno Loc. Yk1-3, GSJ F18254-18
6. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. Yk3-2, GSJ F18273-39
7. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Yk1-3, GSJ F18254-2
8. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. Yk1-2, GSJ F18253-9
9. *Cryptamphorella* cf. *conara* (Foreman) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-22
10. *Holocryptocanium barbui* Dumitrica Loc. Yk2-1, GSJ F18271-12
11. *Hemicryptocapsa polyhedra* Dumitrica Loc. Yk3-2, GSJ F18273-46
12. *Mita* sp. Loc. Yk3-2, GSJ F18273-10
13. *Mita* sp. Loc. Yk3-2, GSJ F18273-20
14. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. Yk3-2, GSJ F18273-40
15. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. Yk3-2, GSJ F18273-36
16. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. Yk3-2, GSJ F18273-34
17. *Parvicingula* sp. Loc. Yk3-2, GSJ F18273-28
18. *Pseudodictyomitra pseudomacrocephala* (Squinabol) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-23
19. *Thanarla conica* (Aliev) Loc. Yk1-3, GSJ F18254-13
20. *Thanarla brouweri* (Tan) Loc. Yk2-1, GSJ F18271-25
21. *Thanarla brouweri* (Tan) Loc. Yk2-1, GSJ F18271-34
22. *Thanarla elegantissima* (Cita) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-15
23. *Thanarla elegantissima* (Cita) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-27
24. *Thanarla elegantissima* (Cita) Loc. Yk2-1, GSJ F18271-64
25. *Thanarla* sp. Loc. Yk1-2, GSJ F18253-30
26. *Thanarla veneta* (Squinabol) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-41
27. *Thanarla veneta* (Squinabol) Loc. Yk3-2, GSJ F18273-19
28. *Thanarla praeveneta* Pessagno Loc. Yk2-1, GSJ F18271-70
29. *Thanarla praeveneta* Pessagno Loc. Yk1-3, GSJ F18254-5
30. *Stichomitra* cf. *communis* Squinabol Loc. Yk2-1, GSJ F18271-71



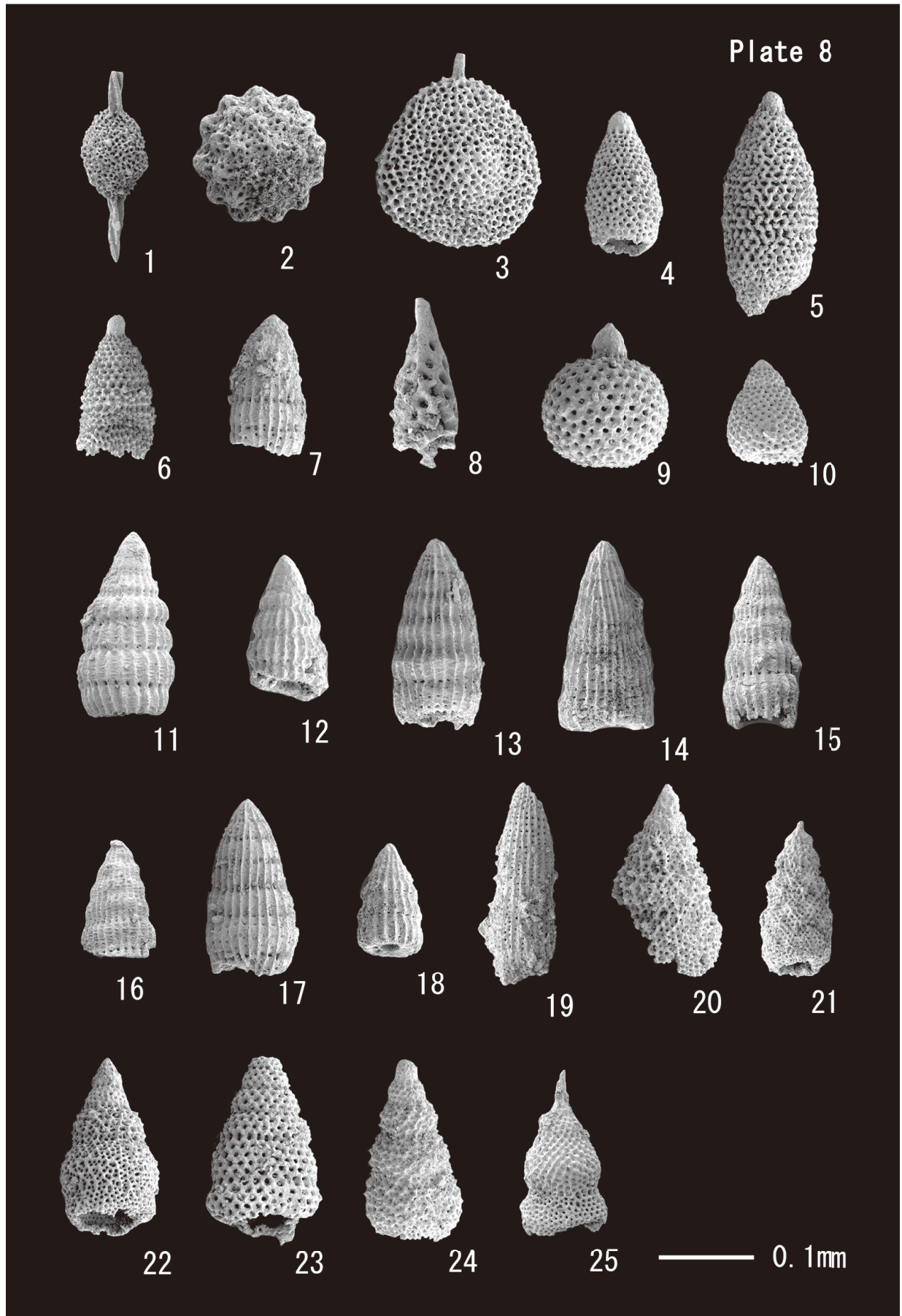
図版7 美山層の群集 I : *Holocryptocanium barbui*群集
Plate 7 *Holocryptocanium barbui* Assemblage of the Miyama Formation

1. *Alievium* sp. Loc. My1-8, GSJ F18281-41
2. *Archaeospongoprunum* sp. Loc. My1-3, GSJ F18276-5
3. *Pseudoaulophacus* sp. Loc. My1-10, GSJ F18283-20
4. *Pseudoaulophacus* sp. Loc. My1-12, GSJ F18285-36
5. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. My1-8, GSJ F18281-28
6. *Amphipyndax ellipticus* Nakaseko and Nishimura Loc. My1-8, GSJ F18281-25
7. *Archaeodictyomitra vulgaris* Pessagno Loc. My1-12, GSJ F18285-8
8. *Archaeodictyomitra simplex* Pessagno Loc. My1-12, GSJ F18285-17
9. *Thanarla* sp. Loc. My1-3, GSJ F18276-2
10. *Squinabollum* cf. *fossilis* (Squinabol) Loc. My1-8, GSJ F18281-27
11. *Dictyomitra* sp. Loc. My1-12, GSJ F18285-51
12. *Hemicryptocapsa polyhedra* Dumitrica Loc. My1-12, GSJ F18285-28
13. *Holocryptocanium astiensis* Pessagno Loc. My1-12, GSJ F18285-41
14. *Holocryptocanium geysersensis* Pessagno Loc. My1-8, GSJ F18281-14
15. *Holocryptocanium tuberculatum* Dumitrica Loc. My1-8, GSJ F18281-5
16. *Mita gracilis* (Squinabol) Loc. My1-8, GSJ F18281-18
17. *Mita* sp. Loc. My1-8, GSJ F18281-26
18. *Mita* sp. Loc. My1-12, GSJ F18285-38
19. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. My1-12, GSJ F18285-52
20. *Novixitus weyli* Schmidt-Effing Loc. My1-12, GSJ F18285-23
21. *Pseudodictyomitra leptoconica* (Foreman) Loc. My1-12, GSJ F18285-34
22. *Pseudodictyomitra nakasekoi* Taketani Loc. My1-12, GSJ F18285-11
23. *Pseudodictyomitra pseudomacrocephala* (Squinabol) Loc. My1-8, GSJ F18281-19
24. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. My1-12, GSJ F18285-33
25. *Thanarla brouweri* (Tan) Loc. My1-10, GSJ F18283-4
26. *Thanarla veneta* (Squinabol) Loc. My1-12, GSJ F18285-50
27. *Xitus* sp. Loc. My1-12, GSJ F18285-22



図版8 美山層の群集Ⅱ：*Dictyomitra formosa*群集
Plate 8 *Dictyomitra formosa* Assemblage of the Miyama Formation

1. *Archaeospongoprunum* sp. Loc. My1-4, GSJ F18277-26
2. *Praeconocaryomma* sp. Loc. My1-6, GSJ F18279-1
3. *Pseudoaulophacus* sp. Loc. My1-6, GSJ F18279-5
4. *Amphipyndax ellipticus* Nakaseko and Nishimura Loc. My1-6, GSJ F18279-17
5. *Amphipyndax ellipticus* Nakaseko and Nishimura Loc. My1-6, GSJ F18279-30
6. *Amphipyndax stocki* (Campbell and Clark) Loc. My1-4, GSJ F18277-11
7. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. My1-4, GSJ F18277-17
8. *Cornutella* sp. Loc. My1-4, GSJ F18277-2
9. *Squinabollum fossilis* (Squinabol) Loc. My1-6, GSJ F18279-20
10. *Diacanthocapsa* sp. Loc. My1-4, GSJ F18277-8
11. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-4, GSJ F18277-21
12. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-6, GSJ F18279-4
13. *Dictyomitra multicosata* Zittel Loc. My1-4, GSJ F18277-30
14. *Dictyomitra multicosata* Zittel Loc. My1-4, GSJ F18277-10
15. *Dictyomitra napaensis* Pessagno Loc. My1-6, GSJ F18279-25
16. *Dictyomitra napaensis* Pessagno Loc. My1-4, GSJ F18277-1
17. *Dictyomitra multicosata* Zittel Loc. My1-4, GSJ F18277-28
18. *Dictyomitra* sp. Loc. My1-6, GSJ F18279-36
19. *Mita* sp. Loc. My1-6, GSJ F18279-22
20. *Stichomitra asymbatos* Foreman Loc. My1-6, GSJ F18279-32
21. *Stichomitra asymbatos* Foreman Loc. My1-6, GSJ F18279-13
22. *Stichomitra asymbatos* Foreman Loc. My1-6, GSJ F18279-16
23. *Stichomitr acommunis* Squinabol Loc. My1-6, GSJ F18279-38
24. *Stichomitra* sp. Loc. My1-6, GSJ F18279-14
25. *Stichomitra* sp. Loc. My1-4, GSJ F18277-22



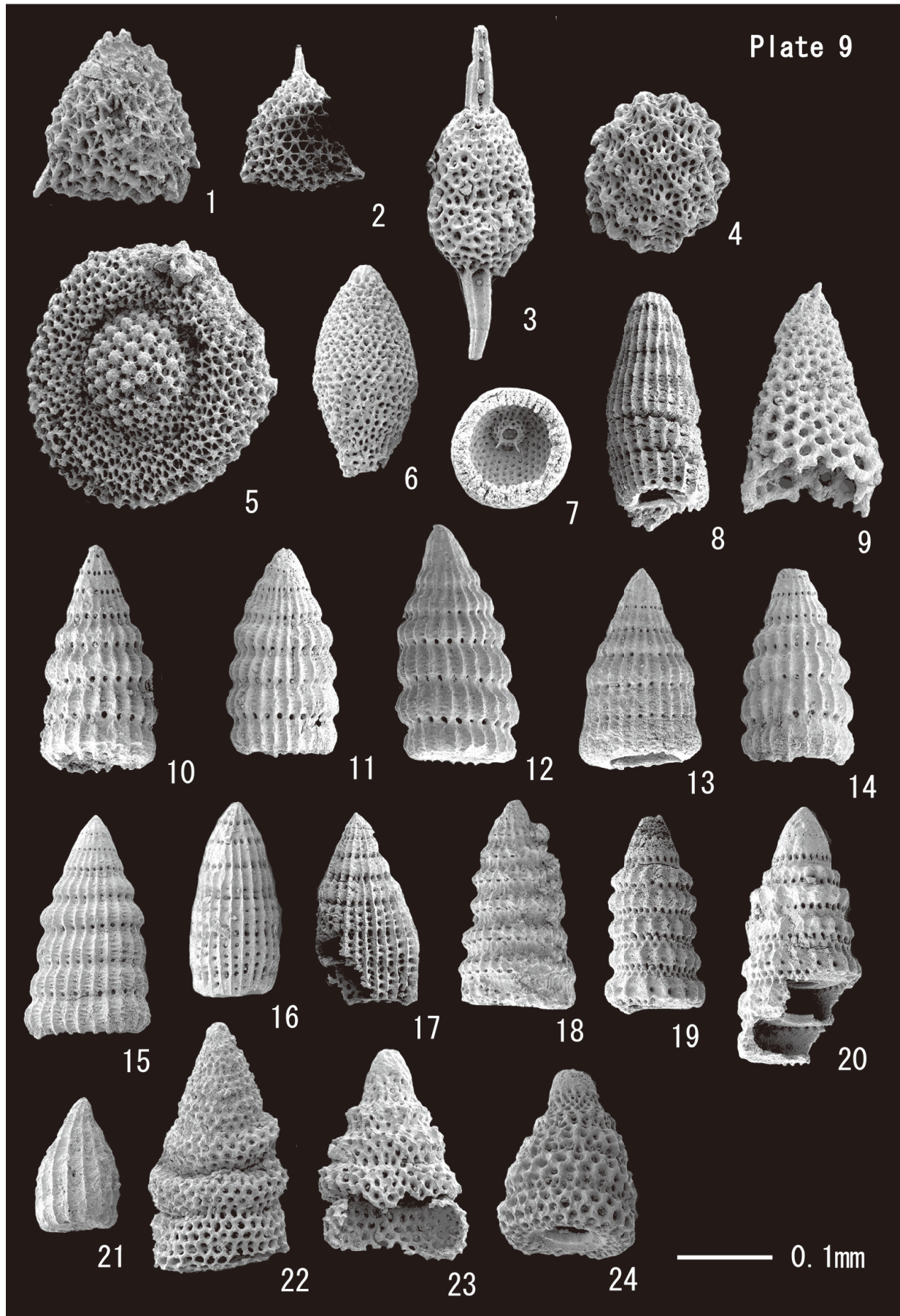
図版9 美山層の混在群集

群集 I : *Holocryptocanium barbui*群集と群集 II : *Dictyomitra formosa*群集の混在群集

Plate 9 Mixed Radiolarian Assemblage of the Miyama Formation

Mixed assemblage of *Holocryptocanium barbui* and *Dictyomitra formosa* assemblages

1. *Alievium* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-8
2. *Alievium* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-45
3. *Archaeospongoprunum* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-42
4. *Praeconocaryomma* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-33
5. *Orbiculiforma* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-44
6. *Amphipyndax ellipticus* Nakaseko and Nishimura Loc. My1-5, GSJ F18278-7
7. *Holocryptocanium* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-25
8. *Archaeodictyomitra* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-30
9. *Cornutella* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-12
10. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-26
11. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-18
12. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-20
13. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-14
14. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-15
15. *Dictyomitra formosa* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-3
16. *Dictyomitra* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-19
17. *Mita* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-39
18. *Pseudodictyomitra leptconica* (Foreman) Loc. My1-5, GSJ F18278-11
19. *Pseudodictyomitra nakasekoi* Taketani Loc. My1-5, GSJ F18278-36
20. *Pseudodictyomitra nakasekoi* Taketani Loc. My1-5, GSJ F18278-28
21. *Thanarla brouweri* (Tan) Loc. My1-5, GSJ F18278-1
22. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-2
23. *Stichomitra communis* Squinabol Loc. My1-5, GSJ F18278-22
24. *Stichomitra* sp. Loc. My1-5, GSJ F18278-24



Elemental distribution of surface sediments around Oki Trough including adjacent terrestrial area: Strong impact of Japan Sea Proper Water on silty and clayey sediments

Atsuyuki Ohta^{1*}, Noboru Imai¹, Shigeru Terashima¹, Yoshiko Tachibana¹,
Ken Ikehara¹ and Hajime Katayama¹

Atsuyuki Ohta, Noboru Imai, Shigeru Terashima, Yoshiko Tachibana, Ken Ikehara and Hajime Katayama (2015) Elemental distribution of surface sediments around Oki Trough including adjacent terrestrial area: Strong impact of Japan Sea Proper Water on silty and clayey sediments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 66 (3/4), p. 81-101, 6 figures, 3 tables.

