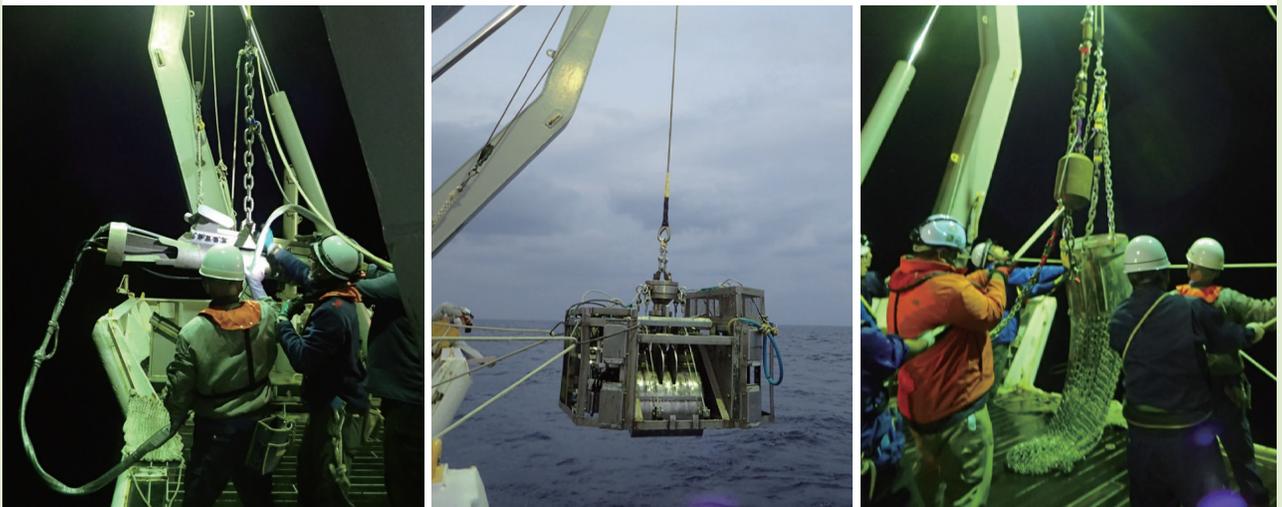


地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 74 No. 5/6 2023

特集： 鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質 —2021年度調査航海結果—



地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 74 No. 5/6 2023

表紙の写真

2021 年度トカラ列島周辺海洋地質調査

地質調査総合センター (GSJ) では 1970 年代から日本周辺海域の 20 万分の 1 海洋地質図を発行している。本特集号では沖縄トラフ北部海域調査の一環として、トカラ列島周辺海域で実施した反射法地震探査、海底地形調査、磁力調査、表層堆積物調査の結果について報告する。

上：鹿児島県トカラ列島の火山島である諏訪之瀬島に沈む夕日

諏訪之瀬島は活動的な活火山で、山頂より噴煙が上がっているのが確認できる

左上：反射法地震探査で使用する音源(エアガン)の投入

中下：表層試料を採取するための木下式グラブサンプラーの投入

右下：岩石試料を採取するためのドレッジャーの投入

(写真・文：井上卓彦)

Cover Photograph

Marine geological survey around the Tokara Islands, Kagoshima Prefecture, in Fiscal Year 2021

The Geological Survey of Japan (GSJ) has been published the Marine Geology Map Series (1:200,000) for Japan since the 1970s. In this special issue, we report the results of seismic reflection profiling surveys, bathymetry surveys, magnetic anomaly surveys, and submarine sediment surveys conducted around the Tokara Islands as part of the northern Okinawa Trough Project.

Upper: Sunset on Suwanosejima island, a volcanic island in the Tokara Islands archipelago in Kagoshima Prefecture. Suwanosejima is an active volcano, and ash plumes can be seen billowing from its summit.

Lower left: Deploying the seismic source (air gun) used in the seismic profiling survey.

Lower center: K-grab sampler for obtaining submarine sediment samples from the sea bottom.

Lower right: Deploying the dredge sampler for obtaining submarine rock samples.

(Photograph and caption by INOUE Takahiko)

地質調査研究報告
BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN
Vol. 74 No. 5/6 2023

特集：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質－2021年度調査航海結果－

巻頭言

鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質－2021年度調査航海結果－

井上卓彦・板木拓也・天野敦子187

概報

GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要

高下裕章・佐藤太一・鈴木克明193

GB21-2, GB21-3 及び GS21 航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要

佐藤太一・高下裕章203

2021年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ調査の概要

石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦211

GS21 航海での高分解能サブトムプロファイラー探査に基づくトカラ列島周辺海域の海底下浅部構造

三澤文慶・古山精史朗・高下裕章・鈴木克明231

論文

GB21-3 航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義

有元 純・宇都宮正志245

トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因

鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治259

概報

トカラ列島周辺海域(GB21-2 および 21-3 航海)で採取された海底堆積物の化学組成

久保田 蘭・太田充恒・立花好子・板木拓也・片山 肇・鈴木克明・間中光雄287

トカラ列島周辺海域における底生有孔虫群集の概要(予報)

長谷川四郎301

論文

トカラ列島周辺海域における現生貝形虫相の空間変化

中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也315

概報

トカラ列島周辺海域から海洋底調査航海 GB21-1・GB21-2 により採集されたウシオダニ類

安倍 弘325

トカラ列島南西海域より採水した底層水の水素・酸素同位体組成

及川一真・宮島利宏・高柳栄子・井龍康文329

GH18 航海において石垣島近傍海底で採取された堆積物の石灰質ナノ化石の追加検討

宇都宮正志337

巻 頭 言 : 鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質 —2021 年度調査航海結果—

井上 卓彦^{1,*}・板木 拓也¹・天野 敦子¹

INOUE Takahiko, ITAKI Takuya and AMANO Atsuko (2023) Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima prefecture: result of marine geological mapping survey cruises in Fiscal Year 2021. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 187-191, 1 fig and 1 table.

Keywords: Geological survey cruise, Marine geological map series 1:200,000, Tokara Islands, Kagoshima Prefecture, Island arc, Volcanic front, Seismic profiling survey, Bathymetric survey, bottom sediment, marine environment, magnetic anomaly

産業技術総合研究所では、国土の知的基盤整備の一環として、日本周辺海域において海洋地質図の整備を行っている。海洋地質図は、地質構造を反映した海底地質図、海底面の堆積物を反映した表層堆積図、海底深部の構造を反映した重磁力異常図からなる。2019年度までに日本主要四島周辺及び奄美大島から南の南西諸島周辺海域の調査を完了させ、2020年度から九州南方から奄美大島までの吐噶喇列島周辺海域(本稿では一般性を考慮し、トカラ列島と表す)の調査を開始した。トカラ列島は主要な島として北から口永良部島、口之島、中之島、諏訪之瀬島、悪石島が北東南西方向に直線上に並び、悪石島を境にわずかに西に方向を変え、小宝島、宝島、横当島が直線的に存在する。特に口之島、中之島、諏訪之瀬島は島弧域の火山フロントに位置しており、活発な活火山であることが知られている(例えば、下司・石塚, 2007)。また、トカラ列島西側の背弧域には、臥蛇島、平島などが存在し、海底にも多数の海底火山が知られており、近年の詳細な海底地形データから新たな海底火山が多く報告されている海域である(例えば、Minami *et al.*, 2021)。さらに西方には水深 1,000 m 以深の平坦面を呈する沖縄トラフ北部域が背弧海盆として広がる。本調査海域の陸域及び海域の地形名については第 1 表にまとめる。

2021年度は南部から北部トカラ列島周辺域において、東海大学の海洋調査研修船「望星丸」と東京海洋大学の練習船「神鷹丸」を用いた計 3 つの調査航海を実施した。東海大学望星丸を用いた調査航海は、2021年7月から8月(GB21-2航海)と11月(GB21-3航海)の2航海、東京海洋大学神鷹丸を用いた調査航海は10月に1航海(GS21航海)を実施した。望星丸を用いたGB21-2航海は2021年7月17日から8月2日に、GB21-3航海は2021年11月2日から26日に実施した。航走観測として、主に反射法地震探査、セシウム及び三成分磁力計を用いた磁気探査、マルチビーム音響測深器(MBES)を用いた海底地形調査

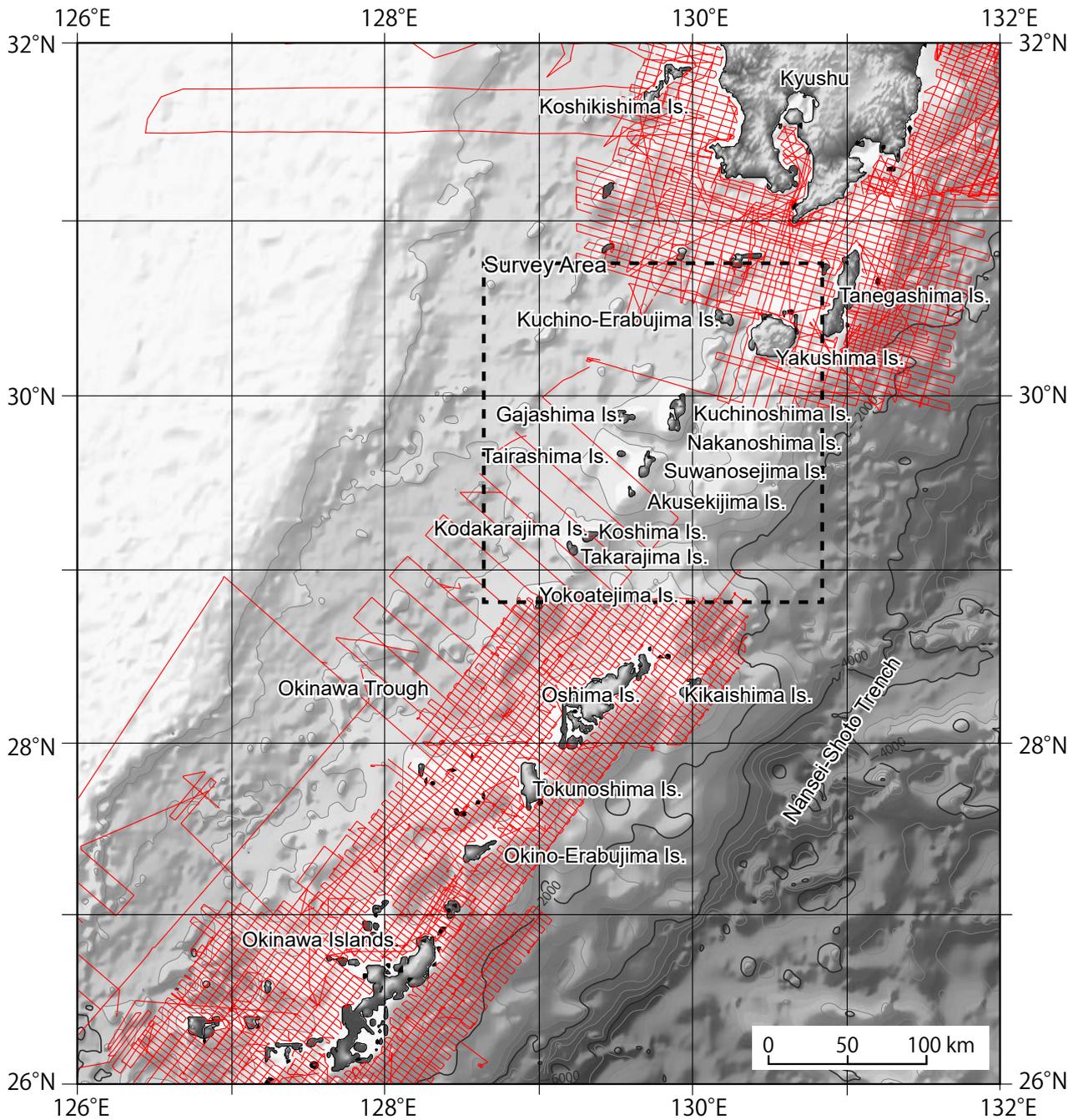
を実施し、停船観測として主にグラブ採泥器を用いた海底表層堆積物採取、ドレッジャーを用いた岩石採取、大口径グラビティコアラを用いた柱状試料採取を行った。神鷹丸を用いたGS21航海は2021年10月5日から10月23日に実施している。GS21航海では航走観測のみを実施し、反射法地震探査、セシウム及び三成分磁力計を用いた磁気探査、MBESを用いた海底地形調査とサブボトムプロファイラー(SBP)を用いた海底表層高分解能音波探査を行っている。本号ではこれらの2021年度に実施した調査航海で取得したデータについて、地質調査研究報告にまとめる。また、2020年度(2019年3月)のトカラ列島周辺海域の海洋調査(GB21-1航海)で取得した試料の分析・解析結果を含んだ報告、2018年度に石垣島周辺海域で実施した海洋地質図調査(GH18航海)で得られた海底の堆積岩の年代についての報告を含む。

本号には、カテゴリー別に論文 2 編、概報 10 編の計 12 編が収録されているが、掲載順は、カテゴリー別ではなく、海域地質図調査において基礎となるデータ及び、より古い構造を示すものから順に構成することとする。以下、個々の論文の目的や意義について簡単に紹介する。

高下ほか(2023)は、調査において取得したMBESによる高分解能海底地形調査の結果についてまとめたものである。本論文では、新たな地形データを取得し、個別の高まり(曾根)とされていたものが、沖縄トラフ縁辺に位置する連続するリッジ状の高まりの一部であることを明らかにした。またMBESデータから作成した後方散乱強度から、火山性崩壊堆積物の存在を示唆しており、トカラ列島の火山フロント部では、海底に影響を及ぼす火山活動が一般的であることを示した。海底地形は海洋地質調査の基礎となる情報で、トカラ列島周辺海域のような基礎データの少ない海域においては貴重なデータであり、今後の本海域の研究を実施する上でも大変有意義な情報となる。

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)

* Corresponding author: INOUE, T., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: inoue-taku@aist.go.jp



第1図 調査域図

赤線は2019年度までの海洋地質図航海で実施した航走観測の航跡を、黒破線で囲まれた範囲は2020年度からのプロジェクト調査域を示す。地名は国土地理院に従った。

Fig. 1 Bathymetric map around Tokara Islands.

Red lines indicate track lines carried out in geological mapping cruises by Geological Survey of Japan before 2019 FY around Japan. Box enclosed by black broken lines indicate the study area since 2020 FY. Geographical names follow Geospatial Information Authority of Japan.

第1表 調査海域における地名の対応. 地名は国土地理院及び海上保安庁による.

Table 1 Correspondence table of geographical names in the surveyed area. Geographical names are based on Geospatial Information Authority of Japan and Japan Coast Guard.

地名	ふりがな	英語表記
悪石島	あくせきじま	Akusekijima Is.
臥蛇島	がじゃじま	Gajashima Is.
上ノ根島	かみのねじま	Kaminonejima Is.
喜界島	きかいしま	Kikaishima Is.
小宝島	こだからじま	Kodakarajima Is.
小臥蛇島	こがじゃじま	Kogajajima Is.
口永良部島	くちのえらぶじま	Kuchino-Erabujima Is.
口之島	くちのしま	Kuchinoshima Is.
中之島	なかのしま	Nakanoshima Is.
沖永良部島	おきのえらぶじま	Okino-Erabujima Is.
諏訪之瀬島	すわのせじま	Suwanosejima Is.
平島	たいらじま	Tairashima Is.
宝島	たからじま	Takarajima Is.
吐噶喇(トカラ)列島	とかられっとう	Tokara Islands
横当島	よこあてじま	Yokoatejima Is.
海域地形名	ふりがな	英語表記
奄美舟状海盆	あまみしゅうじょうかいぼん	Amami Trough
臥蛇海丘	がじゃかいきゅう	Gaja Knoll
五号曾根	ごごうそね	Gogo-Sone
権曾根	ごんそね	Gon Sone
墓曾根	ひきそね	Hiki Sone
上ノ根海丘	かんのねかいきゅう	Kan'none Knoll
南墓曾根	みなみがまそね	Minami-Gama Sone
中ノ曾根	なかのそね	Naka-no-Sone
濁り曾根	にごりそね	Nigori Sone
西横当海丘	にしよこあてかいきゅう	Nishi-Yokoate Knoll
沖臥蛇堆	おきがじゃたい	Oki-Gaja Bank
沖繩舟状海盆	おきなわしゅうじょうかいぼん	Okinawa Trough
沖横当海丘	おきよこあてかいきゅう	Oki-Yokoate Knoll
大島新曾根	おおしましんそね	Oshima-Shin Sone
白浜曾根	しらはまそね	Shirahama Sone
平島曾根	たいらしまそね	Tairashima Sone
宝海丘	たからかいきゅう	Takara Knoll
俵曾根	たわらそね	Tawara Sone
横当海丘	よこあてかいきゅう	Yokoate Knoll
横ガン曾根	よこがんそね	Yokogan Sone

佐藤・高下(2023)は、海洋地質図作成の一環として実施した曳航式磁力計による地磁気観測の結果について、磁力異常をまとめたものである。本論文では磁力計の観測値に基づき全磁力異常図を作成し、加えて前年度に取得された磁気観測結果と合わせてトカラ列島全域におよぶ磁気異常を明らかにしている。その結果、島弧の島々及び複数の海底下の地形的高まりではダイポール型磁気

異常が見られ、地形との関連から火山活動によるものと推測されている。また調査海域西側の南北方向に連続する地形的高まりは、地磁気・重力的特徴から火成活動を伴う沖繩トラフの東縁部をなす地形的境界であることが示唆されている。一方、トラフ底では海底地形を伴わないダイポール型磁気異常を観測し、海底下の火成活動であると推測している。地磁気情報は、海底面に現れない

岩体の情報や火成活動の情報を推測できるため、海域の構造発達史を論ずる上で非常に重要な情報として注目される。

石野ほか(2023)は、海洋地質図の作成の一環として実施したマルチチャンネル反射法音波探査及びドレッジ調査の結果について論じている。高密度な測線間隔の反射断面をもとに、音響層序及び断層の分布、地下構造をまとめており、トカラ列島東方、西方に分けてそれぞれの海域で音響層序、堆積盆の構造、断層の分布を検討し、断層の形成時期や構造運動について考察をしている。特に本海域では、それぞれの海域毎に断層の分布・方向に傾向が見られ、今後、このような構造的特徴に加えて音響層序による地層の面的な分布を検討することで、北部沖縄トラフとトカラ列島周辺海域の構造発達史についてより詳細な議論へ進展すると期待される。これらの情報は地質構造発達史の解明のみならず、断層の連続性などの多くの地質情報の基礎となるもので、それぞれの音響層序に対応した岩石試料が採取されており、今後の発展が期待される。

三澤ほか(2023)は、GS21航海においてSBPにより得られた海底下浅部地質構造探査の結果についてまとめたものである。SBPデータは海底表層100 m程度の地層を把握できるもので、比較的新しい堆積層や活断層の分布などを確認するために用いられる。本論文ではSBP探査により明らかになった海底下浅部の地質構造を、その特徴によりトカラ列島周辺海域をいくつかに分けている。特に、海域より断層及び海底火山の分布に差があり、断層に起因したと考えられる凹地地形や階段状の地形、島嶼の間に海底火山と思われる地形的高まりの存在が報告されている。加えてより細かい堆積構造として、サンドウェーブに起因する反射面や浸食地形に類似した海域が報告されている。

有元・宇都宮(2023)は、海底から採取された堆積岩試料について、年代決定に有効な石灰質微化石の結果を論じている。本論文では石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫を用いて、トカラ列島前弧側及び背弧側から得られた試料から前期更新世以降に対比される年代を得た。これらの年代情報は海底に露出している堆積岩の形成年代を制約するもので、海底地質図作成のためには大変重要なデータである。また岩相や微化石群集組成から、これらの試料の由来する地質体は前期更新世以降の北部琉球弧における火山活動やテクトニクスを背景とした堆積作用を記録している可能性が示唆されている。これらの情報は海域地質図作成に利用されるとともに、琉球弧周辺の火山活動の理解を深めることが期待される。

鈴木ほか(2023)は、表層堆積図作成のためにトカラ列島海域において取得した堆積物試料の結果についてまとめたものである。本論文で取り扱うデータは堆積物のみではなく、海底写真の情報やコケムシ類や有孔虫、サン

ゴ類といった生物群集の情報を含む。本論文では取得データから、概ね水深800 m以上の平坦な海底に強い生物擾乱を受けた泥質堆積物が分布する一方、比較的粗粒な碎屑物については、島嶼からの碎屑物供給に加えて海底火山の存在に規制されていることを指摘している。またベッドフォームや露頭、礫質堆積物の分布が黒潮の影響によるものである可能性を論じている。さらにコケムシ類、サンゴ類、浮遊性有孔虫の検討から、黒潮が堆積物に対して、流体的な影響とともに、生物群集組成などの生物学的な影響を与えている可能性を示唆している。これらの系統的な海底堆積物の分布及びその試料は海域の基礎データとして大変貴重なものである。

久保田ほか(2023)は、海底表層堆積物試料について、主成分元素及び微量元素について計24元素を定量した結果から化学組成の特徴や分布特性について検討を行っている。本調査海域の海底堆積物は、生物遺骸粒子、苦鉄質火山岩類由来の碎屑性粒子、珪長質火山岩類由来の碎屑性粒子の3つの起源物質に由来するものと考えられ、それらの寄与率には地域性があることが指摘されている。特に諏訪之瀬島の東方沖(トカラ列島中部海域)では苦鉄質火山岩由来の碎屑性粒子の寄与が大きいことを報告している。これらの情報は本海域のみならず、日本周辺海域全域の化学組成分布へ反映が期待され、海域の基礎情報として大変貴重なデータとなりうる。

長谷川ほか(2023)は、2019年度に取得された碎屑物試料を含めトカラ列島周辺海域の73地点の試料について、有孔虫群集の産状を検討している。底生有孔虫の主要種の深度分布をもとに識別した群集は、これまでに南西諸島周辺で報告されているⅡ帯ⅠV帯の4帯に対応することを報告した。しかし、南西諸島北部の本海域と南端の八重山諸島周辺海域とでは、深度帯の水深に明瞭な相違が認められ、この相違について、底生・浮遊性有孔虫に関するいくつかの指標に着目して検討した結果、トカラ列島周辺の起伏に富んだ海底地形と黒潮の強い流れによって、局所的に多様な有孔虫遺骸群集が形成される可能性が指摘された。

中野ほか(2023)は、生物地理分布境界の渡瀬線が設定されている小宝島、悪石島間における海底生物相の変化を、現生貝形虫をモデルとして検討すると共にトカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集構造を明らかにすることを目的としている。今回の試料から産出した貝形虫の多くは、亜熱帯域～熱帯域に生息する分類群であり、トカラ列島北部と南部周辺海域の貝形虫相を比較した結果、本海域の貝形虫相の空間分布は渡瀬線によって変化せず、黒潮の影響を受けて形成される可能性が高いことを示した。

安倍(2023)は、2021年3月及び7月に実施された航海(GB21-1, GB21-2)において採取された4地点の底質試料から、6属12種のウシオダニ類、ならびに属が不明であ

るウシオダニ類とコナダニ類1種の分布を報告している。これまでウシオダニ類における属の多様性について、その生息する底質の間隙の大きさが制限要因となることが知られていたが、本論文では、属によって底質の粒径・質より深度が分布における大きな制限要因となることが新たに示された。

及川ほか(2023)は、2021年3月のGB21-1航海において採取された32地点の底層水の水素・酸素同位体組成について検討・議論をしたものである。その結果、天水線の定数項が、沖縄トラフ東縁及び宝島北部と、宝島南部及び宝島沖東方とで異なる値を示すことを報告している。また、トカラ列島南西海域の水塊の起源・分布や混合過程が複雑であることを指摘しており、横当島—宝島周辺の水塊が水深200～600 mにて一様であり、黒潮流軸周辺の鉛直混合の影響である可能性があることを指摘した。

宇都宮(2023)は2018年のGH18航海において石垣島近傍海底で採取された堆積物の石灰質ナノ化石について検討を行っている。この調査で得られた試料の石灰質ナノ化石の保存は良好であり産出頻度も高かった。この試料から得られた石灰質ナノ化石の年代指標から本試料の堆積年代は3.61～2.76 Maに制約されることが報告されている。これらの情報は海洋地質図の作成に利用されるのみならず、八重山諸島周辺海域の構造発達史の解明の一助になることが期待される。

これらの研究成果は、調査日数の確保や多くの研究員・調査員の協力により実施することが出来た海域における系統的な調査に基づくもので、全てのデータが学術的にも貴重なものと言える。本報告の多くは速報的なものであり、今後堆積学・構造地質学・地球化学・古生物学等が互いに連携することで学術的に飛躍すると考えられる。これらのデータは今後、20万分の1海洋地質図として取りまとめていく予定であるが、それに加え、これらの成果を「地質調査研究報告」に集約して出版することにより、今後の地質学研究への応用や発展に寄与することを期待する。

謝辞: 本調査を行うにあたり、東海大学海洋調査研修船「望星丸」の上河内船長をはじめとする乗組員、調査員の皆様、東京海洋大学練習船「神鷹丸」の宮崎船長をはじめとする乗組員及び調査員の皆様、乗船学生の方々に大変お世話になりました。GB21-1航海において、海洋技術開発株式会社にはコンプレッサーの管理をして頂き長期間の連続調査が可能となった。また、本特集号を取りまとめるにあたり、ご承認頂くとともに、地形名の取りまとめなど様々なご協力を頂いた鈴木 淳委員長をはじめとする編集委員会・事務局の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

安倍 弘(2023)トカラ列島周辺海域から海洋底調査航

海GB21-1・GB21-2により採集されたウシオダニ類。地質調査研究報告, 74, 325–328.

有元 純・宇都宮正志(2023) GB21-3航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義。地質調査研究報告, 74, 245–257.

下司信夫・石塚 治(2007)琉球弧の火山活動。地質ニュース, no. 634, 6–9.

長谷川四郎(2023)トカラ列島周辺海域における底生有孔虫群集の概要(予報)。地質調査研究報告, 74, 301–314.

石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦(2023) 2021年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ調査の概要。地質調査研究報告, 74, 211–230.

高下裕章・佐藤太一・鈴木克明(2023) GB21-2, 3トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要。地質調査研究報告, 74, 193–202.

久保田 蘭・太田充恒・立花好子・板木拓也・片山 肇・鈴木克明・間中光雄(2023)トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された海底堆積物の化学組成。地質調査研究報告, 74, 287–300.

Minami, H., Ohara, Y. and Tendo, H. (2021) Volcanic and tectonic features of Shirahama Bank in the northern Ryukyu Arc: Implications for cross-arc volcanism controlled by arc-parallel extension. *Marine Geology*, 441, 106623.

三澤文慶・古山精史朗・高下裕章・鈴木克明(2023) GS21航海での高分解能サブボトムプロファイラー探査に基づくトカラ列島周辺海域の海底下浅部構造。地質調査研究報告, 74, 231–243.

中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也(2023)トカラ列島周辺海域における現生貝形虫相の空間変化。地質調査研究報告, 74, 315–324.

及川一真・宮島利宏・高柳栄子・井龍康文(2023)トカラ列島南西海域より採水した底層水の水素・酸素同位体組成。地質調査研究報告, 74, 329–336.

佐藤太一・高下裕章(2023) GB21-2, GB21-3及びGS21航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要。地質調査研究報告, 74, 203–209.

鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治(2023)トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因。地質調査研究報告, 74, 259–286.

宇都宮正志(2023) GH18航海において石垣島近傍海底で採取された堆積物の石灰質ナノ化石の追加検討。地質調査研究報告, 74, 337–338.

(受 付 : 2023年12月6日 ; 受 理 : 2023年12月8日)

GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要

高下 裕章^{1,*}・佐藤 太一¹・鈴木 克明¹

KOGE Hiroaki, SATO Taichi and SUZUKI Yoshiaki (2023) Results of the multibeam echo sounder observations on the GB21-2,3 cruises (around Tokara Islands). *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 193-202, 7 figs and 1 table.

Abstract: The high-resolution bathymetry was observed using Multibeam echosounder (MBES) as a part of an ongoing seafloor mapping around Tokara Islands, a region from latitude 28°45' N to 31°15' N, and longitude 128°50' E to 131°20' E. The bathymetry map indicates that several bathymetric highs such as Hiki Sone, Minami-Gama Sone, Gon Sone, and Tairashima Sone, are part of a continuous ridge-like feature and possibly is located on the edge of the Okinawa Trough. The backscatter intensities are relatively high around Kuchinoshima, Nakanoshima, Gajashima, Kogajajima, Suwanosejima islands, and Hiki Sone, which suggest the presence of volcanic collapse depositions around them. Such high-backscatter intensities are also shown around Akusekijima and Tairashima islands suggesting distribution of volcanic collapse depositions, too. The result indicates that volcanic activities accompanied by volcanic collapses is common along the volcanic fronts of the Tokara Islands.

Keywords: Tokara Islands, Okinawa Trough, Bathymetry, Volcanoclastic material, Backscatter strength

要 旨

トカラ列島周辺海域の、北緯28度45分から北緯31度15分、及び東経128度50分から東経131度20分の範囲において、海域地質図作成を目的としたマルチビーム音響測深装置 (MBES) を用いる航走観測を実施し、高解像度海底地形データ及び後方散乱強度データを取得し解析した。統合した地形からは、当該海域に含まれる特徴的なリッジ状の地形が、ひきそね 慕曾根・みなみがまそね 南慕曾根・ごんそね 権曾根・たいらしま 平島曾根を含む一連の高まりを形成し、その位置は沖縄トラフと島弧の境界に相当することが示唆された。後方散乱強度は、くちのしま 口之島、なかのしま 中之島、がじゃじま 臥蛇島・こがじゃじま 小臥蛇島、すわのせ 諏訪之瀬島、及び慕曾根周辺で高く、広く火山砕屑物が海底面を覆っている可能性が示唆された。同様に高い後方散乱強度分布はあくせきじま 悪石島、たいらしま 平島周辺でも見られることから、トカラ列島の火山フロント部では、広域に海底を覆う崩壊を伴う火山活動があった可能性が示唆された。

1. はじめに

GB21-2, 3 調査航海では主としてトカラ列島周辺海域の北緯28度45分から北緯31度15分及び東経128度50分から東経131度20分の範囲においてマルチビーム音響測深装置 (MBES) による海底地形航走観測を実施した。第

1図に本年度調査が行われた調査航海の全測線図を示す。本報告書では、測深データの取得方法・データ処理・処理結果の報告と、得られた結果に基づく調査海域の海底地形の記載と予察的解釈を記す。また、海底地形データと同時に取得された後方散乱強度分布についても報告する。

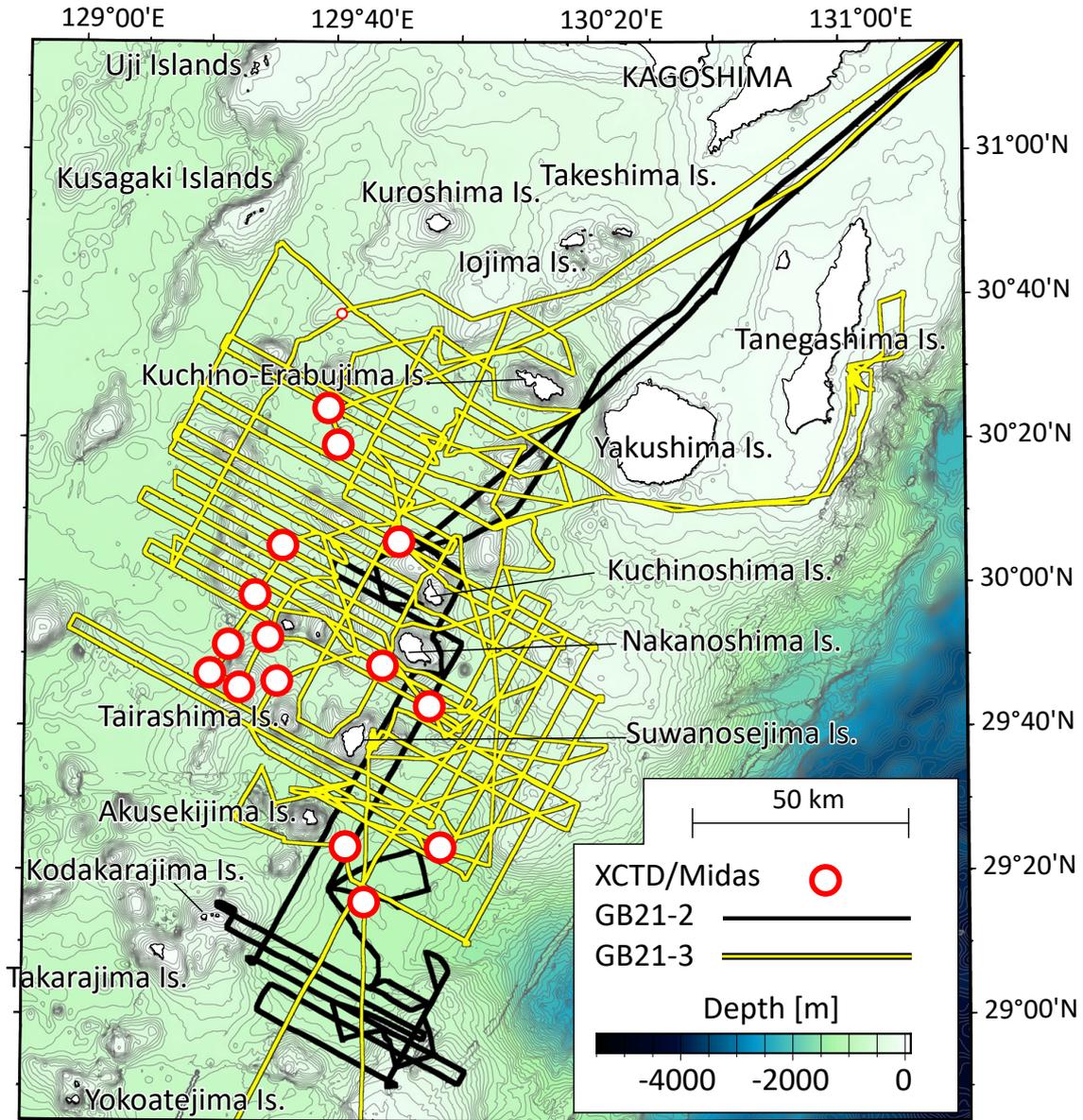
2. 装置及びデータ処理

これまで行われてきたトカラ列島の調査航海に続き、GB21-2, 3 調査航海では、東海大学所有の海洋調査研修船「望星丸」に搭載されている観測機器 (高下ほか, 2022) を使用した。同海域では同大学所有の練習船「神鷹丸」によるGS21航海でもマルチビーム音響測深を試みたが、マルチビーム測深器の不調によりデータを得られなかったので本書には含めない。

望星丸は全長87.98 m, 全幅12.80 mで、船体のヘディングはMBES専用のアンテナによるGPSコンパス機能により、ロール・ピッチ・ヒープはMRU 5+MKII (動揺センサー) により、それぞれ観測した。本観測航海を含む、2020年4月以降に実施された全ての観測航海では、日本の海域では準天頂測位衛星みちびきのLIS信号によるサブメートルスケールの測位が可能であり、みちびきの配信するSBAS信号を受信することで測位精度を維持して

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)

* Corresponding author: KOGE H., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: koge.h@aist.go.jp



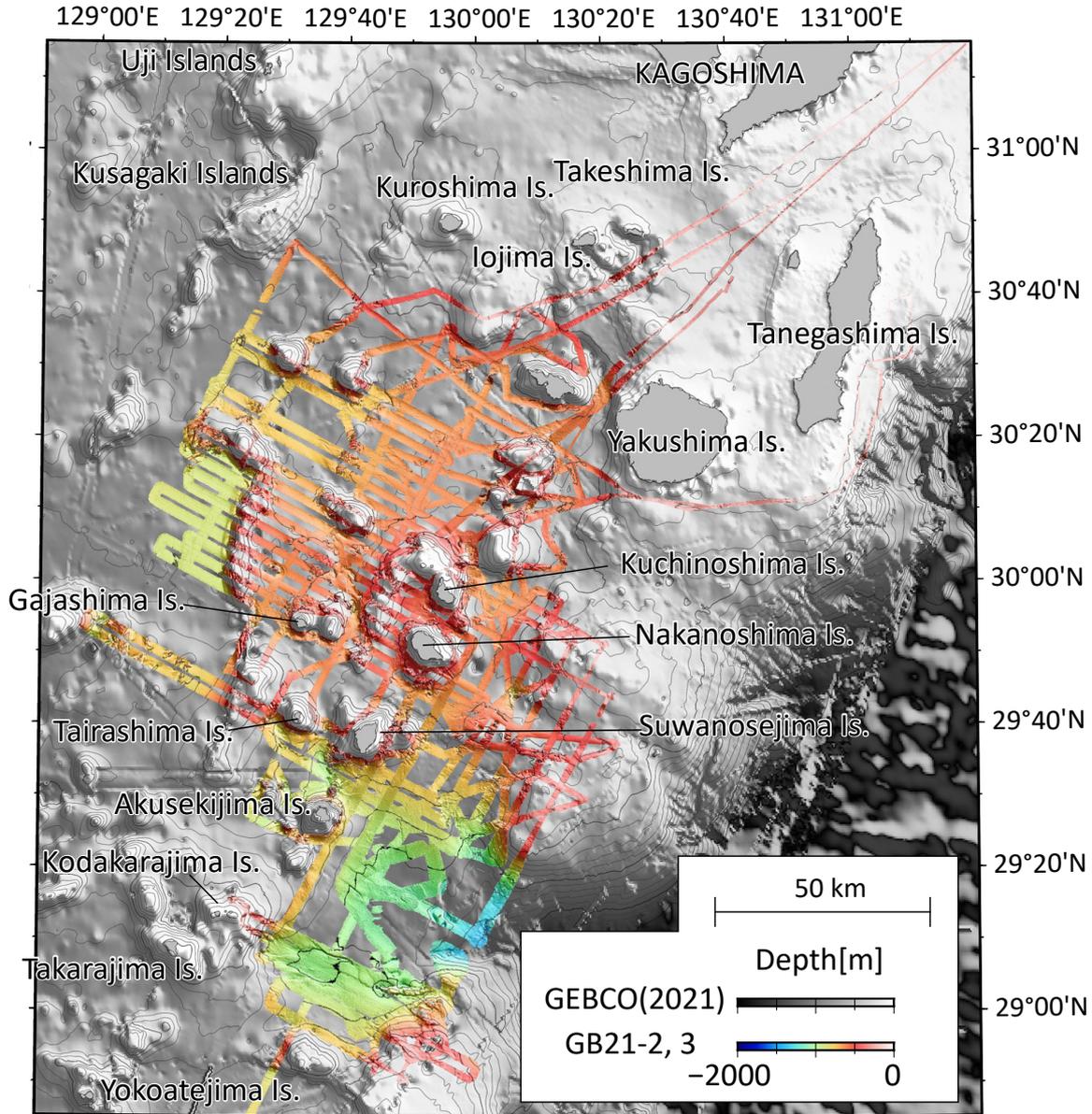
第1図 GB21-2, 3航海の調査海域及び測線図。黒色実線はGB21-2を、黄色実線はGB21-3航海測線を表す。赤丸は音速度観測を行った箇所を表す。地形はGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを使用した。

Fig.1 Survey area and Track lines of the GB21-2, 3 cruises. The solid black line represents the GB21-2 and the yellow line represents the GB21-3. The red circles indicate the locations of the sound velocity observations. Bathymetry data was used the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021).

いる。船体動揺データはSeapath380-5+ (船体動揺船首方位測定装置：以下Seapath)により取得し、測位情報と統合した。

調査船の船底音速 (表面音速) は、音響ビームを望む方向に放射するために重要である。望星丸では船底から機関室に海水を汲み上げて循環させるタイムオブフライト方式の音速度センサー (Applied Microsystems Ltd.社製Micro X, SV-Xcharge)により、リアルタイムで船底音速度 (精度：±0.025 ~ 0.50 m/s)を観測した。観測され

た音速度値は望星丸搭載のMBES (EM302, Kongsberg社製、周波数30kHz)に入力した。取得されたデータに対して、CARIS社製のソフトウェアHIPS & SIPS 11.4.3を用いて、音速度・船体動揺・船体位置データに基づく水深値の再計算とエラーデータの除去を施した。再計算・再処理された海底地形データは緯度・経度・深度のアスキーファイル出力を行い、GMT (Generic Mapping Tools ver. 6; Wessel *et al.*, 2019)のnearneighborアルゴリズムにより、水深40 ~ 1,400 mである本調査海域において、グリッド



第2図 GB21-2, 3航海で取得した海底地形図. グリッド間隔は50 mである. 背景にグレースケールでGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを表示した.

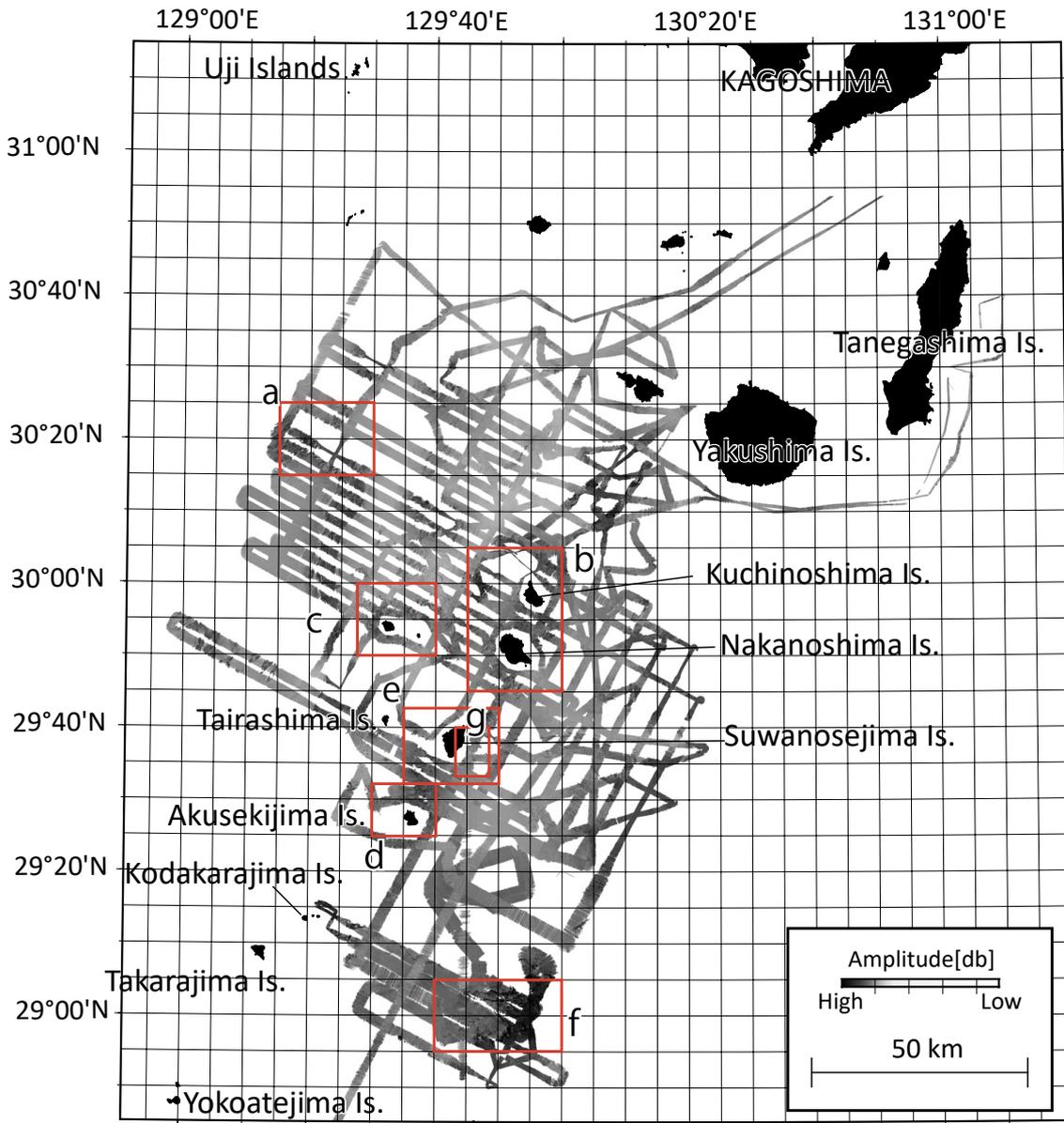
Fig.2 The cleaned bathymetry of GB21-2, 3. Grid space is 50 m. In the background, the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021) is drawn in gray scale.

間隔50 mの地形データを作成した(第2図).

海底地形データと同時に取得された後方散乱強度データの処理には, CARIS社のHIPS & SIPS 11.4.3を用いて, 初めに望星丸のビームパターンを計算し, 次にSIPS BackScatter (WMA with Area based AVG)によりグリッド間隔20 mのデータを作成した. これによって, 異なる海況や, 船などにより得られる絶対値が変化する後方散乱強度をある程度規格化して扱うことを可能にした. 本処理で出力したデータはGMTを用いて後方散乱強度分布図を作成した(第3図). なお, 後方散乱強度は観測原理

上, 海底地形データより高解像度のデータを取得するため, より細かいグリッドを作成することができる. 今回20 mグリッドとしたのは, 全域のデータを計算するために用いた計算機性能上の制限のためであって, 狭い範囲に限定すれば, 例えば1 mグリッドなどを作成すること可能であった(第6図).

マルチビーム測深器を含む音波を使用する観測は, 音源から放出された音波が, 海底などの反射面に到達して戻るまでにかかる時間(往復走時)を観測している. 音波の移動経路に沿う音速の推定値 (= 音速度プロファイ



第3図 GB21-2, 3航海で取得した後方散乱強度図。黒い場所ほど反射強度が強い。赤枠は第5, 6図で拡大図を示す箇所。

Fig.3 Backscatter image observed by the GB21-2, 3. The black suggests stronger reflection. The red frame indicates the focused image in Fig. 5 and 6.

ル)は、往復走時に基づいて距離に変換するために必要である。水中の音速度プロファイルは、XCTD (XCTD-4, 鶴見精機製), 及び産総研が所有する音速度計 (Midas MiniSVP, Valeport社製。以下Midasと省略)により、水深500~1,000 mまでの観測に基づいて作成した(第1表及び第4図)。XCTD観測は鶴見精機のデジタルコンバータTS-MK150Nに専用のハンドランチャを接続して同社のXCTD-4プローブ(最大観測深度:1,850 m)を装着し、航行する船舶の後方から海中にプローブを投入して計測す

る。XCTDプローブは電磁誘導型セルによる電気伝導度の観測を行う。鶴見精機のXCTDプローブの詳細についてはMizuno and Watanabe (1998)を参照されたい。XCTDによる観測は、同航海中に実施した曳航体(セシウム磁力計・エアガン・ストリーマケーブル)投入前後の低速航行時に、海況に応じて実施した。XCTDによる観測は、GB21-2航海とGB21-3航海でそれぞれ2回ずつ実施した。観測生データのサンプリング周波数は25 Hzであり、収録ソフトにより生データ(.RAWファイル)、全

トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム観測概要（高下ほか）

第1表 GB21-2, 3 調査航海における音速度観測一覧.

Table.1 The list of sound velocity observations during GB21-2 and 3 cruises.

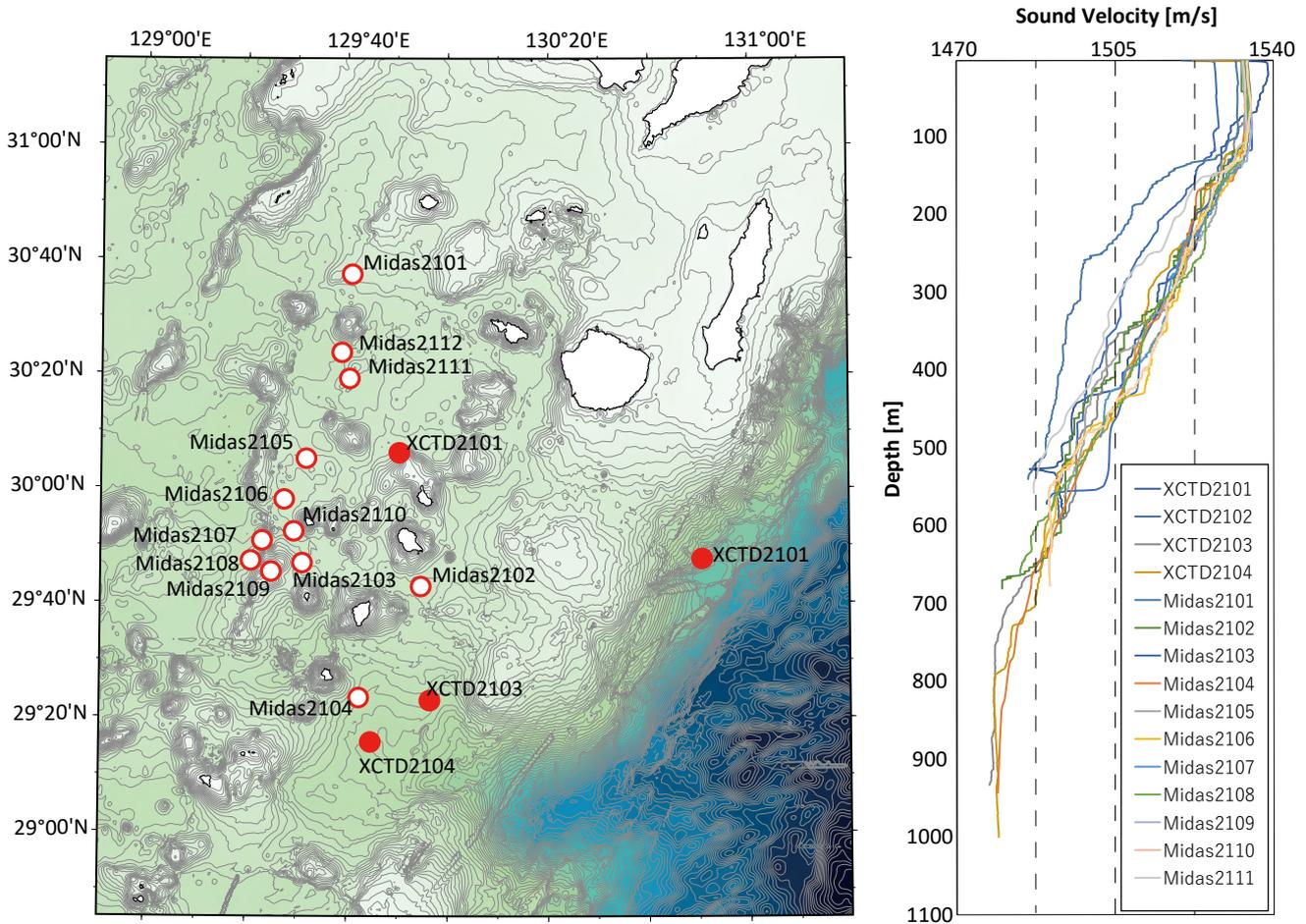
Name	Cruise	Date	Time(JST)	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Site (Sampling)
XCTD2101	GB21-2	2021/7/26	07:11:00	30°06.1456'	129°50.3500'	590	-
XCTD2102		2021/7/28	07:19:00	29°48.0000'	129°48.4166'	596	-
XCTD2103	GB21-3	2021/11/4	14:37:29	29°22.8868'	129°56.4442'	933	-
XCTD2104		2021/11/11	06:48:36	29°15.6333'	129°44.7000'	1000	-
Midas2101		2021/11/13	19:21:35	30°37.2985'	129°40.8755'	539	g356
Midas2102		2021/11/15	18:06:22	29°42.8066'	129°54.6632'	680	g199
Midas2103		2021/11/19	10:00:00	29°46.9059'	129°31.0792'	571	g245
Midas2104		2021/11/20	17:40:18	29°23.3909'	129°42.360'	943	g119
Midas2105		2021/11/21	09:53:22	30°05.1237'	129°31.8315'	562	g299
Midas2106		2021/11/21	11:22:35	29°57.9960'	129°27.4595'	639	g283
Midas2107		2021/11/21	12:51:35	29°50.8193'	129°23.0847'	485	g265
Midas2108		2021/11/21	13:54:01	29°47.3029'	129°20.8613'	662	g264
Midas2109		2021/11/21	14:50:41	29°45.3928'	129°24.9019'	136	g244
Midas2110		2021/11/21	16:02:12	29°52.4322'	129°29.3784'	676	g266
Midas2111		2021/11/24	11:49:48	30°19.0935'	129°40.4151'	557	g326
Midas2112		2021/11/24	13:04:47	30°23.6533'	129°38.8635'	676	g237

データ(CTDファイル)、深度1 m間隔データ(CTDファイル)に変換した3種類のデータを出力した。なお、電気伝導度から塩分への換算、深度の計算、音速度の計算には、それぞれの観測機器に付属のソフトウェアを用いた。Midasは表層採泥器として用いた木下式グラブ採泥器(K-グラブ)の側面フレーム内部に固定し、採泥器が通過する海水中の音速度を計測するものである。Midasによる計測はGB21-3航海で合計12回実施した。一般的なCTD観測では観測機器下降中の乱流の影響を避けるためにセンサーを下方に向けて固定し観測を行うが、センサー部を下のまま固定すると、K-グラブが転倒などした際にセンサー部が海底面に接触し、破損する可能性がある。そのため、本観測では破損を回避するために、Midasのセンサーを上向きで固定した。Midasの音速度センサーにはタイムオブフライト方式を採用しており、計測範囲は1,400 ~ 1,600 m/s、分解能は0.001 m/s、精度は±0.02 m/sである。音速度センサー部は、トランスデューサーから音響パルスを発振して反射板からトランスデューサーにまで戻るまでの時間を計測して、音速度を求める(同型機のウェブサイトを参照にここに載せる。https://www.valeport.co.uk/products/midas-svx2/)。電気伝導度計には電磁誘導式センサーを用いており、計測範囲は0 ~ 80 mS/cm、分解能は0.003 mS/cm、精度は±0.01 mS/cmである。温度計には白金測温抵抗高速センサーを用いており、計測範囲は-5 ~ 35 °C、分解能は0.001 °C、精度は±0.01 °Cである。圧力計にはピエゾ抵抗センサーを用いており、計測限界は600 Bar (約6,000 m)、分解

能は0.001%FSR、精度は±0.05%FSRである。観測に用いるセンサーには2022年3月にメーカーによる校正が行われた。機器の設定は制御用のソフトウェアDataLog Expressを用いた。GB21-3航海では、Midasによる全ての観測で連続測定モード(Continuous Mode, 8 Hz)で観測を行った。圧力センサーの出力は圧力と深度から選択可能であるところ、本航海では深度を選択した。本報告書では深度1 m毎の平均値を計算して解析に用いた。第4図に得られた音速度プロファイルをまとめた。Midasによる音速プロファイルは一般的なCTDのオペレーションに倣い、上昇時のデータは使用していない(高下ほか, 2022)。

本報告で示した海底地形図は以上の観測データに加えて、同等の精度で取得した既存のGH11航海のデータ(佐藤・小田, 2014)にGK20, GB21-1航海のデータ(高下ほか, 2022)をGMTのgrdblendコマンドにて統合して作成した(第7図)。

grdblendコマンドでは測線が重複している場合には、加重平均法に基づき航海ごとの重み付けが出来る。例えば、音速度を頻繁に求めた航海のデータや、海況が穏やかで波浪の影響が大きくなかった航海のデータがあれば、それらに重みを置いて統合することも有効と思われる。ただし広域データを統合する際に異なるUTMゾーンを含む場合には、処理内で座標変換がうまくいかず大きく座標がずれることがある。そのため、同じ座標系同士で一度データを切り取って合成するなどの手順を踏むことが必要である。本航海のデータ及び過去の航海データ



第4図 GB21-2, 3航海の音速度観測から得た海中音速度プロファイルとその観測位置. XCTDを赤丸, Midasを白抜き赤丸で示す. 地形はGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを使用した.

Fig.4 Sound velocity profiles obtained at GB21-2, 3 and the index map. A red circle indicates XCTD observations, and a white filled circle indicates Midas observations. Bathymetry data was used the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021).

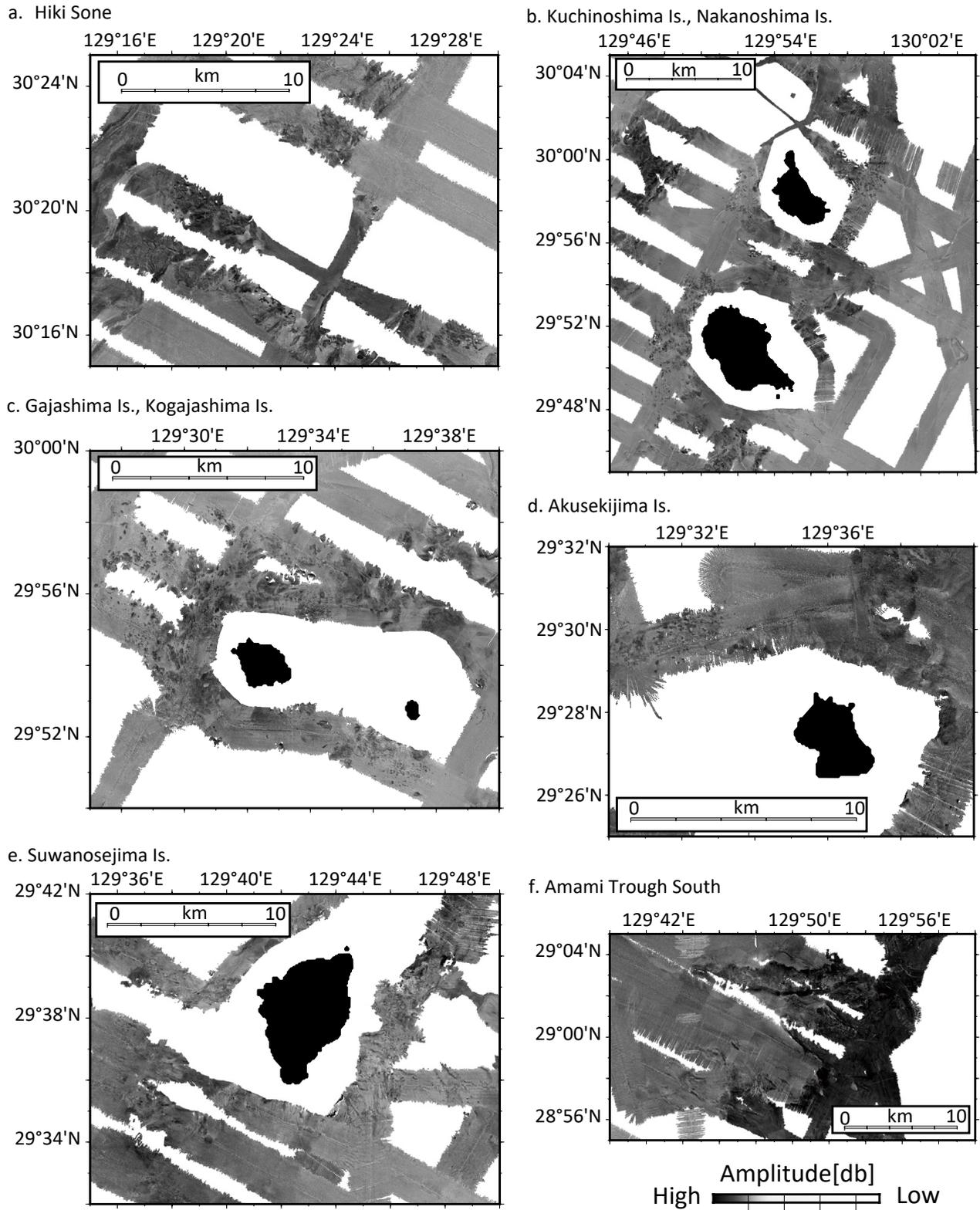
は、基本的にすべてKongsberg社製のEMシリーズで取得されたものであり、データの品質差が顕著ではなかったため、重みづけは用いずに統合した。

3. 観測結果

音速度プロファイルは、海面から100から150 m程度の表面混合層を持つ。GB21-3航海の日ごとのデータを比較すると、Midas2101のみ音速度が全体的に遅い傾向が得られた。黒潮と大陸河川の影響を複雑に受ける海域なので原因の考察は難しい。

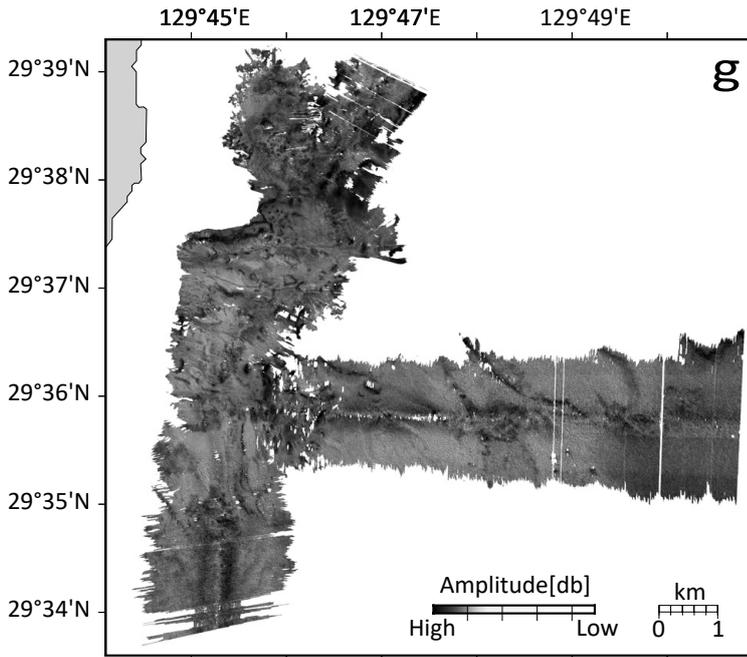
統合地形データを第7図に示す。調査海域の地理的呼称は海上保安庁のホームページ「海しる」で公開されている海底地形名レイヤに記載された地名を参照・使用した(海上保安庁, 2022)。まず、水深は十島村の島々で構成される北東方向に連続する島弧を中心に西側の沖縄トラフ及び東側の琉球海溝へ向かい増加する傾向にある。第7図に示すトラフ側(緯度29°40' N-30°40' N, 経度129°

E-130° E)を見ると、今回新たに得られた地形では暮曾根・南暮曾根・権曾根・平島曾根で連続するリッジ状の地形的高まりが形成されており、それを扶んで西側では平坦面が広がっていることが明瞭に示された。さらに西には、平坦面の中の地形的高まりとして臥蛇海丘が存在する。第7図の海溝側(緯度28°45' N-29°40' N, 経度129°20' E-130°20' E)では、トカラ海底谷に向かって水深が全体的に深くなるような、すり鉢状の地形を示す。奄美舟状海盆の中、水深1,200 mの部分でコンターに沿ったチャンネルのような凹地形が幅800 m比高100 m(第7図中矢印A)が形成されている。ただし、連続性が低く海盆の可能性も考えられる。ほかのチャンネルのような構造として1000 m部分のコンターが細かく切れている箇所や(第7図中矢印B)、南海トラフや他の沈み込み帯で一般的に見られる明瞭な海底谷(例えば少し北にある中種子海底谷など)が第7図中矢印C(幅1,500 m, 比高100 m)などにみられた。



第5図 GB21-2, 3航海で取得した後方散乱強度図の拡大図。黒い場所ほど後方散乱強度が強い。

Fig.5 Focused backscatter image observed by the GB21-2, 3. The darker color indicates stronger reflection.



第6図 GB21-3航海で取得した1 mグリッドの後方散乱強度図の拡大図。第3図におけるgに対応。黒い場所ほど後方散乱強度が強い。

Fig.6 1 m gridded backscatter image obtained on the GB21-3 cruises corresponds to g in Fig. 3. The darker color indicates stronger reflection.

後方散乱強度については第3図を基に概略を記す。第3図を拡大し、第5図で観察すると、2020年度調査(高下ほか, 2022)にて悪石島や平島の周辺の海底で見つかった、後方散乱強度の小さな海底面に後方散乱強度が相対的に大きな直径50～300 m程度の不定形の領域が200 m程度の間隔で点在するごま塩状のファシス(白黒入り乱れた斑状の平面的広がりのことを指す)が、口之島、中之島、臥蛇島・小臥蛇島、諏訪之瀬島、蓼曾根の周辺で見つかった(第5図)。島ごとに、このごま塩状のファシスの分布範囲は異なっており、例えば諏訪之瀬島周辺では島の東側に偏る一方で、臥蛇島・小臥蛇島周辺では島の西側にその偏りを持つ。また、これらとは異なり、広範囲で強い後方散乱強度を示す箇所がトカラ海底谷南側の奄美海脚上(緯度29°N経度129°50'E付近)に見られた。ここでは東西方向に2本の線状構造(長さ～13 km)も観察される。

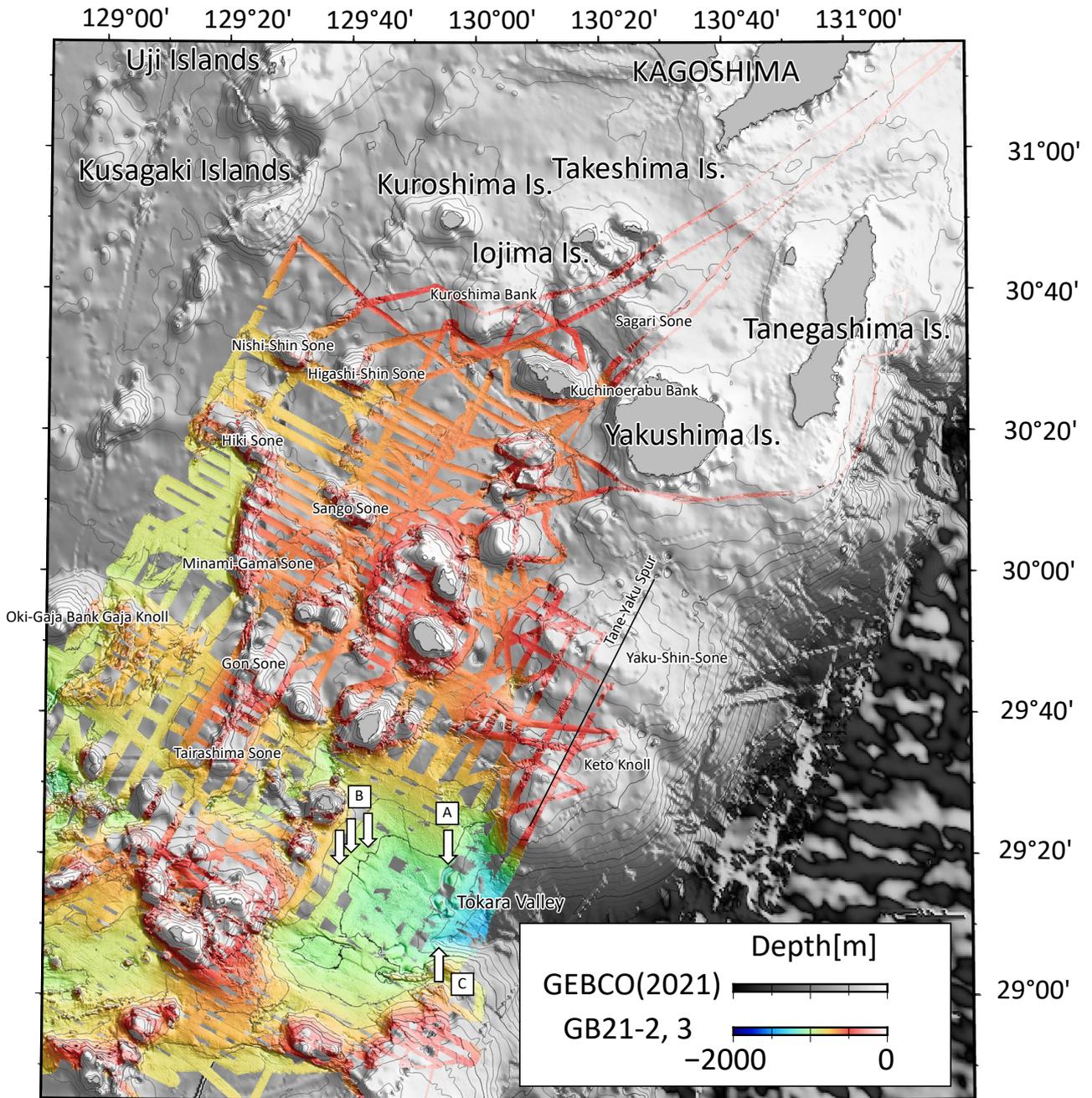
4. 考察

地形補正に用いるために取得した海水の音速度プロファイルは、一般に、温度・塩分及び圧力によって支配される。Schmidt *et al.* (2006)によると一般的な音速度プロファイルでは、海面波浪の作用による表層水の混合により、海面から水深数十メートルまで等速層が示される。この層は表面混合層と呼ばれる(例えば気象庁, 閲覧日: 2022年9月30日)。その下には、季節変性の温度躍層及び水塊構造に応じたより大きな温度躍層が存在し、音速度はこの区間では温度の低下と同調して減少する。これらの温度躍層より深い水深では、温度変化が少なくなり、圧力上昇影響が支配的になる。そのため、一定の深度を

超えると水深に依存する値へと変化する。しかし、今回観測したプロファイルはこうした一般的な音速度プロファイルと様相が異なり、海面から100から150 m程度の表面混合層を持つことが明らかになった。東シナ海は長江、黄河など大陸河川から供給される多量の淡水の影響下にあることが知られており(Kubota *et al.*, 2015)、本海域ではそれと同時に黒潮の影響も受けていることが考えられる。本航海で観測された表面混合層の成因については、CTDのデータなども組み合わせる議論が必要となる。

GB21-1航海で得られた地形では、平島・臥蛇島の西北西方向(N24°E)に比高100 m程度の西落ちの崖が連続して存在している(高下ほか, 2022)。これと同様に、蓼曾根・南蓼曾根・権曾根・平島曾根で連続するリッジ状の地形的高まりが存在するが、Minami *et al.* (2022)では沖縄トラフのouter trough内の構造と考えられている。これより西方の平坦面に現れる臥蛇海丘は、磁気異常の観測結果から(佐藤・高下, 2023)、その成因が火山性ではない可能性が高い。隣の沖臥蛇堆^{おきがじやたい}もまた、過去にとられた広域の磁気異常の観測結果から(CCOP and GSJ, AIST, 2021)、火山性ではない可能性が高い。沖縄トラフ形成の影響と考えられるが詳細は不明である。

後方散乱強度は、発振した音波が観測対象にあたって跳ね返り、受振される際の強度を観測している。一般的に、観測機器に斜面が向いている場合と、海底表面が固い場合に大きな値を返す。したがって斜面の効果を除けば底質の違いを反映する値が得られるが(露岩は反射が強く、堆積物は弱い)、音響測深機は水深の変化に応じて適切な反射強度が得られるように発振強度を自動で調



第7図 GB21-2, 3航海にて取得されたMBESデータを過去のGH11, GK20, GB21-1航海のデータと統合したトカラ列島周辺海域の海底地形。グリッド間隔は50 mである。背景にグレースケールでGEBCO Compilation Group (2021)による15秒(およそ360 m)統合グリッドを表示した。矢印はチャネルのような凹地形 (A), コンターが細かく切れているチャネル状の構造 (B), 及び海底谷 (C)。

Fig.7 The 50 m gridded bathymetry color map integrating GB21-2, GB21-3, GH11, GK20, and GB21-1 cruises. The background is a grayscale bathymetry map gridded at 15 arc seconds (GEBCO Compilation Group, 2021). The arrows indicate channel-like depressions (A), channel-like structures with fine contours (B), and submarine canyons (C).

整する場合が多いので、一様に値だけを比較して判断することは出来ない。また水深の変化だけでなく、観測で使用了船上装置の船ごとに値を算出する基準が異なることや、さらに海況にも発振強度は大きく影響を受けるので、同一箇所であっても違う値を示すことも一般的である。異なる環境で取得した複数の後方散乱強度値を統合すると、人工的な段差ができることも多い(高下ほか, 2022)。今回は望星丸EM302のビームパターンを計算した後に、SIPS BackScatter (WMA with Area based AVG)で全体の後方散乱強度を計算し、各航海及び測線間の数値を発振強度に依存しないよう規格化する試みを行った(第3図)。その結果、GB21-1航海で見られたような機械的アーチファクトが減少した。そのため、本処理は水深に変化が大きい海域で複数のデータを統合するにあたっては重要な処理であると考えられる。このような処理をおこなった結果、口之島、中之島、臥蛇島・小臥蛇島、諏訪之瀬島、暮曾根の周辺に見つかったテクスチャは、火山碎屑物が海底面付近に分布することを示す可能性が考えられる。諏訪之瀬島周辺では島の東側に、臥蛇島・小臥蛇島周辺では島の西側に偏りを持ち、トカラ海底谷南側の奄美海脚上では面的に見られた強い後方散乱強度の偏在は、火山性物質の噴出や山体崩壊などの地形制約による崩壊堆積物の偏在を表している可能性も高い。加えて、通常時の堆積物供給によって崩壊堆積物の一部または全部が覆い隠されている場合も考えられ、崩壊堆積物が偏在する実態や要因を後方散乱強度のみから特定することは難しい。ごま塩状のファシスが各島の周辺にそれぞれ観察されたことから、火山碎屑物がトカラ列島の火山フロント周辺の島及び海底火山周辺の海底面を広く覆っている可能性は示唆される。東西方向に観察された2本の線状構造の成因等詳細は現時点では不明である。

謝辞: 今回の調査では、望星丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、産総研リサーチアシスタントや乗船学生の方々、及び調査団の研究員の皆様には調査機器の運用やデータ記録に関してご尽力頂きました。望星丸における観測については、特に玉井隆章技術員、東海大学・佐藤悠介氏及び永井あすか氏、東京大学・山本一平氏の尽力により実現されました。また、査読者の方の有益なコメントにより、本稿は大幅に改善されました。皆様に篤く謝意を表します。

文 献

- Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST (2021) Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Revised. Geological Survey of Japan.
- GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid. doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cfe053-6c86abc09f8f
- 海上保安庁 (2022) 海しる, <https://www.msil.go.jp/msil/hm/topwindow.html> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 気象庁 (2022) <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/knowledge/mixedlayer.html> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) GB21-1及びGK20航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **73**, 211–217.
- Kubota Y., Tada R. and Kimoto K. (2015) Changes in East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene deduced from a freshwater flux reconstruction of the Changjiang (Yangtze River) based on the oxygen isotope mass balance in the northern East China Sea. *Climate of the Past*, **11**, 265–281.
- Mizuno, K., Watanabe, T. (1998) Preliminary results of in-situ XCTD/CTD comparison test. *Journal of Oceanography*, **54**, 373–380.
- QGIS.org (2022) QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 佐藤太一・小田啓邦 (2012) GH11航海(沖縄トラフ-東シナ海)海域の海底地形. 荒井晃作(編)「東シナ海沖縄トラフ海域の海洋地質学的研究」平成23年度研究概要報告書—北部沖縄トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 19–28.
- 佐藤太一・高下裕章 (2023) GB21-2, GB21-3及びGS21航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **74**, 203–209.
- Schmidt, V., Chayes, D., Caress, D. and Aquarium, M. B. (2006) The MB-System Cookbook. Revision, 1(2006), 02.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564.

(受 付 : 2022年10月31日 ; 受 理 : 2023年9月11日)

GB21-2, GB21-3 及び GS21 航海 (トカラ列島周辺海域) における磁気異常観測の概要

佐藤 太一^{1,*}・高下 裕章¹

SATO Taichi and KOGE Hiroaki (2023) Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 203–209, 3 figs and 2 tables.

Abstract: Geomagnetic surveys were conducted to make a marine geophysical map in the northern part of the Tokara Islands. A total magnetic anomaly map was made based on the observed total magnetic field. In addition, a magnetic anomaly map of the whole Tokara Islands was made together with the total magnetic anomaly calculated from the vector magnetic surveys obtained in the southern Tokara Islands last fiscal year. Magnetic dipole anomalies are observed around the island arc area and several bathymetric highs, presumed to be due to volcanic activity. Geomagnetic and published gravity features suggest that the north-south trending ridge on the western side of the survey area forms the eastern edge of the Okinawa Trough containing igneous activities. A positive magnetic anomaly is observed in a part of this topographic ridge, which is presumed to be due to magnetization caused by surface volcanic activity or a deep-seated magnetic body. On the trough, a positive magnetic anomaly without seafloor bathymetry is observed. Based on the published regional magnetic map, this anomaly is considered part of a magnetic dipole anomaly, suggesting subseafloor magmatic activity.

Keywords: Tokara Islands, Okinawa Trough, Bathymetry, Magnetic anomaly, Submarine volcano

要 旨

トカラ列島北部海域において、海域地球物理図作成を目的とした地磁気観測を実施し、曳航式全磁力計の観測値に基づき全磁力異常図を作成した。また昨年度のトカラ列島南部海域で取得された三成分磁気観測から算出した全磁力異常と合わせてトカラ列島全域の磁気異常図も作成した。島弧の島々及び複数の海底下の地形的高まりではダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から火山活動によるものと推測される。調査海域西側の南北方向に連続する地形的高まりは、地磁気・重力的特徴から火成活動を伴う沖縄トラフの東縁部をなす地形的境界であると考えられる。この地形的高まりの一部では正の磁気異常がみられており、表層の火成活動による起因する磁化によるもの、もしくはより深部の磁化物体によるものと推測される。トラフ底では海底地形を伴わないダイポール型磁気異常の一部と考えられる正の磁気異常が観測され、海底下の火成活動が推測される。

1. はじめに

GB21-2, GB21-3 及びGS21航海では主としてトカラ列

島周辺海域の北緯28度50分から北緯30度50分、東経128度40分から東経130度20分の範囲、口之島、中之島、臥蛇島、諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺部において、地磁気観測を実施した。両調査航海における観測の全測線を第1図に示す。本報告書では、3航海での曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製) により得られた磁力データの処理方法とその解釈についての報告を行う。結果に基づき海底地形と合わせて調査海域の地下構造等についての簡単な解釈を示す。

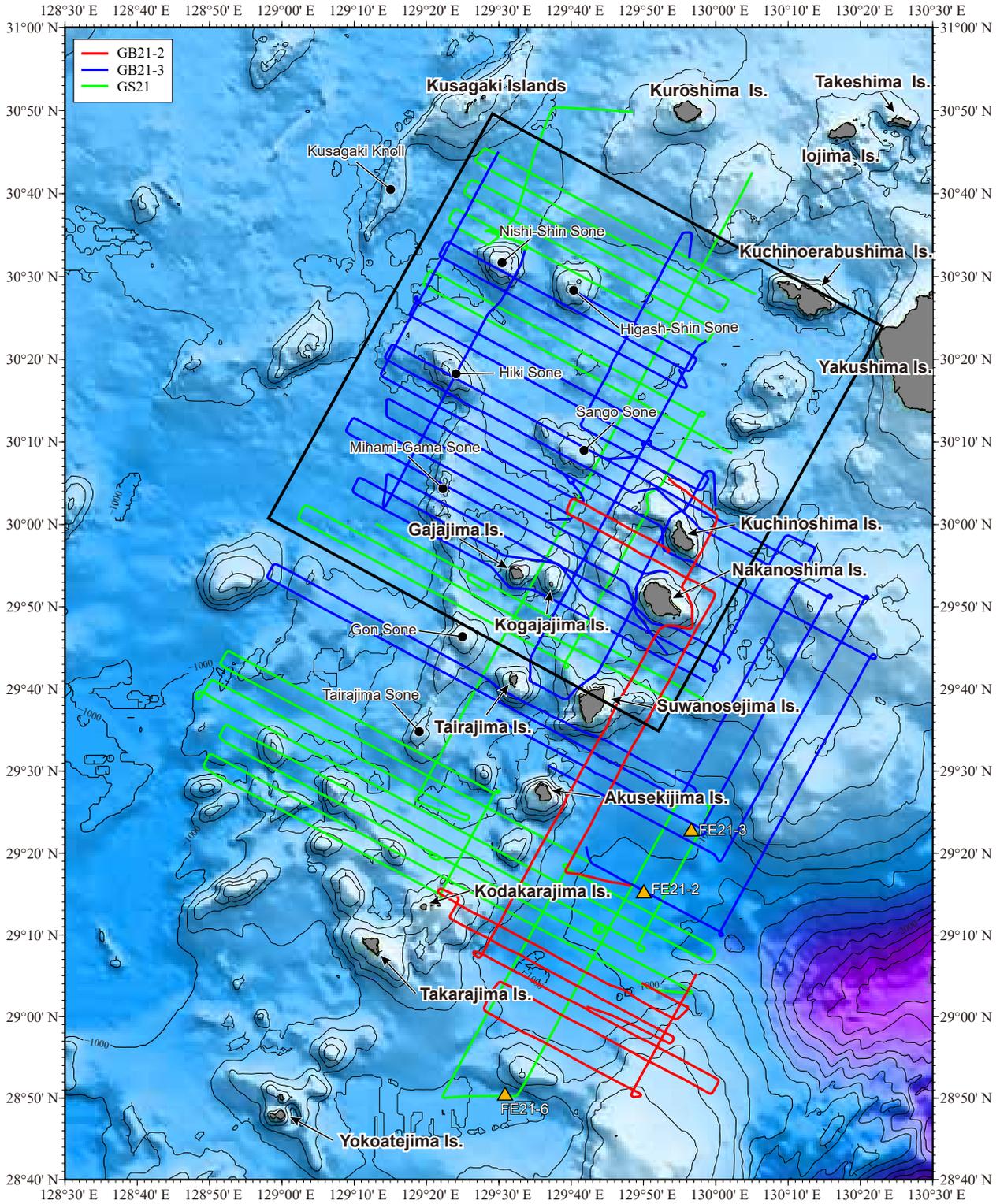
2. 装置及びデータ処理

GB21-2航海 (2021年7月19日–7月20日) 及びGB21-3航海 (2021年10月29日–11月29日) では東海大学所有の海洋調査研修船「望星丸」を使用した。船の全長は87.98 m, 幅は12.80 mである。GS21航海 (2021年10月4日–10月23日) では東京海洋大学所有の「神鷹丸」を使用した。船の全長は64.55 m, 幅は12.10 mである。以下では各測定装置による観測状況及びそのデータ処理について記載する。

地磁気全磁力観測には産総研所有の曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製) を使用した。本調査で

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)

* Corresponding author: SATO, T., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: taichi-sato@aist.go.jp



第1図 GB21-2, GB21-3及びGS21調査航海における磁気異常観測の全測線図。赤線はGB21-2, 青線はGB21-3, 緑線はGS21調査航海の測線を示す。オレンジ色の三角形は区内での8の字航走を実施した位置を示す。地形は500 mメッシュ水深データ(J-EGG50, 日本海洋データセンター(2015))を使用した。

Fig.1 All track lines of magnetic anomaly observations during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises. The solid red, blue, and green lines indicate the GB21-2, GB21-3, and GS21 survey lines, respectively. The orange triangles indicate the position of the figure-eight turns in the index map area. Seafloor bathymetry is based on J-EGG50 (Japan Oceanographic Data Center, 2015). The grid interval is 500 m.

第1表 GB21-2, GB21-3, GS21 調査航海における8の字航走一覧.

Table.1 List of figure-eight turns during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises.

Site name	Cruise	Date	Time(UT)		Position	
			Start	End	Longitude	Latitude
FE21-1	GB21-2	2021/7/25	22:18:51	22:29:14	30°40.31' N	130°30.12' E
FE21-2		2021/7/28	18:53:30	19:06:14	29°15.06' N	129°50.05' E
FE21-3	GB21-3	2021/11/4	14:20:00	14:33:46	29°22.63' N	129°56.63' E
FE21-4		2021/11/23	17:56:17	18:00:44	30°39.98' N	131°10.01' E
FE21-5	GS21	2021/10/7	21:02:21	21:11:05	30°49.89' N	130°44.87' E
FE21-6		2021/10/14	7:24:14	7:41:18	28°50.29' N	129°30.87' E
FE21-7		2021/10/17	0:24:13	0:40:53	30°12.74' N	130°35.59' E

は船体磁気の影響を避けるために、磁力計を望星丸及び神鷹丸の船尾左舷側から約300 m後方に曳航し、音波探査と同時に曳航観測を行った。GPSからの正確な曳航距離は、望星丸では362.11 m、神鷹丸では329.95 mに相当する。データ収録はGeometrics社のデータ収録ソフト(MagLog)を用いて実施した。MagLogにはセシウム磁力計から出力される時刻・全磁力・シグナルレベル値・センサー深度データと船側のGPSデータ(NMEAフォーマット)が約0.1秒間隔で別々に取り込まれる。なお位置情報については、GB21-2及びGB21-3航海では望星丸のGPSデータ、GS21航海では持ち込んだ産総研所有のGPSセンサーからのデータをそれぞれ使用した。MagLogに取り込まれる2つのデータセットはGeometrics社のデータ描画ソフト(MagMap2000)を用いて結合し、緯度・経度と全磁力値の対応を行った。測定値はケーブル長補正、地磁気の日変化の補正などを経て、国際標準磁場(IGRF 13th generation; Alken *et al.*, 2021)を差し引くことで全磁力異常値に換算した。

今回報告する3航海では、地磁気ベクトル観測も実施した。本報告書では結果については記載せず観測状況のみの報告とする。GB21-2及びGB21-3航海では、産総研所有のフラックスゲート型深海三成分磁力計(SFG-2009型, テラテクニカ社製)を使用した。磁力計センサー部は、望星丸ブリッジデッキ後方のウインチルームの屋根部に設置した。地磁気センサー及び船体動揺センサー等のスペックについては高下ほか(2022)を参照されたい。GS21航海では、東京大学大気海洋研究所所有の深海三成分磁力計SDR-1Gを使用した。観測時の時刻調整は収録PCの時計をNTPサーバー(ETS-204, NTPserver 4.0.2)で同期し、そのPCから磁力計の時計を同期することで行った。時刻調整は1~2日に1度実施した。センサー部は神鷹丸のブリッジデッキに設置した。また神鷹丸ではIXBLUE社製光ファイバーコンパスPHINS(Model PAA00011)から船体動揺データを収録した。方位精度0.05度, ロールピッ

チ精度0.01度である。データ出力は0.1~200 Hzで行うことができる。神鷹丸では、船に装備されている5 Hzの出力ポートを利用したため、5 Hzで取得した。設定変更も可能であったが、高い周波数で収録すると、運行上に使用されるほかの機器への通信に対し、位置情報の提供に遅延が生じる可能性があったため、そちらを考慮して変更は実施していない。上述に加えて、本航海では産総研所有のGPS支援慣性航法システム(SFGFOG-20, テラテクニカ社製)を新たに導入し動揺の収録も同時に行った。センサー部は、神鷹丸のコンパスデッキ上に設置した。センサーは船体動揺センサーと2つのGPSを組み合わせたもので、ロール、ピッチ、ヘディングの精度が0.01度、内部のフィルターレートは1000 Hz、さらに産総研所有の三成分磁力計とデータを結合するため8 Hzで出力するように設定されている。各航海では船体磁気係数導出のために、8の字航走観測を実施し、調査海域で合計7回実施した。実施状況を第1表、船体磁気係数は第2表に示す。

続いて、算出された磁気異常に対して、船体磁気の影響を仮定した交点コントロール補正計算(x2sys: Wessel, 2010)を行った。補正前後での交点誤差の標準偏差は4.6 nTから4.0 nTに改善された。さらに上記のレベル補正を経て得られた3航海の各測線の全磁力異常値を統合し、GMT(Generic Mapping Tools ver. 6; Wessel *et al.*, 2019)のsurfaceプログラムを用いてグリッド間隔1分の全磁力異常グリッドデータを作成した(第2図)。さらに、トカラ列島全域の磁気異常図作成のため、GB21-1及びGK20航海で得られた三成分地磁気観測から算出した全磁力異常値(高下ほか, 2022)を追加した。追加に際しGB21-2, GB21-3及びGS21航海を基準として航海間オフセットを最小化する交点コントロール補正を行った。その結果、補正前後での交点誤差の標準偏差は34.4 nTから21.3 nTに改善された。こちらについてもグリッド間隔1分の全磁力異常グリッドデータを作成した(第3

第2表 GB21-2, GB21-3, GS21 調査航海における8の字航走時の地磁気データから算出した船体磁気係数.

Table.2 List of the 12 constants of the ship's induced and permanent magnetic moment from the figure-eight turns of GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises.

Site name	Induced magnetization matrix									Permanent magnetic field			Standard deviation		
	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₁	B ₂₂	B ₂₃	B ₃₁	B ₃₂	B ₃₃	H _{ph}	H _{ps}	H _{pv}	σ _n	σ _s	σ _v
FE21-1	1.0342	0.0848	-0.071	-0.025	1.1891	0.0824	-0.15	0.0472	0.8713	-13447	8468	-17499	61	166	284
FE21-2	1.0387	0.0823	-0.087	-0.018	1.189	0.0529	-0.159	0.0521	0.9386	-12611	10053	-21443	89	204	239
FE21-Merge1	1.0386	0.083	-0.091	-0.027	1.19	0.0986	-0.16	0.0512	0.94	-12356	7503	-21495	83	191	267
FE21-3	1.0438	0.0436	-0.115	0.0207	1.1938	0.048	-0.107	0.0459	0.6692	-11857	9290	-6686	164	115	243
FE21-4	1.0617	0.0256	-0.241	0.0727	1.1723	-0.211	-0.116	0.0493	0.7345	-4467	24130	-10513	557	698	279
FE21-Merge2	1.0401	0.0403	-0.103	0.0341	1.1881	-0.012	-0.113	0.0481	0.7097	-12494	12607	-9020	401	479	261
FE21-5	1.0105	0.0042	-0.599	-0.054	1.118	-0.141	0.0285	0.0487	0.374	21408	9809	19276	780	795	432
FE21-6	1.0694	0.0317	0.1702	-0.043	1.1235	-0.004	0.0491	0.0573	0.5809	-5104	5118	11646	800	280	528
FE21-7	0.9713	-0.025	-1.073	-0.049	1.1191	-0.055	0.06	0.0596	0.6934	38293	7076	8386	686	1446	401
FE21-Merge3	1.0448	0.0215	-0.13	-0.042	1.1239	0.0127	0.062	0.0643	0.7712	5033	4577	5514	924	848	514

図). なおトカラ列島全域の磁気異常グリッドについては交点誤差等に起因すると思われる短波長の磁気異常を抑えるために4 kmのメディアンフィルターを施している. このため, 第2図と第3図では磁気異常の様相が若干異なるが, 第3図を基本として解釈を進める.

