

Online ISSN : 2186-490X

Print ISSN : 1346-4272



地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 73 No. 5/6 2022

特集：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質 —2020年度調査航海結果—



 **産総研** 地質調査総合センター 

令和4年

表紙の写真

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横当島と上ノ根島

右手前の島が上ノ根島、左奥に見えるのが横当島

左上：反射法地震探査で使用するストリーマケーブルの展開

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

右下：岩石試料を採取するためのドレッジャー

(写真・文：井上卓彦)

Cover Photograph

Marine geological survey around Tokara Islands, Kagoshima Prefecture

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

Upper: Yokoatejima Island and Kaminonejima Island, volcanic islands in the Tokara Islands, Kagoshima Prefecture.

Kaminonejima Island is at the right front, and Yokoatejima Island is at the back left.

Lower left: Deploying the multi-channel streamer cable used for seismic profiling

Lower center: Grab sampler for retrieving submarine samples from the sea bottom

Lower right: Dredge sampler for retrieving rock samples

(Photograph and caption by INOUE Takahiko)

地質調査研究報告

BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Vol. 73 No. 5/6 2022

特集：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質－2020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－2020年度調査航海結果－

井上卓彦・天野敦子・板木拓也193

論文

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

高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶197

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

高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶211

概報

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

石野沙季・三澤文慶・有元 純・井上卓彦219

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

三澤文慶・鈴木克明235

資料・解説

トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴

石塚 治・石野沙季・鈴木克明・横山由香・三澤文慶・有元 純・高下裕章・井上卓彦249

概報

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

有元 純・宇都宮正志267

論文

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

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275

概報

宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境

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301

論文

Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques

MIYAJIMA Toshihiro, HAMAGUCHI Masami, NAKAMURA Takashi, KATAYAMA Hajime and HORI Masakazu313

概報

トカラ列島周辺の深海域における表層堆積物の微生物群集構造

池内絵里・鈴木克明・井口 亮・鈴木 淳323

トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集（予報） 中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也・久保 観・佐々木聡史……………	329
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 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 ……	337

巻 頭 言：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質—2020 年度調査航海結果—

井上 卓彦^{1,*}・天野 敦子¹・板木 拓也¹

INOUE Takahiko, AMANO Atsuko and ITAKI Takuya (2022) Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruise in 2020. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73 (5/6), p. 193-196, 1 fig.

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。2020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(本稿では一般性を考慮し、トカラ列島と表す)周辺海域の調査を開始した(第1図)。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。

2020年度は海洋エンジニアリング株式会社の海洋調査船「第二開洋丸」を用いた調査航海(GK20)と東海大学の海洋調査研修船「望星丸」を用いた調査航海(GB21-1)とを実施した。GK20航海は2020年11月7日から12月2日にトカラ列島周辺海域で網羅的に実施した。主にマルチビーム音響測深器(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。また、GB21-1航海は2021年2月28日から3月29日の期間に南部トカラ列島周辺海域で主に実施した。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、MBESによる地形調査を実施し、停船観測として主にグラフ採泥

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ーを用いた柱状試料採取を行った。本号ではこれらの2020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。

本号には論文が3編、概報が8編、資料・解説が1編の計12編が収録されており、本号ではカテゴリ別ではなく、調査において基礎となるデータおよび、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。

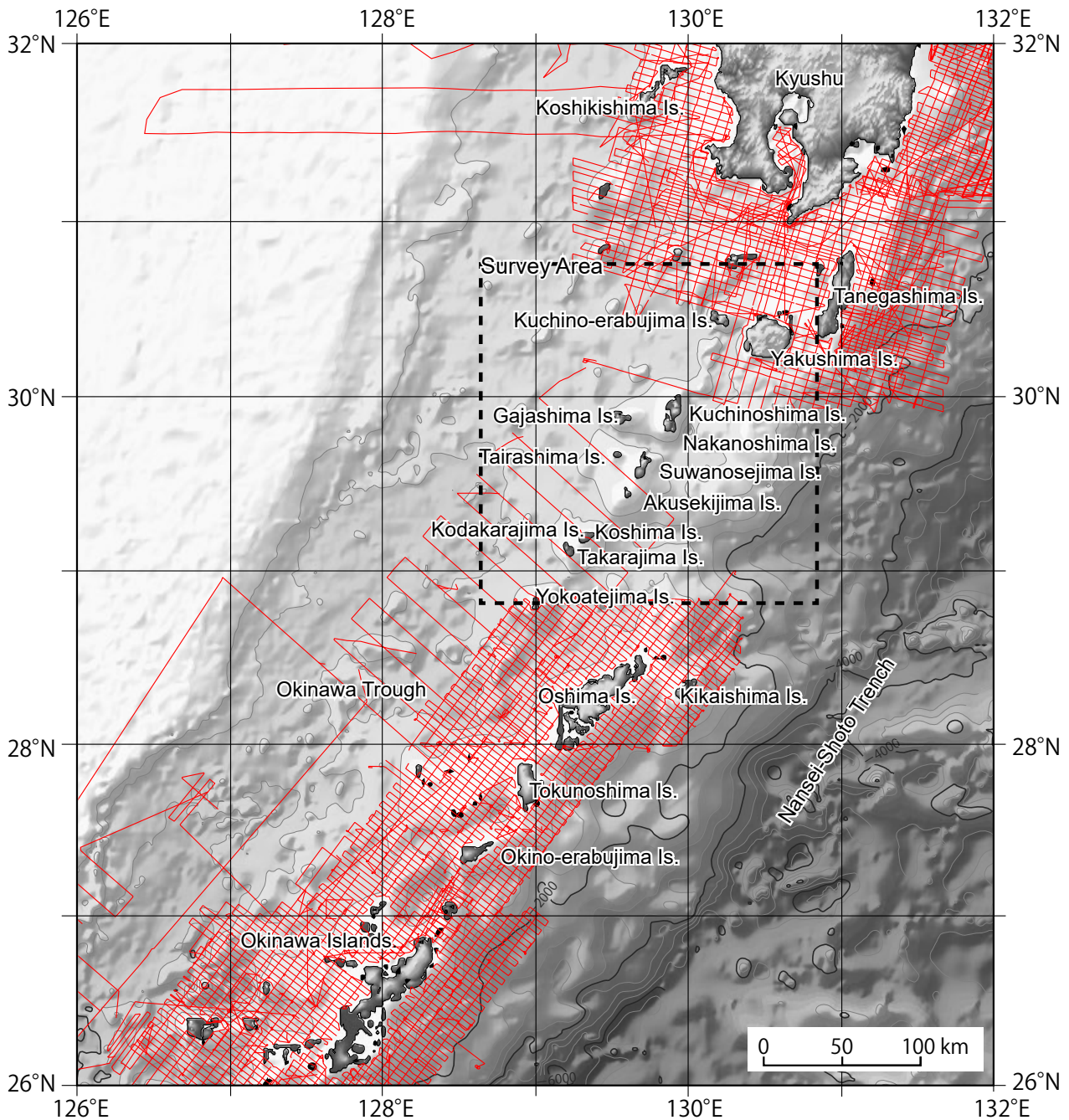
高下ほか(2022a)は、MBESにより得られた高分解能海底地形調査の結果についてまとめたものである。本論では、トカラ列島南部の海域に、沖縄トラフ拡大とトカラギャップの形成に関係すると考えられる2つの線状構造が混在することを明らかにしている。また取得した高分解能海底地形を基に、新たな海丘群を報告している。海底地形は海洋地質調査の基礎となる情報で、トカラ列島周辺海域のような基礎データの少ない海域においては大変貴重なデータであり、今後の本海域の研究を実施する上でも大変有意義な情報となる。

高下ほか(2022b)は、海洋地質図作成の一環として実施した三成分磁力計による地磁気観測の結果について、全磁力異常をまとめたものである。本論では三成分磁力計から全磁力値を合成し、曳航型全磁力計と同程度の全磁力値を得ることが出来ており、新たな補正方法を組み合わせることにより、測線間の誤差が改善することが報告されている。さらに全磁力異常の結果を用いて調査海域における地形形成と火成活動について論じている。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(2022)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の結果について

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



第1図 調査域図

赤線はこれまで海洋地質図航海で実施した航走観測の航跡、黒破線は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 (<https://www.gsi.go.jp/kihonjohochousa/multilingual.html>, 閲覧日: 2022年12月20日) 及び海上保安庁 (<https://www.msil.go.jp/>, 閲覧日: 2022年12月20日) 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 around Japan. Box enclosed by black broken lines indicate the study area since 2020FY. Geographical names follow Geospatial Information Authority of Japan (<https://www.gsi.go.jp/kihonjohochousa/multilingual.html>, Accessed: 2022/12/20) and Japan Coast Guard (<https://www.msil.go.jp/>, Accessed: 2022/12/20).