Abstract: Four-hundred sixty marine sediment samples were collected in the western Sea of Japan and analyzed for 53 elements for a marine geochemical mapping project associated with a nationwide terrestrial geochemical map. Grain size and chemical compositions of marine sediments vary significantly with location of origin (shelf, marginal terrace, slope, or basin). Sandy sediments distributed on the shelf do not likely reflect the geochemical features of river sediments, which are the dominant source of sands in the shelf. Most of the shelf sediments sampled are composed of relict sediments (little contribution of stream sediments) formed between the regression age and the transgression age because they contain a large amount of quartz coated by iron hydroxide and highly enriched in As. The marginal terrace is covered by modern silty sediments that are selectively deposited at the water mass boundary between Tsushima Current (surface water) and Japan Sea Proper Water (deep water). Silty sediments in the western portion of marginal terrace are highly enriched in Nb, rare earth elements, Ta, and Th, which are supplied from Quaternary alkaline volcanic rocks by a denudation process. They are carried eastward by as much as 200 km by oceanic currents. In contrast, the eastern marginal terrace is covered by silty sediments that are highly abundant in Cu, Zn, and Hg, which is attributed to biogenic remains in sediments (organic complex formation). Clayey sediments are widely distributed in the Oki Trough and basin where a hemipelagic environment and highly oxic conditions are found because of the influence of Japan Sea Proper Water. A thin Mn oxide layer in the uppermost 0–4 cm and extreme enrichment of V, Co, Ni, Mo, Sb, and Pb would be caused by an early diagenetic process. Thus, the spatial distribution patterns of elements in marine sediments in the study area are strongly controlled by their depositional environments.

Keywords: geochemical mapping, marine sediment, stream sediment, Oki Trough, relict sediment, early diagenetic process, Japan Sea Proper Water

1. Introduction

A geochemical map that shows the spatial distribution of elements on the Earth's surface provides fundamental geo-information about an element's cycle in the upper crust, environmental assessment, and mineralogical exploration (Webb *et al.*, 1978; Howarth and Thornton, 1983; Weaver *et al.*, 1983). Recently, global-scale geochemical mapping has been an area of active study (Darnley *et al.*, 1995; Salminen *et al.*, 2005; De Vos *et al.*, 2006). In contrast, the Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and

Technology (AIST) has uniquely prepared geochemical maps of 53 elements both in terrestrial and coastal sea areas in Japan mainly for environmental assessment (Imai *et al.*, 2010) because Japan is surrounded by vast seas. Furthermore, we have proposed that a comprehensive geochemical map can be used as powerful tool to provide us information about elemental transportation and diffusive process from terrestrial areas to coastal seas or in marine environments (Ohta *et al.*, 2007; Ohta *et al.*, 2010; Ohta and Imai, 2011).

Rivers flowing to the western Sea of Japan are small, so elemental transfer from land to sea is very restricted in area.

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

*Corresponding author: Atsuyuki Ohta, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: a.ohta@aist.go.jp

In general, modern sedimentation process on the Sea of Japan side are dominated by silt and clay deposition on the marginal terrace, slope, and basins, and the shallow seafloor is covered in sandy sediments that are relict sediments from the last glacial stage and the subsequent transgression (Ikehara, 1991). Yin *et al.* (1987) pointed out that illite in the southern Sea of Japan is transported by the Tsushima Current from the East China Sea. However, Ohta *et al.* (2013) suggested that muddy sediments on the shelf of the eastern Tsushima Strait have homogenous chemical compositions and little contribution of Korean and Chinese terrigenous materials. Thus, it is still unclear what process controls the spatial distribution of elements in marine sediments in the Sea of Japan.

In this study, we selected the area around Oki Trough bordered on the east by the eastern Tsushima Strait. The submarine geology in the area has been examined using seismic reflection profiles as described the follow by Ikehara *et al.* (1990b), Yamamoto (1991), and Yamamoto (1993). The sediments were deposited in the marginal terrace during the late Pliocene to Holocene, and their thickness increases northwestward. In contrast, the shelf was an erosional surface during the Pliocene age. The southwestern region of the Oki Trough is covered by mass-transport deposits derived from the surrounding marginal terrace, but hemi-pelagic deposition is dominant in the northeastern part of the trough. The study area is thus characterized by a shelf having little contribution of adjacent terrestrial materials, a wide marginal terrace with thick sedimentary layers, and a hemi-pelagic basin associated partly with turbidites. The purpose of this study is to examine the controlling factors of spatial distribution patterns of marine sediments across various depositional environments using a comprehensive geochemical map.

2. Samples and methods

2.1 Marine environment study areas, sampling methods, and processing

Figures 1a and b present geographical names of the area and our sampling locations, respectively. The sea shelf, which is shallower than 200 m, is wide on the western end. Oki Strait is located on the west side of the study area. Small basins found on the southeast and southwest sides of Oki Islands are covered by silty sediment. Oki Spur is the topographic rise that continues from the Oki Strait. The Tsushima Warm Current flows from west to east with a complicated flow pattern (Naganuma, 1977). A branch of the current flows through the Oki Strait and along the coast, and the other branch flows on the northern side of Oki Spur. The Oki Ridge is the topographic rise 300–500 m below the surface of the sea and forms the boundary between the Yamato Basin and the Oki Trough. The marginal terrace is

a wide terrace with a water depth of 200–500 m (Iwabuchi 1968; Iwabuchi and Kato, 1988). The Oki Trough is a deep sea basin with a depth of 900–1750 m below the surface of the sea and which declines gently toward northeast. Wakasa Bay has a deeply indented coastline, along which the coastal current flows from west to east. Wakasa Basin is a small basin located next to Oki Trough. Wakasa Sea Knoll Chain and Gentatsu-Se are small seafloor topographic rises.

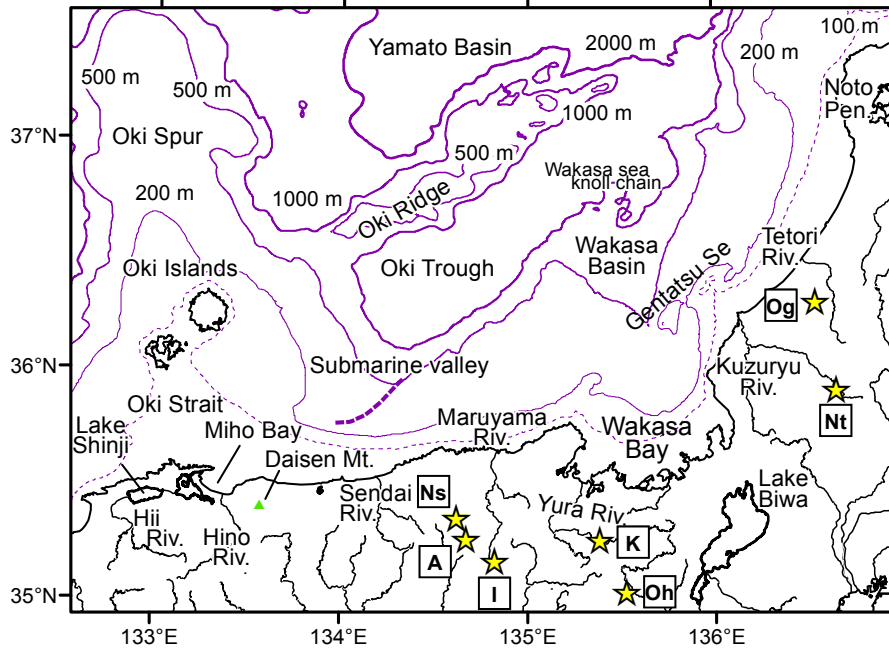
The 460 marine sediment samples used in this study were collected using a grab sampler during Cruises GH86-2 GH87-2 and GH88-2 in 1986, 1987, and 1988 respectively (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama *et al.*, 1993, 2000; Katayama and Ikehara, 2001; Ikehara, 2010). The sampling locations and particle sizes are presented in Fig. 1b. The median diameters of sediments, shown in Φ -scale (negative natural logarithm of grain diameter), were used for classifying the sediments. The sediments were classified into six groups according to texture: granule ($-2 < \Phi \leq -1$), very coarse-coarse sand ($-1 < \Phi \leq 1$), medium sand ($1 < \Phi \leq 2$), fine-very fine sand ($2 < \Phi \leq 4$), silt ($4 < \Phi \leq 8$), and clay ($8 < \Phi$). The uppermost 0–3 cm of the archived sediments collected with the grab sampler were separated, dried in air, ground with an agate mortar and pestle, and retained for analyses.

2.2 Terrestrial study areas, sampling methods, and processing

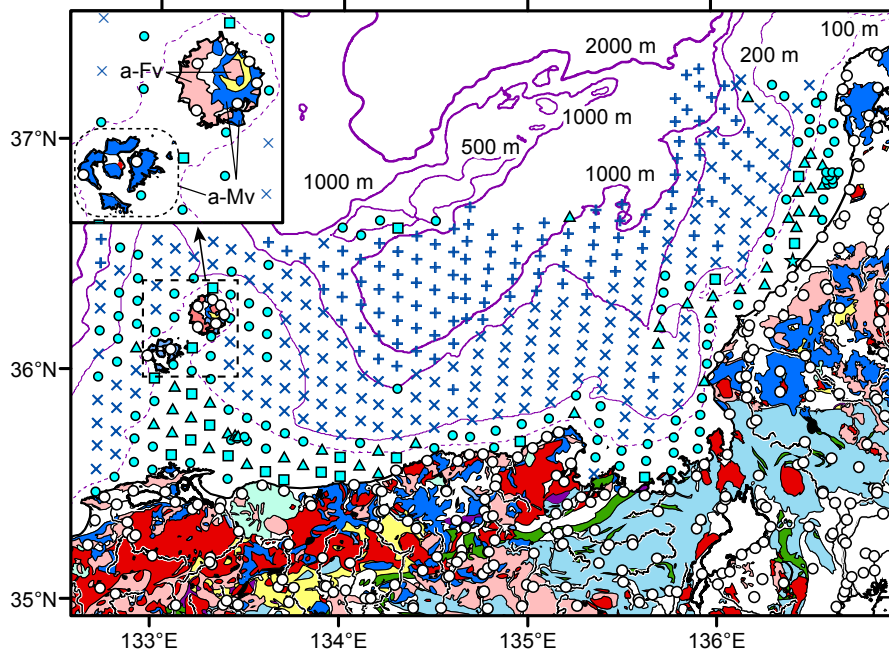
The terrestrial area has gentle relief and a limited flood plain to the west of Wakasa Bay but precipitous mountains in the northeast part of the study area. The rivers located in the western part of the study area have small mean flow rates of 1.0–1.5 km³/year. Hii, Kuzuryu, Sendai, Tetori, and Yura Rivers are major rivers in the terrestrial area (Fig. 1a). Kuzuryu and Tetori Rivers have the largest mean flow rates of 2.3–2.7 km³/year and carry the largest amount of sediments to the sea (4.7–6.8 × 10⁵ m³/year) in the study area (Akimoto *et al.*, 2009). The Yura River also supplies a large amount of silty sediments of 4.4 × 10⁵ m³/year to Wakasa Bay.

Geochemical analyses from 246 stream sediment samples were used for comparison to the marine surface sediment geochemical data. These samples were collected from adjacent terrestrial areas during the period 1999–2002 for Japanese regional geochemical mapping, with a mean sampling density of one sample per 100 km². Eight samples were additionally collected from the Oki Islands in 2013. The stream sediments were dried in air and sieved using an 83 mesh (180 μm) screen. Unlike the marine samples, the stream sediment samples were not milled.

Figure 1b also presents a geologic map of the study area, simplified from the Geological Map of Japan 1:1,000,000 (Geological Survey of Japan, 1992). Granitic rocks intruded



(Fig. 1a)



(Fig. 1b)

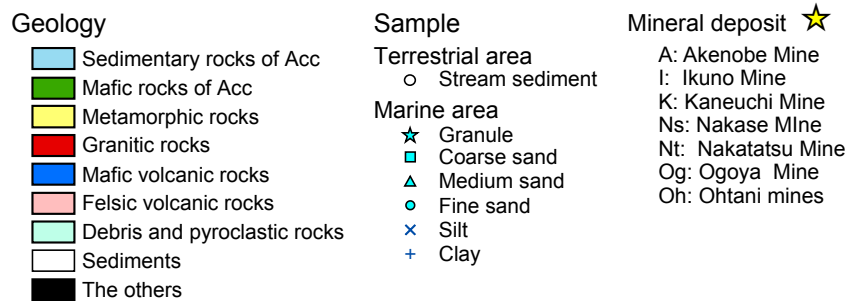


Fig. 1 Schematic maps of the study area. a) Geographical name map; solid lines in terrestrial areas show major rivers. b) Sampling locations of stream sediments and coastal sea sediments with surface geology. The abbreviations Acc, a-Fv, and a-Mv mean accretionary complexes, alkaline felsic volcanic rock, and alkaline mafic volcanic rock, respectively. Depth contours were delineated using a dataset provided by the Japan Oceanographic Data Center.

during the Cretaceous-Paleogene are distributed in the western part and around Lake Biwa. High-pressure-type metamorphic rocks around Sendai river and in the southern direction of Daisen Mountain dominantly consist of pelitic-, psammitic-, siliceous-, and basic schist. Alkaline volcanic rocks of Miocene age are dominantly distributed in the Oki Islands. Non-alkaline volcanic rocks consisting mainly of Miocene andesitic-dacitic rocks are distributed widely on the Sea of Japan side. They have a greenish color caused by conspicuous alteration and are known as Green-tuff. Daisen volcano consists of andesitic-dacitic lava and tuff formed by Quaternary volcanic activity. The central part of the study area has an old tectonic belt consisting of accretionary complexes of mélangé, mudstone, sandstone, and exotic blocks (chert, limestone, greenstones, gabbro and ultramafic rocks), that range in age mainly through the Jurassic-Cretaceous. Permian-Triassic sedimentary rocks associated with limestone and mafic-ultramafic rock (Yakuno ophiolite) are distributed near Wakasa Bay. Sedimentary rocks distributed along the coast were deposited mainly during the Tertiary-Quaternary.