3. 結果と考察

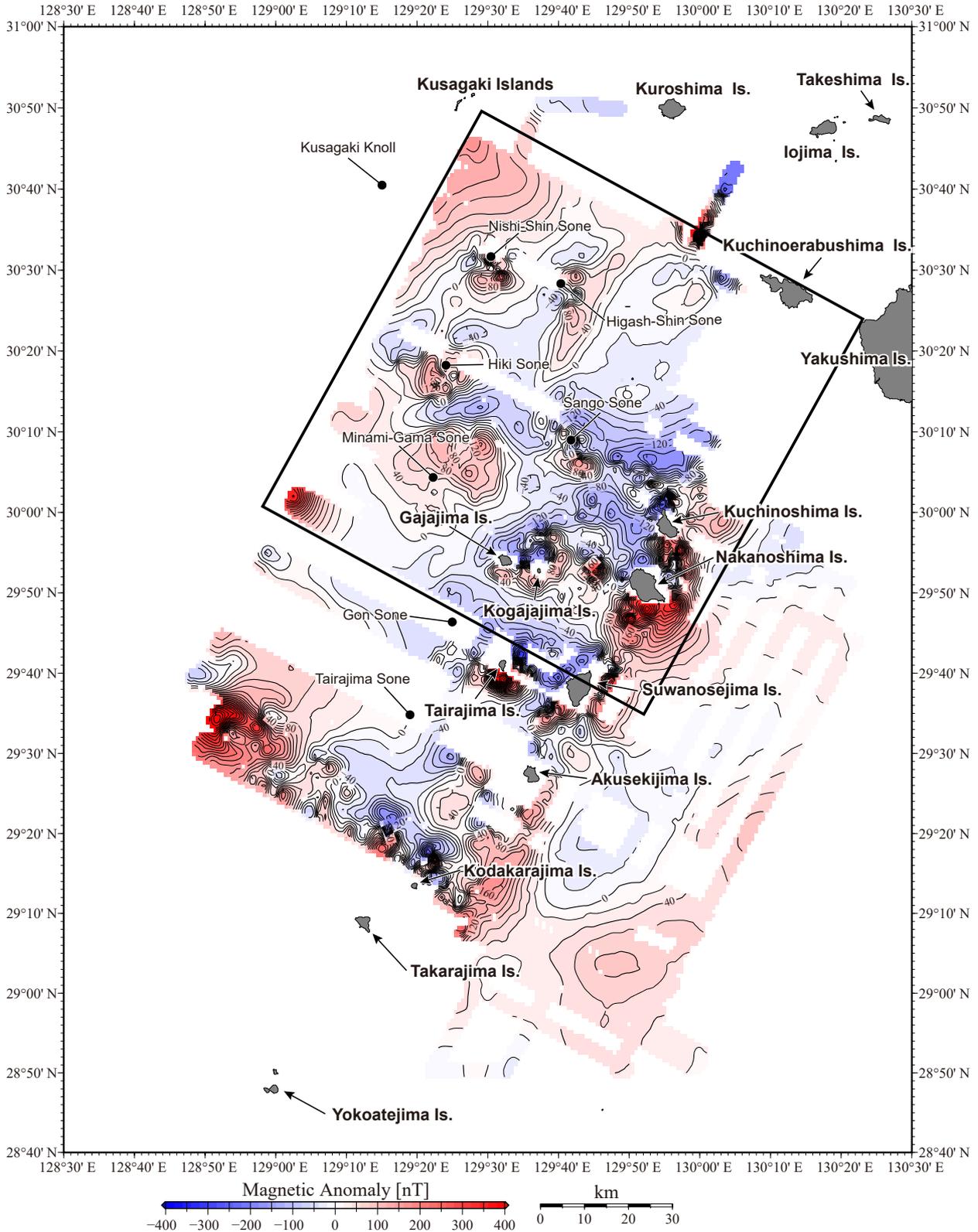
全磁力磁気異常分布の調査範囲は, 高下ほか(2022)による三成分磁気異常から算出した全磁力異常分布と重複が多く, 磁気的特徴についてはすでに報告済みの箇所が多い. このため本論では今回新たに取得された箇所(第3図の四角枠内)であるトカラ列島北部の特徴について記載する.

トカラ列島周辺では南が正で北が負のダイポール型磁気異常が多くみられた. 中之島, 口之島では島を挟んでダイポールが形成されている様子が見られた. 波長は概ね似ており10~20 km程度である. 臥蛇島・小臥蛇島は各島に対応するダイポール型磁気異常は顕著でないが, 二島全体としてダイポール型磁気異常の内部に位置しているように見える. これらのダイポール型磁気異常はトカラ列島の島弧で活発な火山活動(例えば小林, 2008)によって形成されていることが考えられる. 中之島と小臥蛇島の間にもダイポール型磁気異常が見られた. 火山活動が推測されるが, 限られた海底地形(高下ほか, 2023)からは少なくとも海底火山状の地形は見られない.

トカラ列島より西側のサンゴ曾根, 東新曾根, 西新曾根といった地形の高まりにおいてもダイポール型磁気異常が見られた. 海底地形は限られているものの, 高まりの表面には海丘状の地形がみられることから, 地形磁気異常を伴うことと合わせると, これら高まりが火山活動により形成されたと考えられる. 鬘曾根周辺では, 南が正で北が負のダイポール型磁気異常がみられた. 鬘曾根の南側斜面には溶岩流上の地形が, 北側及び西側の斜面では海丘状の地形が複数みられることと合わせる(高下ほか, 2023)と, この高まりも火山活動により形成され

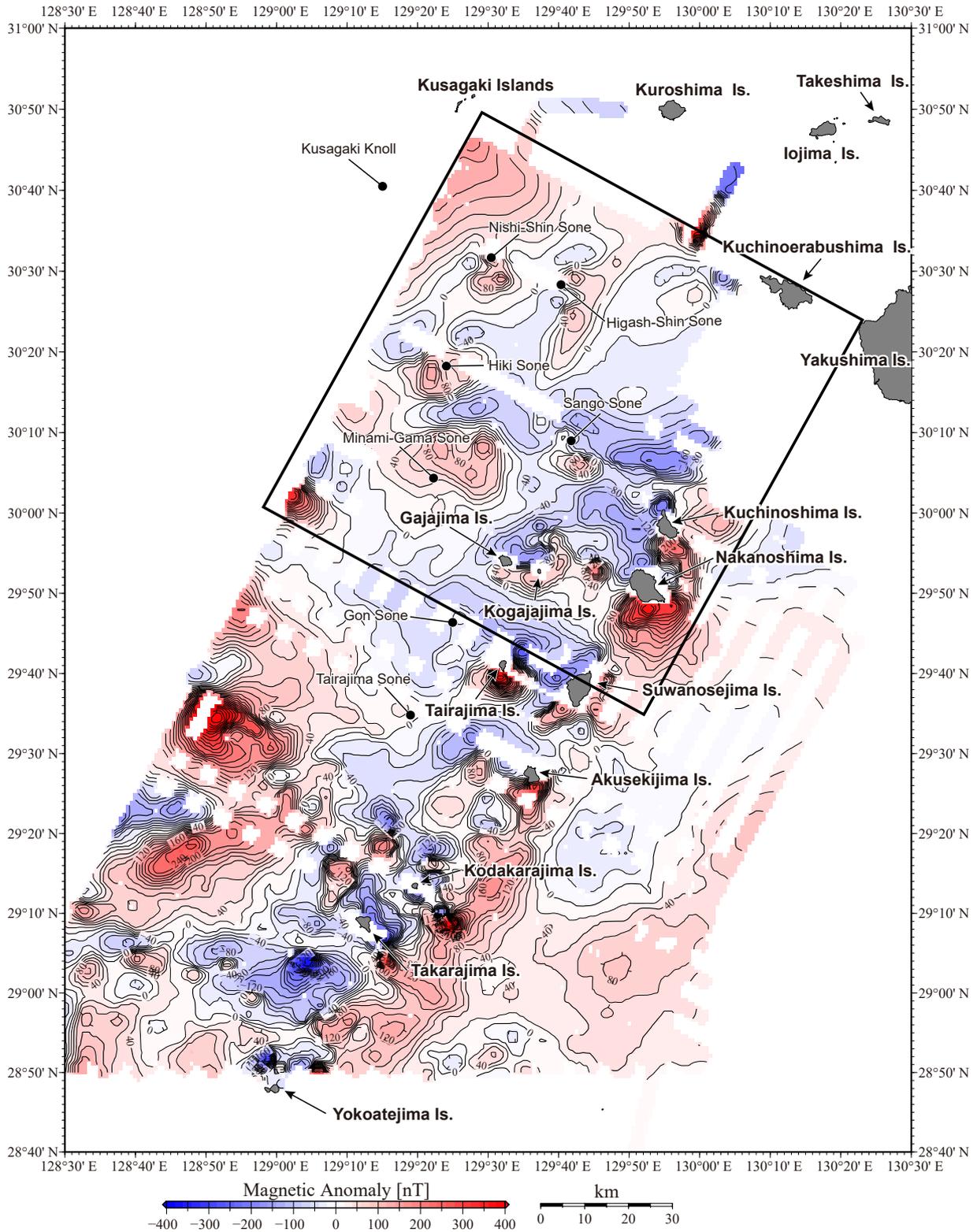
たと考えられる. 南鬘曾根^{みなみがま}周辺では最大約80 nTの正の磁気異常が見られた. この正の異常の北側に磁気異常が見られるためダイポール型磁気異常ともみなせるが, 上述した火山島や海底火山のもつダイポール型磁気異常よりも東西方向に伸びた分布をしている. 南鬘曾根は, 南方の権曾根・平島曾根^{ごんたいらしま}まで連続した南北方向の走向を持つ, 水深350~500 m程度の高まりの一部の北端部に位置する(高下ほか, 2023). 高まりの西側は水深約900 mを平坦な海底となり, 高まりの西側には落差約400 mの崖が形成されている. 南鬘曾根では海底火山等の海底地形は見られないが, 権曾根では円礫からなる溶岩塊が採取されている(横瀬ほか, 2010). 加えて広域の磁気異常図(CCOP and GSJ, AIST, 2021)では権曾根では小規模なダイポール型磁気異常が見られる. これらから権曾根での火成活動が示唆される. なお今回の観測では測線の空白域のため対応する磁気異常は検出できていない. 広域のブーゲー異常図に注目すると(日本重力データベースDVD版, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013), この南北方向の高まりは高ブーゲー異常が特徴的である. 上述した海底地形・地磁気・重力的特徴から, この高まりは沖繩トラフの東縁部境界をなす, 火山活動を含む地形であることが示唆される. 南鬘曾根の磁気異常は権曾根のような火成活動によるもの, もしくは陸上に現れていない, より深部の磁化物体に起因するものと推測される. 高ブーゲー異常は基盤深度が浅いことや火山体が存在することで説明可能であろう. 将来的には本プロジェクトで採取された岩石と結果を統合することで, より詳細な議論が可能と考えられる.

東新曾根の東側には, 0~60 nTの正の磁気異常が北東-南西方向に広がっている. 正の磁気異常の南東部には水深600~700 mの海底に比高100 m程度の北東-南西方向の尾根状地形がみられ, その南部では同方向のリニアメントが数本観測される(高下ほか, 2023). 正の磁気異常の位置と尾根状地形の位置は一致していないが, 走向が一致していることから両者の形成は関連があると考



第2図 GB21-2, GB21-3 及びGS21 航海で得られた全磁力磁気異常図. グリッド間隔は1分とした. コンター間隔は20 nTである.

Fig 2 Total magnetic anomaly map integrated by GB21-2, GB21-3, and GS21. The grid space was set to 1 nautical mile, and the contour interval is 20 nT.



第3図 GB21-2, GB21-3, GS21航海で得られた全磁力異常にGB21-1, GK20で得られた三成分磁気異常から算出した全磁力磁気異常を追加した全磁力異常図。グリッド間隔は1分とした。コンター間隔は20 nTである。四角枠は今回新たに取得された箇所を表す。

Fig 3 The integrated total magnetic anomaly map of the north Ryukyu Islands. Total magnetic anomaly calculated from vector magnetic anomaly data of GB21-1 and GK20 are added to the total magnetic anomaly of this study. The grid space was set to 1 nautical mile, and the contour interval is 20 nT. The black rectangle outlines the area reported in this study.

えられる。西新曾根の西側には正の磁気異常が広がっており、西に行くほど値は増加する。この磁気異常は CCOP and GSJ, AIST (2021) では西は草垣海丘、北は草垣諸島まで広がっている。

トラフ内の北緯30度、東経129度付近では、300 nTを超える顕著な正の磁気異常が見られる。調査範囲の端となり十分カバーされていないが、広域の磁気異常 (CCOP and GSJ, AIST, 2021) を参考にすると、ダイポール型磁気異常の一部と考えられる。海底地形を伴わないことから (第1図) 埋没した磁性体に起因すると考えられる。

4. まとめ

トカラ列島北部海域において地磁気観測を実施し全磁力異常図を作成した。さらに昨年度のトカラ列島南部の地磁気データと統合することで、トカラ列島全域の全磁力異常図を作成した。中之島、口之島、臥蛇島、小臥蛇島のトカラ列島の島々及びその西側のサンゴ曾根、東新曾根、西新曾根といった地形的高まりでは複数のダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から火山活動が推測される。より西側の南藁曾根・権曾根・平島曾根と南北方向に連続する地形的高まりは、火山活動を伴う沖縄トラフの東縁部をなす地形的境界であると考えられる。南藁曾根の正の磁気異常は表層の火山活動による磁化によるものか、陸上に現れていないより深部の磁化物体に起因するものと推測される。トラフ底ではダイポール型磁気異常の一部と考えられる正の磁気異常が観測された。海底地形を伴わないことから埋没した磁性体に起因すると考えられる。

謝辞： 今回の調査では、望星丸・神鷹丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、乗船研究者の皆様には調査機器の運用やデータ記録に関してご尽力頂きました。望星丸における観測については、特に玉井隆章技術員に大変お世話になりました。神鷹丸での三成分磁気観測の際は、東京大学大気海洋研究所の沖野郷子教授と田村千織技官に大変お世話になりました。皆様に篤く謝意を表します。

文 献

Alken, P., Thebault, E., Beggan, C. D., Aubert, J., Baerenzung, J., Brown, W. J., Califf, S., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Hammer, M. D., Holschneider, M., Hulot, G., Korte, M., Lesur, V., Livermore, P. W., Lowes, F. J., Macmillan, S., Nair, M., Olsen, N., Ropp, G., Rother, M., Schnepf, N. R., Stolle,

C., Toh, H., Vervelidou, F., Vigneron P., and Wardinski, I. (2021). Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field. *Earth, Planets and Space*, **73**(1), 1–21.

Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST (2021) Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Revised, Geological Survey of Japan.

小林哲夫 (2008) 九州南方の離島の火山, *Nature of Kagoshima*, 鹿児島県自然愛護協会, **34**, 11–16.

高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) GB21-1 及び GK20 航海 (トカラ列島周辺海域) における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **73**, 211–217.

高下裕章・佐藤太一・鈴木克明 (2023) GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域における海底地形観測の概要, 地質調査研究報告, **74**, 193–202.

日本海洋データセンター (2015) 日本海洋データセンターの現状. 海洋情報部研究報告, **52**, 123–131.

産業技術総合研究所地質調査総合センター (2013) 日本重力データベース DVD版. 数値地質図 P-2.

Wessel, P. (2010) Tools for analyzing intersecting tracks: The x2sys package. *Computers and Geosciences*, **36**(3), 348–354.

Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564.

横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.

(受 付 : 2022 年 10 月 31 日 ; 受 理 : 2023 年 9 月 11 日)

2021 年度海域地質図航海で行った トカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ調査の概要

石野 沙季^{1,*}・針金 由美子¹・三澤 文慶¹・井上 卓彦¹

ISHINO Saki, HARIGANE Yumiko, MISAWA Ayanori and INOUE Takahiko (2023) Overview of the seismic survey and dredge sampling in the vicinity of the Tokara Islands conducted during geological map research cruises in 2021. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 211–230, 9 figs, 1 table, 3 appendices and 1 plate.

Abstract: Multichannel seismic survey and dredge sampling were conducted near the Tokara Islands, northwest of the northern Okinawa Trough during GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises with the aim of constructing marine geological maps at a 1:200,000 scale. We present an overview of the seismic survey and dredge sampling results, and report characteristic geological structures along the observed seismic profiles. Seismic profiles east of the Tokara Islands reveal a sedimentary basin overlaying the acoustic basement. Within this basin, numerous WNW–ESE-trending normal faults are developed, particularly in the northern and southern sectors. We recognized an unconformity that reflects a few stages of tectonic movements during the formation of the sedimentary basin. Dredging from a lower unit outcrop yielded sedimentary rocks. Seismic profiles west of the Tokara Islands reveal a normal fault that extends almost 50 km along the western margin of a topographic high, cutting through strata and dipping to the west. In this region, the flat seafloor surrounding the topographic high displays widespread NNE–SSW trending normal faults, while ENE–WSW trending faults are exclusively found west of the Suwanosejima Island and Akusekijima Island. Additionally, normal faults, potentially with strike-slip components, are densely concentrated in the southwestern part of the topographic high. We aim to proceed with the construction of seismic stratigraphy and the interpretation of structural history after the conclusion of all planned research cruises in the vicinity of the Tokara Islands. These results will provide further insights into the tectonic evolution of the northern Okinawa Trough and the surrounding region of the Tokara Islands.

Keywords: Ryukyu Arc, Tokara Islands, Okinawa Trough, multi-channel seismic survey, dredge sampling

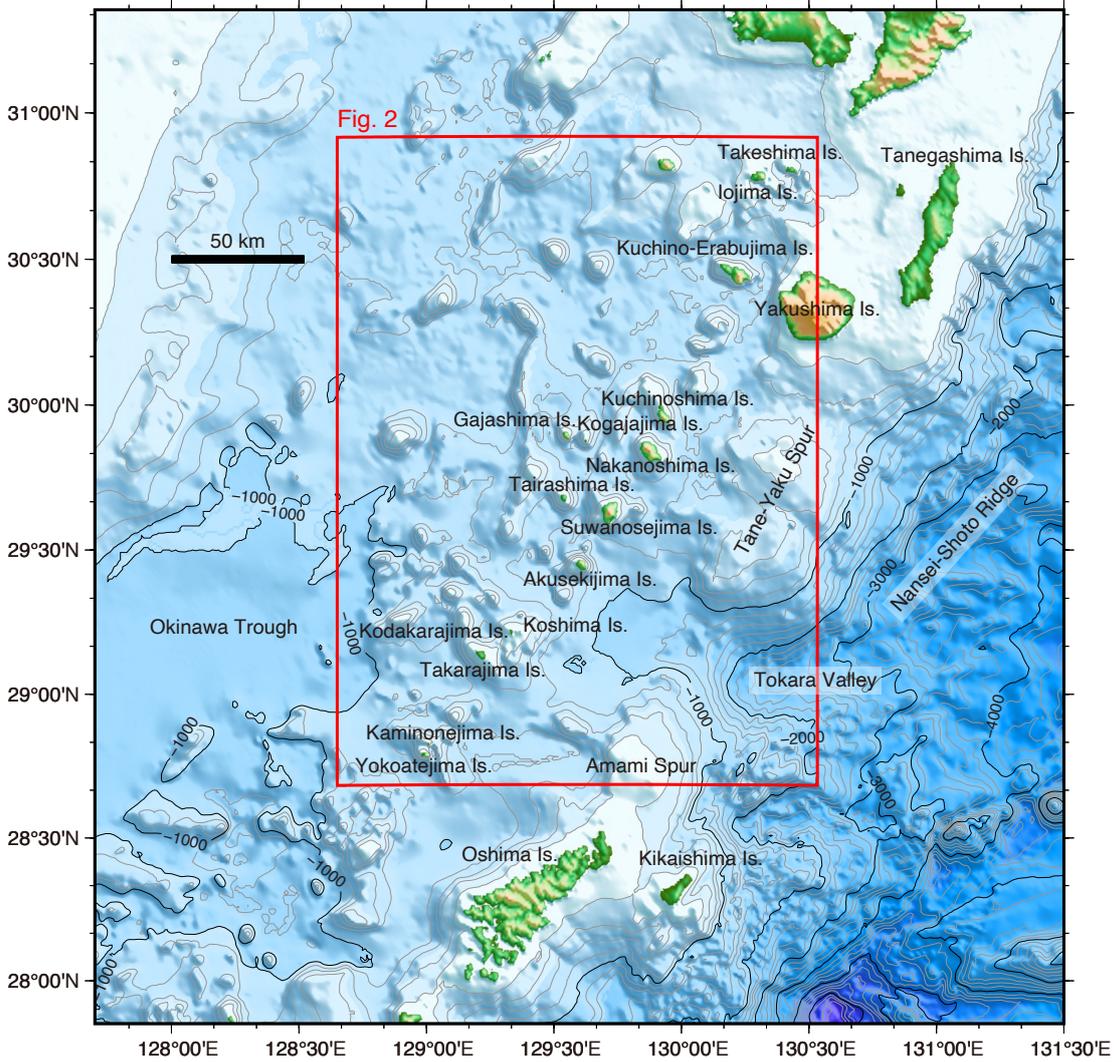
要 旨

北部沖縄トラフ近傍のトカラ列島周辺海域における海底地質図を作成するため、GB21-2航海、GB21-3航海、及びGS21航海にてマルチチャンネル反射法音波探査及びドレッジ調査を行った。本稿では、反射法音波探査とドレッジ調査の概要、及び反射断面に認められた特徴的な海底地質構造について速報する。トカラ列島東方の反射断面には、音響基盤の上位に堆積盆が観察された。この堆積盆には西北西–東南東走向の正断層が発達し、堆積盆の北縁部及び南縁部では正断層が特に密に分布していた。堆積盆の形成過程における構造運動の違いを反映していると考えられる不整合面を認定した。正断層に

よってこの不整合面より下位の地層が露出しているところでドレッジ調査を行い、堆積岩を採取した。トカラ列島西方においては、北北東–南南西方向の地形的高まり西側斜面に沿って約 50 kmに渡る西落ちの正断層が認められた。この地形的高まり周辺の海底平坦部には、広域的に正断層が発達しており、多くが北北東–南南西走向であった一方で、諏訪之瀬島西沖及び悪石島西方沖では東北東–西南西走向が卓越していた。さらに、本海域西方では一部で横ずれ運動を示唆する高密度に発達した正断層が分布していた。今後、このような構造的特徴に加えて音響層序による地層の面的な分布を検討することで、北部沖縄トラフとトカラ列島周辺海域の構造発達史についてより詳細な議論へ進展すると期待される。

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)

* Corresponding author: ISHINO, S., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ishino.saki@aist.go.jp



第1図 調査海域周辺の島嶼名及び主な海底地形名を記した海底地形図。赤枠は本調査航海を行った領域。地形データは岸本(2000)を使用した。

Fig. 1 Bathymetric map with the names of islands and main undersea features around the survey area. The red box frames the area investigated by the survey cruises. The topographic data is based on Kishimoto (2000).

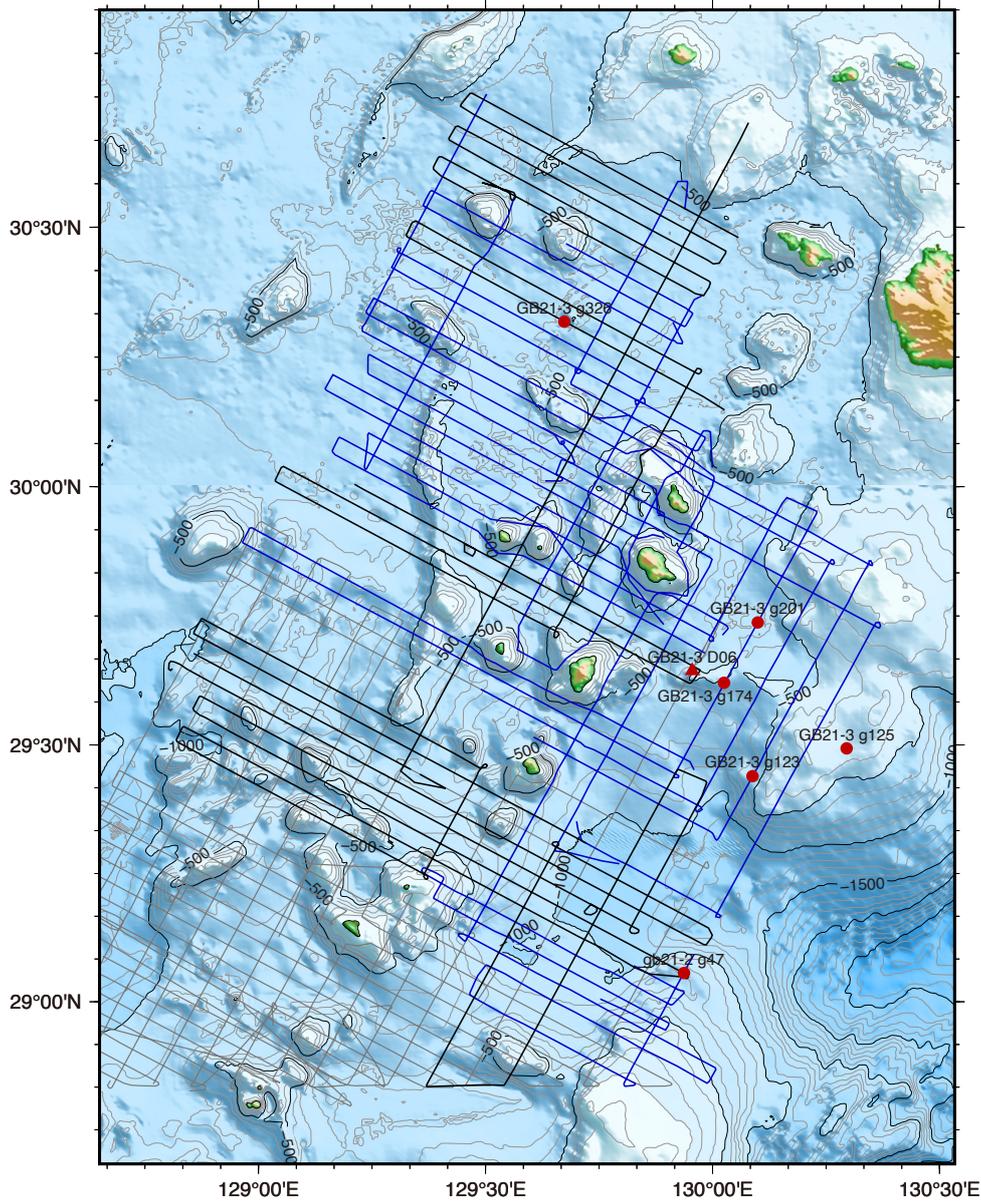
1. はじめに

海洋地質図の作成を目的として2020年度より吐噶喇列島(以下、トカラ列島)周辺海域(第1図)における海底地質調査を開始した。2021年度は、GB21-2航海(2021年7月19日-8月2日)、GB21-3航海(2021年10月29日-11月29日)、及びGS21航海(2021年10月5日-10月23日)にてマルチチャンネル反射法音波探査を行って海底地質構造データを取得するとともに、GB21-3航海にてドレッジ調査を行い、音響層序に年代的な制約をあたえるための岩石試料を取得した(第2図)。本稿では、2021年度に実施した音波探査とドレッジ調査の概要を報告し、反射断面に認められた特徴的な海底地質構造について述べる。なお、GB21-2及びGB21-3航海ではグラブ採泥も行って

おり、海底表層から岩石試料を取得している(鈴木ほか、2023)。また、ドレッジで採取した堆積岩の年代分析結果については有元・宇都宮(2023)を参照されたい。これらの岩石試料から推定される年代は、音響ユニットの形成年代を陸域と対比する際に参照する予定であり、詳細な海底地質構造の解明及びトカラ列島周辺海域の構造発達史の理解に発展するものとする。

2. 地形概略

本調査調査を行ったトカラ列島は琉球弧の北部に位置する(第1図)。琉球弧は、九州から台湾にかけて北東-南西方向に伸びる幅50 kmほどの弧状地形を成し、東方には、水深3,000 m以深の南西諸島海溝が、西方には水深1,000 m以深の平坦部を形成する沖縄トラフ(背弧海

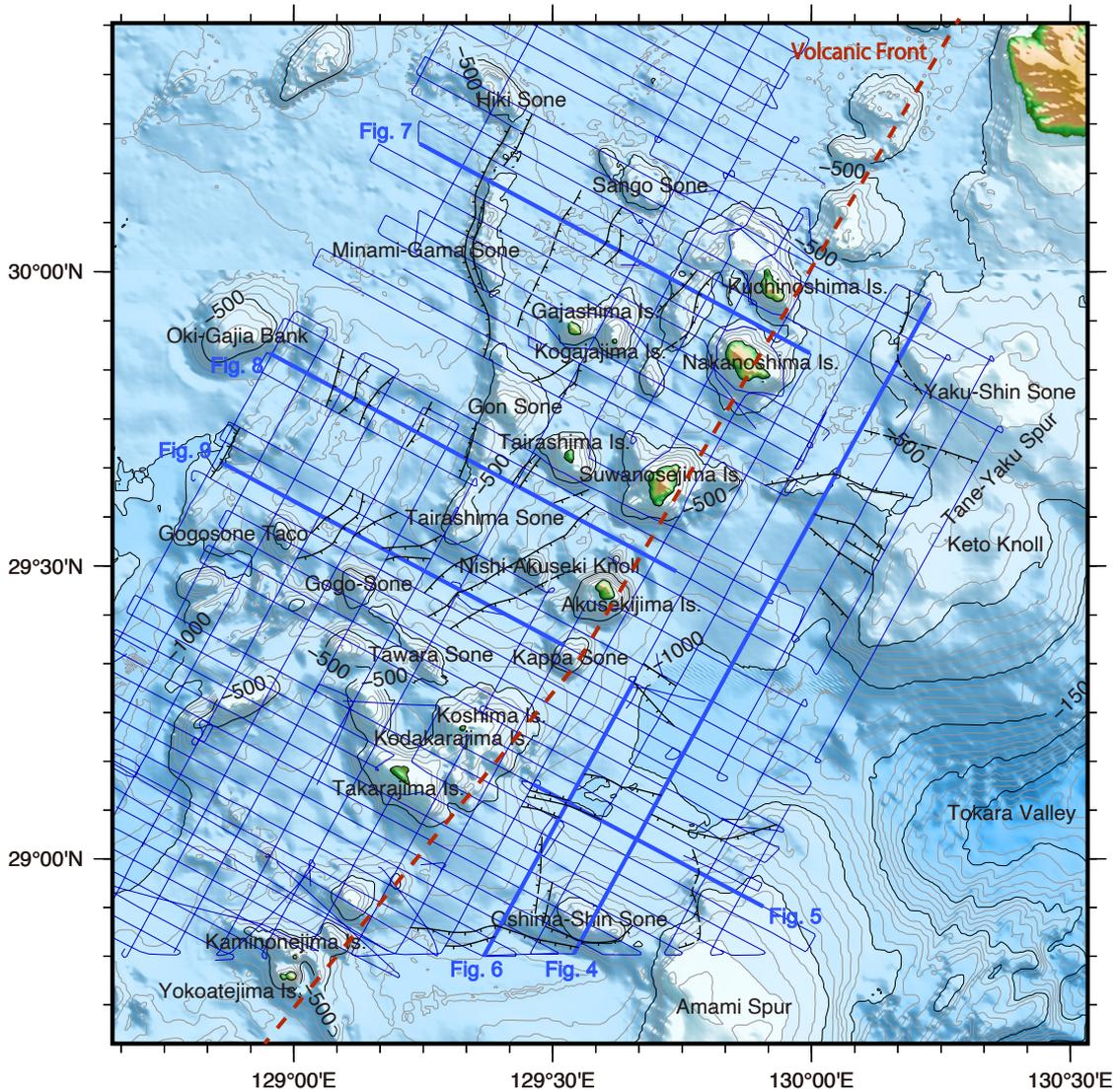


第2図 本調査で観測した音波探査測線図。地形データは岸本(2000)を使用した。青線：GB21-2航海及びGB21-3航海の測線。黒線：GS21航海の測線。灰色線：GB21-1航海測線(石野ほか, 2022)。赤丸：Grab採泥による岩石採取地点。赤三角：ドレッジ地点。

Fig. 2 The seismic survey lines obtained from this survey. The topographic data is based on Kishimoto (2000). Blue lines: GB21-2 and GB21-3 cruise survey lines. Black lines: GS21 cruise survey lines. Gray lines: GB21-1 cruise (Ishino *et al.*, 2022). Red circles: the sites where rock samples were obtained by grab sampling. Red triangle: dredge site.

盆)が分布する。北部琉球弧上には島嶼が並び、北から順に種子島、屋久島、及び奄美大島が分布する。屋久島と奄美大島の間は種子・屋久海脚及び奄美海脚が形作る水深約500 m以浅の高まりが続く。種子・屋久海脚と奄美海脚の間では、水深約1,000–1,300 mの緩やかに東方に傾斜する平坦部及びその東方に広がるトカラ海底谷が琉球弧を胴切る凹地を形成している。

本調査海域の北方には、鬼界カルデラの外輪の一部である硫黄島、竹島が分布する。その南方に位置するトカラ列島は、琉球弧から約20–30 km西方に位置する概ね琉球弧と並行な島嶼を指す。北から口永良部島、口之島、くちのえらぶしま くちのしま 臥蛇島、がしやじま こがしやじま 小臥蛇島、なかのしま 中之島、たいらしま 平島、すわのせしま 諏訪之瀬島、あくせきしま 悪石島、こしま 小島、こだからしま 小宝島、たからしま 宝島、かみのねしま 上ノ根島、よこあてしま 横当島が概ね北北東–南南西方向に並ぶ(第1図)。



第3図 反射断面に認められる追跡可能な断層分布概略図。本地図の地形データは岸本(2000)を使用した。青線：音波探査測線。黒線：正断層。破線：海底面まで達しない正断層。

Fig. 3 Distribution map of faults observed in seismic profiles. The topographic data is based on Kishimoto (2000). Blue lines: seismic survey lines. Black lines: normal faults. Dashed lines: normal faults that do not reach the sea floor.

トカラ列島の東方と西方で地形の特徴が大きく異なる。トカラ列島東方は、比較的大規模な構造が見られ、種子・屋久海脚、奄美海脚、及び大島新曾根からなる頂上で緩やかな斜面を示す凸地形と、諏訪之瀬島、悪石島及び小室島の東方沖に跨って位置する、水深約800-1,200 mで幅約30 kmの海盆で特徴付けられる(第3図)。種子・屋久海脚頂部には、屋久新曾根及びケトウ曾根の水深約300 m以浅の孤立した高まりが存在する。一方、トカラ列島西方では、比高300-700 mほどの急峻な斜面をもつ海丘が海底平坦部に複数点在し、複雑な地形を示す。口之島、中之島、諏訪之瀬島、悪石島、及びカッパ曾根が北北東-南南西方向に並ぶが、これら島嶼の西方に位置

する^{ひきそね}蓑曾根、^{みなまがまそね}南蓑曾根、^{こんそね}権曾根、^{たいらしまそね}平島曾根の海丘列は概ね南北方向に連なる。これらの海丘の間の海底平坦部における詳細な海底地形(高下ほか, 2023)を観察すると、北北東-南南西方向のリニアメントが中之島及び諏訪之瀬島南西沖に、東北東-西南西方向のリニアメントが悪石島西方沖に発達している。

3. 地質概略

本調査海域の主要なテクトニクスは、大陸地殻縁部に形成する南西諸島海溝、琉球弧、沖縄トラフ(背弧海盆)を形成する構造運動に特徴付けられる。琉球弧は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴いユーラシア

プレート東縁部に形成された島弧であり、先新第三紀系付加帯の基盤岩を含む島嶼が分布する(例えば、竹内, 1994; 斎藤ほか, 2007; 中江ほか, 2010; 菊川ほか, 2018; Nishizawa *et al.*, 2019). 琉球弧東方の南西諸島海溝にてフィリピン海プレートが北西方向に沈み込むことで(Sella *et al.*, 2002), 大陸縁辺に火山弧を形成している. 琉球弧のうち北部では、第四紀の火山活動年代を持つトカラ列島によって明瞭な火山フロントが観察される(下司・石塚, 2007; 中野ほか, 2008; 横瀬ほか, 2010). 火山フロントの背弧側では、活動的なリフティング段階にある沖縄トラフが琉球弧に並行に位置している(Kimura, 1985; Kimura *et al.*, 1986; Hirata *et al.*, 1991; Sibuet *et al.*, 1995).

琉球弧北部の背弧及び前弧海域は共に、沖縄トラフのリフティングの影響を受けた構造運動が認められる. 沖縄トラフ北部には、概ね北東-南西走向の正断層が雁行状に分布し、幅約50 kmほどの広域的なグラーベン構造を呈する(Kimura, 1985). このグラーベンを構成する地層の音響層序及び陸上露頭の古地磁気学的研究からリフティング活動は過去に複数の段階を経ていることが明らかになっており(Kimura, 1985; Miki, 1995; Sibuet *et al.*, 1995), 現在は琉球弧に対して斜行する北北西-南南東方向に伸張する応力場を形成している(Kubo and Fukuyama, 2003; Nishimura *et al.*, 2004). 琉球弧は弧状に湾曲しているため、このリフティングに起因して周長を広げるように海溝側へ移動していると考えられ、前弧海域では島弧に並行な方向の伸張応力を受けていること(Kubo and Fukuyama, 2003; Ostubo *et al.*, 2008), その応力に伴ってトカラ海底谷付近に凹地様の構造が形成されたこと(Arai *et al.*, 2018)が指摘されている.

4. 調査方法

GB21-2航海及びGB21-3航海では、東海大学が所有する海洋調査研修船「望星丸」を使用し、GS21航海では東京海洋大学が所有する練習船「神鷹丸」を使用した. マルチチャンネル反射法音波探査はGB21-2, GB21-3, GS21航海で実施し、ドレッジはGB21-3航海でのみ行った.

音波探査測線は、口永良部島から悪石島に至る第四紀の火山弧に対して直交する西北西-東南東測線を2マイル間隔で、トカラ列島に並行する北北東-南南西測線を4マイル間隔で計画した. 計画した測線のうち、GB21-2航海およびGB21-3航海では合計約1,609マイル、GS21航海では約1,053マイルにわたって観測を行った(第2図). 反射法音波探査の音源はSercel社製GIガン(GI-355型: ジェネレーター 250 cu. in. 及びインジェクター 105 cu. in.)を、受振部はGeometrics社製デジタルストリーマーケーブル(GeoEel Solid: チャンネル数16, チャンネル間隔12.5 m)を用いた. GeoEel SolidはCNT-2探鉱器に接続して信号を記録した. GIガンの発振は6秒間隔で繰り返し、

対地船速約8ノットを維持して航走観測を行ったため、発振点間隔は約25 m, 共通反射点(Common Mid Point: CMP)間隔は約6.25 mとなる. データ収録はGPSデータを加えてSEG-D形式で行った. 収録したSEG-DデータはSEG-Y形式に変換後、信号処理(ジオメトリ編集, バンドパスフィルタリング, 球面発散補正, デコンボリューション, 速度解析, NMO補正, 及びCMP重合, 4トレース水平重合)を施して反射断面を作成した. 本稿で扱う反射断面の横軸CMPは約25 m間隔となる.

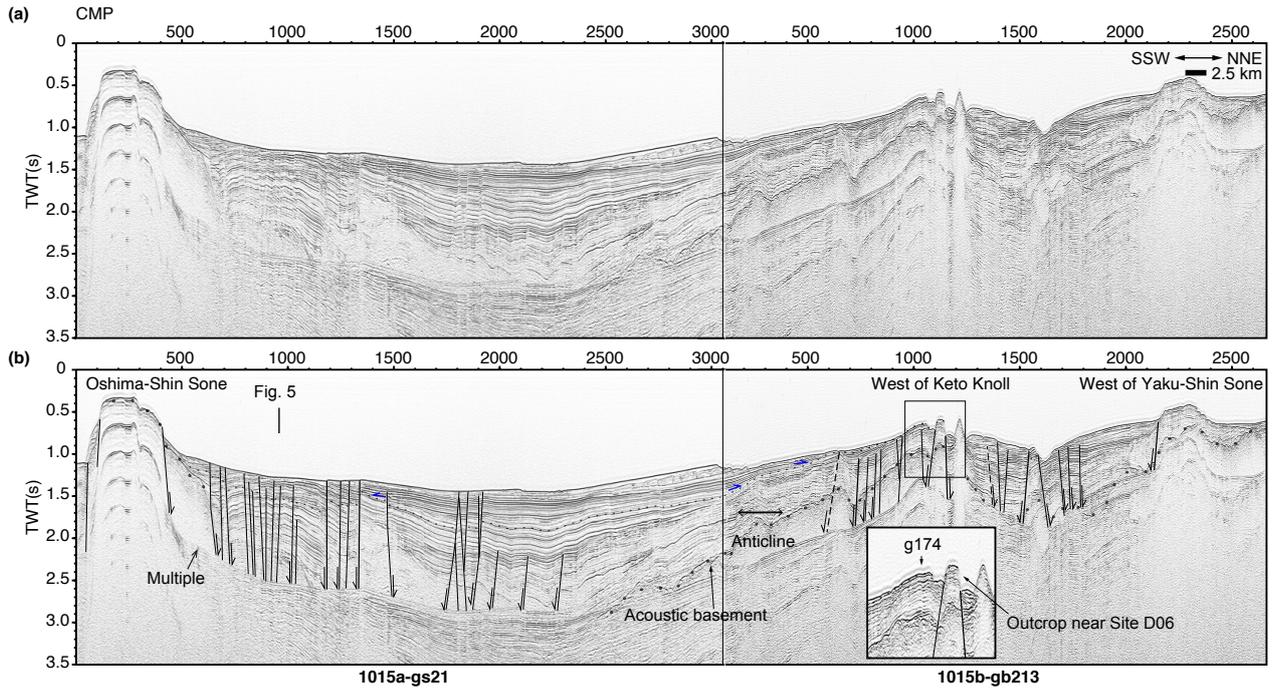
ドレッジは堆積岩が露出している斜面を反射断面で確認し、周囲の海底地形を考慮して実施地点を決定した(例えばGB21-3 D06地点について第2図を参照). 本調査では内径約60 cmの円筒型チェーンバッグ式ドレッジおよび小型円筒ドレッジを用いた(付図1). 付図2に岩石試料採取地点の地形、付表1にオペレーションに関するデータリストを掲げた.

5. 反射法音波探査およびドレッジ調査結果

本調査によってトカラ列島周辺海域にて高密度な測線間隔の反射断面を得た. トカラ列島東方沖及び西方沖に海域を分けて、反射断面に認められた地質構造の特徴を以下にまとめる. 第3図の構造概略図では、複数の反射断面で連続的に追跡できた断層の分布を記した. トカラ列島東方沖は、西北西-東南東測線及び北北東-南南西測線の双方を取得した領域があり、音響ユニットの面的な検討も可能であったため、GB21-3 D06地点のドレッジ(第2図, 三角印点)で岩石を採取したと考えられる地層の分布も検討した. なお、2020年度のGB21-1航海にて取得した反射断面(石野ほか, 2022)も本調査海域の地質構造を検討する際に使用した.

5.1 トカラ列島東方沖

本調査海域を代表する北北東-南南西方向の反射断面を第4図に、宝島西方沖の西北西-東南東方向の反射断面を第5図に示す. トカラ列島東方沖には広域的に追跡できる強反射面が認められる(第4図Line 1015b-gb213 CMP 0-2500付近, 第5図Line 20c-gb212 CMP 1500-2100付近). この強反射面以深で連続的な反射面が認められないため、本稿ではこの強反射面より下位の地層を音響基盤として扱う. 音響基盤は種子・屋久海脚及び奄美海脚付近で海底面付近に認められ、海盆中央部及び西部に向かって分布深度を増す傾向にある. 音響基盤の上位に成層構造が発達した堆積層が分布しており、大規模な堆積盆が形成されている. 第4図以西の反射断面において、堆積盆の最深部は多重反射により確認できない(第5図). 堆積盆内部の成層構造が明瞭に発達した地層には、内部に不整合面が複数観察される. 複数の不整合面のうち、種子・屋久海脚西方の崖付近(第4図Line 1015b-gb213 CMP 500-1150付近)で認められる不整合面は、南方にか



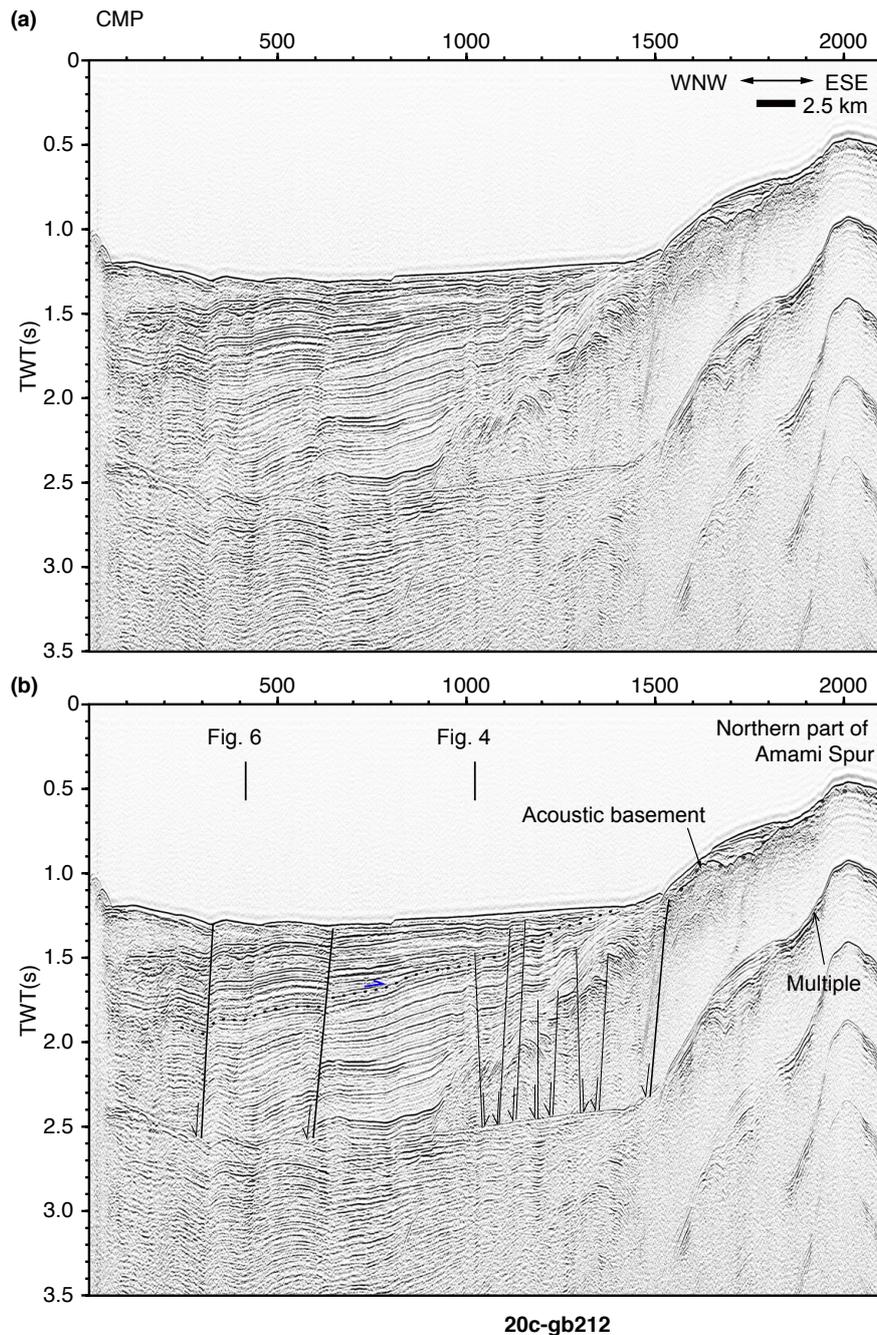
第4図 (a)トカラ列島東方沖の海盆における重合処理断面図(測線1015a-gs21及び1015b-gb213)及び(b)解釈線。CMP: common midpoint. TWT: two-way travel time. 実線:断層(太線は第3図にマッピングした断層)。破線:推定断層。青矢印:オンラップ。
 Fig. 4 (a) Stacked seismic profiles across the basin east of Tokara Islands (Lines 1015a-gs21 and 1015b-gb213) and (b) their interpretations. CMP: common mid point. TWT: two-way travel time. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3). Dashed lines: presumed faults. Blue arrows: Onlap.

けて広域的に連続している。この不整合面より下位の地層の内部反射面は、堆積盆中央部(第4図Line 1015a-gs21 CMP 2100付近)を軸に向斜し、西北西-東南東断面(第5図)では堆積盆西方に向かって傾斜する。不整合面より上位の地層は、下位の地層をオンラップし、概ね海底面と平行な内部反射面を持つ。

種子・屋久海脚西方の急崖(第4図Line 1015b-gb213 CMP 1000-1150付近)において、不整合面より下位の地層が海底面に露出している様子が確認されたため、この地層を構成すると考えられる岩石をドレッジ(GB21-3 D06)で採取した。露頭から岩石を採取したと考えられる1.5~1.8トン程度の大きなあたりが2回あり、最大張力は1.8トンであった。第1表に船上での肉眼観察によって記載した採取岩石試料のリスト、付録図版1に採取した試料の一覧写真を示す。採取した試料は、主に礫岩、泥岩、軽石の他、巻貝や破片となった2枚貝からなる(付録図版1)。GB21-3 D06地点において得られた岩石試料の総重量は3.88 kg、記載された岩石試料の大きさは最大で15.5 cm × 11 cm × 7.5 cm、最小で3 cm × 3 cm × 2 cmであった(第1表)。また、種子・屋久海脚西方の高まりで実施したグラブ採泥により(第4図, g174地点)、不整合面より下位の地層上層部を構成すると考えられる堆積岩を取得した(鈴木ほか, 2023)。

本調査海域において複数の測線で追跡が可能であった断層は、主に種子・屋久海脚、奄美海脚及び大島新曾根の高まり付近に分布する(第3図)。屋久新曾根西方斜面には、水深400-600 mの等深線に沿った走向の正断層が認められ、周囲の音響基盤上面及び堆積層内部に変位を生じさせている(第4図Line 1015b-gb213 CMP 2150付近)。その南方のケトウ曾根西方沖では、西北西-東南東方向に張り出した舌状の地形的高まりの斜面上に複数測線で追跡可能な西北西-東南東走向の正断層が発達している(第3図, 第4図Line 1015b-gb213 CMP 600-1800付近)。これらの断層は、本調査で取得した詳細な海底地形(高下ほか, 2023)にも明瞭なりニアメントを形成している。また、これらの複数測線で追跡が可能であった正断層の周辺には、地層の変位量が小さく高角の正断層が密に存在し、南落ちと北落ちが混在している。加えて、第4図のLine 1015b-gb213 CMP 0-400付近における不整合面より下位の堆積層内部は、断続的で上向きに撓んだ内部反射面及び密に分布する断層が観察される。

奄美海脚西側斜面及び大島新曾根西方、つまり堆積盆の東部では南-北走向の正断層が分布し、海底面付近の堆積層に変位は認められないが音響基盤の分布深度に大きな変位を生じさせている(第3図, 第5図Line 20c-gb212 CMP 1500付近)。さらに、海底地形に明瞭なりニ



第5図 (a)トカラ列島から東方の海盆にかけての重ね処理断面図(測線20c-gb212)及び(b)解釈線。実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。青矢印：オンラップ。
 Fig.5 (a) Stacked seismic profile between Tokara Islands and the eastern basin and (b) its interpretations. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3).

アメントを形成する正断層が認められ(第3図, 第4図 Line 1015a-gs21 CMP 1150及び1300付近), このリニアメントを形成する正断層と大島新曾根の間には地層の変位量の小さい正断層が密に発達する(第4図Line 1015a-gs21 CMP 650-1300, 1700-1900付近, 第5図Line 20c-gb212 CMP 1000-1400付近)。この密な断層群は, 奄美海脚か

ら約13 km西方までに限られ, 不整合面より下位の堆積層に比較的大きな変形を生じさせている。一方, 奄美海脚北西沖, つまり堆積盆西部では, 西北西-東南東走向から東-西走向の正断層が卓越しており, 堆積盆の東部と西部で正断層の特徴が異なっている。宝島東方付近には正断層の活動により形成されたグラーベン構造が

第1表 船上での肉眼観察によって記載した岩石試料のデータリスト。

Table 1 Data list of rock samples described onboard.

GB21-3 D06		2020/11/15								
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight (kg)	colour	Mn coating	memo	
D06-01	conglomerate	subangular	15.5	11	7.5	0.6	reddish brown	film		
D06-02	conglomerate	subrounded	12	10.5	5.5	0.5	pale gray	patch	matrix includes foraminifera?, clast poor	
D06-03		subangular	13.5	8	6	0.2				
D06-04	conglomerate	subrounded	9	8	4	0.2	brownish gray		2 cm thick fine grain layer	
D06-05	conglomerate	subrounded	10.5	4.5	3.5	0.1	dark gray		clast rich	
D06-06	conglomerate	subrounded	9	5.5	5	0.2	reddish brown		matrix rich	
D06-07	mud stone	subrounded	9.5	5.5	4	0.15	beige		many burrows	
D06-08	conglomerate	subrounded	9	7	3.5	0.2	brownish gray		orange colored clast rich	
D06-09	conglomerate	subangular	9	8	5	0.2	beige		medium to fine grained sand, clast rich	
D06-10		subangular	5.5	4.5	2.5	0.1				
D06-11	conglomerate	subrounded	7.5	3.5	3	0.1	brownish gray	patch		
D06-12	conglomerate	subrounded	6	3.5	2.5	0.05	gray	-		
D06-13		subrounded	4.5	3.5	2.5	0.05				
D06-14	conglomerate	subrounded	5	4	2.5	0.05	beige	patch		
D06-15	mud stone	subrounded	5	3.5	3	0.05	greenish gray	-	many burrows	
D06-16	sand stone	subrounded	5.5	3.5	3	0.05	gray	-	many burrows, muddy	
D06-17	sand stone	subrounded	5	3.5	2	0.02	gray	-	many burrows, muddy	
D06-18	sand stone	subrounded	4.5	3.5	2.5	0.02	gray	-	many burrows, muddy	
D06-19	conglomerate	subangular	4.5	2.5	2.5	0.02	beige	-		
D06-20	conglomerate	subangular	3	3	2	0.01	beige	-		
bio						0.01			fossil fragments, shell, brachiopoda	
Others						1			fragments of conglomerate, mudstone, sandstone and pumice	
						3.88 (total)				

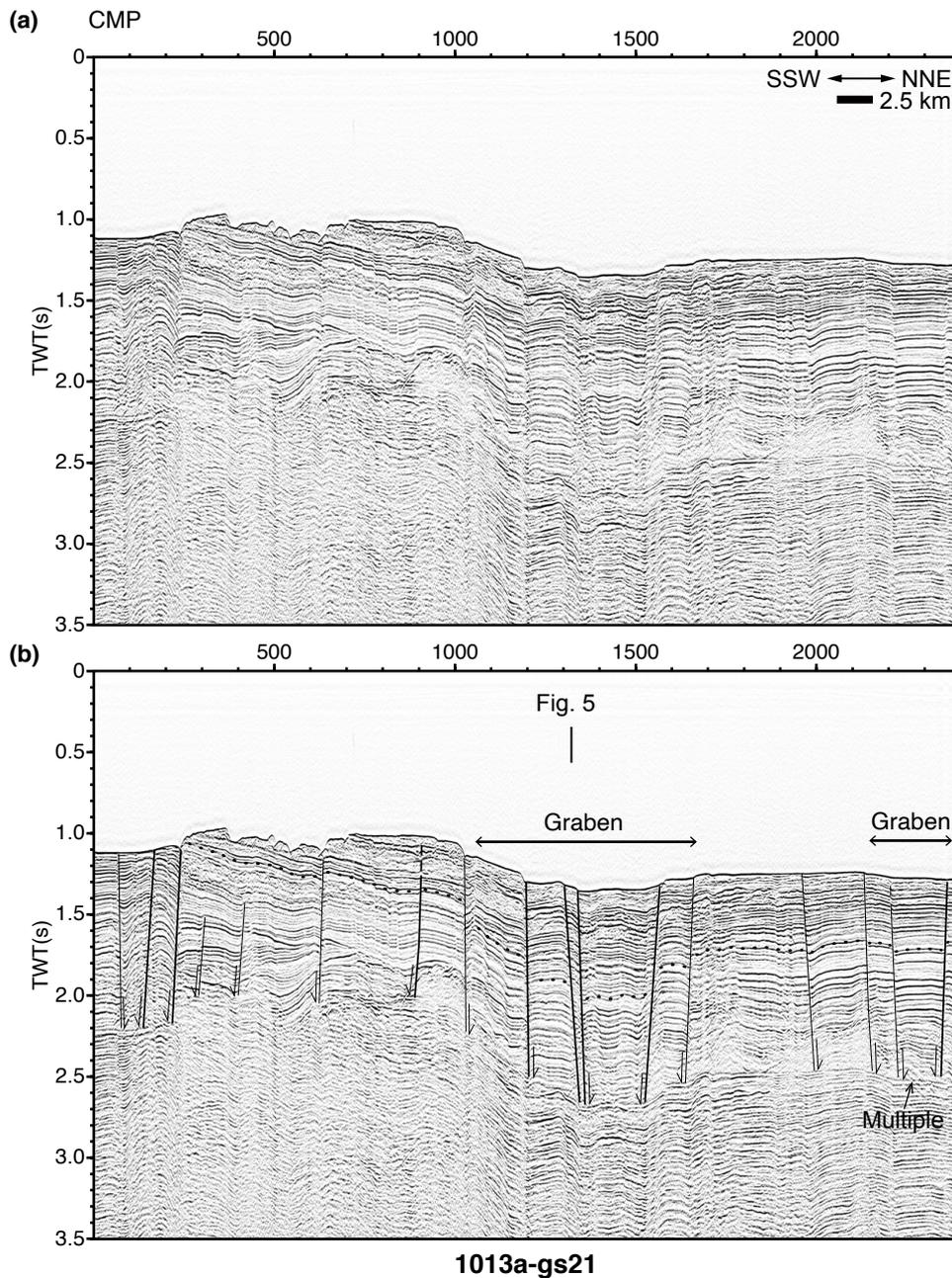
認められる(第6図Line 1013a-gs21 CMP 1000-1650及び1900-2400付近)。この正断層の多くは海底地形図上にリニアメントとして認められるため(第3図)、海底まで変位が達していると考えられる。

5.2 トカラ列島西方沖

本海域で取得した反射断面のうち、西北西-東南東方向の断面を北から順に第7図から第9図にそれぞれ示す。本海域で最も顕著な地層の変位を生じさせた断層は、藁曾根、南藁曾根、権曾根、平島曾根に続く概ね北北東-南南西方向に伸張した地形的高まりの西側斜面の麓に沿って約50 kmに渡る明瞭なりニアメントとして認められ(第3図)、堆積層の変位から西落ちの正断層を示す(第7図Line 46a-gb213 CMP 600付近、第8図Line 33a-gb211 CMP 1650付近)。この北北東-南南西方向に伸張した地形的高まり、臥蛇島西方沖にて約15 km東方に並行移動するような構造を呈し、平島曾根南方では延長が見られない。本稿では取得した測線の多い口之島西方沖(第7図)、諏訪之瀬島西方沖(第8図)、悪石島西方沖(第9図)の特徴を記載する。

口之島西方沖では、北北東-南南西方向に伸張した地形的高まりと火山フロントとの間の海底平坦部に連続的な内部反射を特徴とする堆積層が広く分布している(第7図)。堆積層の表層から0.1-0.5秒(往復走時, TWT)より深部では無秩序で強い反射を示す内部構造が認められる。この連続的な内部反射を特徴とする堆積層は、火山フロント西側に向かって分布深度を増す傾向にある。堆積層内部は概ね東落ちの正断層によって一貫した変形を受けている(第7図Line 46a-gb213 CMP 1000-2000及びLine 46b-gb213 CMP 0-1000付近)。正断層のうち地層の変位量が大きく海底地形のリニアメントとして現れる断層は海底地形図上及び複数の反射断面で追跡でき、走向は北北東-南南西方向を示す(第3図)。中之島西方及び臥蛇島南方においてのみ、西落ちの追跡可能な正断層が分布する。

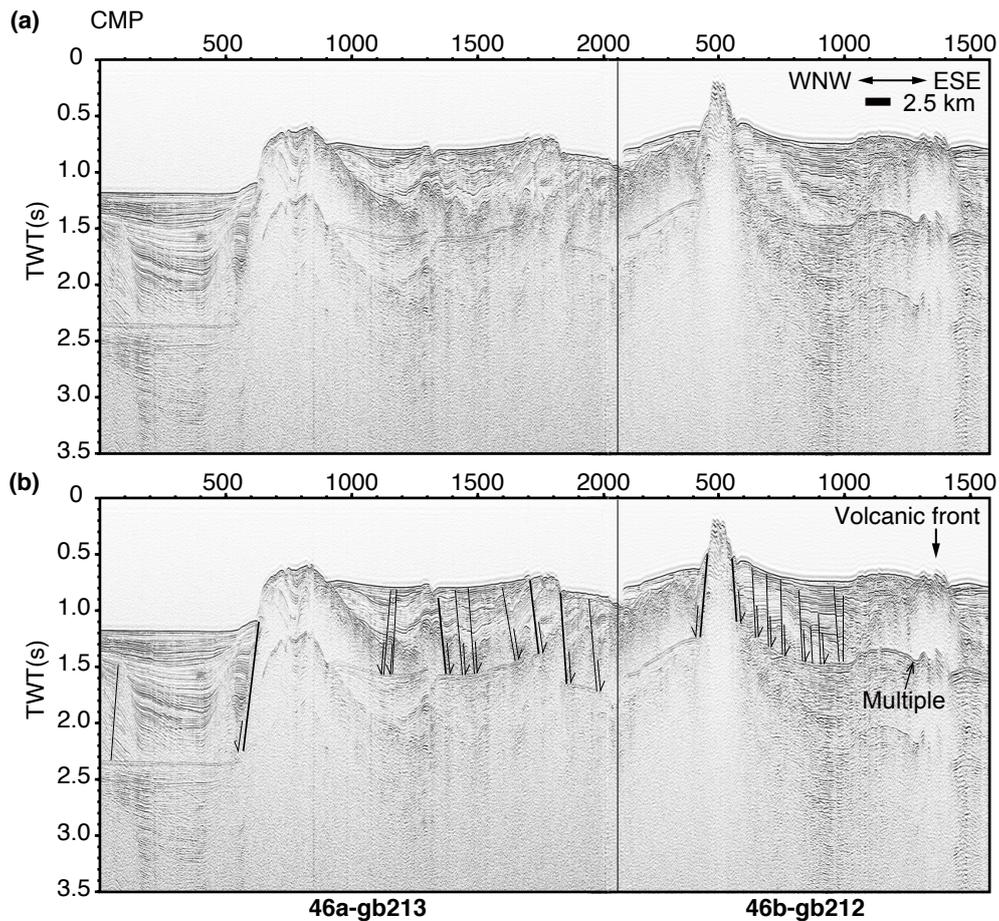
諏訪之瀬島西方沖及び悪石島西方沖では、口之島西方沖と同様に、連続的な内部反射を特徴とする堆積層が広く分布し、概ね東落ちの北北東-南南西走向の正断層によって変位が生じているが、一部で断層による変形の特徴が異なっている。火山フロントと北北東-南南西方向



第6図 (a)小宝島東方の重ね処理断面(測線1013a-gs21)及び(b)解釈線. 実線:断層(太線は第3図にマッピングした断層).
 Fig. 6 (a) Stacked seismic profile on the east of Kodakarajima Island (Line 1013a-gs21) and (b) its interpretations. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3).

に伸張した地形的高まりとの間はグラーベン構造が発達しており(第8図Line 33b-gb213 CMP 0-800付近), そのグラーベンを形成する断層は東北東-西南西走向から北東-南西走向を示す(第3図). また, 北北東-南南西方向に伸張した地形的高まり西側の約5-7 kmに渡って, 変位の少ない西落ちと東落ちが高密度に混在した正断層が分布し, 周囲の堆積層が背斜状に変形している(第8図Line 33a-gb211 CMP 200-1700付近). この密な正断層は,

諏訪之瀬島西方沖から悪石島西方沖にかけて, つまり権曾根から平島曾根西方にかけて認められる(第9図Line 27a-gs21 CMP 1600-1800付近). 権曾根西方沖では, 海底表層部に振幅が弱く海底面と平行な内部反射面をもつ堆積層が分布し, 正断層によって深部方向に一樣な変位が生じている(第8図Line 33a-gb211 CMP 300-1200付近). 一方で, 南方の平島曾根西方沖では, 振幅が弱く平行な内部反射面を持つ堆積層は海底面より0.2-0.5 msecほど



第7図 (a) 口之島西方沖の重合処理断面(測線46a-gb213及び46b-gb212)及び(b)解釈線。実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 7 (a) Stacked seismic profiles west of Kuchinoshima Island (Lines 46a-gb213 and 46b-gb212) and (b) its interpretations. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3).

深部に分布し、正断層による堆積層の変位は深部ほど発達している(第9図Line 27a-gs21 CMP 900-1500付近)。

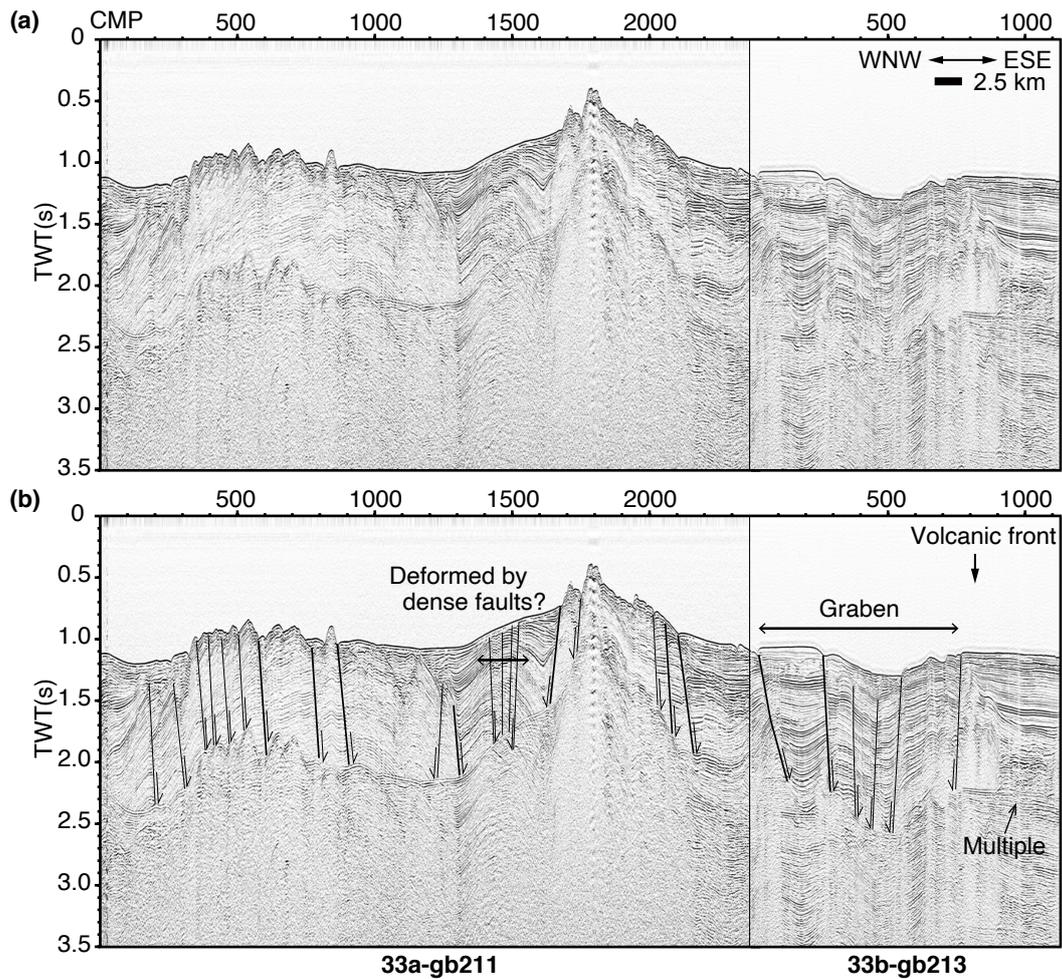
6. 地質構造の議論及びまとめ

本調査の反射断面の解釈から、トカラ列島東方の大規模な堆積盆周辺及びトカラ列島西方の海底平坦部における地質構造が明らかになった。それぞれの海域に関して以下に議論をまとめる。

トカラ列島東方の反射断面には音響基盤と大規模な堆積盆が観察された。堆積盆の内部反射面は、堆積盆中央部で向斜し(第4図)、火山フロント側(堆積盆の西方)に向かって傾斜する(第5図)。これらの堆積盆の構造は、Arai *et al.* (2018)による深部構造探査でも見出されており、堆積盆の形成は島弧に沿った伸張運動に伴う沈降に起因する可能性がある指摘されている。本調査でまとめた追跡可能な正断層は、北北東-南南西走向に伸張した形状の海脚に対して垂直方向に発達する西北西-

東南東走向が多く、島弧に沿った伸張応力場であることを支持する。さらに、堆積盆の北部及び南部(第4図Line 1015a-gs21 CMP 600-1900, Line 1015b-gb213 CMP 600-1800付近)、つまり種子・屋久海脚及び奄美海脚の先端部西方では、変位量が小さく高角の正断層が密に発達していることから、この正断層は横ずれ成分を伴うことが示唆される。この断層帯は、前弧に位置する海脚が弧状に湾曲する方向に応力を受けた際に、火山弧との間で生じる歪みによって生じる横ずれ運動(例えば、Lallemant and Oldow, 2000)を反映している可能性がある。上記の断層による変形は、堆積盆内部の不整合面より下位の地層に卓越するため、本調査のGB21-3 D06地点及びg174地点で得た不整合面下位層の堆積岩の形成年代を今後調べることで、堆積盆内部に発達するこれらの構造運動の活動年代を制約することが期待される。

トカラ列島西方の反射断面において確認できる最も大規模な構造運動は、幕曾根、南幕曾根、権曾根、平島曾



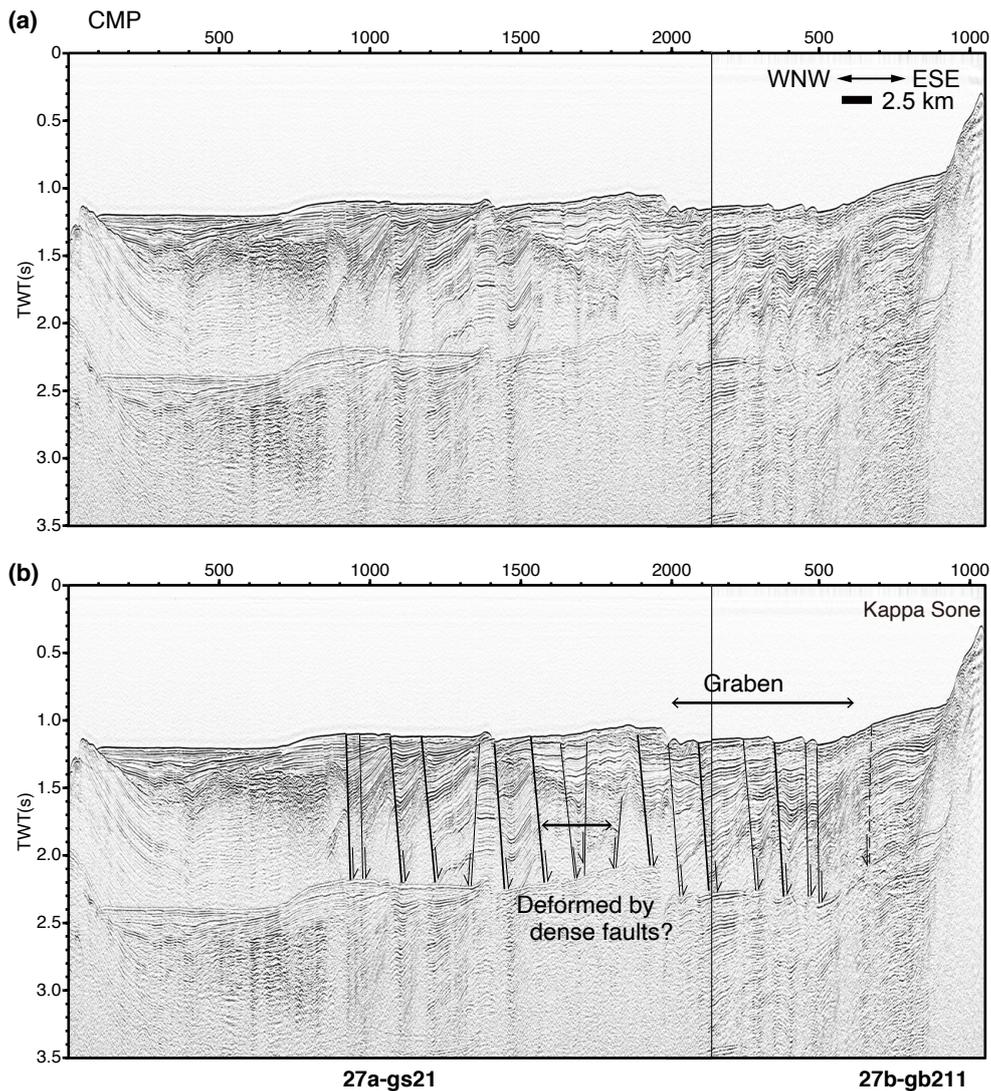
第8図 (a) 諏訪之瀬島西方沖の重合処理断面(測線33a-gb211及び33b-gb213)及び(b)解釈線。実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 8 (a) Stacked seismic profiles west of Suwanosejima Island (Lines 33a-gb211 and 33b-gb213) and (b) its interpretations. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3).

根に続く、北北東-南南西方向に伸張した地形的高まりの西側斜面に沿って分布する西落ちの正断層である。この北北東-南南西方向に伸張した地形的高まり周辺の構造は、南北に徐々に異なる特徴を示すことが明らかになった。この地形的高まりの東方北部および西方では北北東-南南西走向の正断層が発達しており、東方南部では明瞭な東北東-西南西走向の正断層によってグラベンを形成している。北北東-南南西走向の正断層は、北部沖縄トラフのリフティングに起因するものとして広域的に観察される(Kimura 1985; Sibuet *et al.*, 1987)ため、本調査で認められる正断層もそれらの一部と考えられる。一方で、東北東-西南西走向の正断層は、本調査海域の近傍では、南方に位置する奄美リフト以南にて観察されており、沈降域に沖縄トラフの断層活動より新しい火山の存在も示唆されている(Minami *et al.*, 2022)。本海域で見られた東北東-西南西走向の正断層及びグラベンの

形成は、沖縄トラフの発達史の中でどのような位置付けにあるのか、また、南方のリフトと関連付けてどのような広域的な構造運動が起きているかを論じるには、周囲の火山の分布や形成年代、音響層序による地層の面的な分布を検討することが今後必要である。

さらに、北北東-南南西方向に伸張した地形的高まりの南端部である、権曾根及び平島曾根西方では、正断層が高密度に発達しており、その東西に主要な断層と考えられる明瞭な変位を示す正断層が認められた。この特徴からフラワーストラクチャー(Woodcock and Fischer, 1986)を呈していると考えられ、北北東-南南西方向の断層は横ずれ成分をもつことが示唆される。北北東-南南西走向の正断層の発達過程に調査域の南北で差があることも、堆積層の音響的層相や内部構造構造の変化から明らかになった。この走向の断層を形成する構造運動は、現在の北部沖縄トラフに卓越する北北西-南南東方向の



第9図 (a) 悪石島西方沖の重ね処理断面(測線27a-gs21及び27b-gb211)及び(b)解釈線。実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 9 (a) Stacked seismic profiles west of Akusekijima Island (Lines 27a-gs21 and 27b-gb211) and (b) its interpretations. Solid lines: faults (bold lines indicate tracked faults in Fig. 3).

引張応力場(Kubo and Fukuyama, 2003; Nishimura *et al.*, 2004)と解釈が一致しないこと、広義の沖縄トラフと定義されている水深1000 m以深の海盆(木村, 1990)より北部に位置していること、沖縄トラフは中新世から現世にかけて複数の段階を経て形成したこと(Kimura, 1985; Sibue *et al.*, 1995)を踏まえ、現在の運動より前のリフティング過程を記録している可能性がある。

西方海域に関しては現在調査中であるため、取得したデータを加えた上で、同時断面の地層の連続性を加味した音響層序の検討を行う予定である。トカラ列島西方及び東方海域の音響層序を明らかにし、本稿で記載した地質構造の年代を制約することで、北部沖縄トラフとトカラ海底谷周辺の活動史に関する俯瞰した議論を展開でき

るものと考えている。

謝辞：GB21-2航海及びGB21-3航海の調査にあたっては、上河内信義船長をはじめとする望星丸運行に携わる東海大学職員の方々、甲板作業をお手伝いいただいた東海大学の学生の皆様、海洋技術開発株式会社の乗船職員、そして乗船者研究者の方々にご協力を頂きました。また、宮崎唯史船長をはじめとする神鷹丸運行に関わった東京海洋大学の職員の方々、サイスガジェット株式会社の乗船職員の方々、東京海洋大学の鶴 哲郎教授、酒井久治教授、古山精史郎助教及び乗船学生の方々にGS21航海での観測を支えていただきました。皆様のお陰で安全に調査航海を終えたことを厚く御礼申し上げます。

文 献

- Arai, R., Kodaira, S., Takahashi, T., Miura, S. and Kaneda, Y. (2018) Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc. *Earth, Planets and Space*, **70**, 1–15.
- 有元 純・宇都宮正志(2023) GB21-3航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義. 地質調査研究報告, **74**, 245–257.
- 下司信夫・石塚 治(2007)琉球弧の火山活動. 地質ニュース, no. 634, 6–9.
- Hirata, N., Kinoshita, H., Katao, H., Baba, H., Kaiho, Y., Koresawa, S., Ono Y. and Hayashi, K. (1991) Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa Trough: Part 3. Crustal structure of the southern Okinawa Trough. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **66**, 37–70.
- 石野沙季・三澤文慶・有元 純・井上卓彦(2022)トカラ列島南西沖におけるGB21-1航海の反射法音波探査概要. 地質調査研究報告, **73**, 219–234.
- 菊川照英・相田吉昭・亀尾浩司・小竹信宏(2018)鹿児島県種子島北部, 熊毛層群西之表層の地. 地質学雑誌, **124**, 313–329.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **2**, 222–240.
- 木村政昭(1990)沖繩トラフの発生と形成. 地質学論集, 堆積盆地と褶曲構造—形成機構とその実験的研究一, **34**, 77–88.
- Kimura, M., Kaneoka, I., Kato, Y., Yamamoto, S., Kushiro, I., Tokuyama, H., Kinoshita, H., Isezaki N., Masaki H., Oshida A. and Ueda S. (1986) Report on DELP 1984 Cruises in the Middle Okinawa Trough : Part V : Topography and Geology of the Central Grabens and Their Vicinity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **61**, 269–310.
- 岸本清行(2000)海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).
- 高下裕章・佐藤太一・鈴木克明(2023) GB21-2, 3トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要. 地質調査研究報告, **74**, 193–202.
- Kubo, A. and Fukuyama, E. (2003) Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, **210**, 305–316.
- Lallemant, H. G. A. and Oldow, J. S. (2000) Active displacement partitioning and arc-parallel extension of the Aleutian volcanic arc based on Global Positioning System geodesy and kinematic analysis. *Geology*, **28**, 739–742.
- Miki, M. (1995) Two-phase opening model for the Okinawa Trough inferred from paleomagnetic study of the Ryukyu arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **100**, 8169–8184.
- Minami, H., Okada, C., Saito, K. and Ohara, Y. (2022) Evidence of an active rift zone in the northern Okinawa Trough. *Marine Geology*, **443**, 106666.
- 中江 訓・兼子尚知・宮崎一博・大野哲二・駒澤正夫(2010) 20万分の1地質図幅「与論島及び那覇」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- 中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄(2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- Nishimura, S., Hashimoto, M. and Ando, M. (2004) A rigid block rotation model for the GPS derived velocity field along the Ryukyu arc. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **142**, 185–203.
- Nishizawa, A., Kaneda, K., Oikawa, M., Horiuchi, D., Fujioka, Y. and Okada, C. (2019) Seismic structure of rifting in the Okinawa Trough, an active backarc basin of the Ryukyu (Nansei-Shoto) Island Arc–Trench system. *Earth, Planets and Space*, **71**, 1–26.
- Otsubo, M., Yamaji, A. and Kubo, A. (2008) Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, **457**, 150–160.
- 斎藤 眞・小笠原正継・長森英明・下司信夫・駒澤正夫(2007) 20万分の1地質図幅「屋久島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- Sella, G. F., Dixon, T. H. and Mao, A. (2002) REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107**, ETG-11–ETG-30.
- Sibuet, J. C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J. P., Hilde, T. W., Kimura M., Chiao L. Y., Marsset B., Mullar C. and Stéphane, J. F. (1987) Back arc extension in the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **92**, 14041–14063.
- Sibuet, J. C., Hsu, S. K., Shyu, C. T. and Liu, C. S. (1995) Structural and kinematic evolutions of the Okinawa Trough backarc basin. In: Taylor (eds.) *Backarc basins*. Springer, 343–379.
- 鈴木克明・板木拓也・片山肇・兼子尚知・山崎誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治(2023)トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **74**, 259–286.

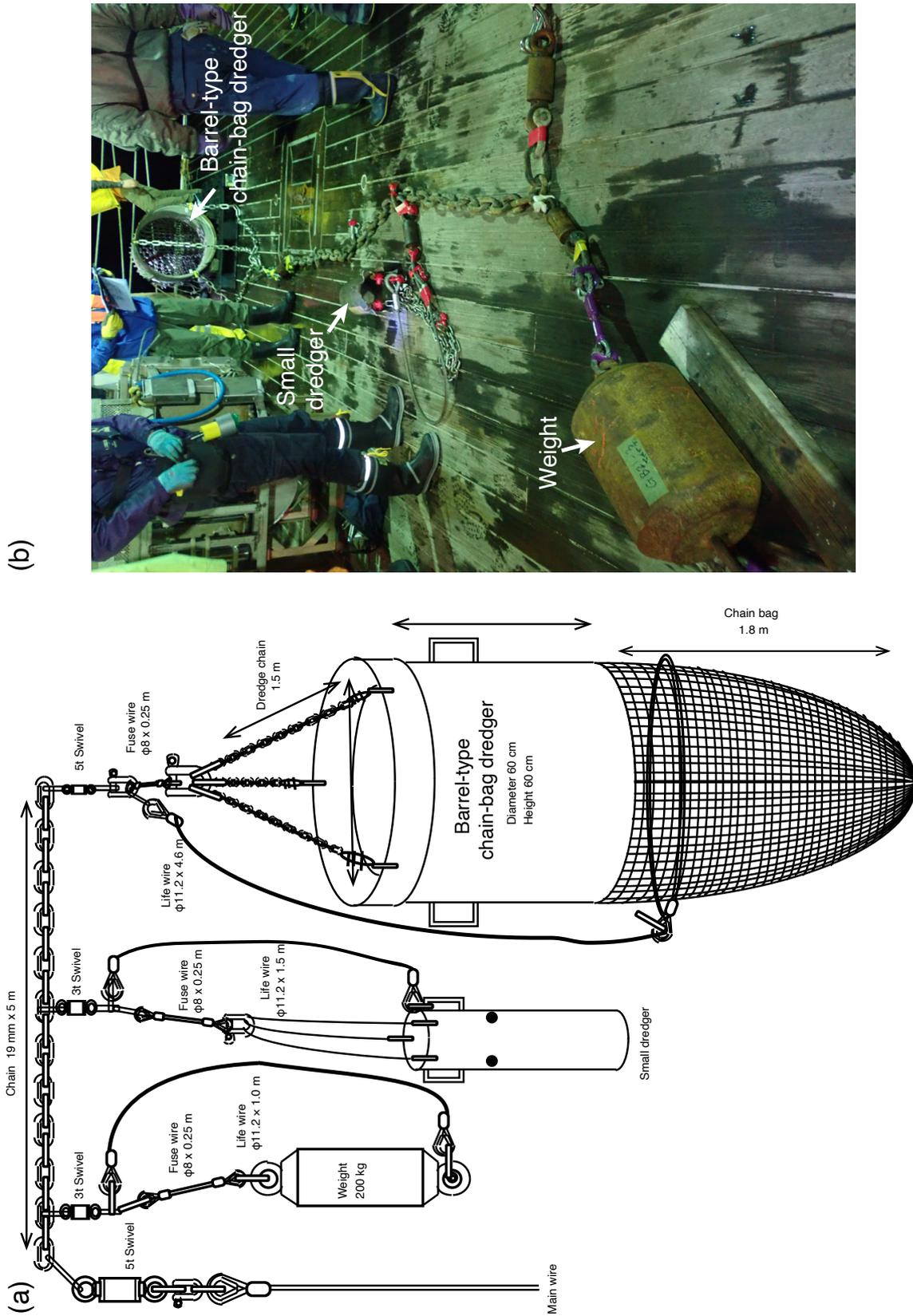
竹内 誠(1994) 20万分の1地質図幅「奄美大島」. 地質調査所.

Woodcock, N. H. and Fischer, M. (1986) Strike-slip duplexes. *Journal of structural geology*, **8**, 725–735.

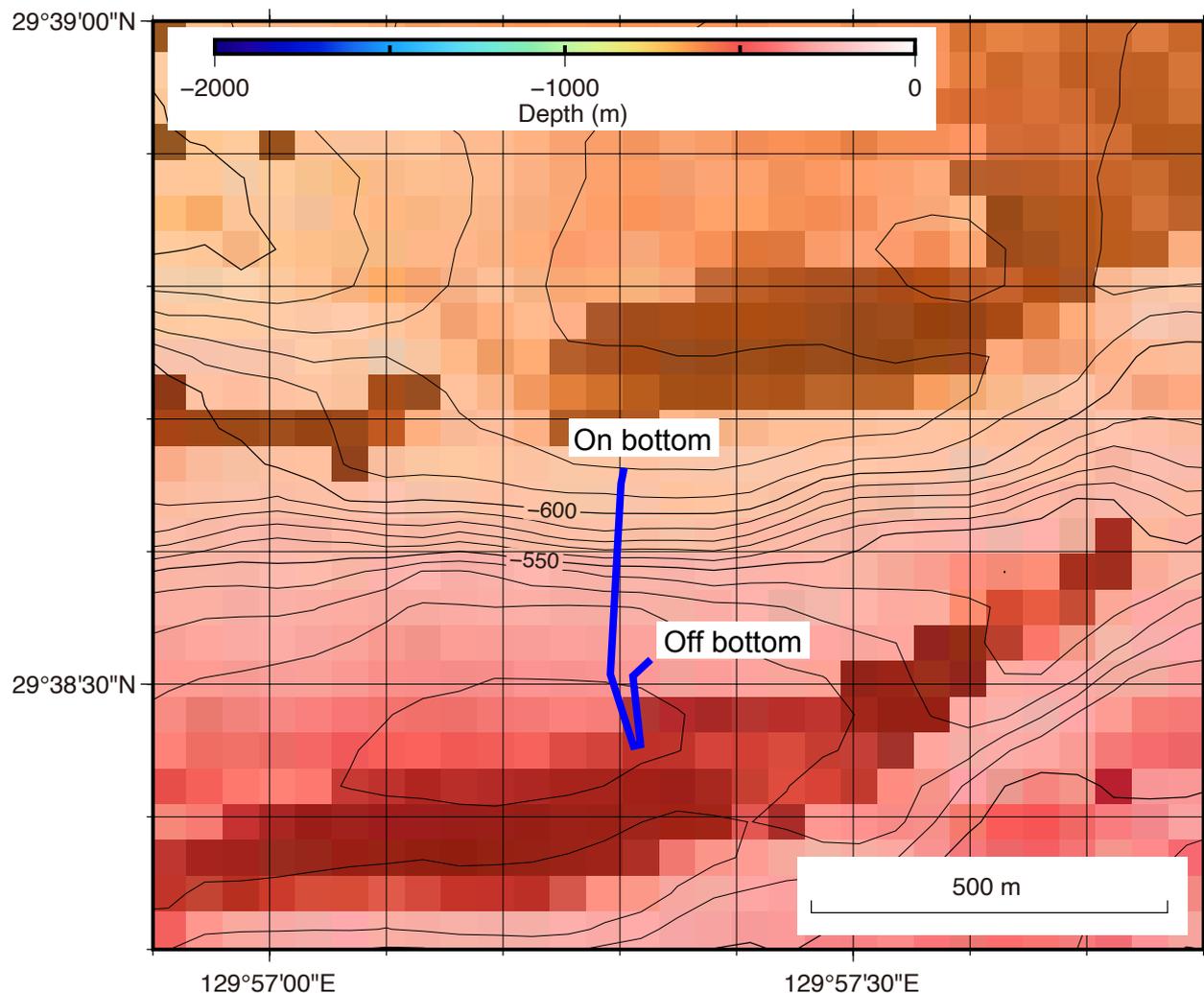
横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.

小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一(2010)トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.

(受 付 : 2022年10月31日 ; 受 理 : 2023年11月16日)



付図1 岩石試料採取に用いたドレッジシステムの模式図及び写真.
Fig. A1 Schematic illustration and photo of dredge system for rock sampling.