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、沖繩トラフ域及び火山フロント西方、東方のそれぞれの海域で音響層序、断層の分布深度を検討し、断層の形成時期や構造運動について考察をしている。本海域における高密度な反射法地震探査断面は、これまで取得されておらず、大変貴重なデータセットである。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、今後の発展が期待される。

三澤・鈴木(2022)は、GK20航海でSBPにより得られた海底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の分布や活断層の分布などを確認するために用いられる。本論ではSBPにより認められる音響層序と海底地形から音響層相分布を明らかにしている。本調査海域において高密度で取得された高分解能な海底浅部の地質断面は非常に貴重であり、今後、堆積層の分布や活構造の把握のために活用されることが期待される。

石塚ほか(2022)及び有元・宇都宮(2022)は、海山や海丘を形成する火山体の活動を理解することと、海底下堆積層の年代決定を目的として実施したドレッジによる海底岩石試料について論じている。石塚ほか(2022)はドレッジ試料の船上観察結果と共に、火山岩類について、全岩主成分分析を実施し、琉球弧火山フロント近傍の火山体で採取した玄武岩が、琉球弧火山フロントと同レベルかつ沖繩トラフ内のものよりやや少ないアルカリ金属元素濃度を示す一方、沖繩トラフ内の流紋岩溶岩は、火山フロント近傍の流紋岩類に比べてアルカリ金属元素濃度が高い特徴を持つことを明らかにした。また、トカラ列島周辺海域から採取された海底堆積物・堆積岩試料については、有元・宇都宮(2022)が、年代決定に有効な石灰質微化石の検討を行っている。本論では石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫を用いて、トカラ列島前弧側および背弧側から得られた試料から下部～中部更新統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。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(2022)は、表層堆積図作成のためにトカラ列島南部海域において採泥器により取得されたデータについてまとめたものである。本論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。本論では取得データから、本海域の底質分布の変化が、島嶼からの碎屑物供給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ことを指摘している。

また火山島周辺の一部の試料からは斜面崩壊などを起源としてイベント的に堆積した層相があることを指摘した。加えてリップルなどのベッドフォームや生物遺骸の濃集、露頭や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。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。

板木ほか(2022)は、トカラ列島周辺海域で実施したCTD観測と底層水サンプリングの結果から、調査海域の表層部は黒潮の影響を受けていることが確認され、表層から底層にかけて、黒潮水、北太平洋亜熱帯モード水、北太平洋中層水、北太平洋深層水に区分されると結論づけている。また一部海域では表層に水深が浅くなることによって生じた鉛直混合の影響や海底付近の流れによる厚さ数十mの高濁度層が認められたとされている。本論は系統立てて取得された海水の情報であり、トカラ列島南部の海域における水塊構造を理解するために重要な情報である。

Miyajima *et al.* (2022)は、DNAプローブ技術を用いて、トカラ列島周辺及び八重山諸島周辺海域における沿岸域に分布する大型植物由来の有機物の沖合堆積物への輸送・拡散を論じている。この中で八重山諸島の沿岸域から輸送される有機物は、八重山諸島周辺と沖繩トラフ南部の深海底堆積物に保存される一方、トカラ列島周辺の堆積物には、中国大陸の沿岸域からの大型藻類由来の有機物が多く含まれており、黒潮によって沖繩トラフ北部の堆積物に保存されており、大型植物由来の有機物の沖合の輸送・拡散については、調査地域の近傍の強い黒潮によって制約されると結論づけている。

池内ほか(2022)は、採取した表層堆積物からDNA抽出を行い、塩基配列の決定、表層堆積物のバクテリアの群集解析を行なっている。本論では、底生バクテリアの群集構造は水深と底質に影響を受ける可能性を論じており、さらに調査地点を増やすことでバクテリア群集の地理的な違いを比較できる可能性について指摘している。本研究はトカラ列島海域において初めて網羅的かつ定量的に底質のバクテリア群集構造を評価した点で貴重な知見であり、今後の深海生物群集の把握や、環境影響評価を行う上で基礎的な情報として活用されることが期待される。

中野ほか(2022)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とも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。今回の試料から本調査域で貝形虫が初めて認定され、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ることが示された。加えて、本海域の貝形虫種群や貝形虫相が水深に伴い変化する底質の影響を受けるということを論じている。

久保田ほか(2022)は、海底表層堆積物試料について、

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。本論では、沖縄本島周辺海域に比べ、本調査海域で生物遺骸粒子より陸源性砕屑粒子の寄与が大きいことが指摘されている。特に諏訪之瀬島および宝島周辺の浅い海域では、砕屑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。

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、海洋エンジニアリング株式会社第二開洋丸の五十嵐 泰船長をはじめとする乗組員及び調査員の皆様、東海大学海洋調査研修船「望星丸」の上河内信義船長をはじめとする乗組員、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、「地質調査研究報告」における本特集について、ご検討・ご承認頂くとともに、編集を担当頂いた鈴木 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

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.

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.

池内絵里・鈴木克明・井口 亮・鈴木 淳(2022)トカラ列島周辺の深海域における表層堆積物の微生物群集構造。地質調査研究報告, **73**, 323-328.

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.

石塚 治・石野沙季・鈴木克明・横山由香・三澤文慶・有元 純・高下裕章・井上卓彦(2022)トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴。地質調査研

究報告, **73**, 249-265.

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.

海上保安庁ウェブサイト(2022)海洋状況表示システム <https://www.msil.go.jp/> (閲覧日: 2022年12月20日)

国土地理院ウェブサイト(2022)多言語表記の地図 <https://www.gsi.go.jp/kihonjohochousa/multilingual.html> (閲覧日: 2022年12月20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・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.

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.

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・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.

Miyajima, T., Hamaguchi, M., Nakamura, T., Katayama, H. and Hori, M. (2022) Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **73**, 313-321.

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.

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.

(受 付 : 2022年11月25日 ; 受 理 : 2022年11月28日)

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

高下 裕章^{1,*}・佐藤 太一¹・横山 由香^{2,1}・佐藤 悠介^{2,3}・三澤 文慶¹

KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori (2022) The bathymetry survey around Tokara Islands during GB21-1 and GK20 cruises. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 197-209, 8 figs, 1 table.

Abstract: The high-resolution seafloor bathymetry was observed using Multibeam acoustic profiler (MBES) as a part of an ongoing geological mapping of the southern region of the Tokara Islands region. As a result, intricately two lineations (N24° E and N73° E) were observed in this area. The structures could be related to the formation of the Okinawa Trough and Tokara Gap, respectively. From the cutting relationship, we considered that the gap formation occurred after the trough expansion. In addition, we discovered a group of knoll chains in the N73° E direction in the southern part of the Yokogan Knoll, which we named and described as the Yokoate Echelon Knoll Chains. Based on the dipole-type magnetic anomalies and seismic reflection survey results, the Yokoate Echelon Knoll Chains are inferred to be volcanic structures. Therefore, these linear structures should be related to the rifting of the Okinawa Trough and the formation of the Tokara Gap, and this area might be important for understanding the history of the back-arc rifting in the northern Ryukyu Arc.

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

要 旨

トカラ列島南部海域において、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) による海底地形航走観測を実施し、高解像度海底地形図を作成した。その結果、2つの線状構造 (N24° E, N73° E方向) が混在する地域であることが明らかになった。これらの線状構造はそれぞれ沖縄トラフ拡大とトカラギャップの形成に関する構造である可能性が高く、本海域は琉球弧における背弧リフト形成史の理解に重要であると考えられる。さらに海底地形が高解像度で得られたことで、横ガ
ン海丘南部にN73° E方向に配列する海丘群を発見し、横
当雁行海丘群として記載した。この海丘群はダイポール
型の磁気異常と反射法地震探査の観測結果から、火山性
の構造であることが推測される。

1. はじめに

GB21-1 及び GK20 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30度10分、東経128
度20分から東経130度00分の範囲、中之島、臥蛇島、
諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺海域にお

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両
調査航海の全航跡図を示す。本報告書ではGB21-1を中
心に測深データの取得方法・データ処理・処理結果の報
告及び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データの処理結果についても報告
する。