Figure 1a shows seven major mines in the study area. Ogoya (Cu-Zn-type), Nakatatsu (Zn- and Pb-type), and Kaneuchi (Sn- and W-type) mines are located in the catchment area of rivers flowing to the Sea of Japan. The Ohtani mine yields W and Sn ores. Nakase mine yields Au, Ag, and Sb. Akenobe and Ikuno mines are polymetallic-vein-type deposits.

2.3 Geochemical analysis

The analytical method including quality control has been described in Ohta *et al.* (2013). First, 0.2 g of each sample was digested for 2 h using HF, HNO₃, and HClO₄ solutions at 120 °C. The degraded product was evaporated to dryness at 200 °C; then the residue was dissolved with 100 mL of 0.35 M HNO₃ solution. Concentrations of 51 elements were determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) for Na₂O, MgO, Al₂O₃, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Total (T-) Fe₂O₃, V, Sr, and Ba, and using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for Li, Be, Sc, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Zr, Nb, Y, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Bi, Th, and U. Analyses of As in all samples and Hg in stream sediment samples were subcontracted to ALS Chemex in Vancouver, B.C. Hg in marine sediments were determined using an MA-2000 (Nippon Instruments Corp.) that measures the quantity of Hg vapor generated by thermal decomposition using an atomic absorption spectrometer. A part of the heavy mineral fraction was not digested satisfactorily by HF, HNO₃, and HClO₄ solutions. Incomplete decomposition of these minerals affected the determination of some elemental abundance, especially of Zr and Hf included in zircon. In addition,

our marine sediments were not desalinated. Therefore, Zr and Hf in stream and marine sediments and Na in marine sediments should be used only as a guide. Tables 1 and 2 present summaries of the analytical results obtained for marine and stream sediments, respectively.

2.4 Spatial analyses

The spatial distribution patterns of elements in both the terrestrial and the marine environments of the study area were prepared using geographic information system (GIS) software (ArcGIS 10.2; Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)). The method is described in detail in Ohta *et al.* (2004). The inverse distance weight (IDW) method was used for interpolation of point data (Watson and Philip, 1985). Marine sediments and stream sediments differ in their chemical and mineralogical compositions, particle size, and origin. Therefore, a common class selection makes the regional geochemical differences (color variation) in either the terrestrial area or the marine area difficult to see (Ohta *et al.*, 2007). Consequently, a class selection of elemental concentration is separated for terrestrial and marine environments. In this study, a percentile is used for class selection of elemental concentration intervals in maps: $0 \leq x \leq 5$, $5 < x \leq 10$, $10 < x \leq 25$, $25 < x \leq 50$, $50 < x \leq 75$, $75 < x \leq 90$, $90 < x \leq 95$, and $95 < x \leq 100\%$, where x represents the elemental concentration (Reimann, 2005). Using this class selection, geochemical patterns displayed in different sample media can be directly compared, independent of the actual element concentration (Reimann, 2005; Ohta *et al.*, 2007).

The spatial distribution patterns of mud concentration and oxidative-reductive potential (ORP) in marine environment are also created. These data are taken from by Ikehara *et al.* (1990a), Katayama *et al.* (1993, 2000), Katayama and Ikehara (2001), and Ikehara (2010). The study area is widely covered by silt and clay and the median value of mud content is 77%. Thus, mud content classification was arbitrarily selected to be 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%. ORP was measured for a surface sediment sample collected using a K-grab sampler on board ship and was not observed in-situ at the bottom of sea. The data were collected only in the summer season (mainly June to July). So the classification of ORP was also arbitrarily selected to be -100 eV, -50 eV, 0 eV, 50 eV, 100 eV, 200 eV because ORP data are rather qualitative nature. The resulting spatial distribution of mud content, ORP, and typical examples of elemental concentrations are shown in Fig. 2.

Table 1 Summary for the geochemistry of marine sediments off eastern Tsushima Island, Japan ($N = 460$).

Element	unit	Min	25%	Median	Mean	75%	Max	MAD	S.D.
Na ₂ O	wt. %	1.08	2.38	2.83	3.33	3.86	9.70	0.58	1.49
MgO	wt. %	0.43	2.11	2.55	2.46	2.93	4.75	0.42	0.64
Al ₂ O ₃	wt. %	2.00	8.18	9.29	9.13	10.2	13.9	0.97	1.61
P ₂ O ₅	wt. %	0.032	0.107	0.131	0.137	0.155	0.713	0.024	0.063
K ₂ O	wt. %	0.51	1.79	1.95	1.94	2.10	3.55	0.16	0.30
CaO	wt. %	0.41	2.27	4.18	4.88	6.21	33.4	1.98	4.31
TiO ₂	wt. %	0.077	0.317	0.386	0.378	0.437	1.93	0.056	0.126
MnO	wt. %	0.016	0.043	0.053	0.137	0.084	2.31	0.014	0.281
T-Fe ₂ O ₃	wt. %	0.84	3.20	3.69	3.74	4.13	18.0	0.46	1.33
Li	mg/kg	5.64	32.9	44.8	46.4	56.4	96.3	11.7	18.4
Be	mg/kg	0.46	1.18	1.37	1.36	1.53	4.45	0.18	0.33
Sc	mg/kg	1.24	7.14	8.34	8.08	9.46	20.1	1.14	2.13
V	mg/kg	6.16	43.0	58.1	57.3	72.0	190	14.6	21.4
Cr	mg/kg	9.27	35.1	47.7	45.2	55.4	250	9.54	17.4
Co	mg/kg	1.36	6.80	8.41	8.65	9.80	27.8	1.47	3.22
Ni	mg/kg	3.11	13.8	23.4	23.7	32.8	129	9.50	12.4
Cu	mg/kg	2.47	9.20	21.9	28.5	40.6	144	14.0	24.2
Zn	mg/kg	14.70	62.2	83.3	80.0	99.0	154	17.7	25.6
Ga	mg/kg	3.58	12.2	13.6	13.3	14.8	22.8	1.23	2.15
As	mg/kg	0.2	4.2	6.6	8.0	10	58	2.7	7.0
Rb	mg/kg	17.3	62.0	70.9	69.7	77.9	156	8.21	14.6
Sr	mg/kg	72	162	236	282	311	2152	75	240
Y	mg/kg	3.16	9.20	10.9	10.8	12.4	24.4	1.62	2.83
Zr	mg/kg	11	41	50	50	57	127	7	17
Nb	mg/kg	1.77	5.72	7.13	7.45	8.36	20.4	1.35	2.88
Mo	mg/kg	0.23	0.60	0.82	1.67	1.20	32.6	0.25	3.21
Cd	mg/kg	0.019	0.046	0.061	0.070	0.082	0.30	0.017	0.038
Sn	mg/kg	0.36	1.45	2.00	1.90	2.35	4.02	0.41	0.61
Sb	mg/kg	0.20	0.49	0.63	0.76	0.94	3.28	0.20	0.44
Cs	mg/kg	0.26	2.72	3.91	3.88	5.21	9.75	1.28	1.56
Ba	mg/kg	60.0	296	337	347	377	2226	40.9	125
La	mg/kg	4.92	14.1	16.3	16.8	18.9	63.1	2.36	5.29
Ce	mg/kg	12.1	28.1	33.3	34.3	39.2	146	5.68	12.0
Pr	mg/kg	1.01	3.28	3.78	3.83	4.34	14.0	0.52	1.20
Nd	mg/kg	3.94	12.6	14.6	14.8	16.8	54.5	2.06	4.59
Sm	mg/kg	0.78	2.46	2.86	2.85	3.25	10.3	0.40	0.84
Eu	mg/kg	0.26	0.56	0.65	0.66	0.72	2.22	0.081	0.16
Gd	mg/kg	0.67	2.17	2.53	2.50	2.85	8.36	0.34	0.70
Tb	mg/kg	0.11	0.35	0.41	0.40	0.46	1.20	0.053	0.11
Dy	mg/kg	0.55	1.73	2.00	1.96	2.24	5.13	0.26	0.49
Ho	mg/kg	0.098	0.32	0.38	0.37	0.42	0.88	0.048	0.090
Er	mg/kg	0.30	0.94	1.09	1.06	1.21	2.43	0.13	0.25
Tm	mg/kg	0.049	0.15	0.17	0.17	0.19	0.36	0.022	0.04
Yb	mg/kg	0.31	0.92	1.06	1.04	1.19	2.09	0.13	0.23
Lu	mg/kg	0.045	0.14	0.16	0.15	0.17	0.29	0.018	0.03
Hf	mg/kg	0.31	1.1	1.3	1.3	1.5	3.1	0.18	0.39
Ta	mg/kg	0.036	0.51	0.65	0.65	0.77	1.46	0.13	0.22
Hg	µg/kg	0.5	35	62	70	100	400	32	48
Tl	mg/kg	0.036	0.44	0.49	0.48	0.53	0.83	0.046	0.091
Pb	mg/kg	9.86	20.9	25.1	27.3	31.7	86.4	4.88	9.93
Bi	mg/kg	0.071	0.23	0.40	0.42	0.59	1.08	0.18	0.23
Th	mg/kg	1.58	4.97	6.12	6.07	7.10	29.9	1.04	1.94
U	mg/kg	0.43	1.12	1.38	1.40	1.65	3.66	0.26	0.41

Minimum (Min), maximum (Max), median absolute deviation (MAD) and standard deviation (S.D.)

As: 11 samples below D.L. (0.2 mg/kg); Hg: 6 samples below D.L. (0.5 µg/kg)

Table 2 Summary for the geochemistry of stream sediments ($N = 254$).

Element	unit	Min.	25%	Median	Mean	75%	Max.	MAD	S.D.
Na ₂ O	wt. %	0.71	1.59	2.02	2.07	2.56	4.07	0.44	0.68
MgO	wt. %	0.37	1.56	2.08	2.39	2.94	10.87	0.65	1.27
Al ₂ O ₃	wt. %	4.39	8.28	10.27	10.44	12.15	19.17	1.94	2.67
P ₂ O ₅	wt. %	0.033	0.096	0.12	0.13	0.15	0.47	0.028	0.062
K ₂ O	wt. %	0.80	1.81	2.15	2.10	2.38	3.76	0.28	0.47
CaO	wt. %	0.14	0.93	1.56	1.80	2.48	5.17	0.78	1.12
TiO ₂	wt. %	0.16	0.56	0.68	0.80	0.84	3.13	0.13	0.45
MnO	wt. %	0.029	0.093	0.12	0.13	0.15	1.10	0.031	0.082
T-Fe ₂ O ₃	wt. %	1.34	4.32	5.29	5.73	6.65	18.1	1.18	2.17
Li	mg/kg	9.9	25.2	33.0	34.7	41.3	89.1	8.1	12.5
Be	mg/kg	0.53	1.41	1.69	1.76	2.02	4.05	0.29	0.53
Sc	mg/kg	2.77	7.80	10.3	11.5	14.4	36.0	3.06	5.02
V	mg/kg	20.2	78.3	100	114	136	378	29.2	54.4
Cr	mg/kg	14.1	41.5	60.7	94.4	97.2	1941	23.5	140
Co	mg/kg	2.53	10.5	13.4	15.1	18.0	59.7	3.66	7.64
Ni	mg/kg	4.99	16.1	25.4	38.2	38.9	699	10.8	59.6
Cu	mg/kg	5.66	21.0	29.9	52.1	44.1	2599	10.5	167
Zn	mg/kg	17.1	99.7	126	214	157	11444	28.2	743
Ga	mg/kg	11.7	16.0	17.2	17.4	18.7	26.2	1.36	2.30
As	mg/kg	1.0	6.0	10	25	19	1578	5.0	107
Rb	mg/kg	17.6	68.8	93.4	93.6	116	186	23.1	35.4
Sr	mg/kg	25.1	86.5	131	144	180	597	47.1	84.1
Y	mg/kg	5.40	12.8	15.9	17.3	21.3	47.0	4.01	6.90
Zr	mg/kg	19.1	45.4	57.1	64.0	67.6	367	11.0	41.5
Nb	mg/kg	4.10	6.94	8.14	9.93	9.94	77.2	1.45	8.28
Mo	mg/kg	0.35	0.82	1.11	1.39	1.58	9.71	0.36	1.09
Cd	mg/kg	0.045	0.13	0.19	0.42	0.29	28.7	0.073	1.88
Sn	mg/kg	0.94	2.31	3.01	5.27	3.98	170	0.80	12.9
Sb	mg/kg	0.17	0.54	0.85	1.44	1.22	63.7	0.32	4.28
Cs	mg/kg	1.41	3.23	4.57	5.10	6.03	16.0	1.44	2.71
Ba	mg/kg	210	369	439	447	506	1649	69	129
La	mg/kg	11.1	17.5	20.4	23.7	24.8	119	3.7	12.6
Ce	mg/kg	19.6	32.3	37.1	44.0	46.6	232	6.5	24.6
Pr	mg/kg	2.59	4.00	4.67	5.35	5.66	25.9	0.79	2.70
Nd	mg/kg	10.1	15.6	18.2	20.7	22.3	92.7	2.91	9.68
Sm	mg/kg	1.79	3.12	3.56	3.99	4.34	16.1	0.58	1.71
Eu	mg/kg	0.37	0.66	0.79	0.80	0.92	2.48	0.13	0.22
Gd	mg/kg	1.44	2.72	3.19	3.48	3.89	11.4	0.57	1.33
Tb	mg/kg	0.23	0.44	0.54	0.57	0.65	1.36	0.10	0.20
Dy	mg/kg	1.07	2.22	2.72	2.90	3.35	7.10	0.58	1.10
Ho	mg/kg	0.19	0.41	0.52	0.55	0.65	1.38	0.12	0.21
Er	mg/kg	0.56	1.21	1.49	1.62	1.97	4.28	0.35	0.62
Tm	mg/kg	0.09	0.19	0.24	0.26	0.31	0.70	0.05	0.10
Yb	mg/kg	0.55	1.21	1.50	1.62	1.92	4.58	0.34	0.64
Lu	mg/kg	0.08	0.17	0.22	0.24	0.28	0.69	0.05	0.09
Hf	mg/kg	0.59	1.35	1.63	1.76	1.86	8.16	0.26	0.88
Ta	mg/kg	0.28	0.51	0.63	0.78	0.83	5.23	0.15	0.58
Hg	μg/kg	10	30	42	91	80	2660	25	240
Tl	mg/kg	0.12	0.49	0.61	0.64	0.73	2.52	0.12	0.27
Pb	mg/kg	10.1	21.2	25.9	63.9	34.2	4177	5.9	291
Bi	mg/kg	0.050	0.19	0.28	0.41	0.39	6.00	0.10	0.59
Th	mg/kg	2.11	5.40	7.12	9.25	9.74	53.6	2.09	7.34
U	mg/kg	0.63	1.33	1.69	1.89	2.12	8.90	0.40	1.00

Minimum (Min), maximum (Max), median absolute deviation (MAD) and standard deviation (S.D.)