付図2 ドレッジサイトの海底地形図. 青線: ドレッジ着底から離底までのGB21-3 D06の船位.

Fig. A2 Bathymetry map of the dredge site. Blue line: ship's position of GB21-3 D06 from when the dredger arrived at the seafloor to when the dredger left the seafloor.

付表1 ドレッジオペレーションに関するデータリスト.

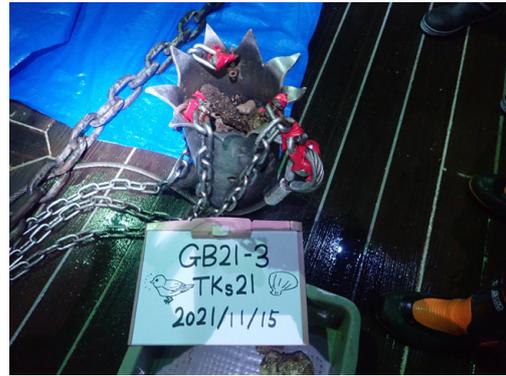
Table A1 Data list of dredge operations.

Site	GB21-3 D06				
Time (JST)	Lat.	Lon.	Depth (m)	Wire out (m)	Description
19:28:47	29°38.6819'N	129°57.3060'E	612	-	Dredge in water
19:38:16	29°38.6633'N	129°57.3036'E	583	608	Dredge on bottom
19:38:53	29°38.6626'N	129°57.3029'E	594	625	Stop wire
20:09:52	29°38.6514'N	129°57.3005'E	594	625	Pull in
20:17:24	29°38.5280'N	129°57.3199'E	503	517	Dredge off bottom
20:33:48	29°38.5830'N	129°57.3114'E	512	-	Dredge on deck

GB21-3 D06



D06 all



D06 all2



D06 all3



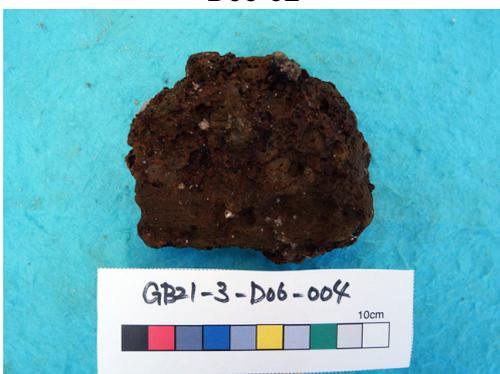
D06-01



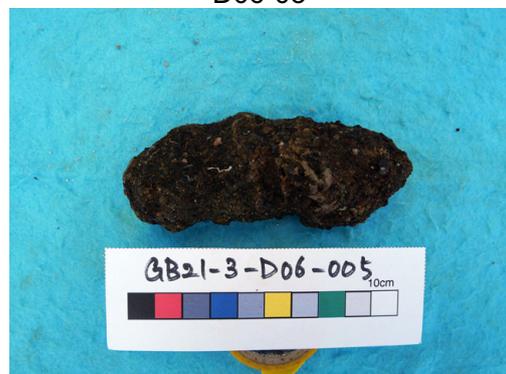
D06-02



D06-03



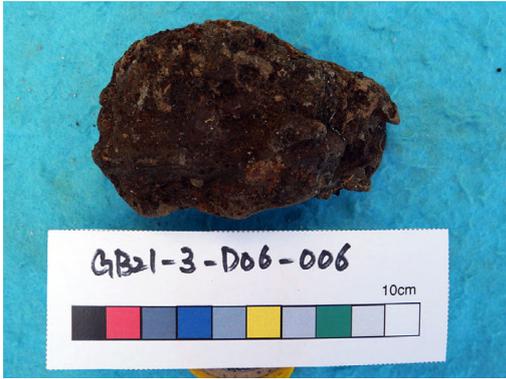
D06-04



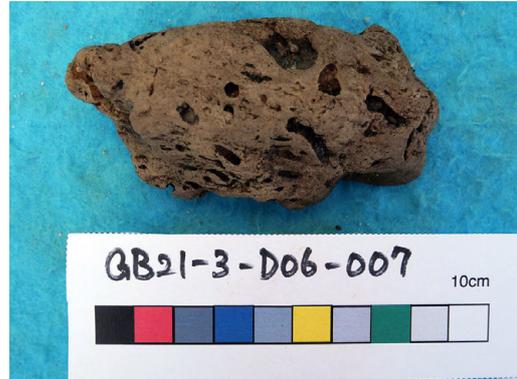
D06-05

図版1 GB21-3 D06で採取した岩石試料の一覧。
Plate 1 List of rock samples obtained at site GB21-3 D06.

GB21-3 D06



D06-06



D06-07



D06-08



D06-09



D06-10



D06-11



D06-12



D06-13

図版1 続き.
Plate 1 Continued.

GB21-3 D06



D06-14



D06-15



D06-16



D06-17



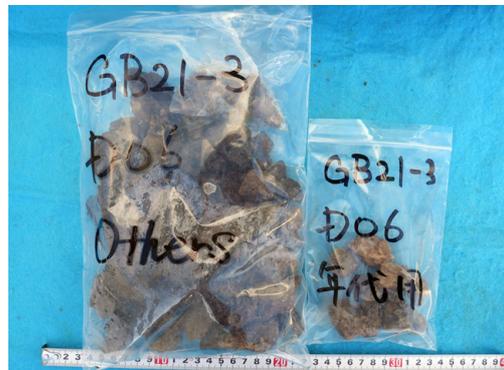
D06-18



D06-19



D06-20



D06 others

図版1 続き.
Plate 1 Continued.

GB21-3 D06



D06 bio

図版1 続き.
Plate 1 Continued.

GS21 航海での高分解能サブボトムプロファイラー探査に基づく トカラ列島周辺海域の海底下浅部構造

三澤 文慶¹・古山 精史朗^{2, 1}・高下 裕章¹・鈴木 克明¹

MISAWA Ayanori, FURUYAMA Seishiro, KOGE Hiroaki and SUZUKI Yoshiaki (2023) Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GS21 cruise. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 231–243, 9 figs.

Abstract: During the GS21 cruise, in October 2021, a high-resolution subbottom profiler (SBP) survey was conducted focusing on the volcanic front around the Tokara Islands using *R/V Shinyo Maru* (Tokyo University of Marine Science and Technology) to obtain geological information on the shallow subbottom structure in this area. In this paper, we summarize the shallow subbottom structure around Higashi-Shin Sone, the southern area of Gajashima Island, the Gogo Sone area, and the Amami Trough near the Tokara Islands revealed by SBP surveys. The area around Higashi-Shin Sone and the southern area of the Gajashima Island tend to have fewer faults and submarine volcanoes than the area around Gogo Sone, and the sedimentary layers consisting of stratified structures are well developed. Around Gogo Sone, depressions and stepped bathymetry, probably caused by faults, have developed, and topographic highs that are thought to be submarine volcanoes have been recognized between the islands. In the Amami Trough, a reflective surface characterized by sand waves has been observed on the northern slope of Oshima-Shin Sone. In addition, the bedding plane of the sedimentary sequence has been exposed as in a cuesta, which is a type of erosion morphology, in some places due to erosion.

Keywords: Tokara Islands, Ryukyu Arc, Volcanic front, Okinawa Trough, Subbottom Profiler (SBP) Survey, Submarine shallow structure

要 旨

2021年10月に実施したGS21航海では、東京海洋大学の神鷹丸を用いて、トカラ列島周辺海域の火山フロント域を中心に高分解能サブボトムプロファイラー(Subbottom profiler; SBP)探査を行い、海底下浅部に関する地質情報を取得した。本論では、SBP探査により明らかになったトカラ列島周辺海域の東新曾根周辺部、臥蛇島南方域、五号曾根周辺部、及び奄美舟状海盆域の海底下浅部の地質構造をまとめる。東新曾根周辺部及び臥蛇島南方域は、五号曾根周辺部と比較して断層及び海底火山が少ない傾向にあり、成層構造からなる堆積層が発達している。五号曾根周辺では、断層に起因したと考えられる凹地形や階段状の地形などが発達し、島嶼の間に海底火山と思われる地形的高まりが認められる。奄美舟状海盆では大島新曾根の北側斜面域でサンドウェーブに起因する特徴ある反射面が認められた。加えて、浸食地形の一種であるケスタ地形に類似した堆積層の層理面

が浸食によりむき出しとなったエリアが認められた。

1. はじめに

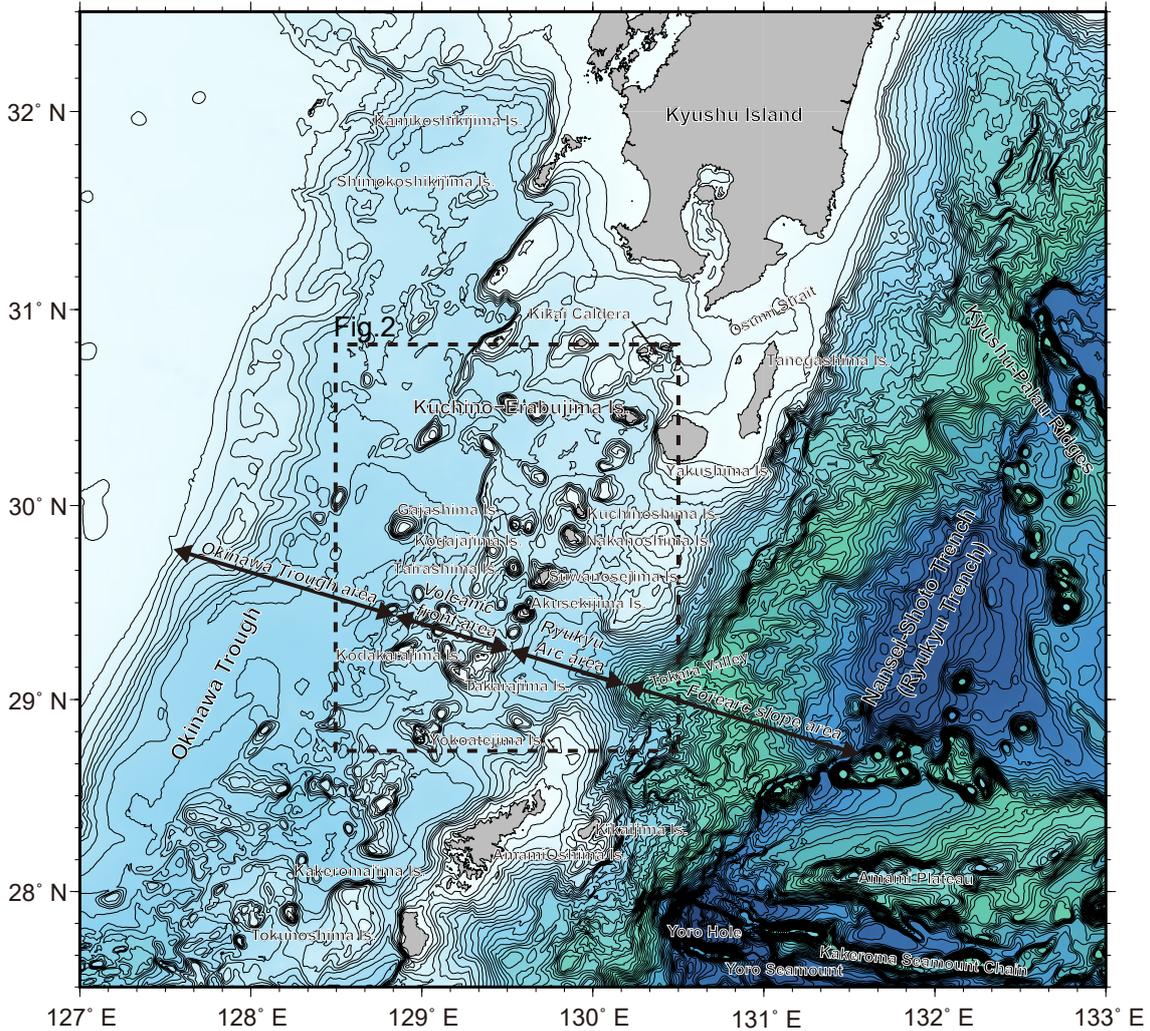
鹿児島県南部に位置する吐噶喇列島(以下、トカラ列島)は九州島と奄美大島の間に島嶼が断続的に発達し、北から口之島、臥蛇島、小臥蛇島、中之島、平島、諏訪之瀬島、悪石島、小宝島、宝島、及び横当島が存在する(第1図)。本海域には複数の島々が存在し、鹿児島側の桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、口之島、中之島、諏訪之瀬島、横当島、そして硫黄島島といった火山島が発達し、南九州から続く琉球弧の火山フロントを形成している(下司・石塚, 2007)(第2図)。なかでも、口之島・中之島・諏訪之瀬島は活火山であり、特に諏訪之瀬島は現在も活発な火山活動が継続している。また、海底にも海底火山に起源を持つ大小様々な規模の海山及び海丘が発達しているが、特に小規模の海丘については名称のついていないものが多い。

GS21航海(2021年10月5日～10月23日)では、トカ

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

² 国立大学法人 東京海洋大学海洋資源環境学部 (Tokyo University of Marine Science and Technology, School of Marine Resources and Environment)

* Corresponding author: MISAWA A., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ayanori-misawa@aist.go.jp



第1図 調査地域広域海底地形図。図中の等深線の間隔は100 mである。

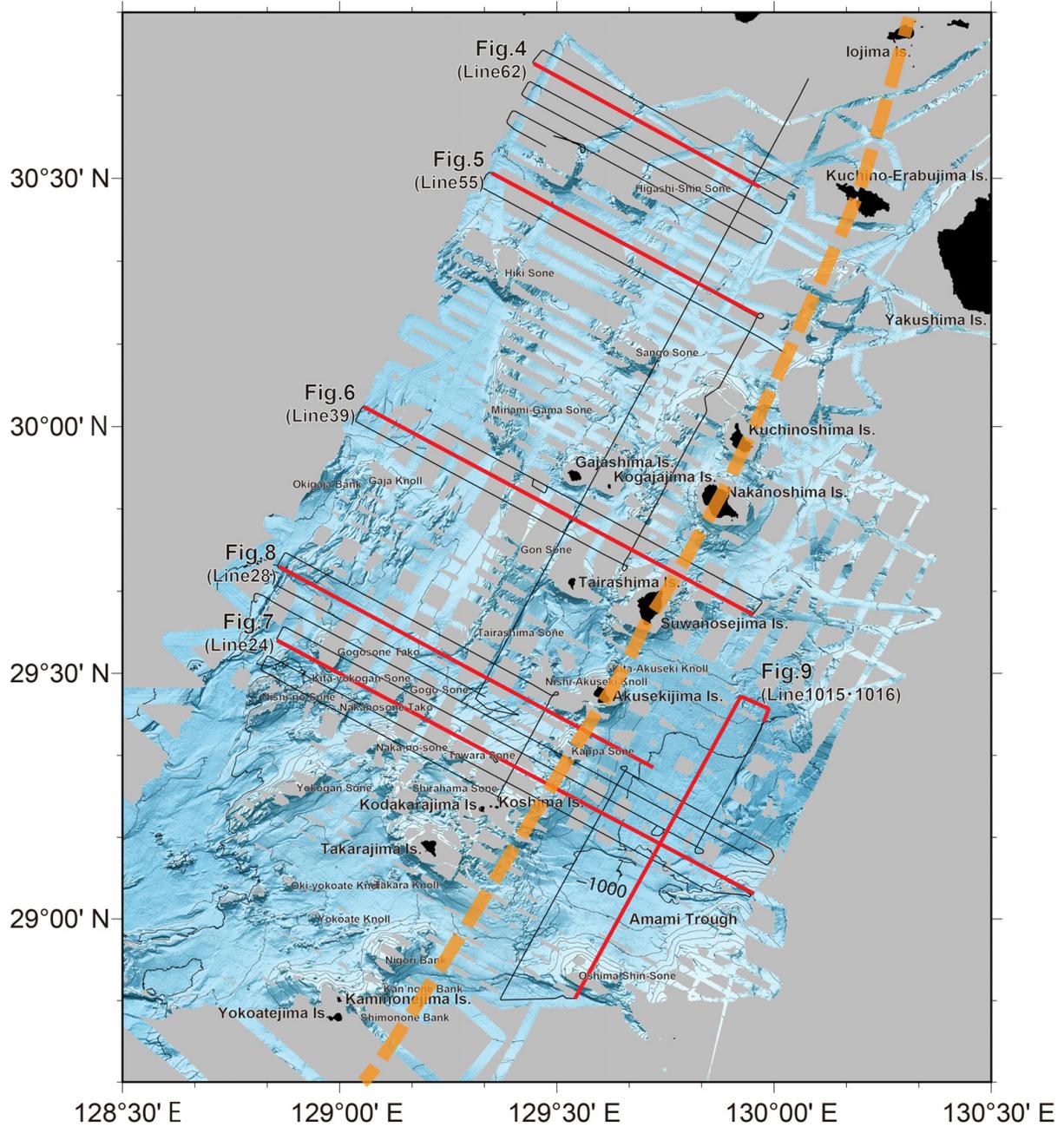
Fig. 1 Bathymetric map of the northern Okinawa Trough. The spacing between contour lines in the figure is 100 m.

ラ列島周辺海域にて海洋地質調査を行い、反射法地震探査及び地球物理観測といった航走観測を実施し、本海域の海洋地質・海底地球物理に関する地質情報の取得した。本論では、GS21航海で取得した高分解能サブボトムプロファイラー (Subbottom profiler; 以下, SBP) で取得した海底下浅部の地質断面を用いて、トカラ列島周辺海域の海底下浅部の地質構造について予察的な結果をまとめる。

2. 調査概要

GS21航海は、2021年10月5日から2021年10月23日の期間において、東京海洋大学所有の練習船「神鷹丸」(986トン)を使用して実施した。本航海の調査は航走観測である反射法音波探査、地球磁場観測(曳航式セシウム磁力計・船上三成分磁力計)及び高分解能SBP探査を実施した。高分解能SBP探査は神鷹丸搭載のKongsberg社製の

TOPAS PS18を使用し、調査時は船速8ノットで航行し、データ取得を実施した。本海域での調査測線は、GB21-1航海以降の反射法地震探査などの航走観測用に設定されたものを用い、琉球弧の軸方向に対して直交方向に切る西北西-東南東方向、平行な北北東-南南西方向の2種類である。本調査で使用したSBP装置であるTOPAS PS18は15-21 kHzの一次高周波数と0.5-6 kHzの二次低周波数 (Secondary Low Frequency; SLF)の2種類の波を発生させるパラメトリック方式のSBPである。このパラメトリック方式SBPの詳細に関しては、例えば佐藤ほか(2011)及び井上ほか(2017)を参照されたい。SBPは全測線に渡ってチャープ波モードで発振を行った。収録データはKongsberg社の独自フォーマット(.allファイル)で収録された後に、SEG-Y形式に変換した。変換後のSEG-Yファイルは、Chesapeake Technology社製のSonarWiz 7を用いてデータの表示及び編集を行った。なお、本航海では神



第2 図 高分解能海底地形図及び探査測線. 図中の黒線が探査測線を示し, 赤線が本論中で使用した断面図の位置を示す. また, オレンジ破線は火山フロントの位置を示す(例えば, Minami *et al.*, 2021).

Fig. 2 High-resolution bathymetric map around Tokara Islands area and GS21 cruise survey lines. Black lines indicate SBP survey track. Red lines indicate SBP profiles in this study. Dashed bold orange line indicates the position of the volcanic front (ex. Minami *et al.*, 2021).

鷹丸搭載のナローマルチビーム音響測深装置 (Multibeam echo sounder, 以下MBES) が不調で観測が実施できなかったことにより, 音響機器同士の干渉の有無や対処方法は検討していない。

3. 地質概説

南西諸島海溝は, フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に年間 50 mm (Seno *et al.*, 1993) の速さで沈み込む全長約 1,200 km, 最大水深約 7,500 m 以上におよぶ「沈み込み帯」である(第1図)。また, 南西諸島海溝に

沿って発達する琉球弧はトカラ海峡及び慶良間海裂にて北琉球、中琉球、南琉球の3つのエリアに大別され(小西, 1965), このうち本調査の対象であるトカラ列島周辺海域は北琉球に位置する。加えて、北琉球と中琉球の境界はトカラ海峡が位置するトカラギャップと言われる(松本ほか, 1996)。

トカラ列島周辺海域の地形は西から東に向かって、背弧海盆である沖繩舟状海盆域(以下、沖繩トラフ域)、火山島が線上に点在する火山フロント域、屋久島・種子島から奄美大島まで連続する島弧である琉球弧、及び南西諸島海溝側の斜面域である前弧斜面域に大別区分される(例えば、Ishibashi *et al.*, 2015)。本海域の地形は多くの火山島及び海底火山が発達することが特徴である。トカラ列島に多く見られる海底火山は、南海トラフおよび南西諸島海溝でのフィリピン海プレートの沈み込みに伴い形成された火山フロントでの火山活動に起源がある。トカラ列島周辺海域の火山岩類は溶岩流を主体とし、まれにカンラン石結晶も認められているが大部分は両輝石安山岩からなり、鮮新世前期(4 Ma前後)と更新世中期(0.7 Ma以降)を中心とした時期に集中的に活動し、形成されたと指摘されている(横瀬ほか, 2010)。また、口之島では角閃石安山岩、中之島では角閃石デイサイト及び両輝石デイサイト、臥蛇島及び小臥蛇島では角閃石安山岩が分布している。一方、宝島・小宝島・小宝小島では、中新世と推定される火山岩から構成される宝島層群が発達する(中野ほか, 2008)。

トカラ列島周辺海域の海洋地質研究は、火山フロント域から沖繩トラフにかけて無数に発達する海底火山や火山岩類に関する研究が多い(例えば、横瀬ほか, 2010, Minami *et al.*, 2021)(第2図)。特に、本海域には未記載の海底火山地形が無数に存在し、近年では海上保安庁海洋情報部による詳細な海底地形調査より、白浜曾根の北方では海底カルデラの存在、白浜曾根での熱水噴出の兆候の発見と周辺部でのリニアメント分布から推定された島弧横断方向の拡大の存在、奄美リフトと呼ばれる活動的なリフト帯の発見とそれに関連する火山活動の存在が新たに報告されている(Minami *et al.*, 2014, 2021, 2022)。また、本海域の大構造に関してはArai *et al.* (2018)により沖繩トラフから火山フロント域を通る反射法地震探査結果が報告され、火山フロント域では貫入構造に伴う形成されたマウンドの存在や沖繩トラフ縁辺部でのリフティングに伴い無数の正断層や横ずれ断層系の存在が指摘された。

4. 海底地形概要

本地域の地形の大枠を東から西に沖繩トラフ域・火山フロント域・琉球弧・前弧斜面域(例えば、Ishibashi *et al.*, 2015)に区分されているが、今回の調査では沖繩トラフ域東縁部・火山フロント域・琉球弧を対象とした(第

1図及び第2図)。本調査では調査範囲西縁の沖繩トラフ域で最大水深約1,150 m、一方調査範囲東縁の奄美舟状海盆で最大水深約1,200 mの範囲を調査した。なお、本海域の海底地形調査結果の詳細に関しては、高下ほか(2023)を参照されたい。

本海域の海底地形の特徴は、沖繩トラフと島嶼群からなる火山フロント域の間に海丘や曾根といった地形的高まり無数に点在している。今回の調査範囲である諏訪之瀬島から横当島の間では、北から東新曾根、墓曾根、サンゴ曾根、南墓曾根、臥蛇海丘、沖臥蛇堆、権曾根、平島曾根、五号曾根タコ、北悪石海丘、西悪石海丘、五号曾根、北横ガン曾根、西ノ曾根、中ノ曾根タコ、カップ曾根、中ノ曾根、俵曾根、横ガン曾根、白浜曾根、宝海丘、沖横当海丘、横当海丘、濁り曾根及び上ノ根海丘などが位置し、そのほとんどが海底火山に起源があると考えられている(第2図)。また、小規模な地形的高まりが点在し、その多くも海底火山と考えられる。一方、島嶼域の東側では大島新曾根以外に地形的高まりがほぼ無く、最大水深約1,100 mの奄美トラフが位置している(第2図)。

本海域には複数の線状構造(リニアメント)が認められる(第2図)。沖臥蛇曾根及び臥蛇海丘の周辺部を含む沖繩トラフ東縁部では概ね南北走向もしくは北北東-南南西走向のリニアメントが発達している(三澤・鈴木, 2022)。また、俵曾根の北方では北西-南東走向の明瞭なリニアメントが認められる。

5. SBP 探査結果

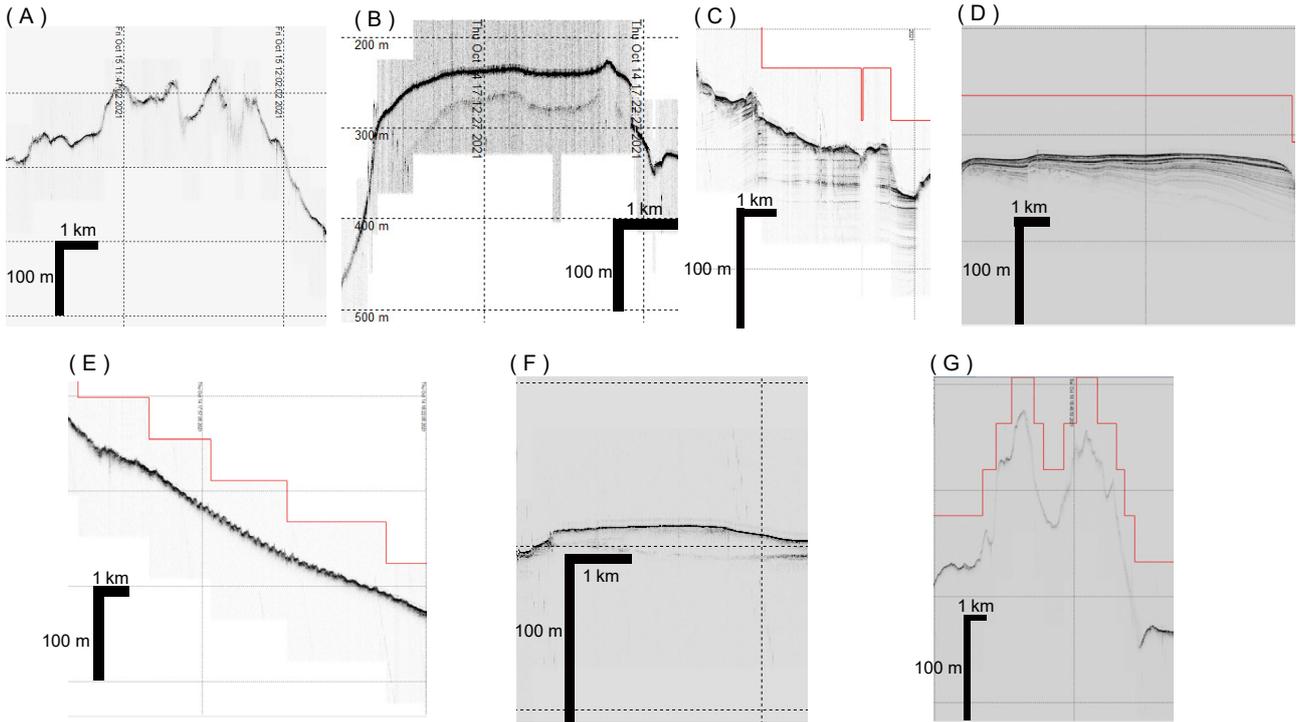
本調査では、トカラ列島を直交方向に切る西北西-東南東方向の測線を21本、トカラ列島に並行な北北東-南南西方向測線を6本、合計27本の測線にて観測を行い、約1,095 miles(約2,028 km)分のデータを取得した(第2図)。本調査では海底面下最大約100 m部分の構造に関する地質情報を取得することができた。

本調査で取得したSBP断面を記載するにあたり、層相区分に関しては池原ほか(1990)及び井上ほか(2017)に準じた。池原ほか(1990)では海底面及び内部構造の反射パターンの組み合わせから音響的層相を8パターンに、これに井上ほか(2017)では急斜面部分に認められる海底面の反射が非常に弱いものの1パターンを加えた全9パターンの音響的層相とした(三澤・鈴木, 2022)。これらの音響的層相に基づきSBP断面を解釈した結果、本調査範囲では層相(Facis) 1, 2, 3, 4, 7, 8及び9の7パターンが認められ、その特徴について以下に示す(第3図)。

層相1: 海底面での反射が強く、内部構造は見えないものの、海底面の起伏が激しい。

層相2: 海底面での反射が強く、内部構造は見えないものの、海底面の起伏がほとんどないか平坦なもの。

層相3: よく成層した構造を示し、反射面の間隔が荒いもので、海底面は平坦のもの。



第3図 調査海域での音響的層相区分. A: 層相1, B: 層相2, C: 層相3, D: 層相4, E: 層相7, F: 層相8, G: 層相9. 区分は池原ほか(1990)及び井上ほか(2017)に準じた.

Fig. 3 Typical cases of each acoustic facies. A: facies 1, B: facies 2, C: facies 3, D: facies 4, E: facies 7, F: facies 8, and G: facies 9. The acoustic facies classification is based on Ikehara *et al.* (1990) and Inoue *et al.* (2017).

層相4: よく成層した構造を示し、反射面の間隔が密なもので、海底面は平坦なもの。

層相7: 海底面あるいは反射面が小さな双曲線状を呈し、双曲線直下の内部構造は認められないことが多いが、より下位の構造がみられることもある。

層相8: 内部反射のみられない部分。その上位もしくは下位、あるいはその両方に他の層相がみられることが多く、マウンド状・レンズ状・層状あるいは楔形の断面形態を示す。

層相9: 急斜面部分に認められる海底面の反射が弱く、内部構造も不明瞭なもの。

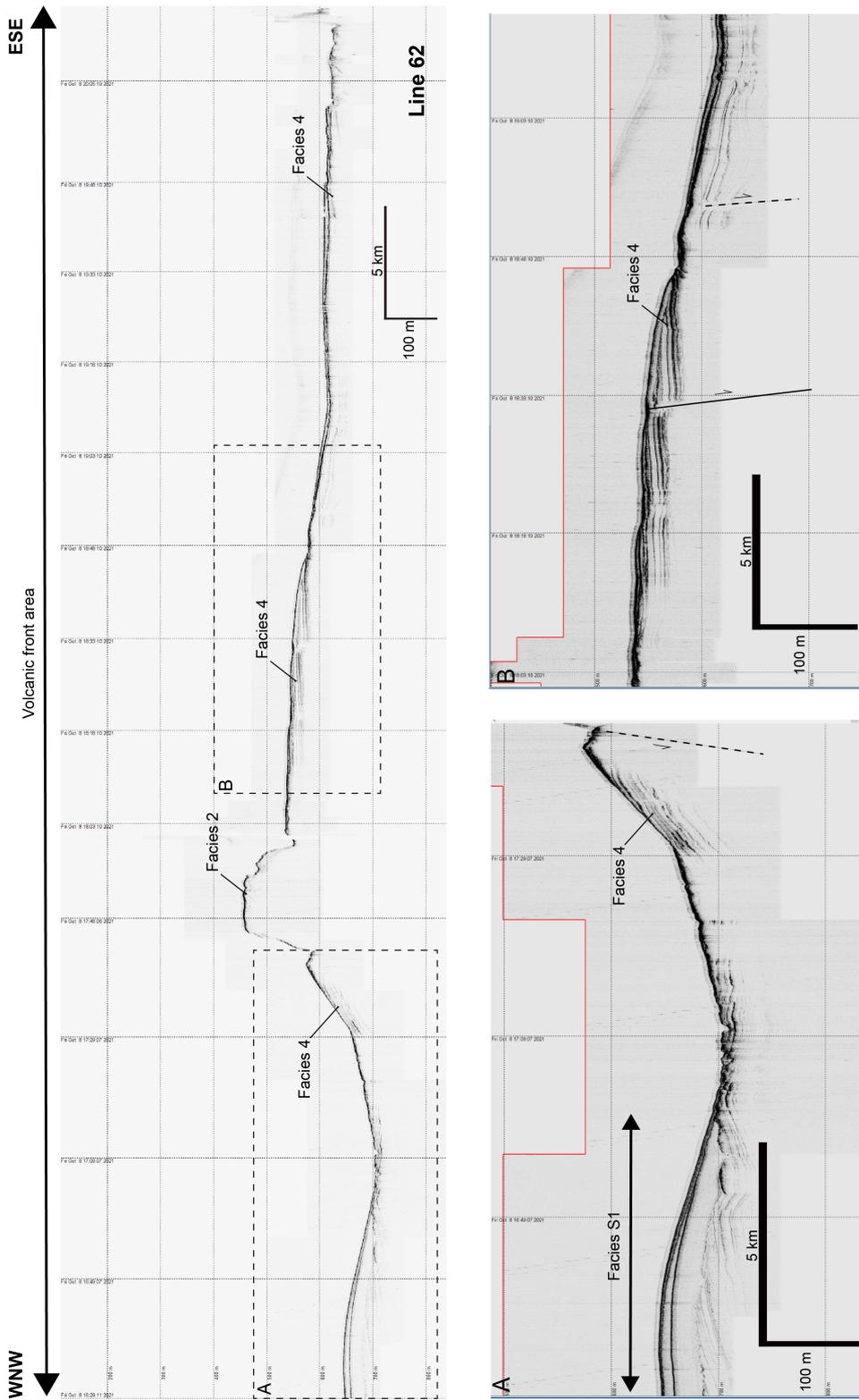
本報告では、調査範囲を北から東新曾根周辺部、臥蛇島南方域、五号曾根周辺部、及び奄美舟状海盆域の4区画に分けて、詳細な音響的層相の分布や海底下浅部の地質構造についてまとめる。

5.1 東新曾根周辺部

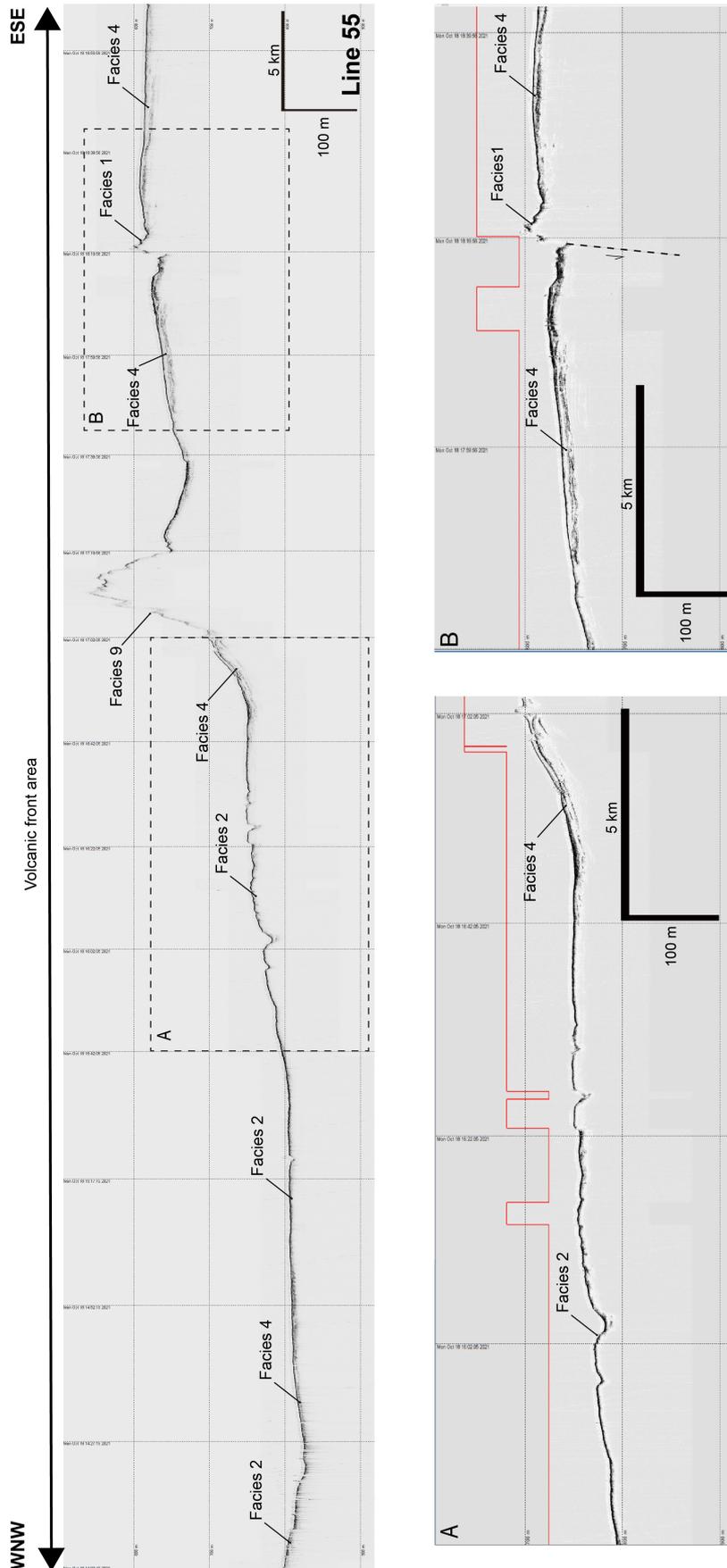
東新曾根は火山フロント域に位置し、曾根部分を除き、その周辺部は水深600 m程度は比較的なだらかな平坦面を示す(第2図)。測線62の中央部に位置する地形的高まりの頂部は比較的平坦な地形を示し、層相2が認められる(第4図)。また、測線55の中央部に位置する地形的高まり部分では、急斜面であるために起因して海底面の反

射が微弱となる層相9が認められる(第5図)。平坦面部分では層相4もしくは層相2が卓越し、層相4の部分では成層した堆積層が認められ、最大で海底面下約70 mの部分をとらえている(第4図及び第5図)。なかでも、第4図の北西端部には海底面下が音響的に透明な部分が海底下約30 mに渡って認められるが、その下部に微弱であるが成層した反射面が認められる(第4A図)。このような層相は先行研究などでは認められず、池原ほか(1990)の層相8と4を併せた特徴である。ゆえに、この層相を新しく層相S1と定義する。この層相の上部の音響的に透明な部分は、音響的に散乱していると考えられるため火山性碎屑物などから構成されることが示唆される。

本地域の平坦面部では部分的に不連続部が認められ、これらは正断層と解釈できる(第4B図及び第5図)。本地域の地質構造で特徴的なのは、トカラ列島南部地域に比べて、全体的に断層が少ないことである。また、断層周辺部には断層に伴って形成されたと考えられる比高差最大100 mの凹地が発達する(第5B図)。しかしながら、この断層活動の累積性などは本断面では検討できなかった。加えて、東新曾根などが位置する北部では、南部と比べて下部からの貫入構造に起因した小規模な海底火山もほぼ認められない。

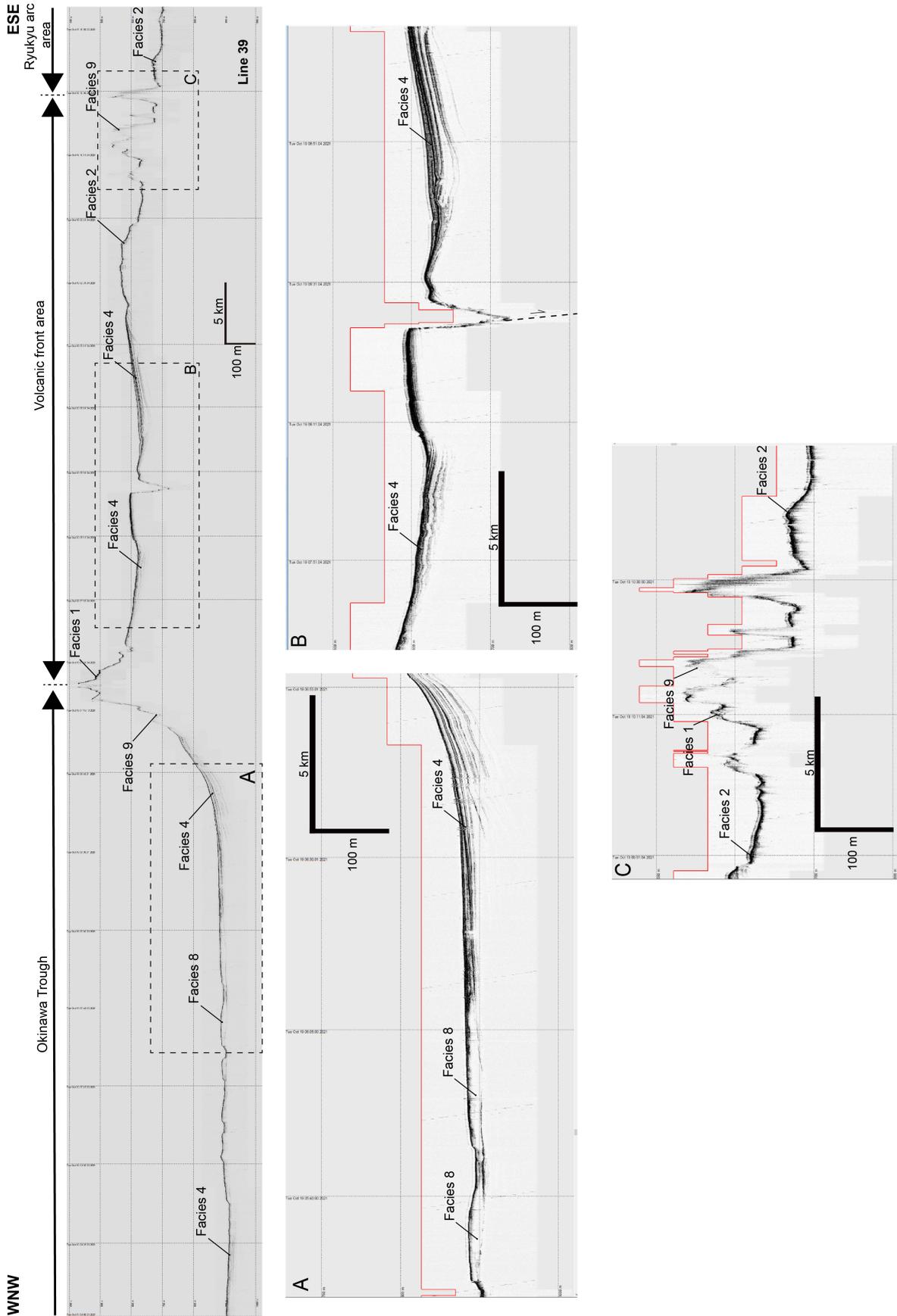


第4図 測線62のSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探査測線の位置は、第2図を参照されたい。
 Fig. 4 SBP profile of Line 62 and close-up profiles. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.



第5図 測線55のSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探査測線の位置は、第2図に示す。

Fig. 5 SBP profile of Line 55 and close-up profiles. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.



第6図 測線39のSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探査測線の位置は、第2図に示す。
 Fig. 6 SBP profile of Line 39 and close-up profile. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.

5.2 臥蛇島南方域

臥蛇島は火山フロント域に位置する島であり、臥蛇島南方に位置する平坦面も火山フロント域に位置する。測線39では測線の中央部に地形的高まりがあり、それを境として西側は水深900 mの平坦面、東側には水深600 m前後の平坦面が発達している(第6図)。測線39(第6図)では、中央部に位置する地形的高まりでは層相1及び層相9が認められる。また、2種類の深度からなる平坦な領域では主に層相4が認められるが、部分的に層相2及び層相8も認められる(第6A図)。このうち、地形的高まりの西側に位置する水深約900 mの平坦面では、層相4の成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約20 mの範囲が確認できる(第6A図)。加えて、部分的に海底面下の部分が音響的に透明となる層相8も認められる。一方、地形的高まりの西側に位置する水深600 mの平坦面においても、成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約40 mの範囲が確認できる。平坦面では局所的に凹地状の地形が認められるが、この部分の精密な海底地形が取得されていないため、その連続性などは不明である(第6B図)。凹地の基部には正断層の存在が示唆されるため、この地形は断層活動に伴い形成されたものと考えられる。加えて、断面の東縁部には層相1及び層相9が認められる比高最大約100 mの複数の地形的高まりが認められる(第6C図)。

これらの地形は中之島-諏訪之瀬島間に位置しているため海底火山と考えられるが、該当部分の精密な海底地形は現状で取得されていないため、規模などは推定できない。

5.3 五号曾根周辺部

五号曾根はトカラ列島の島嶼群から西に約40 km離れた地点に位置する最大比高約500 mの地形的高まりである(第2図)。五号曾根の周辺には北から平島曾根、五号曾根タコ、西悪石海丘、五号曾根タコ、北横ガン曾根、西ノ曾根、中ノ曾根タコ、中ノ曾根、俵曾根などの地形的高まりが点在している(第2図)。五号曾根及び五号曾根タコを通る測線24(第7図)では、五号曾根タコ周辺では海底面の反射波が微弱である層相9が認められる。また、五号曾根頂部には起伏に富んだ地形を示す層相1が、斜面部分には反射波が微弱な層相9が認められる。五号曾根の東方には水深約550 m前後の平坦面が発達する。この平坦面部分では層相4が認められ、成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が存在し、海底面下最大で約30 mの範囲が確認できる(第7A図)。平坦面の東縁部では、比高約100 mの地形的高まりがあり、この部分の東側には東落ちの階段状の地形が認められる(第7B図)。この階段状の地形部分では、正断層が発達することが推察される。

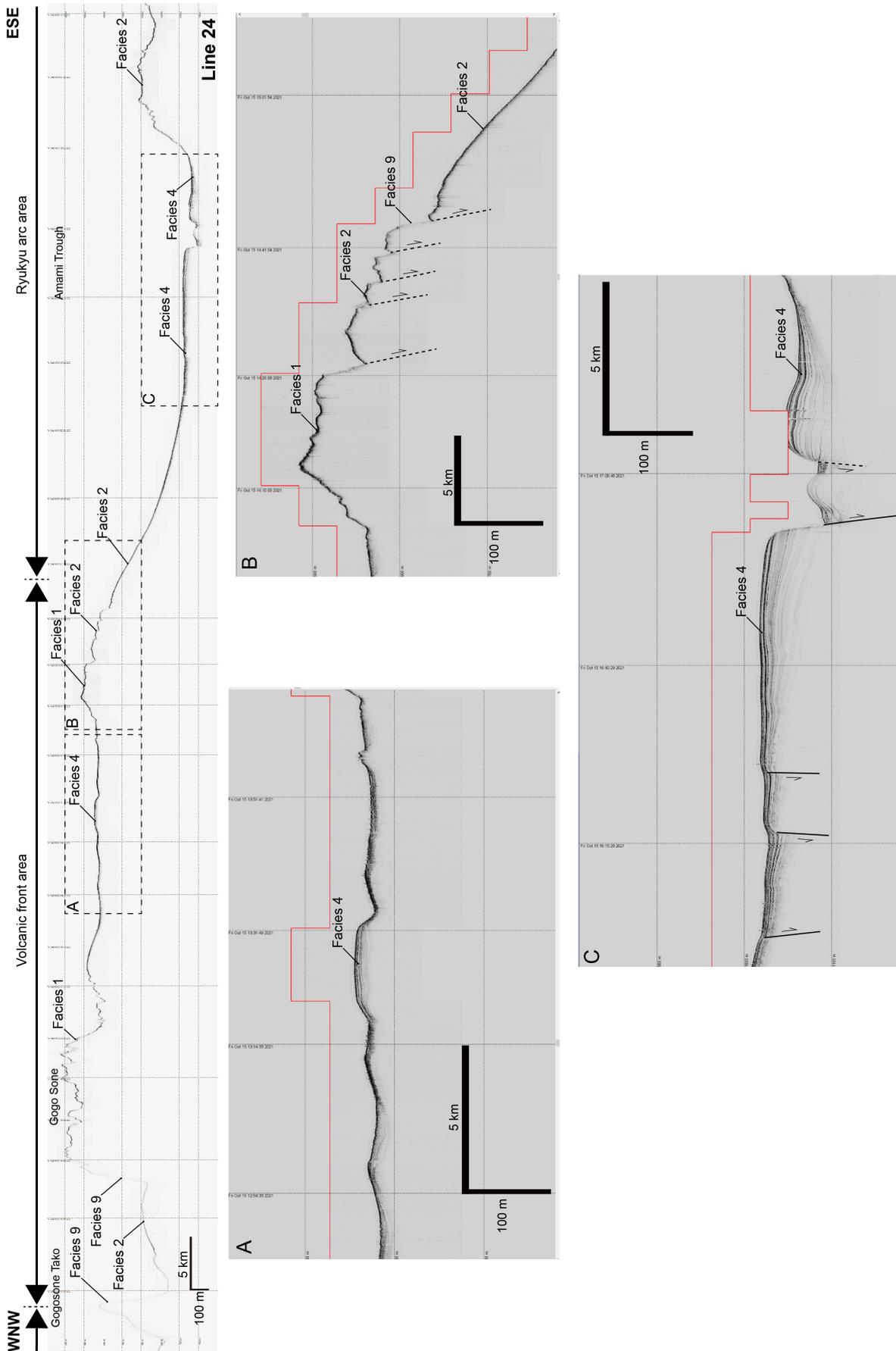
五号曾根の北側には水深800～900 mの平坦面が認められる。平坦部の西端部には最大比高200 mの凹地が存在し、その両端部には溝地形が発達している(第8A図)。凹地の中央部には堆積層が認められ、層相4の成層した海底面にほぼ平行で東傾斜した連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約50 mの範囲が確認できる(第8A図)。また、溝地形部分には海底地形でも北北東-南南西方向に約40 kmに渡って追跡できる(第2図)。この溝地形の両端部には正断層の存在が示唆される(第8A図)。溝地形の東方には水深850 m程度の平坦面が存在し、層相4の成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約25 mの範囲が確認できる(第8B図)。平坦面の一部に比高最大20 m程度の崖地形が認められ、この部分で堆積層が不連続になることから東落ちの正断層と考えられる(第8B図)。平坦面の東縁に比高100 m程度の緩やかな地形的高まりが存在し、この東縁に比高差最大70 m程度の崖地形が認められる(第8C図)。この崖部分にも東落ちの正断層が分布するものと推察される。火山フロント域の東端にはカッパ曾根が位置する。カッパ曾根の部分では起伏に富んだ地形を示し、大部分で層相9が認められる。

5.4 奄美舟状海盆地

測線1015は奄美舟状海盆を北東-南西方向に走る測線である。測線の南端部に大島新曾根が位置し、大島新曾根部分の頂部は比較的平坦であり、層相2が認められる。大島新曾根の北側斜面には層相7が認められる(第9A図)。この部分に関しては、三澤・鈴木(2022)にて記述したサンドウェーブをとらえたものと考えられる。斜面の麓部分には層相4の成層した成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約40 mの範囲が確認できる(第9B図)。また、この部分には堆積層に複数の不連続部が認められ、南落ちの正断層の発達も認められる。堆積層の中央部には堆積層の反射面が不連続になる部分が認められ、正断層が認められる(第7C図及び第8D図)。堆積層には凹地の存在も認められ、この凹地も正断層によって形成されたものと考えられるが、形成要因に関しては不明である(第7C図)。測線1015の終点付近から次測線である測線1016の開始直後に至る区間で堆積層が浸食され、堆積層の層理面が露出している部分がある(第9C図)。この部分にはSBP断面上では断層なども認められず、浸食性の地形と考えられ、一種のケスタ地形(例えば、von Haugwitz and Wong, 1993)の可能性もある。

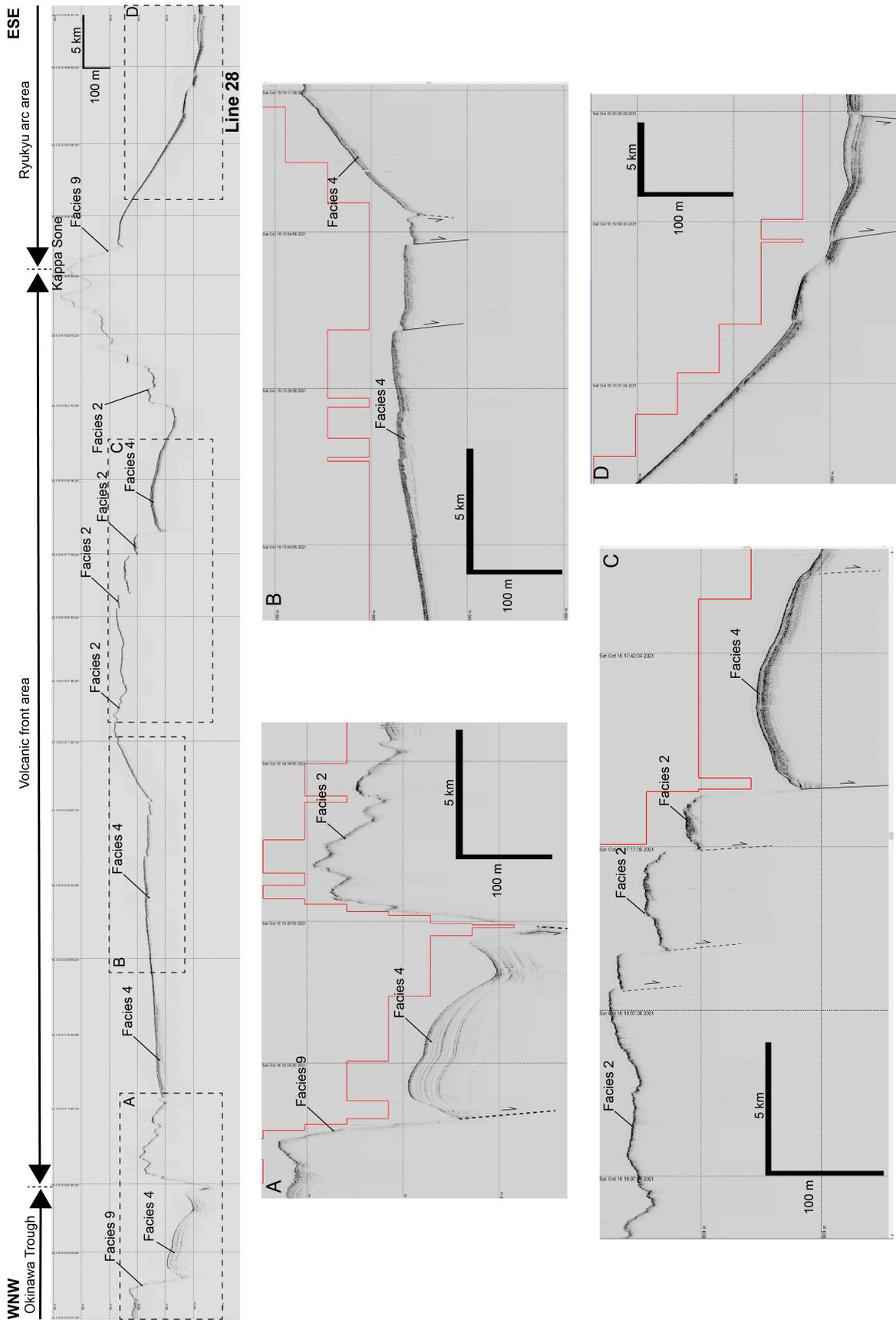
6. まとめ

神鷹丸でのGS21航海では、トカラ列島周辺海域の沖縄トラフ域・火山フロント域・琉球弧で高分解能SBP探査を行い、本海域の海底面下浅部に関する地質情報を取



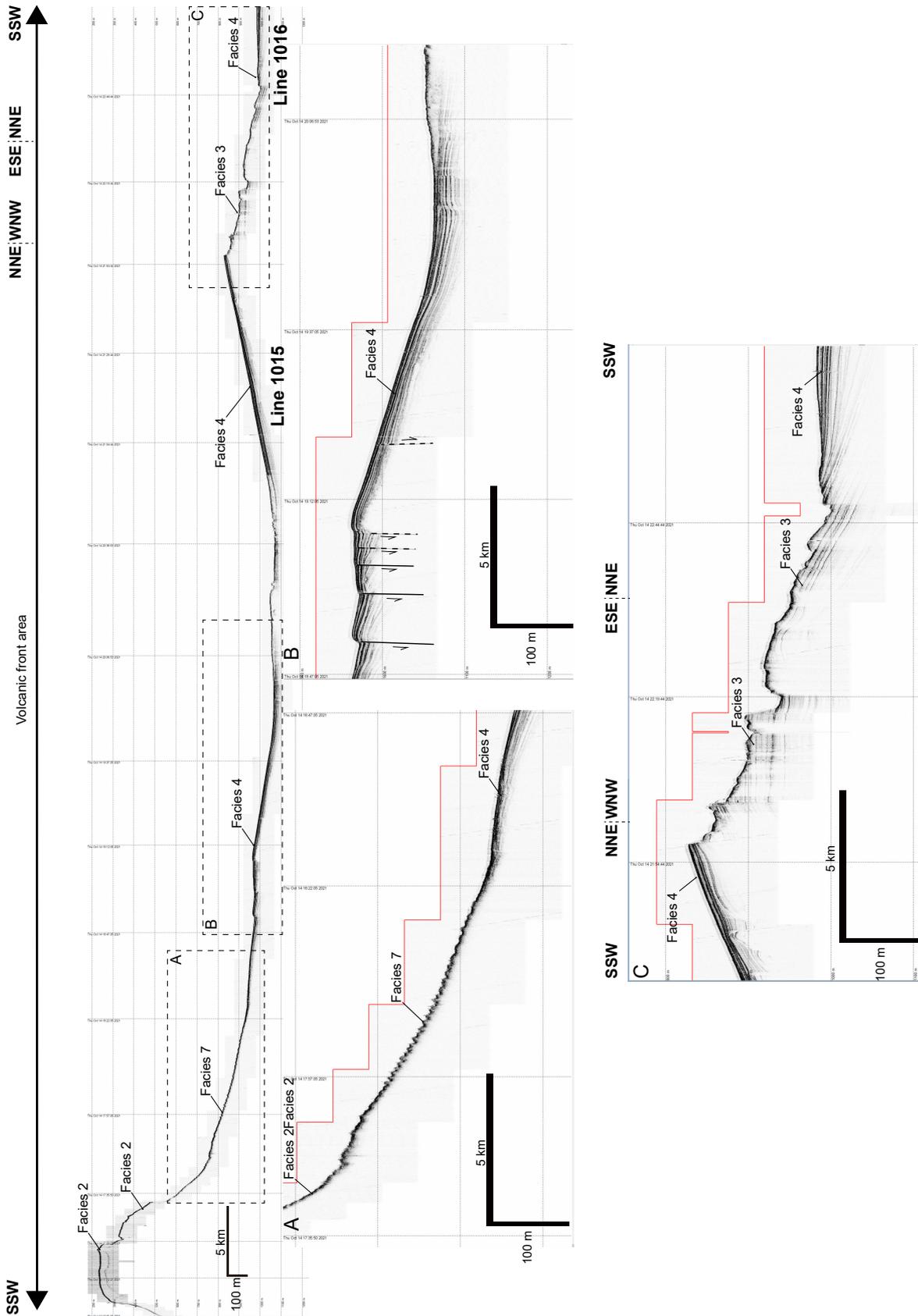
第7図 測線24のSBP断面図。 探査測線の位置は、第2図に示す。

Fig. 7 SBP profile of Line 24. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.



第8図 測線28のSBP断面図. 探査測線の位置は、第2図に示す。

Fig. 8 SBP profile of Line 28. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.



第9図 奄美舟状海盆を通る測線1015及び測線1016のSBP断面図。探査測線の位置は、第2図に示す。

Fig. 9 SBP profile of Line 1015 and 1016 along the Amami Trough. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.

得した。今回の調査を行った東新曾根周辺部及び臥蛇島南方域は、調査範囲南部の五号曾根周辺部と比較して断層及び海底火山が少ない傾向にあり、平坦部に成層構造からなる堆積層が発達している。五号曾根周辺では、断層に起因したと考えられる凹地地形や階段状の地形などが発達し、島嶼の間に海底火山と思われる地形的高まりが認められる。奄美舟状海盆では、大島新曾根の北側斜面域でサンドウェーブに起因する特徴ある反射面が認められ、かつ浸食地形の一種であるケスタ地形に類似した層理面がむき出しとなったエリアが存在することが明らかになった。今後、反射法地震探査により取得された深部構造と比較することにより、これらの特徴的な海底地形と浅部地層構造の成因についてより詳細な検討が進むことが期待される。

本調査では海底地形がSBP探査と同時に取得できなかったため、SBP断面と海底地形を併せて解釈できない地域が複数あった。今後2022年度に取得した地形データも加えた海底地形データと合わせて再検討することで、海底地形と海底下の浅部構造の関係を議論できるものと考えられる。

謝辞：本調査を行うにあたり、練習船神鷹丸の宮崎唯史船長をはじめとする乗組員の皆様、観測補助として乗船して頂いた東京海洋大学の学生及び大学院生の皆様、東京海洋大学の関係者の皆様には大変お世話になりました。記して厚く御礼申し上げます。

文 献

- Arai, R., Kodaira, S., Takahashi, T., Miura, S. and Kaneda, Y. (2018) Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc. *Earth, Planets and Space*, **70**, 1–15.
- 下司信夫・石塚 治 (2007) 琉球弧の火山活動. 地質ニュース, no. 634, 6–9.
- 池原 研・佐藤幹夫・山本博文 (1990) 高分解能音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作用. 地質学雑誌, **96**, 37–49.
- 井上卓彦・三澤文慶・荒井晃作 (2017) GH16航海における宮古島周辺海域のSBP記録概要. 板木拓也 (編) 「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成28年度研究概要報告書—宮古島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 72, 34–46.
- Ishibashi, J. I., Ikegami, F., Tsuji, T. and Urabe, T. (2015) Hydrothermal activity in the Okinawa Trough backarc basin: Geological background and hydrothermal mineralization. In: J. Ishibashi, K. Okino and M. Sunamura (eds.) *Subseafloor biosphere linked to hydrothermal systems*, Springer, 337–359. doi:10.1007/978-4-431-54865-2_27
- 高下裕章・佐藤太一・鈴木克明 (2023) GB21-2, 3トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要. 地質調査研究報告, **74**, 193–202.
- 小西健二 (1965) 琉球列島 (南西諸島) の構造区分. 地質学雑誌, **71**, 437–457.
- 松本 剛・木村政昭・仲村明子・青木美澄 (1996) 琉球弧のトカラギャップおよびケラマギャップにおける精密地形形態. 地学雑誌, **105**, 286–296.
- Minami, H., Oikawa, M. and Ito, K. (2014) Newly discovered submarine volcano near the Tokara Islands. Report of Hydrographic and Oceanographic researches (海洋情報部研究報告), no. 51, 145–151.
- Minami, H., Ohara, Y. and Tendo, H. (2021) Volcanic and tectonic features of Shirahama Bank in the northern Ryukyu Arc: Implications for cross-arc volcanism controlled by arc-parallel extension. *Marine Geology*, **441**, 106623.
- Minami, H., Saitou, K. and Ohara, Y. (2022) The Amami Rift: Clarifying the roles of rifting and volcanism in the central Ryukyu Arc. *Marine Geology*, **450**, 106839.
- 三澤文慶・鈴木克明 (2022) GK20航海での高分解能サブボトムプロファイラー探査に基づくトカラ列島周辺海域の海底下浅部構造. 地質調査研究報告, **73**, 235–248.
- 中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄 (2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- 佐藤智之・荒井晃作・井上卓彦 (2011) 新規に搭載されたサブボトムプロファイラー (TOPAS PS18) の特性. 荒井晃作 (編) 「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成22年度研究概要報告書—沖縄島西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 55, 35–41.
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A.E. (1993) A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 17941–17948.
- von Haugwitz, W. R. and Wong, H. K. (1993) Multiple Pleistocene ice advances into the Skagerrak: A detailed seismic stratigraphy from high resolution seismic profiles. *Marine Geology*, **111**, 189–207.
- 横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.

(受 付 : 2022 年 10 月 31 日 ; 受 理 : 2023 年 10 月 20 日)

GB21-3 航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義

有元 純^{1,*}・宇都宮 正志¹

ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki (2023) Depositional ages of sedimentary rocks obtained from the sea floor around the northern Tokara Islands during GB21-3 cruise, based on calcareous microfossil assemblages, and their geological significance. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 245–257, 3 figs and 3 tables.

Abstract: Calcareous nannofossil and planktic foraminiferal assemblages were examined to determine the depositional ages of sedimentary rocks obtained during GB21-3 cruise at around the Tokara Islands, northern Ryukyu arc. Depositional ages of examined microfossil-bearing samples are shown to be the Early Pleistocene (Calabrian) or younger. Several samples from the western margin of the Tane–Yaku Spur in the forearc side and from between the Higashi–Shin Sone and Sango Sone in the back-arc side, are correlated with calcareous nannofossil biozone CN14a and/or planktic foraminiferal biozone PT1a, and their depositional ages fall between 1.59 and 0.43 Ma during the Early–Middle Pleistocene (Calabrian–Chibanian). The other younger samples are correlated with calcareous nannofossil biozone CN15, which constrains the depositional ages younger than 0.29 Ma (Middle Pleistocene to Recent). Our observation on lithology and microfossil assemblages imply that the sedimentary rock units which derived the examined samples likely have geological records of volcanogenic sedimentation and tectonic influence on uppermost crustal recycling at the northern Ryukyu arc during the Pleistocene.

Keywords: biostratigraphy, biochronology, Quaternary, Pleistocene, calcareous nannofossil, planktic foraminifera, Tokara Islands, Ryukyu Arc

要 旨

GB21-3航海において北部琉球弧トカラ列島周辺の海底から採取された堆積岩試料について、年代決定に有効な石灰質微化石(石灰質ナノ化石・浮遊性有孔虫)の検討を行った。石灰質微化石の産出が認められた検討試料は全て、前期更新世カラブリアン期以降の堆積年代を示す。前弧側の種子・屋久海脚西縁部から得られた試料の一部、及び背弧側の東新曾根-サング曾根間から得られた試料は、石灰質ナノ化石帯CN14a垂帯もしくは浮遊性有孔虫化石帯PT1a垂帯に対比され、堆積年代は1.59–0.43 Ma(前期-中期更新世)と考えられる。また種子・屋久海脚西縁部で得られた試料の一部は、石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され、堆積年代は0.29 Ma以降(中期更新世以降)に制約される。岩相や微化石群集組成から、これらの試料の由来する地質体は前期更新世以降の北部琉球弧における火山活動やテクトニクスを背景とした堆積作用を記録している可能性が示唆される。

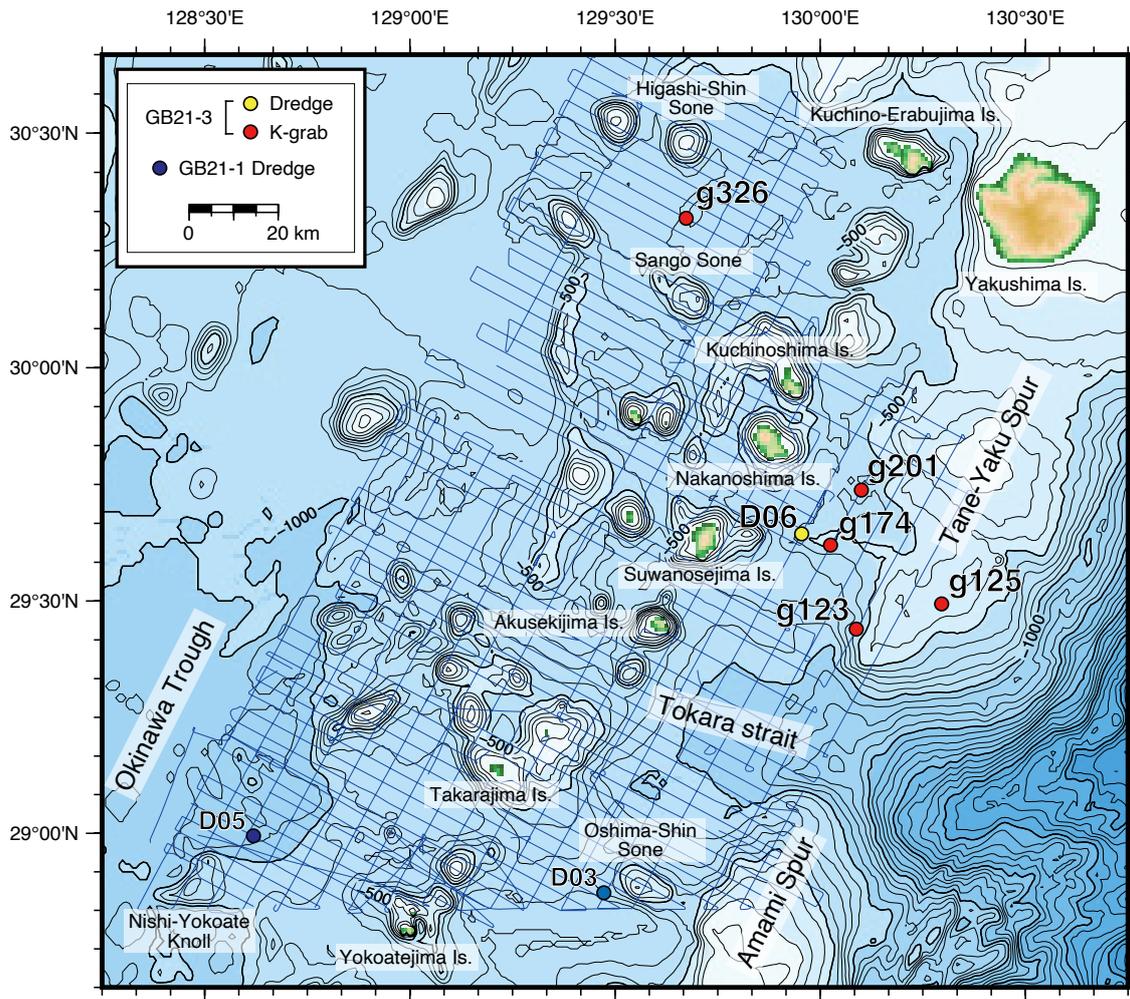
1. はじめに

トカラ列島は、南西諸島北部の屋久島と奄美大島の間に位置する火山島嶼群である。地質学的には新第三系及び第四系の火山岩類あるいは火砕岩類を主体とし、陸域における非火山性の地質体の分布は非常に限られている(中野ほか, 2008)。一方、既存の海域構造探査や大深度掘削の結果から、南西諸島中-南部の陸域・海域に分布する新生界海成堆積岩類に対比しうる地質体が、北部周辺海域の海底下にも分布することが明らかになっている(木村ほか, 1999など)。したがって、トカラ列島周辺地域の新生代における地質構造発達や堆積作用、火山活動などを含めた地史を解明するためには、海域調査による海洋地質情報の集積と、南西諸島周辺における既存研究との比較を通じた統合的解釈が不可欠である。

産業技術総合研究所では2020年度より、トカラ列島海域における20万分の1海洋地質図の作成を目的とした海洋地質調査を実施している。2021年3月に実施され

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)

* Corresponding author: ARIMOTO, J., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: j-arimoto@aist.go.jp



第1図 試料採取地点図。青の実線は2020–2021年度航走観測時の航跡を示す。

Fig. 1 Sample locality map for this study shown together with ship tracklines (blue) for geophysical surveys during 2020–2021 FY.

たGB21-1航海ではトカラ海峡以南を主な調査対象とし、横当島・宝島周辺の海底からドレッジにより前期–中期更新世(0.9–0.43 Ma)の年代を示唆する堆積岩試料が得られた(第1図; 有元・宇都宮, 2022)。本稿では、同年11月に実施されたGB21-3航海の調査海域であるトカラ海峡以北においてドレッジあるいはグラブ採泥により採取された堆積岩試料を対象として、石灰質微化石群集と堆積年代、その地質学的意義について考察する。

2. 試料と方法

2.1 試料

本研究では、GB21-3航海調査海域における6地点より採取された計10試料の堆積岩試料について検討を行った(第1図, 第1表)。本稿では調査海域の北東から南西にかけて口永良部島–悪石島を結ぶ火山フロント(下司・

石塚, 2007)に対し、東方を前弧側、西方を背弧側と呼称する。諏訪之瀬島東方約20 kmのドレッジ地点D06は、前弧側に連続的な地形的高まりをなす種子・屋久海脚の西縁部に相当する(第1図; 石野ほか, 2023)。ドレッジは北に急傾斜する水深583–503 mの海底を削り取るように実施され、合計約4 kgの垂角礫・亜円礫状岩石試料が得られた。このうち岩相の異なる5試料(D06-02, -08, -15, -16, -19)の堆積岩試料を微化石検討用に選定した(第1表)。D06-02, -08及び-19の3試料は、肉眼観察による船上記載では礫岩とされたが、基質支持で淘汰が悪く概ね砂質である。砂粒子は石英、長石、有色鉱物や黒色・赤色岩片などの碎屑物と有孔虫殻を主とし、D06-02及びD06-19試料には火山噴出物由来と考えられる自形鉱物粒子が含まれる(第2図a)。D06-08試料は黒色の岩片を顕著に含む(第2図b)。粒子間は石灰質あるいは凝灰質

第1表 検討試料のリスト。試料採取位置の座標及び水深は石野ほか(2023)及び鈴木ほか(2023)に従う。岩相の簡易的な記載も合わせて示す(詳細は本文2.1章を参照)。各試料について浮遊性有孔虫(PF)及び石灰質ナノ化石(CN)が認められたものをそれぞれxで示す。ドレッジにより得られたD06系試料の座標と水深は、ドレッジ着底時のものである。

Table 1 List of examined samples. Coordinates and water depths are from Ishino *et al.* (2023) and Suzuki *et al.* (2023). Simplified lithology are also noted. Each sample for which planktic foraminifera and/or calcareous nannofossil are determined is remarked by "x". The location and water depth for D06-series are those when the dredger apparatus set on-bottom.

Type	Sample ID	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Lithology	PF	CN
Dredge	D06-02	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted tuffaceous sandy conglomerate	x	x
Dredge	D06-08	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted sandy conglomerate	x	x
Dredge	D06-15	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Mudstone	x	x
Dredge	D06-16	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Muddy sandstone	x	x
Dredge	D06-19	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted tuffaceous calcareous sandy conglomerate	x	x
K-grab	g123	29°26.3710' N	130°05.2913' E	605	Bioclastic calcarenite	x	
K-grab	g125	29°29.6034' N	130°17.7445' E	327	Well-consolidated mudstone	-	
K-grab	g174	29°37.2147' N	130°1.5352' E	525	Tuffaceous calcareous muddy sandstone	x	x
K-grab	g201	29°44.2746' N	130°6.0069' E	736	Poorly-sorted pumice-bearing bioclastic calcarenite	x	x
K-grab	g326	30°19.0935' N	129°40.4151' E	548	Tuffaceous calcareous muddy sandstone	x	x

の細粒物質により膠結され、全体として半固結状態である。D06-15及び-16は珪長質鉱物粒子や岩片を主体とする泥岩及び砂岩であり、生物源炭酸塩粒子に乏しい(第2図c)。なおドレッジで得られた試料の採取層準にはある程度の不確実性があるため、1試料あたりひとつかたまりの岩石から必要量を取るようにして、異なる層準の微化石群集が1つの検討試料内に混在しないよう注意を払った(有元・宇都宮, 2022)。

ドレッジ試料に加えて、木下式グラブ採泥器(以下K-グラブと呼称)を用いて採取された、5地点の半固結あるいは固結堆積岩試料(g123, g125, g174, g201, g326)について微化石の検討を行った(第1図, 第1表)。海底カメラによる観察の結果、前弧側の種子・屋久海脚西縁部に位置するg123, g174地点、種子・屋久海脚上に位置するg125地点、及び調査海域北部背弧側の東新曾根とサンゴ曾根の間に位置するg326地点では露頭が確認されたが、同じく種子・屋久海脚西縁部に位置するg201地点の海底は平坦な砂底であり、露頭は確認されなかった(鈴木ほか, 2023)。g123及びg201試料は、有孔虫殻、コケムシ遺骸、軟体動物殻など生物源炭酸塩粒子を主体とし、珪長質鉱物粒子や岩片を含む半固結の石灰砂岩(カルカレナイト)である(第2図d, f)。g123試料には大型底生有孔虫(例えば藤田, 2013)がわずかに認められるが、殻が摩耗し保存状態は極めて悪い。g201試料は淘汰が悪く、細礫サイズの軽石や生砕物粒子を含む。両試料とも石灰質セメントによる空隙の充填は認められず、固結の程度はg123試料でやや強いがg201試料はごく弱い。一方、g174及びg326試料は半固結の石灰質砂岩であり(第2図e)、石灰質あるいは凝灰質の基質による膠結が認められる。g174試料には火山ガラス、g326試料には自形の長石や有色鉱物など火山噴出物由来と考えられる粒子が認められる。g125試料は他試料と異なり、部分的に風化が

進んでいるがよく固結した硬質の泥岩である。

2.2 方法

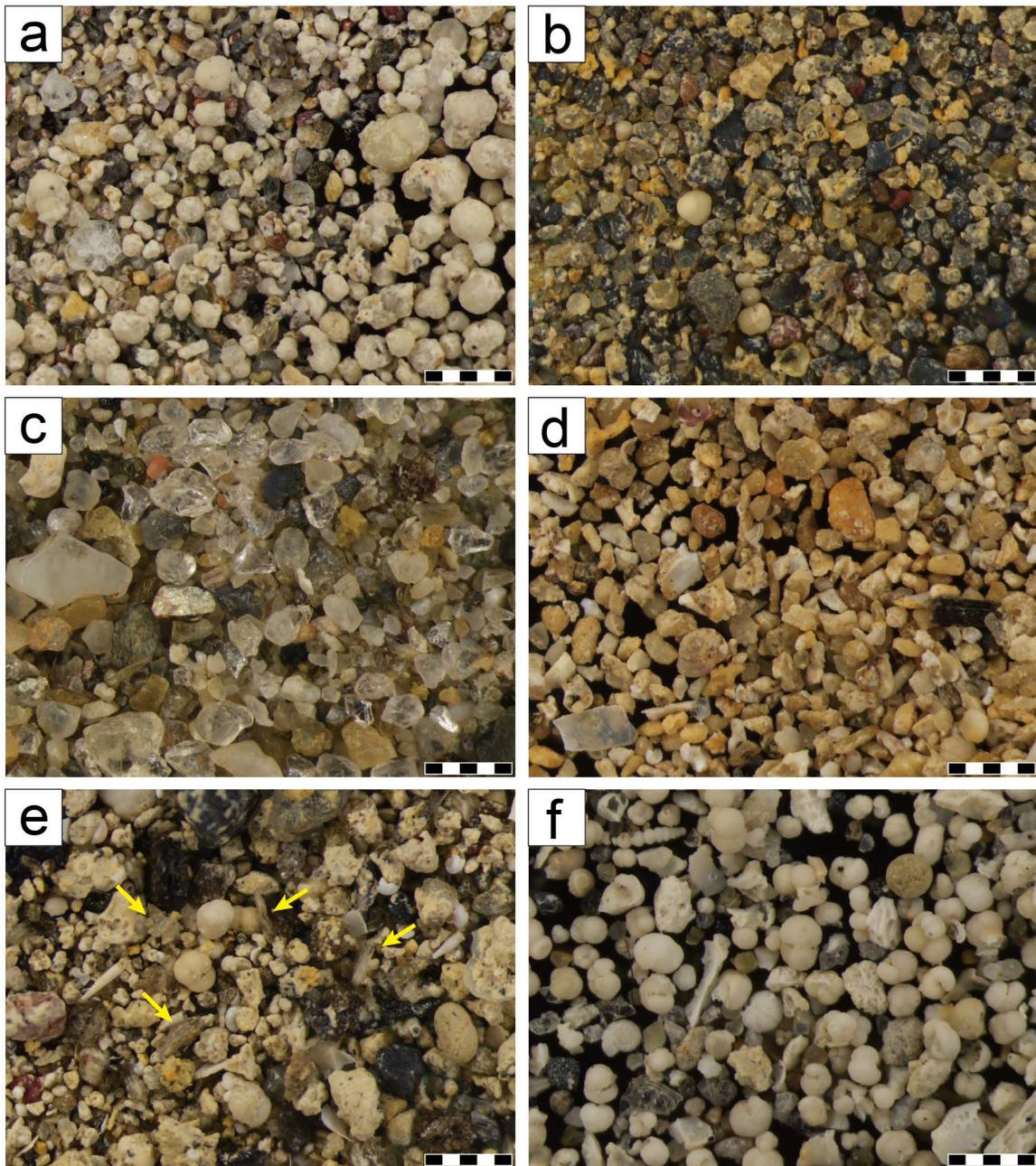
第1表に示した試料について、石灰質微化石群集を検討するため処理、同定を行った。以下、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石に分けて記述する。

2.2.1. 石灰質ナノ化石

計10試料について、新鮮な面から米粒大の量を取り、スミアスライドを作成した後、偏光顕微鏡を用いて1,500倍の倍率で観察を行った。産出量について、0.1 mm²内に観察される平均的な個数が10個より多い場合をAbundant, 1-10個をCommon, 1個未満の場合をFewとして評価した。保存の程度については、溶解または再結晶により同定が困難な個体がおおよそ3割以下の場合Good, 3-6割を占める場合はModerate, 6割よりも多い場合はPoorとして評価した。また一部の試料については走査型電子顕微鏡による観察を行った。水道水で懸濁させた堆積物試料を孔径0.45 µmのメンブレンフィルターでろ過して恒温乾燥機で乾燥後、イオンスパッタ装置(日立ハイテクE-1020)で金-パラジウム蒸着を行った後、走査型電子顕微鏡(日本電子JSM-6390LV)による観察を行った。

2.2.2. 浮遊性有孔虫化石

硬質で残渣化が困難であるg125試料を除く9試料について検討を行った。風化面を極力除いた後1-2 cmまで砕いた試料の乾燥重量1-6 g程度について、ボロン法(Hanken, 1979)により粒子間の膠結の分解を促進させた。その後、開口径63 µmの篩上で水洗し、40 °Cの恒温乾燥機内で一晩以上乾燥させた。水洗後の砂サイズ粒子になお粘土鉱物の付着が認められた場合、処理の前後で生物源粒子の著しい破損が起きないことを慎重に



第2図 堆積岩試料の代表的な粒子写真(125–2000 μm 画分) ; (a) D06-02, (b) D06-08, (c) D06-16, (d) g123, (e) g174, 矢印は火山ガラスを示す, (f) g201. スケールバーは1 mm.

Fig.2 Representative photos of particles (125–2000 μm fraction) in examined samples; (a) D06-02, (b) D06-08, (c) D06-16, (d) g123, (e) g174, arrows indicate volcanic glasses, (f) g201. Scale bars = 1 mm.

確認した上で、超音波洗浄機(40 kHz)を用いて15秒程度、残渣の洗浄を行った。得られた残渣のうち125 μm 以上のサイズの粒子について適宜分割し、実体顕微鏡下において200個体以上を目安に浮遊性有孔虫化石を抽出した。D06-15及びD06-16については200個体に満たなかったため、処理した残渣に含まれる全ての個体を拾い出した。産出量については、検討画分内の堆積物粒子に

占める浮遊性有孔虫化石の割合を基準として、Dominant (>50%), Abundant (>30–50%), Common (>10–30%), Few (>5–10%), Rare (>1–5%), Present (>0–1%)およびBarren (0%)の7段階で評価した。各試料に含まれる個体の平均的な保存状態は、定性的観察に基づく溶解・破損・着色等の程度によりVery Good, Good, Moderate, Poor, Very Poorの5段階を基本として評価した。抽出

第2表 GB21-3航海で採取された堆積岩試料から産出した石灰質ナノ化石. 産出頻度は次のように示す;A:Abundant (多産), C: Common (普通), F: Few (少産). 保存状態は次のように示す;G: Good (良好), M: Moderate (中程度), P: Poor (悪い). 産出状況は次のように示す;+: 産出が確認された種, R: 再堆積と判断される種. クエスチョンマークは産出の可能性があるが保存状態が悪く同定が困難であることを示す.

Table 2 Distribution chart of calcareous nanofossil identified from GB21-3 samples. Abundance; A: Abundant, C: Common, F: Fw. Preservation; G: Good, M: Moderate, P: Poor. +: present; R: Rework. Question marks indicate possible occurrence with uncertainty due to poor preservation.

Sample ID	D06-02	D06-08	D06-15	D06-16	D06-19	g174	g201	g326
Abundance	A	A	C	A	C	A	A	A
Preservation	P	M	G	G	P	M	G	G
<i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray and Blackman)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>C. macintyreii</i> (Bukry and Bramlette)								
<i>Coccolithus</i> spp.			+	+			+	+
<i>Discoaster</i> spp.			R	R				
<i>Emiliania huxleyi</i> (Lohmann)			+	+	?		+	
<i>Gephyrocapsa</i> spp. small (<4 μm)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gephyrocapsa oceanica</i> Kamptner	+		+	+	?	+	+	
<i>Gephyrocapsa parallela</i> Hay and Beaudry		+			?			
<i>Gephyrocapsa</i> spp. (4-5.5 μm)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gephyrocapsa</i> spp. large (>5.5 μm)	+				?	+	R	
<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Helicosphaera inversa</i> (Gartner)								
<i>Helicosphaera sellii</i> (Bukry and Bramlette)								
<i>Pseudoemiliania lacunosa</i> (Kamptner)	+	+	R	R	+	+	R	+
<i>Syracosphaera</i> sp.						+		
Small placolith (<2 μm)	+	+				+	+	+
<i>Reticulofenestra asanoi</i> Sato and Takayama					?			
<i>Reticulofenestra</i> cf. <i>asanoi</i>		+						
<i>Reticulofenestra</i> spp. (<7 μm)	+	+	+	+		+	+	+
<i>Reticulofenestra pseudumbilicus</i> Gartner (>7 μm)			R	R				
<i>Sphenolithus</i> spp.			R	R				
<i>Umbilicosphaera</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+
CN zone (Okada and Bukry, 1980)	CN14a	CN14a	CN15	CN15	CN13b-CN15	CN14a	CN15	CN14a

した全ての個体について種レベルまで同定し、種ごとに個体数を計数した。さらに、産出頻度が少ない大型の示準種を取りこぼさないよう、残渣全量の1/4-1/2程度に含まれる180 μm以上のサイズの粒子について検鏡を行った。形態種分類にあたり、mikrotaxデータベース (<https://www.mikrotax.org/pforams>; Young *et al.*, 2017) および当データベースに引用されている各種文献を参照した。*Globorotalia*属の一部の分類に関しては、Rögl (1974) を参考にした。*Neogloboquadrina asanoi*は*Neogloboquadrina atlantica*のシノニム(異名同種)とせず独立種とした。なお2020年度実施のGB21-1航海において、本調査海域の南方に隣接する海域においてドレッジにより採取された下部-中部更新統堆積岩から、*Tenuitella fleisheri*, *Tenuitella iota*, *Tenuitella parkerae*の産出が報告されている(有元・宇都宮, 2022)が、Brummer and Kucera (2022)に従い本稿ではこれらの種を*Tenuitellita*属として扱った。

3. 結果

各試料における産出量、保存状態および産出した種のリストを、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石に分けてそれぞれ第2表と第3表に示す。

3.1 石灰質ナノ化石

検討した試料のうちg123, g125を除く8試料には石灰質ナノ化石が含まれていた(第2表)。全体として12属13種が同定されたほか、長径2 μm未満のプラコリスをsmall placolithとして扱った。*Emiliania huxleyi*, *Pseudoemiliania lacunosa*および*Gephyrocapsa oceanica*は更新統の主な示準化石として重要であるほか、*Reticulofenestra*属と*Gephyrocapsa*属のココリスの長径変化も年代推定において有効である。保存不良な試料では、*Reticulofenestra*属と*Gephyrocapsa*属のココリス中心部を構成するカルサイトの過成長あるいは再結晶化によって、種同定に必要な特徴が不明瞭であったことから、それらをreticulofenestridsとして、ココリスの外形と長径によって種同定と年代制約を試みた。年代推定に直接的に関与しない随伴種としては、*Calcidiscus leptoporus*や*Helicosphaera carteri*などが産出した。

3.2 浮遊性有孔虫化石

検討した9試料の全てから、浮遊性有孔虫化石の産出が認められた(第3表)。乾燥試料単位重量あたりの個体密度は、多くの試料で1 gあたり数千個体のオーダー

第3表 GB21-3航海で採取された堆積岩試料から産出した浮遊性有孔虫化石。産出頻度は次のように示す；D: Dominant (卓越), A: Abundant (多産), C: Common (普通), F: Few (少産), R: Rare (極めて少産), P: Present (稀産), B: Barren (産出なし)。保存状態は次のように示す；VG: Very Good (極めて良好), G: Good (良好), M: Moderate (中程度), P: Poor (悪い), VP: Very Poor (極めて悪い)。種ごとの産出状況は、定量的検討において確認された個体数をアラビア数字で、>180 μmの残渣の定量的検討でのみ確認されたものについて+で示す。

Table 3 Distribution chart of planktic foraminifera identified from GB21-3 samples. Abundance; D: Dominant, A: Abundant, C: Common, F: Few, R: Rare, P: Present, B: Barren. Preservation; VG: Very Good, G: Good, M: Moderate, P: Poor, VP: Very Poor. In the case a species was missed in the quantitative count and only checked by >180 μm-scanning, it is represented by the signature "+".