2. 装置及びデータ処理

2.1 GB21-1 調査航海

2.1.1. 測位航法装置

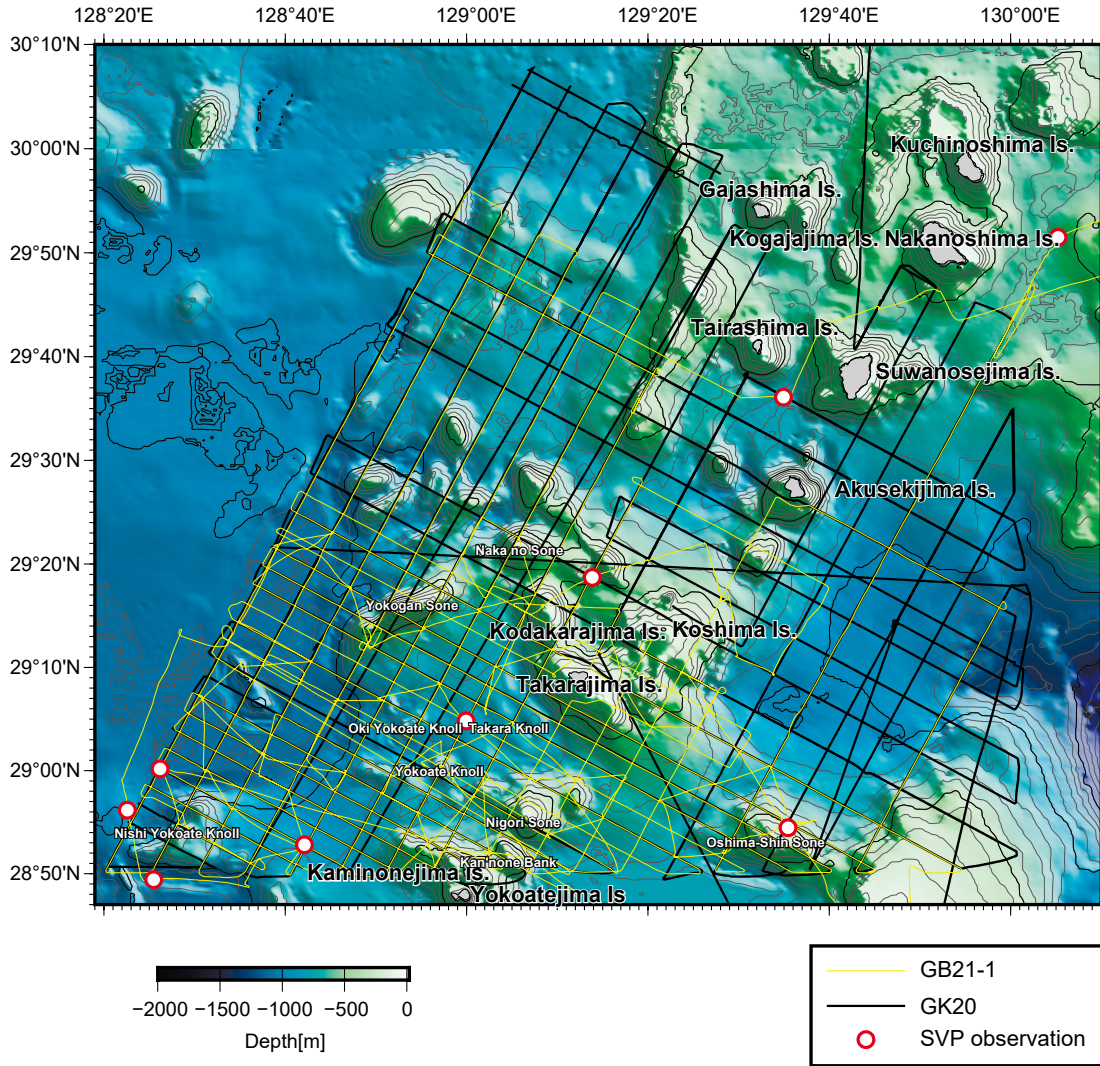
GB21-1 調査航海では東海大学所有の海洋調査研修船
「望星丸」を使用した。船の全長は87.98 m幅は12.80 mで
ある。測位と船体動揺データはSeapath380-5+ (船体動揺
船首方位測定装置:以下Seapath) で統合しており、ヘディ
ングはMBES専用のアンテナによるGPSコンパス機能、
ロール・ピッチ・ヒーブはMRU 5+MKII (動揺センサー)
によりそれぞれ観測している。測位に関し、2020年4月
以降に実施されたGB21-1 観測航海とGK20航海では、日
本の海域では準天頂測位衛星みちびきのL1S信号による

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)

² 東海大学海洋学部 (School of Marine Science and Technology, Tokai University)

³ 株式会社 マリン・ワーク・ジャパン (Marine Works Japan, Ltd.)

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



第1図 GB21-1, GK20航海の調査海域及び測線図。黄色実線はGB21-1航海, 黒色実線はGK20航海測線を表す。赤丸は音速度観測を行った箇所を表す。岸本(2000)による250 m統合グリッドを使用した。なお、北緯30度に東西方向に存在する線は地形ではなく、岸本(2000)グリッドにおけるデータ境界である。

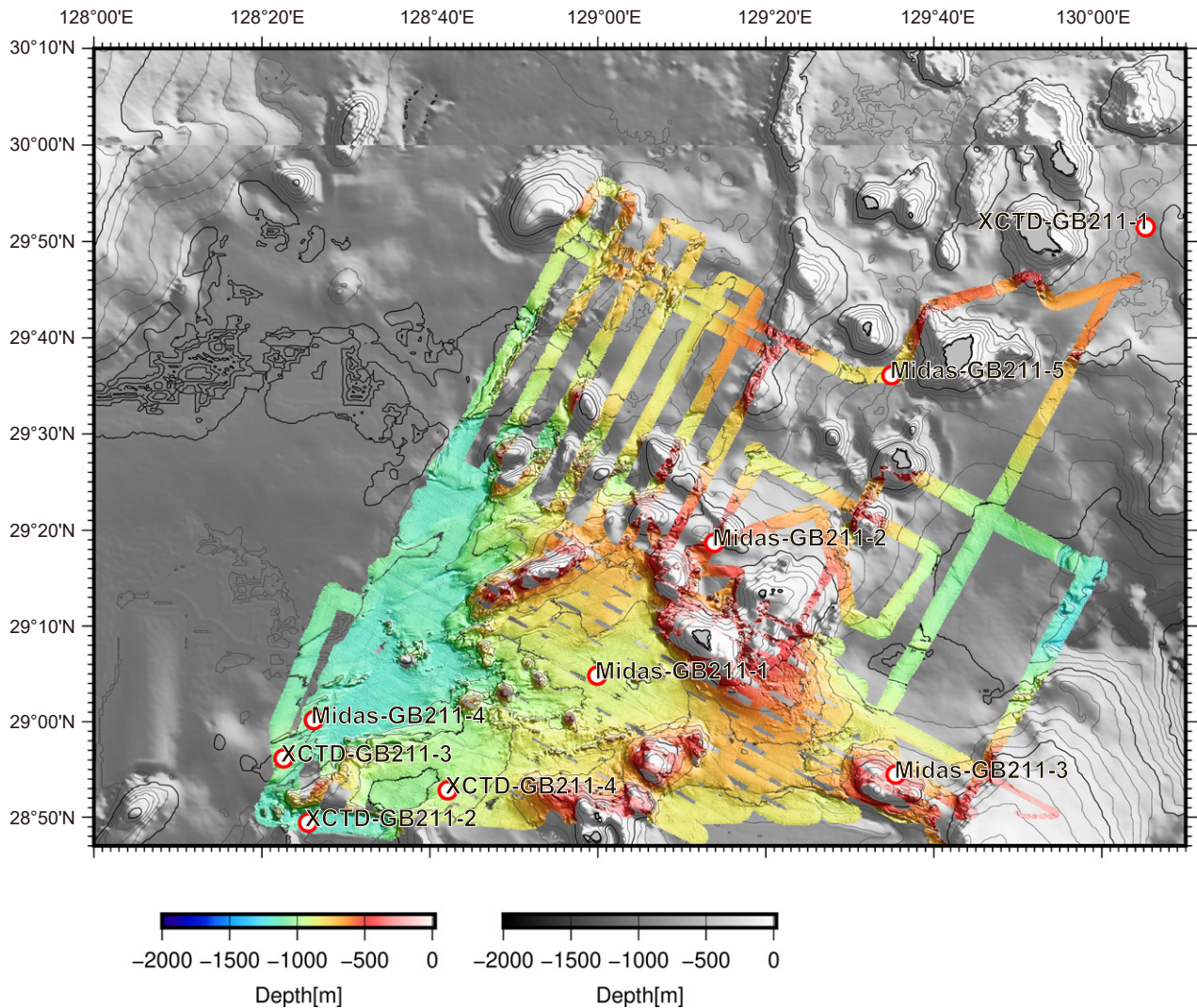
Fig.1 Survey area and Track lines of the GB21-1 and GK20 cruises. The solid yellow line represents the GB21-1 and the solid black line represents the GK20. The red circles indicate the locations of the sound velocity observations. Bathymetry data was used the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000). The east-west slice line at 30° N is not a topographic feature, but a data boundary.

サブメートル級測位, 及びみちびきの配信するSBAS 信号受信で測位精度を維持している。

2. 1. 2. MBES

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しながらリアルタイムで観測できるタイムオブフライト方式のApplied Microsystems Ltd.社製Micro X, SV-Xchargeが導入され, 船底における精密な音速(精度: ±0.025 ~ 0.50 m/s)の観測が可能となっている。音速センサーによって観測された値は

望星丸搭載のMBESである深海用のEM302 (Kongsberg社製)に入力される。GB21-1航海では全調査海域においてEM302(周波数30kHz)を使用した。海底地形データはKongsberg社のオリジナルフォーマット(.allファイル)で記録された。取得されたデータに対して, CARIS社HIPS & SIPS 11.3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。海中音速度観測に関しては次項目で説明する。再計算・再処理された海底地形データは緯度・経度・深度のアスキーフォーマットでファイル出力を行い, GMT (Generic Mapping Tools ver. 6; Wessel *et al.*, 2019)のnearneighbor



第2図 GB21-1航海で取得した海底地形図. グリッド間隔は50 mである. 等深線の間隔は100 mである. 背景にグレースケールで岸本 (2000) による 250 m統合グリッドを表示した.