As: 6 samples below D.L.(1.0 mg/kg); Hg: 13 samples below D.L.(10 μg/kg).

3. Results

3.1 Characteristics of marine surface sediments

Characteristics of grain size, mud content, and ORP in marine sediments are shown in Figs. 1b and 2a, respectively. Grain size and mud content in marine sediments decreases gradually in a seaward direction. ORP is positive on the shelf and around Oki Trough and negative on the marginal terrace and slope. Negative values at the mouths of the Maruyama, Yura, and Kuzuryu rivers indicate input of organic matter on land (Katayama *et al.*, 1993; 2000; Kondo, 2006). The continental shelf is covered predominantly by sandy sediments. Quartz particles covered by iron hydroxides are found in the eastern part of Oki Strait and the shelf off Noto Peninsula (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama and Ikehara, 2001). Quartz in modern sediments supplied from a river is not covered by iron hydroxides. Therefore, they are relict sediments deposited from regression age to transgression age. Sandy sediments (partly including sandy silt) having positive ORP and low mud content (< 60%) are also found in submarine valleys off Sendai River, around Gentatsu-Se, and at the Oki Ridge. The sandy sediments in the submarine valley and around Gentatsu-Se contain not newer volcanic glass and pumice (< 10 ky) but older ones (> 10 ky) (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama *et al.*, 2000). The sediments would be denudated from old sediments. Positive ORP data indicates that these places have quite low deposition rates or are in erosional regimes.

Silty sediments are widely distributed on the marginal terrace (WD = 200–400 m) and slope (WD = 400–900 m), and have more than 80% mud content. The small basins located at both sides of the Oki Strait (WD = 120–200 m) are covered by silty sediments having > 60% mud content. The Oki Trough is characterized by oxidative condition because the Japan Sea Proper Water (JSPW) flows from the Yamato Basin (Senjyu *et al.*, 2005). JSPW is the most homogenous water mass in the Sea of Japan at depths deeper than 300 m, and is characterized by low temperature (0–1 °C) and high oxygen concentrations (210–260 $\mu\text{mol/kg}$) (Gamo *et al.*, 1986; Sudo, 1986). JSPW accelerates the dissolution of calcareous material. The abundance of calcareous nano-planktonic materials steeply decreases below water depths of 900 m and these materials are nearly absent below a water depth of 1250 m (Ikehara *et al.*, 1990a).

3.2 Marine spatial distribution patterns of elemental concentrations

Sandy and silty sediments around the Oki Spur and Oki Islands are enriched in CaO, P₂O₅, TiO₂, Cr, Sr, Nb, Cd, Ta, Y, lanthanides (Ln), and Th. Stream sediments in the Oki inlands are also enriched in P₂O₅, TiO₂, Nb, Mo, Cd, Y, Ln, Ta, Th and

U but poor in Li, MgO, CaO, Cs, Tl. High CaO and Sr concentrations on topographic heights are attributed to shell fragments and foraminifera. The small basins (WD = 120–200 m) located southeast and southwest of the Oki Islands are covered by silty sediments and enriched in Li, Be, Sc, Cr, Co, Ni, Cu, Ni, Zn, Ga, Nb, Cs, Sn, Cd, Pb, Hg, Bi, Tl, and U. Sandy sediments on the Oki Strait are composed dominantly of calcareous materials, quartz, plagioclase, and lithic fragments (Fig. 1b) (Ikehara, 2010). Most elements are poor in the Oki Strait and the shelf expanding westward from Oki Strait (depth of under 100 m). However Al₂O₃ is abundant around Miho Bay; CaO and Sr are enriched in the water off Sinji Lake and Daisen volcano; K₂O and Rb concentrations are low on the coastal zone (WD = 0–50 m) but are elevated offshore (WD = 50–200 m); As is highly rich in the eastern part of Oki Strait.

The Oki Trough and Wakasa Basin are highly enriched in MgO, P₂O₅, V, MnO, Co, Ni, Cu, As, Mo, Sn, Sb, Cs, Ba, Tl, Pb, and Bi. In contrast, Cu, Zn, and Hg are instead enriched in the slope around the Oki Trough and Wakasa Basin (WD = 200–900 m). CaO and Sr concentrations are quite low in these places because the lysocline is shallow (900–1250 m) in the Sea of Japan (Ikehara *et al.*, 1990a). The marginal terrace southwest and south of the Oki Trough is covered by silt and enriched in P₂O₅, Y, Nb, Ln, Ta, Th and U. Sandy sediments around the Oki Ridge and Wakasa Sea Knoll chain are enriched in Be, K₂O, T-Fe₂O₃, Sc, Cr, Ga, Rb, Y, Nb, Ba, Ln, Ta, and Th.

The sediments in the western part of Wakasa Bay have high mud contents and enriched in Al₂O₃, MgO, TiO₂, MnO, T-Fe₂O₃, Sc, V, Cr, Co, and Ni. The northern area of Wakasa Bay is a gradual slope (WD = 200–500 m) that is covered in silty sediments. In this region, many elements excluding for MgO, K₂O, CaO, Rb, Sr, Ba, and Tl are abundant. The Kaneuchi mine locating in the catchment area of Yura River is a Sn-W mine. It elevates MnO, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, and Pb concentrations in stream sediments. However, the influence of this mine to Wakasa Bay seems to be slight. The features of spatial distribution of elements in the Wakasa Basin are similar to those of the Oki Trough: MgO, P₂O₅, MnO, Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, Bi, and Hg are abundant there.

The K₂O, TiO₂, MnO, T-Fe₂O₃, Ba, and As concentrations are sporadically high on the shelf off Noto Peninsula. The topographic high around Gentatsu-Se is abundant in CaO and Sr attributed to shell fragments. Fine and medium sands distributed around Gentatsu-Se were supplied by the Kuzuryu River and are abundant in Al₂O₃, K₂O, TiO₂, MnO, T-Fe₂O₃, Be, Sc, V, Co, Ba, and Ln. The Ogoya and Nakatatsu Mines are Cu-Zn-type and Zn-Pb-type mines, respectively. They elevate Cu, Zn, Cd, Mo, Sb, Pb, and Bi concentrations in stream sediments collected near these mines. However, the adjacent coastal sea

(Fig. 2a)

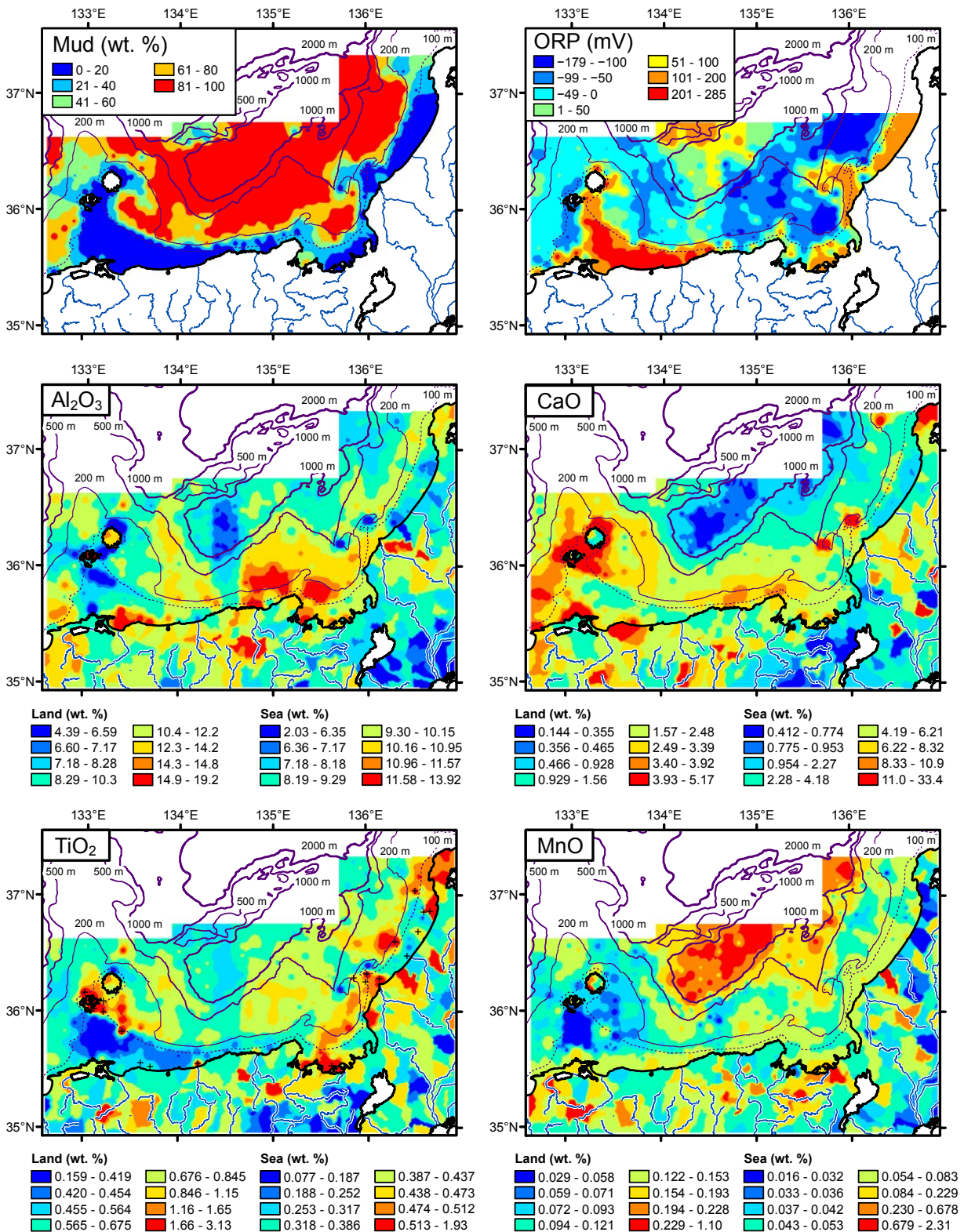


Fig. 2 Spatial distributions of mud (silt + clay) content and ORP data in marine areas and those of elemental concentrations in terrestrial and marine areas for Al₂O₃, CaO, TiO₂, MnO, T-Fe₂O₃, Cr, Cu, As, Nb, Cd, Cs, La, Hg and Pb data. Star symbols indicate major metalliferous deposits. Cross symbols indicate samples containing brown or brownish black sands. Plus symbols indicate samples that plot outside the positive correlation between elemental concentrations and median diameter (Fig. 3).

(Fig. 2b)

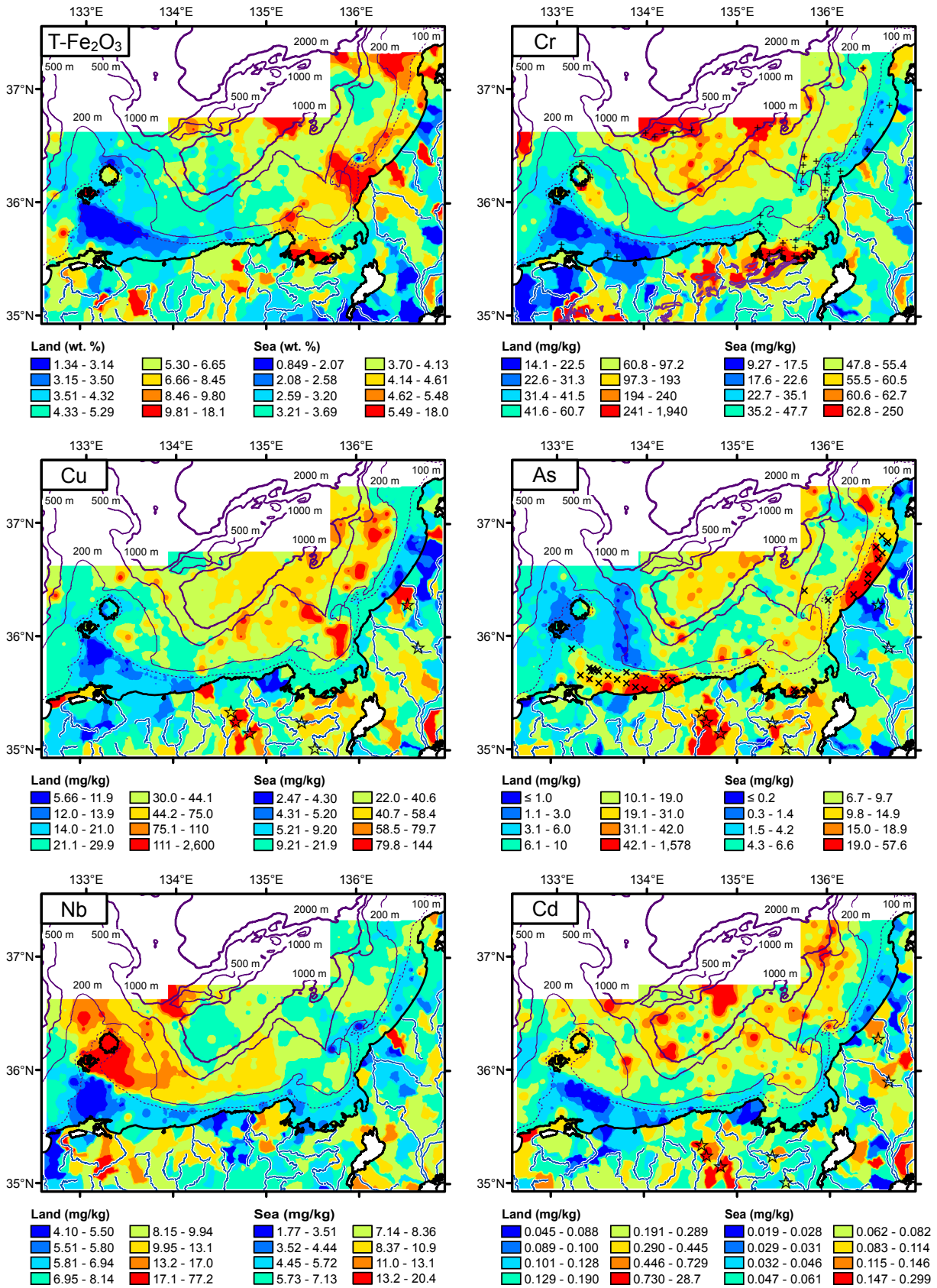


Fig. 2 Continued.