Sample ID	D06-02		D06-08		D06-15		D06-16		D06-19		g123		g174		g201		g326	
	A	M-P	R	M-P	P	G	P	G	A	M-P	F	VP	F	P	A	M	D	P
<i>Dentoglobigerina venezuelana</i> (Hedberg)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny	4	0	0	0	12	2	7	7	40	7	55	12	41					
<i>Globigerina falconensis</i> Blow	32	41	14	14	7	40	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerina umbilicata</i> Orr and Zaitzeff	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinella calida</i> (Parker)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinella obesa</i> (Boli)	2	0	0	0	2	1	0	0	3	2	0	0	2	0	0	0	2	
<i>Globigerinella siphonifera</i> d'Orbigny	2	0	2	1	19	4	13	5	23	6	26							
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	7	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides bollii</i> (Blow)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides conglobatus</i> (Brady)	0	3	1	0	0	0	1	6	3	4	3	3	3	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides elongatus</i> (d'Orbigny)	1	11	0	0	0	0	2	3	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides elongobatus</i> Stainbank, Spezzaferri, Kroon, de Leau and Rüggeberg	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides extremus</i> Boli and Bermúdez	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides kennetti</i> (Keller and Poore)	1	10	1	0	0	0	0	6	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides cf. kennetti</i> (Keller and Poore)	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides obliquus</i> Boli	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Globigerinoides ruber</i> (d'Orbigny)	14	16	12	3	23	11	10	15	18									
<i>Globigerinoides tenellus</i> Parker	0	0	0	0	0	0	1	2	11	3	3							
<i>Globoconella inflata</i> (d'Orbigny)	7	7	0	0	0	0	2	10	11	11	3							
<i>Globoconella pliozea</i> (Hornibrook)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0							
<i>Globoconella puncticulata</i> (Deshayes)	1	6	0	0	0	0	2	1	5	+	0							
<i>Globoconella triangula</i> (Theyer)	0	10	0	0	0	0	0	2	+	+	2							
<i>Globoquadrina conglomerata</i> (Schwager)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globoquadrina dehiszens</i> (Chapman, Parr and Collins)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0							
<i>Globorotalia crassaconica</i> Hornibrook	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globorotalia crassaformis</i> (Galloway and Wisler)	2	2	0	0	0	0	0	0	0	3	3							
<i>Globorotalia excelsa</i> Sprovieri and Ruggieri	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0							
<i>Globorotalia hessi</i> Boli and Prenoli Silva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globorotalia menardii</i> (Parker, Jones and Brady)	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globorotalia pachytheca</i> Blow	+	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globorotalia ronda</i> Blow	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<i>Globorotalia scitula</i> (Brady)	2	0	0	0	0	2	0	0	0	1	6							
<i>Globorotalia tenuithecica</i> Blow	+	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0							
<i>Globorotalia tosaensis</i> Takayanagi and Saito	+	+	+	0	0	0	0	0	1	1	1							

(~1,100–7,400個体/g)であったが、D06-08試料でやや低く(620個体/g)、D06-15及びD06-16試料では著しく低かった(<20個体/g)。検討試料の中でD06-15及びD06-16試料に含まれる個体は保存が良く、鉱物の付着などはあるが半透明ガラス質の殻をもった個体が多くを占めた。その他の試料から産する個体の保存状態は概して悪く、溶解の影響は明らかには認められないものの、殻が白濁あるいは黄褐色に着色した個体や、表面の微細構造が部分的に失われた個体などが普遍的に産出した。しかしながら種同定に必要な形質は概ね保たれており、全体として16属64種の浮遊性有孔虫化石の産出が認められた(第3表)。重要な示準種として*Globorotalia tosaensis*及び*Globorotalia truncatulinoides*などが認められたが、いずれも産出は稀であった。年代推定に関与しないが相対産出頻度が比較的高い種として*Globigerina falconensis*, *Globigerinita glutinata*, *Globigerinoides ruber*, *Globoturborotalita woodi*, *Neogloboquadrina incompta*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Pulleniatina obliquiloculata*などが認められた。産出した*Gs. ruber*は全て白色あるいは無色の個体であった。

4. 議論

示準化石の産出に基づく国際標準化石帯との対比について分類群ごとに記述し、検討試料の堆積年代について考察する。石灰質ナノ化石について、Okada and Bukry (1980)による帯区分(CN帯)を適用した。浮遊性有孔虫化石については、Wade *et al.* (2011)による帯区分(PL/PT帯)を用いた。化石帯境界やその他の示準面の数値年代は、原則としてGeologic Time Scale 2020 (Raffi *et al.* 2020)に従った。その他、辻ほか(2005)による房総半島やLam *et al.* (2022)による西赤道太平洋–北西太平洋中緯度域における生層序年代のデータも参考とした。

4.1 石灰質ナノ化石帯

ドレッジ試料D06-02, -08及びK-グラフ試料g174, g326は、示準化石である*P. lacunosa*及び*Gephyrocapsa*属の産出状況から、下部–中部更新統に相当するCN14a亜帯に対比される(第2表)。さらにココリスの長径が5.5 µm以上である大型の*Gephyrocapsa*属(以下large *Gephyrocapsa*と呼称)や年代示準種である*Gephyrocapsa parallela*の産出状況から、層位学的に上下関係があると考えられる3つのグループに分けられる。

グループ1：D06-02及びg174 (CN14a亜帯下部；1.59–1.25 Ma)。これらに含まれる個体はいずれも保存不良であったが、D06-02試料にはlarge *Gephyrocapsa*の産出が認められた。またg174試料についても中央部の過成長あるいは再結晶化が著しい5.5 µm以上の楕円形のreticulofenestridsが確認された。両試料にはlarge *Gephyrocapsa*の初産出層準直下に終産出層準(1.60 Ma)

をもつ(Raffi, 2002) *Calcidiscus macintyreii*が産出しない。この年代の地層に産出する5.5 µm以上の楕円形のreticulofenestridsは一般にlarge *Gephyrocapsa*であることから、g174試料の楕円形のreticulofenestridsはlarge *Gephyrocapsa*と推定される。岩相や随伴種の産出状況がD06-02試料と類似することもこの推定を支持する。large *Gephyrocapsa*の産出はCN14a亜帯下部(1.25–1.59 Ma)に制約されることから、これら2試料の堆積年代は1.59–1.25 Maと考えられる。

グループ2：g326 (CN14a亜帯中部；1.25–1.04 Ma)。本試料に含まれる個体は保存状態が良好で、*C. macintyreii*, large *Gephyrocapsa*及び*G. parallela*がいずれも産出しない。*G. parallela*は房総半島上総層群においてMIS30 (1.04 Ma)に初産出層準をもつことが知られており(辻ほか, 2005)、以上より本試料の堆積年代は1.25–1.04 Maに制約される。

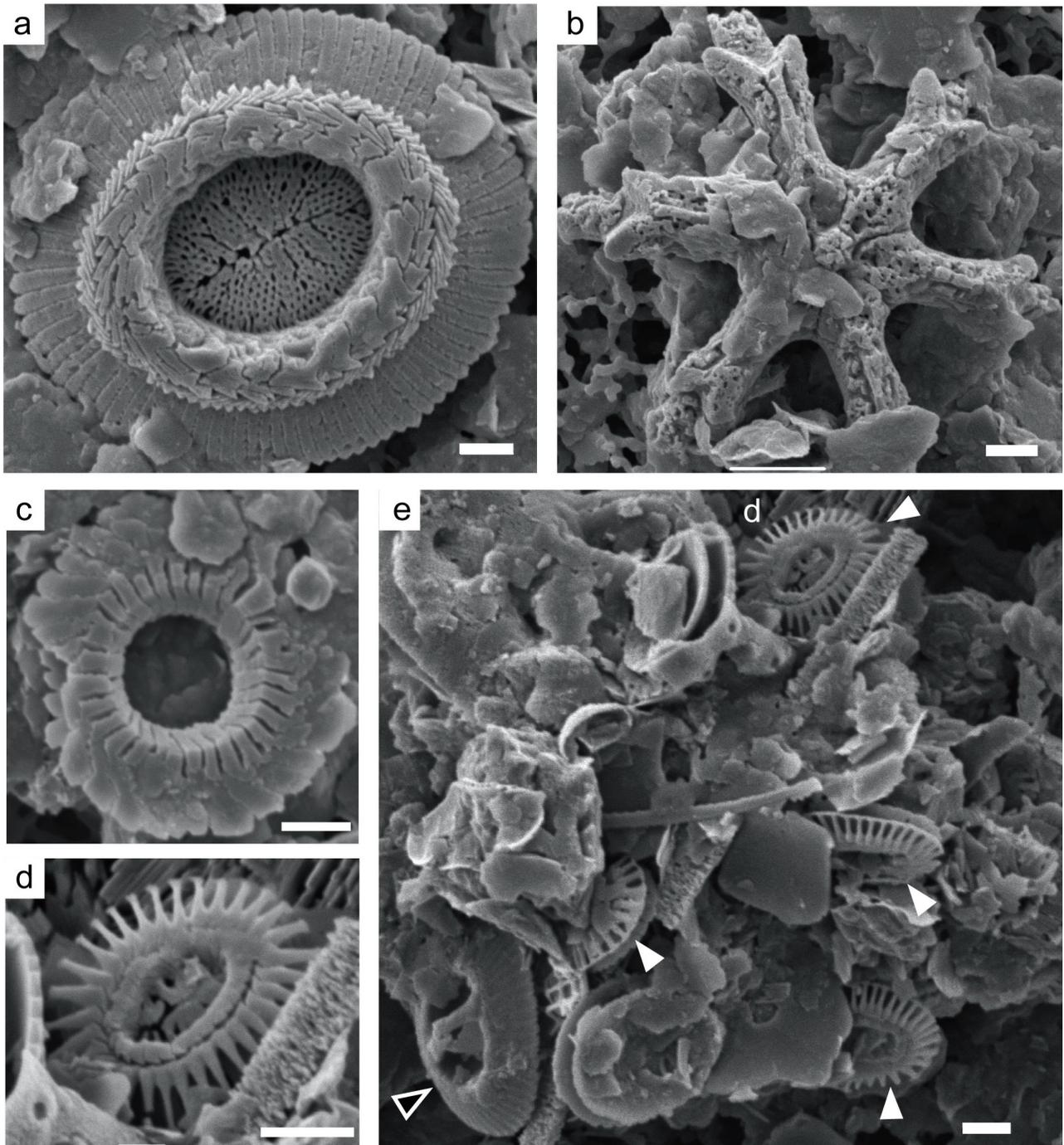
グループ3：D06-08 (CN14a亜帯上部；1.04–0.43 Ma)。本試料に含まれる個体は保存不良であり、reticulofenestridsのココリス中央部の過成長あるいは再結晶化が著しい。本試料からは*G. parallela*の産出が認められ、CN14a亜帯上限(0.43 Ma)に終産出層準をもつ*P. lacunosa*との共産から、本試料の堆積年代は1.04–0.43 Maと推定される。楕円形のreticulofenestridsについては*Reticulofenestra cf. asanoi*として同定し、さらなる年代制約は避けた。

一方、K-グラフ試料g201とドレッジ試料D06-15及びD06-16は*E. huxleyi*を含むことから、同種の初産出層準(0.29 Ma)を下限とするCN15帯に対比される(第2表)。このうちg201試料には*P. lacunosa*とlarge *Gephyrocapsa*がわずかに含まれるが、*E. huxleyi*の産出と矛盾するため、再堆積による混入と判断される。D06-15及びD06-16試料にはいずれもCN11b亜帯上限(3.82 Ma)とCN12a亜帯下部(3.61 Ma)にそれぞれ終産出層準をもつ*R. pseudumbilicus*と*Sphenolithus* spp. が保存の良い状態で含まれていたほか、CN12帯に終産出層準をもつ*Discoaster*属やCN10b–CN12b亜帯に産出範囲をもつ(Utsunomiya *et al.*, 2021)ことが知られる*Umbilicosphaera patera*も含まれており(第3図)、やはり再堆積による混入と判断される。

ドレッジ試料D06-19に含まれる個体については、ココリス中央部の過成長あるいは再結晶化が著しく、reticulofenestridsの同定やサイズ変化に関する検討も困難であった。第2表ではこのことを示すためクエスチョンマークで表現している。本試料からは4–5 µmの*Gephyrocapsa*属が産出したことから、下部更新統カラブリアン階以上に相当するCN13b亜帯–CN15帯とした。

4.2 浮遊性有孔虫化石帯

検討試料のうちドレッジ試料D06-15及びD06-16を除いて、産出頻度は多くないものの*Gt. truncatulinoides*(あるいは派生種である*Globorotalia pachythea*及び*Globorotalia excelsa*)と*Gt. tosaensis*の共産が認められた



第3図 ドレッジ試料D06-16から産出した石灰質ナノ化石。スケールバーは1 μm 。

Fig. 3 Calcareous nanofossils from the dredge sample D06-16. (a) *Reticulofenestra pseudoumbilicus* Gartner, (b) *Discoaster surculus* Martini and Bramlette, (c) *Umbilicosphaera patera* Utsunomiya, Hagino and Tanaka, (d) *Emiliana huxleyi* (Lohmann), (e) sediment aggregates including *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner (a black arrow) and *E. huxleyi* (white arrows) coccoliths. Scale bars = 1 μm .

(第3表). *Gt. truncatulinoides*の初産出年代は、西赤道太平洋のオントンジャワ海台で2.3 Ma, 北西太平洋中緯度に位置するシャツキー海台では2.0–2.4 Maとされている (Lam *et al.*, 2022). これらに基づいて北西太平洋におけ

る本種の初産出準面の同時性を仮定すると、本海域において*Gt. truncatulinoides*及び派生種の産出は、検討試料が更新統最下部のジェラシアン階以上に対比されることを示すと考えられる。さらに沖縄島に分布する上

部中新統-下部更新統島尻層群の上部では、標準化石帯PT1a亜帯の下限を定義する*Globigerinoidesella fistulosa*の終産出層準の上位に*Gt. truncatulinoides*の初産出層準が認められ、両種の共産は確認されていない(Natori, 1976; Ujiie, 1985). *Gt. truncatulinoides*及び派生種の産出と*Gsl. fistulosa*の非産出に加えて、終産出層準がPT1a亜帯の上限を定義する*Gt. tosaensis*の産出から、D06-15及びD06-16を除くドレッジ試料とK-クラブ試料はPT1a亜帯(下部-中部更新統)に対比される。これらの試料には、鮮新統に終産出層準をもつ示準種である*Globoturborotalita nepenthes*や*Dentoglobigerina altispira*も認められるが、いずれも再堆積による混入と判断される。

一方、ドレッジ試料D06-15及びD06-16は年代決定に有効な示準種がほとんど産出しなかった(第3表)。上部鮮新統に終産出層準をもつ*D. altispira*が産出しないことからPL5-PT1帯に対比されるとしたが、検討個体数も十分でなく決定的とは言えない。副次的な情報として、他の試料にも共通する随伴種である*N. atlantica*の産出や、相対的な保存状態の良さなどから、これら2試料の堆積年代はPT1a帯に対比される検討試料群と同時代かそれより新しい可能性が示唆される。

4.3 堆積年代と地質学的意義

4.3.1. CN14a/PT1a亜帯：前期-中期更新世

検討試料のうちドレッジ試料D06-02, D06-08及びK-クラブ試料g174, g326については、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石の検討結果に矛盾はなく、堆積年代は前期-中期更新世と推定される。これらの試料はいずれも石灰質ナノ化石帯CN14a亜帯および浮遊性有孔虫化石帯PT1a亜帯に対比されるが、いくつかの有用な示準種の産出状況から層序学的な上下関係を推定することが可能である。

前期更新世後期(カラブリアン期)の年代を示す試料のうち最も古いものはD06-02及びg174試料であり、large *Gephyrocapsa*の産出から1.59-1.25 Maと推定される。両試料の採取地点はともに種子・屋久海脚南西縁部に位置し、地理的に非常に近接している(第1図)ことから、両試料は同一の地質体の近い層準に由来する可能性が高い。この地質体は、沖縄島周辺において島尻層群を不整合に覆い陸源あるいは石灰質碎屑岩を主体とする知念層、及びその上位に部分的に同時異相として形成が開始した礁複合体石灰岩である琉球層群下部(Iryu *et al.*, 2006; 千代延ほか, 2009; 藤田ほか, 2011)と同時代に形成されたと考えられる。また背弧側北部から得られたg326試料は、両試料よりもやや若い堆積年代(1.25-1.04 Ma)が示唆され、本試料の由来層準は琉球層群下部に対比される。

D06-02, g174及びg326試料の特徴は、構成粒子に多少の差異はあるものの、火山噴出物由来と考えられる鉱物粒子を顕著に含むことである。調査海域中央に島列を

なす口之島、中之島、諏訪之瀬島はいずれも活火山であるが、現在活動的でない悪石島や南西方の横当島も含めて、更新世以降現在に至る「第四紀新期火山活動」に関連するとされる(大四, 1992; 横瀬ほか, 2010)。島嶼部を含むトカラ列島周辺海域からは、中期更新世以降の安山岩質あるいは珪長質の火山活動を示す地質試料が多く得られている(横瀬ほか, 2010)のに対し、1 Maより古い前期更新世の初生的な火山岩年代の報告は極めて限られている。これと同時期の堆積年代を示すD06-02, g174, g326試料の由来層準は、いまだ詳しくわかっていない第四紀新期火山活動初期における、陸上・海底火山の形成発達、及びそれを背景とする堆積作用を記録している可能性がある。

D06-08試料は*G. parallela*と*P. lacunosa*の共産によりCN14a亜帯上部に対比され、堆積年代は前期更新世最後期から中期更新世前期(カラブリアン期-チバニアン期)に相当する1.04-0.43 Maと推定される。また本試料は、2020年度実施のGB21-1航海において宝島-横当島周辺海域で採取された下部更新統-中部更新統堆積岩(有元・宇都宮, 2023; 以下GB21-1試料と呼称)と年代的に近い層準に由来すると考えられ、ともに中-南琉球弧に広く分布する琉球層群中部の同時異相と考えられる(有元・宇都宮, 2022)。本試料とGB21-1試料を比較すると、岩相や石灰質微化石の保存状態が大きく異なり、堆積場の違いによる堆積作用や続成過程の違いが想定される。

本研究において検討した下部-中部更新統試料とGB21-1試料に含まれる浮遊性有孔虫化石群集を、有元・宇都宮(2022)の結果に基づいて比較すると、前者における*Neogloboquadrina*属の多産がひとつの大きな違いといえる。特に前者は*N. dutertrei*や*N. atlantica*に代表される大型で頑強な殻をもつ種の産出が特徴的であり、試料によってはやや小さく原始的な種である*Neogloboquadrina acostaensis*の産出頻度もGB21-1試料より明らかに高い。このような*Neogloboquadrina*属の産出状況の違いは、例えば現在の黒潮流域周辺のように特徴的な表層水塊の分布を反映した群集構造の違い(Ujiie and Ujiie, 2000)による可能性がある。またGB21-1試料と比較して本研究の検討試料が全体としてやや古い年代を示し、絶滅種を多く含むことを考慮すると、前期更新世における*Neogloboquadrina*属絶滅種群の衰退に伴う群集変化を反映している可能性もある。一方、このような生物学的背景による群集組成の時空間変化以外の要因として、*Neogloboquadrina*属現生種の殻が溶解など物理的破損に対して比較的強い(例えばParker and Berger, 1971)ことから類推して、再堆積プロセスを経た選択的濃集も考えられる。本研究の検討試料に産出した*N. atlantica*や*N. acostaensis*は後期中新世-前期更新世を特徴付ける絶滅種であり、島尻層群から*N. atlantica*は未報告であるものの*N. acostaensis*の産出は広く確認されている

(例えばUjii, 1985). しかしながら, 特に*N. atlantica*や*Neogloboquadrina inglei*など絶滅種の生層序年代に関する既往研究は日本周辺海域を含む北西太平洋において極めて少なく(例えばDomitsu *et al.*, 2011; Lam and Leckie, 2020), 今後の研究の進展によりトカラ列島周辺海域における前期更新世の群集進化や堆積作用について議論を深めることができるようになると期待される.

なおK-グラフ試料g123については, 石灰質ナノ化石が非産出であり示準化石による制約は弱いものの, おそらく異地性の大型底生有孔虫化石をわずかに含むことが特徴である. 琉球列島の第四系における大型底生有孔虫化石の産出は知念層以上の層準で知られ(藤田ほか, 2011), 層相区分や堆積環境の推定に広く用いられている(Sagawa *et al.*, 2001など). 水深や固結の程度, 海底カメラによる産出の観察から現世・完新統の地質体とは考えにくく, これらのことからg123試料は知念層あるいは琉球層群と同時代の地質体由来し, 堆積年代はカラブリアン期以降の更新世である可能性が高い.

4. 3. 2. CN15帯：中期更新世-現世

ドレッジ試料D06-15及びD06-16は, *E. huxleyi*の産出から石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され, 堆積年代は0.29 Ma以降と推定される. これは浮遊性有孔虫化石の検討結果と矛盾せず, 化石の保存状態が他試料と比べて相対的に良いという観察結果とも整合的である. またこれら2試料には鮮新世の石灰質ナノ化石絶滅種である*Discoaster* spp.及び*Reticulofenestra pseudoumbilicus*の再堆積個体が認められることから, 島尻層群相当の鮮新統海成堆積岩体が後背地に露出し第四紀における碎屑物の供給源となったと考えられる. さらにこれらの試料は半固結状態であることから表層堆積物ではないとすると, 島尻層群相当の地質体の削剥は中期-後期更新世のある時期に起こった可能性が高い. このように中部更新統以上であるCN15帯に対比されつつ, 鮮新統由来の再堆積を示唆する石灰質ナノ化石を含む堆積岩・堆積物は, 沖縄島周辺の島棚縁辺の海底からも採取されている(田中, 2010, 2012). 第四紀の琉球弧におけるテクトニックイベントとして, 前期更新世における「島尻変動」(氏家, 1980など)や琉球層群主部形成後の「うるま変動」(沖縄第四紀調査団, 1976など)などが知られる(兼子, 2007; 新城, 2014)が, これらに代表される断続的な島嶼部及び周辺海域の地質構造発達に伴う堆積物の再移動が, 古い地質体のリサイクルによる新しい地質体の形成のメカニズムとなっていると考えられる.

一方, K-グラフ試料g201試料は同様に石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比されるが, 浮遊性有孔虫化石群集としてはむしろ下部-中部更新統試料との類似性が認められ, 示準化石の産出状況から明らかに層準として下位の浮遊性有孔虫化石帯PT1a帯に対比される. 本試料に含まれ

る個体の殻は不透明白色を呈し, 化石個体と判断されるものが大多数を占めた. 以上のような観察結果の説明として, 中期更新世以降の地質構造発達を背景とし, 例えばD06地点やg174地点のようなPT1a帯層準を含む近傍の堆積岩露岩域が削剥され, g201地点に再堆積粒子の大規模な供給がある時点で起きたか, あるいは現在まで継続していることが考えられる. これはg201試料にCN14a帯に産出する石灰質ナノ化石の再堆積個体が認められることから支持される.

以上のように, 本調査海域における検討試料のうち特にCN15帯に対比される前弧側の堆積岩は, おそらく第四紀テクトニクスを背景とした鮮新統-中部更新統下部地質体の削剥と再堆積の影響を強く受けていることが, 石灰質微化石群集から明らかとなった. このように年代示準となる石灰質微化石の網羅的検討は, 地質試料の堆積年代の制約に加え, 堆積粒子の供給源となる後背地の地質体や再堆積プロセスの推定などを通じて地史の解明に大きく寄与するといえる. また, おそらく個体サイズの違いや物理化学的破壊に対する耐性など堆積粒子としての特性が異なることに由来し, 堆積環境や続成過程の違いにより化石の産出状況に時空間的に様々なバリエーションが生じることが想定される. これをふまえ, 本研究のように複数の分類群を用いて多角的に検討することが重要であり, より多くの地質情報を得ることに繋がると考えられる.

5. まとめ

トカラ列島周辺海域の海洋地質図整備を目的として行われたGB21-3航海において, 火山フロント東方(前弧側)及び西方(背弧側)の海底から堆積岩試料が採取された. 1地点でのドレッジ及び5地点でのグラフ採泥により得られた石灰質あるいは非石灰質の砂岩, 泥岩など合計10試料について, 石灰質ナノ化石および浮遊性有孔虫化石の検討を行った結果, 保存状態は悪いもののほとんどの試料で産出が確認された. 検討試料のうち石灰質ナノ化石を産出しなかったg125試料の地質年代は不明である. それ以外の検討試料は全て, 前期更新世カラブリアン期以降に形成されたと考えられる. さらに示準化石の産出から, 前弧側の種子・屋久海脚西縁付近に位置するドレッジ地点D06及び近傍の採泥地点g174, 並びに背弧側の東新曾根-サンゴ曾根間の採泥地点g326で採取された石灰質砂岩試料は, 石灰質ナノ化石帯CN14a帯及び浮遊性有孔虫化石帯PT1a帯に対比され, 堆積年代は1.59-0.43 Ma(前期更新世カラブリアン期-中期更新世チバニアン期)に制約される. これらの試料層準を含む地質体は, 琉球列島島嶼部に分布する下部更新統知念層あるいは更新統琉球層群の同時異相と考えられる. 一方, D06地点で得られた非石灰質砂岩・泥岩試料, 及び同じく種子・屋久海脚西縁の採泥地点g201において採取された石灰砂

岩試料は石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され、堆積年代は0.29 Ma以降(中期更新世チバニアン期-完新世)に制約される。これらの若い堆積年代を示す試料には、鮮新統-中部更新統地質体に由来する石灰質微化石の再堆積個体が認められる。本研究において堆積年代が明らかになった試料層準を含む地質体は、前期更新世の琉球列島周辺海域における「泥の海」から「サンゴの海」への環境変遷(Iryu *et al.*, 2006)や、いまだ多くが知られていない琉球弧北部における前期更新世火山活動、そして第四紀テクトニクスを背景とした、数十万年-百万年程度のスケールにおける地殻表層の物質循環と地質構造発達を議論するうえで重要な役割を果たすと考えられる。

謝辞: GB21-3航海音波探査・採泥調査の各主任である石野沙季研究員・鈴木克明研究員には、本研究に使用した堆積岩試料、及び試料採取地点や航走観測の位置情報、試料の産状に関する情報をご提供いただきました。また粗稿に目を通していただき、堆積作用の解釈などについて議論していただきました。針金由美子主任研究員にはドレッジのオペレーションに関する情報をご提供いただきました。上河内信義船長をはじめとする望星丸の乗組員および東海大学実習生の皆様、また本調査航海の乗船研究者および学生の皆様には、調査の実施に関してご尽力いただきました。査読者である田中裕一郎博士の有益なご指摘により、本稿は改善されました。以上の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 有元 純・宇都宮正志(2022) GB21-1航海においてトカラ列島周辺海域で採取された堆積物および堆積岩の石灰質微化石に基づく年代推定。地質調査研究報告, **73**, 267-274.
- Brummer, G. J. A. and Kučera, M. (2022) Taxonomic review of living planktonic foraminifera. *Journal of Micropalaeontology*, **41**, 29-74.
- 千代延俊・猿渡隼人・佐藤時幸・榎元淳一・井龍康文(2009) 沖縄本島勝連半島に分布する知念層の石灰質ナノ化石生層序。地質学雑誌, **115**, 528-539.
- 大四雅弘(1992) 琉球列島新生代の火山活動と岩石。松本 徕夫教授記念論文集, 49-60.
- Domitsu, H., Uchida, J., Ogane, K., Dobuchi, N., Sato, T., Ikehara, M., Nishi, H., Hasegawa, S. and Oda, M. (2011) Stratigraphic relationships between the last occurrence of *Neoglobobulimina inglei* and marine isotope stages in the northwest Pacific, D/V Chikyu Expedition 902, Hole C9001C. *Newsletters on Stratigraphy*, **44**, 113.
- 藤田和彦(2013) サンゴ礁海域に分布する大型底生有孔虫の生態。日本サンゴ礁学会誌, **15**, 57-77.
- 藤田和彦・千代延俊・溝淵年哉・井龍康文(2011) 沖縄島那覇港沖の海底コアから発見された知念層とその意義。地質学雑誌, **117**, 625-631.
- 下司信夫・石塚 治(2007) 琉球弧の火山活動。地質ニュース, no. 634, 6-9.
- Hanken, N. M. (1979) The use of sodium tetraphenylborate and sodium chloride in the extraction of fossils from shales. *Journal of Paleontology*, **53**, 738-741.
- Iryu, Y., Matsuda, H., Machiyama, H., Piller, W. E., Quinn, T. M. and Mutti, M. (2006) Introductory perspective on the COREF Project. *Island Arc*, **15**, 393-406.
- 石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦(2023) 2021年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ概要。地質調査研究報告, **74**, 211-230.
- 兼子尚知(2007) 沖縄島および琉球弧の新生界層序。地質ニュース, no. 633, 22-30.
- 木村政昭・Wang Yugang・八木秀憲(1999) 琉球弧海域の海底地質構造および発達史。地質ニュース, no. 543, 24-38.
- Lam, A. R. and Leckie, R. M. (2020) Subtropical to temperate late Neogene to Quaternary planktic foraminiferal biostratigraphy across the Kuroshio Current Extension, Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean. *PLoS One*, **15**, e0234351.
- Lam, A. R., Crundwell, M. P., Leckie, R. M., Albanese, J. and Uzel, J. P. (2022) Diachroneity rules the mid-latitudes: A test case using Late Neogene planktic foraminifera across the Western Pacific. *Geosciences*, **12**, 190.
- 中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄(2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」。産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- Natori, H. (1976) Planktonic foraminiferal biostratigraphy and datum planes in the Late Cenozoic sedimentary sequence in Okinawa-jima, Japan. In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., *Progress in Micropaleontology*, American Museum of Natural History, New York, 214-243.
- Okada, H. and Bukry, D. (1980) Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation (Bukry 1973, 1975). *Marine Micropaleontology*, **5**, 321-325.
- 沖縄第四紀調査団(1976) 沖縄および宮古群島の第四系一とくに“琉球石灰岩”の層序について一。地球科学, **30**, 145-162.
- Parker, F. L. and Berger, W. H. (1971) Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific. In Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, **18**, no. 1, Elsevier, 73-107.
- Raffi, I. (2002) Revision of the early-middle Pleistocene calcareous nannofossil biochronology (1.75-0.85 Ma).

- Marine Micropaleontology*, **45**, 25–55.
- Raffi, I., Wade, B. S., Pälike, H., Beu, A. G., Cooper, R., Crundwell, M. P., Krijgsman, W., Moore, T., Raine, I., Sardella, R. and Vernyhorova, Y. V. (2020) Chapter 29 - The Neogene Period. In *Geologic Time Scale 2020*, Elsevier, 1141–1215.
- Rögl, F. (1974) The evolution of the *Globorotalia truncatulinoides* and *Globorotalia crassaformis* group in the Pliocene and Pleistocene of the Timor trough, DSDP Leg 27, Site 262. Veevers, J. J., Heirtzler, J. R. *et al.*, Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, **27**, Washington, U.S. Government Printing Office, 743–767.
- Sagawa, N., Nakamori, T. and Iryu, Y. (2001) Pleistocene reef development in the southwest Ryukyu Islands, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **175**, 303–323.
- 新城竜一(2014) 琉球弧の地質と岩石：沖縄島を例として. 土木学会論文集A2 (応用力学), **70**, I_3-I_11.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治(2023) トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **74**, 259–286.
- 田中裕一郎(2010) 沖縄本島東西沖で採取された海底堆積物中の石灰質ナンノプランクトン遺骸群集と年代分析. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成21年度研究概要報告書—沖縄島北西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 51, 122–125.
- 田中裕一郎(2012) 沖縄本島周辺海域で採取された海底堆積物の石灰質ナンノ化石による年代分析. 荒井晃作(編)「東シナ海沖縄トラフ海域の海洋地質学的研究」平成23年度研究概要報告書—北部沖縄トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 134–135.
- 辻 隆司・宮田雄一郎・岡田 誠・三田 勲・中川 洋・佐藤由理・中水 勝(2005) 房総半島に分布する下部更新統上総層群大田代層と梅ヶ瀬層の高精度堆積年代—石油公団研究井TR-3 コアの酸素同位体比・古地磁気・石灰質ナンノ化石に基づく年代層序—. 地質学雑誌, **111**, 1–20.
- 氏家 宏(1980) 南琉球弧“500 m島棚”の第四紀地史上の意義. 第四紀研究, **18**, 209–219.
- Ujiie, H. (1985) A standard late Cenozoic microbiostratigraphy in southern Okinawa-jima, Japan. II: Details on the occurrence of planktonic foraminifera with some taxonomic annotations. *Bulletin of the National Science Museum. Series C*, **11**, 103–136.
- Ujiie, Y. and Ujiie, H. (2000) Distribution and oceanographic relationships of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, Northwest Pacific Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, **30**, 336–360.
- Utsunomiya, M., Hagino, K. and Tanaka, Y. (2021) Speciation of extant Umbilicosphaera (Prymnesiophyceae) during the Pliocene. *Marine Micropaleontology*, **169**, 102037.
- Wade, B. S., Pearson, P. N., Berggren, W. A. and Pälike, H. (2011) Review and revision of Cenozoic tropical planktonic foraminiferal biostratigraphy and calibration to the geomagnetic polarity and astronomical time scale. *Earth-Science Reviews*, **104**, 111–142.
- 横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一(2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.
- Young, J. R., Wade, B. S. and Huber B. T., eds. (2017) pforams@mikrotax. <https://www.mikrotax.org/pforams> (閲覧日：2022年9月22日)

(受 付 : 2022 年 10 月 31 日 ; 受 理 : 2023 年 10 月 20 日)

トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因

鈴木 克明^{1,*}・板木 拓也¹・片山 肇¹・兼子 尚知¹・山崎 誠²・
有元 純¹・徳田 悠希³・千徳 明日香⁴・清家 弘治^{1,5}

SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, ARIMOTO Jun, TOKUDA Yuki, SENTOKU Asuka and SEIKE Koji (2023) Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 259–286, 12 figs and 4 tables.

Abstract: Surface sediment sampling was conducted at 102 sites during two marine geological survey cruises (GB21-2 and GB21-3) around the Tokara Islands. Muddy sediments are generally distributed on the flat seafloor below 800 m depth, and are strongly bioturbated in many sites. The distribution of sandy sediments, gravels, and outcrops is not necessarily limited to shallow water depths, but coarse-grained materials of biogenic and non-biogenic sources were observed in and around islands as well as shallow water areas. This distribution of bottom sediments is believed to be influenced by the presence of submarine volcanoes which are a potential source of sediments beneath the seafloor, in addition to islands and shallow-water areas where biological production occurs. The distribution of bedforms such as ripples, outcrops, and gravelly sediments, commonly found around islands, suggests a strong influence of the meandering Kuroshio Current in this area. Analyses of bryozoans, coral distribution, assemblages, size distribution, and preservation of planktic foraminifera suggest that the Kuroshio Current exerts both mechanical effects, through bottom currents, and biological effects, such as on community composition and the body size of organisms, on the sediments.

Keywords: Tokara Islands, East China Sea, Northwest Pacific, Sedimentology, Bryozoa, Planktic foraminifera, Coral

要 旨

トカラ列島周辺海域において実施した海底地質調査航海GB21-2及びGB21-3では、102地点で表層採泥を実施した。おおむね水深800 m以上の平坦な海底には泥質堆積物が分布し、多くの地点で強い生物擾乱を受けている。砂質堆積物や礫、露頭の分布は、必ずしも浅い水深には限定されないが、島嶼部や浅海域およびその周辺では生物源または非生物源の粗粒物質が多く観察された。こうした底質分布は生物生産の場である島嶼部や浅海域に加えて、海底下の堆積物供給源となりうる海底火山の存在に規制されていると思われる。島嶼部周辺で多く見られるリップルなどのベッドフォーム、露頭や礫質堆積物の分布は、本海域で蛇行する黒潮の強い影響を示唆する。コケムシ類の分析結果、サンゴ類の分布、及び浮遊性有

孔虫の群集・サイズ分布・保存状態の検討から、黒潮は底層流を通じた力学的な影響とともに、生物群集組成やその体サイズなど生物学的な影響も同時に堆積物に与えている可能性が示唆された。

1. はじめに

産業技術総合研究所では、日本周辺海域における20万分の1海洋地質図の網羅的な作成を目的とした海域地質図プロジェクトの一環として、2021年7月及び11月に東海大学の調査実習船「望星丸」を使用してトカラ列島周辺海域において海底地質調査航海(GB21-2, GB21-3)を実施した。南西諸島において、屋久島・種子島以北及び奄美大島以南の海域は詳細な地質調査が完了しており、表層堆積図を含む海域地質図の出版が進んでいる(例えば、板木, 2015; 池原, 2014)。本海域での調査を行うこと

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

² 秋田大学大学院 国際資源学研究所 (Graduate School of International Resource Sciences, Akita University, Akita, 010-0852, Japan)

³ 公立鳥取環境大学 環境学部 (Faculty of Environmental Studies, Tottori University of Environmental Studies, Tottori, 689-1111, Japan)

⁴ 琉球大学 理学部 (Faculty of Science, University of the Ryukyus, Okinawa, 903-0213, Japan)

⁵ 東京大学 新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Chiba, 277-8563, Japan)

* Corresponding author: SUZUKI, Y., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: yoshiaki.suzuki@aist.go.jp

で、南西諸島での縦断的な海域地質調査が完了する。トカラ列島周辺における海域地質調査は2020～2022年度の三年間にわたり実施され、2020年度は海域南側を中心として地球物理探査、反射法音波探査、表層採泥などの項目を実施する航海(GK20航海及びGB21-1航海)が実施された(鈴木ほか, 2022)。GB21-2, GB21-3航海はその2年目として、トカラ列島周辺海域の島嶼部周辺を主な調査対象範囲として実施された。

トカラ列島は南西諸島を北部・中部・南部に分ける地形学的境界のうち北部と中部の境界である「トカラギャップ」(後述)の周辺に位置する島嶼群の総称であり、主要な島として口之島くちのしま、中之島なかのしま、諏訪之瀬島すわのせじま、平島たいらじま、悪石島あくせきじま、小宝島こたからじま、宝島たからじまなどから構成される。

トカラ列島の島々の多くは第四紀に活動の履歴が認められる火山島である。特に口之島、中之島、諏訪之瀬島は現在でも活発な活動の記録がある活火山である(下司・石塚, 2007)。また、島嶼部の西側を中心に多数の海丘が存在しており、未報告の海底火山が数多く存在する海域でもある。近年でも、詳細な海底地形データの解析などから海底火山地形が新規に報告されている(Minami *et al.*, 2021; Minami *et al.*, 2014; 高下ほか, 2022)。これらの火山、海底火山群の活発な活動により火山性物質が海域全体にわたり供給されていると考えられ、宝島周辺海域では島嶼部周辺や海底火山等の地形的な高まりを中心に火山起源とみられる砕屑物が分布していることが分かった。このような火山群からもたらされる堆積物が、トカラ列島の中部から北部にかけてどのように分布しているか、また諏訪之瀬島、中之島、口之島、口永良部島などの島嶼群から供給される物質とあわせてどのような底質を形成しているかは現在のところ明らかになっていない。本海域における火山起源堆積物の起源ごとの分布やその時系列変化を堆積物の組成・分布解析や柱状試料の分析に基づいて解明することができれば、本海域における火山活動をはじめとした地質災害リスクの評価に貢献することができる。

トカラ列島周辺の海洋環境に火山群と同様に多大な影響を与えているのが本海域付近を通過する黒潮の流路である。黒潮は大局的には東シナ海から北上して太平洋に向かうが、トカラ列島周辺で大きく東に蛇行して太平洋側へ抜けることが知られている。トカラ列島は陸地面積こそ小さいものの周辺の海底は比較的浅くなっているため、黒潮の蛇行時は地形的な制約に伴って流速の増加、黒潮反流の形成、下流側での活発な乱流の形成などの様々な現象が観測されている(例えばTsutsumi *et al.*, 2017)。黒潮に関連する観測、研究は海洋表層部に着目したものが多く、トカラ列島周辺での海底付近での黒潮に伴う底層流の拳動実態や、ベッドフォーム、堆積物の組成分布に与える影響についての詳細は分かっていたが、宝島周辺海域においては黒潮の蛇行と島嶼部

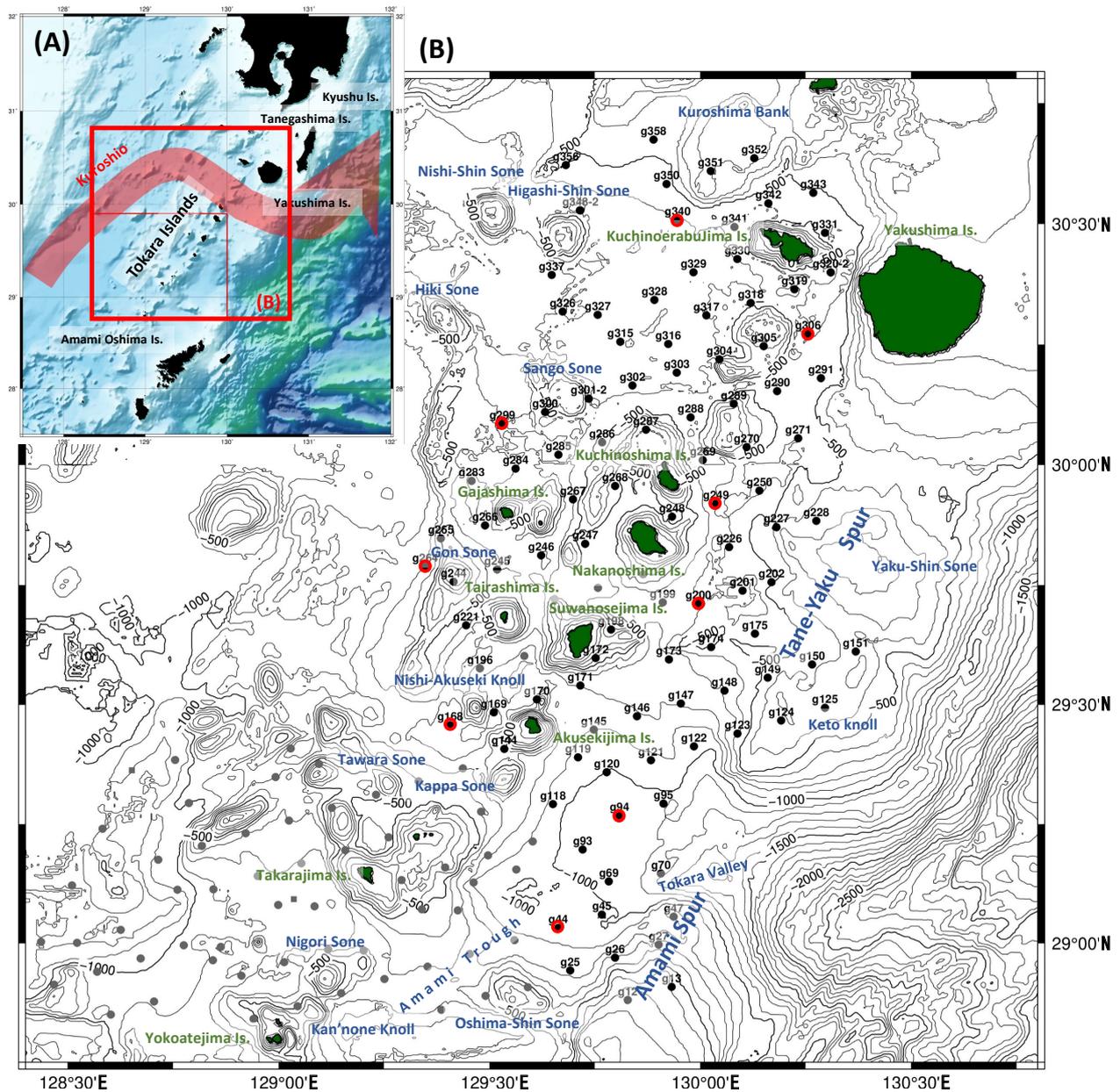
の浅海域通過に伴って底層流の流速が高い値を取り、その変化が波長数十cm程度のリップルや、波長数百m程度のサンドウェーブなどのベッドフォームを特定の水深で形成することや、局所的に生物源砕屑物や細粒砕屑物が吹き溜まりのように集積する堆積場が存在することが明らかになってきた(鈴木ほか, 2022)。こうした堆積過程がトカラ列島の全体にわたり同様に見られるのかについてはまだわかっていない。

また、黒潮が通過してくる東シナ海においては、アジア大陸の揚子江や黄河など巨大河川群から多量の河川水や土砂、栄養塩が供給されており、長江希釈水と呼ばれる独特な水塊を形成している(Kim *et al.*, 2009)。黒潮の流路として東シナ海の下流側かつ近傍に位置するトカラ列島周辺海域もこうした大陸河川起源水の影響下にある可能性が高い。こうした黒潮の流路や黒潮を通じて供給される物質は黒潮そのものに加えて島嶼部や海底地形の影響を受けて複雑に分布していると考えられ、その詳細は未解明である。

「トカラギャップ」は奄美海脚と種子・屋久海脚の境界となる“海底の1000 mの等深線がトカラ海峡を分断するように、海溝側から、西側に向けて入りこんでいる”部分(木村ほか, 1993, p.284)で、ここで琉球海嶺が途切れるためギャップと称される(Matsumoto *et al.*, 1996)。生物地理区の旧北区と東洋区の境界である渡瀬線は、このトカラギャップに重なるように位置し、悪石島と小宝島の間引かれるものと近年広く認識されていた(Motokawa and Kajihara, 2017; Ota, 1998)。しかし、Komaki (2021)は、そもそも悪石島と小宝島の間で渡瀬線を置く根拠は無く、生物地理学的な統計解析においてもこれら2島の間で陸上生物相の明確な切り替わりが認められないことを示した。一方、海洋生物においても渡瀬線を境界として生物相が切り替わると考えられてきたが、具体的な研究データは浅海の魚類などに限られ(たとえば、坂井ほか, 2005)、本海域の浅海から深海までを網羅した生物地理学的研究はほとんど認められない。そのため、本海域における海洋生物分布の解明は、いまだに生物地理学上の重要な課題である。

このように、トカラ列島周辺海域は地質学、海洋学、生物学など多くの面で未知の課題を多く含む海域である。網羅的な海域地質調査による表層堆積物の採取・分析やそれに含まれる生物群集の解析、水塊構造の直接観測といった基礎データを蓄積することで、こうした課題を解決することに大きく貢献できる。

本論文では、2021年度に実施したGB21-2, GB21-3航海で採取した堆積物について、主要な底質とその分布、それらを制御していると考えられる要因について主に船上記載データと生物試料の分析結果に基づいて検討を行った。



第1図 (A)トカラ列島位置図。(B) GB21-2及びGB21-3航海の実施範囲におけるグラフ試料採取地点図。地点番号のない灰色の点はGB21-1航海におけるグラフ試料(丸)およびコア試料(四角)採取点を示す。浮遊性有孔虫分析を実施した地点を赤丸で囲った。海底地形は岸本(2000)に基づく。

Fig. 1 (A) Location of the Tokara Islands. (B) Sampling points of K-grab on GB21-2 and GB21-3 cruises. Gray circles and squares indicate sampling points of K-grab and gravity corer on GB21-1 cruise. The analysis of planktonic foraminifera is conducted on red circled points. Sea-bottom topography is based on Kishimoto (2000).

2. 調査・分析方法

2.1 表層試料採泥

トカラ列島悪石島, 諏訪之瀬島, 平島, 中之島, 臥蛇島, 口之島, 口永良部島周辺及び諏訪之瀬島東方, 南方海域において, 表層堆積物の組成や分布を把握するため, 木下式グラフ採泥器(K-グラフ)による表層採泥をGB21-2

航海で20地点, GB21-3航海で82地点の計102地点で実施した(第1図)。K-グラフには海底カメラ, ニスキン採水器, CTD (CTD90M, Sea & Sun Marine Tech社製)を装備し, 海底面の画像撮影, 底層水の採取, 水質データの連続取得を行った。K-グラフは海中下降時の動揺により着底前に誤作動する場合がある。これを防ぐため, 超音波高度計と連動して海底上7 mで解除される電磁石式

の誤作動防止システム(板木, 2018b)を運用した。海底カメラは超音波高度計と連動させ、海底面上2 mで作動し、海底面の写真を撮影する。ニスキン採水器も同様に超音波高度計と連動し、海底面上7 mで蓋が閉まるようセットした。これらの超音波高度計と連動する装置群と独立に、降下中の水質データを連続取得するためにCTDを設置した(板木ほか, 2022)。また、降下・上昇中の回転や採取時の転倒といった投入中の採泥器の状態及び採取した堆積物や海底写真の方位を把握するために方位傾斜計を設置した。一部の地点では音速度計Midas (Midas MiniSVP, Valeport社製)を装着し、水中音速度の直接観測を行った(高下ほか, 2023)。またGB21-3航海では、10 cm間隔で設置されたレーザーポインター2器から構成されるレーザースケールを装備し、海底カメラ撮影時に照射することで被写体の大きさを把握することを試みた。

K-グラフの揚収後、取得した堆積物表面の写真撮影を行った。堆積物が充分量採取された場合は、採取された堆積物にプラスチック製の縦5 cm、横6 cm、高さ30 cmの有田式角柱容器を貫入し、柱状試料(以下サブコア)を採取した。サブコアは1地点につき2本採取した。1本は保存用とし、もう一本は実験室において分割(厚さ1 cmのスラブ試料と、5 cmの角柱試料)した。角柱試料は断面を整形した後、写真撮影と肉眼記載、CT像取得に用いた。スラブ試料は軟X線写真による堆積構造解析に使用した。サブコア試料採取と並行し、以下の試料分取を試料の量に応じて行った。

- ・岩石磁気的研究用のキューブ試料を定方位で1個採取。
- ・粒子組成分析及び地球化学分析用の試料として、表層から約2 cmをスパチュラでプラスチック容器に採取。
- ・採取した底質に応じて、堆積物DNA、コケムシ類(コケムシ動物門; *Phylum Bryozoa*)、サンゴ類(刺胞動物門; *Phylum Cnidaria*)、浮遊性有孔虫(有孔虫門; *Phylum Foraminifera*)、底生有孔虫(有孔虫門; *Phylum Foraminifera*)、貝形虫(節足動物門; *Phylum Arthropoda*)、ウシオダニ類(節足動物門; *Phylum Arthropoda*)、クモヒトデ類(棘皮動物門; *Phylum Echinodermata*)分析用の試料をそれぞれスパチュラで棒瓶ないしビニール袋に採取。

これらの試料分取を実施した後、残った試料を底面積1815 cm²のプラスチックバケツに移し、おおよその試料体積を確認した。バケツに移した試料は5 mmメッシュを用いて水洗いし、5 mmより大きな残渣を礫、二枚貝、巻貝、翼足類、腕足類、サンゴ類などに可能な限り分類してビニール袋に採取した。ニスキン採水器から得た底層水は、pHの測定を行った後、塩分測定及び水素・炭素同位体測定に用いる試料をそれぞれ棒瓶、バイアル瓶に分取した。

2.2 軟X線像及びCT像取得

グラフ試料から採取した有田式サブコア及び柱状試料から採取したスラブ試料を用いて、堆積構造を把握するため軟X線像撮影を実施した。実施条件は鈴木ほか(2022)と同様である。撮影条件は電流1.5 mA、電圧40 kVとし、露光時間は20秒に設定した。

また、堆積物の内部構造を三次元的に把握するためにX線CT装置(Supria Grande, 日立製作所製、産総研 地質調査総合センター共同利用実験室)を用いた。CT像撮影には有田式サブコアより分割した角柱試料を用いた。撮影条件は電流120 mA、電圧80 kV、撮影視野90 mmとした。画像再構成にあたってスライス厚を0.625 mm、マトリクス数を512×512と設定し、再構成フィルターとして軟物質用フィルター(人体・内臓観察用)を用いた。

2.3 コケムシ類分析

K-グラフ採泥器が船上に揚収された後、コケムシ類分析用として約100 ccの堆積物試料を分取し、常温保存した。採泥時の目視観察ではg244とg305にコケムシ骨格が豊富に含まれていたものの、試料の全体量が少なかつたため、コケムシ類分析用試料の分取ができなかった。

採泥時の目視観察では、多くの地点で試料中にコケムシ骨格は含まれていなかった。目視観察でコケムシ骨格が認められた地点(g221・g228・g245・g269・g304)についても、コケムシ骨格は少量であるか、変色・摩耗して保存状態が非常に悪かつた。これらのうち比較的豊富にコケムシ骨格を含むg228(水深346 m)とg304(水深607 m)について、検鏡を行った。試料を開口0.125 mmの篩で水洗し、篩上に残った堆積物を自然乾燥した。乾燥した試料から開口4 mmの篩で岩塊を取り除き、2.5 g以上5.0 g未満となるよう分割・秤量し、検鏡試料とした。この試料に含まれるコケムシ類の骨格破片を双眼実体顕微鏡下で拾い出した。コケムシ骨格の合計重量を秤量して、堆積物中のコケムシ骨格含有率を算出した。

2.4 浮遊性有孔虫分析

海洋表層に生息する動物プランクトンの一種である浮遊性有孔虫の炭酸塩殻は、遠洋域における生物源炭酸塩粒子として重要で(Schiebel, 2002)、例えば沖縄島周辺の水深1000 m以深では、表層堆積物の中粒砂サイズ粒子の80%以上を占める地点が認められる(板木, 2018a, 2022)など、南西諸島海域の堆積作用及び物質循環において大きな役割を担うと考えられる。浮遊性有孔虫殻の表層堆積物への集積過程は、水塊構造などに関連する表層での生産あるいは群集構造などの生物学的要因と、死後の水平・鉛直方向への輸送や堆積後の再移動など非生物学的要因に影響されると考えられる。以上の観点から、表層堆積物中の浮遊性有孔虫殻の群集組成、保存状態、サイズ分布に着目し、群集組成について9地点、保存状態と

サイズ分布についてはさらに1地点を加えて計10地点で分析を実施した。分析試料にはK-グラブで採取された表層堆積物の表層約1 cm部分を用いた。

群集組成分析用の試料は採取後、船上で直ちにローズベンガル染色液を添加し冷暗所に保管した。この染色液はろ過海水で希釈した10%ホルマリン溶液に0.5 g/Lのローズベンガルを加え、四ホウ酸ナトリウムで緩衝した溶液である。

室内に持ち帰った試料を開口径63 μmの篩上で水洗し泥質分を除去し、篩上の粒子に付着した余分なローズベンガルを除去するため、温水(約40℃)で十分に水洗した。その後、それぞれの残渣を濾紙上に回収し、60℃で乾燥させた後、63 μm以上の粒子については有孔虫分析用として重量を測定したうえで封筒または薬包紙に保存した。各試料は微化石用分割器で適宜分割し、径125 μm以上の浮遊性有孔虫について計200個体を目安に分割試料中に含まれるすべての個体を拾い出し、種の同定・計数を行ったのち各種の産出頻度(%)を算出した。種の同定はSchiebel and Hemleben (2017)とMorard *et al.* (2019)に基づいて行った。

群集組成検討用と別途採取した試料に含まれる63–2,000 μmの浮遊性有孔虫殻について、保存状態及びサイズ分布の検討を行った。乾燥試料1–10 g程度を開口径63 μmの篩を用いて水洗し、40℃のオーブンで一晩以上乾燥させた。得られた残渣から開口径2 mmの篩を用いて礫サイズの粒子を除いた後、1画分あたり数十から最大で300個体程度を含むよう簡易分割器を用いて適宜半割を行った。分割した画分に含まれる全ての個体を、1試料あたり200–300個体を目安として実体顕微鏡下で拾い出した。この時、多少の破損があっても全体の3分の2以上の殻が保たれているものは1個体として扱った。

得られた全ての個体について、試料ごとに実体顕微鏡下において保存状態を観察し、主に殻表面の着色や鉱物粒子の付着の程度に従い定性的なグループ分けを以下のように行った。乾燥状態で半透明の殻表面にほぼ着色が認められないものをランクA、殻表面に明らかに黄色–黄褐色の着色があり少量の鉱物粒子の付着なども認められるが、表面の微細構造を保持し殻自体の変質が著しくないと考えられるものをランクB、殻表面に黄褐色–褐色の着色や鉱物粒子の付着が著しく、殻の部分的な破損、変質や充填物の固結などがしばしば認められるものをランクCとして計数した。また、ランクA–Cの個体とは別に、殻表面構造あるいは初生的な殻を完全に失った橙色の個体が認められる場合があり、これをランクDとした。

また拾い出した個体のうち、ランクD個体及び房室の破損により元のサイズに比べて小さくなっていると考えられるランクA–C個体(合わせて各試料の検討個体数の2–6%)を除いて、各個体のサイズ計測を行った。微化石用マイクロスライドに各個体の臍側面あるいは背側

面が鏡下で見えるようトラガカントゴムで固定し、双眼実体顕微鏡OLYMPUS SZX16に顕微鏡用デジタルカメラOLYMPUS DP74を接続して撮影を行った。1視野あたり最大45個体程度を含む画像を取得し、画像解析ソフトウェアOLYMPUS Streamを用いて最大径、最小径、シレット面積、等価円直径などのパラメータを取得した。本研究では、サイズを代表するパラメータとして予想的に最大径と最小径についてのみ検討を行った。

2.5 サンゴ類分析

K-グラブにより採泥したGB21-2およびGB21-3の全102地点中、堆積物試料が十分量あった72地点においてサンゴ分析用に500 cc程度の堆積物を採取し常温保存した後、持ち帰った。その後、実験室において採取した堆積物を4 mm, 2 mm, 500 μm, 74 μmの各目合いの篩を用いて順次水洗し残渣中から全てのサンゴ類を採取した。採取されたイシサンゴ類については、その全てについて双眼実体顕微鏡(Leica M165C)を用いて種の同定を行った。また、K-グラブに付属した海底カメラによる海底写真を用いてイシサンゴ、八放サンゴ、ヒドロサンゴの生息状況を検討した。

3. 堆積物採取・分析結果

3.1 表層堆積物採取結果

GB21-2/3航海では採泥を実施した102地点のうち計98地点(水深60–1201 m)においてK-グラブによる表層堆積物試料の採取に成功した。取得した堆積物について、採取緯度経度、着底時の水深、残渣分類結果、サブコア試料ないしタッパー試料の肉眼観察に基づく船上記載結果を第1表に示した。また、採泥を実施した102地点のうち101地点で海底写真の撮影に成功した。サイトg343での投入時は海底カメラが作動せず、写真を撮影できなかった。海底写真及び方位傾斜計から得た、着底時及び海底上約2 mにおける採泥器方位(真北からの時計回り角度で表記)、写真から判別できる底質及びリップルの有無を第2表に示す。サイトg301, g320, g348ではグラブ採泥器が作動しなかったため、それぞれ2回ずつ投入を行った。これら再投入を実施した地点で最後の投入により取得した採泥試料番号はそれぞれ投入回数をつけ、g301-2, g320-2, g348-2とした。このほかサイトg149, g319, g350ではグラブ採泥器が作動せず、底質試料を得られなかったが、海底カメラの撮影及び底層水試料の採取に成功した。これらのグラブ不作動の主な原因として、黒潮を主体とする強い潮流により、採泥器の作動に必要なメインワイヤーのたるみが得られなかったことが考えられる。Kグラブは、本体の着底後、メインワイヤーに接続されたヘッド部分が自重で本体部に落下し、この際にヘッドに架けられた本体のフックが外れることにより作動する。このとき、海中のメインワイヤー全体

第1表 GB21-2及びGB21-3航海で採取されたグラブ・コア採泥試料の採取位置、着底時の水深、ワイヤー長、試料容積と肉眼観察に基づく主要構成物、5 mm以上残渣として回収された生物遺骸の一覧。

Table 1 List of grab and core samples collected during the GB21-2 and GB21-3 cruise, showing position, water depth, and wire out at the landing time. Major components based on macroscopic observation, sample volume, and biological remains collected as a residue larger than 5 mm are also shown.

Cruise	Sample name	Sampler	date (Y/M/D)	JST	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	Depth (m)	Wire out (m)	Sample volume (L)	major component vased on VCD	Organic residue
GB21-2	g12	K-grab	2021/7/27	14:02:23	28-52.8441 N	129-49.6912 E	244	251.7	0	Bioclastic coarse to medium sand	
GB21-2	g13	K-grab	2021/7/27	12:49:53	28-54.4981 N	129-55.9144 E	406	417.6	0	Bioclastic medium sand including coral and sponge spines	
GB21-2	g25	K-grab	2021/7/27	16:37:58	28-56.5691 N	129-41.4903 E	839	854.3	27	foraminifera bearing coarse to medium sand (19cm)	
GB21-2	g26	K-grab	2021/7/27	15:11:41	28-58.1767 N	129-47.8704 E	681	705.4	13	foraminifera bearing coarse to medium sand (11.9cm)	Mollusk, Crinoid, Barnacle, Sponge, Coral
GB21-2	g27	K-grab	2021/7/27	11:31:55	28-59.8176 N	129-54.07 E	673	684.7	0	Min-coated gravel and bioclasts	
GB21-2	g44	K-grab	2021/7/27	18:08:01	29-1.938 N	129-39.7905 E	940	951.8	22	medium sand rich in bioclasts (10.7cm)	
GB21-2	g45	K-grab	2021/7/28	7:54:17	29-3.6165 N	129-45.9852 E	999	1008.9	18	cterigenous coarse sand interbedded by foraminifera bearing medium sand (15.9cm)	Fish, Brachiopod, Sponge
GB21-2	g47	K-grab	2021/7/27	10:15:27	29-3.347 N	129-56.2131 E	793	806.6	4	foraminifera bearing medium sand (5.4cm)	Brachiopod, Arthropod, Sponge
GB21-2	g69	K-grab	2021/7/28	9:13:20	29-7.7937 N	129-46.9766 E	1025	1029.8	36	silty very fine sand (20.4cm)	Mollusk, Fish, Sea Urchin
GB21-2	g70	K-grab	2021/7/27	8:38:25	29-8.7866 N	129-54.3861 E	1201	1202.2	36	very fine sandy silt (20.6cm)	Fish, wood fragments
GB21-2	g93	K-grab	2021/7/28	10:50:43	29-11.8044 N	129-43.2593 E	1053	1058.2	36	very fine sandy silt (22.5cm)	Sponge, Ragworm, wood fragments
GB21-2	g94	K-grab	2021/7/28	18:14:51	29-16.0811 N	129-48.5085 E	1064	1071.9	36	silty clay (20.8cm)	Fish
GB21-2	g95	K-grab	2021/7/28	16:45:06	29-17.5776 N	129-54.76 E	1051	1064.4	36	silty clay overlapped by fine to very fine sand sized ash(2.5cm) (20cm)	
GB21-2	g118	K-grab	2021/7/28	12:24:29	29-17.5111 N	129-39.0261 E	942	948.4	33	fine to very fine sand (19.9cm)	Fish, Sponge
GB21-3	g119	K-grab	2021/11/20	17:40:18	29-23.3909 N	129-42.6053 E	933	936.4	18	foraminifera bearing very fine sandy silt (15.4cm)	Mollusk, Fish
GB21-2	g120	K-grab	2021/7/28	13:56:38	29-21.5219 N	129-46.683 E	1012	1019.6	36	very fine sand (20.1cm)	
GB21-2	g121	K-grab	2021/7/28	15:22:37	29-23.0265 N	129-52.9739 E	925	945.8	36	very fine sandy silt (22.5cm)	Snail, Fish
GB21-3	g122	K-grab	2021/11/5	4:40:49	29-24.7637 N	129-59.0974 E	968	985.9	4	scoria and bioclastic fine to very fine sand (7.9cm)	
GB21-3	g123	K-grab	2021/11/5	3:22:47	29-26.371 N	130-5.2913 E	605	620	1	very coarse to medium scoria sand and sub-angular calcareous sandstone	
GB21-3	g124	K-grab	2021/11/5	2:11:22	29-28.0052 N	130-11.5071 E	306	320	0	bioclastic fine to very fine sand	
GB21-3	g125	K-grab	2021/11/5	0:58:49	29-29.6034 N	130-17.7445 E	327	371.4	0	coral fragment, very coarse sand and angular mudstone	Mollusk, Sponge, Cnidaria
GB21-3	g144	K-grab	2021/11/20	16:06:57	29-24.4491 N	129-32.1209 E	652	736.2	0	sub-angular altered pumice pebbles to very coarse sand with organism	
GB21-3	g145	K-grab	2021/11/4	17:58:09	29-26.8688 N	129-44.8459 E	915	921.2	25	very fine sand patched by very fine sandy silt (1.6cm)	Shell, wood fragments
GB21-3	g146	K-grab	2021/11/4	19:30:44	29-28.547 N	129-50.9916 E	789	831.7	33	interbedding of foraminifera bearing pumiceous very fine sand and scoria rich(?) pumiceous very coarse sand (17.1cm)	
GB21-3	g147	K-grab	2021/11/4	20:56:09	29-30.1386 N	129-57.2296 E	801	807.8	18	scoria pebbles and poorly sorted sandy matrix (12.9cm)	Shell, Fish
GB21-3	g148	K-grab	2021/11/4	22:18:15	29-31.7512 N	130-3.4417 E	671	694.9	31	weakly upward fining of angular scoria granules with foraminifera and bioclasts (11.4cm)	Shell, Echinodermata, Barnacle, Arthropod, Bryozoa, Sponge, Cnidaria, Ragworm
GB21-3	g149	K-grab	2021/11/4	23:33:55	29-33.3875 N	130-9.5926 E	490	506.3	--	no sediment sample	
GB21-3	g150	K-grab	2021/11/13	0:15:42	29-35.0375 N	130-15.9132 E	423	431.9	1	bioclastic scoria pebbles to coarse sand (pteropod, foramedium, coral-rich)	Sponge, Cnidaria
GB21-3	g151	K-grab	2021/11/13	1:21:42	29-36.6548 N	130-22.1134 E	313	315.5	0	altered pumice(?) pebbles to medium sand rich in organism	Sponge
GB21-3	g168	K-grab	2021/11/20	14:48:21	29-27.4277 N	129-24.4289 E	861	865.9	31	foraminifera bearing silty very fine sand (17.5cm)	Pteropod, Sponge, wood fragments
GB21-3	g169	K-grab	2021/11/20	11:57:28	29-29.0328 N	129-30.6314 E	923	932.6	16	ash rich medium to fine sand (12.9cm)	Brachiopod, Sponge
GB21-3	g170	K-grab	2021/11/20	10:29:44	29-30.6561 N	129-36.7512 E	837	896.4	0	altered sandstone(?) pebbles to medium sand	
GB21-3	g171	K-grab	2021/11/20	9:03:42	29-32.3959 N	129-42.9255 E	799	806	18	volcanic fine sand interbedded by foraminifera rich fine sand (11.5cm)	

GB21-2, GB21-3 航海における表層採泥調査結果 (鈴木ほか)

GB21-3	g172	K-grab	2021/11/12	18:16:13	29-35.8496 N	129-45.1156 E	401	442.6	0	scoraceous(?) medium to fine sand with coral fragment		
GB21-3	g173	K-grab	2021/11/12	21:12:49	29-35.6634 N	129-55.5406 E	727	738	22	sub-angular scoria pebbles and foraminifera bearing fine sandy matrix (10.7cm)		
GB21-3	g174	K-grab	2021/11/12	22:28:34	29-37.2147 N	130-1.5352 E	525	547.8	2	altered calcite-cemented(?) sandstone pebbles and bioclastic coarse to medium sand	Mollusk, Echinodermata, Sponge, Chidaria	
GB21-3	g175	K-grab	2021/11/13	3:35:46	29-38.8917 N	130-7.78 E	554	567.6	15	interbedding of poorly sorted scoria-rich coarse to medium sand and foraminifera bearing fine to very fine sand (11.3cm)	Mollusk, Coral	
GB21-3	g196	K-grab	2021/11/20	13:18:39	29-34.5414 N	129-28.6448 E	780	784.5	24	ash-rich very fine sand (15.9cm)	Fish, Ragworm, wood fragments	
GB21-3	g198	K-grab	2021/11/12	19:19:56	29-39.4104 N	129-47.3132 E	507	529.7	18	scoria and ash rich fine sand patched by foraminifera(?) bearing finesand (14.3cm)	Mollusk, Sponge	
GB21-3	g199	K-grab	2021/11/15	18:06:22	29-42.8066 N	129-54.6632 E	669	679.5	22	poorly sorted bioclastic and scoriaceous medium to coarse sand overlapping sub-angular scoria pebble and ash-rich medium to fine sand (13.1cm)	Shell	
GB21-3	g200	K-grab	2021/11/13	5:16:52	29-42.6446 N	129-59.7237 E	601	610.5	18	ash-rich fine to very fine sand and scoria pebbles (10.4cm)	Mollusk	
GB21-3	g201	K-grab	2021/11/15	21:53:23	29-44.2746 N	130-6.0069 E	736	762.9	2	semi-consolidated sandstone fragments and foraminifera rich bioclastic medium sand (7.5cm)		
GB21-3	g202	K-grab	2021/11/15	22:55:01	29-45.3386 N	130-10.137 E	519	523	13	foraminifera and bioclast rich medium sand (13.4cm)	Mollusk, Sea Urchin, Brachiopod, Sponge, Coral	
GB21-3	g221	K-grab	2021/11/19	8:27:56	29-39.9401 N	129-26.674 E	659	668.5	9	foraminifera bearing bioclast-rich medium sand (9.9cm)	Mollusk, Shark, Brachiopod, Coral	
GB21-3	g226	K-grab	2021/11/16	2:21:01	29-49.7286 N	130-4.092 E	569	575.8	18	interbedding of bioclast-rich coarse to medium sand and bioclast-rich poorly sorted coarse to fine sand (16.4cm)	Mollusk, Sea Urchin, Brachiopod, Sponge, Coral	
GB21-3	g227	K-grab	2021/11/16	1:14:01	29-52.216 N	130-10.8326 E	320	325.7	0	bioclasts and calcite-cemented pebbles to coarse sand	Sponge	
GB21-3	g228	K-grab	2021/11/16	0:15:08	29-53.0052 N	130-16.5125 E	346	349.1	0	bioclast-rich medium to very coarse sand		
GB21-3	g244	K-grab	2021/11/21	14:50:41	29-45.3928 N	129-24.9019 E	136	135.9	0	bioclast-rich pumiceous(?) very coarse sand with rich organism		
GB21-3	g245	K-grab	2021/11/19	9:59:38	29-46.923 N	129-31.0903 E	560	569.6	18	medium to coarse sandy sized foram-rich bioclasts (14.5cm)	Mollusk, Echinodermata, Bryozoa, Coral	
GB21-3	g246	K-grab	2021/11/19	11:12:46	29-48.6881 N	129-37.3544 E	604	611.7	16	ash rich fine to very fine sand (12.4cm)	Mollusk, Echinodermata, Coral	
GB21-3	g247	K-grab	2021/11/19	12:33:02	29-50.1341 N	129-43.6298 E	582	596.1	7	inter-bedding of foraminifera bearing bioclastic medium to very coarse sand and medium to fine sand (11.1cm)	Mollusk, Brachiopod, Arthropod, Bryozoa, Sponge	
GB21-3	g248	K-grab	2021/11/15	3:51:35	29-53.5244 N	129-55.9708 E	520	527.9	15	foraminifera-rich medium sand (14.8cm)	Coral	
GB21-3	g249	K-grab	2021/11/15	2:40:54	29-55.165 N	130-2.2322 E	624	629.4	13	foraminifera bearing ash-rich fine sand (10.9cm)		
GB21-3	g250	K-grab	2021/11/15	1:29:27	29-56.778 N	130-8.4167 E	599	606.3	33	foraminifera bearing bioclastic coarse to medium sand (interbedding of medium and coarse) (21.9cm)		
GB21-3	g264	K-grab	2021/11/21	13:54:01	29-47.3029 N	129-20.8613 E	651	658.7	22	foraminifera-rich medium to fine sand (13.6cm)	Mollusk, Fish, Sponge	
GB21-3	g265	K-grab	2021/11/21	12:51:35	29-50.8193 N	129-23.0847 E	478	483.9	0	Mn-coated calcareous sandstone pebbles and foram-rich (~50%) medium to fine sand		
GB21-3	g266	K-grab	2021/11/21	16:02:12	29-52.4372 N	129-29.3784 E	665	672.7	13	foraminifera-rich coarse to medium sand patched by fine sand (16.4cm)	Mollusk, Sea Urchin	
GB21-3	g267	K-grab	2021/11/19	13:53:27	29-55.6912 N	129-41.885 E	591	605.1	13	foraminifera bearing medium sand (8.2cm)	Mollusk, Sea Urchin, Brachiopod, Bryozoa, Coral	
GB21-2	g268	K-grab	2021/7/29	7:27:26	29-57.3591 N	129-47.8854 E	455.7	455.7	13	poorly sorted bioclastic medium sand (11cm)	Mollusk, Bryozoa, Cnidaria, Organic remains	
GB21-3	g269	K-grab	2021/11/16	3:59:44	30-0.5846 N	130-0.3375 E	644	662.1	27	sub-rounded and bioclastic coarse to very coarse sand and pebbles (18.4cm)	Mollusk, Arthropod, Bryozoa, Sponge, Coral	
GB21-3	g270	K-grab	2021/11/15	00:22:31	30-2.2152 N	130-6.5904 E	268	274.8	15	sub-angular very coarse sandy to granule-sized bioclasts and bioclast-rich coarse to very coarse sand (11cm)	Organic remains	
GB21-3	g271	K-grab	2021/11/14	23:06:59	30-3.3119 N	130-13.9385 E	575	583.2	0	altered pumice pebbles to coarse sand with coral fragments	Coral	
GB21-3	g283	K-grab	2021/11/21	11:22:35	29-57.996 N	129-27.4595 E	628	637.4	18	foraminifera-rich bioclastic medium to fine sand (14.8cm)	Mollusk, Echinodermata, Sponge, Coral	
GB21-3	g284	K-grab	2021/11/21	17:27:26	29-59.5282 N	129-33.7123 E	594	604.4	13	foraminifera-rich fine to medium sand (11cm)	Coral	
GB21-3	g285	K-grab	2021/11/19	15:12:56	30-1.2657 N	129-39.8079 E	643	648	15	foraminifera bearing ash-rich medium to fine sand (12.9cm)	Mollusk, Sea Urchin	
GB21-2	g286	K-grab	2021/7/29	8:37:24	30-2.8013 N	129-46.027 E	479	488.8	16	bioclastic coarse to medium sand (15cm)	Shell, Brachiopod, Sponge, Coral	
GB21-2	g287	K-grab	2021/7/29	9:41:51	30-4.384 N	129-52.2696 E	60	58	0	Bioclastic medium sand	Organic remains	
GB21-2	g288	K-grab	2021/7/29	10:53:24	30-5.9241 N	129-58.6266 E	584	590.3	18	Bioclastic coarse sand (14.8cm)	Shell, Bryozoa, Sponge, Coral	
GB21-3	g289	K-grab	2021/11/14	20:47:11	30-7.6099 N	130-4.7658 E	352	357.2	0	bioclast-rich medium sand and sub-rounded Mn-coated sandstone pebbles		

GB21-3	g290	K-grab	2021/11/14	21:49:17	30-5.2025 N	130-10.9401 E	570	575.5	11	foraminifera bearing bioclastic medium sand patched by well-sorted fine sand (13.5cm)	Mollusk, Echinodermata, Coral
GB21-3	g291	K-grab	2021/11/16	23:55:51	30-10.8072 N	130-17.1606 E	563	568.9	7	bioclastic medium sand patched by ash-rich(?) fine sand (11.5cm)	Mollusk, Coral
GB21-3	g299	K-grab	2021/11/21	9:53:22	30-5.1237 N	129-31.8315 E	584	594.3	9	foraminifera-rich medium to fine sand (11cm)	
GB21-3	g300	K-grab	2021/11/19	16:31:43	30-6.5817 N	129-37.9208 E	644	653.8	0	Mn-coated sub-rounded pebbles and foraminifera-rich coarse to medium sand	
GB21-3	g301-1	K-grab	2021/11/19	17:44:04	30-8.261 N	129-44.1054 E	563	565.4	--	no sediment sample	
GB21-3	g301-2	K-grab	2021/11/19	18:13:47	30-8.2573 N	129-44.136 E	570	582.7	0	Mn-coated sub-rounded pebbles and bioclastic coarse to medium sand	
GB21-3	g302	K-grab	2021/11/14	18:20:39	30-9.8953 N	129-50.3445 E	606	613	16	foraminifera bearing fine to very fine sand (13.3cm)	Mollusk, Sponge
GB21-3	g303	K-grab	2021/11/14	19:34:49	30-11.4956 N	129-56.651 E	619	626.3	13	bioclastic fine to very fine sand (11.9cm)	Mollusk, Sponge
GB21-3	g304	K-grab	2021/11/16	22:18:26	30-13.1486 N	130-2.7209 E	607	612	27	poorly sorted bioclastic pebbles to fine sand (16.5cm)	Mollusk, Brachopod, Arthropod, Bryozoa, Sponge, Coral
GB21-3	g305	K-grab	2021/11/17	21:18:37	30-14.7903 N	130-9.0264 E	282	292.4	0	bioclast-rich sub-rounded very coarse sand	Bryozoa, Coral
GB21-3	g306	K-grab	2021/11/17	1:11:04	30-16.3211 N	130-15.3099 E	595	597.3	7	bioclastic medium sand patched by ash-rich(?) fine sand (12.6cm)	
GB21-3	g315	K-grab	2021/11/16	18:42:56	30-15.3425 N	129-48.6219 E	636	641.5	9	poorly sorted foraminifera bearing medium to fine sand (11.9cm)	Mollusk, Brachopod, Coral
GB21-3	g316	K-grab	2021/11/16	21:06:39	30-15.0611 N	129-55.4408 E	618	624	16	ash-rich foraminifera bearing fine sand (14.1cm)	Sea Urchin, Sponge, Ragworm
GB21-3	g317	K-grab	2021/11/17	3:38:07	30-18.6162 N	130-0.8627 E	615	617	15	muddy-patched foraminifera bearing ash rich fine to very fine sand (12.5cm)	
GB21-3	g318	K-grab	2021/11/18	4:07:03	30-20.1703 N	130-7.1715 E	599	606.8	4	foraminifera bearing medium to fine sand (6.8cm)	
GB21-3	g319	K-grab	2021/11/18	2:58:29	30-21.8632 N	130-13.4014 E	626	628.7	--	no sediment sample	
GB21-3	g320-1	K-grab	2021/11/18	1:08:08	30-23.9701 N	130-18.5618 E	590	592.1	--	no sediment sample	
GB21-3	g320-2	K-grab	2021/11/18	1:52:48	30-23.9731 N	130-18.5569 E	590	592.3	4	poorly sorted sub-angular very coarse to medium sand interbedded by foraminifera bearing medium to fine sand (10.3cm)	
GB21-3	g326	K-grab	2021/11/24	11:49:48	30-19.0955 N	129-40.4151 E	548	553.8	2	semi-consolidated mud(sand?)stone	Sponge
GB21-3	g327	K-grab	2021/11/16	19:46:43	30-18.6917 N	129-45.4074 E	676	680.5	2	foraminifera bearing medium to fine sand (4.6cm)	
GB21-3	g328	K-grab	2021/11/17	4:51:19	30-20.545 N	129-53.4639 E	639	642.5	27	foraminifera bearing ash-rich fine to very fine sand (14cm)	
GB21-3	g329	K-grab	2021/11/18	5:33:38	30-23.9852 N	129-59.0226 E	639	644.3	4	foraminifera rich medium to fine sand (6cm)	
GB21-3	g330	K-grab	2021/11/17	23:34:45	30-25.6267 N	130-5.2652 E	636	644.4	16	ash-rich very fine sand (10.9cm)	Mollusk, Sponge
GB21-3	g331	K-grab	2021/11/14	1:26:42	30-28.8807 N	130-17.7406 E	546	552.5	11	foraminifera bearing poorly sorted medium sand patched by bioclastic coarse to medium sand (10cm)	Mollusk, Brachopod, Sponge, Ragworm
GB21-3	g337	K-grab	2021/11/24	13:04:47	30-23.6533 N	129-38.8635 E	752	754.6	5	poorly sorted foraminifera bearing coarse to fine sand patched by ash-rich medium to fine sand (5.5cm)	
GB21-3	g340	K-grab	2021/11/14	4:31:55	30-30.4798 N	129-56.7746 E	598	603.5	36	foraminifera bearing fine sandy silt with fine sandy patch (burrow?) (20.4cm)	
GB21-3	g341	K-grab	2021/11/17	22:26:22	30-29.6103 N	130-4.8592 E	636	639.5	36	ash-rich foraminifera-bearing very fine sandy silt (21cm)	Mollusk, Sponge, Ragworm, wood fragments
GB21-3	g342	K-grab	2021/11/14	02:56:55	30-32.5421 N	130-9.698 E	592	593	36	foraminifera-bearing very fine sandy silt (24cm)	Mollusk
GB21-3	g343	K-grab	2021/11/14	0:23:39	30-33.852 N	130-16.0847 E	502	516.3	36	foraminifera bearing silt (20.9cm)	Mollusk, Sponge, Ragworm
GB21-3	g348-1	K-grab	2021/11/17	18:50:18	30-31.6691 N	129-42.857 E	615	619.2	--	no sediment sample	
GB21-3	g348-2	K-grab	2021/11/17	19:25:42	30-31.6745 N	129-42.9391 E	615	617.4	--	no sediment sample	
GB21-3	g350	K-grab	2021/11/17	20:55:32	30-34.9459 N	129-55.2022 E	545	547.2	--	no sediment sample	
GB21-3	g351	K-grab	2021/11/13	22:05:25	30-36.5536 N	130-1.4858 E	185	187.2	18	well sorted medium sand (ash?) interbedded by pumiceous pebbles, granules and coarse sand (12.9cm)	Mollusk, Brachopod, Arthropod, Coral
GB21-3	g352	K-grab	2021/11/13	23:04:04	30-38.1473 N	130-7.6854 E	184	192.1	0	semi-altered pumice pebbles and very coarse sand and foraminifera bearing medium to fine sand	
GB21-3	g356	K-grab	2021/11/13	19:21:35	30-37.2985 N	129-40.8755 E	536	543.6	18	coarse sandy bioclast interbedded by foraminifera rich bioclastic foraminifera bearing medium to fine sand	Mollusk, Sponge, Cnidaria, Ragworm
GB21-3	g358	K-grab	2021/11/13	20:50:49	30-40.4442 N	129-53.3488 E	472	476.2	16	very coarse sand to granules (12.9cm) foraminifera bearing fine sand (12.3cm)	Mollusk, Echinodermata, Sponge, Coral

GB21-2, GB21-3 航海における表層採泥調査結果 (鈴木ほか)

第2表 グラブ採泥器着底時の方位, 傾斜及び海底から2 m上(2m asb)での方位データと, 海底写真によって認められた各地点の海底の特徴. リップルが観察された地点についてはリップルから推定される流向も示した.

Table 2 Orientation, inclination and orientation data at 2 m above the seafloor (2 m asb) at the time of landing of K-grab. Seafloor characteristics at each point recognized by the seafloor photograph are also shown. Flow direction estimated by ripple is also shown at the site where rippled bed is observed.

Cruise	Sample name	Direction (bottom) (degree)	X-tilt (bottom) (degree)	Y-tilt (bottom) (degree)	Direction (2m asb) (degree)	Characteristics of seafloor	flow direction based on ripple (degree)
GB21-2	g12	294.6	1.5	4.78	305.9	flat bed with gravels	
GB21-2	g13	97.6	-0.31	2.09	94.6	flat bed	
GB21-2	g25	208.5	7.32	-1.53	211.5	rippled(?) bed	
GB21-2	g26	138.2	-2.22	1.27	139.1	flat bed	
GB21-2	g27	312.8	-1.97	0.11	317.4	outcrop	
GB21-2	g44	185.8	0.77	2.21	186.4	flat bed with gravels	
GB21-2	g45	71.2	1.11	3.51	65.4	flat bed	
GB21-2	g47	152.5	-2.38	2.61	149.4	outcrop overlapped by sand	
GB21-2	g69	326.1	1.8	1.93	325.6	flat bed with burrows	
GB21-2	g70	121.1	1.78	3.68	120.7	flat bed	
GB21-2	g93	38.1	1.44	4.94	55.0	muddy cloud	
GB21-2	g94	6.4	0.93	1.52	11.4	flat bed with burrows	
GB21-2	g95	354.1	4.04	-2.33	7.4	flat bed	
GB21-2	g118	203.2	-1.36	2.34	207.5	flat bed	
GB21-3	g119	12.9	-1.66	1.52	22.7	flat bed with burrows	
GB21-2	g120	334.2	0.54	2.04	333.5	muddy cloud	
GB21-2	g121	279.9	-1.38	2.75	281.6	flat bed	
GB21-3	g122	315	0.04	1.15	315.1	flat bed	
GB21-3	g123	6.8	9.83	6.85	11.8	flat bed(outcrop?)	
GB21-3	g124	145	-1.65	3.27	152.3	outcrop with rich organism	
GB21-3	g125	160.9	-2.82	7.36	154.8	outcrop and boulders with rich organism	
GB21-3	g144	141.8	16.03	-0.56	140.2	outcrop	
GB21-3	g145	208.5	-1.21	1.19	213.2	flat bed	
GB21-3	g146	242.8	-0.44	1.67	241.6	flat bed	
GB21-3	g147	351.7	1.39	4.04	350.2	flat bed	
GB21-3	g148	81.2	-9.9	21.8	77.4	flat bed	
GB21-3	g149	185.1	-2.33	4.19	188.4	rippled bed with rich bioclasts	77.4
GB21-3	g150	171.9	-14.72	2.21	104.7	flat bed	
GB21-3	g151	251.1	-1.41	11.6	246.7	outcrop	
GB21-3	g168	185.1	-3.68	0.94	193.0	flat bed	
GB21-3	g169	356.2	-0.05	4.45	2.7	rippled bed	145.7
GB21-3	g170	81.3	11.71	29.36	95.0	outcrop	
GB21-3	g171	141.4	-1.66	3	153.2	chaotic rippled bed	??
GB21-3	g172	131.7	20.85	-33.78	116.3	outcrop	
GB21-3	g173	166.1	0.55	2.9	158.3	flat bed (?)	
GB21-3	g174	194.6	-2.24	6.74	189.4	outcrop covered by bioclastic sediment	
GB21-3	g175	295.9	-1.24	2.08	292.2	flat bed	
GB21-3	g196	185.7	-1.48	0.93	190.3	rippled bed	147.3
GB21-3	g198	266.6	-4.24	-2.2	271.9	flat bed	
GB21-3	g199	44.3	1.47	4.14	42.1	rippled bed	42.1
GB21-3	g200	350.6	-0.14	1.02	354.7	flat bed	
GB21-3	g201	168.8	-0.85	1.76	161.1	flat bed	
GB21-3	g202	187.8	1.19	1.32	188.1	flat bed	
GB21-3	g221	351.3	-3.5	-2.11	352.5	flat bed with gravels	
GB21-3	g226	78	0.29	2.26	76.9	flat bed	
GB21-3	g227	68	4.61	0.95	71.8	outcrop	
GB21-3	g228	24	-5.65	-0.52	35.5	outcrop covered by bioclastic sediment	
GB21-3	g244	1.6	-2.51	2.85	357.5	outcrop with sediment (sand?) and rich organism	
GB21-3	g245	61.1	-3.78	6.22	65.8	flat bed with gravels	
GB21-3	g246	207.3	-0.84	1.64	208.3	flat bed	
GB21-3	g247	157.7	1.66	1.01	154.0	faint rippled bed	8.0
GB21-3	g248	266.6	3.37	4.17	275.6	rippled bed	316.6
GB21-3	g249	192.4	0.63	3.84	201.8	flat bed with gravels	
GB21-3	g250	20.3	6.86	-0.21	23.4	chaotic rippled bed	??
GB21-3	g264	6.3	1.61	0.92	6.4	flat bed	
GB21-3	g265	150.3	-5.69	-1.53	140.4	gravels overlapped by sediment	

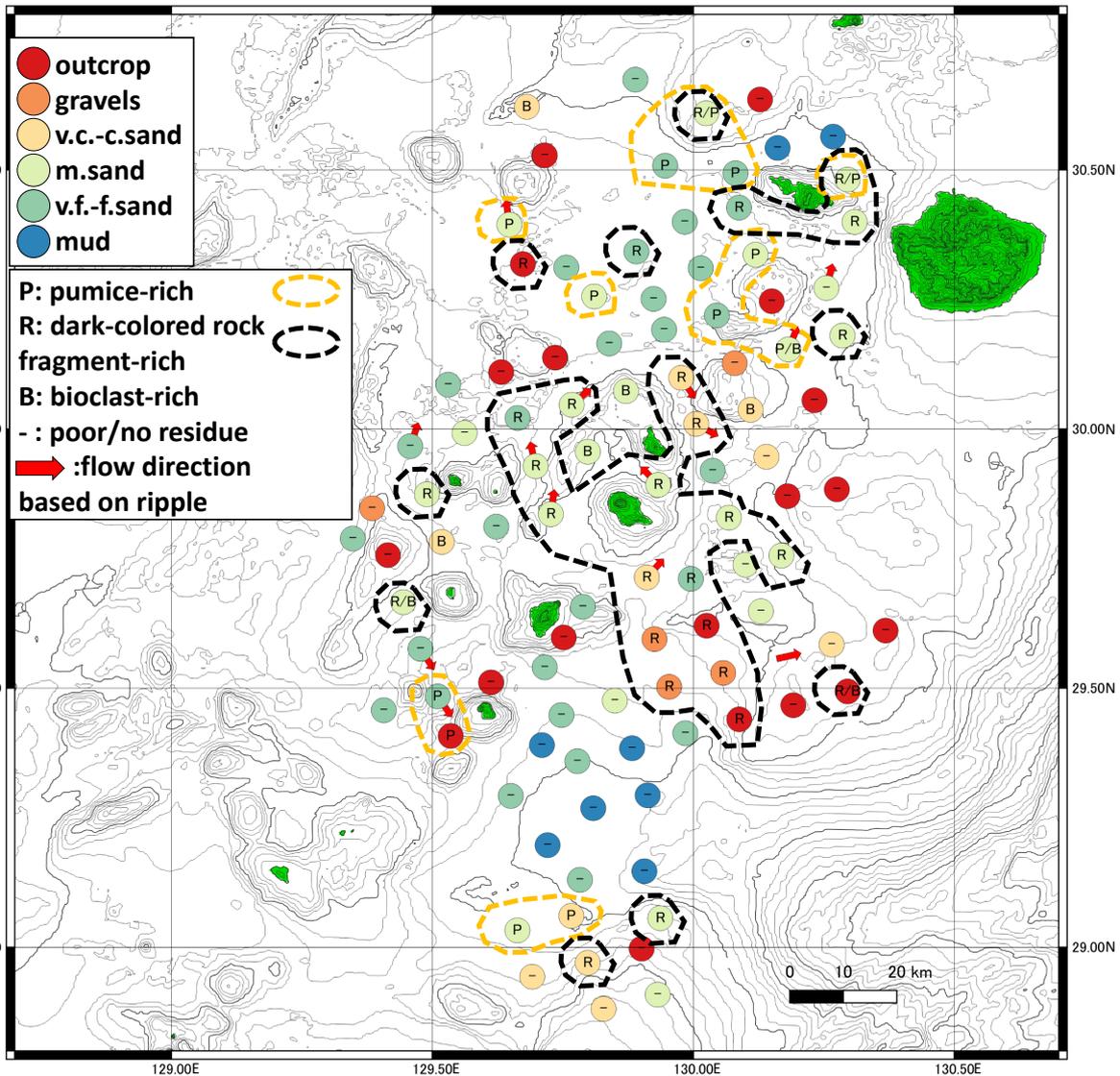
第2表 続き.
Table 2 Continued.