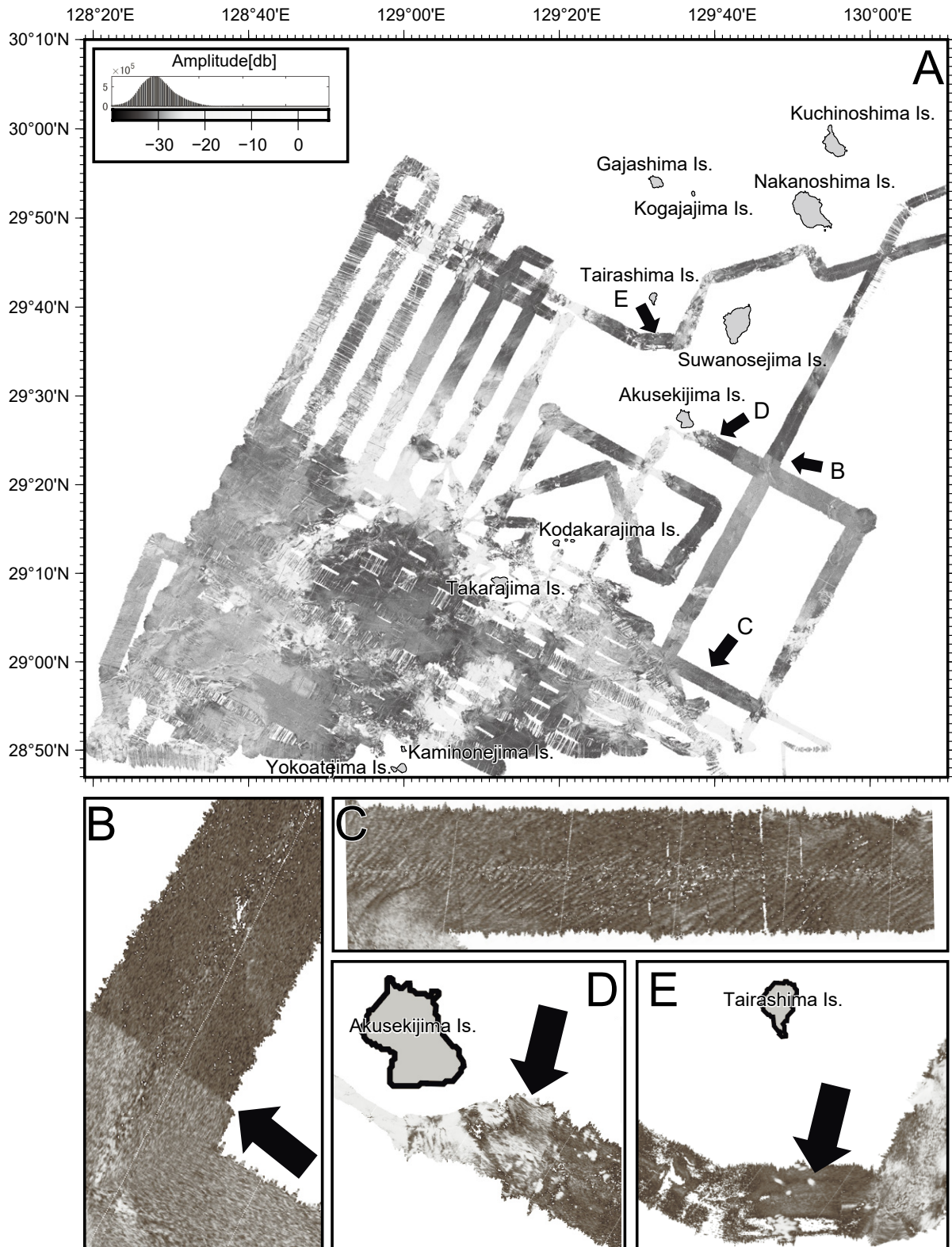
Fig.2 The cleaned bathymetry of GB21-1. Grid space is 50 m. The contour interval is 100 m. In the background, the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000) is drawn in gray scale.

アルゴリズムにより、グリッド間隔50 mの海底地形グリッドデータを作成した(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 11.3でデータを出力したのちにGMTのxyz2grdアルゴリズムにより20 mグリッドを作成した(第3図). 一般的に後方散乱強度は技術的に海底地形より細かい海底面の情報を観測しているため、より細かいグリッドで作成することができる.

2. 1. 3. 音速度観測

音速度プロファイルはXCTD観測 (XCTD-4, 鶴見精機製), 及び弊産総研有の音速度計 (Midas MiniSVP,

Valeport社製. 以下Midasと省略)により観測を実施した(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: 1850 m)を装着し、合計4回の観測を実施した. ただし2回目の投入時は強風のためプローブとランチャをつなぐ銅線と船体が接触し、通信が中止され観測に失敗した. そのため実際の観測結果は3回分のみとなる. 使用したXCTDプローブは電磁誘導型セルによって電気伝導度の観測を行っている. なお鶴見精機のXCTDプローブの詳細についてはMizuno and Watanabe (1998)を参照されたい. 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



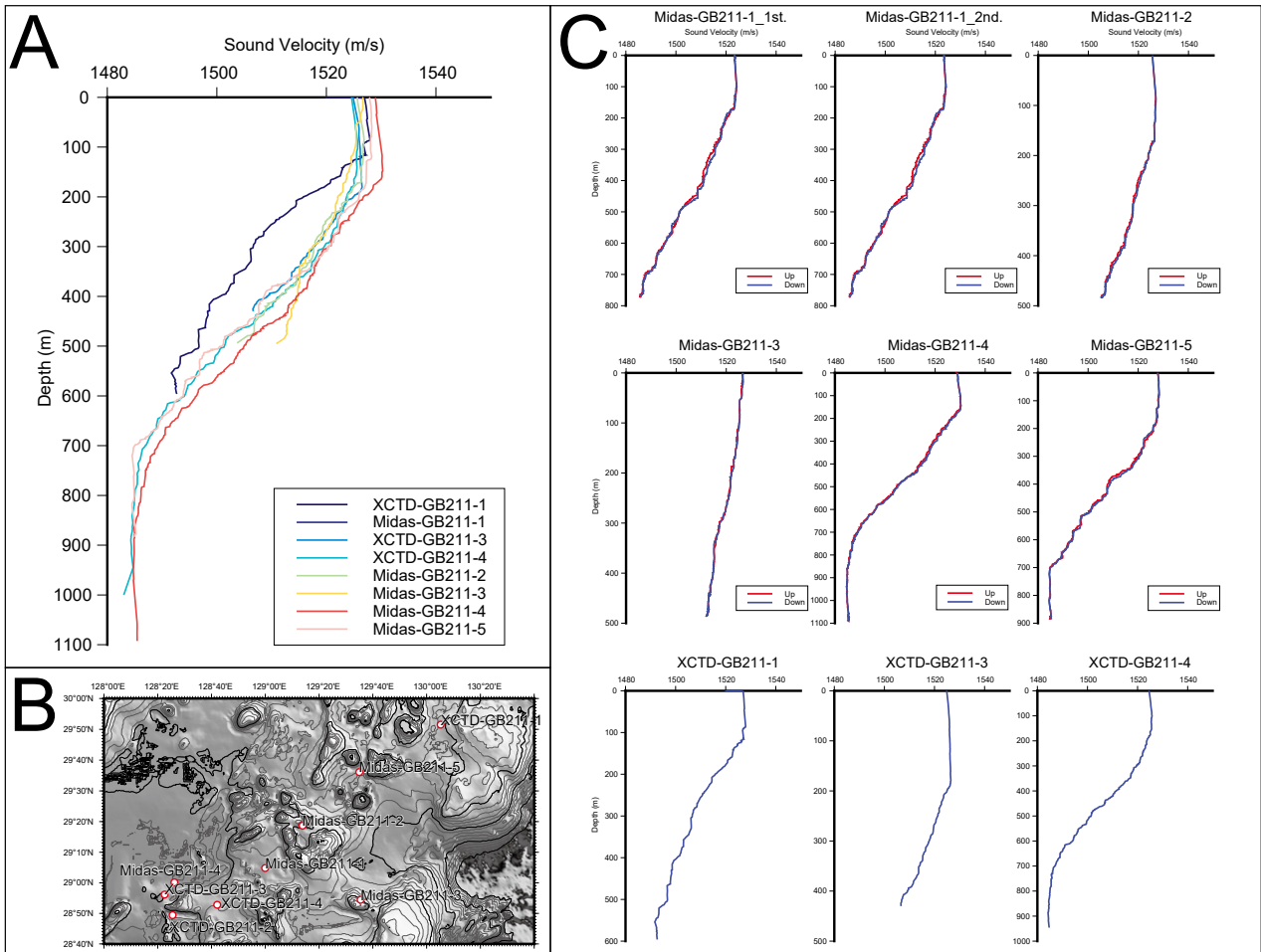
第3図 GB21-1航海で取得した後方散乱強度図。白い場所ほど反射強度が強い。

Fig.3 Backscatter image observed by the GB21-1. The white suggests stronger reflection.

第1表 GB21-1 調査航海におけるCTD, 音速度およびXCTD観測一覧。

Table.1 The list of sound velocity observations during the GB21-1 cruise.