(Fig. 2c)

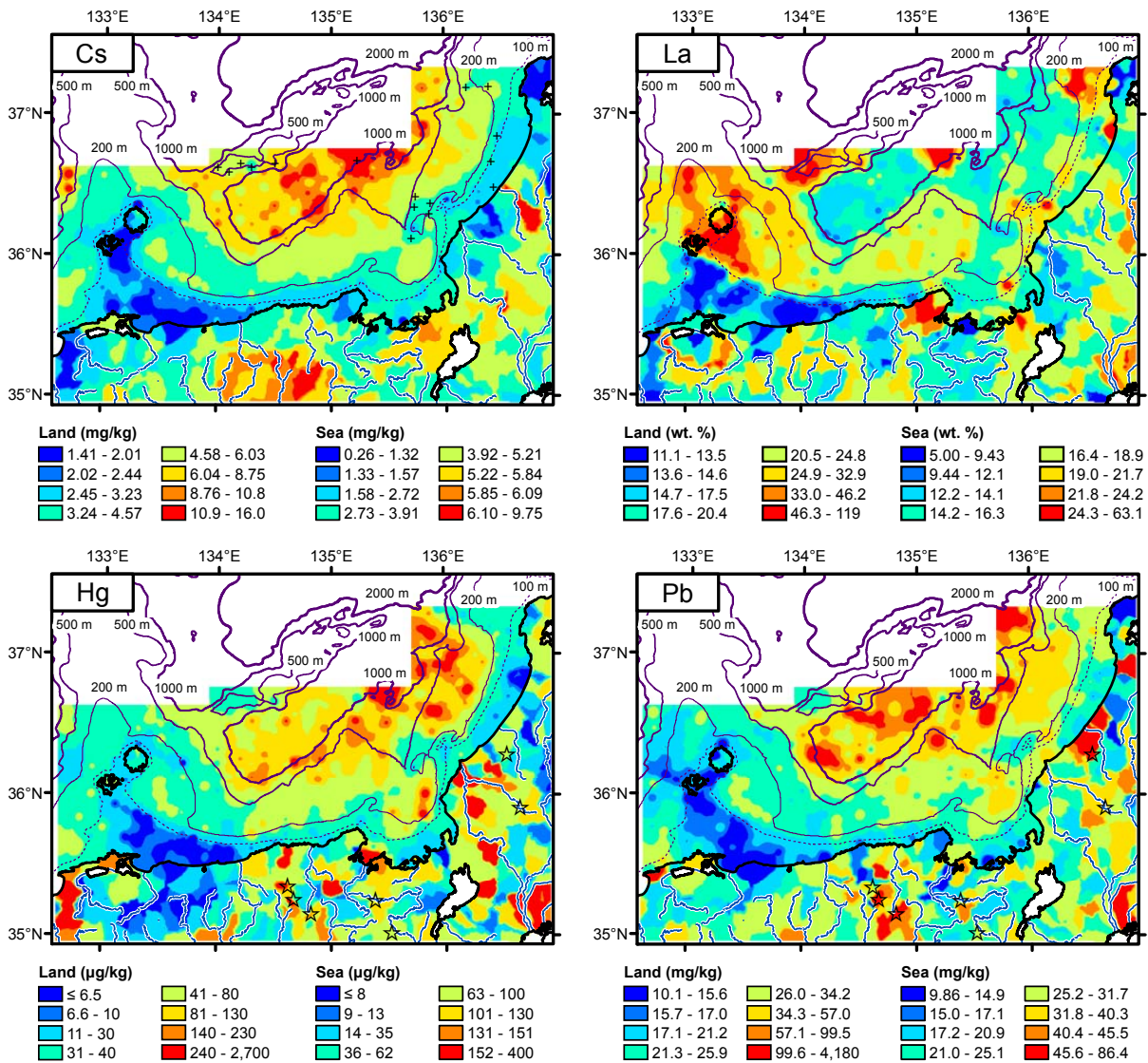


Fig. 2 Continued.

sediments are not abundant in these elements.

3.3 Variation of elemental concentrations in marine sediments with grain size or with water depth

Elemental concentrations in marine sediments change significantly with grain size (Ohta and Imai, 2011). It is necessary to examine the influence of grain size on elemental concentrations to elucidate the element transfer process in the marine environment. This is because coarse sediments on the shelf or topographic highs are enriched in quartz and calcareous materials, which dilutes the concentrations of most elements except for SiO₂, CaO, and Sr. Figure 3 shows the relationships between the concentrations of 12 elements and median diam-

eter (Φ). In addition, median elemental concentrations of 53 elements of marine sediments are summarized in Table 3.

The concentrations of all elements except for As increase sharply from $\Phi = -2$ to $\Phi = 4$ because of the dilution effect by quartz and calcareous materials. Be, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, T-Fe₂O₃, Sc, Ga, Rb, Sr, Nb, Sn, Y, Ba, Ln, Ta, Th, and U concentrations are constant from $\Phi = 4$ to $\Phi = 7-8$, followed by a gradual (but slight) decrease in the $\Phi > 7-8$ range (see Al₂O₃, TiO₂, and Nb in Fig. 3). CaO and Sr follow trends similar to Al₂O₃ except for sediments on the shelf, which contain more than 10 wt. % CaO. MgO, P₂O₅, V, Cr, Co, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Hg, Pb, and Bi concentrations increase with decreasing grain size (see Cs in Fig. 3). The relationship between As concentration and grain size

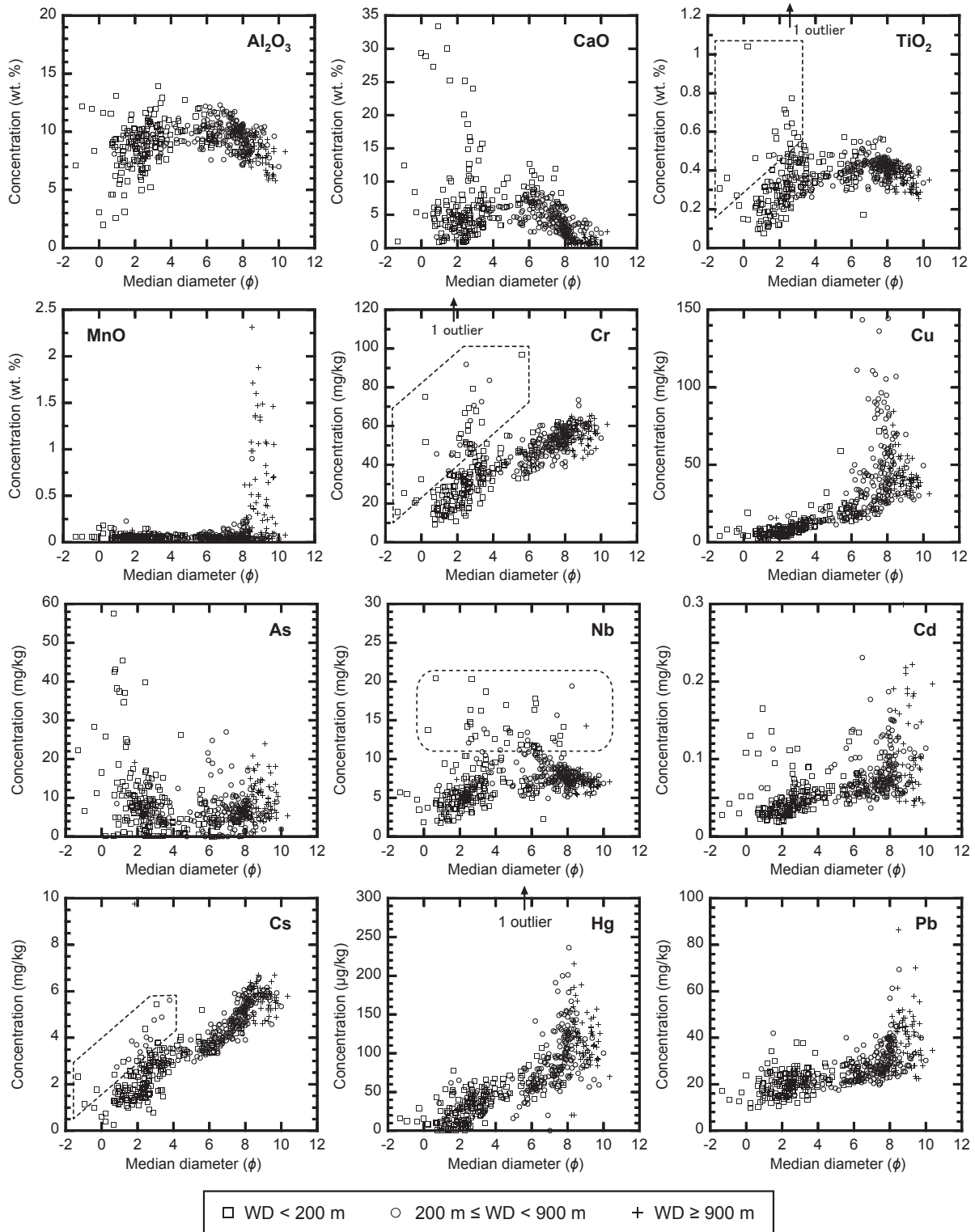


Fig. 3 The relationship between median diameter (Md (ϕ)) and elemental concentrations. The area enclosed by dotted lines indicates the samples that deviate from the positive correlation between Md (ϕ) and elemental concentration. Samples are classified into 3 groups according to water depth (WD): $\text{WD} < 200 \text{ m}$ (shelf), $200 \text{ m} \leq \text{WD} < 900 \text{ m}$ (marginal terrace, slope, and sea topographic heights such as Oki ridge), and $\text{WD} \geq 900 \text{ m}$ (trough).

Table 3 Median elemental concentrations of marine sediments and stream sediment data.

Element	Unit	Coarse sand (N=62)	Fine sand (N=112)	Silt (N=171)	Clay (N=115)	Land_sea side (N=130)
Li	mg/kg	24.2	32.2	48.6	57.2	29.8
Be	mg/kg	1.16	1.28	1.44	1.44	1.57
Na ₂ O	wt. %	2.35	2.41	2.95	4.31	2.27
MgO	wt. %	1.69	2.10	2.52	3.05	2.31
Al ₂ O ₃	wt. %	8.66	9.08	10.0	8.47	10.9
P ₂ O ₅	wt. %	0.093	0.099	0.144	0.150	0.127
K ₂ O	wt. %	1.98	2.10	1.93	1.93	1.99
CaO	wt. %	4.54	4.61	5.32	1.35	1.92
Sc	mg/kg	5.05	7.07	9.18	8.50	11.3
TiO ₂	wt. %	0.238	0.347	0.422	0.391	0.699
V	mg/kg	38.8	41.0	57.0	75.8	106
Cr	mg/kg	22.2	34.1	49.1	57.0	67.5
MnO	wt. %	0.057	0.051	0.049	0.120	0.132
T-Fe ₂ O ₃	wt. %	3.22	3.47	3.68	3.76	5.61
Co	mg/kg	6.52	7.45	8.14	10.7	14.2
Ni	mg/kg	10.0	12.8	25.4	35.8	26.9
Cu	mg/kg	5.31	8.90	27.5	41.5	29.2
Zn	mg/kg	42.9	59.1	88.3	101	124
Ga	mg/kg	11.1	12.4	14.2	14.2	17.7
As	mg/kg	10.7	6.0	5.7	7.5	9.3
Rb	mg/kg	70.2	71.9	68.8	73.5	77.4
Sr	mg/kg	328	283	257	133	147
Y	mg/kg	7.97	10.6	12.1	10.3	15.5
Zr	mg/kg	31.2	42.9	56.3	49.9	54.2
Nb	mg/kg	4.47	6.08	8.03	7.20	7.98
Mo	mg/kg	0.54	0.59	0.83	1.54	1.12
Cd	mg/kg	0.034	0.045	0.067	0.083	0.18
Sn	mg/kg	0.95	1.38	2.15	2.38	2.65
Sb	mg/kg	0.47	0.46	0.66	1.16	0.83
Cs	mg/kg	1.57	2.64	4.21	5.69	4.02
Ba	mg/kg	337	351	312	375	406
La	mg/kg	13.7	17.2	17.8	15.4	19.4
Ce	mg/kg	28.6	36.6	36.9	28.4	36.2
Pr	mg/kg	3.01	3.88	4.05	3.52	4.48
Nd	mg/kg	11.5	14.7	15.7	13.7	17.4
Sm	mg/kg	2.14	2.84	3.07	2.72	3.45
Eu	mg/kg	0.53	0.68	0.69	0.58	0.80
Gd	mg/kg	1.89	2.49	2.71	2.41	3.16
Tb	mg/kg	0.31	0.39	0.44	0.40	0.53
Dy	mg/kg	1.48	1.88	2.18	1.91	2.64
Ho	mg/kg	0.27	0.35	0.41	0.37	0.50
Er	mg/kg	0.78	1.00	1.19	1.05	1.44
Tm	mg/kg	0.12	0.16	0.19	0.17	0.22
Yb	mg/kg	0.76	0.99	1.17	1.03	1.40
Lu	mg/kg	0.11	0.14	0.17	0.16	0.20
Hf	mg/kg	0.88	1.16	1.48	1.31	1.56
Ta	mg/kg	0.39	0.53	0.75	0.67	0.60
Hg	μg/kg	13	34	74	116	50
Tl	mg/kg	0.41	0.49	0.50	0.51	0.54
Pb	mg/kg	18.5	20.4	26.5	36.2	25.2
Bi	mg/kg	0.18	0.21	0.45	0.69	0.27
Th	mg/kg	3.70	5.62	6.89	5.84	6.30
U	mg/kg	0.97	1.18	1.58	1.48	1.45

shows a concave feature. Some samples do not fall on the trends mentioned above. For example, V, MnO, Co, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, and Bi are highly enriched in deep sea sediments ($WD \geq 900$ m) having $\Phi > 8$. Factors other than grain size effects elevate their concentrations, and they will be discussed in detail in subsequent sections.

3.4 Terrestrial spatial distribution patterns of elemental concentrations

Spatial distribution patterns of elemental concentrations in terrestrial regions are influenced primarily by surface lithologies and sporadically by the presence of mineral deposits. Na₂O, Be, Ga, Nb, Y, Ln, Tl, Th, and U are abundant in stream sediments flowing in areas covered by granitic rocks. Mafic volcanic rocks elevate the concentrations of MgO, Sc, V, Cr, T-Fe₂O₃, Co, Ni, and Sr in stream sediments. MgO, Cr, Co, and Ni in particular are extremely enriched in stream sediments derived from mafic rocks of accretionary complexes and ultramafic rocks associated with Yakuno ophiolite. Li, MnO, Rb, Sb, Cs, and Tl concentrations are enhanced in stream sediments derived from sedimentary rocks of accretionary complexes. Geochemically anomalous areas having high concentrations of Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, and Bi tended to be spatially related to the presence of mineral deposits (see star symbols in Fig. 2).