Cruise	Sample name	Direction (bottom) (degree)	X-tilt (bottom) (degree)	Y-tilt (bottom) (degree)	Direction (2m asb) (degree)	Characteristics of seafloor	flow direction based on ripple (degree)
GB21-3	g266	126.8	-3.14	-3.16	129.5	flat bed	
GB21-3	g267	108.7	-1.01	9.12	114.5	rippled bed	347.5
GB21-2	g268	156.4	-1.12	-1.05	162.6	faint rippled bed	
GB21-3	g269	277.9	-1.79	4.1	283.2	rippled bed (wave length ~1m)	119.2
GB21-3	g270	271.7	-1.22	5.02	287.6	flat bed	
GB21-3	g271	97.4	-2.67	-6.08	94.1	channel of 10cm width covered by rippled sediment on outcrop	
GB21-3	g283	43	-1.15	-0.66	34.0	rippled bed	19.0
GB21-3	g284	98.3	0.42	-0.93	97.5	flat bed	
GB21-3	g285	342.1	-1.58	2.81	347.8	flat bed with gravels (outcrop?)	
GB21-2	g286	183.4	1.13	0.27	186.9	rippled bed	49.8
GB21-2	g287	264	0.8	4.08	222.8	flat bed with rich organism	
GB21-2	g288	92.9	0.73	6.33	99.5	rippled bed	146.5
GB21-3	g289	103.1	2.18	-2.1	100.9	outcrop with gravels	
GB21-3	g290	103.1	-2.35	-2.9	99.7	rippled bed	21.7
GB21-3	g291	275.7	1.97	6.94	268.3	mottled flat bed	
GB21-3	g299	358.3	-1.39	1.29	346.5	flat bed	
GB21-3	g300	322.2	-3.03	7.04	329.0	outcrop	
GB21-3	g301-1	41.8	51.11	-11.03	18.0	outcrop with rich organism	
GB21-3	g301-2	312.9	6.42	-15.12	29.4	outcrop with rich organism	
GB21-3	g302	289.4	0.27	2.31	289.7	flat bed	
GB21-3	g303	16.1	-2.85	0.11	12.0	flat bed	
GB21-3	g304	174.4	-1.26	2.05	173.9	flat bed	
GB21-3	g305	140.1	-1.23	0.87	146.0	outcrop with rich organism and bioclasts	
GB21-3	g306	36.6	-0.55	4.52	35.3	rippled bed	14.3
GB21-3	g315	269	1.09	8.34	276.1	flat bed with gravels	
GB21-3	g316	141.7	-0.32	-4.37	145.1	flat bed	
GB21-3	g317	145.4	-1.38	1.13	144.5	flat bed with densely distributed ophiuroids	
GB21-3	g318	123.2	0.66	-0.74	124.4	flat bed with gravels	
GB21-3	g319	203.9	-1.04	3.01	206.7	faint rippled bed(?)	??
GB21-3	g320-1	163.9	-1.5	2.1	174.7	flat bed	
GB21-3	g320-2	263.8	-2.7	4.05	270.3	flat bed	
GB21-3	g326	97.5	-16.69	0.45	99.3	outcrop	
GB21-3	g327	79	-1.13	1.45	76.1	flat bed with gravels	
GB21-3	g328	ND	ND	ND	ND	flat bed with densely distributed ophiuroids	
GB21-3	g329	222.1	-2.51	4.62	231.5	flat bed with densely distributed ophiuroids	
GB21-3	g330	123.7	-1.14	2.51	128.8	flat bed with densely distributed ophiuroids	
GB21-3	g331	306.4	-1.39	3.5	314.8	flat bed	
GB21-3	g337	319.2	-3.82	3.19	318.2	faint rippled bed with gravels	352.2
GB21-3	g340	209.1	-1.96	2.1	209.2	flat bed with densely distributed ophiuroids	
GB21-3	g341	347.8	-0.67	2.98	355.4	flat bed	
GB21-3	g342	357.4	1.18	1.56	356.5	muddy cloud	
GB21-3	g343	287.7	-2.13	2.43	298.7	no photo	
GB21-3	g348-1	157.9	-1.49	0.79	153.2	outcrop with bioclasts	
GB21-3	g348-2	126	-3.75	0.07	133.3	outcrop	
GB21-3	g350	11.3	-3.99	2.76	22.4	flat bed	
GB21-3	g351	302.7	-0.88	2.92	307.2	flat bed with pebbles	
GB21-3	g352	320.8	1.11	1.2	318.9	outcrop	
GB21-3	g356	241.6	-2.27	1.46	240.5	flat bed	
GB21-3	g358	104.5	-0.27	2.32	109.3	flat bed	

にかかる潮流の影響により生じる鉛直方向の張力がヘッド部分の自重を上回っているとヘッド部がKグラブ本体に落着かない、すなわちフックが外れず、結果として作動に失敗する。そこで、通常時は着底直前にワイヤー繰り出し線速0.3 m/s、張力計から確認できる着底後の余分な繰り出しを3 mとしていたが、GB21-3航海中の

11/18以降、メインワイヤー傾角から推測される潮流の強さに応じて以下のような対策を講じた。

- ・Kグラブのヘッド部に錘(合計約30 kg)を装着し、ヘッド部の重量を増すことで落下しやすくする。
- ・着底確認後の繰り出し余長を3 mとしたところを、5~7 mにすることで、メインワイヤーのたるみを大きくする。



第2図 調査海域における主たる底質の分布。各地点の主たる底質は主にサブコア試料の肉眼記載と海底写真観察に基づいて判定した。海底写真でリップルが認められた地点ではその位置と流向を赤矢印で示した。P/R/Bの表記は、充分量のメッシュ洗浄をした結果残渣の主要構成物としてパミス質、暗色岩片質、生物源碎屑物に富んでいた地点を示す。オレンジ及び黒色の破線はそれぞれパミス質、暗色岩片質の堆積物が認められる範囲を示す。海底地形は岸本(2000)に基づく。

Fig. 2 The distribution of major sediment types in the survey area of GB21-1 cruise. Major sediment types are classified mainly based on the visual core description of sub-core samples and observation of seafloor photos. Red arrows and their directions indicate positions and directions of rippled beds. The P/R/B designations indicate locations where the residue was rich in pumice-rich, dark-colored rock fragment-rich, and bioclast as major residues after a sufficient amount of mesh cleaning. The orange and black dashed lines indicate the areas where pumice and dark-colored rock fragment deposits are found, respectively. Sea-bottom topography is based on Kishimoto (2000).

・着底直前の繰り出し線速を、通常0.3 m/sのところ0.5 ~ 1.0 m/sにすることでヘッド部分の降下速度を上げる、サイトg329では離底時の張力計の数値変化から、採泥器が作動していない可能性があったため、離底から数m巻き上げたのちの再着底を2回実施した。これらの再投入ないし再着底を実施した地点について、採泥位置、着底時水深、方位は試料採取に成功した再投入時及び再着

底時の記録を示した。

第2図には船上記載及び海底写真判読から総合的に判断、分類した主たる底質(露頭、礫質、粗粒砂質、中粒砂質、細粒砂質、泥質)を示す。加えて海底写真上でリップルが認められる地点には矢印でその流向を示した。底質が露頭の場合、Grab試料で採取できるのは露頭を薄く覆っていた少量の細粒物質であることが多い。

この場合は第2図に示す「主たる底質」としては海底写真判読結果(露頭)を採用した。K-グラフにより採取した試料からは、主たる底質を問わずほとんどの地点で5 mm以上の礫ないし生物遺骸を主要成分とする残渣が採取された。これら5 mm以上の残渣の主要構成物については第2図に「P」(パミス質), 「R」(暗色岩片質), 「B」(生物遺骸)の文字で示した。メッシュ洗浄を行ったが残渣がごく少量しか得られなかった地点、全く得られなかった地点及び、試料が極少量しか取得できずメッシュ洗浄を実施しなかった地点は「-」で示した。以下に本海域における底質の分布を、露頭及び礫質堆積物、砂質堆積物、泥質堆積物に分類して記述する。なお本論文では「半固結ないし固結した岩石が主要底質と考えられる地点の底質としての呼称を「露頭」、海底面に存在する(主に海底写真等から認められる)半固結ないし固結した岩石を「露岩」と呼称する。

3.2 露頭及び礫質堆積物

調査海域における主たる底質として、19地点が露頭、4地点が礫質堆積物と分類された。採取水深範囲は露頭が136～837 m、礫質堆積物478～801 mで、様々な水深に分布している。露頭は、種子・屋久海脚の主稜線および海脚から分岐する尾根上地形とその周辺、奄美海脚、悪石島周辺、諏訪瀬島南東方、権曾根、サンゴ曾根周辺から東新曾根に連なる地形の高まり、黒島堆の西部、口永良部島南方の地形の高まりに分布する。礫質堆積物は種子・屋久海脚の西方と、権曾根の北方に局所的に分布する。露頭と認定された19地点のうち17地点では露頭の表面を覆う礫、砂泥、固着生物やその遺骸のみが採取され、露頭を構成する岩石試料は採取できなかったが、海底写真の観察に基づいて露頭と認定した。

悪石島南西方のサイトg144では、グラフ採泥器作動時に露頭から剥離したと見られるパミス質の垂角礫が採取された(第3図A)。また、サンゴ曾根から東新曾根に連なる地形の高まりのサイトg326では、グラフ採泥器作動時に海底から剥離したと見られる半固結の石灰質泥質砂岩が採取された(第3図B)。

礫質堆積物は種子・屋久海脚の西方、諏訪之瀬島との中間部に位置する3地点(サイトg147, g148, g173)及び権曾根北方斜面(サイトg265)から採取された。種子・屋久海脚-諏訪之瀬島の中間の3地点はいずれもスコリア質の礫を主要成分とし(サイトg173の例: 第3図C)、基質として淘汰が悪く有孔虫を含み、珪質碎屑物を主体とする砂質堆積物を少量含む(サイトg147サブコア試料の例: 第5図A)。権曾根北方のサイトg265では少量の砂質堆積物のみが採取されたが、海底写真上では砂質堆積物に覆われる形で粒径数cm～数十cmの垂角礫が分布しており、主たる底質としては礫質堆積物と認定した(第3図D)。

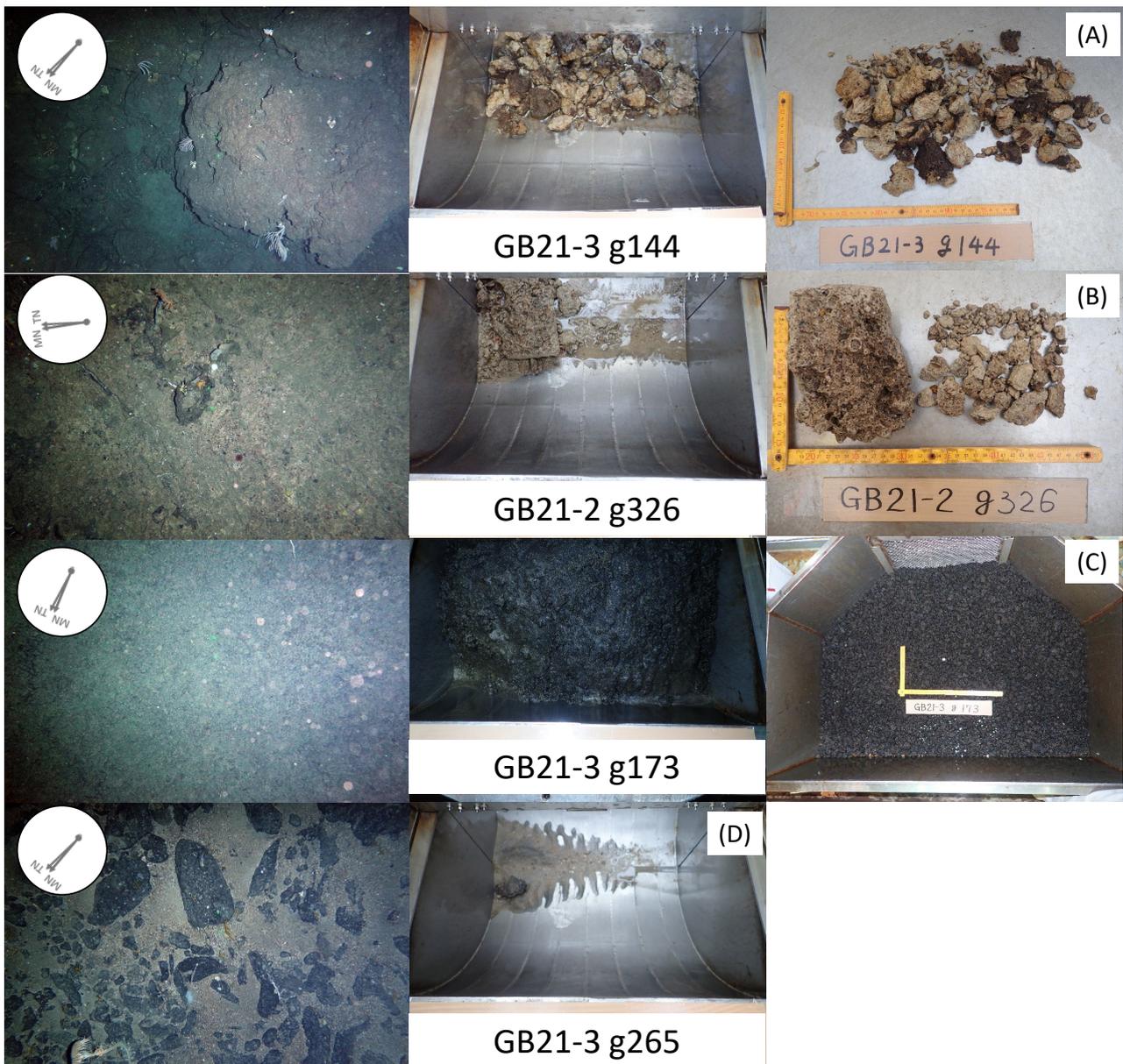
3.3 砂質堆積物

調査海域における主たる底質として、68地点が砂質堆積物と分類された。うち30地点が極細粒～細粒砂質(水深352～1025 mで採取)、26地点が中粒砂質(水深60～940 mで採取)、12地点が粗粒～極粗粒砂質(水深244～999 m)である。砂粒子は主に火山ガラスや、パミスないしスコリア質の火山性碎屑物、その他砂岩、泥岩や、これらがマンガン被覆を受けた岩片、サンゴ、有孔虫、翼足類などの軟体動物、海綿動物などを起源とする生物源碎屑物などから構成される。砂質堆積物を取得した地点の全てで5 mm以上の残渣が回収された。残渣はおおむねその地点の砂粒子に近い組成を持ち、灰色～灰黄色のパミス質ないし、暗褐色～黒色のスコリア、砂岩、泥岩、これらがマンガン被覆を受けた岩片(本論文ではこれらを一括して暗色岩片と呼称する)、これらの中間的な組成を持つ黄土色～褐色の碎屑物と、生物源碎屑物を主要成分とする。こうした礫種はいずれかの種類が卓越して見られることが多いが、パミス質及び暗色岩片質の礫が混合して採取された地点もある(第4図A～C)。5 mm以上の大型の生物遺骸としては海綿動物、刺胞動物、軟体動物、コケムシ動物、腕足動物、棘皮動物、脊椎動物(サメの歯、魚類の耳石など)などが採取された。たとえば口之島東方のサイトg270では、軟体動物、刺胞動物、コケムシ類の殻を主体とする生物遺骸が得られた(第4図A)。

パミス質の残渣を多く含む砂質堆積物は大島新曾根北方、悪石島西方、口之島から口永良部島、黒島堆にかけての海域に点在している。暗色岩片質の残渣を多く含む堆積物は奄美海脚付近、種子・屋久海脚西方から中之島周辺にかけての海域、口永良部島周辺など、島嶼部や地形の高まりの周辺に密集して存在する傾向がある。生物源碎屑物を主体とする残渣を多く含む砂質堆積物は口之島北西方、東新曾根北方の地形の高まりなどに局所的に確認された。

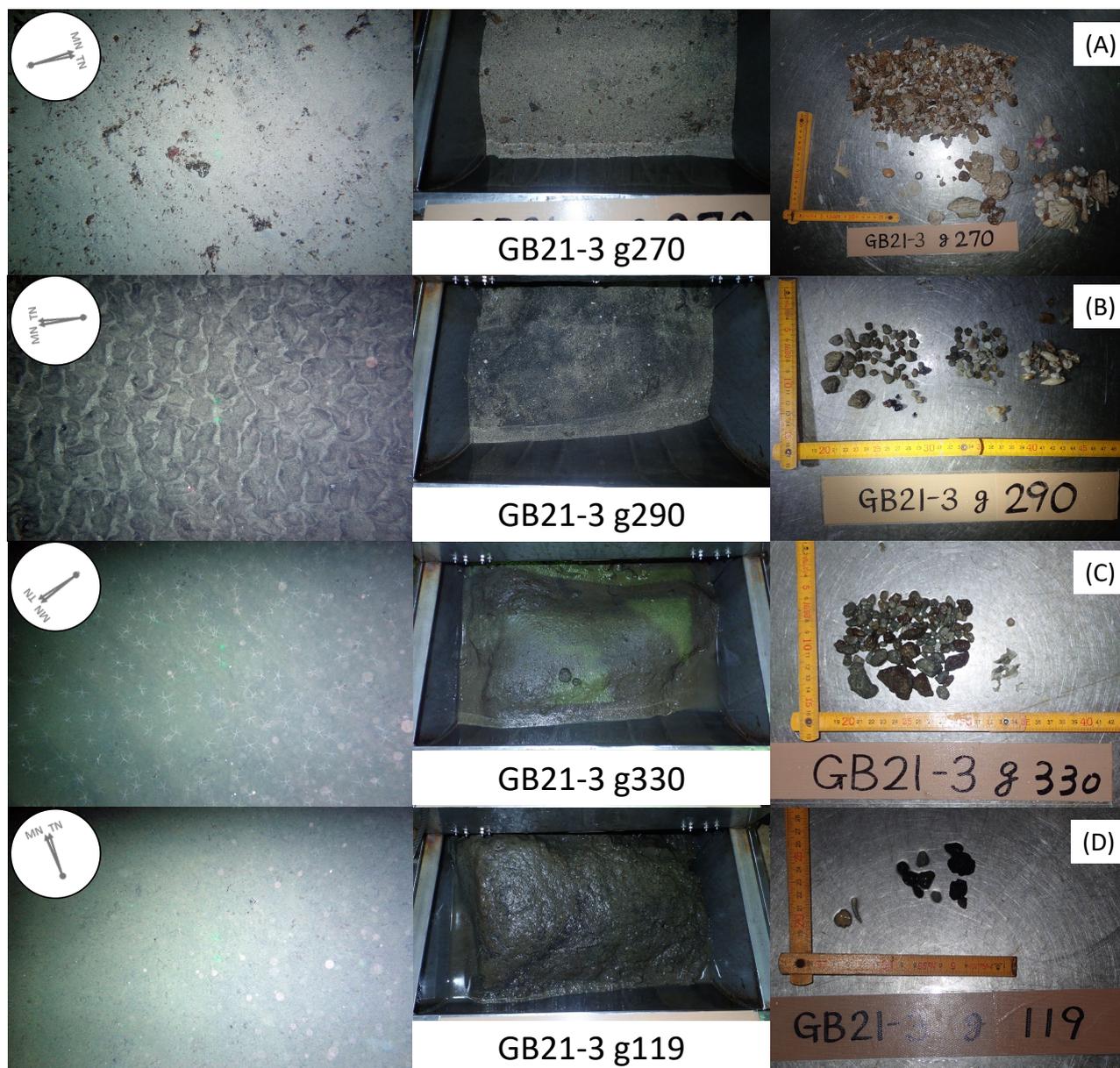
砂質堆積物が採取された地点のうち15地点で海底写真上にリップルが観察された。その多くは諏訪之瀬島南方から西方、中之島周辺、臥蛇島周辺、口之島から口永良部島にかけての浅海域など、トカラ列島を東西に取り囲む14地点(サイトg169, g171, g196, g199, g247, g248, g250, g267, g269, g286, g283, g288, g290, g306)と、東新曾根南方の1地点(サイトg337)である。口之島北西方のサイトg269では波長1 m程度のメガリップルが観察された。リップルが確認された地点ではサブコア試料にも粒径や淘汰度、粒子組成の異なる堆積物が斜交しつつ明瞭ないし漸移的な境界をもって互層を成す堆積構造が肉眼ないしCT断面で確認できる場合がある(サイトg169の例: 第5図B)。

この他、K-グラフが作動せず海底写真のみが撮影でき、底質を「不明」とした、種子・屋久海脚西側のサイトg149



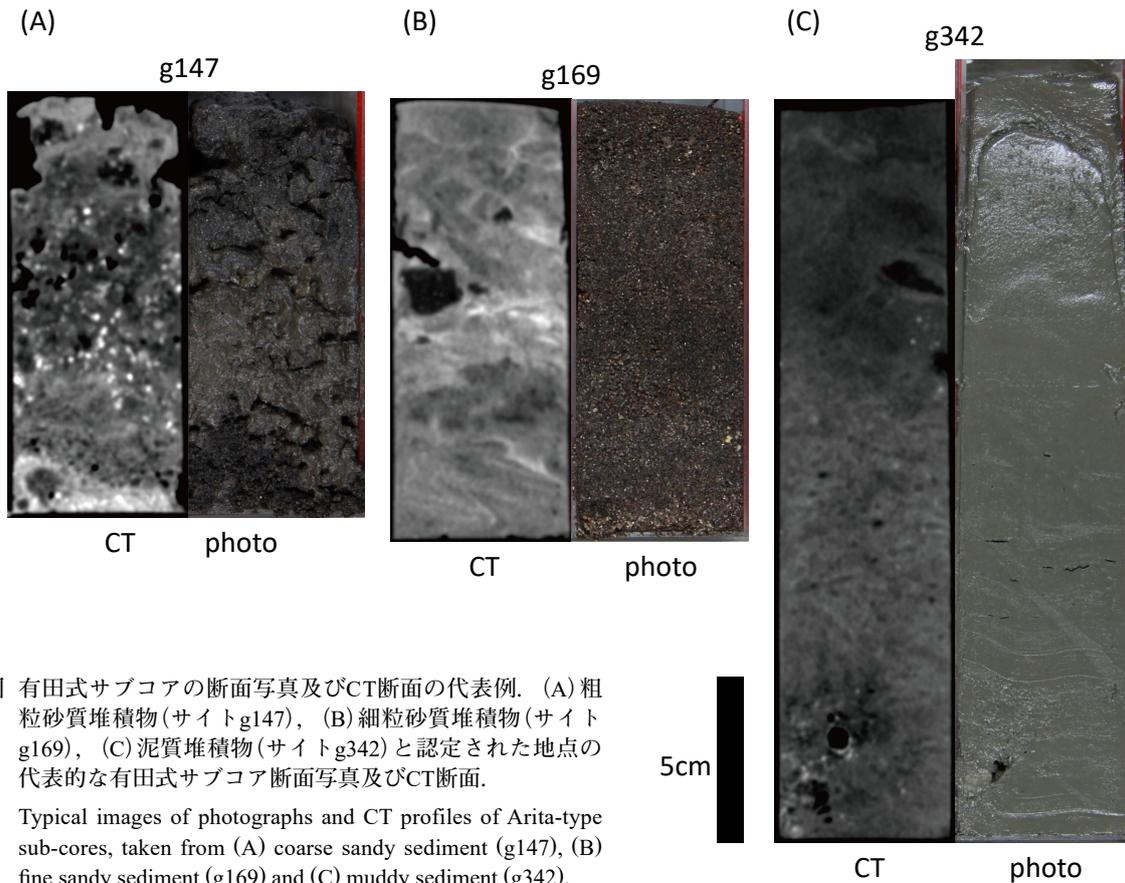
第3図 露頭、礫質堆積物と認定された地点の写真。海底写真には撮影時の方位(真北:TN, 磁北:MN)も示した。海底写真に写り込んだ緑色の光点(レーザースケール)の間隔は10 cmである。(A)(B)露頭と認定されたサイトg144, g326の海底写真, グラブ表面写真および5 mmメッシュで洗浄後の残渣。(C)礫質堆積物と認定されたサイトg173の海底写真, グラブ表面写真及び5 mmメッシュで洗浄後の残渣。(D)礫質堆積物と認定されたサイトg265の海底写真及びグラブ表面写真。

Fig. 3 Seafloor photos, grab surfaces, and residues(>5mm) taken on the sites of outcrop and gravels. Arrows on seafloor photos indicate true north (TN) and magnetic north (MN). The green light spots (laser scale) in the seafloor photograph are 10 cm apart. (A)(B) Seafloor photos, grab surfaces and residues (>5 mm) of sites g144 and g326, classified as the outcrop. (C) A seafloor photo, grab surfaces and residues (>5 mm) of site g173, classified as gravels. (D) A seafloor photo and grab surface of site g265, classified as gravels.



第4図 砂質堆積物、泥質堆積物と認定された地点の代表的な海底写真、グラブ表面写真及び5 mmメッシュで洗浄後の残渣写真。海底写真には撮影時の方位(真北：TN，磁北：MN)も示した。(A)粗粒砂質堆積物と認定されたg270の写真。生物源碎屑物を主体とする残渣が回収された。(B)中流砂質堆積物と認定されたg290の写真。海底写真上に明瞭なリップルが観察される。(C)細粒砂質堆積物と認定されたg330の写真。海底写真上に密に生息するクモヒトデ類が観察される。(D)泥質堆積物と認定されたg119の写真。海底写真上に巣穴や底生生物が観察される。

Fig. 4 Typical seafloor photos, grab surfaces, and residues (>5 mm) taken on the sites of sand and mud. Arrows on seafloor photos indicate true north (TN) and magnetic north (MN). (A) Photos taken on the site g270 classified in its major sediment types as coarse sand. Residues indicate that their major components are bioclasts. (B) Photos taken on the site g290 classified in its major sediment types as medium sand. Ripples are clearly observed in the seafloor photo. (C) Photos taken on the site g330 classified in its major sediment types as fine sand. Densely distributed ophiuroids are observed in the seafloor photo. (D) Photos taken on the site g119 classified in its major sediment types as mud. Burrows and benthos are found in the seafloor photo.



第5図 有田式サブコアの断面写真及びCT断面の代表例。(A)粗粒砂質堆積物(サイトg147), (B)細粒砂質堆積物(サイトg169), (C)泥質堆積物(サイトg342)と認定された地点の代表的な有田式サブコア断面写真及びCT断面。

Fig. 5 Typical images of photographs and CT profiles of Arita-type sub-cores, taken from (A) coarse sandy sediment (g147), (B) fine sandy sediment (g169) and (C) muddy sediment (g342).

及び口永良部島南方のサイトg319でも海底写真上にリップルが確認された。リップルはその峰に対して非対称な断面形状を持っており、底層流の影響で形成されるカレントリップルと考えられる(サイトg290の例:第4図C)。以上17地点のうち、14地点では海底写真上のリップルの形状に基づいて流向を推測できた。サイトg171, g250, g319のリップルは不明瞭、またはカオティックな様相を示し、流向を推測できなかった。リップルの形状から推測される流向(緩傾斜側から急傾斜側に向かう方位)はほぼ真北から真東、南南東にかけての方位を示し、調査海域の北西側、サンゴ曾根周辺から臥蛇島周辺に位置する地点では真北から北東、南から南東側、島嶼部から種子・屋久海脚に位置する地点では真東から南東にかけての方位を示す傾向を持つ。

3.4 泥質堆積物

調査海域における主たる底質として、グラブ採泥を実施した地点のうち8地点が泥質堆積物(水深502~1202mで採取)と分類された。泥質堆積物を得た8地点のうち6地点は、水深800mよりも深い地点から採取された。泥質堆積物を得た地点のうち水深が800mよりも浅かったのはサイトg342(水深592m)及びサイトg343(水深502

m)である。これら2地点は口永良部島北方に位置しており、口永良部島、黒島堆などの地形的障壁により流速が弱まり、局所的に細粒物質が堆積しやすい環境であると考えられる。水深800m以上で泥質堆積物と分類された6地点(サイトg70, g93, g94, g95, g119, g121)はいずれもトカラ海底谷西方、諏訪之瀬島、悪石島、宝島、大島新曾根、奄美海脚に囲まれた海盆に分布している。水深800m以上の採泥点であっても、その全ての堆積相が泥質堆積物というわけではなく、3.2, 3.3節で記述した通り、より粗粒な物質が主たる底質として認定された地点も多く存在する。

泥質堆積物を得られた地点の海底写真では、クモヒトデやヤギなどの底生生物や、底生生物の巣穴が複数観察された(サイトg119の例:第4図D)。また肉眼観察でも粒径がパッチ状に粗粒化している様子は多く観察され、CT画像、軟X線像において生痕が発達する様子が観察された(サイトg342の例:第5図C)。スミアスライドを用いた鏡下観察によれば、泥質堆積物を構成するのは主に有色鉱物、粘土鉱物、火山ガラス、有孔虫などの微生物殻であった。5mmメッシュで篩にかけた残渣はどの地点でも採取された堆積物量に対してごく僅かであるが、パミス質ないしスコリア質の礫や海綿骨針が多くの地点

で採取され、一部の地点では軟体動物殻なども回収された。

3.5 コケムシ試料分析結果

サイトg228及びg304に含まれるコケムシ骨格は、多くが変色・摩耗して保存の悪い状態であるため、同定は困難なものが多数を占めた。コケムシ骨格が堆積物中に占める重量は、g228で7.7%、g304で11.7%であった。

3.6 浮遊性有孔虫分析結果

本調査海域の9試料(第6図a)から産出した径125 μ m以上の浮遊性有孔虫は16属28種である。10%以上の頻度を示す種は*Globigerinita glutinata* (Egger), *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), *Globigerina bulloides* d'Orbigny, *Pulleniatina obliquiloculata* (Parker and Jones) および *Globigerinoides ruber albus* (Morard et al., 2019) の5種である(第6図b~f)。またこれらの種に加え、*Trilobatus sacculifer* (Brady), *Globigerina falconensis* Blow, *Turborotalita quinqueloba* (Natland), *Globoconella inflata* (d'Orbigny) および *Globigerinoides elongatus* (d'Orbigny) が最大5~8%の頻度で産出した。本調査測点を特徴づける種として *G. glutinata*, *N. dutertrei*, *G. bulloides*, *P. obliquiloculata* および *G. ruber albus* の5種が挙げられ、浮遊性有孔虫が産出するすべての試料で群集の68%を占める。

浮遊性有孔虫殻の保存状態及びサイズ分布を検討した試料と検討個体数の一覧を第3表に示す。63~125 μ mの個体群は *Turborotalita* Blow and Banner や *Tenuitellita Li* などの属を主として含むが、このサイズレンジでは種レベルの同定やタクソンごとの計数を行っていない。

各地点における検討個体群の最大・最小径について、それぞれ20 μ mピン及び砂粒度区分を基準とするヒストグラムを作成し、比較検討を行なった(第7図、第8図)。サイズ分布からみて各検討地点は3つのグループに大別される。火山フロントを挟んで前弧側のg249を除くシルト・細粒砂相(g94, g200)及び背弧側の細粒・中粒砂相(g168, g221, g264, g299, g340)は全体として最もサイズの小さい個体群を含む。このグループの個体群は、最大径・最小径ともに概ね100~180 μ mに最頻値をもち、最大径は細粒砂サイズ(125 μ mより大きく250 μ m以下)、最小径は極細粒砂サイズ(63 μ mより大きく125 μ m以下)の個体がそれぞれ砂粒度区分において最も多数を占める。中でも調査海域南半部に位置するg94, g168, g200の個体群は、中粒砂サイズ(250 μ mより大きく500 μ m以下)以上の個体をほとんど含まず、細粒砂サイズ以下の小さな個体が90%以上を占める。次に前弧側のg44及びg249に含まれる個体群は、前述のグループと大きくは変わらないものの、サイズの大きい方にやや幅広の分布を示し、最大径・最小径ともに細粒砂サイズの個体が最も

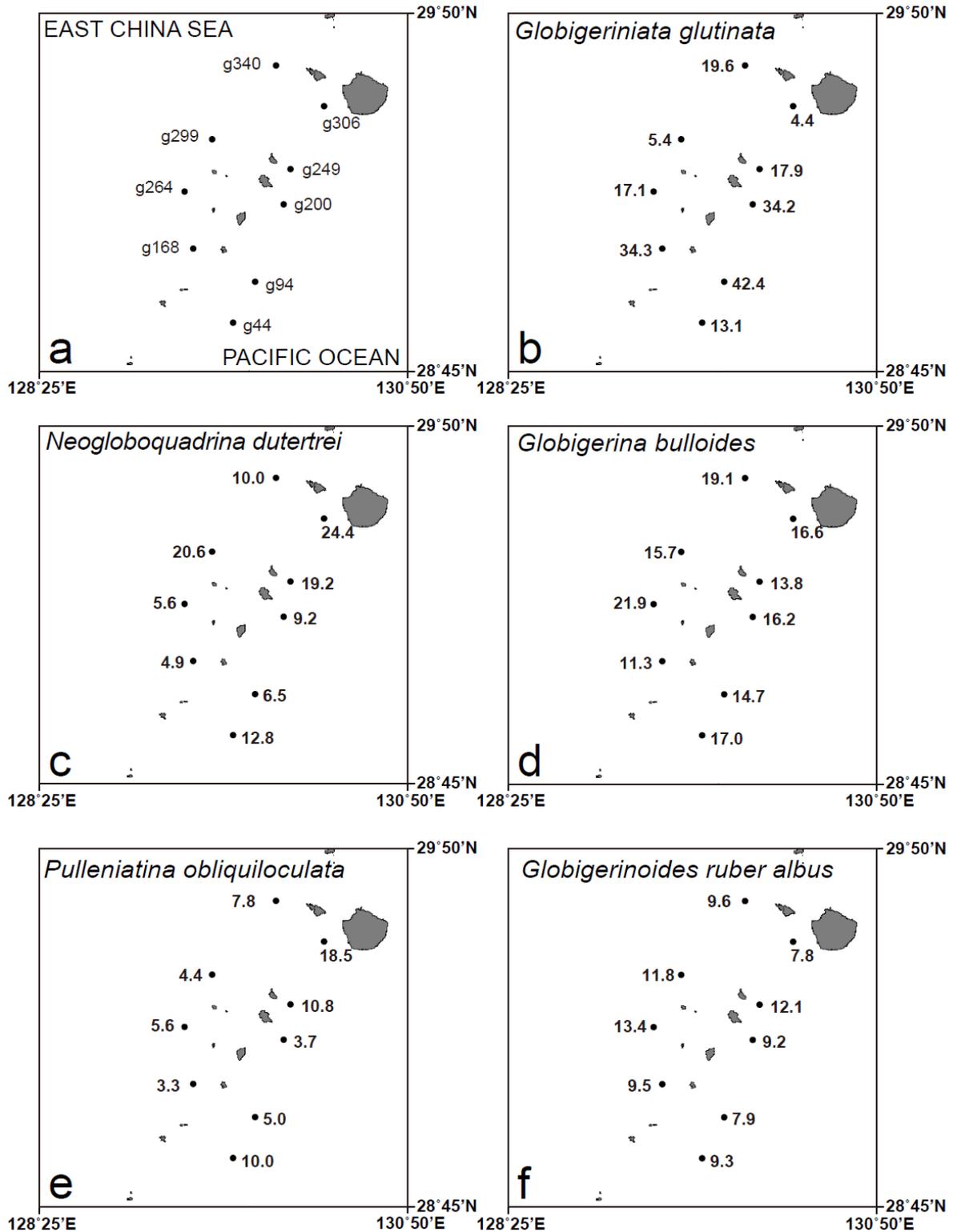
多い。中粒砂相であるg44では、中粒砂サイズの個体が30%を超える。最後に、前弧側で最も北に位置する中粒砂相のg306は他の地点と大きく異なるサイズ分布を示し、検討地点の中で全体として最もサイズの大きい個体群を含む。最大径・最小径ともに中粒砂サイズの個体が最も多く、ともに個体群の60%近くを占める。

各検討地点における浮遊性有孔虫殻の保存状態の典型的な例を第9図に示した。観察結果としては、ランクAの個体が約60~80%を占める地点がほとんどであり、最も多いg94では90%を超える。またランクCの個体の割合は全ての地点で10%を下回った。ランクDの個体はg168に1個体、g221に2個体のみが認められた。またサイズ計測を行った個体群を対象として、最小径サイズ分布を用いて予想的に保存状態とサイズの関係を検討した(第10図)。その結果、元々ランクB・Cの個体が少ないg94を除く多くの地点で、サイズが小さい砂粒度区分ほどランクAの個体が相対的に多い傾向が認められた。

3.7 サンゴ類分析結果

102地点(水深60~1201m)のうち31地点でイシサンゴ類が採集された(第11図)。本調査域における、イシサンゴ類(Cnidaria: Anthozoa: Hexacorallia: Scleractinia)の採集深度は185~999mであった。採集されたイシサンゴ標本を検討した結果、11科25属14種が同定された(第4表)。本調査域内において採集されたイシサンゴの属数が最も大きい地点はサイトg267(水深591m)、g304(水深607m)、g351(水深185m)であり、それぞれの地点から7属が認められた。また、ヒドロサンゴ類Family Stylanderidae (Cnidaria: Hydrozoa: Anthoathecata: Filifera)はサイトg26, g268, g288, g148, g247, g267, g269, g304, g351, g356から採集された。八放サンゴ類は堆積物サンプルからは認められなかった。

海底写真では25地点においてサンゴ類が確認された(第11図)。特に、サイトg125(水深327m)では海底の露岩表面にヒドロサンゴ類の生体が八放サンゴ類や海綿動物などと共に数多く固着し、高密度で生息している様子が確認された。また、その露岩の平坦部には、ヒドロサンゴの遺骸が大量に集積している様子が認められた。サイトg124(水深306m)、g174(水深525m)及びg227(水深320m)においても、露岩表面の凹地に多量のヒドロサンゴ遺骸が堆積している様子が認められた。サイトg270(水深268m)における海底写真では2次元的な樹状形態を示す八放サンゴが認められた。それらの樹状形態の平面部分はほぼ同様の方向を向いており、その平面部分と直交する直線の真北からの角度は時計回りに61.5°であった。サイトg287(水深60m)の海底写真では海綿動物や藻類に混じり有藻性イシサンゴ類のワレクサピライシや八放サンゴ類が数多く認められた。



第6図 調査海域における表層堆積物のうち浮遊性有孔虫群集組成分析実施地点 (a)と浮遊性有孔虫の相対頻度分布 (b~f)。b~fの数値は各試料中の産出頻度 (%)を示す。

Fig. 6 The distributions of six major planktic foraminifera in the survey area. (a) Sampling points of K-grab. (b)-(f) Relative abundance (%) of major planktic foraminifera.

第3表 砂粒子サイズ浮遊性有孔虫殻の保存状態の検討及びサイズ計測を行なった地点と検討数のまとめ。#PFは各試料における全ての検討個体数、#excludedはそのうちサイズ計測から除外した個体数を表す(詳細は本文を参照)。

Table 3 Summary of study locations and sample sizes for checking preservation states and size analysis of sand grain-sized planktic foraminiferal tests. #PF and #excluded indicate the total number of examined specimens for each sample and that of excluded from size analysis, respectively, for which detailed explanation is given in the manuscript.

Loc	#PF	#excluded
g44	202	3
g94	242	5
g168	325	10
g200	234	8
g221	228	5
g249	219	8
g264	245	11
g299	208	9
g306	234	14
g340	288	7

4. 議論

本章では、K-グラフで実施した表層採泥試料とその観察・分析結果の中から、本海域の底質分布を規定する主要因と考えられる、島嶼及び海底地形と黒潮の影響について考察する。

4.1 底質分布の規定要因1：島嶼部及び海底地形

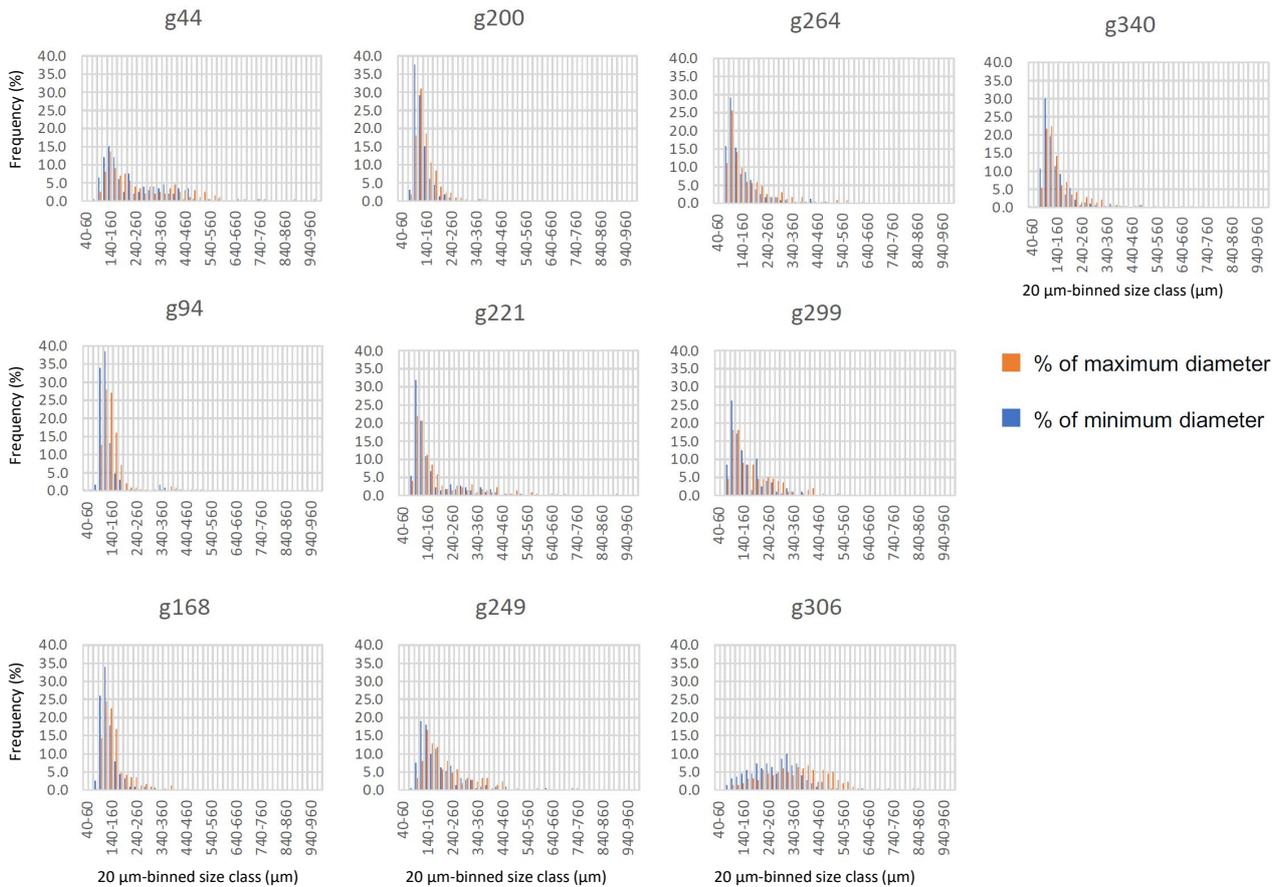
2021年度の調査において、主たる底質として泥質堆積物は水深502～1201 m、細粒砂質堆積物は水深352～1025 m、中粒砂質堆積物は水深60～940 m、粗粒砂質堆積物は水深244～999 m、礫質堆積物は水深478～801 m、露頭は水深136～837 mの範囲で確認された。それぞれの底質について、本調査海域に接続するトカラ列島南側の宝島周辺海域では「細粒物質は深い水深にしか分布しないが、粗粒物質は水深を問わず分布する」という特徴を持っていた(鈴木ほか, 2022)が、本調査範囲においては各底質の分布する最大水深と最小水深のいずれも、底質との明瞭な関係が見られなかった。ただし、中粒砂質堆積物、細粒砂質堆積物、泥質堆積物の3つの画分に注目すると、細粒化に伴って分布最大・最小水深が増大する傾向にある。この傾向は宝島周辺海域でも認められる(鈴木ほか, 2022)。主たる底質として露頭、礫、粗粒砂が観察された地点は調査範囲全体に散在しているわけではなく、とくに露頭及び礫質堆積物は、種子・屋久海脚

の主稜線部および枝分かれする稜線部やその周縁部、諏訪之瀬島や悪石島周辺、権曾根、サンゴ曾根から東新曾根に連なる地形的高まりの頂部付近、口永良部島南方など、地形高まりの頂部から稜線部に分布している。また礫質堆積物や粗粒砂質堆積物は、諏訪之瀬島東方、口之島東方、権曾根東方などに分布している。こうした粗粒物質の分布を規定する要因の一つとして、海域に水深を問わず広く分布する島嶼、海丘をはじめとする地形的高まりの存在が考えられる。これらの地形を構成するのは海底火山やサイトg326で観察されたような堆積岩露頭であり、本海域の深海部で見られる粗粒物質はこれらの山体から供給される粗粒物質、たとえば海底火山からの噴出物を主要な供給源とすると考えられる。奄美海脚、種子・屋久海脚から中之島周辺海域にかけての範囲や、口永良部島周辺などの砂質堆積物中に見られる5 mm以上の残渣の主成分が暗色岩片質であることも、山体から供給される粗粒物質の影響がこうした海域で強いことを裏付けている。

口之島周辺、臥蛇島周辺、種子・屋久海脚の稜線部などの600 m以浅において、主に石灰質の生物遺骸を主体とする底質が特徴的に観察された。以下、このような底質を有する代表的なサイトについて考察する。東新曾根の北方に位置するサイトg356(水深536 m)では深海域で大きな群集を形成することが可能な群体性イシサンゴ *Enallopsammia* sp.および*Madrepora* sp.の断片化した骨格が多数採集された。採集した骨格断片は、その表面が茶褐色に変色していることから、骨格が形成されてから、かなりの時間が経過していることが推測される。また、同サイトの海底写真では、これらのイシサンゴの生体は認められない。以上のことから、これらの多量のサンゴ遺骸は周辺からの流れ込みにより堆積しており、この供給源となる群体サンゴの群生地がサイトg356の近傍に存在していた可能性が高い。特に、サイトg356付近は、幅の狭い岬状の地形をしておりこの稜線付近などがその候補となる。

口之島の西に位置するサイトg268(水深456 m)は、その西側にある地形的高まりの斜面にあたる。このサイトでは、保存のよい自由生活性の単体イシサンゴ骨格と固着性の単体イシサンゴ、さらにはヒドロサンゴが多数採集された。基本的に骨格の保存状態が非常によいため、原地性の遺骸も含まれると考えられる。このサイトの主要な底質は中粒砂であるが、礫も海底面に散在しており、これらの礫に固着性の単体イシサンゴやヒドロサンゴが固着し生息している可能性が高い。一方で、当サイトは、その西側にある谷地形の出口付近に位置し、さらに、水深の浅い西側に比べて傾斜が緩やかになっている。そのため、浅海から流入した骨格遺骸がこの地点に集積している可能性も考えられる。

口之島の北に位置するサイトg287(水深60 m)は、中



第7図 浮遊性有孔虫殻サイズ(最大径・最小径)計測結果の20 μmビンヒストグラム。それぞれ横軸は20 μm刻みのサイズ階級(μm)、縦軸はそれらが各地点ごとの全計測個体数に占める割合(%)を表す。

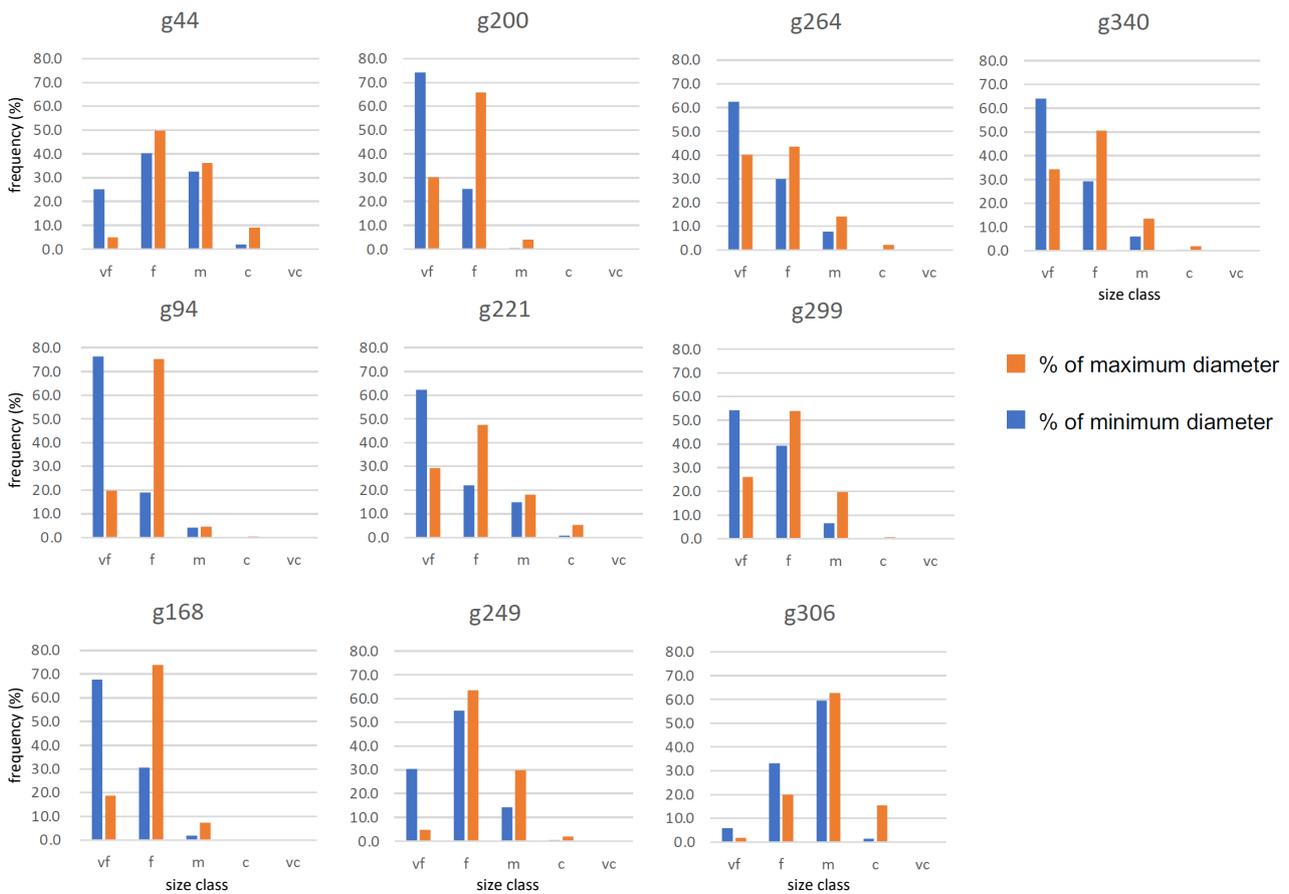
Fig. 7 Histograms with 20 μm-bin showing results for planktic foraminiferal size analysis regarding both maximum and minimum diameters. Horizontal and vertical axes indicate 20 μm-binned size class (μm) and its frequency (%), respectively.

有光層のサンゴ生態系が認められ、生体の有藻性イシサンゴや石灰藻類なども海底写真で数多く確認される。このことから、このサイトに堆積する生碎物の礫は浅海からの流入だけでなく、イシサンゴや石灰藻などの原地性の炭酸カルシウム骨格を起源とするものも含まれると考えられる。権曾根の頂部付近にあたるサイトg244(水深136 m)においても、生碎物を主体とする礫が認められるが、ここでは有藻性イシサンゴ類や藻類が海底写真からは認められない。水深136 mは有藻性イシサンゴが生息する中有光層のサンゴ生態系が成立する上での限界深度に近く(Lesser, Slattery and Mobley, 2018)、海底に届く光量の差異がg287と異なる群集構成をもたらしていると考えられる。そのため、g244で認められる生碎物の礫は、浅海からの流入の可能性が高い。

サイトg125(水深327 m)の海底写真では八放サンゴや海綿動物を伴うヒドロサンゴを中心とした高密度群集が

露岩表面に認められた。また、同じ海底写真内の露岩の平坦部には、ヒドロサンゴの遺骸が大量に集積している様子が認められた。写真内では露岩平坦部は周囲の壁面よりも深い場所に位置するため、周辺の露岩表面に固着しているヒドロサンゴが壁面から剥離・落下することでその場に集積したと考えられる。サイトg124(水深306 m)、g174(水深525 m)及びg227(水深320 m)では露岩表面の凹地にヒドロサンゴ遺骸が堆積している様子が海底写真から認められたが、露岩そのものには固着したヒドロサンゴが認められないため、近傍の生息場よりヒドロサンゴ遺骸が流入し堆積した可能性が高い。

口之島の北西に位置するサイトg270では、やや多様性の高い自由生活性イシサンゴ群集が認められた。海底写真では八放サンゴが礫から生えている様子が認められ、ある程度の流れがあると推測される。そのため、底質中の細粒粒子がバイパスされ、結果的に粗い骨格遺骸が密



第8図 浮遊性有孔虫殻サイズ(最大径・最小径)計測結果の砂粒度区分階級ヒストグラム。それぞれ横軸は砂粒度区分に従った階級(vf: very fine, f: fine, m: medium, c: coarse, vc: very coarse), 縦軸はそれらが各地点ごとの全計測個体数に占める割合(%)を表す。

Fig. 8 Histograms with sand grain-size division-based class showing results for planktic foraminiferal size analysis regarding both maximum and minimum diameters. Horizontal and vertical axes indicate sand grain-size division-based size class (μm) and its frequency (%), respectively.

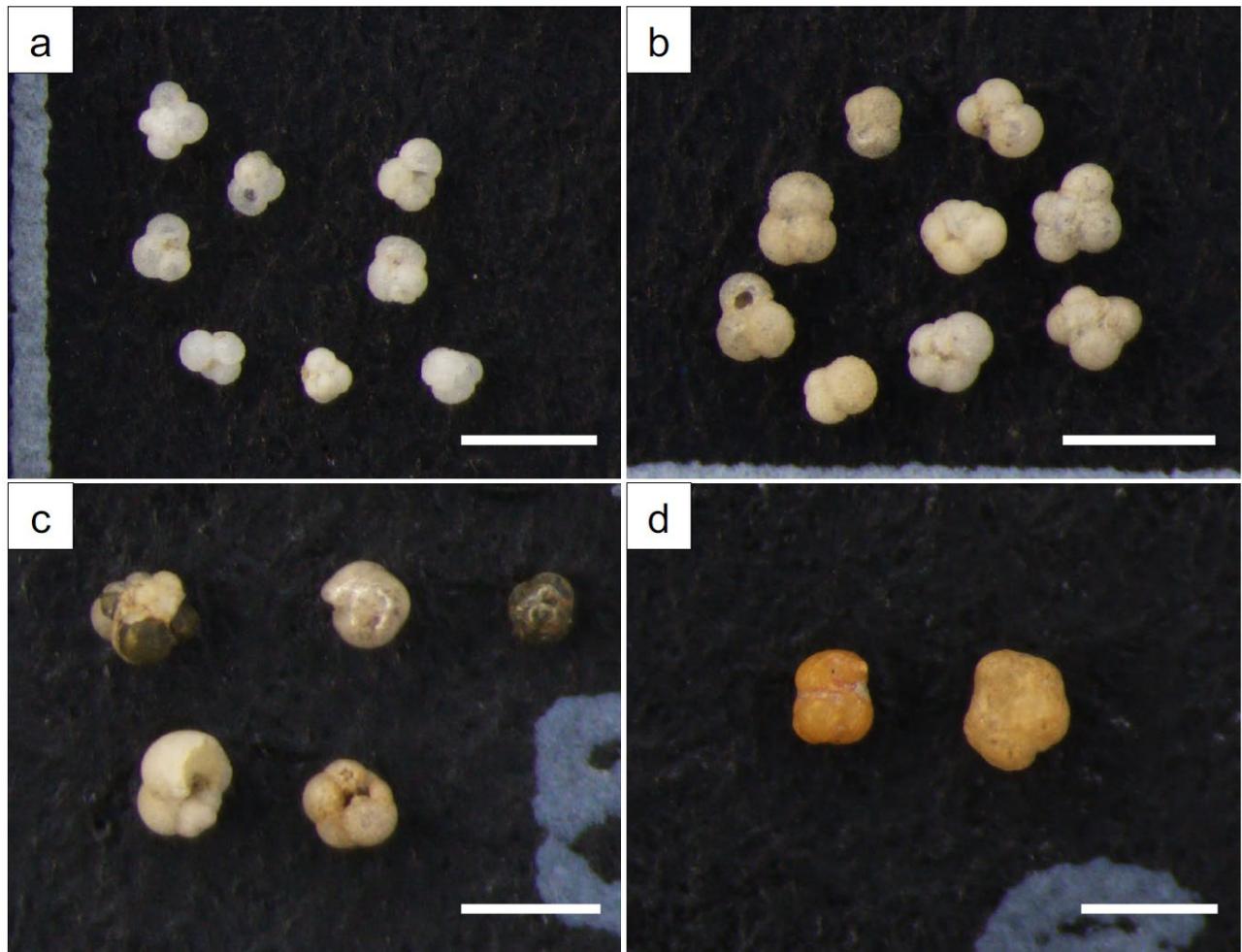
集している可能性がある。サイトg245はリップルが認められリップルの凹部に翼足類などの骨格生物遺骸が集積している。このサイトにおいても細粒粒子が流れによりバイパスされることで骨格遺骸が密集的な産状を示している可能性がある。

以上をまとめると、本海域の底質分布の規定要素の一つとして、海域東側の海脚や、点在する海丘群、海底火山群などの地形的高まりから供給される粗粒物質の供給が考えられる。またその粗粒物質の組成は、山体から供給される火山性ないし珪質碎屑物に加えて、浅海域で生産されたと見られる生物遺骸が混合しており、周辺の地質や水深(とくに最小水深)の影響を受けて多様化していることが考えられる。

すでに海脚、海丘などとして認定されている海底地形に加えて、本海域において取得された航走観測データによれば、既存の海底地形データでは検出されていなかっ

た未報告の海底火山も多数存在することが示唆されている。それらの一部は産総研の海域地質調査航海により地形が認定、記載されている(高下ほか, 2022)。

したがって、今回主たる底質として細粒物質が採取された範囲においても、表層採泥の実施間隔(約6海里 \approx 約11 km)よりも狭い範囲で局所的に粗粒物質が分布している可能性が高い。こうした局所的な底質の分布については、サブボトムプロファイラーによる浅層地層探査の結果や海底地形データを取得する際に得られるマルチビーム音響測深器の後方散乱強度など、高い連続性を持つが詳細な解釈が難しい音波探査データと、採泥試料分析をはじめとする離散的だが情報量が多く、詳細な解釈が可能な採泥データを組み合わせることで、調査海域全体について面的に解明できると考えられる。また反射法音波探査に基づく海底地質の認定(例えば、石野ほか, 2022)と組み合わせれば、海底の地形的高まりからの供給物質



第9図 本研究で定義した保存状態の定性的観察に基づくランクA–Dの代表的な個体の実体顕微鏡写真。a：ランクA (g249), b：ランクB (g299), c：ランクC (g306), d：ランクD (g221)。スケールバーは500 μm 。

Fig. 9 Stereo microscope images of representative specimens belonging to the preservation ranks A–D defined on the basis of qualitative examination in this study. a: rank A (g249), b: rank B (g299), c: rank C (g306), d: rank D (g221). Scale bars represent 500 μm .

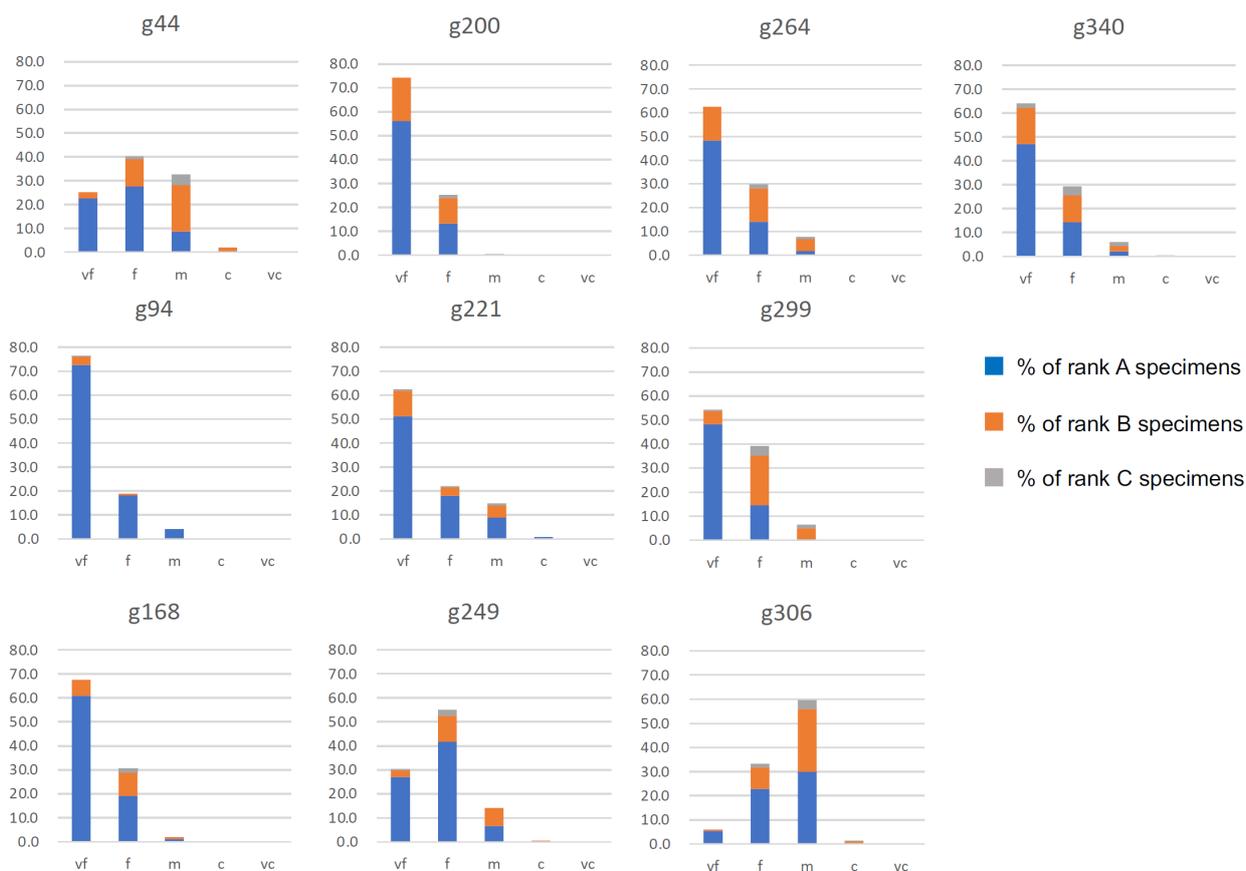
の種類についても制約を加えることが可能である。

4.2 底質分布の制御要因2：黒潮の力学的影響

砂質堆積物の章で記述した通り、調査海域の計17地点においてリップルが観察された。これらのリップルが観察される地点の水深範囲は479～923 mである。この水深では潮汐や波浪の影響は考えにくく、また前述したように多くの地点でリップルの形状が非対称性を持つ。従ってこれらのリップルはいずれも、潮汐や波浪によるウェーブリップルではなく、底層流により形成されたカレントリップルと考えられる。このリップルの水深範囲は宝島周辺海域で見られたリップルの分布水深(500～800 m：鈴木ほか, 2022)と一致しており、宝島周辺から口永良部島周辺にかけて、南北を縦断する形でカレントリップルを形成しうる流速の底層流が存在する

ことが示唆される。本研究でリップルが認定された地点(主たる底質は、極粗粒から粗粒砂3地点、中粒砂8地点、細粒から極細粒砂4地点、不明2地点)に対してStow *et al.* (2009)により示されたBedform-velocity matrixを適用すると、おおむね0.2～0.5 m/s程度(0.4～1.0ノット程度)の底層流の存在が示唆される。今後、堆積物試料の粒度分析やリップルの形態解析などによりより詳細な底層流速の空間分布を解明することが期待される。

リップルが観察される地点近傍かつ水深のより浅い地点での採泥結果を参照すると、リップルが観察された地点よりも粗粒な底質(粗粒砂質堆積物、礫質堆積物、露頭)が観察される場合が多い。すなわち、リップルの形成水深よりも浅い地点では底層流の流速がさらに高まり、中粒砂質以下の粒径を持つ堆積物が堆積できない状況、またはほぼ無堆積ないし侵食作用が卓越する場となってい



第10図 浮遊性有孔虫殻の最小径サイズ分布と保存状態の関係。ヒストグラムの横軸・縦軸は第8図に同じ。

Fig. 10 Histograms showing relationships between minimum diameter size distribution and observed preservation states of foraminiferal tests. Horizontal and vertical axes follows those of Figure 8.

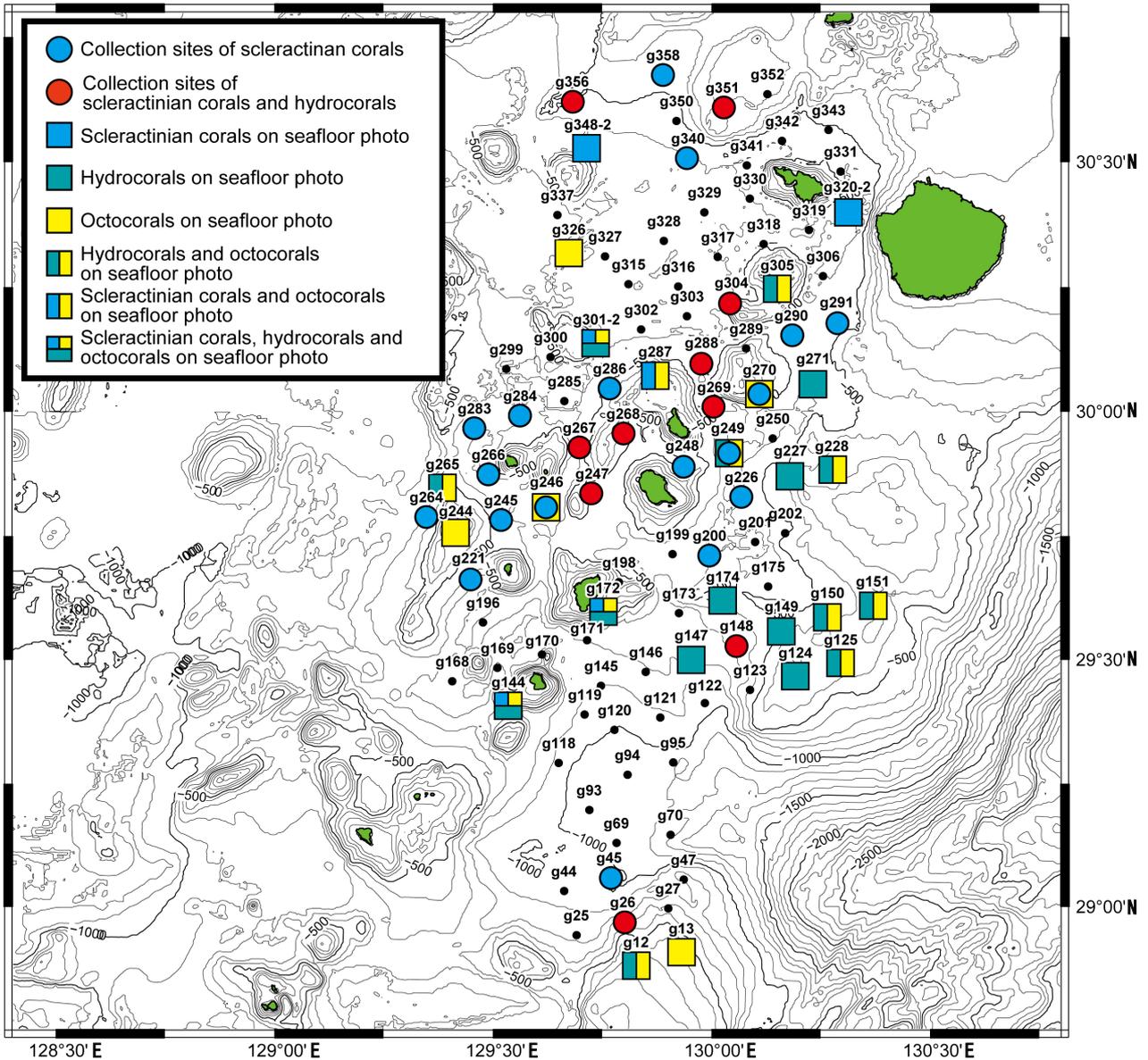
ると考えられる。

また、マルチビーム音響測深機により取得した海底地形データ(高下ほか, 2023)によれば、口之島北方から東方にかけての海域に波長200～300 m, 振幅1 m程度のサンドウェーブが発達する地形が三か所認められる(第12図)。それぞれのサンドウェーブの形状から推定される流向は、口之島北方において北北西から南南東、口之島北東方において北西から南東、口之島東方において西から東となっており、島嶼部及び海底下の地形の高まりの間で流向を変えつつ通過する底層流が存在することを示唆する。

サイトg270の海底写真では、平面的な樹状形態を示す生体の八放サンゴ2群体が礫上に固着している様子も認められた。それら2群体の樹状形態の平面部分は、ほぼ同様の方向を向いており、その平面部分に対する法線は真北から時計回りに61.5°, 概ね東北東-西南西方向を示した。このような八放サンゴでは能動的に群体の向きを変化させることは難しいが、群体成長の中で、最も卓越する流れの方向に対して直交方向に群体の平面部分が

成長することが知られている(たとえば, Grigg, 1972)。このことから、サイトg270においては、サンゴの群体成長の様子から、ある程度長期間にわたり、東北東-西南西方向に卓越する底層流(等深線流)がg24を含む地形的な高まり上に影響していると考えられる。サイトg270を含む地形的高まりの南側から東側、北東側にかけては、リップルの方位から等深線に沿う南東・東南東・北東向きの底層流(等深線流)の存在が示唆され、サイトg270の海底写真で確認された八放サンゴから得られた流れの方向はこの一連の傾向と整合的である。

トカラ列島周辺では、東シナ海を北上してくる黒潮の流路が蛇行する。奄美大島近傍では沖縄トラフ側(南西諸島西側)にあった流軸が、屋久島近傍で蛇行し、太平洋側(南西諸島東側)に移動する。その中間点に位置するトカラ列島周辺海域では流軸の移動とともに、海洋表層ではトカラ列島を横断する北西から南東向きの流れが卓越することが海洋観測により知られている(日本海洋データセンター, 2021; 気象庁, 2021)。リップルやサンドウェーブから推測される流向もおおむね、海域の北



第11図 GB21-2及びGB21-3航海でサンゴ類が採集されたサイト及び海底写真でサンゴ類が確認されたサイト。海底地形は岸本(2000)に基づく。

Fig. 11 Map of the survey area of GB21-2 and GB21-3 cruise with localities where corals were collected or identified on seafloor photos. Sea-bottom topography is based on Kishimoto (2000).

西側で北向きを示していた流れが、南東側に通過する際に流向を転じて東向きから南東向きの流れとなる傾向を示しており、こうした観測事実と整合的である。

リップルの形状から推定される流向に見られるばらつきは、底層流の流向が大局的には黒潮の流路の影響を受けつつも、島嶼部や海丘などの海底地形に制約されて、局地的には複雑に変化していることを示唆する。このような傾向は鈴木ほか(2022)において示した宝島周辺海域で見られる傾向と同様である。ただし、トカラ海底谷、沖縄トラフ等水深1000 m級の海底地形を含む宝島周辺海域と比べると、諏訪之瀬島から口永良部島にかけての海

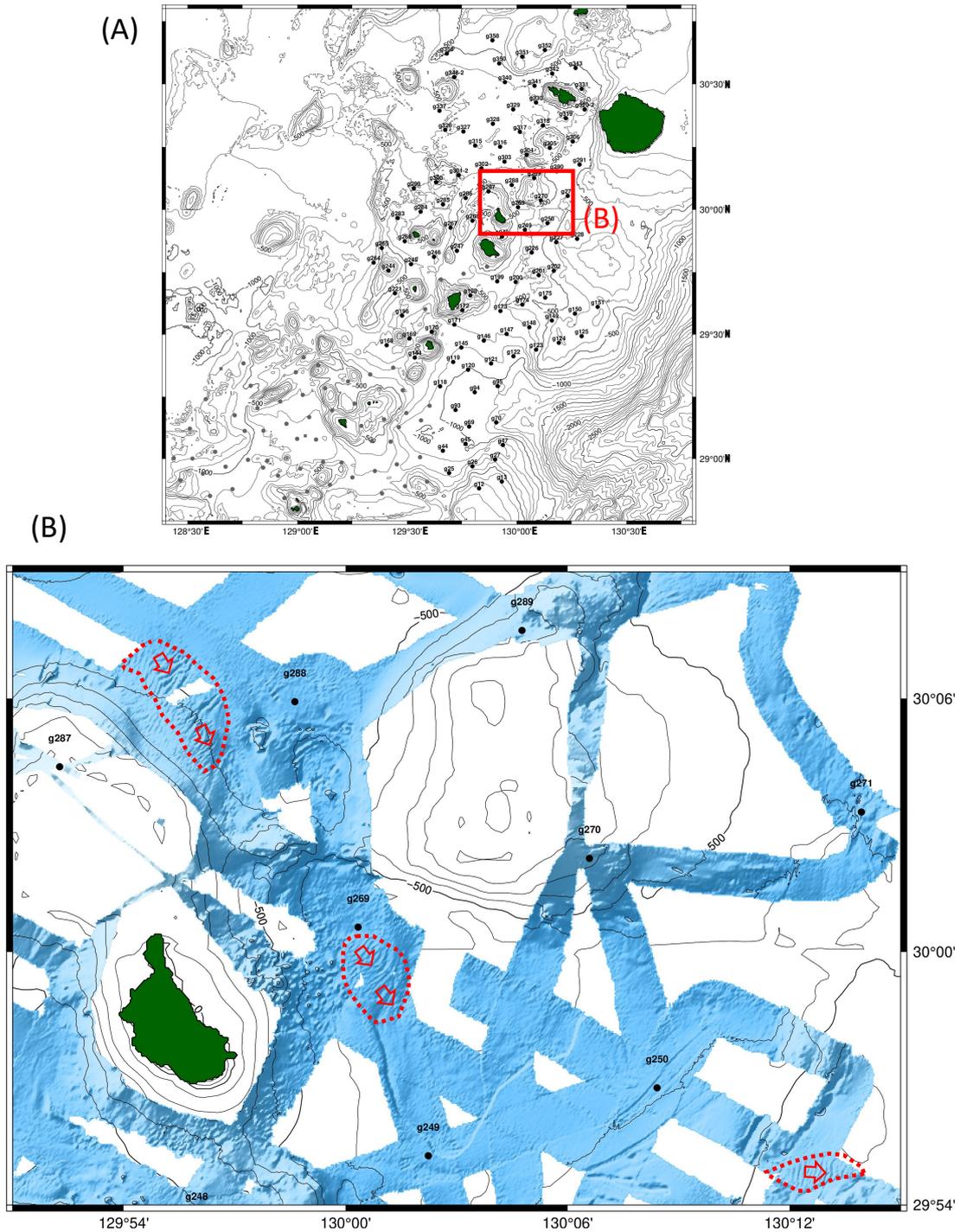
域は比較的水深が浅い。この結果として、リップルやサンドウェーブなどを形成する流速・粒径範囲を取る領域が宝島周辺海域よりも広い領域にわたると考えられる。

コケムシ類や有孔虫保存状態の分析結果も、本海域における黒潮の力学的影響を示唆する。鈴木ほか(2022)に述べたとおり、本海域の多くの地点においてコケムシ骨格が含まれないことの要因として、①底層の水流速度が大きい、または②堆積速度が大きい(堆積物供給量が多い)といったことが挙げられる。これは、固着性・濾過食のコケムシ類は水流が速すぎると摂食ができず、堆積物に埋没すると生存不可となることによる。コケムシ類

第4表 GB21-2及びGB21-3航海で採集されたイシサンゴ類のリスト.

Table 4 List of coral species with sampling sites

ORDER	
Family	
Species	Collection locality (St.)
SCLERACTINIA	
Fungiacyathidae	
<i>Fungiacyathus (Fungiacyathus) paliferus</i> (Alcock, 1902)	g268, g351
<i>Fungiacyathus (Bathyactis) turbinolioides</i> Cairns, 1989	g200, g226, g249, g266, g267, g283, g290, g291
<i>Fungiacyathus</i> sp.	g221, g245, g266, g340
Micrabaciidae	
<i>Letepsammia formosissima</i> ? (Moseley, 1876)	g268
<i>Letepsammia</i> sp.	g226, g247, g269, g351
<i>Stephanophyllia fungulus</i> Alcock, 1902	g268, g270
Anthemiphylliidae	
<i>Anthemiphyllia spinifera</i> ? (Alcock, 1902)	g26
<i>Anthemiphyllia</i> sp.	g304
Oculinidae	
<i>Madrepora oculata</i> Linnaeus, 1758	g286, g304
<i>Madrepora</i> sp.	g356
Deltocyathidae	
<i>Deltocyathus</i> sp.	g45, g286, g288, g221, g226, g246, g264, g267, g269, g283, g284, g304, g356
Caryophylliidae	
<i>Caryophyllia (Caryophyllia)</i> sp.	g247, g304
<i>Conotrochus</i> sp.	g221
<i>Premocyathus dentiformis</i> (Alcock, 1902)	g351
<i>Goniocorella dumosa</i> (Alcock, 1902)	g247, g248
<i>Goniocorella</i> sp.	g267
<i>Thalamophyllia tenuescens</i> (Gardiner, 1899)	g247
<i>Trochocyathus (Trochocyathus) cepulla</i> ? Cairns, 1995	g267
Turbinoliidae	
<i>Deltocyathoides</i> sp.	g226
<i>Idiotrochus kikutii</i> (Yabe & Eguchi, 1941)	g270
<i>Peponocyathus folliculus</i> (Pourtalès, 1868)	g286, g269, g304, g351
<i>Peponocyathus</i> sp.	g226
<i>Thrypticotrochus petterdi</i> (Dennant, 1906)	g267
Stenocyathidae	
<i>Stenocyathus vermiformis</i> (Pourtalès, 1868)	g268, g247, g304, g356
<i>Stenocyathus</i> ? sp.	g221
Guyniidae	
<i>Guynia annulata</i> Duncan, 1872	g351
Flabellidae	
<i>Flabellum (Flabellum)</i> sp.	g267
<i>Flabellum (Ulocyathus)</i> sp.	g270
<i>Truncatoflabellum phoenix</i> Cairns, 1995	g351
<i>Truncatoflabellum</i> sp.	g270
Dendrophylliidae	
<i>Balanophyllia</i> sp.	g148, g351
<i>Dendrophyllia</i> sp.	g288
<i>Enallopsammia</i> sp.	g148, g267, g269, g356
<i>Endopachys grayi</i> Milne Edwards & Haime, 1848	g148, g270
<i>Eguchipsammia</i> sp.	g304



第12図 (A) GB21-2及びGB21-3航海の実施範囲におけるグラブ試料採取地点図。地点番号のない灰色の点はGB21-1航海におけるグラブ試料(丸)およびコア試料(四角)採取点を示す。(B)口之島周辺でマルチビーム音響測深機により取得された海底地形陰影図(高下ほか, 2023)。背景の海底地形は岸本(2000)に基づく。口之島北方、北東方、東方の赤い破線で囲まれた領域にサンドウェーブの発達が見られる。中抜き赤矢印はサンドウェーブの形状から推定される流向を示す。

Fig. 12 (A) Sampling points of K-grab on GB21-2 and GB21-3 cruise. Gray circles and squares indicate sampling points of K-grab and gravity corer on GB21-1 cruise. (B) Seafloor shaded topographic map acquired by a multibeam echo sounder around Kuchinoshima Island (Koge *et al.*, 2023). Background contour is based on Kishimoto (2000). On the north, northeast, and east off Kuchinoshima Island, surrounded by the red dotted lines, Sand waves are prominent. Red open arrows indicate flow directions estimated by the form of sand waves.

の検鏡分析を行ったサイトg228及びg304のようにコケムシ骨格を含むものの保存状態が悪い地点では、強い水流によって広い範囲から長距離・長期間にわたって掃き寄せられたことで、変質(変色)・摩耗を被ったものと推定される。

本研究においてランク分けした浮遊性有孔虫の保存状態のうち、サイトg168及びg221にのみ稀に産出したランクDの個体は、ランクA-Cの個体と質的に全く異なり、おそらく強い続成を被った特定の層準から洗い出された異地性のもと考えられる。また、ランクCの個体も状態の悪さから堆積後の再移動に関連する可能性があるが、ランクBとの中間的な個体も存在する。殻表面の着色の原因として、堆積物-水境界あるいは堆積物浅部の酸化層内部における酸化鉄などの付着が推定されるが、その時間スケールについては明らかではない。これに対して、例えば本研究のランクA-Cなど保存状態ごとに浮遊性有孔虫殻に対して放射性炭素年代測定などを行って、堆積物表層における浮遊性有孔虫殻の滞留時間と保存状態との関係のある程度定量的に見積もることにより、同地点の堆積プロセスに対しても制約を与える情報として活用できるようになることが期待される。

4.3 底質分布の制御要因3: 黒潮の生物学的影響

前節で述べた通り、黒潮は主に底層流を通して底質の粒度・粒子組成や滞留時間に力学的影響を与えることが示唆されるが、この他に、サンゴ生体・遺骸の群集解析及び、浮遊性有孔虫の群集解析およびサイズ・保存状態の検討から、黒潮の影響が生物学的な観点でも底質に影響を与えている可能性が示唆された。

サンゴ類の分布は、種子・屋久海脚、悪石島・諏訪之瀬島・中之島・口之島から口永良部島に連なる浅海部に偏在していた(第11図)。また、これらの地形の高まり(浅海部ないし島嶼部)を繋ぐ鞍部には、海底写真上で生体サンゴが確認できた事例は少ないものの、サンゴ遺骸が多く分布していた(例えば、トカラ列島と種子・屋久海脚に挟まれた谷状地形など)。一般的にサンゴ類は泥などの細粒な堆積物への埋没に弱い(Weber *et al.*, 2012)。当海域においては、黒潮の流路上に存在する島や岩礁・海山など急峻な地形の200 m以深では、地形性の強い乱流混合や湧昇が生じ、これによる表層への多量の栄養塩供給が行われている(Hasegawa *et al.*, 2021)。これらの強い乱流は、当海域の地形的な高まりの浅海部において細粒堆積物の堆積量を減少させると同時に露岩域への餌の供給に寄与すると考えられる。さらには、より深い地形的鞍部への粗粒堆積物や骨格生物遺骸の輸送にも大きな影響を与えていると考えられる。その一方で、500 m以深の領域が広がる、例えば口永良部島西方の海域にはサンゴ遺骸または生体は疎らにしか確認されなかった。このようなサンゴ類の産出数の減少は、水深の増加に伴う細

粒堆積物の堆積量の増加など、何らかの環境変化が影響を与えていると考えられ、今後検討していく必要がある。

本研究における浮遊性有孔虫サイズ分布の検討結果からは、背弧側に比べて前弧側の地点、そして南に比べて北の地点に大きいサイズの浮遊性有孔虫が産出する傾向が示唆される。今後検討地点数を増やし、統計解析によりこのような傾向を裏付ける必要があるが、これらは大局的に東西方向及び南北方向の環境勾配を反映している可能性がある。g306を除く検討地点における浮遊性有孔虫の個体群は極細粒砂-細粒砂サイズに分布の極大を示す点において類似している一方、g306地点の個体群のみが中粒砂サイズに幅広の極大をもつ異なるサイズ分布を示す。このことはg306とそれ以外の地点における浮遊性有孔虫殻の堆積作用が異なるメカニズムに駆動されていることを示唆する。径125 μm 以上の浮遊性有孔虫群集の検討結果から、g306およびg340では*Pulleniatina obliquiloculata*や*Neogloboquadrina dutertrei*が共に他地点より多く産出しているが、これは南西諸島周辺海域において黒潮水塊に対応する群集の特徴とされている(Ujiie and Ujiie 2000)。このような水塊構造とそれに伴う生物学的要素としての群集構造の違いが、研究海域における生物炭酸塩粒子の堆積作用と、その結果としての堆積物特性のバリエーションに影響する要因のひとつとして考えられる。

5. まとめ

GB21-2及びGB21-3航海では海洋地質図作成を目的としてトカラ列島周辺海域において102地点での表層採泥を実施した。本海域において泥質堆積物はそのほとんどが水深800 mより深い地点で採取された。泥質堆積物の多くには生痕が発達している。

礫質堆積物、露頭は必ずしも浅い水深のみに分布するわけではなく、島嶼部や海脚の周辺、海域に点在する地形的高まりの付近に分布しており、これらの地形を形作る山体や火山起源物質が粗粒物質の供給源ではないかと考えられる。本海域には未報告の海底火山地形が多数存在することが知られており、主にこれらに付随して局所的には露頭や粗粒物質の堆積場が多数存在すると思われる。

砂質堆積物には、水深479~923 mの地点でカレントリップルやサンドウェーブなどのベッドフォームが見られた。これらの構造は本海域において蛇行する黒潮に伴う底層流の影響により生じている可能性が高い。また、黒潮が蛇行して島嶼部を通過する際の流向・流速の変化に応じて場所ごとに堆積、輸送、侵食の各プロセスが卓越し、多様な底質を形成している。諏訪之瀬島周辺から口永良部島周辺海域では輸送による特徴的なベッドフォームが卓越する範囲が、宝島周辺海域と比べて広い。コケムシ、浮遊性有孔虫などの分析結果によれば、本海域において黒潮は、底層流を通じた力学的な影響の他に、

個体サイズのばらつきなど生物学的な観点でも影響を与えている可能性が高い。

本調査で対象としたトカラ列島周辺海域に加えて、2022年度はさらに水深が浅い種子・屋久海脚の中央部から東部、さらに水深が深いトカラ列島西方海域でも今後調査を実施する予定であり、黒潮の蛇行に伴う堆積物分布のより広域的な特徴を解明できると期待される。

謝辞: 石塚 治氏, 針金由美子氏, 山本浩万氏, 齋藤直輝氏, 池内絵里氏, 菅澤陽奈氏, 舘 宏輔氏, 中野太賀氏, 宮坂慎太郎氏, 若公良太氏には良質な海底堆積物試料の採取にあたり多大なご協力をいただいた。東海大学の玉井隆章技術員, 産業技術総合研究所の井上卓彦調査団長, 石野沙季氏, 高下裕章氏, 三澤文慶氏ほか乗船研究員の方々には採泥点選定やシップタイム調整, コアリング作業など様々な面でご協力いただき, 採泥調査を効率的に遂行することができた。東海大学坂本研究室の乗船学生の方々には観測記録や採泥作業の実施において多くの助力を頂いた。東海大学望星丸の上河内信義船長をはじめとする乗組員の皆様, 航海工学科航海学専攻の実習生の方々には調査船の運航及び採泥器投入・揚収をはじめとした甲板作業を安全かつ効率的に実施して頂いた。堆積物試料のX線CT像撮影及びデータ解析にあたり横井久美氏にご助力をいただいた。以上の皆様に心より御礼申し上げます。

文 献

- 下司信夫・石塚 治 (2007) 琉球弧の火山活動. 地質ニュース, no. 634, 6-9.
- Grigg, R. W. (1972) Orientation and Growth Form of Sea Fans. *Limnology and Oceanography*, **17**, 185-192. doi: 10.4319/lo.1972.17.2.0185
- Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., Yoshie, N., Nakamura, H., Nishina, A., Kobari, T., Nagai, T. and Guo, X. (2021) How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL092063. doi:10.1029/2020GL092063
- 池原 研 (2014) 種子島付近表層堆積図及び説明書. 海洋地質図, no. 84 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 石野沙季・三澤文慶・有元 純・井上卓彦 (2022) トカラ列島南西沖におけるGB21-1 航海の反射法音波探査概要. 地質調査研究報告, **73**, 219-234.
- 板木拓也 (2015) 沖縄島北部周辺海域表層堆積図. 海洋地質図, no. 85 (DVD), 産総研地質調査総合センター.
- 板木拓也 (2018a) 沖縄島南部周辺海域表層堆積図. 海洋地質図, no. 90 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 板木拓也 (2018b) 超音波高度計によるK-グラフ採泥器の誤作動防止システム. 板木拓也(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 143-146.
- 板木拓也 (2022) 久米島周辺海域表層堆積図. 久米島周辺海域海洋地質図, 海洋地質図, no. 92, 産総研地質調査総合センター.
- 板木拓也・鈴木克明・池内絵里・及川一真・片山 肇・飯塚 睦・鈴木 淳・高柳栄子 (2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境. 地質調査研究報告, **73**, 301-311.
- Kim, H.-C., Yamaguchi, H., Yoo, S., Zhu, J., Okamura, K., Kiyomoto, Y., Tanaka, K., Kim, S.-W., Park, T., Oh, I. S. and Ishizaka, J. (2009) Distribution of Changjiang Diluted Water detected by satellite chlorophyll-a and its interannual variation during 1998-2007. *Journal of Oceanography*, **65**, 129-135. doi:10.1007/s10872-009-0013-0
- 木村政昭・松本 剛・中村俊夫・西田史朗・小野朋典・青木美澄 (1993) トカラ海峡の潜水調査: 沖縄トラフ北部東縁のテクトニクス. しんかいシンポジウム報告書, no. 9, 283-307.
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).
- 気象庁 (2021) 海流に関する診断表、データ 日別海流. https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/current_HQ.html (閲覧日: 2023年3月23日)
- 高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) GB21-1 及びGK20 航海(トカラ列島周辺海域)における海底地形観測. 地質調査研究報告, **73**, 197-209.
- 高下裕章・佐藤太一・鈴木克明 (2023) GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域における海底地形観測の概要. 地質調査研究報告, **74**, 193-202.
- Komaki, S. (2021) Widespread Misperception about a Major East Asian biogeographic boundary exposed through bibliographic survey and biogeographic meta-analysis. *Journal of Biogeography*, **48**, 2375-2386. doi:10.1111/jbi.14210
- Lesser, M. P., Slattery, M. and Mobley, C. D. (2018) Biodiversity and Functional Ecology of Mesophotic Coral Reefs. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **49**, 49-71. doi:10.1146/annurev-ecolsys-110617-062423
- Matsumoto, T., Kimura, M., Nakamura, A. and Aoki, M. (1996) Studies of land bridges and the migration of men and other animals along them. Detailed bathymetric features of Tokara and Kerama gaps in the Ryukyu Arc. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **105**, 286-96. doi:10.5026/jgeography.105.3_286

- Minami, H., Oikawa, M. and Ito, K. (2014) Newly discovered submarine volcano near the Tokara islands. *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches* (海洋情報部研究報告), **51**, 145–151.
- Minami, H., Ohara, Y. and Tendo H. (2021) Volcanic and tectonic features of Shirahama Bank in the northern Ryukyu Arc: Implications for cross-arc volcanism controlled by arc-parallel extension. *Marine Geology*, **441**, 106623. doi:10.1016/j.margeo.2021.106623
- Morard, R., Füllberg, A., Brummer, G-J A., Greco, M., Jonkers, L., Wizemann, A., Weiner, A. K. M., Darling, K., Siccha, M., Ledevin, R., Kitazato, H., de Garidel-Thoron, T., de Vargas C. and Kucera, M. (2019) Genetic and morphological divergence in the warm-water planktonic foraminifera genus *Globigerinoides*. *PLoS One*, **14**, e0225246. doi: 10.1371/journal.pone.0225246
- Motokawa, M. and Kajihara, H., eds. (2017) *Species Diversity of Animals in Japan, Diversity and Commonality in Animals*. Springer Tokyo, Tokyo, 721p.
- 日本海洋データセンター (2021) 海流観測データ. https://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html (閲覧日: 2023年3月23日)
- Ota, H. (1998) Geographic patterns of endemism and speciation in amphibians and reptiles of the Ryukyu Archipelago, Japan, with special reference to their paleogeographical implications. *Population Ecology*, **40**, 189–204. doi: 10.1007/BF02763404
- 坂井陽一・門田 立・木寺哲明・相良恒太郎・柴田淳也・清水則雄・武山智博・藤田 治・橋本博明・具島健二 (2005) トカラ列島北部に位置する口之島, 中之島の浅海魚類相. *生物圏科学: 広島大学大学院生物圏科学研究科紀要*, **44**, 1–13.
- Schiebel, R. (2002) Planktic foraminiferal sedimentation and the marine calcite budget. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**, 3-1-3–21. doi: 10.1029/2001GB001459
- Schiebel, R., and Hemleben, C. (2017) *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*. Springer Berlin, Heidelberg, 358p.
- Stow, D.A.V., Hernández-Molina, F. J., Llave, E., Sayago-Gil, M., Díaz del Río, V. and Branson, A. (2009) Bedform-velocity matrix: The estimation of bottom current velocity from bedform observations. *Geology*, **37**, 327–330. doi:10.1130/G25259A.1
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・徳田悠希・千徳明日香 (2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域の底質分布とその制御要因. *地質調査研究報告*, **73**, 275–299.
- Tsutsumi, E., Matsuno, T., Lien, R. C., Nakamura, H., Senjyu, T. and Guo, X. (2017) Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 7082–7094. doi: 10.1002/2017JC013049
- Ujiie, Y. and Ujiie, H. (2000) Distribution and oceanographic relationships of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, northwest pacific ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, **30**, 336–360. doi: 10.2113/0300336
- Weber, M., de Beer, D., Lott, C., Polerecky, L., Kohls, K., Raed, M. M. A., Ferdelman, T. G. and Fabricius, K. E. (2012) Mechanisms of damage to corals exposed to sedimentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, E1558-E1567. doi:10.1073/pnas.1100715109

(受付: 2022年10月31日; 受理: 2023年6月26日)

トカラ列島周辺海域 (GB21-2 および 21-3 航海) で採取された海底堆積物の化学組成

久保田 蘭^{1,*}・太田 充恒¹・立花 好子¹・板木 拓也¹・
片山 肇¹・鈴木 克明¹・間中 光雄¹

KUBOTA Ran, OHTA Atsuyuki, TACHIBANA Yoshiko, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, SUZUKI Yoshiaki and MANAKA Mitsuo (2023) Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 Cruise), Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 287-300, 4 figs, 5 tables.