Site Name	Equipment	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth(m)	Date(JST)	Time(JST)	Note
XCTD-GB211-1	XCTD	29° 51.49	130° 05.22	596	2021/3/7	9:29:53	-
Midas-GB211-1	Valeport MiniMidas	29° 04.82	128° 59.94	771	2021/3/9	16:16:16	K-grab g62 (double data)
XCTD-GB211-2	XCTD	28° 49.42	128° 25.51	-	2021/3/12	9:39:24	Failed 283.3m
XCTD-GB211-3	XCTD	28° 56.16	128° 22.59	430	2021/3/12	10:41:58	Failed 429.6m
XCTD-GB211-4	XCTD	28° 52.82	128° 42.13	1000	2021/3/14	18:16:36	-
Midas-GB211-2	Valeport MiniMidas	29° 18.69	129° 13.86	482	2021/3/16	8:37:37	K-grab g141
Midas-GB211-3	Valeport MiniMidas	28° 54.46	129° 35.46	485	2021/3/18	7:30:59	K-grab g24
Midas-GB211-4	Valeport MiniMidas	29° 0.17	128° 26.19	1092	2021/3/20	16:30:44	K-grab g107
Midas-GB211-5	Valeport MiniMidas	29° 36.10	129° 34.96	883	2021/3/24	6:55:35	K-grab g197



第4図 GB21-1 航海の音速度観測から得た海中音速度プロファイル。Bに位置を，Cには各プロファイルを個別に示す。

Fig.4 Sound velocity profiles obtained from the GB21-1 cruise. Fig.4B is the index map. Fig. 4C shows each profile individually.

フトにより生データ(.RAWファイル), 全データ(.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。本報告書では深度1 m間隔のデータを使用して解析を行っている。なお, 電気伝導度から塩分への換算, 深度の計算, 音速度の計算などはそれぞれの観測機器に付属のソフトウェアで処理した。なおXCTD観測は曳航体(セシウム磁力計・エアガン・ストリーマケーブル)の投入前後の低速航行時に, 風向きに応じて調査船の研究室の右舷または左舷部から後方に向けてプローブを投下した。

Midasは採泥時の木下式グラフ採泥器(K-グラフ)のフレーム内部に固定し, 表層採泥に伴い合計5回の観測を実施した。2回の投入を実施したMidas-GB211-1では, 1回目の投入時にK-グラフに装備した誤作動防止装置(板木, 2018)が解除されずグラフ採泥器が作動しなかった。この誤作動防止装置の不作動の原因として高度計とMidas発振周波数の干渉が懸念されたため, 2回目の投入では誤作動防止装置をあらかじめ解除した状態でK-グラフ投入を行った。その後実施した4地点では問題なく作動したため, Midas-GB211-1での不作動はMidasとは別の原因で発生したと現時点では考えている。また, 一般的なCTDではセンサーを下向きに固定して観測を行うが, K-グラフ着底時の破損を回避するため本観測ではMidasのセンサーをすべて上向きで固定して観測を実施した。Midasの音速度センサーはタイムオフライン方式であり, 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放射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精密計測して音速度を求める。電気伝導度計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。温度計のタイプは白金測温抵抗高速センサーであり, 計測範囲は-5~35℃, 分解能は0.001℃, 精度は ± 0.01 ℃である。圧力計のタイプはピエゾ抵抗センサーであり, 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は2019年4月にメーカーによる校正が行われている。Midasはオフラインで観測し内蔵メモリーにデータを蓄積, 揚収後にデータを回収する。観測はスイッチコネクタを挿入することで開始され, コネクタを抜去することで終了する。機器の設定は制御用のソフトウェアDataLog Expressを用いて行った。GB21-1調査航海では, 全ての観測において連続測定モード(Continuous Mode)を用いて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が, 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を行った。

第4図にMidasの直接計測音速度プロファイルとXCTDによる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K-グラフの下降時・上昇時で得られ, 下降・上昇中の音速プロファイルが微小にずれることが確認された。ただし一般的なCTDのオペレーションでは降下時に水塊を乱してしまっていると考え, 上昇時のデータは使用しない。そのため今回の処理においてはそちらに倣い, 下降時のデータを音速度として採用した。

各海域に合わせた海底地形の音速度補正は必須である。本航海では, 各地点の音速プロファイルを, HIPS & SIPS 11.3の音速度補正オプションのPrevious in Timeを用いて補正を行った。

2.2 GK20 調査航海

GK20航海は調査委託で行われ, 海洋エンジニアリング株式会社所有の第一開洋丸にて観測が実施された。第一開洋丸は望星丸と同じEM302が搭載されている。こちらもGB21-1航海と同様にHIPS & SIPS 11.3で観測データの計算・処理を行い, GMT(Generic Mapping Tools)のnearneighborアルゴリズムにより, グリッド間隔50 mの海底地形グリッドデータを作成した(第5図A)。また後方散乱強度データは海底地形データと同時に取得された。データ処理には, CARIS社のHIPS & SIPS 11.3でデータを出力したのちにGMTのxyz2grdアルゴリズムにより20 mグリッドを作成した(第5図B)。

2.3 データ統合

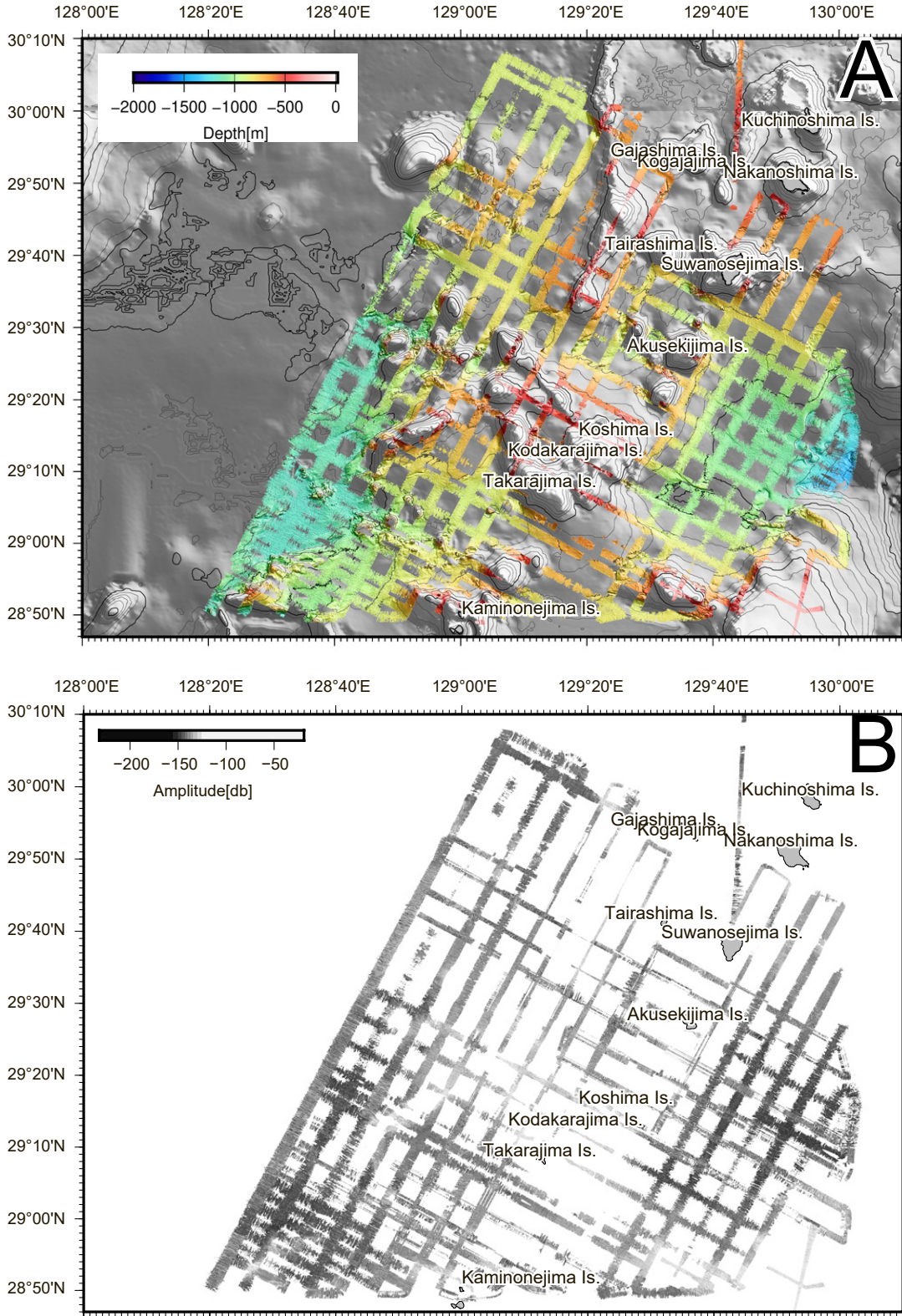
最終的に海底地形データは既存のGH11航海のデータ(佐藤・小田, 2012)にGK20, GB21-1航海のデータを合わせ本海域の海底地形図を作成した(第6図)。加えてQGIS 3.20の地形解析プロセッシングツールGeomorphon(Jasiewicz and Stepinski, 2013)を用いて海底地形から構造の抽出を行い, 海底地形解析図を作成した(第7図)。後方散乱データに関しては観測で使用した船上装置の違いのみならず海況にも大きく影響を受けて同一箇所で違う値を示すことも一般的である。そのため, 海底地形のような統合が難しい。以上から今回は後方散乱に関しては統合を実施していない。