4. Discussion

4.1 Sandy sediments on the shelf: Contribution of river input and relict sediments

Although the input of terrigenous materials to coastal sea is not conspicuous, the supply of terrigenous materials to marine environment through the Yura River is clearly recognized in Wakasa Bay. The Yura River flows through an area covered by ultramafic, metabasalt, and gabbroitic rocks associated with accretionary complexes and Yakuno ophiolite that are highly abundant in MgO, TiO₂, Sc, V, Cr, T-Fe₂O₃, Co, and Ni (see TiO₂, Cr, and T-Fe₂O₃ in Fig. 2).

Al₂O₃, CaO, Sr, and Ga are abundant in Miho Bay (see Al₂O₃ and CaO in Fig. 2). The Hino and Hii Rivers supplied a large amount of decomposed granite soil to Miho Bay through large-scale mining of iron sand during 1600–1920. Therefore, high concentrations of Al₂O₃, Ca, Sr, and Ga indicate the spatial distribution of plagioclase. However, these high concentrations are restricted to Miho Bay and off Daisen volcano. This indicates that sandy sediments from rivers are deposited quite near shore.

Enrichment of Be, MgO, Al₂O₃, K₂O, Sc, V, TiO₂, T-Fe₂O₃, Co, Zn, Ba and Ln in sandy sediments is found on the shelf between Gentatsu-Se and the mouth of the Kuzuryu River (see plus symbols in TiO₂ map of Fig. 2). These sandy samples plot

off of the trend between TiO₂ and median diameter (Φ) (Fig. 3). These elements except for Be, K₂O, and Ln are also enriched in the adjacent terrestrial area where the Kuzuryu River flows. Katayama *et al.* (2000) reported that sandy sediments on the shelf contain amphibole, pyroxene and magnetite that originate from andesitic volcanic rocks in the catchment area of Kuzuryu River. Consequently, continuous spatial distribution of high concentrations of MgO, Al₂O₃, Sc, V, TiO₂, T-Fe₂O₃, Co, and Zn across land and sea is explained by the input of terrestrial materials to coastal sea. However, the spatial distributions of high Be, K₂O, Sc, V, T-Fe₂O₃, and Ln concentrations extend beyond this region and continue from Gentatsu-Se to Wakasa Basin. In addition, the area corresponds to the distribution of sandy sediments that plot outside the trend between Cr and Cs concentrations and median diameter (Φ) (see Cr and Cs data in the area enclosed by dotted lines in Fig. 3). Those elements are not abundant in the catchment area of Kuzuryu River (Fig. 2). Those results support the suggestion that the sandy sediments located off Gentatsu-Se are denudated from old sediments (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama *et al.*, 2000).

4.2 Input of Oki Island volcanic material to the southeast of the Oki Islands and near the Oki Ridge and Wakasa Sea Knoll Chain

Li, Sc, Cu, Ni, Zn, Ga, Cs, Sn, Cd, Pb, Hg, Bi, Tl, and U are enriched in the small basins and marginal terrace around the Oki Islands, which are covered by silty and clayey sediments ($6 < \Phi < 9$). Because those elements are not abundant in the stream sediments of Oki Islands, their enrichments are explained simply by grain size effects.

In contrast, samples having high Be, TiO₂, Zr, Nb, Y, Ln, Th, and U concentrations are found around the Oki islands, Oki Ridge, and Wakasa Sea Knoll Chain. Samples enriched in Nb, Y, Ln, Ta, Th, and U have a variety of grain sizes but their distribution is restricted to the western part of the shallow waters (see the samples enclosed by dotted line in Nb of Fig. 3). Yamasaki (1998) reported that the crust of the Oki Islands is considered to be a fragment of continental crust. The Oki island area including Oki Spur and Oki Strait were formed by a complex evolutionary process and covered heavily by lavas and pyroclastic rocks during the late Miocene and Pleistocene. Alkali-rhyolite is dominant in the eastern Oki Islands and alkali-basalt is dominant in the western Oki Islands. They are enriched in incompatible elements such as Zr, Nb, and rare earth elements compared with non-alkaline volcanic rocks distributed on the mainland (Kaneko, 1991; Kobayashi *et al.*, 2002). River sediments from the Oki Islands are also enriched in these elements. However, the Oki islands are small islands so the supply of the volcanic materials through rivers would be subtle. Marine geological maps indicate that Quaternary alkali-basaltic rock and

Pliocene tuffaceous sandstone and volcanic rocks are distributed widely and exposed in the shallow waters ($WD < 100$ m) around the Oki Islands and Oki Spur (Tamaki *et al.*, 1982). Erosion and denudation processes acting on the seabed by tidal waves would produce sandy and silty sediments that could then be subsequently dispersed by a branch current of the Tsushima Current.

Sandy sediments around the Oki Ridge and Wakasa Sea Knoll Chain are enriched in Be, K_2O , Sc, Cr, Rb, Y, Zr, Nb, Ba, Ln, Hf, Ta, and Th. Ikehara *et al.* (1990a) suggested that sandy sediments around Oki Ridge contain a large amount of volcanic glass, volcanic fragments, and pumice. Yamamoto *et al.* (1990) reported that semi-consolidated silt, andesitic welded tuff associated with moonstone, alkali-rhyolites, and pumices were dredged from the top and southern slope of Oki Ridge. These volcanic rocks are also found in the Oki Islands. As we explained above, that region has a low deposition rate or is in an erosional regime. Therefore, the enrichment of the above elements is explained by sands denudated from alkaline olivine basalt.

The elements Sc, Ti, Nb, Y, Ln, Ta, and Th are used for the discrimination of sediments because they are relatively immobile in nature. Yang *et al.* (2003) used the concentration ratios of Cr/Th, Ti/Nb, and La/Yb as geochemical parameters for a provenance study of Yellow Sea sediments. In the study area, Sc and TiO_2 are roughly abundant in the eastern region except for samples located near the Oki Islands, whereas Nb, Y, Ln, Ta, and Th are abundant in sediments around the Oki Islands. Therefore, the ratio of the former and latter elements is useful to elucidate the dispersion process of alkaline volcanic materials. Figure 4 shows how Ti/Nb and Sc/La ratios classified by grain size (sand, silt, and clay) change from west to east. For comparison, these ratios in stream sediments collected from rivers flowing into the Sea of Japan and from Oki Islands ($N = 138$) are also shown in Fig. 4.

The Ti/Nb and Sc/La ratios in stream sediments vary widely. The former ratio gradually increases toward the east but the latter ratio is almost constant. Stream sediments collected from the Oki Island have the lowest ratios among stream sediments in the study area: $Ti/Nb = 85\text{--}260$ and $Sc/La = 0.10\text{--}0.48$. Sandy sediments on the shelf have a similar trend to stream sediments. Their Ti/Nb and Sc/La ratios are consistent with the lowest values of stream sediments. This fact suggests that mineralogical composition in sediments is largely fractionated between river and coastal sea. It is apparent that these sandy shelf sediments seem to be affected by river sediments rather than alkaline volcanic rocks, except for samples collected from the Oki Islands.

In contrast, both Ti/Nb and Sc/La ratios in silty sediments are low at 133° E, gradually increase toward the east, and finally

level out to constant values between 135.4° E and 136.8° E (Fig. 4). Ikehara (1991) suggested that fine particles selectively deposit around current rips and between surface water and deep water. In this study area, muddy sediments deposit on the marginal terrace ($WD = 200\text{--}500$ m), near a water mass boundary between the Tsushima Current (surface water) and JSPW (deep sea). Therefore, the spatial distribution of silty sediments on the marginal terrace is strongly affected by the oceanic current. The systematic changes of Ti/Nb and Sc/La ratios from west to east (between 133° E and 135.4° E) indicate that silty grains originating from alkaline volcanic rocks are conveyed by the Tsushima Current or related bottom sea flows along the marginal terrace for distances as far as 200 km.

Finally, clay sediments have constant ratios of Ti/Nb and Sc/La along the east-west direction different from the cases of sandy and silty sediments. The reason is that clay minerals are weathering products of other minerals, resulting in the loss of their original geochemical features.

4.3 Influence of early diagenetic processes and input of organic materials in silt and clay

The elements MnO, V, Ni, Co, Mo, Sb, Pb, and Bi are extremely enriched in deep basins with water depths below 900 m and which are covered by clay ($Md(\Phi) > 8$). ORP is positive in the Oki Trough and a brown clay layer is found at the top of surface sediments (0–4 cm) of Oki Trough (Fig. 2) (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama *et al.*, 1993). The brown clay layer is considered to be the oxidizing layer and the result of Mn oxide precipitation. The enrichments of V, Ni, Co, Mo, Sb, Pb, and Bi may therefore be caused by early diagenetic processes (e.g., Klinkhammer, 1980; Shaw *et al.*, 1990). This process involves metals that are dissolved at greater depths in sediments under reducing conditions, then diffuse upward, and finally precipitate with Fe-Mn hydroxides, especially Mn dioxide, or on the sediment surface under oxic conditions (Aplin and Cronan, 1985; Shaw *et al.*, 1990; Morford *et al.*, 2005). Actually, Yin *et al.* (1989) confirmed that MnO and Co in brownish muds of the Oki trough and Tsushima Basin exist in the form of Fe-Mn oxides or hydroxides through extraction experiment.

Although V, Co, Ni, Mo, and Sb concentrations in clay sediments of the study area correlate positively to the concentration of MnO, their relationship is fairly scattered (Fig. 5). Provided that enrichment of MnO, V, Ni, Co, Mo, Sb, Pb, and Bi was caused by early diagenetic processes under a static depositional environment, their concentrations would have a definite correlation with MnO concentration. Ikehara *et al.* (1990b) suggested that the southwestern part of Oki Trough is covered by mass-transport deposits derived from slope failure at the edge of the marginal terrace and the northeast part is covered

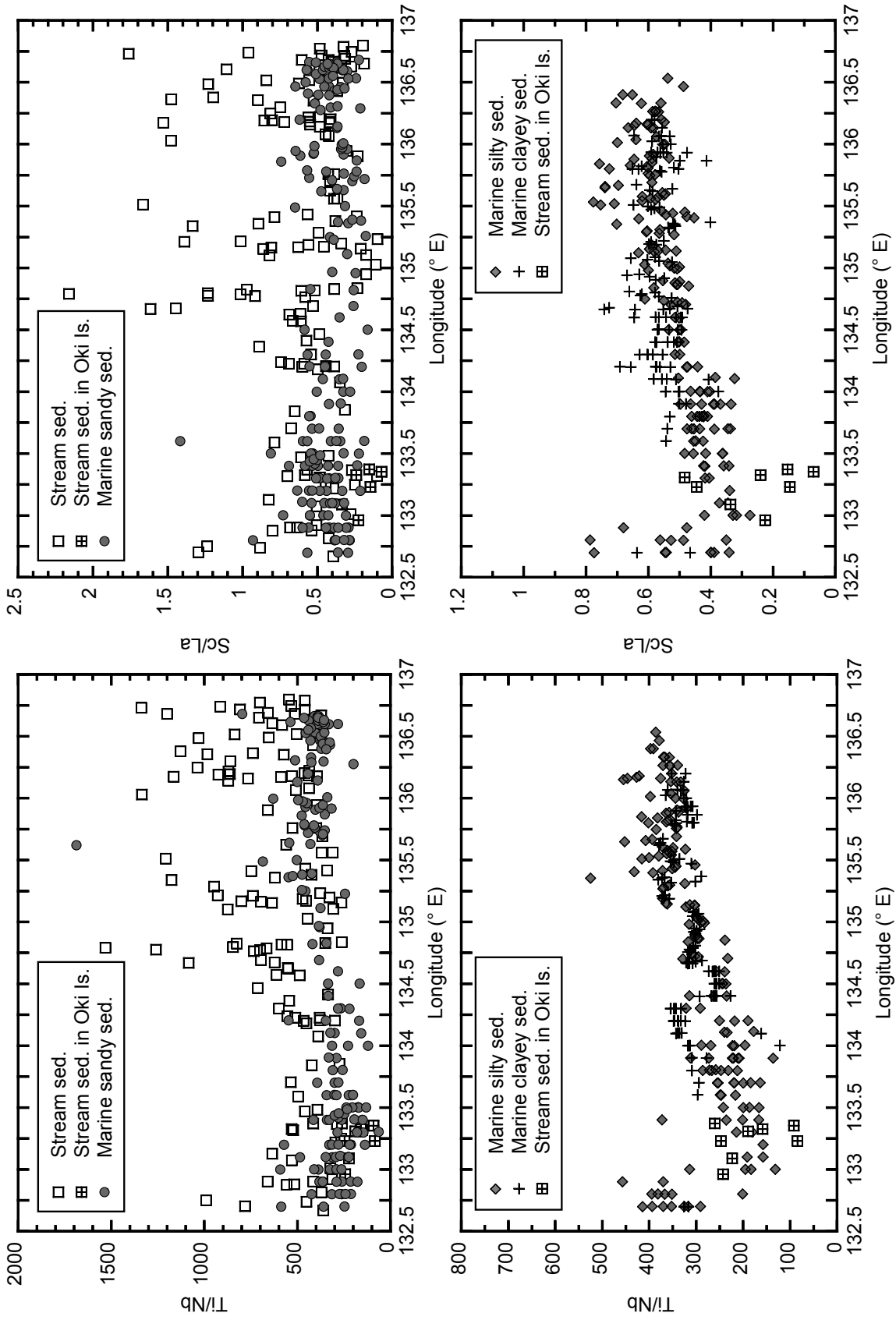


Fig. 4 The longitudinal dependence of Ti/Nb and Sc/La ratios in marine sediments (sandy, silty, and clayey sediments) and stream sediments.

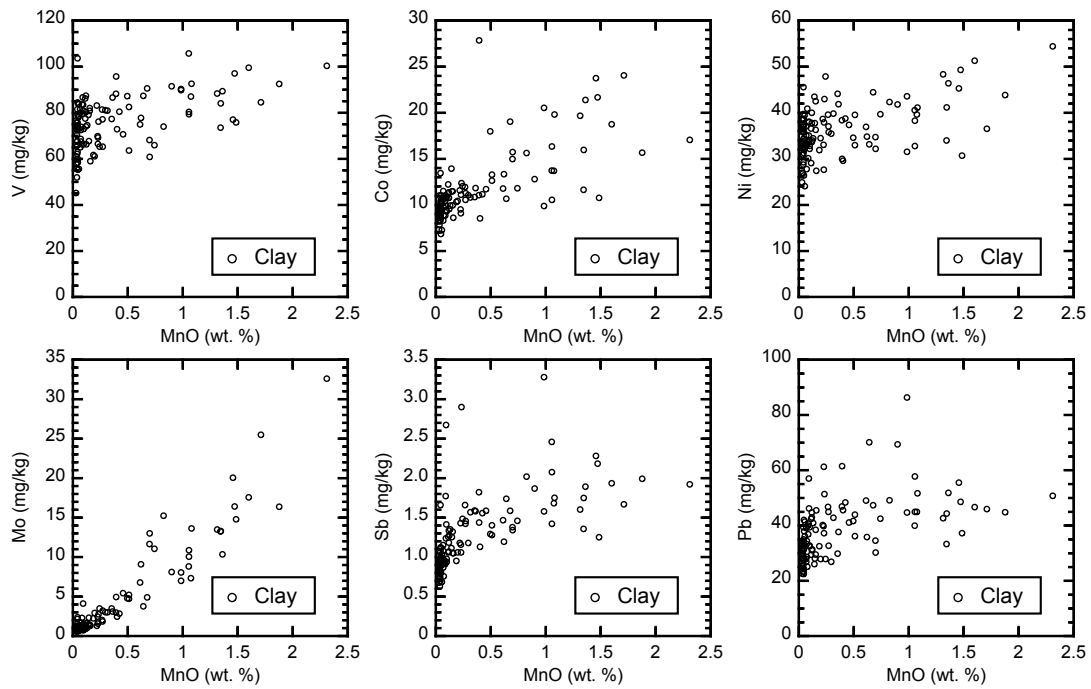


Fig. 5 Scatter diagrams of elemental concentrations in the marine sediments classified as clay ($\phi > 8$).