Abstract: The concentrations of 24 elements in the 90 marine surface sediment samples collected from around Tokara Islands, were determined, and the characteristics of the chemical composition and concentration distribution were investigated. The sediments in this sea area are considered to be derived from three sources: bioclasts rich in CaO and Sr, mafic clastic materials rich in T-Fe₂O₃ and MgO, and felsic clastic materials rich in K₂O. The contribution of the three sources differs depending on the sampling area. The analysis results of the relationship between the concentrations of each element suggests that the contribution of mafic clastic particles is particularly large in the off eastern Suwanose Island (Central zone of Tokara Islands). Samples having high Cu concentrations are distributed mainly in the Central zone of Tokara Islands, although they are not always enriched in T-Fe₂O₃ and TiO₂ concentrations. The high Cu concentration samples in Southern zone of Tokara Islands would be influenced by the early diagenesis process because they are also abundant in MnO concentrations.

Keywords: simultaneous multi-element analysis, clastic material, bioclast, mafic rock, felsic rock, early diagenesis, accumulation of heavy metal element

要 旨

トカラ列島周辺海域から採取した海底表層堆積物90試料について、主成分元素および微量元素24元素を定量した結果を示し、化学組成の特徴や分布特性について検討を行った。本調査海域の海底堆積物は、CaO, Srに富む生物遺骸粒子、T-Fe₂O₃やMgOなどに富む苦鉄質火山岩類由来の碎屑性粒子、K₂Oなどに富む珪長質火山岩類由来の碎屑性粒子の3つの起源物質に由来するものと考えられ、それらの寄与率には地域性がある。各元素濃度間の相関関係から、特に諏訪之瀬島の東方沖(トカラ列島中部海域)では苦鉄質火山岩由来の碎屑性粒子の寄与が大きいことが示唆された。また、Cuを高濃度含む試料がトカラ列島中部海域に認められるが、T-Fe₂O₃やTiO₂濃度は必ずしも高くない。一方で、トカラ列島南部海域のCu高濃度試料はMnO濃度が高いことから、Cu濃集の原因としては初期続成作用の影響が考えられた。

1. はじめに

筆者らは、「本邦沿岸海域地質地球化学図」の作成に関する基礎的研究を継続しており、平成20年度より沖縄本島周辺海域の海底表層堆積物の化学分析を行い、その結果を公表した(寺島ほか, 2009; 太田ほか, 2010, 2011, 2013, 2016, 2017, 2019; 久保田, 2019, 2022)。GB21-2および21-3航海では、トカラ列島周辺海域の105地点で木下式グラブ採泥器(K-グラブ採泥器)により海底表層堆積物が採取され、このうち90地点の試料(第1図)について53元素の化学分析を行った。本概要報告では、GB21-2および21-3航海で採取された海洋堆積物中の、主成分元素(Na₂O, MgO, Al₂O₃, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Total(T)-Fe₂O₃ (全鉄量をFe₂O₃に換算したもの))といくつかの微量元素(Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Mo, Ba, Pb)を分析した結果と化学組成の特徴について報告する。

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)

* Corresponding author: KUBOTA, R., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ran-kubota@aist.go.jp

2. 試料処理及び分析方法

K-グラフ採泥器で採取された試料のうち、表層部0-3 cmを適量分取した。礫質の堆積物試料については、可能な限り付随する細粒の堆積物を分取した。試料を室温で乾燥した後、石川式めくろ粉砕機で約80メッシュ(約180 μm)以下に粉砕して分析試料とした。粉砕した試料0.1 gを硝酸3 ml, 過塩素酸2 ml, フッ化水素酸5 mlの混酸を用いて、120°Cで2時間加熱して分解後、さらに145°Cで1時間加熱分解を行った。その後、200°C以下で蒸発乾固した後、7M硝酸5 mlを加えて加温溶解し、超純水で希釈して試料溶液(100 ml)とした。各種成分の測定では、主成分元素(Na_2O , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , $\text{Total(T-Fe}_2\text{O}_3)$)とSr, BaをICP-AES (Thermo Fisher Science iCap-6300)で、そのほかの微量元素(Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Mo, Pb)はICP質量分析計(Agilent 7900)を用いて測定した。分析結果を第1表および第2表にまとめた。今回は海塩の除去を行っていないため、海塩の影響を最も受ける Na_2O は参考値として示している。

3. 結果と考察

3.1 本海域における表層堆積物の元素濃度の特徴

第1表に主成分元素、第2表に微量元素の分析結果をまとめている。GB21-2および21-3航海の試料採取地点は、GB21-1およびGK15-2航海の範囲と近接しており、10個余りの島嶼からなるトカラ列島のうち口之島、中之島、臥蛇島、平島、諏訪之瀬島、悪石島の周辺、および口永良部島、屋久島周辺の海域である(鈴木ほか, 2023)。一部の試料は、粒度や採取深度にかかわらず、炭酸塩骨格や殻から構成される生物遺骸破片を含む。元素濃度は CaO (5.92-47.7 wt%), $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ (0.279-22.6 wt%), Al_2O_3 (0.227-16.4 wt%)が高く、これに続く MgO (1.17-7.59 wt%), Na_2O (1.00-5.29 wt%)が主な構成元素である。微量元素で高い濃度範囲を示すのは、Sr (251-3,830 mg/kg), V (9.82-679 mg/kg), Ba (10.6-380 mg/kg), Zn (6.94-225 mg/kg)などで、他の微量元素は100 mg/kg以下であることが多い。沖縄周辺海域の海底表層堆積物の主成分は生物起源の炭酸塩鉱物であることが多く、過去の沖縄周辺および奄美大島周辺海域試料の分析結果(寺島ほか, 2009; 太田ほか, 2010, 2011, 2013, 2016, 2017; 久保田ほか, 2019)においても、ほとんどの試料で CaO 含有量が最も多かった。しかしながら本海域においては、30 wt%以上の CaO 濃度を示したのは8試料(20 wt%以上の濃度を示したのは24試料)と少なく、 CaO 濃度12 wt%以下の39試料については CaO 濃度より Al_2O_3 もしくは $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ 濃度が高かった(第1表)。トカラ列島周辺海域(GB21-1航海)試料(久保田ほか, 2022)と同様、 $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$, MgO 濃度が高く相対的に CaO が低いという特徴

があり、生物遺骸粒子の寄与が少ないことが示唆される。また、船上記載データによると、今回取り扱った90試料のうちg265, g289, g300は Mn 酸化物に被覆された礫を含む試料とあるが、3試料とも MnO 濃度は0.2 wt%前後と高くはない。g265, g289は $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ 濃度がそれぞれ12.0 wt%, 17.9 wt%と高く、鉄マンガン酸化物の被覆の影響を受けている可能性がある。しかしZnを除くと鉄マンガン酸化物に多く含まれるCo, Ni, Cu, Pbの濃度は低い。また、g300はPb濃度が32.8 mg/kgと最大値を示すものの、 $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ 濃度は7.26 wt%と低い。これらのことから、 Mn 酸化物の被覆は礫に対してのみであり、分取した中粒砂堆積物中には含まれていないと考えられる。

第3表には調査海域を4つに区分した海域別の元素濃度平均値を示した。海域区分はg302, 303, g315-g358を口永良部島周辺海域, g196, g221-g300, g304-g306をトカラ列島北部海域, g118-g175, g198-g202をトカラ列島中部海域, g12-g95をトカラ列島南部海域とした(第1図)。口永良部島周辺海域試料のほとんどは水深500 m-700 mで採取され、 K_2O , Na_2O , Li, Be, Rb, Baの濃度が高い。この海域の北側に存在する鬼界カルデラから放出された火山性噴出物の影響は、今回確認できなかった。北部海域では浅海部を中心に CaO やSrの濃度が高く、表層堆積物に占める生物遺骸粒子が多いこと(海水温度や海流などの関係で他海域より生物生産が卓越するため)を反映していると考えられる。 MgO は基本的には CaO の濃集に伴って高濃度になりうると考えられるが、北部海域で特に高濃度は得られなかった。中部海域試料は、 Al_2O_3 , MgO , Sc, Cr, Co, Ni, Cuの濃度が高い。南部海域のg12とg13(奄美大島により近い)は浅瀬で採取され CaO , MgO , Srの濃度が高いのに対し、北側に位置するg47, g69, g70, g93, g94は1,000m以深で採取され MnO 濃度が0.2-0.3 wt%と高い。これら MnO 濃度が高い試料に関しては、初期続成作用による濃集が考えられるがGB21-1航海試料に比べると MnO 濃度が低いため(久保田ほか, 2022)、濃集作用が働いているとしても初期段階であると推測される。

次に、船上記載データを基にして、全分析試料を礫、粗粒砂、中粒砂、細粒砂、シルト-粘土質の粒度別に区分し、それぞれ各元素濃度の中央値を算出して第4表に示した。地殻起源と考えられる Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , MnO , Ni, Mo, Ba, Pbといった成分が粒度の細粒化に伴い高濃度になる。一方で、生物遺骸粒子に由来する CaO やSrの濃度は、逆に細粒化に伴って濃度が低くなる傾向がある。粗粒-細粒砂の区分では CaO 濃度が最も高いが、礫およびシルト-粘土質では Al_2O_3 が最も高い濃度を示すことから、本海域では生物遺骸粒子(炭酸塩鉱物)のみならず、採取地点近くの島々から供給される碎屑性粒子の寄与が大きい可能性が高い。

トカラ列島周辺海域で採取された海底表層堆積物の化学組成 (久保田ほか)

第1表 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物の主成分元素の分析結果.

Table 1 Major element composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 cruises).

Location no.	W. D. m	Na ₂ O wt%	MgO wt%	Al ₂ O ₃ wt%	P ₂ O ₅ wt%	K ₂ O wt%	CaO wt%	TiO ₂ wt%	MnO wt%	T-Fe ₂ O ₃ wt%
g12	244	1.00	5.67	2.68	0.119	0.158	39.6	0.173	0.071	3.01
g13	406	1.70	5.69	6.50	0.112	0.285	28.8	0.402	0.147	6.30
g25	839	3.76	1.24	10.8	0.132	1.21	16.2	0.579	0.131	4.49
g26	681	2.29	3.02	7.25	0.151	0.459	27.7	1.08	0.146	7.83
g44	940	3.40	2.04	12.6	0.136	1.05	15.0	0.569	0.134	5.18
g45	999	3.26	1.72	12.3	0.121	1.06	17.3	0.520	0.108	5.45
g47	793	2.16	3.44	8.21	0.301	0.471	17.5	3.35	0.306	22.6
g69	1025	3.44	2.04	11.4	0.130	1.59	15.5	0.479	0.209	4.62
g70	1201	3.72	2.51	12.9	0.137	1.70	10.8	0.544	0.257	5.24
g93	1053	3.73	2.20	11.7	0.151	1.80	12.2	0.505	0.319	4.79
g94	1064	4.00	2.55	12.6	0.158	1.90	10.4	0.526	0.315	5.40
g95	1051	3.20	3.48	13.5	0.125	1.55	10.5	0.581	0.139	6.38
g118	942	3.53	2.16	11.2	0.126	1.45	15.1	0.468	0.184	4.50
g119	933	3.61	2.63	12.8	0.135	1.67	10.7	0.549	0.097	5.67
g120	1012	4.16	2.67	12.7	0.157	1.95	10.3	0.542	0.089	5.50
g121	925	3.85	2.85	12.7	0.156	1.71	9.64	0.561	0.128	5.94
g122	968	3.01	5.13	14.5	0.091	1.04	9.96	0.593	0.158	8.21
g123	605	2.66	6.04	13.6	0.130	0.784	13.1	0.828	0.202	10.1
g125	327	1.62	7.20	8.77	0.074	0.322	23.3	0.288	0.154	6.85
g144	652	5.29	1.23	10.9	0.106	2.02	5.92	0.413	0.089	2.79
g145	915	3.70	2.95	13.3	0.139	1.64	10.1	0.561	0.200	5.93
g146	789	3.69	3.02	13.2	0.131	1.55	9.66	0.564	0.173	6.01
g147	801	3.10	4.66	14.1	0.106	1.20	9.23	0.593	0.145	7.51
g148	671	2.74	5.99	16.4	0.081	0.765	11.2	0.515	0.153	8.03
g150	423	2.44	7.59	12.8	0.103	0.523	13.8	0.531	0.193	9.37
g168	861	3.40	1.78	9.59	0.119	1.49	16.6	0.398	0.285	3.68
g169	923	3.27	4.02	14.2	0.093	1.19	8.14	0.584	0.198	7.06
g171	799	3.05	5.23	14.6	0.095	1.11	8.96	0.611	0.169	8.21
g173	727	3.08	5.14	14.9	0.103	1.18	9.45	0.606	0.155	7.98
g174	525	2.64	6.29	13.8	0.101	0.737	11.2	0.772	0.204	10.7
g175	554	3.29	3.68	13.6	0.102	1.23	11.8	0.487	0.135	6.07
g196	780	3.42	2.43	12.2	0.115	1.45	13.0	0.488	0.167	4.93
g198	507	3.21	4.18	15.0	0.111	1.21	8.33	0.640	0.142	7.45
g199	669	3.35	3.98	14.2	0.106	1.26	10.4	0.541	0.123	6.63
g200	601	4.04	2.33	12.4	0.115	1.63	10.7	0.484	0.149	4.63
g201	736	2.70	1.59	7.84	0.094	1.28	24.6	0.284	0.091	2.90
g202	519	2.59	5.77	12.1	0.122	0.736	11.9	1.14	0.216	14.0
g221	659	2.07	4.62	7.41	0.157	0.487	25.9	0.727	0.178	7.26
g226	569	2.19	5.43	10.0	0.106	0.312	25.0	0.358	0.147	6.04
g228	346	3.43	2.37	13.4	0.097	1.21	14.2	0.444	0.110	4.72
g244	136	1.16	3.93	0.544	0.100	0.083	45.2	0.036	0.012	0.455
g245	560	1.72	3.11	3.62	0.099	0.351	39.9	0.152	0.045	1.80
g246	604	3.16	1.90	10.4	0.116	1.38	18.5	0.408	0.113	3.88
g247	582	2.97	4.51	13.6	0.114	0.790	12.6	0.691	0.192	9.30
g248	520	2.98	3.96	13.1	0.108	0.984	7.56	1.48	0.200	16.6
g249	624	3.72	2.34	13.2	0.103	1.52	10.2	0.531	0.123	5.26
g250	599	3.27	1.23	10.5	0.098	1.64	16.2	0.382	0.073	2.75

第1表 続き.
Table 1 Continued.

Location no.	W. D. m	Na ₂ O wt%	MgO wt%	Al ₂ O ₃ wt%	P ₂ O ₅ wt%	K ₂ O wt%	CaO wt%	TiO ₂ wt%	MnO wt%	T-Fe ₂ O ₃ wt%
g264	651	2.51	1.93	8.66	0.113	1.05	27.1	0.387	0.126	4.25
g265	478	2.05	3.32	7.85	0.206	0.739	21.2	1.50	0.185	12.0
g266	665	2.81	3.18	11.6	0.140	1.13	16.3	0.746	0.168	7.98
g267	591	3.04	2.66	13.2	0.124	0.778	19.5	0.367	0.119	4.94
g268	450	2.63	3.13	8.54	0.111	0.676	26.4	0.496	0.098	5.63
g269	644	2.63	2.87	13.0	0.085	1.71	14.4	0.440	0.102	4.88
g270	268	1.18	2.99	1.96	0.092	0.289	41.7	0.583	0.058	4.96
g283	628	2.89	1.17	4.89	0.091	0.821	34.3	0.193	0.134	2.20
g284	594	3.10	1.52	9.11	0.118	1.28	23.4	0.359	0.127	3.35
g285	643	3.69	1.17	8.32	0.100	1.59	19.9	0.301	0.162	2.65
g286	479	2.59	2.78	9.99	0.133	0.739	24.9	0.506	0.123	6.21
g287	60.0	1.25	2.75	0.227	0.069	0.094	47.7	0.028	0.008	0.28
g288	584	2.81	5.91	12.3	0.138	0.714	9.60	0.804	0.257	10.6
g289	352	1.76	4.08	6.13	0.269	0.341	25.5	1.70	0.228	17.9
g290	570	3.45	3.31	11.8	0.173	1.21	11.6	1.02	0.161	7.32
g291	563	3.81	2.43	12.4	0.152	1.76	6.84	0.729	0.117	5.30
g299	584	2.85	2.16	9.88	0.148	1.20	21.3	0.516	0.130	5.09
g300	644	2.72	2.90	10.0	0.159	0.976	23.7	0.613	0.215	7.26
g302	606	4.35	1.51	9.93	0.122	1.76	16.9	0.403	0.114	3.27
g303	619	3.95	1.39	10.6	0.127	1.97	14.5	0.433	0.128	3.35
g304	607	2.97	1.73	5.89	0.125	1.15	30.7	0.244	0.084	2.32
g305	282	1.49	2.16	1.25	0.104	0.218	45.9	0.089	0.104	1.02
g306	595	4.02	2.25	12.7	0.150	1.67	7.68	0.806	0.126	5.80
g315	636	3.71	1.62	11.2	0.131	1.61	14.8	0.525	0.117	4.10
g316	618	3.47	1.21	9.49	0.115	1.78	18.0	0.390	0.111	3.05
g317	615	3.70	1.33	10.0	0.120	1.82	16.5	0.425	0.106	3.35
g318	599	3.74	2.63	13.0	0.162	1.55	9.12	0.920	0.140	6.99
g320-2	590	3.69	2.20	13.2	0.114	1.60	9.25	0.550	0.110	5.26
g326	548	2.92	4.00	13.6	0.155	1.32	17.2	0.748	0.161	7.95
g327	676	3.71	1.40	10.1	0.134	1.63	17.8	0.469	0.107	3.62
g328	639	3.54	1.25	9.12	0.118	1.68	20.0	0.392	0.133	3.18
g329	639	3.73	1.21	9.77	0.129	1.79	16.6	0.443	0.094	3.38
g330	636	4.39	1.25	11.6	0.140	2.15	9.42	0.506	0.102	3.54
g331	546	3.30	3.00	12.5	0.117	1.52	8.38	0.813	0.152	7.65
g337	752	4.10	1.70	14.0	0.144	1.38	9.88	0.639	0.128	4.64
g340	598	3.43	1.89	10.1	0.177	1.57	15.9	0.790	0.175	6.28
g341	636	4.17	1.50	11.4	0.133	2.12	11.2	0.499	0.137	3.87
g342	592	4.34	1.87	11.5	0.145	2.21	11.7	0.483	0.078	3.94
g343	502	4.36	1.94	11.6	0.154	2.16	11.8	0.471	0.157	4.21
g351	185	3.17	4.00	14.0	0.255	0.63	11.7	0.795	0.166	7.37
g352	184	3.02	3.91	13.8	0.353	0.816	8.82	2.538	0.229	18.0
g356	536	3.61	2.28	14.5	0.140	1.11	13.7	0.425	0.104	4.98
g358	472	3.64	1.58	10.7	0.138	1.67	17.4	0.476	0.130	4.12

The most abundant elements in the sample are shown in bold.

トカラ列島周辺海域で採取された海底表層堆積物の化学組成 (久保田ほか)

第2表 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物の微量元素の分析結果.

Table 2 Trace element composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 cruises).

Location no.	W. D.	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Mo	Ba	Pb
	m	mg/kg														
g12	244	4.7	0.1	10	57	29	11	11	4.8	31	5.4	1572	7.5	0.3	23	5.4
g13	406	6.9	0.3	22	126	37	23	22	12	61	8.4	1245	8.7	0.8	44	13
g25	839	15	0.9	15	54	3.8	7.4	6.8	7.4	72	38	491	32	1.1	163	19
g26	681	9.9	0.5	19	219	22	19	11	9.7	87	15	1342	15	0.4	74	12
g44	940	17	0.9	17	88	17	11	10	13	71	33	514	21	0.7	184	15
g45	999	17	1.0	14	86	22	12	11	13	67	36	568	18	0.6	182	11
g47	793	8.8	0.5	33	679	39	41	17	14	225	14	498	20	1.0	105	16
g69	1025	24	1.0	15	112	39	13	24	34	72	60	503	21	1.9	311	20
g70	1201	27	1.1	17	134	47	15	28	42	73	62	386	21	2.3	331	20
g93	1053	31	1.3	14	117	50	15	33	41	82	74	467	21	2.4	373	26
g94	1064	32	1.4	16	132	57	18	34	46	84	75	408	20	2.0	373	24
g95	1051	24	1.1	22	164	60	19	26	40	78	58	325	21	1.3	263	15
g118	942	22	0.9	15	117	35	13	23	35	65	52	459	19	1.6	268	20
g119	933	25	1.1	18	151	45	15	23	48	72	59	385	21	1.3	287	17
g120	1012	34	1.4	17	140	62	15	34	51	92	81	424	21	1.2	369	26
g121	925	24	1.0	18	154	57	16	27	50	76	60	351	20	1.4	294	19
g122	968	13	0.6	29	223	73	28	29	48	73	29	258	18	1.0	157	10
g123	605	9.8	0.5	35	299	94	34	44	47	91	21	408	18	0.9	106	10
g125	327	6.9	0.3	39	163	128	32	43	19	62	9.4	1734	12	0.7	99	12
g144	652	22	1.1	10	48	5.7	7.1	6.1	7.6	48	57	301	27	1.8	212	18
g145	915	23	1.0	21	172	59	19	28	54	78	59	356	22	2.0	275	20
g146	789	20	0.9	20	169	55	18	25	52	69	50	327	22	1.8	241	16
g147	801	14	0.7	29	226	82	26	31	64	74	37	258	21	1.3	177	11
g148	671	10	0.5	38	210	83	29	32	55	67	21	269	18	0.7	110	6.8
g150	423	7.3	0.3	39	214	110	35	42	32	75	12	384	15	0.7	75	11
g168	861	22	1.0	11	89	32	10	24	29	59	56	500	18	2.4	247	19
g169	923	19	0.8	30	163	19	22	12	25	84	33	275	21	1.2	154	13
g171	799	13	0.6	33	232	67	29	29	51	78	32	266	21	1.2	155	9.8
g173	727	14	0.6	30	223	99	27	33	64	74	36	251	20	1.2	173	10
g174	525	11	0.4	39	336	93	36	35	41	93	21	325	18	0.8	105	13
g175	554	14	0.7	24	167	57	21	24	45	65	37	429	20	1.2	182	12
g196	780	19	0.8	17	141	34	16	19	38	64	50	424	21	1.8	230	16
g198	507	13	0.6	29	237	80	25	26	66	72	36	256	22	1.5	166	9.9
g199	669	14	0.7	25	187	56	22	23	52	68	39	392	20	1.3	184	12
g200	601	18	0.8	17	123	31	13	15	33	65	53	480	23	1.9	247	16
g201	736	18	0.7	8.1	58	13	6.3	7.6	8.9	53	41	616	16	0.5	188	11
g202	519	11	0.5	32	471	33	35	19	25	119	20	424	16	0.9	111	12
g221	659	8.3	0.4	23	172	23	18	11	11	90	15	1225	16	0.4	77	9.8
g226	569	8.3	0.3	26	152	23	21	16	11	70	7.0	1131	16	0.4	51	11
g228	346	15	0.7	16	128	16	13	9.1	22	58	35	656	18	1.1	179	14
g244	136	2.4	0.0	1.5	23	28	1.8	5.2	2.1	18	2.1	2205	4.5	0.6	12	2.8
g245	560	6.5	0.2	6.8	43	13	6.4	7.7	7.0	28	11	1950	11	0.2	51	7.5
g246	604	19	0.8	11	86	25	9.5	14	17	56	49	826	16	1.2	233	16
g247	582	14	0.6	27	271	21	26	14	23	96	20	589	16	0.7	118	13
g248	520	15	0.6	25	596	26	34	8.5	26	161	26	312	19	1.3	141	9.2
g249	624	18	0.9	16	121	12	12	6.9	16	68	46	529	21	1.4	224	15
g250	599	20	0.9	8.4	44	7.8	6.1	6.3	7.0	51	55	680	20	1.1	230	17
g264	651	19	0.9	11	90	29	12	23	14	67	43	731	12	0.7	166	15
g265	478	12	0.6	21	387	33	27	22	11	120	26	772	14	0.7	126	13
g266	665	15	0.8	17	206	22	19	14	12	86	37	533	16	0.7	192	14
g267	591	12	0.7	13	89	15	13	14	9.1	61	22	764	12	0.6	119	13
g268	450	11	0.5	14	164	16	13	9.5	12	61	19	1256	12	0.6	99	8.2
g269	644	16	0.6	17	127	11	12	5.6	16	57	49	770	19	0.9	215	10
g270	268	4.3	0.1	6.7	191	16	9.9	4.1	3.9	50	7.5	3056	6.1	0.3	39	3.6
g283	628	12	0.6	5.0	39	14	9.4	24	8.1	39	29	922	12	0.8	124	21
g284	594	17	0.8	9.7	78	20	9.7	16	12	56	46	786	16	1.2	219	21
g285	643	20	0.9	7.7	46	17	8.3	19	9.2	52	54	589	20	1.8	246	21
g286	479	13	0.7	14	137	21	16	17	9.0	72	22	993	13	0.4	95	13
g287	60	1.9	0.0	0.7	9.8	10	0.7	2.9	1.3	6.9	1.0	3383	2.4	0.5	11	1.5
g288	584	15	0.7	31	241	13	26	6.9	9.3	119	19	427	21	0.6	112	7.6
g289	352	6.7	0.3	26	622	30	34	14	9.4	188	9.8	1391	16	1.0	52	11
g290	570	16	0.9	24	146	17	15	7.2	8.2	84	37	510	21	1.2	185	11
g291	563	24	1.2	19	95	15	11	5.9	9.7	69	57	292	22	1.5	266	14
g299	584	17	0.9	14	104	29	14	20	12	67	43	596	16	1.1	191	19
g300	644	14	0.7	17	170	28	21	28	15	87	28	1741	17	1.4	157	33
g302	606	21	1.0	10	57	22	6.8	14	13	54	56	611	20	2.0	280	17
g303	619	24	1.2	11	55	24	6.8	15	13	61	65	541	23	2.4	317	18
g304	607	15	0.7	6.3	36	18	6.0	14	9.6	45	39	1812	16	1.4	168	14

第2表 続き.
Table 2 Continued.

Location no.	W. D. m	Li mg/kg	Be mg/kg	Sc mg/kg	V mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Rb mg/kg	Sr mg/kg	Y mg/kg	Mo mg/kg	Ba mg/kg	Pb mg/kg
g305	282	4.5	0.2	2.8	29	7.2	15	15	4.7	21	6.4	3830	6.3	2.1	34	25
g306	595	19	1.1	20	125	14	12	6.5	11	75	52	282	25	2.0	253	15
g315	636	18	1.0	13	74	20	8.6	12	11	63	52	459	21	1.8	254	17
g316	618	22	1.1	10	52	23	6.9	14	12	61	64	531	23	2.5	286	19
g317	615	21	1.1	11	55	20	6.6	13	11	57	59	501.9	22	2.2	288	17
g318	599	18	0.9	22	169	23	15	9.0	13	86	49	314	24	2.0	244	15
g320-2	590	18	0.9	17	122	19	12.1	10	16	67	49	364	21	2.1	253	16
g326	548	26	1.1	24	205	44	22	24.0	17	97	44	503	19	0.5	156	14
g327	676	19	1.0	12	62	20	8	14	11	60	54	499	21	2.0	263	17
g328	639	22	1.1	10	55	24	7.3	16	12	59	61	548	21	2.4	274	18
g329	639	20	1.1	11.3	53	17	6.6	11	10	59	59	459	25	2.2	281	18
g330	636	23	1.2	12	53	17	5.8	10	11.3	64	71	320	29	2.7	341	20
g331	546	17	0.8	25	205	25	18.1	11.0	16	87	47	309	23	2.1	238	15
g337	752	15	1.0	15	93	15	9	10	9	68	41	376	21	1.9	234	15
g340	598	21	1.0	14	138	24	11.4	14.7	11.8	87	53	475	22	2.4	261	16
g341	636	27	1.3	12	62	31	8	17	16	73	74	401	25	2.3	352	21
g342	592	35	1.5	12	74	47	8.9	27	24	86	88	471	21	1.7	380	26
g343	502	37	1.6	11	80	50	9.6	29	26	87	87	518	20	2.3	368	29
g351	185	10	0.7	22	138	12	14.1	7	11	81	13	461	16	0.5	120	9
g352	184	12	0.7	28	467	22	26	9.0	13	167	19	345	20	1.1	136	10.8
g356	536	23	1.1	13	76	25	12	16.6	6	70	40	950	13	0.7	226	15
g358	472	24	1.2	12	73	28	8	17	13.4	70	61	554	21	2.0	271	18

3.2 トカラ列島周辺海域における水深および元素濃度間の関係

第5表に、水深および各元素濃度の測定値間の相関係数を示した。水深と元素濃度の間で高い相関係数は得られなかった。しかし、 Al_2O_3 、 K_2O 、 CaO 濃度と水深の関係を図に示すと(第2図a-1, b, c-1), Al_2O_3 および K_2O 濃度は水深が深くなるにつれ緩やかに増加し、 CaO 濃度は水深が増大するとともに減少する傾向が確かめられた。これは生物遺骸粒子(炭酸塩鉱物)による希釈作用に起因すると考えられる(太田ほか, 2010, 2011)。この直線的な傾向からずれている試料の多くは、口永良部島や口之島、中之島などいくつかの島々の近傍の比較的浅い海域で採取され、かつ CaO 濃度が14.5 wt%以下と低く、 Al_2O_3 濃度が比較的高い(11-15 wt%)試料である。そのため、これら試料の採取地点では CaO の主要供給源であるサンゴ類、貝類、石灰藻などの生物活動が少なく、碎屑性粒子の寄与が大きいと考えられる。この条件に当てはまる試料を取り除いた第2図a-2, c-2では、より明瞭な相関関係が示される。

第3図a, bは、生物遺骸粒子(炭酸塩鉱物)の主成分元素である CaO 、 MgO 、 Sr の濃度の関係を示したものである。 $CaO-Sr$ 濃度間の相関係数は0.89と高いが、 $CaO-MgO$ 濃度間、 $MgO-Sr$ 濃度間の相関係数は低い(第5表)。 MgO と Sr は、主として CaO と同様に石灰藻、珊瑚、貝類などの生物活動で濃集すると考えられるが、第3図aでは正の相関関係は確認できない。 CaO 濃度が低いにもかかわらず MgO に富む試料のほとんどは、トカラ列島中部海域の諏訪之瀬島東方沖で採取されたもので、 Al_2O_3 、

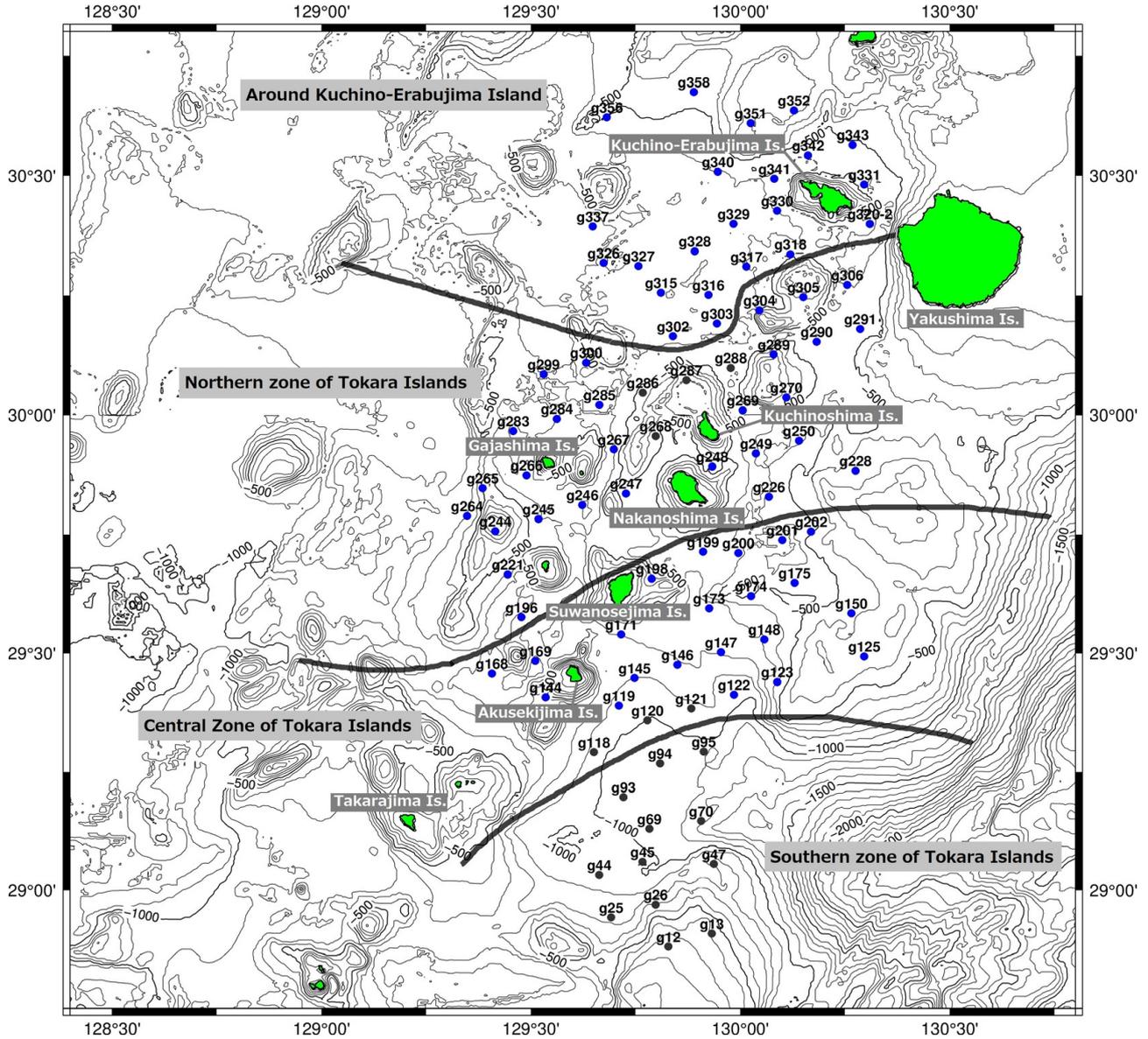
$T-Fe_2O_3$ 、 Sc 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Cu などの濃度も高く K_2O 、 Rb 、 Ba に乏しいという特徴がある。諏訪之瀬島は後期更新世ないし完新世の輝石安山岩の成層火山体であり、トカラ列島に属する島嶼のなかでもとりわけ活動度が高く、現在でも活発に噴火活動が確認されている(斎藤ほか, 2007)。これらのことから、 CaO 低濃度・ Mg 高濃度試料は、苦鉄質岩由来の碎屑粒子を多く含む可能性が高い。この結果はGB21-1航海試料の測定結果と調和的である(久保田ほか, 2022)。 MgO に関しては、生物活動の影響を受けるとともに、碎屑性粒子を起源とする場合もあるため、 CaO と単純な比例関係は得られないものと推測される。苦鉄質火山岩類由来の寄与に関しては、第3図cに示す $TiO_2-T-Fe_2O_3$ 濃度間の明瞭な正の相関関係からも確認することができる。また、 TiO_2 濃度と K_2O 濃度の関係(第3図d)から、① TiO_2 、 K_2O ともに低濃度、②高濃度 TiO_2 ・低濃度 K_2O 、③低濃度 TiO_2 ・高濃度 K_2O の3つの傾向が確認できる。この結果は、本海域より南方で採取されたGK15-2航海試料の分析結果(太田ほか, 2017)と同様であり、各試料の起源は① CaO 、 Sr に富む生物遺骸粒子、② $T-Fe_2O_3$ や MgO などに富む苦鉄質火山岩類由来の碎屑性粒子、③ K_2O などに富む珪長質火山岩類由来の碎屑性粒子であることが考えられる。

第4図には、 Al_2O_3 濃度と K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 $T-Fe_2O_3$ 、 Cu 濃度の関係図を示した。 Al_2O_3-CaO 濃度間には明瞭な負の相関が存在し(第4図a)、 CaO を主とする炭酸塩の生物遺骸粒子と Al_2O_3 を主とするケイ酸塩碎屑性粒子の単純な混合関係が認められる。ただし、 CaO 濃度が低くなるにつればらつきが大きくなる傾向がある。 $Al_2O_3-K_2O$

第3表 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物の海域別平均値。
Table 3 Average elemental concentration and water depth by sea area.

Sea area	(n)	W. D.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	T-Fe ₂ O ₃					
		m	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%					
Around Kuchino-Erabujima Island	22	565	3.73	2.03	11.6	0.151	1.63	13.7	0.642	0.131	5.28					
Northern zone of Tokara Islands	32	529	2.70	2.88	8.99	0.125	0.948	22.7	0.566	0.131	5.78					
Central zone of Tokara Islands	24	724	3.25	4.09	12.9	0.112	1.24	11.8	0.565	0.160	6.91					
Southern zone of Tokara Islands	12	858	2.97	2.97	10.2	0.148	1.10	18.5	0.776	0.190	6.77					
All the samples	90	634	3.13	3.01	10.8	0.131	1.21	17.0	0.612	0.147	6.09					
Sea area	(n)	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Mo	Ba	Pb
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Around Kuchino-Erabujima Island	22	21.5	1.06	14.7	110	25.0	10.8	14.6	13.6	75.8	54.9	478	21.4	1.90	265	17.4
Northern zone of Tokara Islands	32	13.4	0.639	14.9	153	19.6	14.6	12.7	12.1	70.1	30.1	1124	15.4	0.987	144	13.5
Central zone of Tokara Islands	24	16.5	0.738	25.2	190	61.2	22.2	26.5	41.9	73.9	39.7	422	19.6	1.27	191	14.1
Southern zone of Tokara Islands	12	18.1	0.833	17.7	164	35.1	16.9	19.5	23.1	83.6	39.9	693	18.7	1.22	202	16.4
All the samples	90	16.8	0.795	18.0	154	34.1	16.0	17.8	21.9	74.3	40.0	721	18.4	1.32	194	15.0

※Around Kuchino-Erabujima Is.: g302, 303, g315-g358, Northern zone: g196, g221-g300, g304-g306, Central zone: g118-g175, g198-g202, Southern zone: g12-g95.
Bolded letters indicate the highest concentration of each element.



第1図 トカラ列島周辺海域 (GB21-2 および 21-3 航海) における表層堆積物試料の採取地点。海底地形図は岸本 (2000) に基づく。
 Fig. 1 Sampling locations of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 cruises). Submarine topographic map is based on Kishimoto (2000).

濃度間の相関係数は低いが、濃度間の関係図(第4図b)を見ると海域ごとに特徴があることが分かる。口永良部島周辺で採取された試料(試料番号を黒字で表示, g302, g303, g304, g305, g316, g317, g328, g329, g330, g341, g342, g343)は、 Al_2O_3 - K_2O 濃度間に正の相関関係があり、 Na_2O , K_2O , Rb, Baなどの元素濃度が高い。 K_2O , Rb, Baは珩長質岩に多く含まれる元素であり、相互に相関係数が高いことから、これらの試料には珩長質火山岩類由来の碎屑性粒子が含まれていると推測される。一方で、正の直線的な関係から K_2O 低濃度方向にずれた位置にプロットされる試料(破線で囲った)が多々存在し、前述のトカラ列島中部海域の諏訪之瀬島東方沖で採取された試

料はここに含まれる。この低濃度 K_2O ・高濃度 Al_2O_3 試料は苦鉄質火山岩由来の碎屑性粒子の影響を示していると考えられる。調査海域に存在する島嶼のほとんどは中期更新世以降の第四紀火山島(主に輝石安山岩で構成)で、噴気活動が認められる火山も多い(斎藤ほか, 2007; 中野ほか, 2008)。また、海底地質図によると中新世・鮮新世堆積層および第四紀堆積層が分布しており(本座, 1976)、本海域の堆積物に供給される碎屑性粒子が、化学組成が大きく異なる岩石の混合であるため、 Al_2O_3 - K_2O 濃度間で高い相関係数が得られなかったと考えられた。
 Al_2O_3 濃度とT- Fe_2O_3 濃度散布図(第4図c)より、著しく高いT- Fe_2O_3 濃度を持つ試料(g47, g202, g248, g265,

第4表 GB21-2および21-3航海で採取された海底表層堆積物の粒度別化学組成の中央値.

Table 4 Median elemental concentrations by particle size.

Elements		Gravel	Very coarse and coarse sand	Medium sand	Fine and very fine sand	sandy silt, silty clay
		n=11	n=21	n=28	n=20	n=10
Na ₂ O	wt %	2.92	2.81	3.07	3.59	3.79
MgO	wt %	4.00	2.99	2.65	2.24	2.35
Al ₂ O ₃	wt %	13.6	10.8	10.6	11.5	12.2
P ₂ O ₅	wt %	0.106	0.114	0.127	0.119	0.148
K ₂ O	wt %	0.98	1.06	1.12	1.61	1.76
CaO	wt %	11.2	16.3	17.0	13.7	11.0
TiO ₂	wt %	0.606	0.487	0.576	0.481	0.535
MnO	wt %	0.161	0.113	0.134	0.137	0.148
T-Fe ₂ O ₃	wt %	7.98	5.26	5.47	4.56	5.32
Li	mg/kg	13.7	14.3	16.6	21.5	26.7
Be	mg/kg	0.662	0.688	0.819	0.970	1.21
Sc	mg/kg	27.9	16.5	17.9	14.7	14.9
V	mg/kg	214	128	115	115	133
Cr	mg/kg	44.0	21.9	19.1	31.3	48.4
Co	mg/kg	26.4	12.6	13.4	12.5	15.1
Ni	mg/kg	27.5	11.2	11.9	18.2	26.9
Cu	mg/kg	17.2	11.4	11.3	30.9	40.6
Zn	mg/kg	75.2	67.1	68.7	64.9	80.0
Rb	mg/kg	28.2	35.5	35.3	56.1	68.1
Sr	mg/kg	345	770	512	490	404
Y	mg/kg	18.2	16.5	17.7	21.2	20.9
Mo	mg/kg	1.11	0.694	1.06	1.90	2.13
Ba	mg/kg	156	163	175	270	341
Pb	mg/kg	12.5	11.9	14.2	17.7	20.5

g289, g352)の存在が確認できる。これらは鉄酸化物の影響を示唆するものであるが、どれもCo, Ni, Cu, Pb濃度が低く、TiO₂, Sc, Vなどのimmobileな元素の濃度が高いことから、苦鉄質火山岩類の影響が大きいと考えられる。しかし、これらの試料は本調査海域に点在しており、地域性が認められないため、より詳細な検討が必要である。これら6試料を図から除くと、Al₂O₃濃度とT-Fe₂O₃濃度間の明瞭な正の相関関係が確認できる。Al₂O₃-T-Fe₂O₃およびAl₂O₃-TiO₂濃度散布図(第4図cおよびd)は傾向が類似している。

Al₂O₃濃度とCu濃度の関係を示す第4図eでは、正の相関直線が2本存在することが確認できる。Cu高濃度域(20 wt%以上)のプロットはトカラ列島中部海域の試料で占められており、一部含まれるトカラ列島南部海域の試料は水深が深い海域で採取された砂質泥-泥質試料(g69, 70, 93, 94, 95)である。深海域で採取された砂質泥-泥質試料中のCu濃度が高い事例は、GH09航海でも報告されており(太田ほか, 2010)、その要因は生物作用と初期続成作用による濃集であると指摘されている。この指摘

についてはg69, 70, 93, 94のMnO濃度がやや高く初期続成作用の影響が考えられることと調和的である。

4. まとめ

トカラ列島の口之島, 中之島, 臥蛇島, 平島, 諏訪之瀬島および悪石島周辺海域, 口永良部島および屋久島の周辺海域から採取した海底表層堆積物90試料について53元素の化学分析を行い、主成分元素および微量元素24元素の化学組成の特徴や分布特性について検討を行った。本調査海域は、既報告の沖縄周辺海域と近接しているが、海底堆積物の化学組成や分布特性は異なる傾向を示し、主な構成成分は生物遺骸粒子だけでなく、苦鉄質または珪長質火山岩類由来の碎屑性粒子の寄与が大きいことが示唆された。本調査海域をさらに細かく区分すると、各海域における特性が明瞭となった。口永良部島周辺海域ではK₂O, Na₂O, Li, Be, Rb, Baの濃度が高く、近傍に位置する鬼界カルデラの火山性噴出物の影響は確認されなかった。トカラ列島北部海域では浅海部を中心にCaOやSrの濃度が高く、中部海域試料は、Al₂O₃, MgO,

第5表 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物の各測定値間の相関係数.

Table 5 Correlation coefficient matrix for studied sediments (n = 90)

Depth (m)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	T-Fe ₂ O ₃	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Mo	Ba	
0.51																								
-0.23		-0.54																						
0.46		0.62	0.16																					
-0.07		0.06	-0.04	0.08																				
0.52		0.91	-0.62	-0.02																				
-0.49		-0.75	-0.93	-0.18	-0.64																			
-0.03		-0.08	0.21	0.79	-0.16	-0.28																		
0.38		0.09	0.28	0.37	0.43	0.02	0.53																	
-0.05		-0.21	0.53	0.31	0.60	-0.31	0.90	0.61																
0.58		0.82	-0.54	0.07	0.91	-0.57	-0.13	0.15	-0.25															
0.55		0.89	-0.61	0.15	0.92	-0.62	-0.08	0.12	-0.24	0.96														
0.08		-0.12	0.81	0.58	0.16	-0.25	0.48	0.53	0.73	-0.23	-0.24													
-0.07		-0.27	0.52	0.22	0.51	-0.34	0.85	0.56	0.97	-0.29	-0.31	0.68												
0.18		-0.08	0.64	0.37	-0.13	-0.06	0.04	0.30	0.28	0.00	-0.09	0.66	0.29											
0.02		-0.31	0.80	0.36	0.23	-0.41	-0.29	0.61	0.85	-0.33	-0.38	0.90	0.85	0.62										
0.35		0.04	0.43	0.33	-0.09	0.07	-0.24	0.43	0.17	0.20	0.10	0.47	0.17	0.89	0.52									
0.50		0.23	0.36	0.59	-0.15	0.23	0.00	0.35	0.19	0.24	0.15	0.52	0.24	0.77	0.47	0.73	0.12							
0.08		0.00	0.28	0.32	-0.08	-0.40	0.92	0.65	0.94	0.02	0.04	0.57	0.89	0.15	0.69	0.12	0.12							
0.55		0.85	-0.63	0.39	-0.01	0.97	-0.19	0.04	-0.35	0.95	0.94	-0.31	-0.37	-0.02	-0.43	0.15	0.24	-0.09						
-0.53		-0.70	-0.83	0.17	0.77	-0.82	-0.25	-0.39	0.07	-0.55	-0.61	-0.41	0.01	0.03	-0.24	0.03	-0.44	-0.36	-0.54					
0.53		0.83	-0.31	0.66	0.17	0.77	0.19	0.26	0.09	0.62	0.71	0.20	0.01	0.03	-0.04	0.29	0.26	-0.24	0.68					
0.32		0.89	-0.55	0.21	0.04	0.78	-0.41	-0.08	0.17	0.63	0.66	-0.26	-0.25	-0.06	-0.33	0.07	0.15	-0.06	0.76	-0.78				
0.57		0.60	-0.60	0.44	0.06	0.96	-0.13	0.12	-0.29	0.94	0.94	-0.25	-0.32	0.00	-0.38	0.16	0.26	-0.03	0.98	-0.57	0.78			
0.44		0.60	-0.55	0.14	0.14	0.65	-0.10	0.25	-0.23	0.71	0.71	-0.30	-0.27	-0.05	-0.25	0.29	0.08	0.02	0.71	-0.23	0.65	0.78		

Bold face type means that correlation coefficient is larger than 0.6 smaller than -0.6.

Sc, Cr, Co, Ni, Cuの濃度が高かった。また南部海域では、奄美大島により近い浅瀬で採取された試料はCaO, MgO, Srの濃度が高く、北側に位置する5試料はMnO濃度が0.2-0.3 wt%と高い結果となった。CaO-MgO濃度およびAl₂O₃-K₂O濃度の関係図から、中部海域特に諏訪之瀬島東方沖で採取された試料については苦鉄質火山岩由来の碎屑性粒子の寄与が大きいことが示された。一方で、口永良部島周辺海域試料ではAl₂O₃-K₂O濃度間に正の相関関係があり、K₂O, Rb, Ba濃度間の相関係数が高いことから、珪長質碎屑性粒子を多く含むと考えられた。トカラ列島南部海域の深海域で採取された砂質泥-泥質試料はCuおよびMnOに富んでおり、初期続成作用の影響を受けている可能性がある。

文献

岸本清行(2000)海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).

久保田 蘭・太田充恒・今井 登・立花好子・板木拓也・片山 肇・杉崎彩子・岡井貴司(2019)奄美大島西方海域(GK17-2航海)で採取された海底表層堆積物の化学組成. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 153-161.

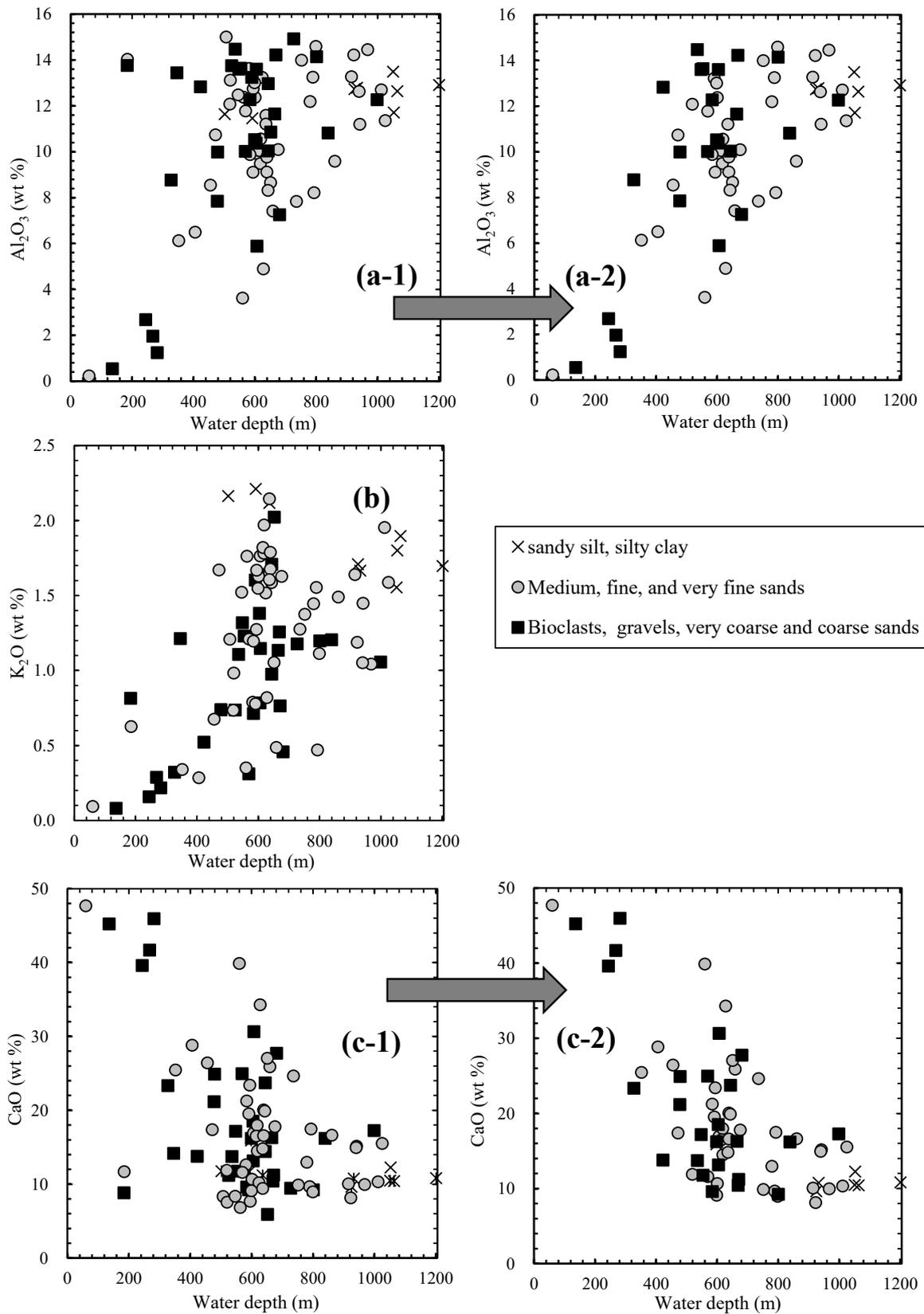
久保田 蘭・太田充恒・立花好子・板木拓也・片山 肇・鈴木克明・間中光雄(2022)トカラ列島周辺海域(GB21-1航海)で採取された海底表層堆積物の化学組成. 地質調査研究報告, 73, 337-347.

中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄(2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.

太田充恒・寺島 滋・今井 登・立花好子・板木拓也・荒井晃作・片山 肇・池原 研(2010)沖縄島西方海域の海底表層堆積物の化学組成. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成21年度研究概要報告書—沖縄島北西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 51, 103-115.

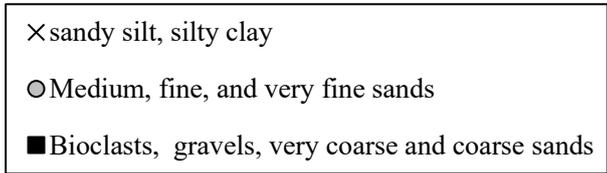
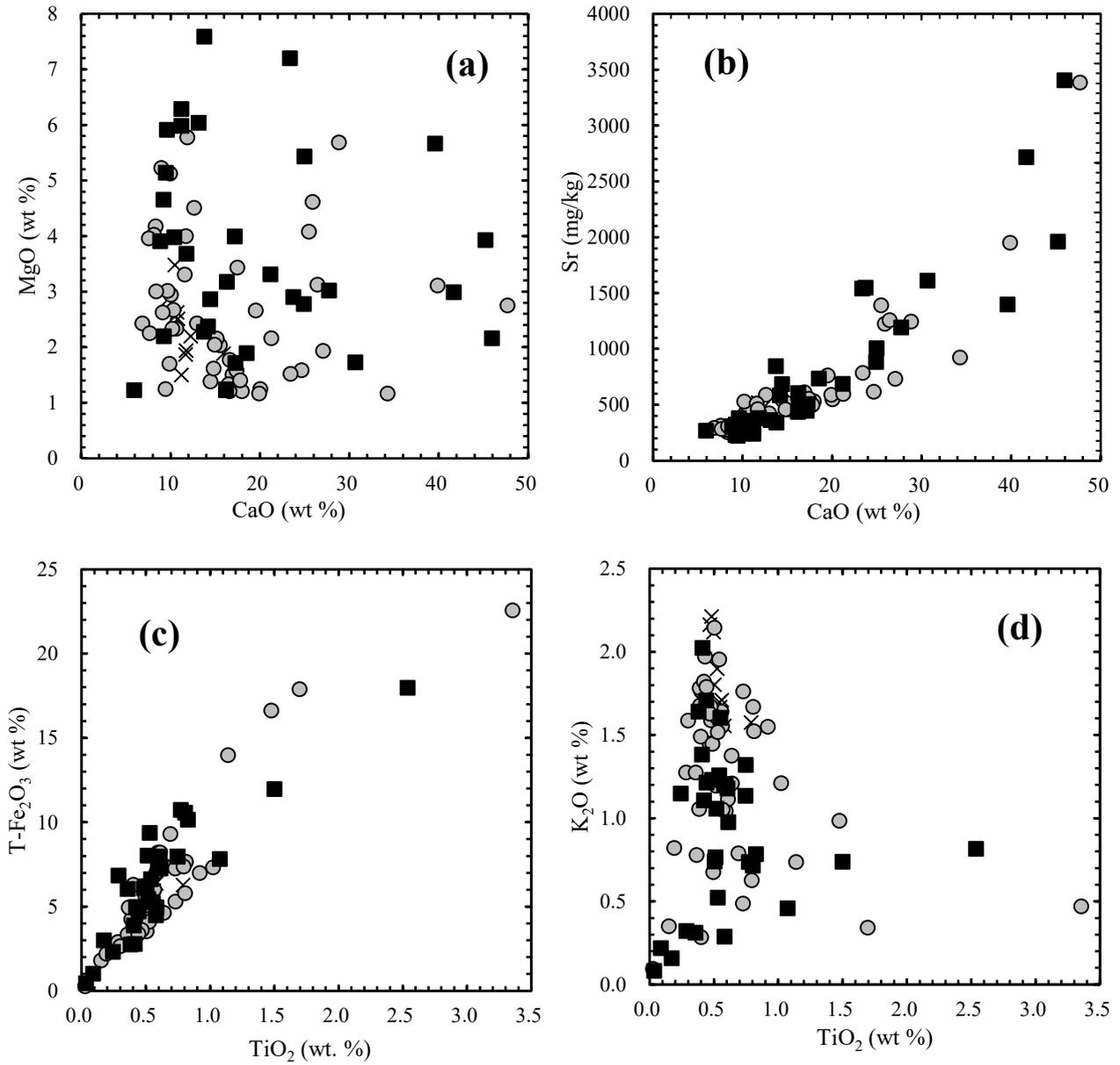
太田充恒・今井 登・立花好子・板木拓也・荒井晃作・片山 肇・池原 研(2011)沖縄島周辺海域の海底表層堆積物の化学組成. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成22年度研究概要報告書—沖縄島西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 55, 124-136.

太田充恒・今井 登・立花好子・天野敦子・板木拓也・荒井晃作・池原 研・岡井貴司(2013)沖永良部島周辺海域の海底表層堆積物の化学組成. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成24年度研究概要報告書—沖永良部島周辺海域—, 地質調査総



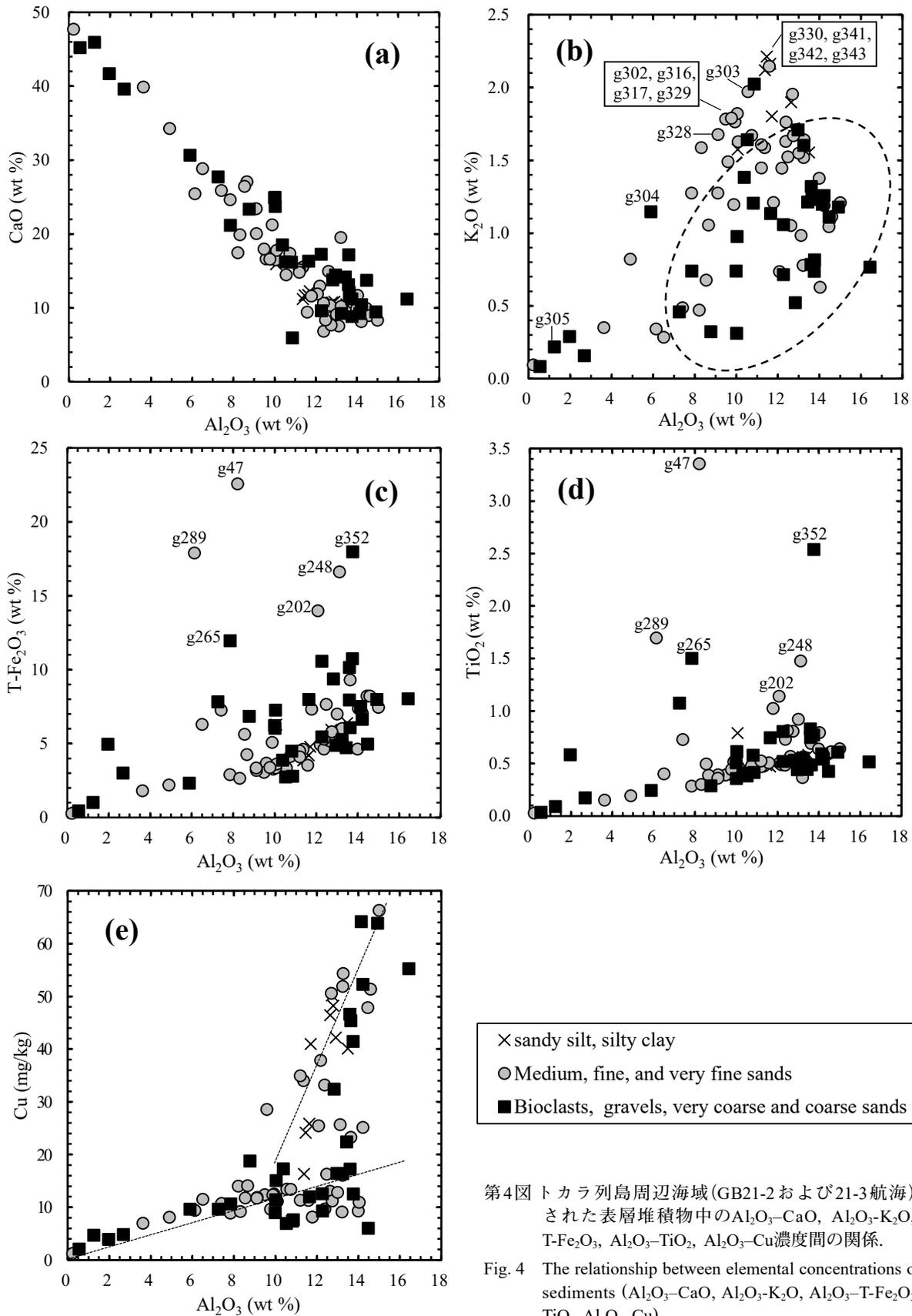
第2図 Al_2O_3 , K_2O , CaO 濃度と試料採取地点の水深の関係.

Fig. 2 The relationship between elemental concentrations (Al_2O_3 , K_2O , CaO) and water depth.



第3図 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物中のCaO-MgO, CaO-Sr, TiO₂-T-Fe₂O₃, TiO₂-K₂O濃度間の関係。

Fig. 3 The relationship between elemental concentrations of marine sediments (CaO-MgO, CaO-Sr, TiO₂-T-Fe₂O₃, TiO₂-K₂O).



第4図 トカラ列島周辺海域(GB21-2および21-3航海)で採取された表層堆積物中の Al_2O_3 - CaO , Al_2O_3 - K_2O , Al_2O_3 -T- Fe_2O_3 , Al_2O_3 - TiO_2 , Al_2O_3 - Cu 濃度間の関係。

Fig. 4 The relationship between elemental concentrations of marine sediments (Al_2O_3 - CaO , Al_2O_3 - K_2O , Al_2O_3 -T- Fe_2O_3 , Al_2O_3 - TiO_2 , Al_2O_3 - Cu).

合センター速報, no. 61, 99-107.

太田充恒・今井 登・立花好子・天野敦子・板木拓也・片山 肇・岡井貴司(2016)沖永良部島-徳之島北西海域(GK14航海)で採取された海底表層堆積物の化学組成. 板木拓也(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成27年度研究概要報告書—奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 70, 88-98.

太田充恒・今井 登・立花好子・板木拓也・片山 肇・天野敦子・岡井貴司(2017)奄美大島, 徳之島, 喜界島周辺海域(GK15-2航海)で採取された海底表層堆積物の化学組成. 板木拓也(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成28年度研究概要報告書—奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 72, 64-81.

太田充恒・久保田 蘭・今井 登・立花好子・板木拓也・片山 肇・杉崎彩子・岡井貴司(2019)宮古島, 石垣

島, 西表島周辺海域(GK18-1航海)で採取された海底表層堆積物の化学組成. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 94-107.

斎藤 眞・小笠原正継・長森英明・下司信夫・駒澤正夫(2007)20万分の1地質図幅「屋久島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.

寺島 滋・板木拓也・片山 肇・池原 研・今井 登・太田充恒(2009)沖縄南東海域の表層堆積物等の化学組成. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成20年度研究概要報告書—沖縄島東方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 46, 99-106.

(受 付 : 2022年10月31日 ; 受 理 : 2023年6月26日)

トカラ列島周辺海域における底生有孔虫群集の概要 (予報)

長谷川 四郎^{1,*}

HASEGAWA Shiro (2023) Preliminary report on the benthic foraminifera in the seas surrounding the Tokara Islands, southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 301–314, 3 figs and 1 table.

Abstract: Four depth zones are recognized based on occurrence of benthic foraminifera at 73 sites from 185 to 1,200 m depths during GB21-1, 2 and 3 cruises around the Tokara Islands. These depth zones correspond to previously reported Zones II to V around the Nansei Islands. However, there is a clear difference in water depth of those zones between the northern part (this sea) and southern end (Yaeyama Islands) in the Nansei Islands. This difference is thought to be related to the geographic variation of the stratified structure by the Kuroshio and intermediate/deep water in the East China Sea.

At some sites, abnormal values are shown in the depth distribution of foraminiferal indicators such as benthic and planktonic foraminiferal numbers, proportion among three types of test composition in benthic foraminifera, proportion of planktonic one in total foraminifera (PF%). Those peculiar occurrences of foraminiferal assemblages are presumed to have been locally formed by remarkable relief of seafloor due to volcanic activity in the Tokara Islands and the strong flow of the Kuroshio Current in this area.

Keywords: benthic foraminifera, Tokara Islands, East China Sea, Northwest Pacific, Recent

要 旨

GB21-1, 2 及び 3 航海によるトカラ列島周辺海域の水深約 185–1,200 m の 73 地点の試料について, 有孔虫群集の産状を検討した. 底生有孔虫主要種の深度分布をもとに識別した 4 帯の群集は, これまでに南西諸島周辺で報告された II 帯～V 帯に対応する. しかし, 南西諸島北部の本海域と南端の八重山周辺海域とでは, 深度帯の水深に明瞭な相違がある. その地理的変異は, 東シナ海における海洋構造に関連すると考えられる.

底生・浮遊性有孔虫数, 底生有孔虫の殻質構成比, 浮遊性有孔虫率などの指標を算出し, 各有孔虫指標の深度分布における異常値に着目して, それぞれの地点の有孔虫群集が形成される要因を検討した. トカラ列島周辺の起伏に富む海底地形と黒潮の強い流れによって, 局所的に多様な有孔虫遺骸群集が生まれることが推定された.

1. はじめに

産業技術総合研究所地質情報研究部門が望星丸により実施した 3 次わたる令和 3 年度の調査航海 (GB21-1, 2 & 3) により, トカラ列島周辺海域から採取された表層

堆積物について, 底生有孔虫群集の予察的調査を行った. 本調査の中心を占めるトカラ (吐噶喇) 列島は, 屋久島と奄美大島との南北約 160 km に点在する火山島群で, その東縁は口之島から横当島に至る北北東–南南西方向の島列をなし, その西方には大小の島々が散在する (第 1 図). 列島東縁の島列は, 南九州から延びる琉球弧の火山フロントに相当するもので, 列島北部の口之島, 中之島及び諏訪之瀬島には活火山が見られる. 東縁の島列より西側には, 臥蛇島・平島などの火山島のほかに, 海面下に曾根・堆などと呼ばれる多数の火山性海丘が点在する. 火山島の周囲や多くの海丘頂部には, 水深約 200 m 以浅 (まれに 300 m 付近) に平坦面が認められるが, それ以深は水深 500 ~ 700 m に向かって急斜面をなす. また, その西方は, 大局的には緩やかに西方の沖繩舟状海盆底に向かう. 一方, 列島の東側は, 悪石島以北では屋久島から南南西に延びる種子・屋久海脚と列島との間に水深 600 ~ 700 m の谷地形があり, また, 宝島以南では奄美大島から北東に延びる奄美海脚との間に水深約 800 m で幅広の奄美舟状海盆があって, 両海脚の間の鞍部 (トカラギャップと呼ばれる) の西方において合流する.

本調査海域の南側に隣接する奄美大島周辺から八重山

¹ 東北大学 学術資源研究公開センター 総合学術博物館 (Tohoku University Museum, 6-3, Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan)

* Corresponding author: HASEGAWA S., Email: shiro@museum.tohoku.ac.jp

諸島に至る南西諸島の周辺海域では、産総研地質情報研究部門による調査航海が2008年以来実施されており、その採取試料にもとづく有孔虫分布の概要として、群集の基礎的統計量で表される指標と主要構成種の水深に伴う変化の概略が、速報として報告されてきた(たとえば、大井ほか, 2009; 長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2020など)。今回のトカラ列島を中心とする調査海域は、これまでの奄美大島周辺やそれ以南に比べて、とくに多くの火山島と海丘群が集中して存在し、海底地形の起伏が著しく大きい。加えて、東シナ海を北上する黒潮がこのトカラ列島周辺海域を経て太平洋側に抜ける。トカラ海峡付近における流軸の位置は時期により変動し、時には悪石島付近まで南偏するが、概ね列島の北部海域を通過する(橋本・井上, 2009)。その際に列島を構成する島嶼や海丘群などの高まりによって海流に擾乱が生じることで、有孔虫殻の堆積作用に大きな影響を与えていることが推定される。

そこで、今後のより詳細な解析の予察として、ここではこれまでの報告と同様の有孔虫群集の各指標や主要構成種の深度分布を調査し、奄美大島以南の各海域において示された結果がどの程度の広域性を有するのかを検証するとともに、海底地形に影響されると考えられる群集組成の局所的な変異について検討する。

2. 調査試料

有孔虫分析に用いる試料は、3次にわたる航海で採取された以下の計124地点である。

GB21-1航海: 列島のほぼ中央に位置する悪石島を北端とし、トカラ列島南端の横当島に至る島列を軸に東西に広がる海域の水深353 m (St. g90) ~ 1,169 m (St. g108)にわたる計48地点。

GB21-2航海: 悪石島を北西端とするGB21-1の東側の海域の水深450 m (St. g268) ~ 1,201 m (St. g70)の15地点。

GK21-3航海: 悪石島付近を南限とするトカラ列島の北半部、並びにその北側の口永良部島周辺からその西方に広がる海域の、水深185 m (St. g351) ~ 968 m (St. g122)の61地点。

これらの全地点の試料について、底生有孔虫の生体識別のためのローズベンガル染色と、乾燥重量を算出するための所定の手順(下記)で処理したのち、水深、含泥率、及び処理後の試料について、構成粒子の粒度・岩質などの特性の違いを考慮のうえで、計73地点を選定して、有孔虫類の産状を予察的に分析した(第1表)。

本報告に用いる試料の採取地点はトカラ列島を中心とする海域で、いずれも種子島・屋久島から奄美群島一沖縄諸島に至る島列より西側の東シナ海に位置する。その中でも、トカラ列島付近はとくに多くの火山島と海丘群が集中することから、それによる著しく起伏に富む海底地形が有孔虫群集の分布に及ぼす影響を把握するための

予備調査として、海丘群がとくに多い海域を仮に“トカラ火山群島海域”とし、その周囲の比較的起伏の少ない海域と対比しつつ有孔虫群集の差異を検討する(第1図)。

トカラ火山群島海域の範囲は、第1図において破線で示すように、北東端をトカラ列島北端の口之島から北方の口永良部島に続く海丘列、北西端をひきそね曾根、南西端は五号曾根タコから西ノ曾根-横ガン曾根-宝島を経て横当島周辺の海丘群、東端は小宝島から諏訪之瀬島-中之島を経て平瀬-口永良部島に至る島列とし、各山体の斜面下底の傾斜変換点付近(水深500 m ~ 700 m)を結ぶ線の内側とする。なお、第1図には、有孔虫用全試料の採泥位置を示し、予察に用いた地点にのみ地点名を付した。

トカラ火山群島海域(以下では、“火山群島海域”と記す)では30地点を選定した。その最浅地点は平瀬南東の上部斜面にあたるSt. g270(水深268 m)、最深地点は五号曾根の南西、海丘に囲まれた小海盆にあたるSt. g190(水深932 m)である。火山島及び海丘の斜面は急傾斜をなし、それで深で緩傾斜となる。その傾斜変換点は北半部では水深500 ~ 600 mであるが、悪石島より南西側で深くなる傾向にあり、横当島周辺で約800 m、沖縄トラフ縁辺にあたる五号曾根タコや西ノ曾根付近では水深約1,000 mである。

火山群島海域を取り巻く東シナ海海域では、43地点を選定した。以下では、便宜上、火山群島海域の東・西・南・北側の4海域に分けて述べる。北側海域は口之島の北側に広がる平坦面とその北側の黒島堆周縁域である。最浅地点は黒島堆上のSt. g351(水深185 m)だが、これを除く残りの7地点はいずれも海丘斜面から若干離れた、水深が472 m (St. g358) ~ 752 m (St. g337)の平坦面に位置する。西側海域は水深651 m (St. g264)を最浅とし、緩斜面を経て水深1,000 m超の沖縄トラフ底に至る範囲に位置する12地点である。南側海域は奄美舟状海盆底にあたる水深702 m (St. 40) ~ 999 m (St. g45)の8地点と、その延長上でトカラ海底谷に連なる本調査の最深採泥地点St. g70(1,201 m)、及び舟状海盆底縁辺部のSt. g24(水深473 m)とSt. g26(水深681 m)である。東側海域はトカラ列島と種子・屋久海脚に挟まれた幅広の谷の内部にあたる、水深525 m (St. g174) ~ 1,064 m (St. g94)の12地点である。

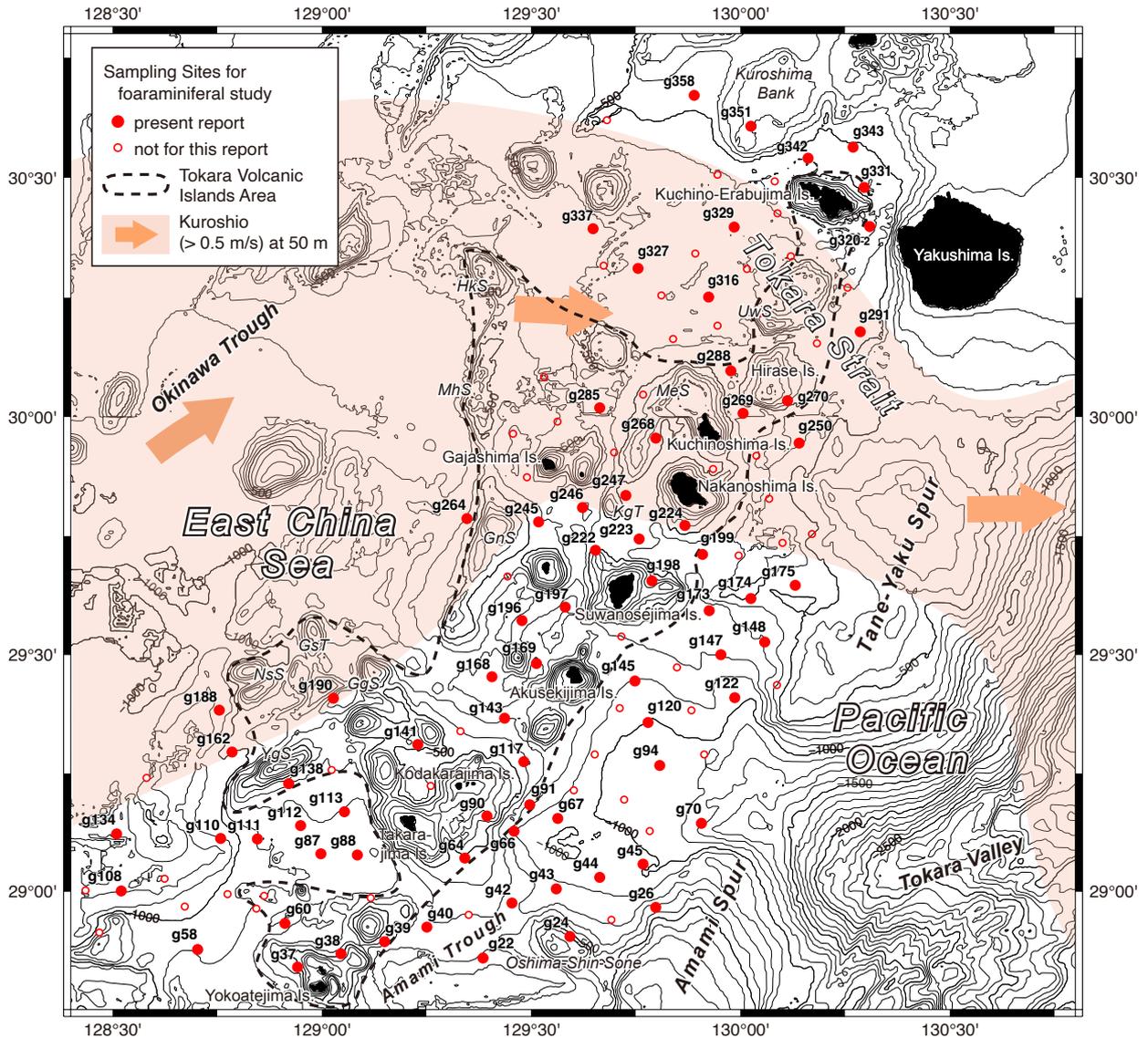
試料は、木下式グラブ採泥器によって採取された表層堆積物の表層2 cmの部分で、当初の目標として約30 ml、実際には20 ~ 60 mlが分取された。採取試料は直ちに冷蔵保存され、寄港先から研究室に輸送された。

湿潤状態にある有孔虫用試料の室内処理において、試料の乾燥重量を求める目的で、なおかつ有孔虫生体を識別するための染色処理に至る工程を通じて、試料の乾燥を忌避するために、処理作業の初期段階で試料中の泥分を分離・回収し、その一定分量の重量を測定して、総重量の推計値を算出した。その手順は以下に示すとおりで、

トカラ列島周辺の底生有孔虫群集 (長谷川)

第1表 トカラ列島周辺海域における有孔虫群集の産状。(底生有孔虫生体個体: +産出, -未発見)
 Table 1 General outline of foraminiferal assemblages in the seas surrounding Tokara Islands. (Living benthic foraminifera: + present, - absent)

Area	Site	Latitude (N)	Longitude (E)	Water Depth (m)	Cruise GB	Dry Weight (estimated) (g)	Mud Content (%)	Foraminiferal No. (/g)		Wall Composition of Benthic Foraminiferal Test (%)			Planktonic Foraminifera Ratio (%)	Pteropoda / Plankt. Foram. Ratio	Living Benthic Foraminifera	
								Benthic	Planktonic	Agglutinated	Porcellaneous	Hyaline				
Tokara Volcanic Islands Area	g270	30° 02.22'	130° 06.59'	268	21-3	43.5	2.1	439	433	4.9	14.7	80.4	49.7	0.21	+	
	g90	29° 09.55'	129° 23.70'	353	21-1	36.9	5.5	2,024	2,024	5.9	16.4	77.6	73.3	0.65	+	
	g224	29° 46.34'	129° 51.87'	416	21-1	56.4	1.1	132	467	1.7	25.3	73.0	78.0	0.06	+	
	g268	29° 57.36'	129° 47.89'	450	21-2	52.6	8.7	2,075	5,871	1.4	13.1	85.4	73.9	0.16	+	
	g141	29° 18.69'	129° 13.86'	475	21-1	56.9	3.5	1,319	2,809	3.4	10.9	85.7	68.0	0.24	+	
	g38	28° 52.05'	129° 02.71'	489	21-1	28.1	1.0	12	58	4.0	14.9	81.0	82.9	0.20	+	
	g198	29° 39.41'	129° 47.31'	507	21-3	49.8	17.2	70	871	12.4	11.0	76.7	92.6	0.07	+	
	g222	29° 43.24'	129° 39.27'	509	21-1	49.6	4.3	240	1,599	2.1	19.3	78.5	86.9	0.13	+	
	g64	29° 04.28'	129° 20.39'	524	21-1	6.8	26.5	134	470	4.5	25.8	69.7	77.8	0.08	+	
	g37	28° 50.46'	128° 56.45'	543	21-1	46.6	6.1	80	1,824	10.5	16.9	72.6	95.8	0.38	+	
	g331	30° 28.88'	130° 17.74'	546	21-3	30.9	18.5	232	1,708	7.7	4.1	88.3	88.0	0.00	+	
	g245	29° 46.92'	129° 31.09'	560	21-3	51.1	7.6	1,148	4,189	3.9	24.5	71.6	78.5	0.14	+	
	g223	29° 44.63'	129° 45.44'	563	21-1	45.1	7.9	204	2,557	5.9	9.8	84.3	92.6	0.03	+	
	g117	29° 16.56'	129° 28.81'	576	21-1	41.9	2.4	110	552	5.1	11.1	83.9	83.3	0.08	+	
	g247	29° 50.13'	129° 43.63'	582	21-3	45.9	7.9	202	806	6.0	18.0	76.0	80.0	0.04	-	
	g288	30° 05.92'	129° 58.63'	584	21-2	59.1	5.3	131	246	8.0	18.9	73.1	65.2	0.03	+	
	g320-2	30° 23.97'	130° 18.56'	590	21-3	51.4	6.9	168	1,367	4.9	2.0	93.1	89.0	0.02	+	
	g246	29° 48.69'	129° 37.35'	604	21-3	35.2	24.1	756	15,700	7.7	7.2	85.1	95.4	0.10	+	
	g285	30° 01.27'	129° 39.81'	643	21-3	27.7	24.1	1,270	19,234	17.9	0.3	81.8	93.8	0.00	+	
	g269	30° 00.58'	130° 00.34'	644	21-3	48.3	6.9	22	58	2.0	10.0	88.1	72.4	0.03	-	
	g39	28° 53.70'	129° 08.90'	657	21-1	51.2	3.9	340	3,442	11.3	10.3	78.4	91.0	0.11	+	
	g143	29° 22.00'	129° 26.21'	669	21-1	48.2	4.1	515	4,673	2.4	11.2	86.4	90.1	0.07	+	
	g138	29° 13.84'	128° 55.32'	714	21-1	27.8	20.5	508	9,571	26.3	4.3	69.4	95.0	0.01	+	
	g196	29° 34.54'	129° 28.64'	780	21-3	38.2	32.9	868	29,464	17.9	0.3	81.8	97.1	0.00	+	
	g91	29° 11.06'	129° 29.81'	808	21-1	24.3	18.7	2,176	11,429	8.5	0.0	91.5	84.0	0.01	+	
	g60	28° 55.91'	128° 54.71'	841	21-1	21.8	72.1	221	6,665	54.9	0.4	44.7	96.8	0.00	+	
	g168	29° 27.43'	129° 24.43'	861	21-3	24.1	60.2	519	17,060	29.8	0.5	69.7	97.0	0.00	+	
	g197	29° 36.11'	129° 34.96'	868	21-1	55.9	10.2	185	2,035	3.0	1.0	96.0	91.7	0.01	+	
	g169	29° 29.03'	129° 30.63'	923	21-3	51.8	6.3	32	944	7.6	0.5	91.9	96.8	0.00	-	
	g190	29° 24.49'	129° 01.72'	932	21-1	30.2	95.5	136	2,691	52.9	0.5	46.6	95.2	0.00	+	
East China Sea	northern sector (North of Kuchinoshima Is.)	g351	30° 36.55'	130° 01.49'	185	21-3	47.2	7.3	156	145	1.3	17.4	81.3	48.2	0.12	+
		g358	30° 40.44'	129° 53.35'	472	21-3	28.4	38.8	1,524	22,672	8.5	1.4	90.0	93.7	0.00	+
		g343	30° 33.85'	130° 16.08'	502	21-3	18.6	80.1	375	2,209	33.9	4.6	61.5	85.5	0.06	+
		g342	30° 32.54'	130° 09.70'	592	21-3	23.9	80.4	306	8,328	12.6	0.5	86.9	96.5	0.02	+
		g316	30° 15.06'	129° 55.44'	618	21-3	36.1	32.3	582	2,562	17.1	3.4	79.5	81.5	0.00	+
		g329	30° 23.98'	129° 59.02'	639	21-3	35.6	25.2	236	14,331	15.6	1.0	83.4	98.4	0.00	+
	eastern sector (western flank of Tane-Yaku Spur)	g327	30° 18.69'	129° 45.41'	676	21-3	33.0	22.5	423	8,187	14.2	0.0	85.8	95.1	0.00	+
		g337	30° 23.65'	129° 38.86'	752	21-3	55.3	12.7	132	1,519	4.5	2.5	93.0	92.0	0.00	+
		g174	29° 37.21'	130° 01.54'	525	21-3	11.6	39.2	373	3,620	10.5	5.9	83.6	90.7	0.04	+
		g175	29° 38.89'	130° 07.78'	554	21-3	39.7	25.1	233	2,435	11.5	15.7	72.8	91.3	0.43	+
		g291	30° 10.81'	130° 17.16'	563	21-3	39.3	9.3	371	2,837	3.5	10.5	86.0	88.4	0.06	+
		g250	29° 56.78'	130° 08.42'	599	21-3	34.0	10.3	828	5,979	5.0	16.8	78.2	87.8	0.02	-
		g199	29° 42.81'	129° 54.66'	669	21-3	43.4	16.5	187	2,228	8.1	4.1	87.8	92.3	0.20	+
		g148	29° 31.75'	130° 03.44'	671	21-3	28.1	11.3	10	164	3.7	4.7	91.6	94.2	0.01	+
		g173	29° 35.66'	129° 55.54'	727	21-3	43.0	18.3	127	845	18.2	0.0	81.8	86.9	0.02	+
		g147	29° 30.14'	129° 57.23'	801	21-3	49.9	21.8	72	1,889	22.1	0.0	77.9	96.3	0.00	+
		g145	29° 26.87'	129° 44.85'	915	21-3	25.5	61.1	210	2,521	59.8	0.0	40.2	92.3	0.00	+
		g122	29° 24.76'	129° 59.10'	968	21-3	46.4	20.5	64	1,747	18.0	0.7	81.3	96.5	0.00	+
	southern sector (Amami Trough)	g120	29° 21.52'	129° 46.68'	1,012	21-2	31.7	86.8	103	938	72.5	1.0	26.5	90.1	0.00	+
		g94	29° 16.08'	129° 48.51'	1,064	21-2	31.3	83.6	143	842	79.5	0.0	20.5	85.5	0.00	+
		g24	28° 54.46'	129° 35.46'	473	21-1	38.4	4.2	1,381	5,680	5.0	11.6	83.4	80.4	0.00	+
		g26	28° 58.18'	129° 47.87'	681	21-2	53.3	7.3	1,051	6,502	4.1	7.8	88.1	86.1	0.14	-
		g40	28° 55.49'	129° 15.06'	702	21-1	69.8	4.6	32	2,668	11.7	8.4	79.8	98.8	0.00	+
		g42	28° 58.65'	129° 27.20'	735	21-1	30.0	3.2	69	771	2.7	8.4	88.9	91.8	0.05	+
		g22	28° 51.60'	129° 23.15'	823	21-1	45.7	3.8	405	2,487	1.4	9.2	89.4	86.0	0.05	+
		g43	29° 00.39'	129° 33.55'	861	21-1	51.3	2.7	10	16	1.9	2.3	95.8	62.9	0.00	-
		g66	29° 07.65'	129° 27.74'	896	21-1	29.1	73.1	508	13,256	21.9	1.9	76.2	96.3	0.00	+
		g44	29° 01.94'	129° 39.79'	940	21-2	41.2	18.9	161	945	0.9	0.9	98.2	85.4	0.02	+
	western sector (Okinawa Trough)	g67	29° 09.29'	129° 33.82'	943	21-1	23.4	51.1	676	18,744	13.0	0.4	86.6	96.5	0.01	+
		g45	29° 03.62'	129° 45.99'	999	21-2	58.4	13.0	317	7,326	2.3	1.4	96.3	95.9	0.00	-
g70		29° 08.79'	129° 54.39'	1,201	21-2	26.7	62.5	256	4,322	61.5	0.0	38.5	94.4	0.00	+	
g264		29° 47.30'	129° 20.86'	651	21-3	32.0	28.8	756	14,163	13.2	1.7	85.1	94.9	0.00	+	
g88		29° 04.65'	129° 05.11'	699	21-1	40.8	10.4	122	4,744	11.5	2.4	86.1	97.5	0.00	+	
g113		29° 10.07'	129° 03.24'	828	21-1	26.3	30.3	859	37,324	7.7	1.4	91.0	97.7	0.00	+	
g112		29° 08.46'	128° 57.03'	836	21-1	28.8	40.1	224	20,220	21.6	1.5	77.0	98.9	0.00	+	
g87		29° 04.83'	128° 59.95'	883	21-1	21.3	95.9	76	2,613	60.1	0.0	39.9	97.2	0.00	+	
western sector (Okinawa Trough)	g111	29° 06.79'	128° 50.73'	915	21-1	27.2	47.2	235	13,120	9.3	0.9	89.8	98.2	0.00	-	
	g58	28° 52.66'	128° 42.27'	960	21-1	22.6	93.5	73	3,541	65.1	1.4	33.5	98.0	0.00	+	
	g162	29° 17.65'	128° 47.24'	1,003	21-1	17.4	96.8	310	1,071	95.7	0.0	4.3	77.5	0.00	+	
	g110	29° 06.74'	128° 45.60'	1,071	21-1	27.7	62.9	187	7,905	26.4	0.4	73.1	97.7	0.00	+	
	g188	29° 23.06'	128° 45.28'	1,145	21-1	17.4	92.1	256	2,155	75.6	0.0	24.4	89.4	0.00	+	
	g134	29° 07.29'	128° 30.61'	1,151	21-1	29.9	98.7	62	366	82.6	0.4	17.0	85.5	0.00	+	
g108	29° 00.06'	128° 31.33'	1,169	21-1	27.2	93.5	104	2,419	55.1	2.9	42.0	95.9	0.00	+		



第1図 GB21-1, 2&3航海の底生有孔虫試料採取地点とトカラ火山群島海域(破線が囲む範囲)。淡赤色は黒潮軸部(50 m深の流速0.5 m/s以上)の2021年の最大変動範囲(気象庁ホームページ「各種データ資料/海流に関する診断表, データ/月旬平均海流」(気象庁, 2023)を元に, 1年分を合成して作成)。海丘等の名称は海底地形の名称に関する検討会(2022)及び横瀬ら(2010)による(GgS: 五号曾根, GnS: 権曾根, GsT: 五号曾根タコ, HkS: 墓曾根, KgT: 小隊蛇堆, MeS: 芽瀬, NsS: 西ノ曾根, YgS: 横ガン曾根)。海底地形は岸本(2000)に基づく。

Fig. 1 Sampling locations for benthic foraminifera research collected during GB21-1, 2 and 3 cruises. Light red area is maximum fluctuation range of strong current (more than 0.5 m/s) of Kuroshio during 2021. Area enclosed by dashed-dotted lines is Tokara Volcanic Islands Area. Undersea topographic names are based on Japanese Committee on Undersea Feature Names (2022); (GgS: Gogo-Sone, GnS: Gon Sone, GsT: Gogosone Tako, HkS: Hiki Sone, KgT: Ko-Gaja Tai, MeS: Me Se, NsS: Nishi-no-Sone, YgS: Yokogan Sone). Topographic map is based on Kishimoto (2000).