3. 結果と考察

3.1 音速度観測

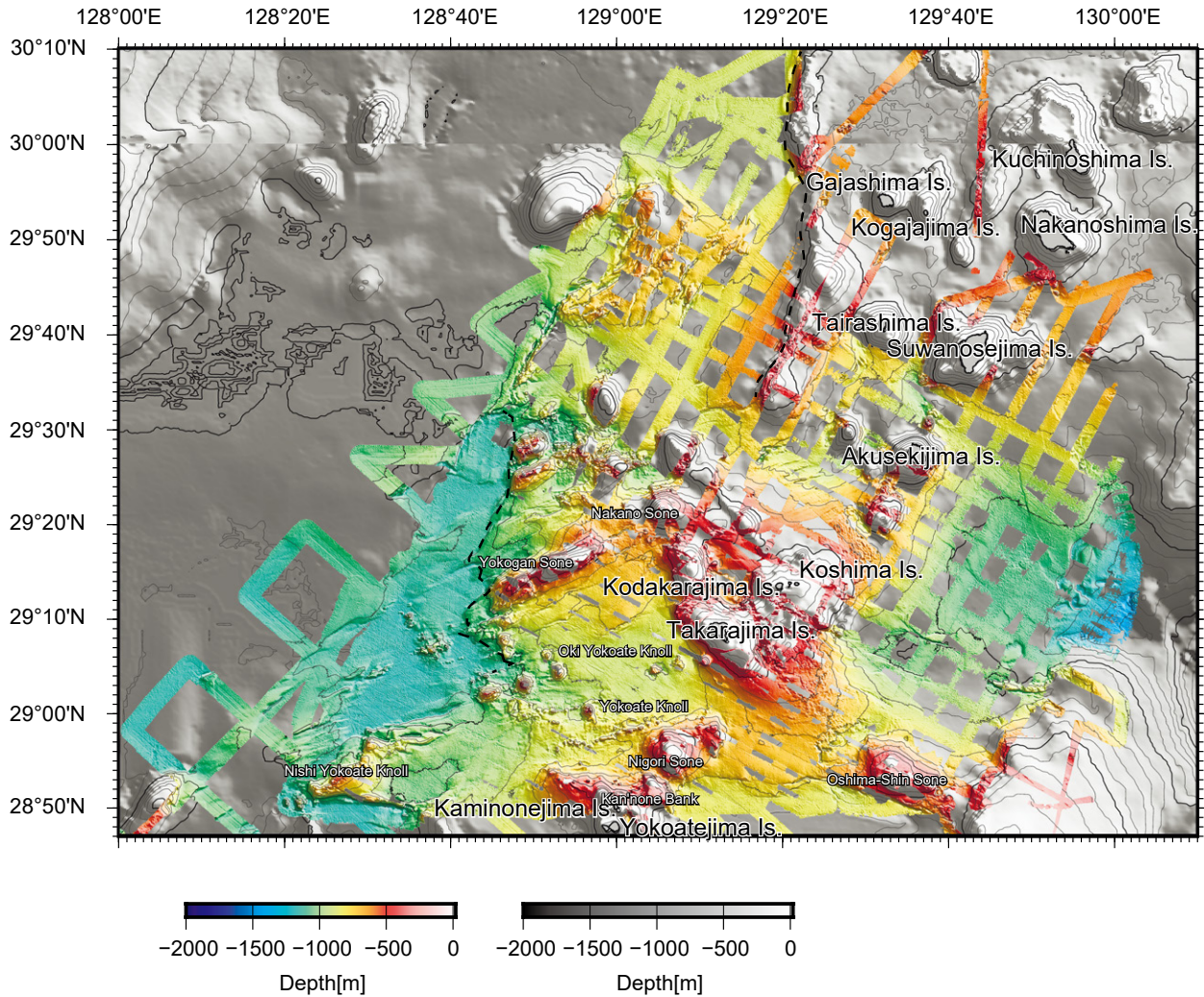
地形補正に用いるために取得した音速度プロファイルについてその特徴と傾向について簡潔に記す。本海域で取得された音速度プロファイルは, 全体的に表層と同様の音速度を水深200 m程度まで保持し, より水深が大きくなると音速度が低下していくという形状を示している。

これまで観測を実施してきた中部および南部沖縄トラフ海域での海中音速度は大きく3つのカテゴリに分類することが出来る。まず①速度一定層を持たない海域: GH10沖縄島北西(小田ほか, 2010), GH12沖永良部島周辺(小田・佐藤, 2013), GH17石垣島・奄美大島周辺



第5図 GK20航海で取得した海底地形図(A)および後方散乱強度図(B)。海底地形図には背景にグレースケールで岸本(2000)による250m統合グリッドを表示した。

Fig.5 The cleaned bathymetry (A) and backscatter image (B) of GK20. The space of bathymetry is 50 m. The contour interval is 100 m. In the background, the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000) is drawn in gray scale.



第6図 GH11・GK20・GB21-1航海にて取得されたMBESデータを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岸本(2000)による250 m統合グリッドを表示した。破線は沖縄トラフとの境界と想定される崖の解釈線。

Fig.6 Integrated bathymetry at the GH11, GK20 and GB21-1 cruise. The grid space is 50 m. In the background, the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000) is drawn in gray scale. The broken line is the interpretation line of the cliff which is assumed to be the boundary with the Okinawa Trough and the arc.

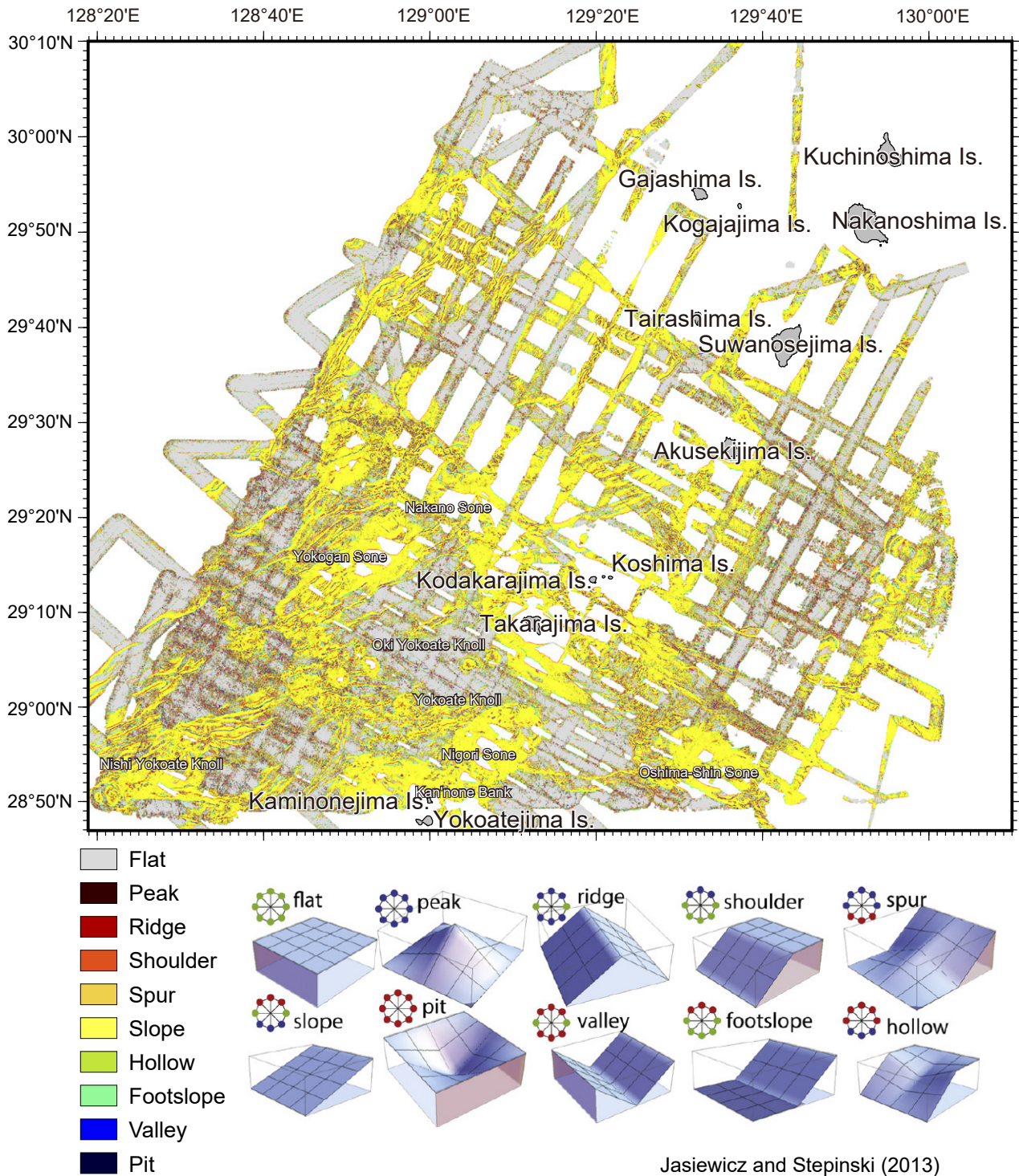
海域(佐藤, 2018)。次に②表層50 mまで速度一定層を持つ海域: GH13徳之島周辺海域(佐藤, 2014), GH15奄美大島周辺海域(佐藤ほか, 2016), GH18(古山ほか, 2019), GH19(佐藤ほか, 2020)。最後に③表層50mを超える速度一定層を持つ海域: GH14奄美大島・徳之島・沖永良部島周辺(小田・佐藤, 2015)。水深50 m程度までは風と波浪の影響による混合層を反映している可能性が高いが、本海域の調査の場合はそれよりも深部まで速度一定層が形成されている。