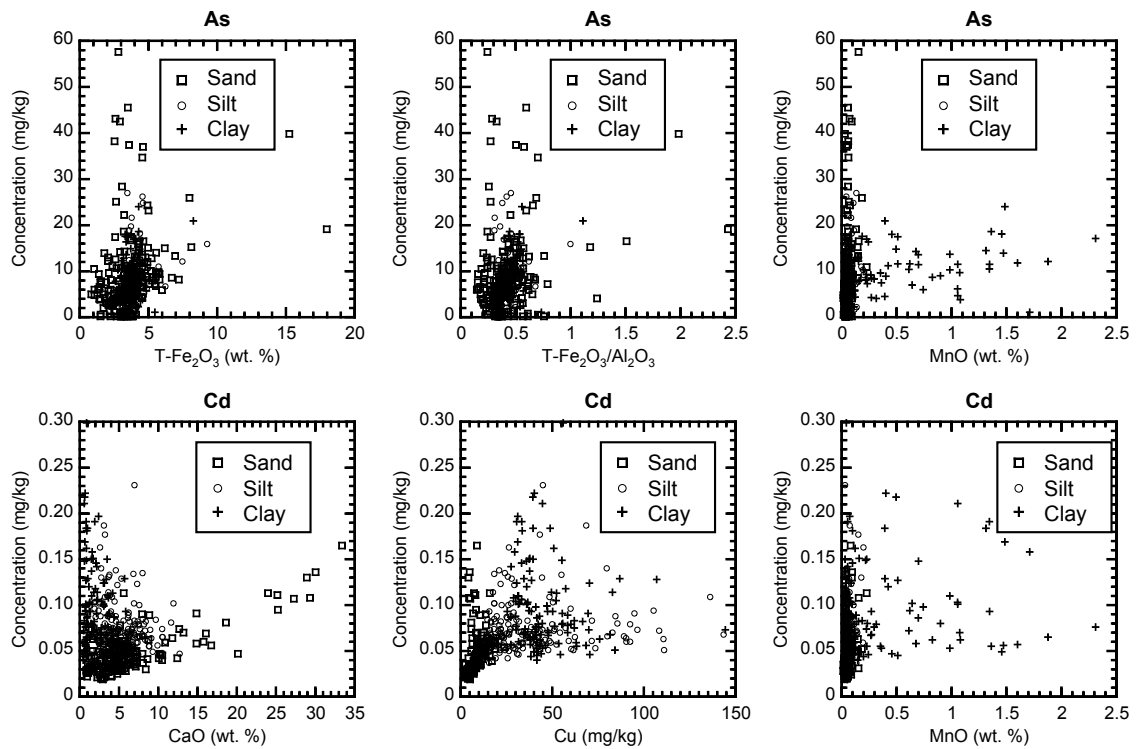


Fig. 6 Scatter diagrams of elemental concentrations in the marine sediments (sand, silt, and clay).

by hemi-pelagic deposition based on seismic records. In other words, sedimentation in Oki Trough and Wakasa Basin has been frequently interrupted by turbidity flow. In that case, early diagenetic process is re-started after the event (Wilson *et al.*, 1985). Such an episodic event may disturb the correlation among MnO, V, Ni, Co, Mo, Sb, Pb, and Bi concentrations in clay sediments.

Silt and clay samples distributed on the marginal terrace and the slope (WD = 200 – 900 m) are also enriched in Ni, Cd, Mo, Sn, Sb, Pb, and Bi, especially in Cu, Zn and Hg (see Cu and Hg in Fig. 3). Their enrichment cannot be explained simply by early diagenetic processes.

The marginal terrace and the slope have negative ORP (under reductive condition) different from deep sea basin (Fig. 2): It has been known that Cu and Hg are transported with detrital biogenic materials from shallow water to sediments (Bothner *et al.*, 1980; Klinkhammer, 1980; Shaw *et al.*, 1990; Mason *et al.*, 1994). They are released from surface sediments to seawater during decomposition of organic matter or are associated with residual organic matter. Namely, the organic remains are an important source of elements in deep seas.

The deposition rate on the marginal terrace is very high (about 10–25 cm/1000y) (Ikehara, 1991). In that place, organic materials associated with silt and clay are also deposited in abundance on the marginal terrace and the slope. They would increase the oxygen consume during the decomposition and cause reducible condition (see ORP data in Fig. 2a). As a result, the organic remaining on the marginal terrace and the slope elevates the concentrations of Cu, Zn and Hg.

Furthermore, the Cu, Zn and Hg concentrations on the marginal terrace and the slope gradually increase toward the east (see Cu and Hg in Fig. 3). Actually, the mean concentration ratios of Cu, Zn and Hg in the east part (between 132.5° E and 134.5° E) to those in the west part (between 134.5° E and 135.4° E) are calculated to be 1.9, 1.3, and 1.6, respectively. Correspondingly, the eastern marginal terrace has ORP values of approximately –50 to –180 eV, with absolute values larger than those found on the western marginal terrace (Fig. 2). Katayama *et al.* (1993) reported that the deposition rate on the eastern marginal terrace is larger than that on the western side based on the seismic records. From those reasons, we assumed that there were many supplies of organic materials in the eastern side.

4.4 Controlling factors of spatial distribution patterns of As and Cd

The spatial distribution patterns of As and Cd somewhat differ from the above mentioned elements. As is abundant in both shelf and basin, Cd is sporadically enriched in the marginal terrace, slope, and basins. The spatial distribution patterns of

As concentration and ORP show that As is high in shelf sediments where its oxic conditions are dominant. Brown or brownish-black sands that contain quartz coated by Fe hydroxides are distributed widely on shelf, especially on the eastern margin of Oki Strait and the shelf off the Noto Peninsula (see cross symbols plotted in As map of Fig. 2) (Ikehara *et al.*, 1990a; Katayama *et al.*, 2000). Fe hydroxide-coated quartz grains would absorb As efficiently (Belzile and Tessier, 1990; Sullivan and Aller, 1996; Chaillou *et al.*, 2008). However, As concentration correlates with neither T-Fe₂O₃ concentration nor the T-Fe₂O₃/Al₂O₃ (or T-Fe₂O₃/TiO₂) ratio, with some exceptions (Fig. 6). In addition, no enrichment of As is found in the adjacent terrestrial area: Sendai, Kuzuryu, and Tetori river systems. Therefore, Fe hydroxide coats minerals thinly and would have absorbed As dissolved in water over a long period. Furthermore, clayey sediments in the Oki Trough are abundant in As (Fig 3). Because their As concentrations roughly correlate to MnO ones (Fig. 6), enrichment of As in the Oki Trough would be caused by early diagenetic process.

Sediments having high Cd concentration are found ubiquitously: on the shelf, marginal terrace and in basins. The relatively high Cd concentration of coarse sediments on the shelf is explained by calcareous materials because Cd²⁺ has a similar ionic radius to Ca²⁺. Figure 6 shows that CaO concentration in sediments associated with calcareous materials positively correlates with Cd concentration. By contrast, Cd concentrations of silty and clayey sediments do not correlate with Cu and MnO concentrations (Fig. 6), whose concentrations indicate the influences of metal binding with organic matters and early diagenetic process, respectively. The geochemistry of Cd is opposite to Mn, V, Ni, Co, Mo, Sb, Pb, and Bi during early diagenetic processes and authigenically accumulates in sediments (for example by precipitation as CdS) (Rosenthal *et al.*, 1995; Morford *et al.*, 2005; Chaillou *et al.*, 2008). For these reasons, Cd does not bind to organic materials and Mn oxides, but authigenically accumulates in silty and clayey sediments.

5. Conclusions

A comprehensive examination of the spatial distribution of 53 elements of 460 marine sediments in the western side of the Sea of Japan and 254 stream sediments collected from the adjacent terrestrial area has been conducted. The spatial distribution of elemental concentrations in marine sediments is influenced by many factors: (1) grain size effects (including dilution effects), (2) particle transport from the land to coastal seas, (3) biogenic remains, (4) conveyance of coastal sediments by waves and coastal currents, (5) early diagenetic processes, (6) deposition at water mass boundaries, (7) denudation or resedimentation of

basement rocks, and (8) precipitation of Fe–Mn oxides. These controlling factors closely relate to marine geography, water depth, and depositional environment.

The influence of particle transport from land to seas through river systems is observed only in restricted area. This is because strong tidal waves and coastal currents sweep away fine grains on the shelf that are supplied from rivers. As a result, old sandy sediments are distributed widely on the shelf. Most elements have low concentrations in sandy sediments because of dilution effects by quartz and calcareous materials. Quartz in relict sediments is often coated by Fe hydroxides and effectively absorbs As. Calcareous materials such as shell fragments and foraminifera cause not only enrichment of CaO, and Sr but also enrichment of Cd. Sea topographic highs (Oki Ridge, Wakasa Sea Knoll Chain, and Gentatsu-Se) are covered by sandy sediments that are produced by denudation or resedimentation of basement rocks. Their elemental abundances are different from the sediments in the surrounding areas.

Silty sediments are deposited on the marginal terrace where a water mass boundary is located. The spatial distribution patterns of Y, Nb, Ln, Ta, and Th clearly suggest that silty sediments denuded from alkaline volcanic rocks around the Oki Islands are conveyed toward the east and deposited on the marginal terrace. In the eastern marginal terrace, Cu, Zn, and Hg are enhanced in silty sediments associated with biogenic remains. In contrast, the deep sea is covered by a low-temperature and oxygen-rich water mass (Japan Sea Proper Water), so that clay sediments distributed there rarely contain calcareous materials and organic remains. A brown clay layer associated with Mn oxide precipitation is found in deep sea basins and is highly enriched in V, Co, Ni, Mo, Sb, Pb, and Bi because of early diagenetic processes.

Acknowledgments

The authors extend special thanks to Dr. Takashi Okai, Dr. Yutaka Kanai, Masumi Mikoshihira, and Ran Kubota (Geological Survey of Japan, AIST) for their useful suggestions, which have helped to improve the manuscript. We are grateful to the Japan Oceanographic Data Center (JODC) for providing data files.

References

- Akimoto, T., Kawagoe, S. and Kazama, S. (2009) Estimation of sediment yield in Japan by using climate projection model. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, **53**, 655-660 (In Japanese with English abstract).
- Aplin, A. C. and Cronan, D. S. (1985) Ferromanganese oxide deposits from the Central Pacific Ocean .I. Encrustations from the Line Islands Archipelago. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 427-436.
- Belzile, N. and Tessier, A. (1990) Interactions between arsenic and iron oxyhydroxides in lacustrine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 103-109.
- Bothner, M. H., Jahnke, R. A., Peterson, M. L. and Carpenter, R. (1980) Rate of mercury loss from contaminated estuarine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 273-285.
- Chaillou, G., Schäfer, J., Blanc, G. and Anschutz, P. (2008) Mobility of Mo, U, As, and Sb within modern turbidites. *Mar. Geol.*, **254**, 171-179.
- Darnley, A. G., Björklund, A., Bølviken, B., Gustavsson, N., Koval, P. V., Plant, J. A., Steenfelt, A., Tauchid, M., Xie, X., Garrett, R. G. and Hall, G. E. M. (1995) *A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for international geochemical mapping*. UNESCO Publishing, Paris, 122 pp.
- De Vos, W., Tarvainen, T., Salminen, R., Reeder, S., De Vivo, B., Demetriades, A., Pirc, S., Batista, M. J., Marsina, K., Ottesen, R.-T., O'Connor, P. J., Bidovec, M., Lima, A., Siewers, U., Smith, B., Taylor, H., Shaw, R., Salpeteur, I., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Slaninka, I., Lax, K., Gravesen, P., Birke, M., Breward, N., Ander, E. L., Jordan, G., Duris, M., Klein, P., Locutura, J., Bel-lan, A., Pasieczna, A., Lis, J., Mazreku, A., Gilucis, A., Heitzmann, P., Klaver, G. and Petersell, V. (2006) *Geochemical atlas of Europe. Part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, 692 pp.
- Gamo, T., Nozaki, Y., Sakai, H., Nakai, T. and Tsubota, H. (1986) Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. *J. Mar. Res.*, **44**, 781-793.
- Geological Survey of Japan (1992) *Geological Map of Japan, 1:1,000,000 (3rd, ed.)*. Geol. Surv. Japan.
- Howarth, R. J. and Thornton, I. (1983) Regional Geochemical Mapping and its Application to Environmental Studies. In Thornton, I., ed., *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, London, 41-73.
- Ikehara, K. (1991) Modern sedimentation off san in district in the southern Japan Sea. *Oceanography of Asian Marginal Seas*, 143-161.
- Ikehara, K. (2010) *Sedimentological Map of Oki Strait. 1:200,000 Marine Geology Map Series 69 (CD-ROM version)*, Geol. Surv. Japan, AIST.
- Ikehara, K., Katayama, H. and Satoh, M. (1990a) *Sedimentological Map offshore of Tottori. 1:200,000 Marine Geology Map Series 36*, Geol. Surv. Japan, AIST.
- Ikehara, K., Satoh, M. and Yamamoto, H. (1990b) Sedimentation in the Oki Trough, southern Japan Sea, as revealed by high