大井ほか(2009)や長谷川(2020)など, 産総研の西南諸島周辺における一連の有孔虫調査で継続して実施されてきたものである。

1) 泥分の分離: 250メッシュ(開口径63 μm)の篩上で水洗。篩を通過する泥分を含む洗浄水を3,000 mLビ-

カーに回収。

2) 泥分の測定: 1)の泥分を含む洗浄水を十分に攪拌し, その1/100量を抜き取って乾燥させ, 泥分の重量を測定。

3) 生体の染色: 篩に残る粗粒部に, それと同容量のローズベンガル液(0.5 g/L)を加え24時間保持。

- 4) 余分な染色液の除去：250メッシュの湯洗用特製篩上で、染色した粗粒部を約40℃の温水により洗浄した後、40℃で乾燥して計量。
- 5) 乾燥重量の算出：2)の泥分の重量 ($W_{t_{md}}$) と4)の粗粒部の重量 ($W_{t_{sd}}$) を元に、次式により試料の推計乾燥重量 ($W_{t_{est}}$) を算出。

$$W_{t_{est}} \text{ (g)} = W_{t_{sd}} + (W_{t_{md}} \times 100)$$
- 6) 含泥率測定：2)の泥分の重量 ($W_{t_{md}}$) と5)の(推計)乾燥重量 ($W_{t_{est}}$) より含泥率 ($MC\%$) を算出。

$$MC\% = (W_{t_{md}} \times 100) \times 100 / W_{t_{est}}$$
- 7) 有孔虫個体の摘出：底生種と浮遊性種のそれぞれについて、1分割分あたり200個体以上を目標として、簡易試料分割器により2分割を繰り返して、最小分割分から全有孔虫個体を拾い出す。なお、拾い出す対象を、大井ほか(2009)を踏襲して、直径125 μm (115メッシュ)以上の比較的大きい個体とした。
- 8) 有孔虫個体数の計数：底生有孔虫の属種の同定を行うとともに、群集の概要を把握する目的で、次に挙げる a) ~ f) の6項目の検討を行った。
- 有孔虫数：単位乾燥重量 (1 g) あたりの有孔虫産出個体数。底生種と浮遊性種のそれぞれについて計数。
 - 底生有孔虫殻質構成比：底生有孔虫の殻質 (膠着質・磁器質石灰質・ガラス状石灰質) の区分にもとづく構成比。
 - 浮遊性有孔虫率 (PF%)：全有孔虫個体に占める浮遊性有孔虫個体の割合。
 - 翼足類—浮遊性有孔虫比：浮遊性有孔虫に対する翼足類の比率。
 - 底生有孔虫の生体：確認された生体個体の有無。
 - 底生有孔虫群集の主要構成種。

なお、本調査の分析試料には、これまでに実施された南西諸島周辺海域の産状と同様に、化石と推定される保存不良個体がかかりの頻度で含まれる。しかし、有孔虫殻の保存状態により化石と現世遺骸を区別することは必ずしも容易ではなく、現状では両者を識別する基準が定まっていない。また、従来の報告との継続性をはかるため、ここでは長谷川 (2018) など従来の報告と同様に、化石個体を保存不良の個体を含めたうえで、現世遺骸の一部として扱った。

3. 有孔虫群集の分析結果

前節に挙げた分析項目のうち、項目1) ~ 5)の結果を第1表及び第2図と第3図に示す。なお、前節に示す方法で算出した調査試料の乾燥重量は、最多はSt. g40の69.8 g、多くが20 g ~ 60 gの範囲内にあり、20 g未満は4地点であった。なお、最小値は宝島南東斜面下底付近のSt. g64における6.8 gで、試料は淘汰不良の含細礫粗粒砂よりなるが、これにおいても、有孔虫解析に足る十分な個体数が得られた(第1表)。

3.1 有孔虫数 (Foraminiferal Number)

有孔虫数は表層堆積物中の有孔虫殻の現存量や、岩石中の化石の賦存量を表す基礎統計量の一種であり、生物生産性の一つの目安である。しかし、その値は、有孔虫自体の生産量のほかに、堆積物を構成する碎屑物粒子の密度や有孔虫殻との量比などに依存するので、その活用には、碎屑物の供給源を含めた堆積場の環境諸条件と照らし合わせた吟味が必要となる。

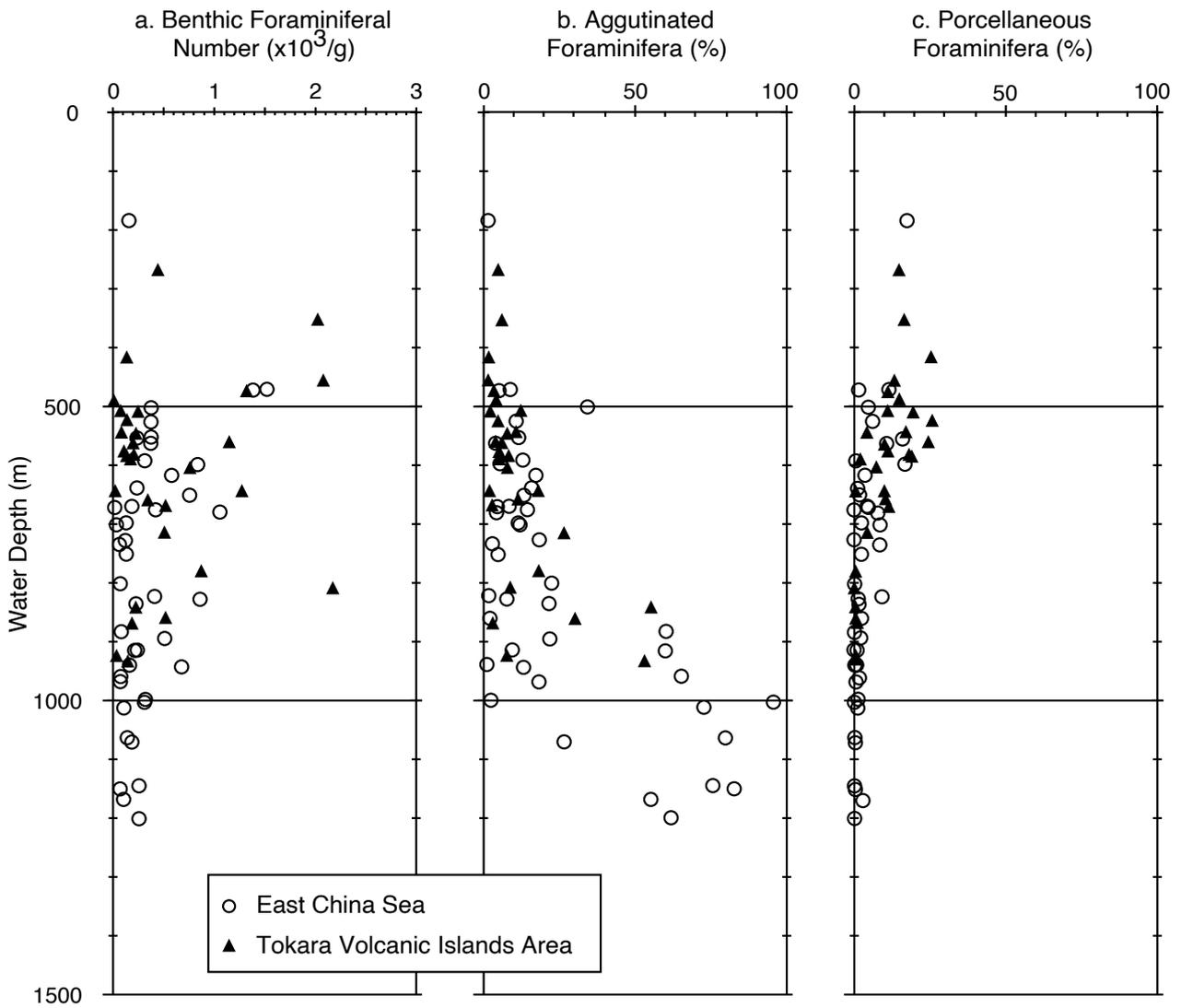
底生種の有孔虫数 (底生有孔虫数 benthic foraminiferal number ; FN_b) は9 ~ 2,176個体/gの値を示すが、全域を通じて300個体/g未満の地点が多い。その中で、火山群島海域では、水深約350 ~ 約800 mの地点で700個体/g以上の地点が確認され、とくに小宝島東側斜面のSt. g90 (水深353 m) とSt. g91 (808 m)、及び口之島西方の海丘の東斜面にあたるSt. 268 (450 m) で2,000個体/g超の値を示す(第3図a)。東シナ海海域においては、水深600 ~ 950 mに500個体/gを超す地点が認められるほか、黒島堆西方の緩斜面上のSt. g358 (水深472 m) で1,523個体/gの高い値を示す。また、奄美舟状海盆に向かう大島新曾根の斜面下部に位置するSt. g24 (水深473 m) と奄美海脚北西斜面のSt. g26 (681 m) で1,000個体/gを超す高い値を示す。

浮遊性種の有孔虫数 (浮遊性有孔虫数 planktonic foraminiferal number ; FN_p) は16 ~ 37,324個体/gと、地点による著しい違いはある。全体としては、水深約600 ~ 1,000 mの範囲で約10,000個体/g以上の高い値を示すが、全深度を通じて1,000個体/g未満の地点も少なくない(第3図b)。なお、火山群島海域のSt. g196 (水深780 m) で29,464個体/g、東シナ海海域のSt. g358 (水深472 m) で22,672個体/g、St. g113 (水深828 m) では37,324個体/gなど、例外的に大きい値を示す地点も認められる。

3.2 底生有孔虫殻質構成比

有孔虫類は有機質、膠着質、石灰質または珪酸質の殻を有する原生物であり、殻の材質と構造は分類の基準として重視されてきた(Loeblich and Tappan, 1964 ; 1992など)。現生底生有孔虫に見られる殻のうち、有機質殻は試料処理の過程で元の形状が失われることが多いため、これまでの一連の調査で扱われておらず、今回も計数の対象に加えていない。また、珪酸質殻は、産総研による一連の南西諸島周辺調査の中で、沖縄周辺における大井ほか(2009)の報告を始めとして、これまでの有孔虫調査において確認されていない。

底生有孔虫は海洋のあらゆる海底環境に生息するが、膠着質殻種は海水の塩分が低下する沿岸域と、海水中の炭酸イオン濃度が減少する深海域で多産する傾向がある(Murray, 1973)。また、石灰質殻のうち磁器質殻の種は比較的高塩分の海域で増加する傾向にあり、その他の通常の海域では、ガラス状石灰質殻種が優勢である。これらの特性は環境指標として有効で、とくに化石群集によ



第2図 トカラ列島周辺海域における底生有孔虫の産状. a: 底生有孔虫数, b: 磁器質殻種の産出頻度, c: 膠着質有孔虫の産出頻度.

Fig. 2 General outline of benthic foraminifera in the seas surrounding Tokara Islands. a: benthic foraminiferal number; b and c: proportion of porcellaneous foraminifera (b) and agglutinated foraminifera (c) in benthic foraminifera.

る古環境指標として重視されている (Murray, 1991).

トカラ列島周辺海域においては、膠着質殻種の割合は1.3～95.7%まで、地点による大きな差異が認められるが、大局的には水深を増すにつれて増加する。すなわち、東シナ海・火山群島海域を通じて、水深500 m以浅では概ね10%未満であるが、水深約700 m以深で20%以上、約800 m以深では50%を越す地点が増加する(第2図b)。しかし例外的に、東シナ海海域の口永良部島北方のSt. g343(水深502 m)では33.9%と、水深の割に大きい値を示す。

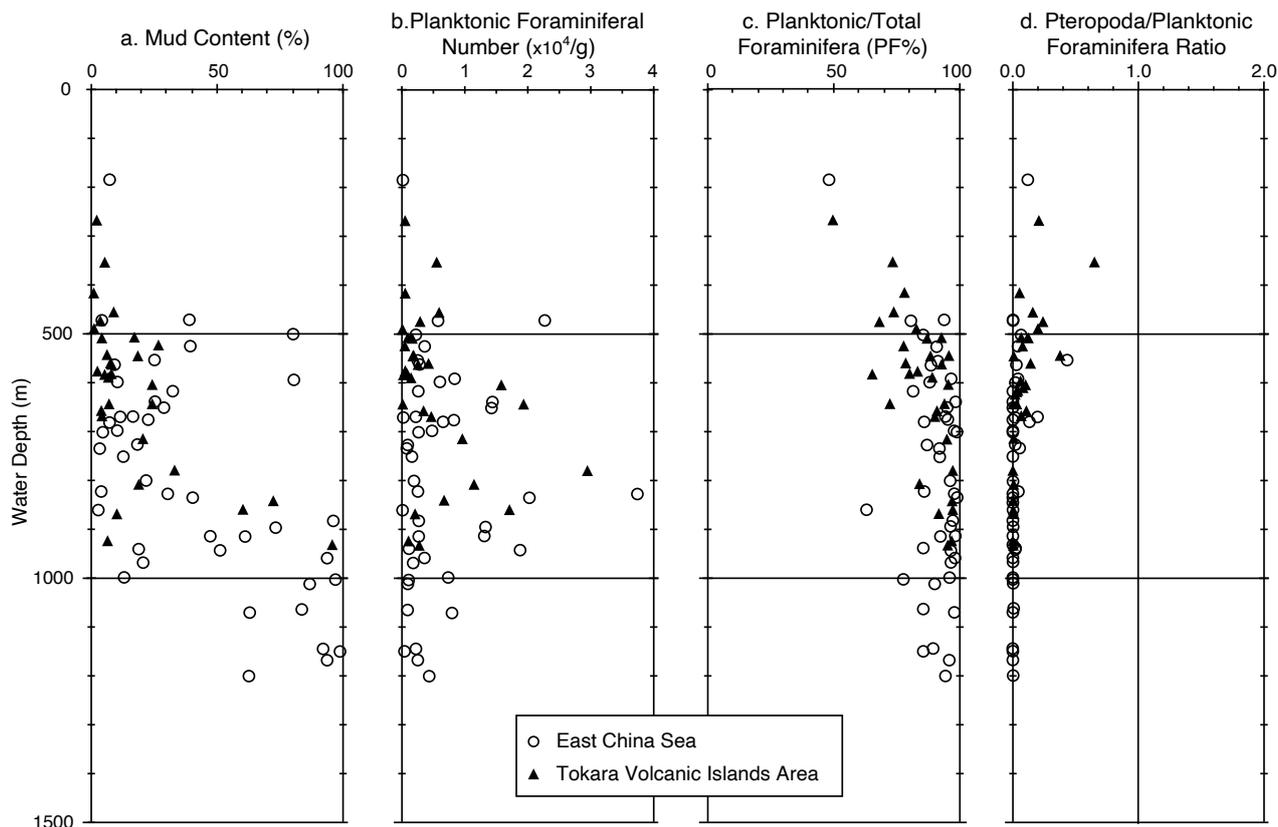
対照的に、火山群島海域では10%未満の地点も少なくない。東シナ海海域でも、奄美舟状海盆底の水深800 m

以深では5%以下の極端に小さい値を示す。また、宝島の西方には30%未満の地点(St. g110～g113)もある。

磁器質石灰質殻種の割合は、水深約600 m以浅で概ね10%以上の値を示し、とくに火山群島海域では約400～600 mで20%以上の地点も確認される。約600 m以深では10%未満、さらに700 m以深で5%未満と顕著に低下する(第2図c)。

3.3 浮遊性有孔虫率

浮遊性有孔虫が底生と浮遊性を合わせた全有孔虫群集の中で占める割合は古水深を示す指標の一つとして古環境解析において適用されてきた(Boltovskoy and Wright,



第3図 トカラ列島周辺海域における浮遊性有孔虫の産状. a: 含泥率, b: 浮遊性有孔虫数(/g), c: 浮遊性有孔虫率, d: 翼足類の浮遊性有孔虫に対する比率.

Fig. 3 General outline of planktonic foraminifera in the seas surrounding Tokara Islands. a: mud content; b: planktonic foraminiferal number; c: proportion of planktonic foraminifera in total foraminifera, d: ratio of pteropods to planktonic foraminifera.

1976; Murray, 1991). この指標は、従来、P/B比、P/T比のように、“比”として表記されることが多いが、実際は百分率である。そこで、ここでは浮遊性有孔虫率(planktonic foraminifera rate)と呼び、“PF%”と表記する。調査対象とした全地点におけるPF%は、48.2～98.9%の値を示す(第3図c)。東シナ海では、最浅地点のSt. g351(水深185 m)で48.2%だが、水深470 m以深で80%以上、650 m以深でほぼ90%以上となる。火山群島海域においても、最浅のSt. g270(水深268 m)で約50%、水深400 m以深で70%以上、500 m以深で90%に達するなど、周囲の東シナ海海域とほぼ同様、水深が増すにつれて増加する傾向にあるが、その一方で、水深500 m以深においても90%に達しない地点が少なくない。

なお、以上のような一般的な傾向に比べて、例外的に小さな値として、火山群島海域の口之島付近のSt. g288(水深584 m)とSt. g269(水深644 m)でそれぞれ約65%と72%、また東シナ海海域でも、沖縄トラフ縁辺のSt. g162(水深1,003 m)と奄美舟状海盆のSt. g43(861 m)でそれぞれ約78%と63%が確認された。

3.4 翼足類

アラレ石で作られる翼足類(軟体動物)の殻は、方解石からなる有孔虫の殻よりも溶解しやすい。そこで、その存在比が有孔虫殻の溶解の目安になる可能性を考慮して、南西諸島周辺海域におけるこれまでの調査において、翼足類遺骸と浮遊性有孔虫殻の産出個体数比(Pteropods/Planktonic foraminifera ratio; Pt/PF比)を検討してきた(長谷川・内村, 2017など)。本調査海域におけるPt/PF比は、0.00～0.65の値を示し、水深約550 m以浅の地点で0.4を上回るものの、大多数の試料が得られた水深約500 m以深では0.1未満であり、翼足類遺骸がまったく含まれない地点も多い(第3図d)。一方、例外的に高い値を示す地点として、火山群島海域におけるSt. g90(水深353 m)の0.65(最大値)とSt. g37(水深543 m)の0.38、東シナ海海域におけるSt. g175(水深554 m)の0.43が挙げられる。

3.5 底生有孔虫生体個体

有孔虫の生体個体は、ローズベンガルで赤色に染まった軟体部(原形質)の有無により識別される。本報告の

海域において確認された生体個体の産出率は、全調査地点を通じて非常に小さい。定量的群集解析のため200個体以上を目標に有孔虫殻を拾い出した結果では、1地点あたり最大でも4個体、すなわち産出頻度によると2%未満であり、大多数の地点では生体が確認されなかった。そこで、処理済み試料の半量(最大分割分)について、あらためて生体の有無を調べたところ、多くの地点で数個体以上の染色個体が抽出された。その一方で、火山群島海域の3地点と東シナ海海域の5地点では、これまでに生体個体が検出されていない。なお第1表には、産出の有無(+または-)のみを示す。

3.6 底生有孔虫群集の主要構成種

GB21-1, 2 & 3航海により採取された試料の有孔虫について、今後の詳細な分類学的検討に基づく群集解析に先立ち、ここでは前項の各種指標を得る過程で把握された底生有孔虫主要種の産出状態について概観する。

本調査海域の南側に隣接する奄美大島周辺海域では、かつて実施された調査航海(GK15-2, GK17-2)の際に、主要底生有孔虫種の水深に伴う遷移にもとづいて、I帯～V帯の群集が識別されている(長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2018)。その帯区分を参考にして、本調査海域における有孔虫群集の産出について検討した結果、奄美大島周辺のII帯～V帯に対応する4群集が確認された。しかし、I帯については、長谷川(2018)が奄美大島周辺で水深120 m以浅に分布すると報告したが、本調査では該当する水深の有孔虫分析試料が得られておらず、相当する群集は確認されない。

II帯(水深360 m以浅)：火山群島海域の水深268 m (St. g270)と353 m (St. g90)、及び東シナ海海域の水深185 m (St. g351)で確認される。II帯の群集組成は奄美大島周辺におけるII帯(水深160 m～350 m)の群集組成とほぼ一致し、*Quinqueloculina*属、*Spiroloculina*属、*Triloculinella*属などの磁器質殻種のほか、*Cibicides*属、*Globocassidulina subglobosa*、*Rectobolivina bifrons*などが多産し、*Glabrattella*属、*Anomalinaella rostrata*などを伴う。

本調査海域でもっとも浅い東シナ海海域のSt. g351では保存状態の良好な殻が多く、染色個体(生体)としては、*Quinqueloculina*属と*Lenticulina*属が確認される。その一方で、保存不良で再堆積と考えられる個体も少なくない。火山群島海域では、St. g270で*Lenticulina*属と*Dentalina*属の染色個体が確認される。また、St. g90では、保存状態の良い有孔虫や翼足類の遺骸が多く含まれるものの、生体は*Quinqueloculina*属の1個体が確認されたのみである。さらに、保存不良で再堆積と考えられる個体やマンガン様の物質で覆われた個体や、サンゴ・コケムシ類などの骨格も多く認められる。

III帯(水深380 m～550 m)：火山群島海域では水深416 m (St. g224)～543 m (St. g37)までの8地点、及び東シナ海

域の水深472 m (St. g358)～546 m (St. g331)の5地点で確認される。III帯の群集は*Ammolagena clavata*、*Psammosphaera*属、*Bolivina robusta*、*Cibicides*属、*Cibicoides pachydermus*、*Eponides repandus*、*Globocassidulina*属、*Heterolepa subhaidingerii*、*Hoeglundina elegans*、*Lenticulina*属、*Paracassidulina*属などで構成されており、奄美大島周辺のIII帯の組成に酷似する。また、*Cibicides refulgens*、*Hoeglundina elegans*、*Lenticulina*属及び*Burseolina*属などに、比較的多くの染色個体が認められた。

III帯の試料には、長谷川(2018)がI帯の特徴とした大型有孔虫類が確認されるものの、その多くは破損個体または殻の薄い幼体である。また、火山群島海域の約半数の地点と東シナ海海域のSt. g24(水深473 m)で、黄褐色に変質した殻の個体が確認された。なお、口永良部島の北側のSt. g343(水深502 m)では、III帯を特徴づける種群に加えて、IV帯～V帯に特徴的な*Pullenia bulloides*、*Sigmoilina sigmoidea*や膠着質殻の*Ammodiscus*属、*Bathysiphon*属、*Saccorhiza*属なども含まれる特異な様相を呈する。これについては後節(考察)において検討する。

IV帯(水深550 m～880 m)：火山群島海域の水深560 m (St. g245)～868 m (St. g197)までの計17地点、及び東シナ海海域の水深554 m (St. g175)～861 m (St. g43)の21地点が該当する。IV帯の群集組成は、*Reophax*属、*Ehrenbergina histrix*、*Fontbotia wuellerstorfi*、*Globocassidulina elegans*、*Gyroidinoides neosoldanii*、*Hoeglundina elegans*、*Melonis pompilioides*、*Parrelloides bradyi*、*Sigmoilina sigmoidea*などよりなり、水深800 m以深では、*Martinottiella communis*、*Pullenia bulloides*などが加わる。これは奄美大島周辺におけるIV帯の群集にきわめて類似する。染色個体としては、*Ammobaculites*属、*Hormosinella distans*、*Placopsillina bradyi*、*Psammosphaera*属、*Reophax*などの膠着質殻種、*Sigmoilina sigmoidea*、*Pyrgoella*属などの磁器質殻種、及び*Ehrenbergina histrix*、*Gyroidinoides neosoldanii*、*Hoeglundina elegans*、*Spincterules anaglyptus*などが確認された。

IV帯の試料には、東シナ海海域の水深約700 m以浅で、III帯に見られた黄褐色に変質した個体のほか、明らかに化石と認定される褐色または灰色の変色した個体が含まれる。また、大型有孔虫類を含む浅海生種やコケムシ、サンゴ、巻貝などの化石が確認される地点も少なくない。それらの個体の多くが破損または溶食を受けており、再堆積した化石と考えられる。

V帯(水深880 m以深)：東シナ海の水深883 m (St. g87)～1,201 m (St. g70)の17地点、及び火山群島海域の水深923 m (St. g169)と932 m (St. g190)の2地点が該当する。V帯の群集には*Ammodiscus*属、*Cribrostomoides subglobosus*、*Discammina depressa*、*Eggerelloides scabra*、*Lituotuba lituiformis*、*Rhabdammina cylindrica*、*Marsipella elongata*、*Psammosiphonella*属、*Saccorhiza ramosa*など

多様な膠着質殻種と、*Melonis*属、*Sphaeroidina bulloides*、*Siphouvigerina hispida*などの石灰質殻種が含まれる。また、IV帯の特徴種である*F. wuellerstorfi*、*H. elegans*、*O. umbonatus*、*P. bulloides*なども産出する。多くの膠着質殻種と石灰質の*Sphaeroidina bulloides*、*Siphouvigerina hispida*、*F. wuellerstorfi*及び*Pullenia*属に染色個体が確認される。

なお、V帯の試料に含まれる浮遊性有孔虫には、溶解により脆弱になった考えられる遺骸が少なくない。また、東シナ海海域の沖縄トラフ内の各地点には比較的多くの放散虫遺骸が確認される。また、火山群島海域のSt. g169（水深923 m）では、*Ammodiscus*属（生体を含む）、*Rhabdammina*属、*Rhizammina*属などの膠着質殻種を主とする群集に、異地性と見られる石灰質の*Amphistegina*属、*Planorbulina*属、*Cibicidoides*属、*Discanomalina*属等が混入する群集が確認された。この群集とともに産する浮遊性種の遺骸の多くが灰色に変色した殻を有しており、異地性の底生種遺骸と共に再移動した個体と推定される。

4. 考察

4.1 有孔虫群集の広域分布

トカラ列島周辺海域において識別された4帯の底生有孔虫群集は、本調査海域の南側につづく奄美大島周辺海域において長谷川（2018）により確認された5帯のうちのII帯～V帯の群集とほぼ一致する。同様の群集区分は、これまでの地質情報研究部門による研究航海により、八重山列島周辺に至る海域で確認されており（小柳ほか、2010；長谷川、2020など）、その帯区分が南西諸島のほぼ全海域に適用できる可能性がある。

その一方で、区分された各帯の境界の水深は海域により若干の差異が確認された。たとえば、東シナ海におけるIV帯・V帯の境界は、本調査では約870 m（正確にはSt. g43（水深861 m）とSt. 87（883 m）の間）であるのに対し、八重山列島周辺では約980 m（960 mと1,000 mの間）に引かれる。すなわち、両海域間で水深に100 m以上の差があり、V帯の上限水深が、トカラ列島周辺で浅くなる。これに対し、IV帯・III帯の境界については、本調査海域では約550 mだが、八重山周辺では約470 mに引かれ、IV帯の上限水深がトカラ列島付近でむしろ深めになる。

底生有孔虫の水深に伴う群集遷移のパターンが、南西諸島に沿う東シナ海海域を通じてほぼ一定であることは、有孔虫群集の深度分布と東シナ海における密度成層との対応関係を示唆しており、表層の黒潮とその下層を占めて沖縄トラフを満たす中・深層水による成層構造を、群集の深度分布が反映しているものと考えられる。黒潮は南端の台湾東方から東シナ海に流入して、大陸棚縁に沿って北上し、トカラ海峡付近から九州東方の太平洋に抜ける。水野ほか（1991）による沖縄島西方での直接測流では、流軸部における深度ほぼ500 mまでの強い流れと、約900 mの無流面が確認され、また、流軸の位置は

概ね沖縄トラフの大陸斜面寄りに位置するが、春期には不安定になり東側に移動する傾向が示された。気象庁の資料によると、西南諸島周辺は、流軸の東側にあつて一般的に流れは弱いが、黒潮が太平洋に抜けるトカラ列島周辺海域のみは、常に東～南東向きの強い流れがある（気象庁、2023）。一方、中深層水は、琉球列島東側斜面の中層流が慶良間海裂（水深1,100 m）で分岐して、慶良間ギャップ通過流として東シナ海に流入する海流を起源とし（Na *et al.*, 2014）、その浅水部は黒潮下層に取り込まれ、深水部は大陸棚斜面反流に取り込まれて沖縄トラフ中深層を巡回しながら湧昇したあと黒潮下層に取り込まれて、北上すると考えられている（Nakamura *et al.*, 2013；Nishina *et al.*, 2016；中村、2017）。東シナ海におけるこのような海洋構造の実態が、底生有孔虫群集の分布にどのように反映されるのか、今後の定量的な解析が期待される。

4.2 トカラ列島周辺海域の異地性有孔虫遺骸

火山活動により生じた起伏の激しい海底地形と、その海域を通過する黒潮で特徴づけられるトカラ列島周辺海域では、それらにより生じる底層の強い流れが海底堆積物の再配置を促し、有孔虫殻の再移動や破壊・変質をもたらす。さらに、起伏に富む地形のもとで浅海域から深海域へ遺骸は流され、さらに、そこには堆積岩から洗い出された化石個体も加わる場合もある。それらの結果として、多彩な遺骸群集が局所的に形成されることが推定される。実際、前節で示した有孔虫群集に関わる指標についても、それぞれ水深の変化に伴う一般的な傾向が見られる反面、そこから大きく逸脱する「異常値」も確認された。以下では、浮遊性有孔虫率、底生有孔虫数及び膠着質殻種の異常値を例にとり、それらを手掛かりに、遺骸群集の形成条件について考察する。

4.2.1 浮遊性有孔虫率の異常値

全有孔虫群集の中で浮遊性有孔虫殻が占める割合（浮遊性有孔虫率；PF%）は一般的には沿岸域から沖合に向かって増加し、陸棚縁辺域で約50%、深海底では90%を越すとされる（たとえば、Brasier, 1980）。調査海域南方の奄美大島西方の東シナ海では、水深440 mで約55%、それ以深では90%以上となる深度変化が示されている（長谷川、2018）。本調査海域においても、火山群島海域を含めて概ね同様の深度分布が確認されるが、その一方で、水深が500 mより大きいにもかかわらず、小さいPF%値を示す地点が認められた。それは、火山群島域のSt. g288（水深584 m）とSt. g269（水深644 m）の、それぞれ65.2%と72.4%、並びに、東シナ海海域のSt. g43（水深861 m）とSt. g162（水深1,003 m）の、62.9%と77.5%である（第3図c）。

これら各地点では、有孔虫数もまた、 $FN_p \cdot FN_b$ ともに

小さく、とくにSt. g288とSt. g43では2桁以下となる(第2図a, 第3図a, b)。また、St. g162を除く3地点は含泥率の低い中・粗粒堆積物からなり、そこに含まれる有孔虫殻も中粒砂サイズの個体が多く、浮遊性種では幼体などの小型個体が極度に少ない。一方、St. g162は含泥率が非常に大きい細粒堆積物よりなり、浮遊性種には他の3地点とは異なり小型個体が多い。以下に、各地点について順に検討する。

St. g288及びSt. g269：両地点は、火山群島海域北部の口之島と平瀬に挟まれた狭小な緩傾斜面の、水深584 mと水深644 mに位置する。ともに火山岩片の細礫を含む中・粗粒砂よりなるが、St. g288には細粒砂とコケムシ・二枚貝などの生物碎屑物が少量含まれるのに対し、St. g269には軽石礫とウニ・コケムシ・サンゴなど多量の生物碎屑物が含まれる。両地点の有孔虫群集にはIV帯を特徴づける現地性底生種群集とともに、保存不良の大型有孔虫遺骸を含む浅海性種が確認されるが、とくにSt. g269で多い。一方、St. g288には幼形など小型の浮遊性個体が認められるほか、底生種の染色個体(生体)も確認される。

St. g288・St. g269両地点で認められる大型有孔虫遺骸などの浅海性有孔虫は浅海域からの異地性個体と考えられる。両地点を間に挟む平瀬と口之島から北側に続く芽瀬には、水深200 m以浅に平坦面があることから(横瀬ほか, 2011)、それらが異地性の有孔虫殻や生物碎屑物の主要な供給源の可能性が大きい。

平瀬と口之島は、黒潮が通過するトカラ海峡を横断するように連なる。口之島から諏訪之瀬島の島列のほぼ中央にあたる。海峡を通過する黒潮の流軸は、時期により変動するが、たとえば本調査航海が行われた2021年には、気象庁の資料によると年間を通じて口之島と中之島の間を、西(または西北西)から東(または東南東)へ通過していた(気象庁, 2023; 第1図に淡赤色で示す)。

黒潮流軸の厚みのある速い流れが海峡を横断する島嶼の間をすり抜けるように通過することを想定すると、口之島と平瀬の狭間にあるSt. g288・g269両地点はほぼ恒常的に強い流れに晒されると推定される。両島間のシルを挟んで下流側に位置するSt. g269においてカレントリップルが確認されていることは(鈴木ほか, 2023)、一方向の強い流れの影響が水深600 mの海底にまで及んでいることを示している。それに対し、上流側のSt. g288では底質がやや細かく、底生種*Reophax*属と*Sigmoilina sigmoidea*の生体(染色個体)が確認され、さらに、浮遊性有孔虫に小型個体が含まれることなどから、下流側に比べて流れがやや緩やかであると推定される。

St. g269とSt. g288の両地点と同様水深(550~700 m)で、生物碎屑物を含む近隣の2地点St. g245とg247は、ともに海丘の麓に位置しており、そのPF%値は78.5%と

80.0%である。また、海丘の麓から離れた位置にある5地点(St. g223, g246, g285, g329, g327)ではPF%値が92~98%と非常に大きい(第1表)、それらに比べると、St. g269・St. g288のPF%値(72.4%と65.2%)はかなり小さいといえる。そのため、トカラ列島を構成する火山島の基底に相当する500~700 mの水深で確認される生物碎屑物は、各々の地点に隣接する海丘・海山の斜面上部を起源する異地性粒子であると考えられる。

さらに、St. g269・St. g288両地点では有孔虫数(FN_p , FN_b)が著しく小さいことも顕著な特徴である。すなわち、両地点のうちでより大きい値を示すSt. g288でも、 FN_p が246個体/g、 FN_b は131個体/gであり、前述した生物碎屑物を含む近隣の2地点と比べると、St. g247(806個体/g)の1/3以下、St. g245(4,189個体/g)の1/10に満たない。また、St. g269にいたってはさらに小さく、 FN_p はSt. g288の1/4、 FN_b は1/6である。

St. g269・St. g288両地点の有孔虫数が著しく低下した要因としては、碎屑物の相対的付加による希釈効果と有孔虫殻の溶解か破壊が考えられる。また、両地点で浮遊性有孔虫率(PF%)が小さくなっており、浮遊性有孔虫殻の逸失を促すメカニズムも併せて働いたことが示唆される。既に述べたように、両地点を間に挟む口之島と平瀬の山体は恒常的に黒潮の強流に晒され、また、その岩礁性海岸は波浪の強力な圧力を受けていることから、常時、多量の碎屑物が生成されて、周辺の海底に沈積していることが予想される。その結果、堆積物中の有孔虫殻は多量の碎屑物粒子により希釈されるので、その賦存量が相対的に減少したと考えられる。さらにこの海域の浮遊性有孔虫は、その死後の殻が海底に向かって落下する間に黒潮の強い流れによって、あるいはまた、海底に沈積した遺骸が底層の流れによって、吹き分け(winning)を被ることにより、とりわけ小型個体が下流側のより遠方に運び去られることが予想される。とくに、カレントリップルが確認されたSt. g269の周辺では、その効果が強く働き、結果として、より多くの粗粒堆積物が集積したものと想定される。

St. g43：St. g43は奄美舟状海盆底の水深861 mにあり、含泥率が2.7%で淘汰良好の軽石質中・粗粒砂よりなり、大型生物遺骸は含まれない。有孔虫群集は中粒砂サイズに良く淘汰されており、浮遊性有孔虫には幼体などの小型個体がほとんど含まれない。また、底生有孔虫の生体(染色個体)は確認されない。この地点におけるPF%値は62.9%で、奄美舟状海盆周辺の各地点が80%以上であるのに対し、唯一の小さい値を示す。また、その有孔虫数は FN_p が9個体/g、 FN_b は16個体/gで、いずれも本稿の調査対象地点の中での最小値である。

良く淘汰された中・粗粒砂よりなり、有孔虫群集はPF%値と有孔虫数がとくに小さく、生体がまったく見られないことなど、St. g43にみられる特徴は強い水流に

よって形成される流動的な堆積物を示唆する。これは、三澤・鈴木 (2022) 及び鈴木ほか (2022) により指摘された St. g43 とその周辺におけるサンドウェーブに符合すると考えられる。

St. g43 と同じ奄美舟状海盆底の2地点、St. g40 (水深 702 m) と St. g42 (水深 735 m) においても、 FN_p は 33 個体/g と 69 個体/g で、水深の割には著しく小さい値を示す。これらの3地点では、いずれも含泥率が低く、火山性碎屑物が非常に多くを占める点で共通することから、奄美舟状海盆底における小さい有孔虫数は、多量に運び込まれた碎屑物による希釈に負うところが大きいと推定される。その一方で、碎屑物を構成する軽石・スコリア・その他の碎屑物の量比には地点間で違いがあることから、近傍の地形や火山活動との関連性を引き続き検討する必要がある。また、St. g40 と St. g41 では、鈴木ほか (2022) によりカレントリップルが観察されており、先に述べた St. g288 の場合と同様に、底層流の影響が強いと考えられる。しかし、St. g40 (St. g41 は予察の対象外のためここでは言及しない) 及び St. g42 には、St. g43 には見られない有孔虫の小型個体や生体が確認されており、St. g288 で推定されたような、底層の強い流れによる吹き分けの効果はそれほど大きくないと考えられる。

St. g162 : St. g162 は沖繩トラフの縁辺部、横ガン曾根北西方の水深 1,003 m に位置し、含泥率が 86.9 % の有孔虫軟泥よりなる。有孔虫群集は、V 帯に特徴的な膠着質種が卓越する底生種群からなり、浮遊性種には白濁した脆い殻壁の個体が多く見られ、また、カウントの対象ならない破片化した殻が目立って多い。

St. g162 の PF% 値は 77.5 % で、近傍の沖繩トラフ底内の各地点が 85 % 以上であるのに比べて、明らかに小さい。隣接する St. g188 (水深 1,145 m) では、同様に有孔虫軟泥よりなるものの、その PF% 値は 92.1 % で、St. g162 とは大きく異なる。その違いは有孔虫数の差異によるもので、St. g162 における浮遊性有孔虫数 FN_p が 1,071 個体/g で St. g188 の約 1/2 であるのに対し、底生有孔虫数 FN_b は 310 個体/g で、逆に St. g188 よりも多い。また、St. g162 では底生有孔虫の 95.7 % が膠着質殻種であるのに対し、St. g188 では 75.6 % で、かなりの差がある。すなわち、St. g162 の PF% 値が小さい要因は、底生有孔虫群集で膠着質殻種が卓越することにある。

深海底において膠着質殻種が多い場合、一般的には、まず石灰質殻の溶解が想起される。その溶解によって、浮遊性種とともに底生種群集の中でも脆弱な石灰質殻の個体が失われると、相対的に膠着質殻種の割合は増加する。St. g162 の浮遊性種で確認される白濁して脆くなった殻壁やその破片は溶解を受けたことを示している。さらに、これと同様に白濁した脆い浮遊性種の殻は、近隣の St. g188 のほか、有孔虫軟泥からなる沖繩トラフ底の3地点 (St. g58, g134, g108) でも確認される。そこで、以

上の5地点について底生種群集の中で膠着質殻種が占める割合を比較すると、その割合がもっとも大きいのは水深 1,003 m の St. g162 で、もっとも小さいのは最深地点の St. g108 (1,145 m) である (第1表)。しかし、この事実をもって、もっとも深い水深 1,145 m よりも、1,003 m で石灰質殻の溶解が進んでいると判定するのは早計であろう。

沖繩トラフ底で溶解が目立ち始める水深のリソクライン (lysocline) は、底生有孔虫群集の V 帯の上限深度に相当する水深約 900 m と考えられる。しかしその水深は、約 3,500 m とされる太平洋の深海底におけるリソクラインに比べて余りにも浅い。またこの海域の中層では、酸素極小層 (OMZ) のように有機物に富む堆積物が形成されるほどの表層生産性は確認されていない。そのため、St. g162 で膠着質種が多くなり、あるいは St. g108 で石灰質殻種が比較的増加する原因としては、CCD や OMZ のようにある程度の広がりをもつ事象ではなく、より局所的な要因が寄与している可能性が高い。沖繩トラフの縁辺部に位置する5地点は、活動的なテクトニクスのあることから、その運動に付随して、さまざまな微小環境が形成されていることが予想される。底生有孔虫は生物の一員として、種ごとに固有の環境に適応して生息することから、水深、水塊分布、栄養塩、溶存酸素などの比較的広域に及ぶ環境要素とは別に、局地的で多様な環境条件との関連性をも考慮して、より詳細な有孔虫分類にもとづく解析が必要と考えられる。

4. 2. 2 底生有孔虫数の異常値

底生有孔虫数 (FN_b) は、一般に、浅海域では地点によるばらつきが大きいのが、深海に向かって減少し、およそ 500 個体/g 以下に収束する。奄美大島周辺海域の例では、浅海域では 1,500 個体/g 程度までのばらつきがあるが、水深約 500 m を境に深海部では概ね 1,000 個体/g 以下となる (長谷川, 2018)。そこで、それらの値を大きく上回る値を異常値とすると、本調査海域では、火山群島海域の St. g90, St. g91, St. g268 の3地点が該当する (第2図a)。

これらのうち、St. g90 (水深 353 m; 小宝島南東の斜面中部) と St. g268 (水深 450 m; 中之島北西方の海丘東斜面下部) では、底生有孔虫数とともに浮遊性有孔虫数 (FN_p) も 5,000 個体/g 以上の比較的大きい値を示す。両地点とも、試料は含泥率が 10 % 未満で、火山岩細礫を含む中-粗粒砂よりなる。また、*Amphistegina* 属、*Miniacina miniacea* などの熱帯浅海性有孔虫に加えて、コケムシ・サンゴなどの骨格を含む生物碎屑物が含まれるが、それらは斜面上方の浅海域からもたらされた異地性個体と推定される。有孔虫群集の概要を調査した限りでは、生体は極めて希で、化石と見なされる黄色に変質した個体と異地性個体が群集の大半を占めると見られる。

St. g91 (水深 808 m; 小宝島東方の斜面下部) では含泥率が約 20 % とやや大きい。 FN_p については他の2地点よ

りもさらに大きく、11,000個体/gを越す。また、定性的観察ではあるが、有孔虫群集には幼体を含む小型個体が多くに多いことを特徴的とする。この地点は小宝島の麓に位置し、前項(4.2.1 浮遊性有孔虫率の異常値)で述べた奄美舟状海盆のサンドウェーブが確認された領域の北西側にあたる。そのベッドフォームの形状から推定される流向が南東から南南東であることから(鈴木ほか, 2022), St. g91はサンドウェーブ領域を通過する流れの上流側にあたる。また、この地点の上流側には小宝島があるので、流れに沿って眺めると、St. g91は小宝島の島陰に入ることになる。そのため、St. g91の堆積物は、サンドウェーブを形成する水流の縁辺部の比較的弱い流れが、小宝島の縁を廻った裏手で澱みを形成したことで、そこに浮遊性種の幼生を含む小型個体が沈積したものと推定される。

4. 2. 3 膠着質殻種の増加

底生有孔虫群集の中で膠着質殻種が占める割合は、沿岸汽水域を除く通常の海域では全般的に少なく、深海底に至って急激に増加する。しかし、口永良部島北方のSt. g343では、水深502 mにしては例外的に、膠着質殻種が33.9%を占める特異な組成を示す。同地点は屋久島、薩摩硫黄島などに囲まれる小海盆内に位置しており、試料の含泥率は東シナ海における一般的傾向に比べて異常に大きく、80%に達する。また、水洗後の砂粒部の観察では、フィーカルペレットや、比較的多くの放散虫と珪藻が確認された。本調査海域において放散虫が目立って産出するのは水深約900 m以深、底生有孔虫のV帯に相当する深海部に限られることから、比較的水深の浅い(約500 m) St. g343における産出は特異な現象といえる。

その底生有孔虫群集は、おもにⅢ帯を特徴づける *Ammolagena clavata*, *Globocassidulina*属, *Paracassidulina*属などと、*Globobulimina auriculata*, *Chilostomella*属などの貧酸素種群で構成されるが、それらに加えて、IV帯~V帯に特徴的な *Pullenia bulloides*, *Sigmoilina sigmoidea*や膠着質殻の *Amodiscus*属, *Bathysiphon*属, *Saccorhiza*属なども含まれる特異な様相を呈する。これと似た群集は、隣接するSt. g342(水深592 m)でも確認されるが、膠着質殻種については12.6%で、St. g343に比べてかなり少なく、産出する種数も限られることから、その特異な群集の分布はきわめて局地的であると見なされる。

なお、St. g343の有孔虫群集に貧酸素環境を示す種群も含まれることは、その海底付近が貧酸素化し、とくに海底下の微小環境において、貧酸素領域が浅くなった可能性を示唆する。また、St. g343の試料には、フィーカルペレットや珪藻が含まれる。それらは、植物プランクトンが増殖し、それに伴って動物プランクトンが増加したことの痕跡であり、それらの集積によって海底付近が富栄養化し、結果として海底下の貧酸素化が引き起こさ

れたと考えられる。また、その一方で、底生有孔虫群集には浅内生でⅢ帯を特徴づける種が一定の割合で含まれており、海底表層部にはそれらが生息する余地があったことも確実であろう。実際、船上での試料の採取時に酸化層が確認されている。そのため、海域の表層における生物生産性の高まりは、おそらくは季節的ブルームのような比較的短期間のイベントであると推定される。さらに、フィーカルペレットは隣接するSt. 342では確認されていないことから、動物プランクトンの増加はかなり限定された範囲で生じる局地的現象と推定される。

St. g343において、水深に相応するⅢ帯の組成に加えて、より深い水深を特徴づける種群が含まれる事実は、深度帯の区分、あるいは帯を特徴づける種の認定について、再検討の余地があることを示している。とくにV帯を特徴づけるとされる膠着質殻種については、これまでの調査地点数が十分でなかったこともあり、今後、分類学的検討とともに、種の分布をさらに調査し、その生息環境に関する理解を深める必要がある。

5. まとめ

GB21-1, 2 及び3航海によりトカラ列島周辺海域より得られた有孔虫群集について、分布の概要を検討するため、水深185 m~1,201 mの計73地点を選定して、底生種と浮遊性種の単位乾燥重量あたりの有孔虫個体数、底生有孔虫殻質構成比、浮遊性有孔虫率、翼足類-浮遊性有孔虫比を算出し、それぞれの水深による変化を分析した結果、産総研によるこれまでの南西諸島周辺海域調査で得られたものと概ね一致する傾向が確認された。また、底生有孔虫群集の主要構成種の分布をもとに4帯の群集を認定した。各群集の分布は、これまでに南西諸島周辺海域で報告されたI帯~V帯のうち、もっとも浅い帯の群集を除く4帯の群集に対応することを確認した。しかし、もっとも深いV帯の群集の上限水深が、本調査海域では最南端の八重山周辺に比べて100 mほど浅く、深度帯の水深範囲が海域により異なることが判明した。さらに、V帯を特徴づける膠着質種の一部がⅢ帯に相当する水深でも確認されており、さらに詳細な検討の必要がある。

浮遊性有孔虫率、底生有孔虫数、及び膠着質殻種の産出率など、算出した有孔虫指標の異常値に着目してその要因について検討し、局所的に形成される特異な有孔虫群集の形成過程の考察を行った。トカラ列島周辺海域は起伏に富む複雑な海底地形と黒潮の強い流れで特徴づけられ、地形条件の違いによって局所的な底層の流れが生じる結果、多様な有孔虫遺骸群集が形成されることが推定された。

本稿は調査航海で採取された全試料の半数余にもとづく概要調査の結果である。これらをもとに、今後、多くの試料を加えて行われる検証の成果は有孔虫化石群集の

タフォノミーという観点において多くの示唆を与えるものであり、堆積盆解析のための基礎的資料として大きな意義があると考えられる。そのための多彩な事例を蓄積するうえで、トカラ列島周辺海域はとくに好適な海域として注目される。

謝辞: 本研究の機会を与えてくださった産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループの方々、並びに試料採取に際してご尽力いただいた研究員及び望星丸の乗組員の方々に深く感謝いたします。また、本概報をまとめるにあたり、同所海洋地質研究グループの鈴木克明博士には航海に関する情報を提供して頂いた。さらに、同グループの有元 純博士から査読者として、多くの有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- Boltovskoy, E. and Wright, R. (1976) *Recent Foraminifera*. R. W. Junk b.v., The Hague, 515p.
- Brasier, M.D. (1980) *Microfossils*. George Allen and Unwin, London, 193p.
- 橋本 晋・井上博敬 (2009) 南西諸島周辺における黒潮の流路変動と海況変動, 測候時報, **76**, 特別号, S55-S81.
- 長谷川四郎 (2018) 奄美大島西方海域の底生有孔虫群集 (予報). 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 109-116.
- 長谷川四郎 (2020) 八重山列島周辺海域の底生有孔虫群集 (予報). 井上卓彦 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」令和元年度研究概要報告書—石垣島・西表島・与那国島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 80, 106-114.
- 長谷川四郎・内村仁美 (2017) 奄美大島周辺海域の底生有孔虫群集 (予報). 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成28年度研究概要報告書—宮古島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 72, 85-91.
- 海底地形の名称に関する検討会 (2022) 承認された海底地形. 海上保安庁, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOKAI/ZUSHI3/topographic/JCUFN/jcufn.html>. (閲覧日: 2022年12月19日)
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).
- 気象庁 (2023) 旬平均海流. 気象庁, 各種データ・資料, 海洋の健康診断表, 海流に関する診断表. https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyoku/jun/current_HQ.htm. (閲覧日: 2023年4月19日)
- 小柳満佐子・増田侑美・大井剛志・長谷川四郎 (2010) 沖繩本島西方海域の底生有孔虫群集 (予報). 荒井晃作 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成21年度研究概要報告書—沖繩島北西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 51, 133-138.
- Loeblich, A. R., Jr. and Tappan, H. (1964) Sarcodina chiefly "Thecamoebians" and Foraminiferida. In Moore, R. C., ed., *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part C, Protista 2*. Lawrence: Geological Society of America and University of Kansas Press, i-xxxii + C1-C900.
- Loeblich, A. R., Jr., and Tappan, H. (1992) Present status of foraminiferal classification. In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., *Studies in Benthic Foraminifera, Proceedings of the Fourth International Symposium on Benthic Foraminifera, Sendai, 1990*, Tokai University Press, Tokyo, 93-102.
- 三澤文慶・鈴木克明 (2022) GK20 航海での高分解能サブボトムプロファイラー探査に基づくトカラ列島周辺海域の海底下浅部構造. 地質調査研究報告, **73**, 235-248.
- 水野信二郎・川建和雄・金子 新・長浜智基 (1991) 東シナ海における黒潮の直接測流結果 (Ⅲ) —海洋における熱および運動量フラックスの計測法に関する開発研究 (第1報) —. 九州大学応用力学研究所所報, no. 71, 1-18.
- Murray, J. W. (1973) *Distribution and Ecology of Living Benthic Foraminiferids*. Heinemann, London, 274p.
- Murray, J. W. (1991) *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman Scientific & Technical, Harlow, 397p.
- Na, H., Wimbush, M., Park, J.-H., Nakamura, H. and Nishina, A. (2014) Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **119**, 689-703.
- 中村啓彦 (2017) 黒潮の流路・流量変動の研究—源流域から九州東岸まで—. 海の研究 (Oceanography in Japan), **26** (4), 113-147.
- Nakamura, H., Nishina, A., Liu, Z., Tanaka, F., Wimbush, M. and Park, J.-H. (2013) Intermediate and deep water formation in the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 6881-6893.
- Nishina, A., Nakamura, H., Park, J.-H., Hasegawa, D., Tanaka, Y., Seo, S. and Hibiya, T. (2016) Deep ventilation in the Okinawa Trough induced by Kerama Gap overflow. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, **121**, 6092-6102. doi: 10.1002/2016JC011822
- 大井剛志・小柳満佐子・長谷川四郎 (2009) 沖繩本島周辺海域の底生有孔虫群集 (予報). 荒井晃作 (編) 「沖

縄周辺海域の海洋地質学的研究]平成20年度研究概要報告書—沖縄島東方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 46, 138–144.

鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・徳田悠希・千徳明日香 (2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **73**, 275–299.

鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治 (2023)

トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **74**, 259–286.

横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.

(受 付 : 2022年10月31日 ; 受 理 : 2023年8月25日)

トカラ列島周辺海域における現生貝形虫相の空間変化

中野 太賀^{1,*}・岩谷 北斗^{1,*}・鈴木 克明²・板木 拓也²

NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki and ITAKI Takuya (2023) Spatial variations in the modern ostracode fauna in the adjacent sea of Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 315–324, 4 figs and 2 tables.

Abstract: We studied the spatial distribution of the modern ostracode in the “Tokara gap”. We examined the ostracod faunal composition in 5 surface sediments collected by GB21-3 cruise (AIST). As a result, at least 150 species of ostracods in 54 genera were identified. Most of the assemblages were subtropical and tropical water species that have been reported from the East China Sea. Four ostracode bioassociations and four biofacies were discriminated based on R-mode and Q-mode cluster analyses. Ostracode bioassociations and biofacies tended to vary with the mud content. We could not find a faunal change in the Tokara gap. On the other hand, the distribution of ostracode fauna was clearly changing between the East China Sea and the Philippine Sea. This spatial distribution variation might be accompanied by the change in the Kuroshio axis. The Kuroshio Current likely influenced modern ostracode fauna in the study site.

Keywords: Nansei Islands, Tokara Gap, biogeographic boundary, ostracode

要 旨

本研究では、生物地理分布境界である渡瀬線が設定される小宝島、悪石島間における海洋生物相の変化を、現生貝形虫をモデル生物として用いて検討した。解析にはGB21-3航海によって採取された表層堆積物5試料を用い、トカラ列島北部周辺海域における現生貝形虫組成の空間分布を明らかにした。結果として、54属150種以上の貝形虫が認められた。産出した貝形虫の多くは東シナ海で一般的に報告される亜熱帯–熱帯域に生息する分類群であった。R-modeクラスター分析の結果、4つの貝形虫種群に区分され、Q-modeクラスター分析では4つの貝形虫相が認められた。これらの種群や貝形虫相は特に底質によって変化する傾向が認められた。また、トカラ列島南部周辺海域の貝形虫相と比較した結果、貝形虫相は渡瀬線によって変化せず、黒潮の流路分布と調和的な傾向を示した。トカラ列島周辺海域の貝形虫相の空間分布は黒潮の影響を受けて形成されている可能性が示された。

1. はじめに

トカラ列島は、九州から台湾にかけて連なる琉球弧のうち、北部から中部琉球弧に位置する島嶼群である(兼

子, 2007;横瀬ほか, 2010)。トカラ列島に属する小宝島・悪石島間の海域には、トカラギャップと呼ばれる水深1000 mを超える海底谷が横たわり、北琉球と中琉球との地理的な境界となっている(木崎, 1985;木村, 1996)。このトカラギャップは、渡瀬線(第1図)と呼ばれる陸生生物の熱帯分類群の北限と暖帯分類群の南限とを区分する生物地理区境界に一致するとされてきた(例えば、黒田, 1931;木村, 1996)。また、トカラギャップ周辺海域は、陸生生物のみならず浅海性魚類の生物地理境界に重なるとする報告もあり(坂井ほか, 2005)、南西諸島から九州以北にかけて大きく変化する海洋生物相を理解する上でも重要な位置にある。

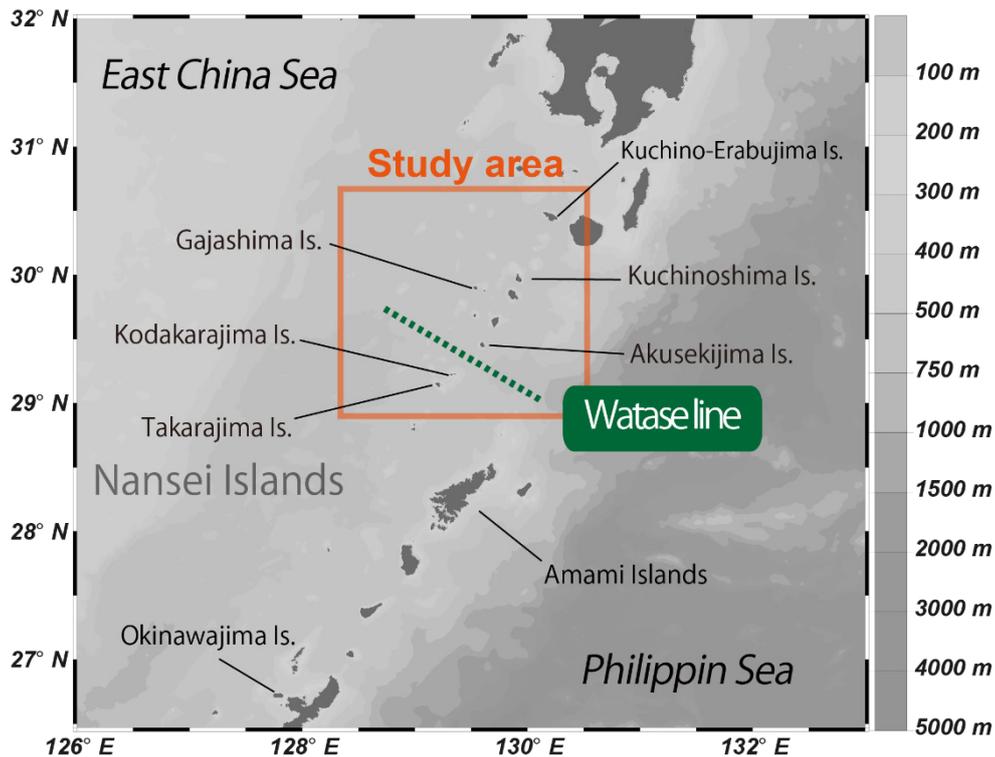
しかしながら、近年では陸生動物の文献調査および多分類群の生物地理学的解析の結果、渡瀬線によって生物相に変化は無いとする報告もあり(Komaki, 2021)、“ギャップ”と呼ばれる海底地形が生物の分散にどの程度影響をもたらすのかについては議論の余地がある。また、浮遊性や遊泳性の生活史を持つ海洋生物は、一般に空間的な分散能力が高いために(関口, 2009)、生物地理上の境界線を明確にとらえることが難しい。

このように、トカラギャップが海洋生物相にどのような影響を与えるのかは十分に解明されておらず、海洋生

¹ 山口大学大学院創成科学研究科 (Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, Yamaguchi 753–8512, Japan)

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

* Corresponding authors: NAKANO, T., Email: taiga.fkmf@gmail.com / IWATANI, H., Email: hokuto_i@yamaguchi-u.ac.jp



第1図 調査地域広域海底地形図. 図中の等深線の間隔は100 mである.

Fig. 1 Bathymetric map of the northern Okinawa Trough. The spacing between contour lines in the figure is 100 m.

物相において渡瀬線は明確に認定されていなかった。こうした問題を解決する方法として、例えば貝形虫などの浮遊幼生期を持たず種の分散範囲が狭い海洋生物種(安原, 2007)をモデル生物として用い、トカラギャップ周辺海域の海洋生物相とその地理分布について検討するという方法が考えられる。

貝形虫は、体長1 mm以下程度の石灰質の殻をもつ微小な甲殻類であり、水温や塩分、底質など生息場の多種多様な環境変化に敏感に反応し、その種構成や多様性などを変化させるため、海洋環境の良い指標として利用される(例えば、安原, 2007; Irizuki *et al.*, 2009; 森下ほか, 2010; Iwatani *et al.*, 2016; 田中, 2016; 塚越, 2017)。中野ほか(2022)は、産業技術総合研究所地質調査総合センターが実施したGB21-1航海によって採取された表層堆積物を用い、トカラギャップ南方の宝島周辺海域における現生貝形虫の空間分布を検討した。結果として、宝島周辺海域から初めて現生貝形虫の産出を報告するとともに、調査海域の貝形虫群集分布は水深に伴い変化する底質の影響を大きく受けると結論付けた。しかしながら、中野ほか(2022)は、トカラギャップより北方の海域を対象としておらず、トカラギャップを挟んで海洋生物がどのように変化するののかについては検討していない。そこで本研究は、トカラギャップ北方に位置する悪石島から

屋久島周辺海域(第1図)における現生貝形虫相の空間分布を明らかにすると共に、その制御要因について検討した。

2. 試料と方法

本研究は、産業技術総合研究所地質調査総合センターにより実施されたGB21-3航海にて、トカラ列島北部に位置する口之島周辺海域で採取された表層堆積物を試料として用いた。調査海域の底質は主に砂質堆積物や泥質堆積物であり、サンゴ等の生物遺骸や火山性の碎屑物が多く試料で確認された(鈴木ほか, 2023)。GB21-3航海にて木下式グラブ採泥器により採取された78点の底質試料のうち、60試料から金属製スパチュラにより表層約1 cmを分取し、貝形虫分析用試料とした。本研究では、調査海域における貝形虫群集の水平分布及び水深毎の特徴を把握するため、5試料[試料採取地点: g270(試料採取水深:268 m), g265(478 m), g343(502 m), g328(639 m), g201(736 m)]を貝形虫分析に用いた(第1表)。また、底質を定量的に判断するため、調査海域から網羅的に選出した36試料を含泥率分析に用いた(第1表)。

本研究において、多様度及び均衡度の産出、各種クラスター分析、ノンパラメトリック多変量解析(PERMANOVA, PERmutational Multivariate ANalysis Of VAriance)等の

トカラ列島の現生貝形虫相 (中野ほか)

第1表 試料採取地点の詳細と含泥率分析結果. *は貝形虫分析に使用した試料を示す.

Table 1 Sample information and results of the mud contents analysis. Stars show samples used for ostracode analyses.

site no.	latitude (° N)	longitude (° E)	Water depth (m)	sampler	wet weight (g)	Mud content (%MD)
g122	29.41	129.98	968	K-grab	71.39	16.38
g145	29.45	129.75	915	K-grab	95.62	59.08
g146	29.48	129.85	789	K-grab	152.68	38.34
g148	29.53	130.06	671	K-grab	95.81	1.00
g168	29.46	129.41	861	K-grab	288.98	49.42
g169	29.48	129.51	923	K-grab	201.26	2.30
g171	29.54	129.72	799	K-grab	277.75	4.34
g174	29.62	130.03	525	K-grab	76.15	3.80
g199	29.71	129.91	669	K-grab	245.11	22.08
g201*	29.74	130.10	736	K-grab	66.43	13.09
g202	29.76	130.17	519	K-grab	231.27	4.30
g226	29.83	130.07	569	K-grab	201.98	11.47
g249	29.92	130.04	624	K-grab	248.54	11.35
g250	29.95	130.14	599	K-grab	195.52	2.39
g265*	29.85	129.38	478	K-grab	25.67	6.57
g266	29.87	129.49	665	K-grab	250.19	4.14
g269	30.01	130.01	644	K-grab	133.86	0.43
g270*	30.04	130.11	268	K-grab	154.72	6.83
g283	29.97	129.46	628	K-grab	190.01	5.01
g291	30.18	130.29	563	K-grab	128.88	3.64
g302	30.16	129.84	606	K-grab	270.76	25.92
g304	30.22	130.05	607	K-grab	175.59	11.88
g306	30.27	130.26	595	K-grab	205.09	1.80
g315	30.26	129.81	636	K-grab	83.83	16.08
g316	30.25	129.92	618	K-grab	170.63	27.87
g317	30.31	130.01	615	K-grab	211.85	21.95
g320	30.40	130.31	590	K-grab	227.94	12.03
g326	30.32	129.67	548	K-grab	22.78	23.00
g327	30.31	129.76	676	K-grab	189.46	16.32
g328*	30.34	129.89	639	K-grab	117.73	26.79
g329	30.40	129.98	639	K-grab	174.86	37.43
g337	30.39	129.65	752	K-grab	139.31	10.34
g340	30.51	129.95	598	K-grab	149.15	23.19
g343*	30.56	130.27	502	K-grab	154.13	90.27
g351	30.61	130.02	185	K-grab	221.74	0.63
g356	30.62	129.68	536	K-grab	230.93	9.40

統計解析は、統計解析ソフトのPAST (Paleontological Statistics ; Hammer *et al.*, 2001)を用いた。

試料から抽出した貝形虫の群集構造を明らかにするために多様度 (H)、均衡度 (E)、産出頻度を算出した。多様度指数は、次のように定義されるShannon-Wiener指数 (H)を用いた： $H = -\sum p_i \ln p_i$ 、ここで p_i は試料 i 番目の分類群の割合である。多様度 ($H \geq 0$)は、ある試料に産する種数が多く、各種が均等に産出する程、高い値をとる。均衡度は、試料中に分類群がどの程度均等に含まれているかを表す指標である。また、均衡度 E はShannon-Wiener指数 H と分類群数 S を用いて $E = e^{-H/S}$ で示される。均衡度 E は0-1の範囲を持ち、ある試料に各種が均等に

産出するほど高い値をとる。産出頻度は、属の同定が不可能であった破片殻を含めた湿潤試料1 gあたりの個体数として算出した。

研究試料を採取した地点を、産出した貝形虫の種構成および産出頻度に基づいた客観的なグループに分類するため、Q-modeクラスター分析による群集解析を行った。また、産出した貝形虫種を生態的に類似するグループに分類し、それぞれのグループの各地点における産出様式を明らかにするためにR-modeクラスター分析を行った。いずれの分析も各地点、各タクサにおける貝形虫の個体数を変数として用いた。この様にQ-mode及びR-modeクラスター分析により、地点毎の類似度、種毎の類似度を

推定する手法は貝形虫組成を統計的に分析する際に一般的に用いられる手法である(例えば, Iwatani *et al.*, 2011; 中野ほか, 2022).

Q-modeクラスター分析は1試料から3個体以上産出する58の分類群を, R-modeクラスター分析は全個体数中における産出割合が1%以上であった16の分類群を対象に検討を行った. クラスター分析の類似度には重複度指数(Horn, 1966)を用い, 算出された類似度を非加重結合法(UPGMA: Unweighted Pair-Group Method with arithmetic Average)により, 類似度の高いほうから順次クラスターを構成した.

2.1 含泥率

研究試料の含泥率を得るために, 以下の手順で試料の処理を行なった.

まず, 試料の湿潤重量を計測後, 約60℃に設定した恒温乾燥器内で試料を完全に乾燥させ, 乾燥重量[Bulk_dry (g)]を計量した. 次に, 乾燥させた試料を孔径63 μmの篩上で水洗し, 砂粒子サイズより粗粒な画分を回収した. 洗浄した試料を上記と同様に恒温乾燥機内で乾燥させ, 水洗後の乾燥重量[Sand_dry (g)]を計量した. 先に得られた試料の水洗前の乾燥重量[Bulk_dry (g)]と, 水洗後の乾燥重量[Sand_dry (g)]の差を求めることで含泥率[%MD]を算出した. 本研究による含泥率の算出法は次式によって示される:

$$\%MD = [\text{Bulk_dry (g)} - \text{Sand_dry (g)}] / [\text{Bulk_dry (g)}] \times 100.$$

2.2 貝形虫分析

含泥率分析において分画した粒径63 μmより粗粒な画分には, 翼足類や棘皮動物等の大型の生物遺骸, 軽石等の礫が多く含まれていた. また同定が困難とされる, 成長ステージが初期段階の貝形虫幼体殻(安原, 2007)や微小な破片殻も多く確認された. これらを除くため, さらに試料を篩過し, 粒径125 μm以上かつ1 mm以下の画分を貝形虫分析に用いた. 篩過された試料は, 保存状態が良好な貝形虫が約200個体含まれるように簡易分割器を用いて適宜縮分し, 8-50の倍率に設定した双眼実体顕微鏡下で抽出を行った. なお, ここでの個体数は右殻・左殻を区分せず, それぞれ1個体とし, 両殻は2個体として計数した. また, 殻の破損が著しく同定が不可能であった場合は“破片”, 成長ステージが非常に初期段階であり同定が不可能であった場合は“幼体”として, 同定可能であった個体とは別に計数した.

産出した貝形虫は, ほぼすべてが遺骸殻であり, 軟体部が残存していた個体は, 口永良部島北方の地点(試料採取地点: g343)と口之島北方の地点(試料採取地点: g270)でそれぞれ1個体が確認されるに留まった. したがって, 本研究では, 殻形態の特徴に基づき種の同定を行った.

3. 結果

3.1 含泥率

含泥率測定の結果, 36試料のうち34試料が, 含泥率50%未満の砂質堆積物で構成され, 含泥率が90%以上の泥質堆積物が確認された地点は口永良部島北方の1地点(g343)に限られた(第1表). また, 含泥率と試料採取地点の水深の間に相関関係は認められなかった. この特徴は, 鈴木ほか(2023)により示された「トカラ列島周辺海域の底質は, 必ずしも粒径と水深が対応するわけではなく, 深い水深に粗粒堆積物が分布する場合も多い」という傾向とも一致している.

3.2 貝形虫

本研究で貝形虫の分析対象とした5地点すべてから貝形虫が産出し, 1172個体の貝形虫殻を抽出した. 種が不明であった個体や破片殻を除き, 少なくとも54属150種の貝形虫が確認された. 確認された種の多くは東シナ海で一般的に報告されている亜熱帯から熱帯域を分布の中心とする分類群であった(例えば, Ruan and Hao, 1988; Tabuki and Nohara, 1998; Hou and Gou, 2007; Iwatani *et al.*, 2013).

3.2.1. 群集構造

分析の結果を第2表に示す. 種多様度は, 2.13-3.63の値を取り, 平均値は3.11であった. また, 属多様度は, 1.94-2.87であり, 平均値は2.49であった. 種均衡度は, 0.31-0.63の値を示し, その平均値は0.50であった. 産出頻度の値は6.74-37.08(個体/g)であり, 平均値は20.32(個体/g)であった.

種多様度は, 水深400-650 mで採取された3試料(g265, g328, g343)が3以上と相対的に高い値を示し, 最も水深が浅い試料(g270)が2.13と低い値であった. 対して, 種均衡度は水深による変化が認められなかった. また, 産出頻度は, 水深と強い正の相関($r=0.87$, $p=0.05$)が認められ, 水深が増加する程, 堆積物湿潤重量1 g中に含まれる貝形虫の個体数が増加することが明らかとなった.

3.2.2. クラスター分析

R-modeクラスター分析の結果, 類似度約0.56を境界に4つの種群(SX, NA, AC, Kr)に区分された(第2図).

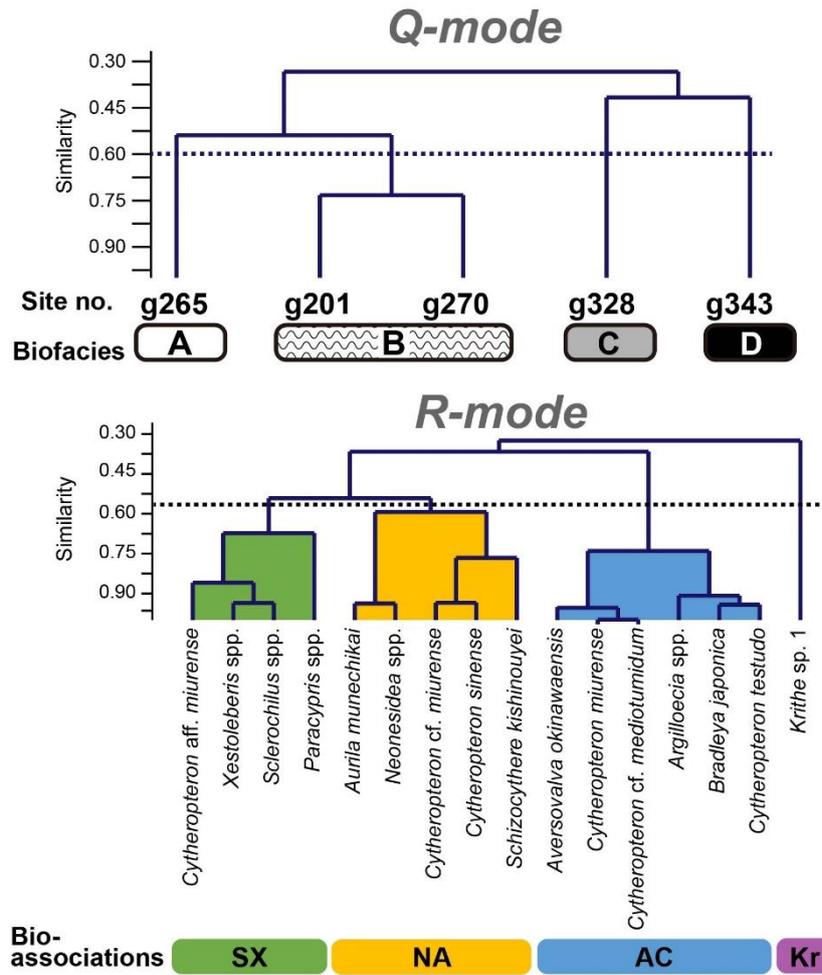
種群SXは, *Sclerochilus* spp.や*Xestoleberis* spp.といった海藻や石灰藻上に生息するとされる葉上種(Sato and Kamiya, 2006)によって特徴づけられ, その産出割合は, 水深600 m以深の2試料(g201, g328)で低く(<5%), 水深が大きくなるに従って減少する傾向を示した. 種群NAは, 熱帯から亜熱帯の浅海環境を生息の中心にする*Neonesidea* spp. (Maddoks, 1969; 鶴見・神谷, 2007)や, ホンダワラやアマモ等が繁茂する湾口に生息する

トカラ列島の現生貝形虫相 (中野ほか)

第2表 貝形虫の産出リスト(クラスター分析に用いた58タクサのみ).

Table 2 List of ostracodes from the adjacent sea of Kuchinoshima Island (The table displays 58 taxa used for cluster analyses).

sampling site	g201	g265	g270	g328	g343
species	736	478	268	639	502
<i>Acanthocythereis munechikai</i> Ishizaki, 1981	1			6	
<i>Argilloecia</i> spp.	2	5		14	11
<i>Aurila</i> cf. <i>corniculata</i> Okubo, 1980	4				
<i>Aurila</i> aff. <i>hataii</i> Ishizaki, 1968		2			4
<i>Aurila munechikai</i> Ishizaki, 1968	8		4		
<i>Aurila</i> aff. <i>uranouchiensis</i> Ishizaki, 1968			3		
<i>Aversovalva bispinea</i> Ruan, 1988		3			
<i>Aversovalva okinawaensis</i> Gou, 2007		2		21	1
<i>Aversovalva</i> sp. 2				3	
<i>Aversovalva</i> sp. 3				5	
<i>Bradleya albatrossia</i> Benson, 1972	1			4	
<i>Bradleya japonica</i> Benson, 1972	1			10	6
<i>Cardobairdia elongata</i> Ruan in Ruan & Hao(Yi-chun), 1988		3	1		1
<i>Cytherois leizhouensis</i> Gou & Huang, 1983		7	4		
<i>Cytheropteron abnormis</i> Guan, 1978		1		3	
<i>Cytheropteron</i> aff. <i>haoae</i> Zhao <i>et al.</i> , 2000		3			
<i>Cytheropteron</i> cf. <i>mediotumidum</i> Zhao <i>et al.</i> , 2000				12	
<i>Cytheropteron miurense</i> Hanai, 1957				23	1
<i>Cytheropteron</i> cf. <i>miurense</i> Hanai, 1957	8	12		9	
<i>Cytheropteron</i> aff. <i>miurense</i> Hanai, 1957		8			9
<i>Cytheropteron</i> aff. <i>nanhaiense</i> Zhao <i>et al.</i> , 2000		4			
<i>Cytheropteron pulchinella</i> Bonaduce, Masoli & Pugliese, 1976				3	3
<i>Cytheropteron quadrinodosa</i> Ruan, 1988				3	
<i>Cytheropteron</i> aff. <i>rhombiformis</i> Chen, 1981				3	6
<i>Cytheropteron sinense</i> Zhao, 1985	3	8		1	
<i>Cytheropteron testudo</i> Sars, 1869				5	7
<i>Cytheropteron uchioi</i> Hanai, 1957				5	
<i>Cytheropteron</i> sp. 7		1	3		
<i>Eucytherura japonica</i> Ishizaki, 1981	1			3	
<i>Eucytherura poroleberis</i> Zhao, 1988		1		3	
<i>Eucytherura utsusemi</i> Yajima, 1982	3				1
<i>Eucytherura</i> sp. 1		4		1	1
<i>Eucytherura</i> sp. 2		3			
<i>Hemicytherura cuneata</i> Hanai, 1957	3				
<i>Kritho</i> sp. 1	1				22
<i>Kritho</i> sp. 2					3
<i>Legitimocythere hanaii</i> Ishizaki, 1981				5	
<i>Loxococoncha japonica</i> Ishizaki, 1968	3				4
<i>Loxococoncha</i> aff. <i>japonica</i> Ishizaki, 1968			3		6
<i>Loxococoncha kattoi</i> Ishizaki, 1968	9		2		
<i>Loxococoncha propontica</i> Hu, 1983				5	
<i>Loxococoncha</i> sp. 1		3			
<i>Neonesidea</i> spp.	82	22	60	5	9
<i>Pacambocythere reticulata</i> Jiang & Wu, 1981				11	
<i>Paijenborchella iocosa</i> Kingma, 1948				4	
<i>Paracypris</i> spp.	1	9	7		
<i>Paracytheridea dialata</i> Gou & Huang in Gou Zheng & Huang 1983				3	
<i>Paracytheridea hispida</i> van den Bold, 1946				2	3
<i>Paranesidea</i> spp.	1		9		
<i>Phlyctocythere japonica</i> Ishizaki, 1981		4			
<i>Polycopis</i> spp.		6	3		2
<i>Pseudocythere caudata</i> Sars, 1866		5			
<i>Saida herrigi</i> Keij, 1975	1			5	
<i>Saida opima</i> Ruan, 1988				5	1
<i>Schizocythere kishinouyei</i> Kajiyama, 1913	8	1		7	
<i>Sclerochilus</i> spp.	1	7	2		5
<i>Semicytherura</i> sp. 1				1	4
<i>Xestoleberis</i> spp.	10	24	7	10	21
Others	48	32	14	43	54
Fragments	114	21	8	41	58
Total number of valves	314	201	130	284	243
Total ostracodes (/1g)	37.08	15.72	6.74	18.38	23.65
%fragments	36.31	10.45	6.15	14.44	23.87
Shannon_H (species)	2.81	3.38	2.13	3.63	3.58
Shannon_H (genus)	2.35	2.71	1.94	2.57	2.87
Evenness_e^H/S (species)	0.31	0.59	0.38	0.63	0.57
Evenness_e^H/S (genus)	0.33	0.52	0.41	0.44	0.50

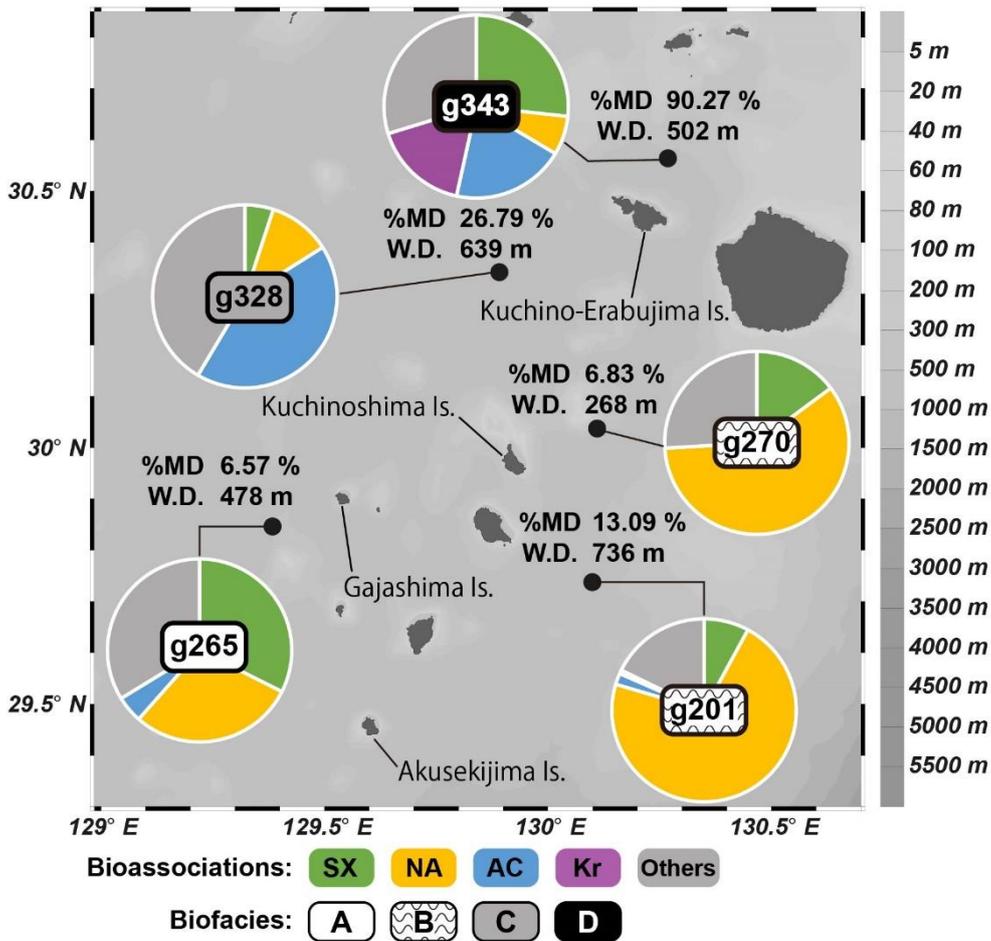


第2図 Q-modeクラスター分析およびR-modeクラスター分析結果。
 Fig. 2 Dendrograms showing the result of Q-mode and R-mode cluster analysis.

Aurila munechikai (Kamiya, 1988), 南シナ海において水深50–150 mに生息の中心を持つ*Cytheropteron sinense* (Zhao *et al.*, 2000) など、浅海種によって特徴づけられた。また、その産出割合は含泥率が20%未満の3試料 (g201, g265, g270) で高く (>30%), 含泥率20%以上の2試料 (g328, g343) は低い値 (<10%) であったことから、含泥率が増加するに従って減少する傾向を持つことが示唆される。種群ACは、産出割合が含泥率の比較的高い2試料 (g328, g343) で高い (>10%) 傾向を示し、低酸素で適度に有機物に富む堆積物中から報告される*Argilloecia* spp. (Cronin, 1983)、深海や低水温環境に普遍的に確認される*Cytheropteron testudo*、暖流影響下の浅海域に生息する*Cytheropteron miurense* (例えば、Hanai *et al.*, 1977; Zhao *et al.*, 2000) などが区分された。種群Krは、深海の泥底に生息するとされる*Krithe*属 (Zhao and Whatley, 1997) の1種のみから構成され、産出割合が含泥率に対して強い正の相関 ($r = 0.84$, $p = 0.01$) を示した。

Q-modeクラスター分析の結果、類似度約0.60を境界に4つの貝形虫相 (A, B, C, D) に区分された (第2図)。貝形虫相Aは、臥蛇島西方沖で採取された含泥率の低い1試料 (g265) から構成される。また、貝形虫相Bは中之島東方沖で採取された水深が最も深い地点 (g201) と、口之島東方沖で採取された水深が最も浅い地点 (g270) の2試料から構成され、いずれも含泥率は低い。貝形虫相Cは口之島北方沖で採取された砂泥質の試料 (g328)、貝形虫相Dは口永良部島北方沖にて採取された泥質の試料 (g343) からなる。

貝形虫相A及びBは、ともに浅海系タクサにより特徴づけられる種群NAや種群SXが多産するが、貝形虫相Bは種群NAがより優占する傾向にある (第3図)。貝形虫相Cは深海系タクサを含む種群ACが多産する。貝形虫相Dは種群Krが他試料と比較すると多く産出し、種群ACや種群SXもそれと同程度に含まれることによって特徴づけられた。



第3図 貝形虫相と貝形虫種群の相対頻度分布図。%MD含泥率(%), W.D.は試料採取地点の水深(m)を示す。等深線図はOcean Data Viewにより作成(Schlitzer, 2021)。

Fig. 3 Diagram showing biofacies and relative abundances (%) of ostracodes in each bioassociation in the study area. %MD —mud contents (%), W.D. —water depth (m). Bathymetric map was created using Ocean Data View (Schlitzer, 2021).