このような表層の速度一定層が存在する主な原因としては東シナ海から流入する黒潮の影響または大陸河川の影響が考えられる。一般的な黒潮の特徴として、平面分布としては海面では100 kmほどの幅を持ち、流速は水深

約200-600 mにある主水温躍層で大きく減少し、1,000 m以深ではさらに低下する傾向を持つ(川辺, 2003)。海上保安庁の海洋速報(海流図)を参照(海上保安庁, 2019)すると、GB21-1航海時にトカラ列島内に黒潮の流軸が存在していたことが分かる。一方、奄美大島北側では表層海域の塩分分布から東シナ海の大陸からもたらされた低塩分水塊の存在が指摘されている(天野ほか, 2018)。また沖縄トラフ南端海域では前弧側・背弧側で音速度プロファイルが異なることが報告されている(古山ほか, 2019)が、本海域ではこのような変化が見られなかった。

3.2 海底地形

統合地形データを第6図に示す。調査海域の地理的呼



第7図 海底地形解析図。GH11・GK20・GB21-1航海の統合海底地形グリッドにQGISの地形解析プラグイン“Geomorphon” (Jasiewicz and Stepinski, 2013)を使用した。地形の探索範囲は200 m、傾斜の閾値を2.5度として解析した。

Fig.7 Geomorphon (Terrian forms) image analyzed by QGIS plugin (Jasiewicz and Stepinski, 2013) with integrated bathymetric grid for the GH11, GK20, and GB21-1. The topographic search area was 200 m, and the slope threshold was set to 2.5 degrees.

称は海上保安庁のウェブサイト「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 (<https://www.msil.go.jp/msil/htm/topwindow.html>, 閲覧日: 2021年1月14日). 第7図は海底地形から構造を抽出した図であり, 尾根・谷・傾斜等を色分けして表示している. また, バックグラウンドには岸本 (2000) を基に白黒で描写した. 以下では海底地形についてその記載と予察的解釈を示す.

水深は北東方向に連続する島弧を中心に西側の沖縄トラフおよび東側の海溝へ向かい増加する. 沖縄トラフ側では約1,180 m前後の水深の平坦面が広がる一方で海溝側は海溝に向かい連続的に斜面が続き, 沖縄トラフよりも深く水深は1,400 mを超える. 火山フロント上に各島が形成されている一方で, 悪石島と小宝島こたからの間に谷地形が存在することがわかる. いわゆるトカラギャップといわれる地質構造であるが, 明瞭な変形構造や断層等の同定は表面の地形からは確認できなかった.

つぎにトラフ側の地形を見てみると, トカラ列島の平島・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する (東経129度20分, 北緯29度30分から北緯30度10分, 第6図破線). これより西側の海底は1180 m前後の平坦面が広がっていることから, この連続的な崖はトカラ列島海域での沖縄トラフのトラフ底の縁辺をなすと考えられる. 横ガン曾根の西にも同様の地形が広がっており (東経128度40分, 北緯29度00分から北緯29度30分, 第6図破線), こちらも同様に縁辺部の一部であることが推測される.

この線状構造に加えて, 海域南側のトラフ・島弧部ではもう1つの東北東-西南西方向 (N73° E) の線状構造が発達している様子が見られる. 例えば海底地形解析図 (第7図) を見ると横ガン海丘南部では顕著に東北東センスの海丘が列状に形成されている. 反射法地震波探査断面から同位置で多くの正断層が同様の方向で発達していることが確認された (石野ほか, 2022). また濁り曾根の北側に新たに見つかった海丘列群 (詳細は後述する. 便宜上以下では伊豆小笠原の背弧雁行海山群に倣い, 横当雁行海丘群と呼称する) も同様の線状で構成されている (第6図, 第8図に拡大図を示す). また, 海丘群東側で見られる同じN73° E方向の線状を示すグラーベン構造群も特徴的である (第8図中破線). これらの線状構造は横瀬ほか (2010) によって報告されているNNE-SSW 方向及びNW-SE方向の火山・海丘列の線状構造とは異なる. 悪石島と小宝島の間にはトカラギャップ (約1.8万年から活動) が位置している (木村ほか, 1993). そのため, この2つ目の線状構造の形成には沖縄トラフの拡大 (2 Maより現在) という大きなテクトニクスの中で (木村ほか, 1993), トカラギャップ形成のローカルな力学が影響している可能性が高い.

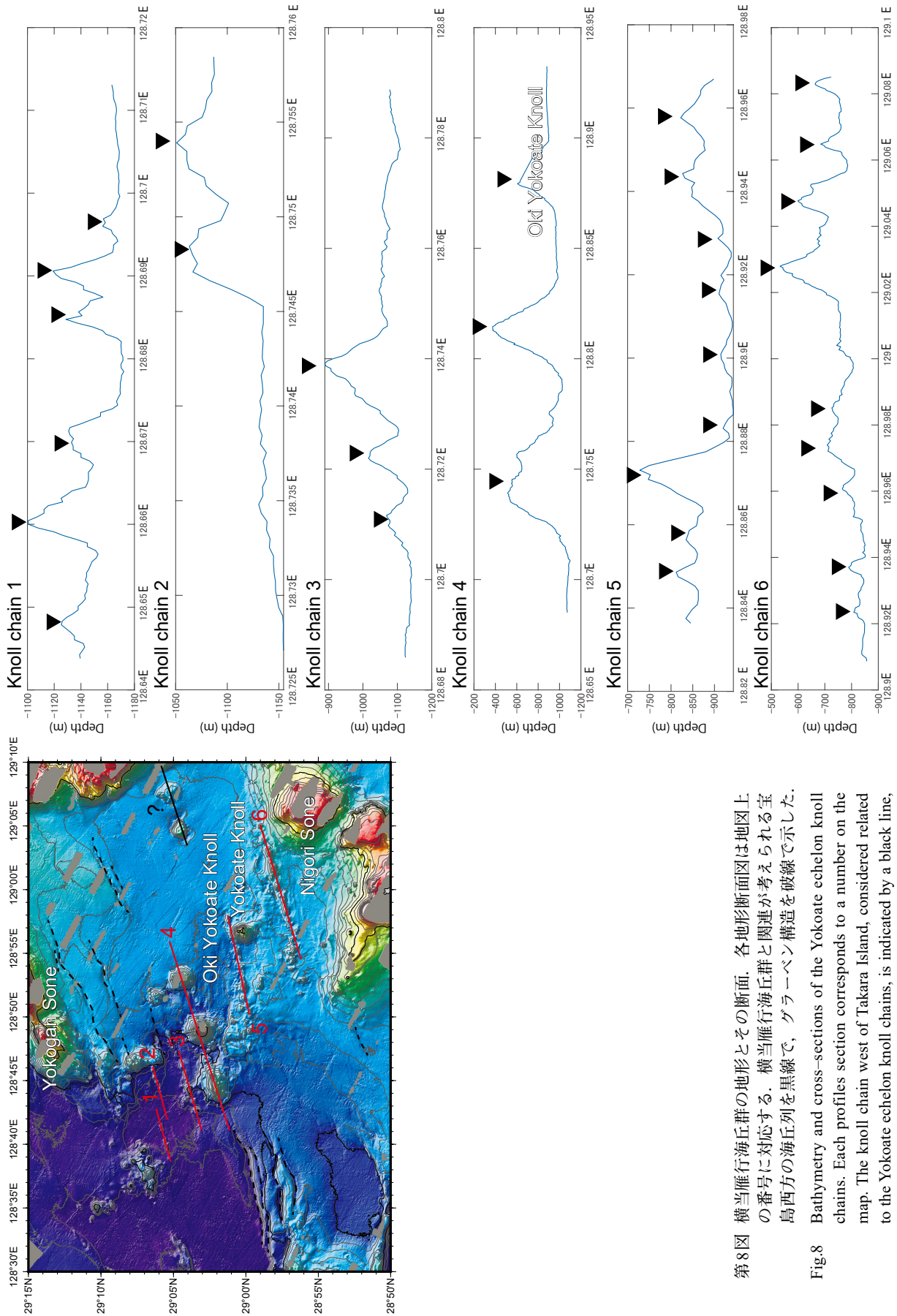
先述の横ガン曾根の西側, N24° E方向に伸びる西落ち

の崖を見ると, N73° E方向の線状構造 (特にグラーベン地形) によって細かく切られている. そのため, その前後関係としては沖縄トラフ形成のあと, トカラギャップが形成される応力場に変換したことが推測される. ただしN73° E方向の線状構造が島弧並行方向の応力場のみで形成されたのか, またはトラフ直方向と島弧並行方向の応力場の合力で形成されたのかは現段階では断定が難しい.