- resolution seismic records (3.5 kHz echograms). *Jour. Geol. Soc. Japan*, **96**, 37-49.
- Imai, N., Terashima, S., Ohta, A., Mikoshihira, M., Okai, T., Tachibana, Y., Togashi, S., Matsuhisa, Y., Kanai, Y. and Kamioka, H. (2010) *Elemental distribution in Japan-Geochemical map of Japan-*. (Imai, N., ed.). Geol. Surv. Japan, AIST, Tsukuba.
- Iwabuchi, Y. (1968) Submarine geology of the southeastern part of the Japan Sea. *Contributions from the Institute of Geology and Paleontology Tohoku University*, **66**, 1-76 (In Japanese with English abstract).
- Iwabuchi, Y. and Kato, S. (1988) Some features of the continental shelf around the Japanese Islands on compilation of the Quaternary Map. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **26**, 217-225 (In Japanese with English abstract).
- Kaneko, N. (1991) Petrology of Oki-Dozen volcano. Part 1. Petrography and major and trace element compositions. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, **86**, 140-159 (In Japanese with English abstract).
- Katayama, H. and Ikehara, K. (2001) *Sedimentological Map west of Noto Peninsula*. 1:200,000 Marine Geology Map Series 57, Geol. Surv. Japan, AIST.
- Katayama, H., Mikio, S. and Ikehara, K. (1993) *Sedimentological Map offshore of Kyo-ga Misaki*. 1:200,000 Marine Geology Map Series 38, Geol. Surv. Japan, AIST.
- Katayama, H., Mikio, S. and Ikehara, K. (2000) *Sedimentological Map of Gentatsu-Se*. 1:200,000 Marine Geology Map Series 53, Geol. Surv. Japan, AIST.
- Klinkhammer, G. P. (1980) Early diagenesis in sediments from the eastern equatorial Pacific. II. Pore water metal results. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **49**, 81-101.
- Kobayashi, S., Sawada, Y. and Yoshida, T. (2002) Magma plumbing systems of the Latest Miocene Oki Alkaline Volcanic Group, Oki-Dogo Island, SW Japan, based on geology and petrology. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **31**, 137-161 (In Japanese with English abstract).
- Kondo, H. (2006) Lipid Compounds and Distribution in Sediments from Tango-kai Bay of western part of Wakasa Bay. *Bulletin of Faculty of Education, Nagasaki University. Natural science*, **74**, 15-25.
- Mason, R. P., Fitzgerald, W. F. and Morel, F. M. M. (1994) The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 3191-3198.
- Morford, J. L., Emerson, S. R., Breckel, E. J. and Kim, S. H. (2005) Diagenesis of oxyanions (V, U, Re, and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 5021-5032.
- Naganuma, K. (1977) The Oceanographic fluctuations in the Japan Sea. *Marine sciences monthly*, **9**, 137-141 (In Japanese with English abstract).
- Ohta, A. and Imai, N. (2011) Comprehensive Survey of Multi-Elements in Coastal Sea and Stream Sediments in the Island Arc Region of Japan: Mass Transfer from Terrestrial to Marine Environments. In El-Amin, M., ed., *Advanced Topics in Mass Transfer*, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advanced-topics-in-mass-transfer/comprehensive-survey-of-multi-elements-in-coastal-sea-and-stream-sediments-in-the-island-arc-region>, Croatia, 373-398.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K. and Nakajima, T. (2004) Geochemical mapping in Hokuriku, Japan: influence of surface geology, mineral occurrences and mass movement from terrestrial to marine environments. *Appl. Geochem.*, **19**, 1453-1469.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K., Okai, T., Ujiie-Mikoshihira, M. and Kubota, R. (2007) Elemental distribution of coastal sea and stream sediments in the island-arc region of Japan and mass transfer processes from terrestrial to marine environments. *Appl. Geochem.*, **22**, 2872-2891.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K., Katayama, H. and Noda, A. (2010) Factors controlling regional spatial distribution of 53 elements in coastal sea sediments in northern Japan: Comparison of geochemical data derived from stream and marine sediments. *Appl. Geochem.*, **25**, 357-376.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y. and Ikehara, K. (2013) Regional spatial distribution of multiple elements in the surface sediments of the eastern Tsushima Strait (southwestern Sea of Japan). *Appl. Geochem.*, **37**, 43-56.
- Reimann, C. (2005) Geochemical mapping: technique or art? *Geochem.: Explor. Environ. Anal.*, **5**, 359-370.
- Rosenthal, Y., Lam, P., Boyle, E. A. and Thomson, J. (1995) Authigenic cadmium enrichments in suboxic sediments: Precipitation and postdepositional mobility. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **132**, 99-111.
- Salminen, R., Batista, M. J., Bidovec, M., Demetriades, A., B., D. V., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P. J., Olsson, S. Å., Ottesen, R.-T., Petersell, V., Plant, J. A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A. and Tarvainen, T. (2005) *Geochemical atlas of Europe. Part 1 - Background Information, Methodology and Maps*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, 526 pp.

- Senjyu, T., Shin, H. R., Yoon, J. H., Nagano, Z., An, H. S., Byun, S. K. and Lee, C. K. (2005) Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.*, **52**, 1726-1741.
- Shaw, T. J., Gieskes, J. M. and Jahnke, R. A. (1990) Early diagenesis in differing depositional environments: The response of transition metals in pore water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 1233-1246.
- Sudo, H. (1986) A note on The Japan Sea Proper Water. *Prog. Oceanogr.*, **17**, 313-336.
- Sullivan, K. A. and Aller, R. C. (1996) Diagenetic cycling of arsenic in Amazon shelf sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1465-1477.
- Tamaki, K., Yuasa, M. and Murakami, F. (1982) Geological Map of Oki Strait. 1:200,000 Marine Geology Map Series 20.
- Watson, D. F. and Philip, G. M. (1985) A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing*, **2**, 315-327.
- Weaver, T. A., Broxton, D. E., Bolivar, S. L. and Freeman, S. H. (1983) *The Geochemical Atlas of Alaska: Compiled by the Geochemistry Group, Earth Sciences Division, Los Alamos National Laboratory*. GJBX-32(83), Los Alamos, 57 pp.
- Webb, J. S., Thornton, I., Thompson, M., Howarth, R. J. and Lowenstein, P. L. (1978) *The Wolfson Geochemical Atlas of England and Wales*. Clarendon Press, Oxford, 69 pp.
- Wilson, T. R. S., Thomson, J., Colley, S., Hydes, D. J., Higgs, N. C. and Sorensen, J. (1985) Early organic diagenesis: The significance of progressive subsurface oxidation fronts in pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 811-822.
- Yamamoto, H. (1991) A submarine sediment slide on the continental slope off Fukui Prefecture, Southern Japan Sea. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 221-232 (In Japanese with English abstract).
- Yamamoto, H. (1993) Submarine geology and post-opening tectonic movements in the southern region of the Sea of Japan. *Mar. Geol.*, **112**, 133-150.
- Yamamoto, H., Joshima, M. and Kisimoto, K. (1990) *Geological Map of Offshore of Tottori*. 1:200,000 Marine Geology Map Series 35, Geol. Surv. Japan.
- Yamasaki, H. (1998) Late Cenozoic tectono-sedimentary history in the Oki-Dogo Island, and its implication for the origin of topographic and structural relief in the Southwestern Japan Sea. *Bulletin of the Faculty of School Education, Hiroshima University. Part II*, **20**, 85-153 (In Japanese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Lim, D. I. and Li, C. X. (2003) A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Sci. Rev.*, **63**, 93-120.
- Yin, J., Okada, H. and Labeyrie, L. (1987) Clay mineralogy of slope sediments around the Japanese Islands. *Geosci. Repts. Shizuoka Univ.*, **13**, 41-65.
- Yin, J. H., Kajiwara, Y. and Fujii, T. (1989) Distribution of transition-elements in surface sediments of the southwestern margin of Japan Sea. *Geochem. J.*, **23**, 161-180.

Received December 8, 2014

Accepted June 30, 2015

隠岐トラフ周辺海域及び近接陸域における表層堆積物の元素分布：
特に日本海固有水のシルト質および粘土質堆積物への強い影響

太田充恒・今井 登・寺島 滋・立花好子・池原 研・片山 肇

要 旨

全国陸域地球化学図に続く海域地球化学図プロジェクトにおいて、日本海西部海域から460個の海洋堆積物が採取され、53元素の分析がなされている。これら海洋堆積物の粒径や化学組成は堆積環境ごと(陸棚, 縁辺台地, 斜面, 海盆など)で大きく異なる。まず陸棚上砂質堆積物の特徴として、主たる起源物質と考えられる(隣接地域の)河川堆積物の化学的特徴を反映していないことが挙げられる。陸棚の堆積物の多くは、鉄水酸化物で覆われた石英を多く含みかつヒ素に著しく富む特徴を有する。この特徴から、陸棚試料の多くは海退期-海進期に形成された残留堆積物が主で、現世の河川堆積物の寄与が小さいと考えられる。縁辺台地の堆積物の特徴として、現世のシルト質堆積物で広く覆われていることが挙げられる。これは、対馬海流(表層水)と日本海固有水(深層水)の境界が縁辺台地上(水深200-500 m)に位置しており、細粒なシルト質堆積物がこの水塊境界部で選択的に沈殿しているためである。西部縁辺台地のシルト質堆積物は、ニオブ、希土類元素、タンタル、トリウムなどに富んでおり、恐らく第四紀のアルカリ火山岩の削剥物の供給があったことを意味している。これらの堆積物は海流の影響を受けて200 kmほど東方へ運ばれていることが明らかとなった。一方、縁辺台地東方部においては、シルト質堆積物は銅、亜鉛、水銀などに富む特徴を有し、恐らく堆積物中の残留生物源物質の影響(有機物と結合して存在している)を見ていると考えられる。粘土質堆積物は隠岐トラフや海盆域に広く分布し、日本海固有水の影響を受けて、半遠洋性の非常に酸化的な環境下にある。堆積物表層部(0-4 cm)には、初期続成作用に伴う薄いマンガン酸化物層が認められ、バナジウム、コバルト、ニッケル、モリブデン、アンチモン、鉛を多く含む。このように、本調査海域の海洋堆積物の化学組成は、堆積環境に強く影響を受けていることが明らかとなった。

地質調査総合センター研究資料集

- 607 地熱開発促進調査の地化学情報整備 佐々木 宗建・阪口 圭一・佐々木 進
- 608 西之島火山：岩石学的変数のコンターマップ 宮城 磯治・下司 信夫
- 609 第 49 回 CCOP 年次総会技術セッション論文集 内田 利弘 他 3 名
- 610 第 23 回地質調査総合センターシンポジウム「日本列島の長期的地質変動の予測に向けた取り組みと今後の課題 - 数十万年の過去を解明し、将来を予測する技術・知見・モデル -」 地質調査総合センター
- 611 地質標本館所蔵鉱物の高波長分解能反射スペクトルデータ 坂野 靖行・古宇田 亮一
- 612 Geological evidence of AD 869 Jogan tsunami – a brochure for peeled tsunami deposit – (津波堆積物のはぎ取り標本の解説パンフレット) 澤井 祐紀
- 613 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図 山元 孝広
- 614 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア (5) 中塚 正
- 615 噴火推移資料集 (その 1) 及川 輝樹・宝田 晋治・東宮 昭彦・下司 信夫・星住 英夫・川辺 禎久・古川 竜太・石塚 吉浩
- 616 日本列島におけるスラブ起源水の上昇地域の分布図 風早 康平・高橋 正明・切田 司・内藤 一樹・渡部 芳夫
- 617 第 4 回火山巡回展伊豆大島火山 - 火山の恵みと 2013 年の土砂災害 - 川辺 禎久・西谷 香奈・加治屋 秋実・安孫子 昌弘・中林 利郎・山田 三正
- 618 地質標本館 2015 夏の特別展ジオパークで見る日本の地質 渡辺 真人

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	南部・北川・鴻巣・川俣・冠山
20 万分の 1 地質図幅	静岡及び御前崎 (第 2 版)・新潟 (第 2 版)・横須賀 (第 2 版)・大分 (第 2 版)
200 万分の 1 地質編集図	No. 4 日本地質図 (第 5 版) No. 11 日本の火山 (第 3 版)
特殊地質図	No. 40 関東平野中央部の地下地質情報とその応用
海洋地質図	No. 83 襟裳岬沖海底地質図 (1:20 万) No. 84 種子島付近表層堆積図 (1:20 万)
鉱物資源図	No. 7 南西諸島 (1:50 万)
構造図	No. 14 全国主要活断層活動確率地図
火山地質図	No. 18 蔵王火山地質図 (1:2.5 万) No. 19 九重火山地質図 (1:2.5 万)
水文環境図	No. 8 石狩平野 (札幌)
空中磁気図	No. 45 福井平野地域高分解能空中磁気異常図 No. 46 養老断層地域高分解能空中磁気異常図
重力図	No. 30 徳島地域重力図 (ブーゲー異常) No. 31 京都地域重力図 (ブーゲー異常) S3 甲府地域重力構造図 (ブーゲー異常)
海外地球科学図	アジア地質図 (1:500 万) 中央アジア鉱物資源図 (1:300 万) アジア鉱物資源図 (1:500 万)
海陸シームレス地質図	S-4 海陸シームレス地質情報集「石狩低地帯南部沿岸域」
燃料資源図	FR-3 燃料資源地質図「関東地方」
土壌評価図	E-6 表層土壌評価基本図「茨城県地域」
数値地質図	G-16 20 万分の 1 日本シームレス地質図 DVD 版 G-17 九州地質ガイド GT-4 全国地熱ポテンシャルマップ S-2 海陸シームレス地質情報集「新潟沿岸域」 S-3 海陸シームレス地質情報集「福岡沿岸域」 V-3 口永良部島火山地質データベース P-2 日本重力データベース DVD 版 G20-1 20 万分の 1 数値地質図幅集「北海道北部」第 2 版 G20-2 20 万分の 1 数値地質図幅集「北海道南部」第 2 版
その他	日本の熱水系アトラス 海と陸の地球化学図

地質調査研究報告編集委員会

委員長 鈴木 淳
副委員長 吉岡 敏和
委員 大谷 竜
長森 英明
柳澤 教雄
川邊 禎久
神宮 司元治
内野 隆之
森尻 理恵
高橋 浩
工藤 崇
田中 明子
板木 拓也
清水 徹

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>

Bulletin of the Geological Survey of Japan Editorial Board

Chief Editor: Atsushi Suzuki
Deputy Chief Editor: Toshikazu Yoshioka
Editors: Ryu Ohtani
Hideaki Nagamori
Norio Yanagisawa
Yoshihisa Kawanabe
Motoharu Jinguuji
Takayuki Uchino
Rie Morijiri
Yutaka Takahashi
Takashi Kudo
Akiko Tanaka
Takuya Itaki
Toru Shimizu

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66巻 第3/4号
平成27年7月24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.66 No.3/4 Issue July 24, 2015

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. 66 No. 3/4 2015

CONTENTS

- Geology and radiolarian fossils of the Upper Cretaceous Hanazono Formation in the Koyasan area,
northwestern part of Kii Peninsula, Southwest Japan
Chikao Kurimoto, Katsumi Kimura and Makoto Takeuchi 41
- Elemental distribution of surface sediments around Oki Trough including adjacent terrestrial area:
Strong impact of Japan Sea Proper Water on silty and clayey sediments
Atsuyuki Ohta, Noboru Imai, Shigeru Terashima, Yoshiko Tachibana, Ken Ikehara and Hajime Katayama
..... 81