4. 考察

4.1 調査海域の貝形虫の制御要因

R-modeクラスター分析の結果、砂質の試料からは浅海生種群が優勢し、泥質の試料からは泥底種や深海生種群が多く産出する傾向が認められた。貝形虫相の分布が底質に依存することは広く知られており(池谷・塩崎, 1993), 調査海域の貝形虫相も底質の影響を受けている可能性がある。一方で、トカラギャップ以南の貝形虫相は、水深に伴い変化する底質の影響により制御される可能性が示唆されていたが(中野ほか, 2022), 本調査地域では貝形虫相の空間分布と水深の間に関係は認められなかった。

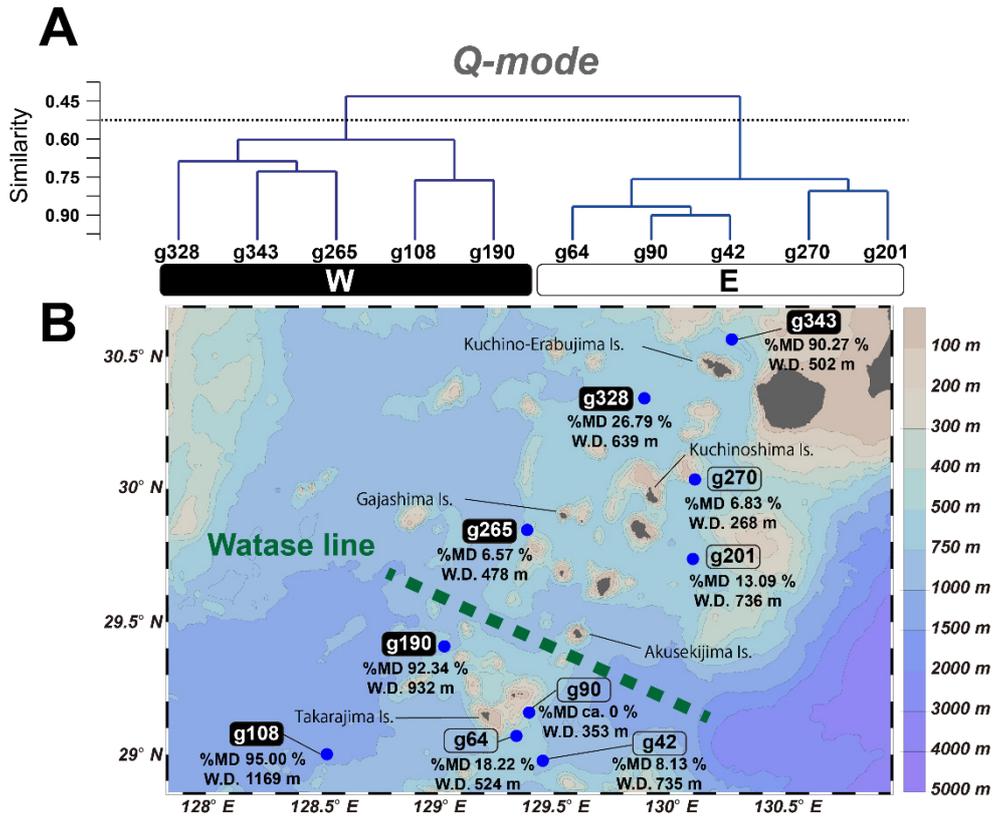
貝形虫相Dに該当する試料(g343)は、含泥率が低い地点が多いトカラ列島北部において、唯一、含泥率が60%を超える泥質の地点であった。この地点は深海泥底種で

ある*Krithe*属や深海域に分布の中心を持つ*Cytheropteron testudo* (Zhao *et al.*, 2000)と、熱帯から亜熱帯の浅海域に生息する*Neonesidea*属(鶴見・神谷, 2007)や葉上種である*Xestoleberis*属や*Loxoconcha japonica* (神谷, 1989; Tanaka and Ikeya, 2002)などの生息環境が大きく異なる種が混在する。さらに、浅海種や葉上種のほぼ全てが小型の幼体殻であった。つまり、貝形虫相Dは、浅海性の細粒堆積物の濃集を記録した混在性群集の可能性もある。

4.2 トカラギャップ南北での貝形虫相変化

トカラギャップ以北にあたり、本研究で分析した口之島周辺海域の貝形虫組成と、トカラギャップ以南に該当する宝島周辺海域の貝形虫組成(中野ほか, 2022)を比較した。中野ほか(2022)で報告された貝形虫群集は属に留まるため、貝形虫組成の比較は属レベルで行った。

結果として、宝島周辺海域では属多様度が最浅部(g90)



第4図 A. トカラ列島全域におけるQ-modeクラスター分析結果. B. 貝形虫相の位置図. %MDは含泥率(%), W.D. は試料採取地点の水深(m)を示す. 等深線図はOcean Data Viewにより作成(Schlitzer, 2021).

Fig. 4 Dendrogram showing the result of Q-mode cluster analysis. B. Locality map of the biofacies in Tokara Islands. %MD —mud contents(%), W.D. —water depth(m). Bathymetric map was created using Ocean Data View (Schlitzer, 2021).

で最も高く(2.89), 水深が深くなるにつれ, 低くなる傾向を示したが, 口之島周辺海域では水深が最浅部(g270)で最も低い値(1.94)を示した. 属均衡度は, 宝島周辺海域では水深が深くなるほど属均衡度が高くなる傾向が認められ, 最深部(g108)で最も高い値(0.94)を示した. しかし, 口之島周辺海域では最深部(g201)で最も低い値(0.33)を示し, 水深が深くなるほど属均衡度が下がる傾向が認められた. また, 宝島周辺海域では産出頻度の値が幅広い値を示し, 水深との相関関係は認められなかったものの, 口之島周辺海域では各地点間における産出頻度の差が比較的小さく, 水深が深くなるほど産出個体数が増えるといった違いが確認された. つまり, トカラ列島周辺海域における貝形虫群集の多様度・均衡度は, 少なくとも属において, トカラギャップ以北, 以南間では異なる傾向を示すことが明らかとなった.

渡瀬線による貝形虫相の変化を検討するため, 中野ほか(2022)によって報告されたトカラ列島宝島周辺海域の貝形虫群集と, 本研究で産出された口之島周辺海域の貝形虫群集をQ-modeクラスター分析によって比較した.

分析対象とする貝形虫はいずれかの地点において3個体以上産出した属とした. 結果として, 類似度約0.53を境界に, 貝形虫相Eと貝形虫相Wの2つに区分されたものの(第4図), 渡瀬線を挟んでの生物相の変化は確認されなかった. また, ノンパラメトリック多変量分散分析として知られるPERMANOVAを用いた有意差検定においても, 渡瀬線を境界とした生物相に有意な差は見られなかった($p=0.95$).

しかしながら, 各貝形虫相は, 東シナ海側に位置する貝形虫相W, 太平洋側に位置する貝形虫相Eに明瞭に区分される. また, 貝形虫相Wの分布は, トカラ列島西方沖から口之島周辺にかけて流軸を持つ黒潮の流路と一致する. トカラ列島周辺海域において黒潮は, 島や海山などの海底地形により乱流を引き起こすことが報告されている(Hasegawa *et al.*, 2021). また, 鈴木ほか(2022)では, 砂質堆積物上のベッドフォームや, 生物遺骸の濃集する地点の存在から, 黒潮に伴う底層流がトカラ列島宝島周辺の深海域の表層堆積物へ影響を与えている可能性について報告している. つまり, 調査海域の貝形虫群集

は、黒潮の影響を強く受けた空間分布を持つ可能性がある。

ただし、解析に使用している貝形虫分析結果は10試料に留まり、調査海域全体を網羅した結果ではない。また、トカラ列島北部と南部における貝形虫相の比較は属に留まり、種による分析では別の貝形虫相に区分された地点が、属による分析では同じ貝形虫相に含まれるなど、分析の解像度によって異なる結果が認められた。そのため、今後検討試料を追加して多様な空間条件における貝形虫分析及び分類学的検討を進め、環境要素と貝形虫相の関係性を明らかにする必要がある。また、口永良部島北方沖で採取された試料 (g343) は、生息環境が異なる種が混在し、浅海種や葉上種のほぼすべてが幼体殻であったことから、貝形虫群集が浅海域起源の細粒堆積物の濃集を記録している可能性が示された。このように、本研究海域の貝形虫群集の組成を解明することは、生物相の形成機構に留まらず、表層堆積物の堆積過程の解明に繋がる重要な手掛かりをもたらす可能性がある。

5. 結論

本研究により、主に以下の結論が得られた。

- (1) GB21-3航海によってトカラ列島口之島周辺海域で採取された、表層堆積物5試料から、54属150種以上の貝形虫が認められた。
- (2) 産出した貝形虫の多くが、東シナ海で一般的に報告される、熱帯-亜熱帯域に生息する分類群であった。
- (3) R-modeクラスター分析において、口之島周辺海域の貝形虫群集は4つの貝形虫種群に区分された。また、産出割合などから貝形虫種群が底質の影響を大きく受けていることが示唆された。
- (4) Q-modeクラスター分析によって、トカラ列島宝島周辺海域の貝形虫群集と口之島周辺海域の貝形虫群集を比較した結果、渡瀬線による貝形虫相の変化は確認されなかった。しかし、貝形虫が黒潮の流軸と調和的な分布を示したことから、黒潮が貝形虫相に影響を与えていることが推測された。

謝辞：産業技術総合研究所の井上卓彦氏、および片山肇氏には、本研究の機会を頂いた。また試料採取にあたり、望星丸乗組員の皆様、並びに乗船研究者の皆様には、多大なるご尽力を頂いた。山口大学大学院創成科学研究科の久保 観氏には、本研究を進めるにあたり、多くのご助言を頂いた。本稿は、匿名の査読者からの有益なご指摘により、大幅に改善された。本研究は、山口大学理学部ステップアップ研究および山口大学理学部ハイライト研究による支援を受けた。以上の皆様、および関係機関に心よりお礼申し上げる。

文献

- Cronin, T. M. (1983) Bathyal ostracodes from the Florida-Hatteras slope, the Straits of Florida, and the Blake Plateau. *Marine Micropaleontology*, **8**, 89–119.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. and Ryan, P. D. (2001) PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**, 9 pp (入手日付：2022年6月6日)。
- Hanai, T., Ikeya, N., Ishizaki, K., Sekiguchi, Y. and Yajima, M. (1977) Checklist of Ostracoda from Japan and Its Adjacent Seas. *The University Museum, The University of Tokyo, Bulletin*, **20**, 1–119.
- Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., Yoshie, N., Nakamura, H., Nishina, A., Kobari, T., Nagai, T. and Guo, X. (2021) How a Small Reef in the Kuroshio Cultivates the Ocean. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL092063. doi:10.1029/2020GL092063
- Horn, H. S. (1966) Measurement of “overlap” in comparative ecological studies. *The American Naturalist*, **100**, 419–424.
- Hou, Y. and Gou, Y. (2007) *Fossil Ostracoda of China (Vol. 2) Cytheracea and Cytherellidae*. 798pp, Science Pub, Beijing. (in Chinese with English abst.)
- 池谷仙之・塩崎正道 (1993) 日本沿岸内湾性介形虫類の特性—古環境解析の指標として—。地質学論集, **39**, 15–32.
- Irizuki, T., Taru, H., Taguchi, K. and Matsushima, Y. (2009) Paleobiogeographical implications of inner bay Ostracoda during the Late Pleistocene Shimosueyoshi transgression, central Japan, with significance of its migration and disappearance in eastern Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **271**, 316–328.
- Iwatani, H., Irizuki, T. and Goto, T. (2011) Temporal changes of Plio–Pleistocene Ostracoda from the Takanahe Formation, Miyazaki Group, Southwest Japan. *Paleontological Research*, **15** (4), 267–289.
- Iwatani, H., Irizuki, T. and Yasuhara, M. (2013) Occurrence of a rare puncooid ostracod, *Promanawa konishii* (Nohara, 1976), in Recent sediments of the East China Sea. *Journal of Micropaleontology*, **32**, 221–223.
- Iwatani, H., Kondo, Y., Irizuki, T., Iwai, M. and Ikehara, M. (2016) Orbital obliquity cycles recorded in Kuroshio Current region, eastern Asia, around the Plio–Pleistocene boundary. *Quaternary Science Reviews*, **140**, 67–74.
- Kamiya, T. (1988) Morphological and Ethological Adaptations of Ostracoda to Microhabitats in *Zostera* Beds. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, **11**,

- 303–318.
- 神谷隆宏 (1989) 藻場の介形虫類の機能形態—特に生殖行動との関連について—. 日本ベントス研究会誌, **35–36**, 75–78.
- 兼子尚知 (2007) 沖縄島および琉球弧の新生界層序. 地質ニュース, no. 633, 22–30.
- 木村政昭 (1996) 琉球弧の第四紀古地理. 地学雑誌, **105**, 259–285.
- 木崎甲子郎 (1985) 琉球弧の地質誌. 沖縄タイムス社, 沖縄, 278p.
- Komaki, S. (2021) Widespread misperception about a major East Asian biogeographic boundary exposed through bibliographic survey and biogeographic meta-analysis. *Journal of Biogeography*, **48**, 2375–2386.
- 黒田長禮 (1931) 脊椎動物の分布上より見たる渡瀬線. 動物学雑誌, **43**, 172–175.
- Maddocks, R. F. (1969) Revision of Recent Bairdiidae (Ostracoda). *Bulletin of the United States National Museum*, **295**, 1–126.
- 森下知晃・山口龍彦・眞柴久和・神谷隆宏 (2010) 貝形虫の殻のMg/Ca比, Sr/Ca比による古環境推定の現状と問題点. 地質学雑誌, **116**, 523–543.
- 中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也・久保 観・佐々木聡史 (2022) トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集 (予報). 地質調査研究報告, **73**, 329–335.
- Ruan, P. and Hao, Y. (1988) II. Descriptions of ostracode genera and species. In Research Party of Marine Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources and Chinese University of Geosciences eds., *Quaternary Microbiotas in the Okinawa Trough and Their Geological Significance*. Geological Publishing House, Beijing. 227–395, 33–74. (in Chinese)
- 坂井陽一・門田 立・木寺哲明・相良恒太郎・柴田淳也・清水則雄・武山智博・藤田 治・橋本博明・具島健二 (2005) トカラ列島北部に位置する口之島, 中之島の浅海魚類相. 生物圏科学: 広島大学大学院生物圏科学研究科紀要, 広島大学, **44**, 1–14.
- Sato, T. and Kamiya, T. (2006) Taxonomy and geographical distribution of recent *Xestoleberis* species (Cytheroidea, Ostracoda, Crustacea) from Japan. *Paleontological Research*, **11**, 183–227.
- Schlitzer, R. (2021) Ocean Data View. <https://odv.awi.de/> (閲覧日: 2021年9月1日)
- 関口英夫 (2009) 沿岸域で生まれた海洋生物の分散とその生態学的意義. 沿岸海洋研究, **46**, 85–100.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・徳田悠希・千徳明日香 (2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **73**, 275–299.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有本 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治 (2023) トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **74**, 259–286.
- Tabuki, R. and Nohara, T. (1988) Preliminary study on the ecology of ostracods from the moat of a coral reef off Sesoko Island, Okinawa, Japan. In Hanai, T., Ikeya, N. and Ishizaki, K. eds., *Evolutionary Biology of Ostracoda, its Fundamentals and Applications*. Kodansha & Elsevier, Tokyo, Amsterdam, 429–437.
- Tanaka, G. and Ikeya, N. (2002) Migration and speciation of the *Loxococoncha japonica* species group (Ostracoda) in East Asia. *Paleontological Research*, **6**, 3, 265–284.
- 田中隼人 (2016) 貝形虫 (甲殻類) からみた分類学と古生物学の繋がり. タクサ, 日本動物分類学会誌, **40**, 9–16.
- 塚越 哲 (2017) 現生生物を対象とした古生物学的研究 その2—貝形虫類の進化と多様性の研究例—. 化石, **102**, 15–30.
- 鶴見厚支・神谷隆宏 (2007) 日本・東南アジア産 *Neonesidea* 属 (甲殻亜門, 貝形虫綱, ポドコピーダ目) 8種の系統関係と生物地理. タクサ, 日本動物分類学会誌, **23**, 19–31.
- 安原盛明 (2007) 完新世の内湾貝形虫と環境変動—特に広義の人為汚染の影響—. 人類紀自然科学編集委員会, 共立出版, 161–172.
- 横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.
- Zhao, Q. and Whatley, R. (1997) Distribution of the Ostracod genera *Krithe* and *Parakrithe* in bottom sediments of the East China and Yellow seas. *Marine Micropaleontology*, **32**, 195–207.
- Zhao, Q., Whatley, R. and Zhou, B. (2000) The taxonomy and distribution of recent species of the ostracod genus *Cytheropteron* in the South China Sea. *Revista Española de Micropaleontología*, **32**, 259–281.

(受付: 2022年10月31日; 受理: 2023年10月10日)

トカラ列島周辺海域から海洋底調査航海 GB21-1・GB21-2 により採集されたウシオダニ類

安倍 弘^{1,*}

ABÉ Hiroshi (2023) Halacarid mites collected at offshore areas of Tokara Islands during the ocean floor survey cruises GB21-1 and GB21-2. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 325–328, 2 figs and 1 table.

Abstract: During the ocean floor survey cruises (GB21-1 and GB21-2) conducted by AIST in the sea around the Tokara Islands in 2021, 12 species of six genera in the family Halacaridae: *Copidognathus*, *Halacarellus*, *Agauopsis*, *Simognathus*, *Lohmannella*, and *Scaptognathus*, an individual thought to be a halacarid mite but whose genus is uncertain, and one species in the family Acaridae were collected from the ocean floor sediment. Although the particle size of the sediment is known to be a limiting factor in the diversity of the halacarid genera, this survey suggests that depending on the genus, depth rather than sediment particle size and quality is a major limiting factor of distribution.

Keywords: Halacaridae, aquatic mites, Tokara Islands, East China Sea

要 旨

産業技術総合研究所により、2021年にトカラ列島周辺海域で行われた海洋底調査航海(GB21-1, GB21-2)において、4調査地点から採取された底質から、フキヨセダニ属、ナミウシオダニ属、ヒシウシオダニ属、ハナマルダニ属、ローマダニ属、スナホリダニ属の6属12種のウシオダニ類、ならびにウシオダニ類と思われるが属が不明である個体とコナダニ類1種が採集された。ウシオダニ類が生息する底質の間隙の大きさが、ウシオダニ類における属の多様性の制限要因となることが知られているが、今回の調査では、属によっては底質の粒径及び組成よりも水深が分布における大きな制限要因となることが示唆された。

1. はじめに

水生ダニ類の一群であるウシオダニ類(Halacaridae)は、主に海洋に生息する底生生物である。日本周辺海域の潮下帯の底質中に生息するウシオダニ類については、船舶による採集が必要であることから、これまでほとんど調査が行われていない。そこで、過去3年間に行われた産業技術総合研究所の航海による海洋底調査で、奄美大島から与那国島にかけての海域において底質を採取し、ウシオダニ相を調べたところ、それまで国内からは記録されていなかった*Acaromantis*属、*Arhodeoporus*属、ローマダニ属(*Lohmannella*)を記録することができた(安倍、

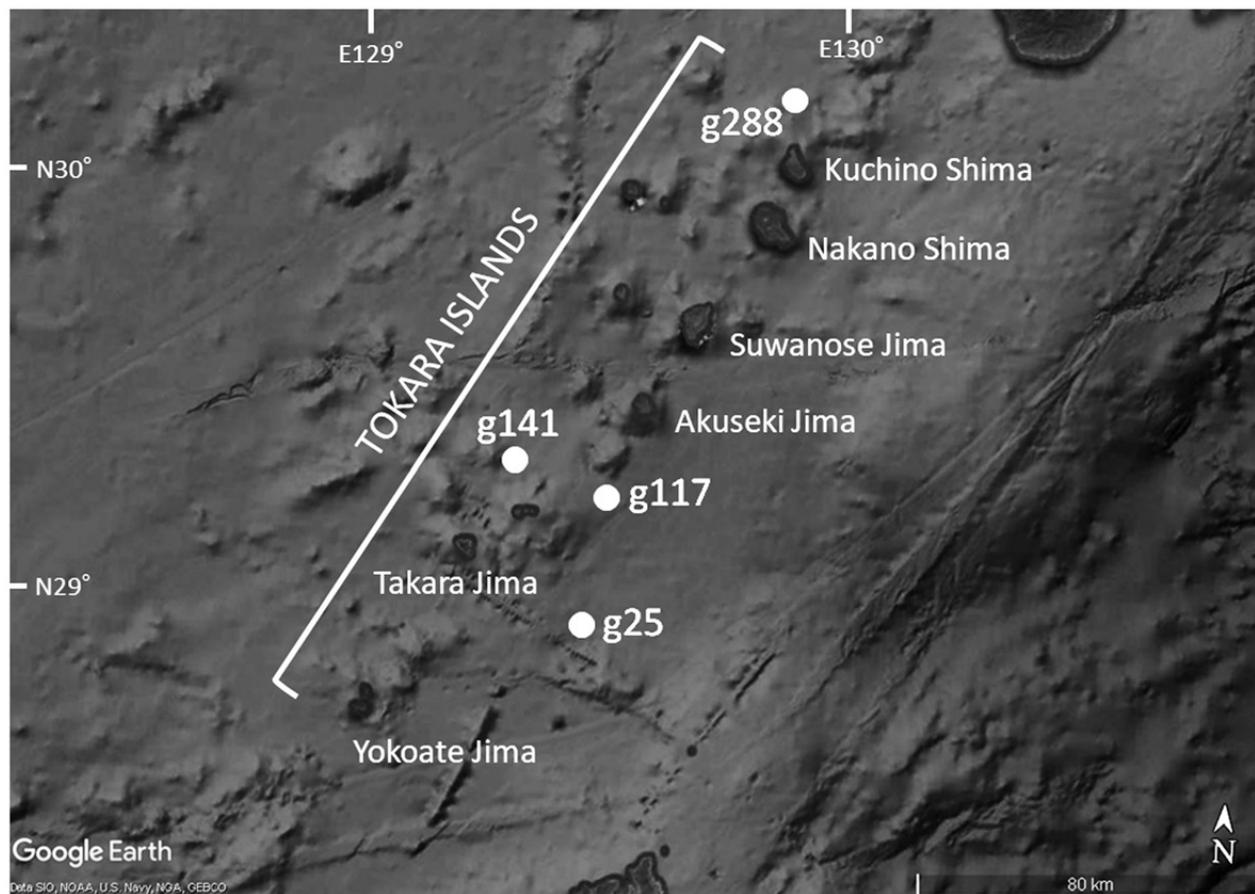
2018, 2019, 2020)。なお、ここで、国内に生息するウシオダニ類の分類群に対する今後の和名使用のために、上記の*Acaromantis*属、*Arhodeoporus*属、ならびに、すでに国内では本海域以外からも記録されていたが和名がつけられていなかった*Halacarellus*属に対して、それぞれカワリハナマルダニ属(新称)、ナガメウシオダニ属(新称)、ナミウシオダニ属(新称)の呼称を提唱する。本研究は、生物多様性が比較的高い事が期待される東シナ海の中で、屋久島と奄美大島の間に位置するトカラ列島の周辺海域で船舶により底質を採取し、潮下帯の底質中におけるウシオダニ相を明らかにすることを目的とした。

2. 材料と方法

産業技術総合研究所の地質調査総合センターにより、トカラ列島周辺海域で行われた2021年3月9日～3月24日(GB21-1航海)、ならび2021年7月27日～7月29日(GB21-2航海)の海洋底調査において、第1図に示す4地点(Stns. g117, g141, g25, and g288)で木下式グラブ採泥器を用いて表層堆積物を採取し、その一部を広口T型瓶(1000 ml)に入れ、少量のエタノールで固定した。採取した底質は日本大学生物資源科学部へ持ち帰り、ポリバケツ中で水道水と混合・攪拌し、上澄みを目合いNXX13(0.1 mm)の濾しネットで濾過した。濾過して得られた採集物を広口T型瓶(300 ml)に入れ、70%エタノールで固定・保存した。また、残った底質残渣の一部を乾燥し、底質標本としてチャック付きポリ袋中に保存した。

¹ 日本大学生物資源科学部 (College of Bioresource Sciences, Nihon University, Kameino 1866, Fujisawa, 252-0880 Japan)

* Corresponding author: ABÉ, H., Email: abe.hiroshi@nihon-u.ac.jp



第1図 トカラ列島海域におけるウシオダニ類の調査地点。

Fig. 1 Survey points (Stns. g117, g141, g25, and g288) of halacarid mites at offshore areas of Tokara Islands.

得られた採集物については、シャーレに入れて双眼実体顕微鏡下で観察し、ウシオダニ類を選別した。得られたウシオダニ類については、生物顕微鏡を用いて分類形質を観察し、分類群の同定を試みた。

3. 結果と考察

当海域における4調査地点から、第1表に示す6属12種のウシオダニ類ならびに、ウシオダニ類と思われるが属が不明である個体とコナダニ類(Acaridae)1種が記録された。コナダニ類については、海域に生息していたものかどうかは明らかではない。なお、種同定のための解析時間を十分に取れなかったことから、分類群の同定は属のレベルとした。得られたウシオダニ類の中で、フキヨセダニ属(*Copidognathus*)、ナミウシオダニ属(新称)(*Halacarellus*) (第2図A)、ヒシウシオダニ属(*Agauopsis*) (第2図B)、ハナマルダニ属(*Simognathus*) (第2図C)、ローマンダニ属(*Lohmannella*) (第2図D)は、潮間帯から潮下帯にかけて広く生息することが知られている(安倍, 1990, 2005, 2008; 安倍ほか, 2002)。一方、スナホリダニ属(*Scaptognathus*)は潮間帯から潮下帯に至る砂泥の

間隙中から記録されている(Abé, 1990a, b, 2011, 2012)。今回の調査で得られたローマンダニ属は脚が3対である幼体であり、日本からローマンダニ属の幼体が初めて記録された。ハナマルダニ属については、外観から推定すると2017年に奄美大島周辺海域で行われた海洋底調査(GK17-2航海)で採集された個体とは異なる種である可能性がある。なお、ハナマルダニ属は沖縄以南の海域における調査では出現していないことから、東シナ海では分布域が限られていると思われる。

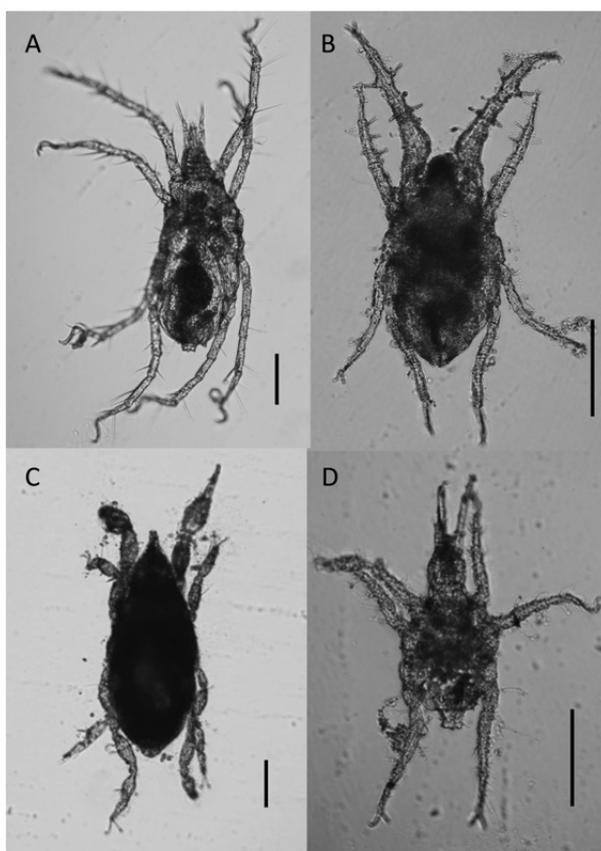
過去3年間における東シナ海の調査で、水深や底質の粒径及び組成がウシオダニ類の属の多様性に影響を与えることが示唆され、比較的粒径が大きく貝殻・珊瑚・軽石などの破片が混じり合った底質で、ウシオダニ類の多様度が高くなることが分かった(安倍, 2018, 2019, 2020)。このことから、ウシオダニ類が生息する底質の間隙の大きさが、ウシオダニ類における属の多様性の制限要因となることが示されたが、今回の調査では、属によっては底質の粒径及び組成よりも水深が分布における大きな制限要因となることが示唆された。

今回の調査で採取した底質は、放散虫類や翼足類の外

第1表 トカラ列島海域におけるウシオダニ類の出現状況.

Table 1 Genera of halacarid mites found from the sediments collected at offshore areas of Tokara Islands.

Date	Survey point (DMM)	Depth (m)	Sediment	Halacarid mites
2021/3/16	St. g117 (29° 16.5603'N, 120° 28.8117'E)	576	Pumice mixed fine sand	<i>Halacarellus</i> sp. 1, <i>Halacarellus</i> sp. 2, <i>Acaridae</i> gen. sp.
2021/3/16	St. g141 (29° 18.6921'N, 129° 13.8600'E)	475	Shell mixed fine sand	<i>Halacarellus</i> sp. 3, <i>Agauopsis</i> sp.
2021/7/27	St. g25 (28° 56.5691'N, 129° 41.4903'E)	839	Shell mixed fine sand	<i>Simognathus</i> sp., <i>Halacarellus</i> sp. 4, <i>Copidognathus</i> sp. 1
2021/7/29	St. g288 (30° 05.9241'N, 129° 58.6266'E)	584	Shell mixed coarse sand	<i>Simognathus</i> sp., <i>Copidognathus</i> sp. 2, <i>Scaptognathus</i> sp., <i>Lohmannella</i> sp.



第2図 A: ナミウシオダニ属の一種(sp. 1), B: ヒシウシオダニ属の一種, C: ハナマルダニ属の一種, D: ローマンダニ属の一種(幼体). スケールは100 μ m.

Fig. 2 A: *Halacarellus* sp. 1, B: *Agauopsis* sp., C: *Simognathus* sp., D: *Lohmannella* sp. (larva). Scale bars: 100 μ m.

殻を含んだ細砂や軽石砂で、奄美大島から与那国島にかけての過去3回の調査でも類似した底質を採取している。一方、今回の調査では、底質を採取した調査地点の水深は475 mから839 mであり、過去の調査地点に比べて水深が大きい。ウシオダニ類の出現状況を見てみると、今回の調査では過去の調査と比べて出現した属の平均数が少なかった。従って、水深がウシオダニ類の多様性に影響を与える事は明らかである。なお、今回の調査ではカ

イソウダニ属(*Rhombognathus*)は出現しなかったが、過去3回の調査でカイソウダニ属の出現が記録されており、出現した地点は全て水深177 m以浅の海底であった。このことから、特にカイソウダニ属の分布は、底質の粒径及び組成よりも水深が制限要因となっている可能性が高いことが示された。

謝辞：本研究の試料採取にご尽力いただいた産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループの鈴木克明研究員、片山肇上級主任研究員、ならびに地球変動史研究グループの板木拓也研究グループ長をはじめとする研究職員の方々、及び、調査を行った船舶の乗組員の方々に深く感謝致します。

文 献

- 安倍 弘(1990)ウシオダニ類の研究法 -採集と標本作製および同定の手引き-. 生物教材, **25**, 21-45.
- Abé, H. (1990a) A new species of the genus *Scaptognathus* (Acari, Halacaridae) from Japan. *Journal of Natural History*, **24**, 251-260.
- Abé, H. (1990b) Two new species of the genus *Scaptognathus* (Acari, Halacaridae) from Hokkaido, Japan. *Cahiers de Biologie Marine*, **31**, 349-363.
- 安倍 弘(2005)海に住むダニ-ウシオダニ類の紹介. タクサ, **18**, 30-33.
- 安倍 弘(2008) 4-3-5 節足動物門クモ綱ダニ目について. 第7回自然環境保全基礎調査, 浅海域生態系調査(藻場調査)報告書, 環境省自然環境局生物多様性センター, 富士吉田市, 262-263.
- Abé, H. (2011) New record of *Scaptognathides* (Acari, Halacaridae) from Japan with notes on geographic distribution. *Journal of the Acarological Society of Japan*, **20**, 19-25.
- Abé, H. (2012) New species of *Scaptognathus* (Acari, Halacaridae) from Okinawa, southern Japan. *Journal of the Acarological Society of Japan*, **21**, 135-140.
- 安倍 弘(2018)奄美大島周辺海域からGK17-2航海により採集されたウシオダニ類. 板木拓也(編)「沖縄

周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 125–128.

安倍 弘(2019) 宮古・石垣島周辺海域からGK18-1航海により採集されたウシオダニ類. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 132–135.

安倍 弘(2020) 石垣・西表・与那国島周辺海域からGK19航海により採集されたウシオダニ類. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」令和2年度研究概要報告書—石垣島・西表島・与那国島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 80, 126–131.

安倍 弘・白戸一士・佐藤正彦(2002) 利尻島の水生ダニ類. 利尻研究, **21**, 29–34.

(受付 : 2022年10月31日 ; 受理 : 2023年11月16日)

トカラ列島南西海域より採水した底層水の水素・酸素同位体組成

及川 一真^{1,*}・宮島 利宏²・高柳 栄子¹・井龍 康文¹

OIKAWA Kazuma, MIYAJIMA Toshihiro, TAKAYANAGI Hideko and IRYU Yasufumi (2023) Hydrogen and oxygen isotope compositions of bottom waters collected around off southwestern Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 329–336, 5 figs, 1 table.

Abstract: We analyzed hydrogen and oxygen isotope compositions (δD and $\delta^{18}O$) of bottom water samples collected at depths of 248–1,169 m from 32 sites around the southwestern Tokara Islands during the GB21-1 cruise. The d-excess differs at the eastern margin of the Okinawa Trough and to the north of Takarajima Island from to the south to the east of off this island. The salinity– $\delta^{18}O$ relationship varied within the study area and at different water depths. These results suggest that (1) the origin of water masses in the southwestern Tokara Islands differs from region to region, (2) that the origin of seawater is the same, but the mixing rate differs among regions, or (3) both.

Keywords: isotope composition of seawater, salinity, d-excess, Kuroshio Current

要 旨

GB21-1航海において採取された32地点の底層水(水深248 m～1,169 m)の水素・酸素同位体組成(δD 値および $\delta^{18}O$ 値)を検討した。その結果、天水線の定数項であるd-excessが、沖縄トラフ東縁および宝島北部と、宝島南部および宝島沖東方とで異なる値を示すことが明らかになった。また、塩分– $\delta^{18}O$ 値の関係は調査海域内および水深ごとに異なる傾向を示した。これらの結果は、トカラ列島南西海域では、(1)各海域の水塊の起源が異なる可能性、(2)各海域の海水の起源は同じであるが混合率が異なる可能性、(3)両者、のいずれかであることを示唆する。

1. はじめに

トカラ列島周辺海域は、東シナ海を北上した黒潮が北太平洋へと通過する主要な流路である。トカラ列島を含む黒潮流軸周辺の小島では、非常に高い湧昇速度と乱流運動エネルギー散逸率が確認されており、宜蘭、伊豆と並んで湧昇と混合が起こる要所として注目されている(Hasegawa *et al.*, 2021)。しかし、同海域周辺で過去に実施された海洋調査は少なく、既存の観測データや採水した海水の分析データが限られている。よって、黒潮流軸周辺海域の水循環や水塊構造を理解するためには、海水の水素・酸素同位体比等の海洋化学データの蓄積が重要

である。これらの組成は、海洋表層における蒸発–降水のバランスや、海水の混合過程の推定に用いることができる。また、海水の物理・化学的特性(水温、塩分、pH、同位体組成など)に関する基礎データは、サンゴ・有孔虫・軟体動物・腕足動物等の炭酸塩生物骨格・殻の炭素・酸素同位体組成や微量元素濃度の古環境指標としての有用性を検討する上でも、必要不可欠である。以上の背景を踏まえ、本研究では、GB21-1航海で採水された底層水(水深248 m～1,169 m)の水素・酸素同位体組成分析(δD , $\delta^{18}O$)を行ったので、ここに結果を報告する。

2. 試料・方法

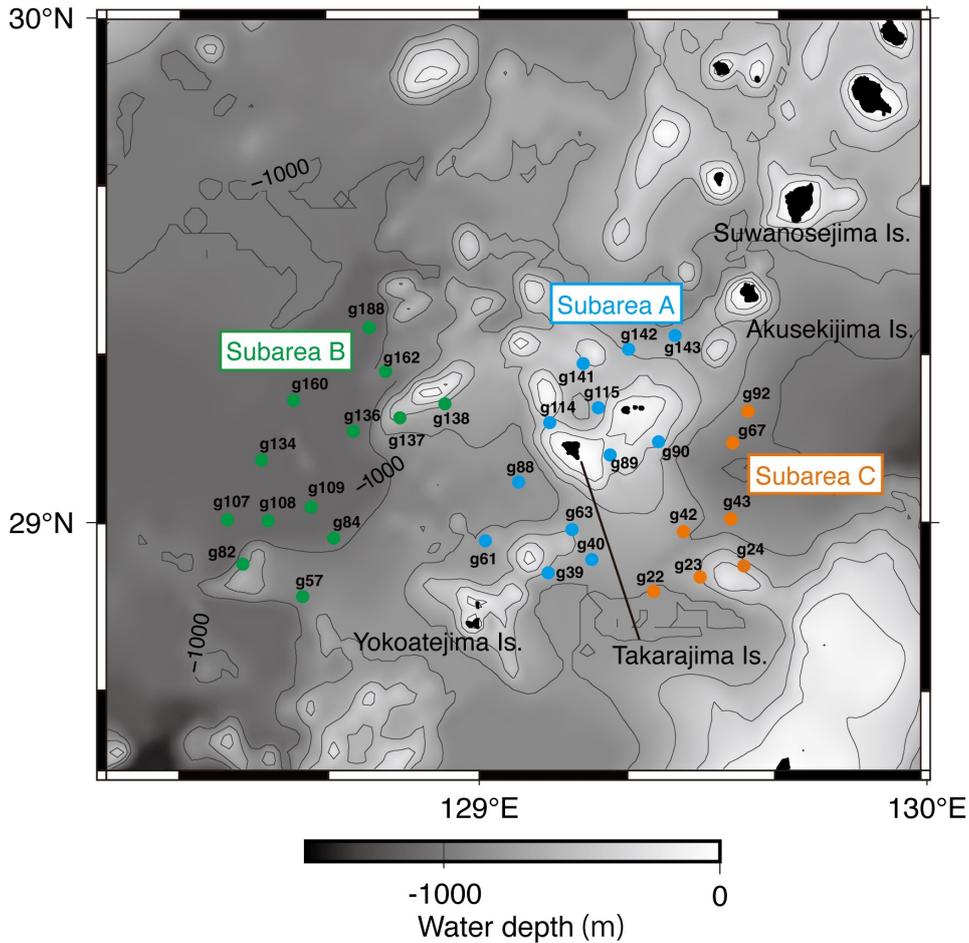
2.1 試料

本研究では、GB21-1航海(2021年2月28日～3月30日)の各採泥地点において採水された、32地点の底層水(水深248～1,169 m)を用いた(第1図)。採泥地点の緯度経度情報は鈴木ほか(2022)の第1表に記載されている。全ての採泥地点は黒潮の流軸の南側に位置していた。本底層水は、採泥器に取り付けられたニスキン採水器によって、海底面上約7 mより採取した。底層水は、採取直後にニスキン採水器から30 ccのガラスバイアル瓶に分取し、一時的に冷暗所で保管した。その後、同海水は0.45 μm のフィルターで濾過しながら再びガラスバイアル瓶に分取し、ガス交換や試料の漏出がないようにゴム栓およびアルミキャップでバイアル瓶を密封した。

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻 (Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Sendai 980-8578, Japan)

² 東京大学大気海洋研究所 (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8564, Japan)

* Corresponding author: OIKAWA, K., 6-3, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan. Email: kazuma.oikawa.q3@dc.tohoku.ac.jp



第1図 水素・酸素同位体組成を検討した底層水の採水地点(水深248 m ~ 1,169 m)。海域ごとの比較を行うため、横当島-宝島周辺を海域A、沖縄トラフ東縁を海域B、宝島東方沖を海域Cと区分した。

Fig. 1 Bottom-water sample sites in the southwestern Tokara Islands. The study area is divided into three subareas: Yokoatejima-Takarajima (A), the eastern margin of the Okinawa Trough (B), and the east of Takarajima Island (C).

2.2 海水の水素・酸素同位体組成分析

海水の水素・酸素同位体組成 (δD , $\delta^{18}O$) の分析は、東京大学大気海洋研究所の所有するPicarro社製の安定同位体比分析装置(L2120-i)を用いて行った。測定する海水は、装置専用の試料瓶に海水試料を約2 ml入れ、専用キャップで密閉した。装置には、未知試料8試料ごとに実験室にて調整された人工海水を1試料セットし、測定値の時間変化を補正した(ドリフト補正)。また、スタンダード試料としてDOW (W0000-01: $\delta D = +0.215$ ‰, $\delta^{18}O = -0.066$ ‰), SLW2 (W0102-01: $\delta D = -71.1$ ‰, $\delta^{18}O = -10.8$ ‰), ICE2 (W0202-01: $\delta D = -106.9$ ‰, $\delta^{18}O = -14.5$ ‰)を用いて検量線を作成し、最終的な値を決定した。水素および酸素のデルタ(δ)値は、それぞれ、VSMOW標準試料の水素および酸素の同位体比($^2H/^1H$, $^{18}O/^{16}O$)に対する千分偏差として求めた。また、繰り返し測定を行った人工海水の水素・酸素同位体組成(ドリ

フト補正後)の標準偏差はそれぞれ ± 0.47 ‰, ± 0.09 ‰ ($n = 28; 1\sigma$)であった。

3. 結果・考察

3.1 水素・酸素同位体組成

GB21-1航海で採取された底層水の δD 値および $\delta^{18}O$ 値の結果を第1表と第2図に示す。2021年3月14日~3月23日の期間に採水された、トカラ列島南西海域の海水(水深248 ~ 1,169 m)の δD 値および $\delta^{18}O$ 値は、それぞれ $-1.2 \sim 3.6$ ‰, $-0.3 \sim 0.5$ ‰の範囲にあった(第2図)。海域ごとの比較を行うため、横当島-宝島周辺を海域A、沖縄トラフ東縁を海域B、宝島東方沖を海域Cと区分すると、それぞれの海水の δD 値, $\delta^{18}O$ 値の範囲は $-0.3 \sim 3.2$ ‰, $-0.2 \sim 0.5$ ‰(海域A), $-1.2 \sim 1.6$ ‰, $-0.3 \sim 0.2$ ‰(海域B), $-0.5 \sim 3.6$ ‰, $-0.1 \sim 0.2$ ‰(海域C)であった。また、本調査海域の $\delta^{18}O$ 値を、西部北太平洋中緯度域(北

第1表 底層水の採水地点, 海水温, 塩分, pH, 水素・酸素同位体組成, d-excess. 水温・塩分・pHは板木ほか(2022)のデータを引用した.

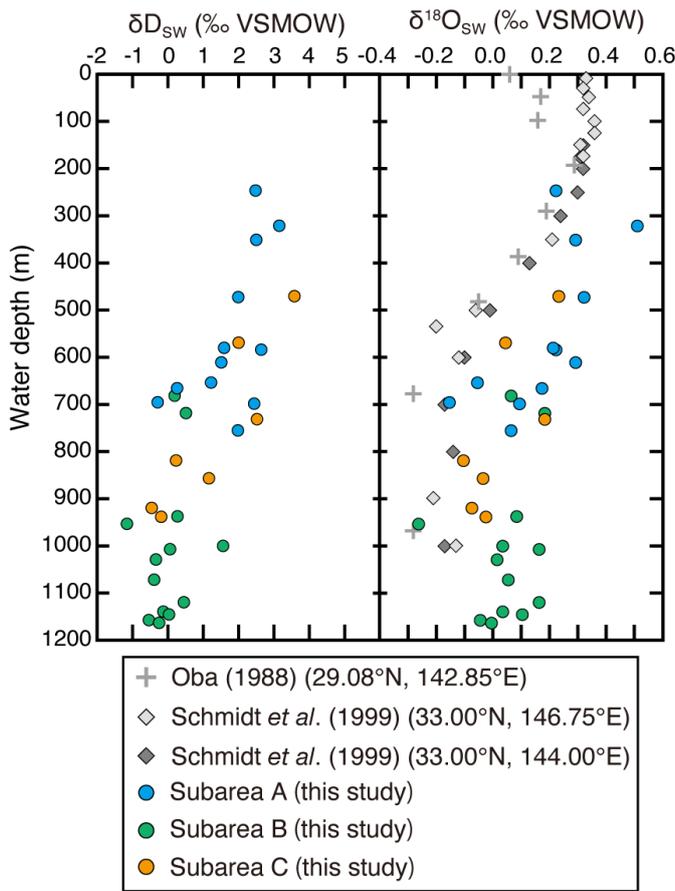
Table 1 List of sampling site, temperature, salinity, pH, hydrogen and oxygen isotope compositions, and d-excess in the southwestern Tokara Islands. Temperature, salinity, and pH were from Itaki *et al.* (2022).

Area	Site No.	Water depth (m)	Sampling date (in 2021)	Temperature (°C)	Salinity	pH	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	d-excess (‰)
Northern subarea A	g114	323	23-Mar	5.30	34.71	8.04	0.51	3.15	-0.91
	g141	475	16-Mar	12.78	34.52	7.85	0.32	1.99	-0.56
	g115	614	23-Mar	11.40	34.36	7.58	0.29	1.51	-0.79
	g143	669	16-Mar	6.74	34.37	7.71	0.17	0.26	-1.14
	g142	583	16-Mar	9.36	34.37	7.85	0.21	1.59	-0.10
Southern subarea A	g61	759	19-Mar	6.09	34.34	7.64	0.06	1.98	1.48
	g89	248	23-Mar	19.17	34.71	8.05	0.22	2.48	0.74
	g90	353	23-Mar	17.02	34.69	8.04	0.29	2.50	0.15
	g88	699	19-Mar	8.79	34.33	7.66	-0.16	-0.29	0.98
	g40	702	19-Mar	6.21	34.37	7.60	0.09	2.44	1.70
	g63	587	19-Mar	8.79	34.30	7.80	0.22	2.64	0.89
	g39	657	19-Mar	6.97	34.33	7.68	-0.06	1.22	1.66
Subarea B	g84	958	20-Mar	4.84	34.39		-0.27	-1.16	0.98
	g57	1005	20-Mar	4.83	34.38	7.55	0.03	1.56	1.32
	g136	1034	17-Mar	4.70	34.43	7.47	0.01	-0.34	-0.45
	g107	1077	20-Mar	4.46	34.40	7.60	0.05	-0.39	-0.82
	g160	1125	17-Mar	4.51	34.45	7.56	0.16	0.45	-0.86
	g188	1145	17-Mar	4.49	34.43	7.57	0.03	-0.13	-0.39
	g134	1151	14-Mar	4.33	34.50		0.10	0.03	-0.73
	g109	1163	14-Mar	4.40	34.49		-0.05	-0.54	-0.17
	g108	1169	14-Mar	4.34	34.50		-0.01	-0.25	-0.14
	g162	1012	15-Mar	4.62	34.42		0.16	0.06	-1.23
	g82	942	20-Mar	4.91	34.37	7.56	0.08	0.27	-0.35
	g137	685	15-Mar	6.19	34.41		0.06	0.19	-0.31
	g138	722	15-Mar	6.28	34.42		0.18	0.51	-0.95
Subarea C	g67	943	16-Mar	3.74	34.44	7.54	-0.03	-0.19	0.05
	g42	735	18-Mar	5.93	34.37	7.60	0.18	2.52	1.09
	g24	473	18-Mar	14.50	34.58	7.83	0.23	3.58	1.75
	g22	823	18-Mar	5.82	34.37	7.63	-0.11	0.23	1.11
	g43	861	18-Mar	3.85	34.42	7.68	-0.04	1.16	1.45
	g23	572	18-Mar	9.40	34.35	7.78	0.04	2.00	1.65
	g92	924	16-Mar	3.55	34.45	7.53	-0.08	-0.46	0.16

緯29°～33°)の海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値(Oba, 1988; Schmidt *et al.*, 1999)と比較すると, 本調査海域の $\delta^{18}\text{O}$ 値の方が相対的に高い値を示した(第2図).

トカラ列島南西海域の各水深における海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の傾向を確認するため, 両結果をReduced Major Axis回帰(Sokal and Rohlf, 1994)によって線形回帰し, 世界各地の降水および地表水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値より得られている天水線($\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961)と比較した(第3図). その結果, 全32地点(水深248 m～1,169 m)の海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の関係式は $\delta\text{D} = 8.1 \times \delta^{18}\text{O} + 0.2$ ($r^2 = 0.62$)となり, 天水線と切片は異なるものの, 傾きは類似した値を示した. 一般に, 海水の水素・酸素同位体比は, 降水や河川からの淡水の流入量とそれらの同位体比, ならびに海面からの蒸発量と

蒸発する水蒸気の同位体比のバランスによってきまり, 垂表層以深の同位体組成は異なる同位体比をもつ海水との混合を除いて, その値は保存される(Craig and Gordon, 1965). 一方で, 前述したOba(1988)やSchmidt *et al.* (1999)などの既存研究では, 深度による同位体比の変化が報告されている(第2図). 本研究で得られた底層水の δD 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値の関係を海域別に比較すると, 海域A北部と海域Cの底層水は回帰線の上, 海域A南部と海域Bの低層水は回帰線の下にプロットされる傾向が認められた(第3図). この傾向を詳細に検証するため, 本研究では天水線の定数項を示すd-excess ($d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$; Dansgaard, 1964)を計算した. d-excessとは, δD と $\delta^{18}\text{O}$ のクロスプロットにおいて δD 軸の切片として定義されたものであるが, 切片を正確に求めるには, 第3図に示したように, ある



第2図 検討した底層水の水素・酸素同位体組成の深度分布と北西太平洋中緯度の酸素同位体組成との比較。北西太平洋中緯度の酸素同位体組成は、GISSより取得したOba (1988), Schmidt *et al.* (1999)のデータを用いた。

Fig. 2 Depth profiles of hydrogen and oxygen isotope compositions in the study area. Grey-colored symbols represent $\delta^{18}\text{O}$ data obtained from the middle latitudes of the northwestern Pacific Ocean (Oba, 1988; Schmidt *et al.*, 1999).

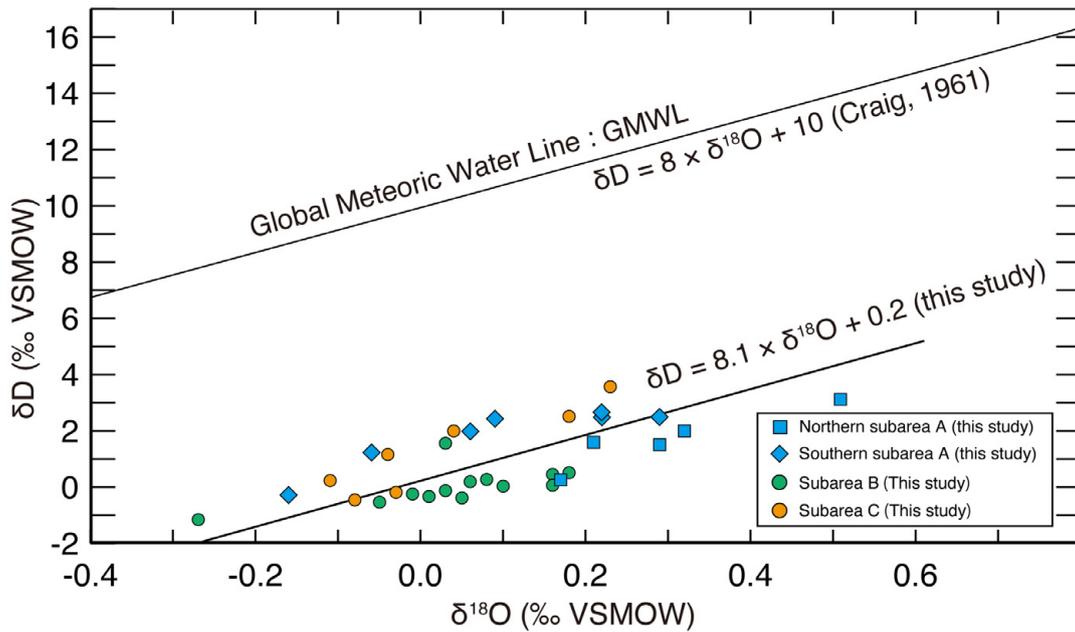
程度の広い範囲のデータが必要であり、1つ1つのデータに対して切片を求めることはできないため、ここでは、各プロットが $\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O}$ の直線からどれだけ離れているかを示す値と定義する(杉本, 2005)。このd-excessの違いは、非平衡の蒸発過程に起因することが知られており(Merlivat and Jouzel, 1979)、気象・陸水・地下水などの水文分野において広く用いられてきた。しかし、海水における微小な同位体比の変化を捉えることが可能となった結果、水塊を識別する指標とされるようになり(Benetti *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2022; Cruz Salmeron *et al.*, 2022)、本研究ではこれを踏襲する。今回検討した各底層水の水温・塩分・pH(以上、板木ほか, 2022)、 δD 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値およびd-excessをCruz Salmeron *et al.* (2022)の水塊区分に基づいて比較した。Cruz Salmeron *et al.* (2022)は南琉球の水塊をポテンシャル密度に従って西部北太平洋中層水(水深250 m ~ 500 m)、黒潮中層水(水深500 ~ 755 m)、より深層の黒潮中層水(水深755 m ~ 1900 m)と区分しており、本調査海域が含まれる北琉球にも、類似した水塊が分布していると予想される。その結果、海域間で水温・塩分・pHの鉛直分布に明瞭な違いが認められない一方で、d-excessには水深500 m ~ 760 m付近の低塩分層では海域に固有の特徴(海域Bでは負の値、海域C

では正の値)が認められた(第4図(f))。この特徴は、海域Bと海域Cの低塩分層を構成する水塊は、密度は変わらないが、(1)各海域の水塊の起源が異なる可能性、(2)海水の起源は同じであるが混合率が異なる可能性、(3)両者、のいずれかであることを示唆する。加えて、宝島を基準にして海域Aの底層水を北部(海域A北部)と南部(海域A南部)に区分すると、d-excessの値が海域A北部では負と、南部では正となり、前者は海域Bと後者は海域Cと類似した傾向がみられた。よって、前述同様、海域Aの低塩分層を構成する水塊は、海水の起源、海水の混合比率、もしくは両者が北部と南部で異なり、それぞれ海域Bおよび海域Cの低塩分層水塊と関連がある可能性がある。海域Bおよび海域A北部、海域Cおよび海域A南部とで、d-excessが類似する傾向は、水深500 m以浅および水深760 m以深でも認められた。

このように、本研究海域の水塊構造は極めて複雑であり、水塊構造の実態と動態を正確に理解するためは、さらなる基礎的データの取得が望まれる。

3.2 塩分と酸素同位体組成の関係

GB21-1航海で採取された底層水32地点の塩分(板木ほか, 2022)と海水の酸素同位体組成($\delta^{18}\text{O}$)の関係を先行



第3図 検討した底層水(水深248 m ~ 1,169 m)の酸素-水素同位体組成の関係. 天水線はCraig (1961)の関係式を引用した. 海域A内の北部と南部とでは, 両者の関係が異なっている.

Fig. 3 Relationship between hydrogen and oxygen isotope compositions in the study area. The Global Meteoric Water Line was from the Craig (1961). Note the different relationship between the northern and southern subarea A.

研究で得られている琉球孤南部の沖縄トラフ側海域(以後, 南琉球と称す)と比較した(第5図). その結果, トカラ列島南西海域(水深248 m ~ 1,169 m)の海水の塩分-酸素同位体比の関係には, 前述した水塊区分ごとに以下の3つの傾向・特徴が認められた. 1) 海域Aおよび海域Cにおける水深240 m ~ 500 mの海水は, $\delta^{18}\text{O}$ 値と比較して塩分の変化量が大きく, 南琉球における西部北太平洋中層水(Western North Pacific Central Water: 水深250 m ~ 500 m)と同様の傾向を示した. 2) 海域Aにおける水深500 m ~ 760 mの海水は, 南琉球における黒潮中層水(Kuroshio Intermediate Water: 水深500 m ~ 755 m)と類似した塩分を示す一方, $\delta^{18}\text{O}$ 値は南琉球の海水と比較して変動幅が大きい. 3) 海域Bおよび海域Cにおける水深760 m以深の海水は, 南琉球のより深層域に分布する黒潮中層水(Deeper Kuroshio Intermediate Water: 水深755 m ~ 1900 m)と類似した塩分-酸素同位体比の関係を示している.

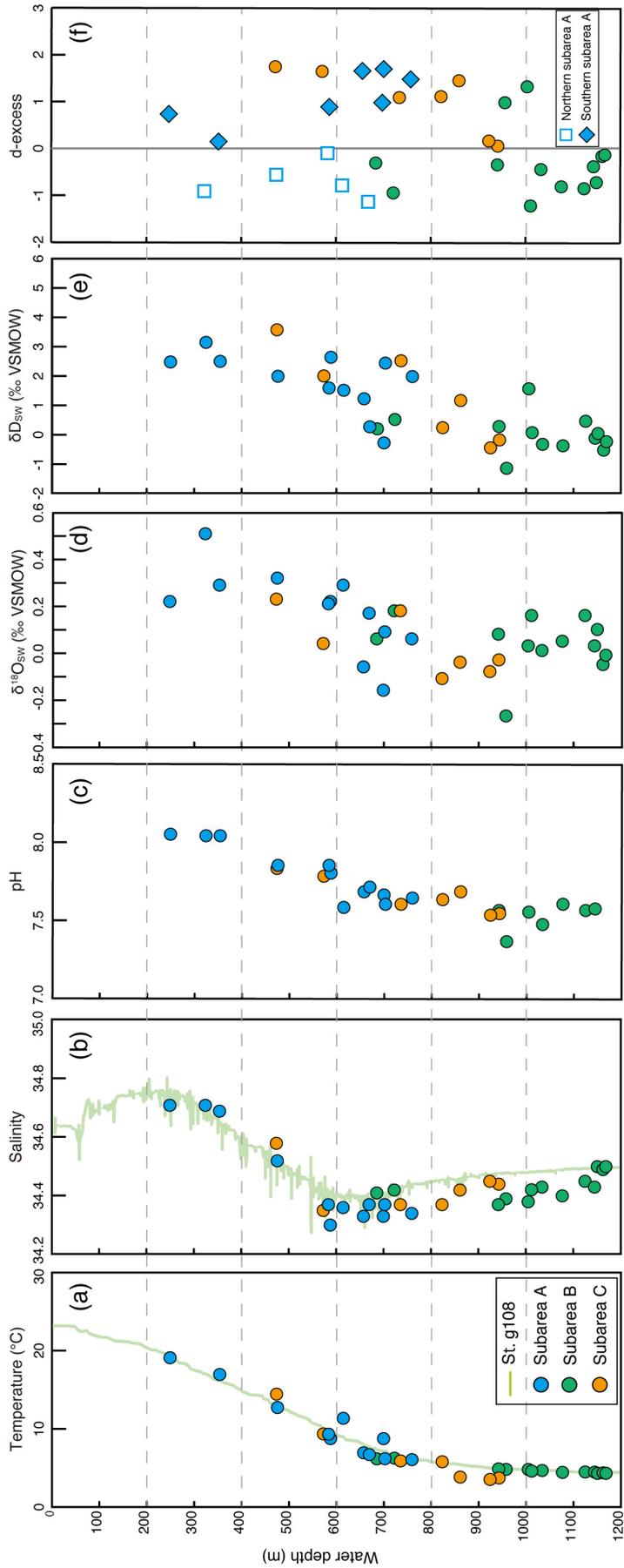
一般に, 塩分-酸素同位体比の正の相関関係は, 炭酸塩生物化石から復元した $\delta^{18}\text{O}$ 値から当時の塩分を推定する場合や, ある海域の塩分の観測結果から同海域周辺の $\delta^{18}\text{O}$ 値を推定する場合などに用いられている. しかし, 本調査地域のように塩分-酸素同位体比の関係が海域や水深によって異なる場合, 上記の推定や, 炭酸塩生物が生息する周囲の海水と同位体平衡で形成される方解石や

アラレ石の $\delta^{18}\text{O}$ 値(平衡値)を計算する際には, 海域の特性や水塊構造を正確に把握する必要がある.

4. 結論

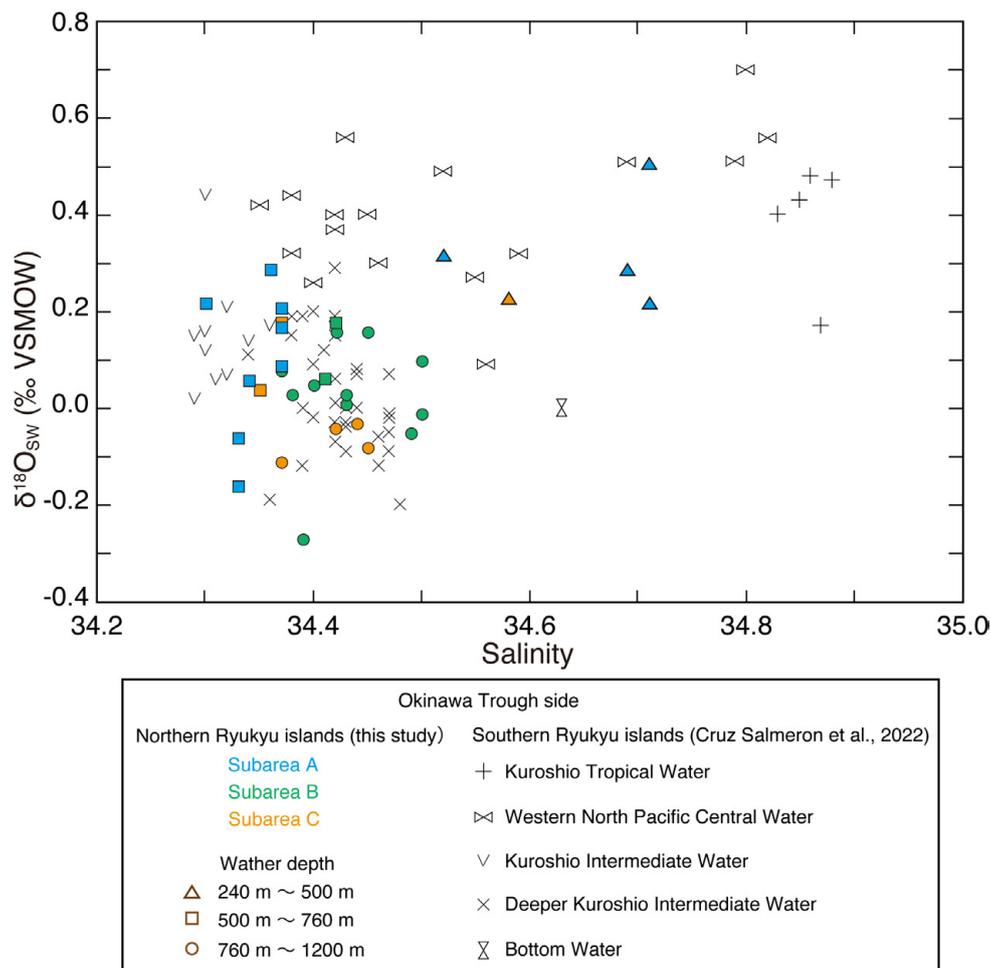
本研究では, GB21-1航海で採取された底層水(水深248 ~ 1,169 m)の水素・酸素同位体組成(δD 値, $\delta^{18}\text{O}$ 値)を検討した. その結果, トカラ列島南西海域の海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値はそれぞれ $-0.3 \sim 0.5 \text{ ‰}$, $-1.2 \sim 3.6 \text{ ‰}$ の範囲であった. 本調査海域を横当島-宝島周辺(海域A), 沖縄トラフ東縁(海域B), 宝島東方沖(海域C)の3海域に分けると, 天水線の定数項であるd-excessは, 宝島を基準として海域Aが北部と南部に分かれ, 海域Bと海域A北部は負の値, 海域Cと海域A南部は正の値をとることが明らかになった. この傾向は, 水塊の起源, 海水の混合比率, その両者のいずれかの違いを反映している可能性が示唆される. また, 塩分-酸素同位体比の関係は海域や水深によってなるため, 両基礎データをより蓄積させていく必要がある.

謝辞: 板木拓也氏, 鈴木克明氏および池内絵里氏(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)には, GB21-1航海における海水の試料採取にご尽力いただいた. ここに, 深く感謝する.



第4図 海域ごとの海水温、塩分、pH、水素・酸素同位体組成、d-excessの深度分布。d-excessのみ海域Aを北部と南部で区別した。各海域における水素・塩分の鉛直分布には、同航海のSt. g108で得られたCTDの結果を示した。水素・塩分・pHは板本ほか(2022)のデータを引用した。

Fig. 4 Depth profiles of temperature, salinity, pH, hydrogen and oxygen isotope compositions, and d-excess in the study area. The depth profile of the d-excess is shown for the northern and southern subarea A. Temperature, salinity, and pH data were from Itaki *et al.* (2022). A light green-colored line shows the salinity and temperature profiles measured with CTD at St. g108 during the GB21-1 cruise.



第5図 検討した底層水(水深248 m ~ 1,169 m)の塩分-酸素同位体組成の関係. 比較のため, 琉球孤南部(沖縄トラフ側)の塩分-酸素同位体組成の関係(Cruz Salmeron *et al.*, 2022)を示した.

Fig. 5 Relationship between salinity and oxygen isotope composition in the study area. Grey-colored plots represent the salinity–oxygen isotope composition data from the Okinawa Trough side of the southern Ryukyu Islands (Cruz Salmeron *et al.*, 2022).

文 献

- Benetti, M., Reverdin, G., Aloisi, G. and Sveinbjörnsdóttir, Á. (2017) Stable isotopes in surface waters of the Atlantic Ocean: Indicators of ocean-atmosphere water fluxes and oceanic mixing processes. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **122**, 4723–4742.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702–1703.
- Craig, H. and Gordon, L. I. (1965) Deuterium and Oxygen 18 Variations in the Ocean and the Marine Atmosphere, *In Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Tongiorgi, E. (ed), 9–130, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa.
- Cruz Salmeron, A. D., Takayanagi, H., Wakaki, S., Ishikawa, T., Miyajima, T., Wakaki, H., Itaki, T. and Iryu, Y. (2022) Characterization of water masses around the southern Ryukyu Islands based on isotopic compositions. *Progress in Earth and Planetary Science*, **9**, 44.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436–468.
- Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., Yoshie, N., Nakamura, H., Nishina, A., Kobari, T., Nagai, T. and Guo, X. (2021) How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL092063. doi: 10.1029/2020GL092063
- 板木拓也・鈴木克明・池内絵里・及川一真・片山 肇・飯塚 睦・鈴木 淳・高柳栄子(2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境. 地質調査研究報

- 告, **73**, 301–311.
- Merlivat, L. and Jouzel, J. (1979) Global Climate interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **84**, 5029–5033.
- Oba, T. (1988) Paleoceanographic information obtained by isotopic measurement of individual foraminiferal specimens, *In Asian Marine Geology*, Wang, P., Lao, Q. and He, Q. (eds.), 169–180, China Ocean Press, Beijing.
- Schmidt, G. A., Bigg, G. R., and Rohling, E. J. (1999) "Global Seawater Oxygen-18 Database", [online]. Available from: <http://data.giss.nasa.gov/o18data/> [Accessed: 2019-12-26].
- Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. (1994) *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*, third ed. W.H. Freeman, New York.
- 杉本敦子(2005)水の安定同位体比から水の動きを追う. 細氷, 51号, 2–7.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・徳田悠希・千徳明日香(2022)宝島及び諏訪之瀬島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **73**, 275–299.
- Yang, J., Han, L., Sun, D. and Xing, Z. (2022) The spatial hydrological structure of the western tropical Pacific derived from $\delta^{18}\text{O}$ and δD signatures. *Journal of Hydrology*, **607**, 127537.
- (受付 : 2022年10月31日 ; 受理 : 2023年6月11日)

GH18 航海において石垣島近傍海底で採取された堆積物の石灰質ナノ化石の追加検討

宇都宮 正志^{1,*}

UTSUNOMIYA Masayuki (2023) Additional data of calcareous nannofossil assemblage in a sediment sample obtained from the seafloor near the Ishigaki Island (GH18 cruise). *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 337–338, 1 table.

Abstract: I examined calcareous nannofossil ages for the muddy part of OK60-5 collected from the seafloor near the Ishigaki Island via GH18 cruise in 2018. The sample yielded *Discoaster tamalis*, whose last appearance datum defines top of CN12a subzone (2.76 Ma), but did not yield *Sphenolithus* spp. which have last appearance (3.61 Ma) in the lower CN12a subzone. This constrains the depositional age of the sample to 3.61–2.76 Ma.

Keywords: biostratigraphy, calcareous nannofossil, Ishigaki island, GH18 Cruise

要 旨

2018年にGH18航海で石垣島近傍の海底から採取されたOK60-5の泥質部について石灰質ナノ化石年代を検討した。試料からは終産出層準がCN12a亜帯の上限(2.76 Ma)を規定する*Discoaster tamalis*が産出し、CN12a亜帯下部に終産出層準(3.61 Ma)をもつ*Sphenolithus* spp.が産出しない。これにより本試料の堆積年代は3.61–2.76 Maに制約された。

1. はじめに

2018年に宮古島・石垣島・西表島周辺海域で行われたGH18航海では、有索式無人探査装置(ROV) TRITON XLR05 (PERRY社)のマニピレーターで露頭の一部もしくは斜面上の転石が採取された(三澤ほか, 2019)。三澤ほか(2019)の試料のうち、石灰質ナノ化石が産出した堆積物試料の石灰質ナノ化石年代は報告されたが(宇都宮, 2019)、石垣島近傍で採取されたOK60-5の砂岩試料については石灰質ナノ化石が産出しなかった。その後、同じ試料の泥質部を検討した結果、石灰質ナノ化石が確認され、堆積年代を検討したので報告する。本試料は基盤層と堆積層の境界部分で、基盤層上面が海底面に露出している海底斜面にて潜航調査を行った際に、斜面頂上部で採取された試料である。

2. 処理法と化石帯

OK60-5の泥質部の新鮮な面から米粒大の量を取り、

スミアスライドを作成した。観察は偏光顕微鏡を用いて1,500倍の倍率で行った。0.1 mm²内に観察される平均的な個数が10個より多い場合をAbundant, 1～10個をCommon, 1個未満の場合をFewとして評価した。また、保存の程度については、溶解または再結晶により同定が困難な石灰質ナノ化石がおおよそ3割以下の場合Good, 3～6割を占める場合はModerate, 6割よりも多い場合はPoorとして評価した。石灰質ナノ化石帯はOkada and Bukry (1980)に従い、年代値はRaffi *et al.* (2020)に従った。

3. 石灰質ナノ化石群集

石灰質ナノ化石の保存は良好であり産出頻度も高かった(第1表)。年代指標として重要なのは、産出層準がCN12a亜帯の上限(2.76 Ma)を規定する*Discoaster tamalis*が産出し、CN12a亜帯下部に終産出層準(3.61 Ma)をもつ*Sphenolithus* spp.が産出しない点である。これにより本試料の堆積年代は3.61–2.76 Maに制約される。終産出層準がCN12d, CN12c, CN12b亜帯の上限をそれぞれ規定する*Discoaster brouweri*, *Discoaster pentaradiatus*, *Discoaster surculus*が産出することや、CN11b亜帯からCN14a亜帯まで産出する*Pseudoemiliana lacunosa*の産出など随伴種の産出状況もこれと調和的である。以上から、本試料の元となった堆積層は島尻層群中部相当と推定される。長径7 μmを超える*Reticulofenestra pseudumbilicus*がわずかに産出するが、*Sphenolithus* spp. が産出しないことは矛盾する。石灰質ナノ化石の保存が良好で産出頻度も高いことを考慮すると*Sphenolithus* spp.のみの産出頻度

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)

* Corresponding author: UTSUNOMIYA, M., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: m.utsunomiya@aist.go.jp

第1表 GH18航海で採取されたOK60-5試料から産出した石灰質ナノ化石. 産出頻度は次のように示す;A:Abundant(多産), C:Common(普通), F:Few(少産). 保存状態は次のように示す;G:Good(良好), M:Moderate(中程度), P:Poor(悪い). 産出状況は次のように示す;+:産出が確認された種, R:再堆積と判断される種.

Table 1 Distribution chart of calcareous nannofossil identified from OK60-5 sample obtained during GH18 cruise. Abundance; A: Abundant, C: Common, F: Few. Preservation; G: Good, M: Moderate, P: Poor. +: present; R: Rework.

Leg	GH18
Sample	OK60-5
Rock type	Semi-consolidated sandy silt
Abundance	A
Preservation	G
<i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray and Blackman)	+
<i>C. macintyreii</i> (Bukry and Bramlette)	+
<i>Discoaster brouweri</i> Tan Sin Hok	+
<i>Discoaster triradiatus</i> Tan Sin Hok	+
<i>Discoaster pentaradiatus</i> Tan Sin Hok	+
<i>Discoaster surculus</i> Martini and Bramlette	+
<i>Discoaster tamalis</i> Kamptner	+
<i>Discoaster variabilis</i> Martini and Bramlette	+
<i>Emiliana huxleyi</i> (Lohmann)	+
<i>Gephyrocapsa</i> spp.small (<4 μm)	+
<i>Gephyrocapsa oceanica</i> Kamptner	+
<i>Gephyrocapsa parallela</i> Hay and Beaudry	+
<i>Gephyrocapsa</i> spp.large (>5.5 μm)	+
<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich)	+
<i>Helicosphaera sellii</i> (Bukry and Bramlette)	+
<i>Pseudoemiliana lacunosa</i> (Kamptner)	+
<i>Syracosphaera</i> sp.	+
Small placolith (<2 μm)	+
<i>Reticulofenestra asanoi</i> Sato and Takayama	
<i>Reticulofenestra</i> spp. (<7 μm)	
<i>Reticulofenestra</i> spp. (>7 μm)	R
<i>Sphenolithus</i> spp.	
<i>Umbilicosphaera</i> spp.	+
CN zone (Okada and Bukry, 1980)	CN12a

が極端に低いことや溶解等で選択的に失われたとは考えにくいことから、長径7 μmを超える*Reticulofenestra pseudoumbilicus*は古い地層からの再堆積と考えられる。

文 献

三澤文慶・荒井晃作・井上卓彦(2019) GH18航海でのROV潜航調査で採取された岩石試料. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 51–66.

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

Raffi, I., Wade, B. S., Pälike, H., Beu, A. G., Cooper, R., Crundwell, M. P., Krijgsman, W., Moore, T., Raine, I., Sardella, R. and Vernyhovova, Y. V. (2020) The Neogene Period. *In* *Geologic Time Scale 2020*, 1141–1215, Elsevier.

宇都宮正志(2019) GH18航海及びGK18-1航海において宮古島・石垣島・西表島周辺海域で採取された堆積物に含まれる石灰質ナノ化石. 井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 67–70.

(受 付 : 2022年10月31日 ; 受 理 : 2023年11月16日)

地質調査研究報告 第74巻 (第1号—第5/6号)

第1号

[論文]

Geology and accretionary age of the Otori Unit, North Kitakami Belt
MUTO Shun, ITO Tsuyoshi and MURAYAMA Masafumi1-40

[講演要旨]

第34回地質調査総合センターシンポジウム「防災・減災に向けた産総研の地震・津波・火山研究
—東日本大震災から10年の成果と今後—」講演要旨集
第34回地質調査総合センターシンポジウム事務局 41-60

第2号

[論文]

北部北上帯ジュラ紀付加体中に産する前期ペルム紀流紋岩とその帰属
内野隆之61-69

[論文]

Multi-element analysis of geological samples using ICP-MS equipped with integrated sample introduction and aerosol dilution systems
NAKAMURA Atsunori, KUBOTA Ran and OHTA Atsuyuki71-85

[論文]

北上山地南東部, 大船渡地区の中生代層のジルコン U-Pb 年代
川村寿郎・内野隆之87-105

第3号

[論文]

富士火山東山麓, 御殿場・馬伏川岩屑なだれ堆積物の¹⁴C年代
山元孝広・小林 淳107-118

[論文]

富山県中—東部の東別所層, 天狗山層及び音川層の層序対比
長森英明・渡辺真人119-131

[概報]

十和田火山の積算マグマ噴出量階段図
工藤 崇133-153

[概報]

Constraint on the spatial distribution of the Early and Middle Jurassic units within the Nakatsugawa Complex of the North Kitakami Belt by detrital zircon U-Pb dating
OSAKA Masashi, AOKI Shogo, UCHINO Takayuki and FUKUYAMA Mayuko155-166

第4号

[概報]

茨城県北部, 久慈川流域の段丘堆積物から発見された大山倉吉テフラ
細井 淳・古澤 明167-178

[概報]

茨城県大子町に露出する中新統内大野層の石灰質ナノ化石年代
宇都宮正志・細井 淳179-185

第 5/6 号 特集：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質 —2021 年度調査航海結果—

[巻頭言]

鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質 —2021 年度調査航海結果—

井上卓彦・板木拓也・天野敦子.....187-191

[概報]

GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要

高下裕章・佐藤太一・鈴木克明.....193-202

[概報]

GB21-2, GB21-3 及び GS21 航海（トカラ列島周辺海域）における磁気異常観測の概要

佐藤太一・高下裕章.....203-209

[概報]

2021 年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ調査の概要

石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦.....211-230

[概報]

GS21 航海での高分解能サブボトムプロファイラー探査に基づくトカラ列島周辺海域の海底下浅部構造

三澤文慶・古山精史朗・高下裕章・鈴木克明.....231-243

[論文]

GB21-3 航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義

有元 純・宇都宮正志.....245-257

[論文]

トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因

鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治.....259-286

[概報]

トカラ列島周辺海域（GB21-2 および 21-3 航海）で採取された海底堆積物の化学組成

久保田 蘭・太田充恒・立花好子・板木拓也・片山 肇・鈴木克明・間中光雄.....287-300

[概報]

トカラ列島周辺海域における底生有孔虫群集の概要（予報）

長谷川四郎.....301-314

[論文]

トカラ列島周辺海域における現生貝形虫相の空間変化

中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也.....315-324

[概報]

トカラ列島周辺海域から海洋底調査航海 GB21-1・GB21-2 により採集されたウシオダニ類

安倍 弘.....325-328

[概報]

トカラ列島南西海域より採水した底層水の水素・酸素同位体組成

及川一真・宮島利宏・高柳栄子・井龍康文.....329-336

[概報]

GH18 航海において石垣島近傍海底で採取された堆積物の石灰質ナノ化石の追加検討

宇都宮正志.....337-338

CONTENTS OF VOLUME 74

No. 1

[Article]

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

MUTO Shun, ITO Tsuyoshi and MURAYAMA Masafumi1–40

[Abstract]

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

Secretariat of the 34th GSJ Symposium 41–60

No. 2

[Article]

Early Permian rhyolite within a Jurassic accretionary complex in the North Kitakami Belt and its attribution

UCHINO Takayuki 61–69

[Article]

Multi-element analysis of geological samples using ICP-MS equipped with integrated sample introduction and aerosol dilution systems

NAKAMURA Atsunori, KUBOTA Ran and OHTA Atsuyuki71–85

[Article]

Zircon U–Pb ages from the Mesozoic strata of the Ofunato area, southeastern Kitakami Massif

KAWAMURA Toshio and UCHINO Takayuki87–105

No. 3

[Article]

¹⁴C ages for the Gotenba and Mabusegawa Debris Avalanche Deposits in the eastern foot of Fuji Volcano, Japan

YAMAMOTO Takahiro and KOBAYASHI Makoto107–118

[Article]

Stratigraphic correlation of the Higashibessho, Tenguyama and Otokawa formations in the central to eastern area of Toyama Prefecture, central Japan

NAGAMORI Hideaki and WATANABE Mahito119–131

[Report]

Cumulative volume step-diagram for eruptive magmas of Towada Volcano

KUDO Takashi.....133–153

[Report]

Constraint on the spatial distribution of the Early and Middle Jurassic units within the Nakatsugawa Complex of the North Kitakami Belt by detrital zircon U–Pb dating

OSAKA Masashi, AOKI Shogo, UCHINO Takayuki and FUKUYAMA Mayuko155–166

No. 4

[Report]

Daisen-Kurayoshi tephra in fluvial terrace deposits along the Kuji River in northern Ibaraki Prefecture, Japan

HOSOI Jun and FURUSAWA Akira167–178

[Report]

Depositional age based on calcareous nannofossil biostratigraphy of the Miocene Uchiono Formation exposed in Daigo Town, Ibaraki Prefecture, Japan

UTSUNOMIYA Masayuki and HOSOI Jun179–185

No. 5/6 Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruises in 2021

[Preface]

Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima prefecture: result of marine geological mapping survey cruises in Fiscal Year 2021

INOUE Takahiko, ITAKI Takuya and AMANO Atsuko187–191

[Report]

Results of the multibeam echo sounder observations on the GB21-2,3 cruises (around Tokara Islands)

KOGE Hiroaki, SATO Taichi and SUZUKI Yoshiaki193–202

[Report]

Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises

SATO Taichi and KOGE Hiroaki203–209

[Report]

Overview of the seismic survey and dredge sampling in the vicinity of the Tokara Islands conducted during geological map research cruises in 2021

ISHINO Saki, HARIGANE Yumiko, MISAWA Ayanori and INOUE Takahiko211–230

[Report]

Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GS21 cruise

MISAWA Ayanori, FURUYAMA Seishiro, KOGE Hiroaki and SUZUKI Yoshiaki231–243

[Article]

Depositional ages of sedimentary rocks obtained from the sea floor around the northern Tokara Islands during GB21-3 cruise, based on calcareous microfossil assemblages, and their geological significance

ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki245–257

[Article]

Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Tokara Islands

SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, ARIMOTO Jun, TOKUDA Yuki, SENTOKU Asuka and SEIKE Koji259–286

[Report]

Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 Cruise), Japan

KUBOTA Ran, OHTA Atsuyuki, TACHIBANA Yoshiko, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, SUZUKI Yoshiaki and MANAKA Mitsuo287–300

[Report]

Preliminary report on the benthic foraminifera in the seas surrounding the Tokara Islands, southwest Japan

HASEGAWA Shiro301–314

[Article]

Spatial variations in the modern ostracode fauna in the adjacent sea of Tokara Islands

NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki and ITAKI Takuya315–324

[Report]

Halacarid mites collected at offshore areas of Tokara Islands during the ocean floor survey cruises GB21-1 and GB21-2

ABÉ Hiroshi325–328

[Report]

Hydrogen and oxygen isotope compositions of bottom waters collected around off southwestern Tokara Islands

OIKAWA Kazuma, MIYAJIMA Toshihiro, TAKAYANAGI Hideko and IRYU Yasufumi329–336

[Report]

Additional data of calcareous nannofossil assemblage in a sediment sample obtained from the seafloor near the Ishigaki Island (GH18 cruise)

UTSUNOMIYA Masayuki337–338

本年掲載論文の査読を下記及び匿名の方々にお願ひしました。厚くお礼申し上げます。

有元 純・井川怜欧・内野隆之・及川輝樹・自見直人(名古屋大学)・志村侑亮・高橋 浩・
田中裕一郎・中嶋 健・中村淳路・中嶋 健・武藤 俊・森尻理恵・柳沢幸夫・山元孝広
(敬称略)

地質調査総合センター研究資料集

- 734 第36回地質調査総合センターシンポジウム「3次元で解き明かす東京都
部の地下地質」講演要旨集 中澤 努・野々垣 進・小松原
純子・宮地 良典(編)
- 735 葛根田花崗岩の石英の岩石学的組織 佐々木 宗建・佐脇 貴幸・藤本 光
一郎・笹田 政克
- 736 20万分の1日高変成帯地質図 高橋 浩
- 737 遺跡発掘調査において記載された桜島テフラ その1 西原 歩・下司 信夫・成尾 英仁
- 738 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構解のデジタル
データ 内出 崇彦・椎名 高裕・今西 和俊
- 739 熊本、阿蘇およびくじゅう地域の地下水および河川水の化学・同位体組成 高橋 正明・稲村 明彦・高橋 浩・
森川 徳敏・東郷 洋子・風早 康平・
佐藤 努・半田 宙子・仲間 純子・
中村 有理・大和田 道子・宮越 昭
暢・戸崎 裕貴・富島 康夫・大丸
純・清水 日奈子・大沢 信二・網
田 和宏・堀口 桂香・柴田 智郎・
小泉 尚嗣・川端 訓代・安原 正也
- 740 第2白嶺丸重力異常データ 石原 丈実・小田 啓邦
- 741 津波堆積物の研究手法 澤井 祐紀・田村 明子
- 742 産総研日高川和佐観測点における物理検層の概要と解析結果 木口 努・北川 有一・松本 則夫
- 743 産総研日高川和佐観測点の地質概要とコア資料 北川 有一・木口 努・松本 則夫・
千葉 昭彦・長谷 和則・小野 雅弘
- 744 津波のシミュレーション 伊尾木 圭衣・行谷 佑一・澤井 祐
紀・田村 明子

地質調査総合センターの最新出版物

5万分の1地質図幅	川越 磐梯山
20万分の1地質図幅	富山（第2版）
海洋地質図	No. 94 積丹半島付近海底地質図
火山地質図	No. 22 日光白根及び三岳火山地質図
海陸シームレス地質図	S-7 海陸シームレス地質情報集「相模湾沿岸域」
大規模火砕流分布図	No. 3 阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図
水文環境図	No.13 静清地域
重力図（ブーゲー異常）	No.35 伊勢地域重力図
土壌評価図	E-9 表層土壌評価基本図～九州・沖縄地方～
その他	東・東南アジア磁気異常図 改訂版（第3版） 中部地方の地球化学図

Spatial variations in the modern ostracode fauna in the adjacent sea of Tokara Islands NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki and ITAKI Takuya	315
Halacarid mites collected at offshore areas of Tokara Islands during the ocean floor survey cruises GB21-1 and GB21-2 ABÉ Hiroshi	325
Hydrogen and oxygen isotope compositions of bottom waters collected around off southwestern Tokara Islands OIKAWA Kazuma, MIYAJIMA Toshihiro, TAKAYANAGI Hideko and IRYU Yasufumi	329
Additional data of calcareous nannofossil assemblage in a sediment sample obtained from the seafloor near the Ishigaki Island UTSUNOMIYA Masayuki	337

地質調査研究報告編集委員会

委員長	鈴木 淳
副委員長	宮城 磯 治
委員	東郷 洋 子
	丸山 正
	藤井 孝 志
	持丸 華 子
	斎藤 健 志
	大谷 竜 竜
	長森 英 明
	納谷 友 規
	天野 敦 子
	細井 淳 恵
	森 尻 理

Bulletin of the Geological Survey of Japan Editorial Board

Chief Editor: SUZUKI Atsushi
 Deputy Chief Editor: MIYAGI Isoji
 Editors: TOGO Yoko
 MARUYAMA Tadashi
 FUJII Takashi
 MOCHIMARU Hanako
 SAITO Takeshi
 OHTANI Ryu
 NAGAMORI Hideaki
 NAYA Tomonori
 AMANO Atsuko
 HOSOI Jun
 MORIJIRI Rie

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
 地質調査総合センター
 地質情報基盤センター 出版室
<https://www.gsj.jp/inquiries.html>

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
 Geological Survey of Japan
 Geoinformation Service Center Publication Office
<https://www.gsj.jp/en/>

地質調査研究報告 第74巻 第5/6号
 令和5年12月28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 中央事業所7群

Bulletin of the Geological Survey of Japan
 Vol. 74 No. 5/6 Issue December 28, 2023

Geological Survey of Japan, AIST

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

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 74 No. 5/6 2023

CONTENTS

Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruises in 2021	
Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima prefecture: result of marine geological mapping survey cruises in Fiscal Year 2021	
INOUE Takahiko, ITAKI Takuya and AMANO Atsuko	187
Results of the multibeam echo sounder observations on the GB21-2,3 cruises (around Tokara Islands)	
KOGE Hiroaki, SATO Taichi and SUZUKI Yoshiaki	193
Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises	
SATO Taichi and KOGE Hiroaki	203
Overview of the seismic survey and dredge sampling in the vicinity of the Tokara Islands conducted during geological map research cruises in 2021	
ISHINO Saki, HARIGANE Yumiko, MISAWA Ayanori and INOUE Takahiko	211
Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GS21 cruise	
MISAWA Ayanori, FURUYAMA Seishiro, KOGE Hiroaki and SUZUKI Yoshiaki	231
Depositional ages of sedimentary rocks obtained from the sea floor around the northern Tokara Islands during GB21-3 cruise, based on calcareous microfossil assemblages, and their geological significance	
ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki	245
Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Tokara Islands	
SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, ARIMOTO Jun, TOKUDA Yuki, SENTOKU Asuka and SEIKE Koji	259
Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-2 and 21-3 Cruise), Japan	
KUBOTA Ran, OHTA Atsuyuki, TACHIBANA Yoshiko, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, SUZUKI Yoshiaki and MANAKA Mitsuo	287
Preliminary report on the benthic foraminifera in the seas surrounding the Tokara Islands, southwest Japan	
HASEGAWA Shiro	301

continued on inside back cover