今後広域な地形で線状構造の分布を追うことで検証可能と考える. また宝島周辺海域の地形調査 (Minami *et al.*, 2021) で, 本調査より海溝側でも沖縄トラフが開く方向の活動の後に, 島弧と並行な方向への拡大が起きたことが示唆されており, 順序としては整合的である. また木村ほか (1993) ではトカラギャップ海溝側で南北成分の深部断裂の横ずれ断層が東西方向のtension crack様な断層形成に寄与していることが推測されていることから, トカラギャップ形成には深部断裂の広がりや海底面での断層分布の関連を議論していく必要がある.

横当雁行海丘群は沖横当海丘を含めて構成されており, 本航海での観測範囲では横ガン曾根から濁り曾根までに6列あることが確認できた (第8図). 具体的な各海丘列の中心位置としては北から順番に東経128度40分42秒・北緯29度5分41秒, 東経128度44分33秒・北緯29度6分4秒, 東経128度44分15秒・北緯29度3分51秒, 東経128度48分47秒・北緯29度3分16秒, 東経128度53分1秒・北緯29度0分15秒, 東経129度0分24秒・北緯28度57分45秒に該当する海丘列が存在する. 沖横当海丘を含む4列目のみ海丘の大きさが異なる大きめの海丘列だが, これも同じ方向に列しているため現段階では同等の扱いをする. 一方で, 横当海丘は海丘列5列目に含めるかどうかだが, これらは平均的な大きさより著しく大きいため違う成因が想像されることから現時点では除外した. また位置が離れているため除外しているが, 宝島西方にも同様の海丘列が見られ横当雁行海丘群と関連が予想される. 海丘列ごとに最大比高はそれぞれ第1列目60 m, 第2列目72 m, 第3列目160 m, 第4列目620 m, 第5列目160 m, 第6列目210 m, また海丘の数は第1列目6個, 第2列目2個, 第3列目3個, 第4列目3個, 第5列目5個, 第6列目9個であった. 海丘群は後方散乱において白く表示されており (比較的固い底質を反映しているとされる), 磁気異常図を見ると第1列目の場所で北側が負のダイポール磁気異常が確認できた (高下ほか, 2022) ことから, 海丘群は火山性のものであることが推測される. 反射法地震探査の観測結果でも同様に火山性であることが推測されている (石野ほか, 2021).

中央海嶺では拡大速度とメルト供給のバランスが海洋性地殻の形成に重要であるとされている (e.g. Buck *et al.*, 2005). リフト帯は中央海嶺とは異なり定期的な海洋性地殻の生産は行われていないため, この考えをそのまま



第8図 横当雁行海丘群の地形とその断面。各地形断面図は地図上の番号に対応する。横当雁行海丘群と関連が考えられる宝島西方の海丘列を黒線で、グラベン構造を破線で示した。

Fig.8 Bathymetry and cross-sections of the Yokoate echelon knoll chains. Each profiles section corresponds to a number on the map. The knoll chain west of Takara Island, considered related to the Yokoate echelon knoll chains, is indicated by a black line, and broken lines indicates the graben structures.

適応することは難しいが、これをアナロジーとして用いると、今回見つかった海丘群も拡大(伸長)量とメルトの供給のバランスに支配されていると予想される。つまり、今回発見された海丘列の大きさのバリエーションは、伸長場とメルト供給のバランスのゆらぎによるのではないかと現時点では推測する。上記仮説の検証には、先述した広域での線状構造の分布の把握に加え、海丘列の年代情報が鍵と考える。線状構造を示すグラベン構造もゆらぎの一部と見なすことができるのかも検証が必要である。

これまで沖縄トラフ北端部ではリフティングに関連した火山活動は見つかっていなかった。今回記載した海丘群の走向がリフティングに伴う断層活動に規制されているとすれば、沖縄トラフ全体での比較研究による背弧拡大のテクトニクスの解明につながるため非常に重要な地質構造と考えられる。

3.3. 後方散乱強度図

後方散乱強度は概して、海底表面の底質の違い(露岩は反射が強く、堆積物は弱い)を反映している。今回は-35 db以下をノイズとして扱い、それより大きな値のみで20 mグリッドを作成した(第3図)。色はヒストグラムの最頻値を確認し、それより強度が強い=白、強度が弱い=黒として表現されるような設定でプロットした。後方散乱データが様々な要因に大きく影響を受けることは既に述べた。例えば第3図Aの一部を拡大すると、測線の途中から色が劇的に変化しているような箇所が見られた(第3図B矢印)。これは底質が劇的に変化した訳ではなく、船速度・水深などの影響でマルチビーム測深器の設定が変化し音波を弱く発信するように変化したことに依る。このような人工的な変化も記録していることを念頭に置いて観察をおこなった。またGK20航海ではMBES観測をサブボトムプロファイラー観測と同時に実施したことにより後方散乱強度データには大量のノイズが含まれていた。このため、後方散乱強度の観察はGB21-1航海のデータのみで実施している。

まず宝島西方に位置し、濁り曾根を囲う平らな地形(第7図)では後方散乱強度が非常に弱い様子が見られた。同じ平らな地形でも、トラフ底とされる場所ではより反射強度が強い物質が堆積している様子が見られる(第3図A)。また第3図Cの箇所では非常に連続的でリズムカルなラミナが存在することが見られた。また海底地形では十分観察できていなかったが悪石島東沖や平島南沖では柔らかい底質の上に固いものがブロック状に存在している様子が示唆された(第3図D, E矢印)。小林(2008)によると悪石島は過去1万年以内、平島はより古い数十万年以内に噴火した火山とされており、火山性の崩壊堆積物と推測されるが、崩壊地形かどうか断定を行うにはまずこれらの崩壊堆積物と思われる構造に関して、堆積物の

分布、形状や内部構造を整理すること、さらに今後の地質図航海を経て、より広域で詳細な海底地形が取得されることと、トカラ列島周辺でほかにも同様の崩壊地形が存在していないか確認することが重要と考えられる。

4. まとめ

GB21-1及びGK20調査航海では主としてトカラ列島周辺海域の調査で高解像度海底地形が新たに取得された。取得された地形の観察から主として2つの線状構造(N24° E, N73° E)が混在する地域であることが明らかになった。横ガン曾根の西側でN24° E方向の崖がN73° E方向で細かく切断されていることから、順序としてはN24° E, N73° Eの順番で構造が形成された可能性が高い。また海底地形が高解像度で得られたことで、横ガン海丘南部にN73° E方向に配列する海丘群を新たに報告し、これを横ガン海丘群として記載した。この海丘群はダイポール型の磁気異常を呈することと反射法地震探査の観測結果から、火山性の構造であることが推測される。一般的に中央海嶺で形成される火山性の構造はメルトの供給量と伸長速度のバランスに支配されるが、これをアナロジーとして用いると同様のメカニズムが働き、この海丘群ではダイクや海丘列として現れている可能性が考えられる。両線状構造がそれぞれ沖縄トラフ形成とトカラギャップの形成に関する構造である場合、沖縄トラフ形成史の理解に重要な構造である可能性が高い。後方散乱強度図からはラミナ、崩壊堆積物等の海底地形図からは判別が難しい詳細な堆積構造が見られた。

謝辞：今回の調査では、望星丸・第二開洋丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、RAやアルバイトで乗船された方々、およ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の尽力に大変お世話になりました。また、査読者である石塚 治氏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

- 天野敦子・杉崎彩子・鈴木 淳・味岡 拓・板木拓也・片山 肇(2018) CTD観測による奄美大島周辺海域の海洋環境。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, 97–105.
- Buck, WR., Lavier, LL. and Poliakov, ANB. (2005) Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, **434**, 719–723.
- 古山精史朗・佐藤雅彦・三澤文慶(2019) GH18調査航海(石垣島・西表島周辺海域)における海底地形観測の概要。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, 6–14.
- 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 (2018) 超音波高度計によるK-クラブ採泥器の誤作動防止システム. 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, 143–146.
- Jasiewicz, J. and Stepinski, T.F. (2013) Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, **182**, 147–156.
- 川辺正樹 (2003) 黒潮の流路と流量の変動に関する研究, 海の研究, no. 12(3), 247–267.
- 海上保安庁ウェブサイト (2019) 海洋速報 & 海流推測図. <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2021cal/cu0/qboc2021165cu0.html> (閲覧日: 2021年10月1日)
- 木村政昭・松本 剛・中村俊夫・西田 史・小野朋典・青木美澄 (1993) トカラ海峡の潜水調査: 沖繩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, 287–307.
- 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).
- 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.
- Minami, H., Ohara, Y. and Tendo, H. (2021) Volcanic and tectonic features of Shira-hama Bank in the northern Ryukyu Arc: Implications for cross-arc volcanism controlled by arc-parallel extension. *Marine Geology*, 106623.
- Mizuno, K. and Watanabe, T. (1998) Preliminary results of in-situ XCTD/CTD com-parison test. *Journal of Oceanography*, **54**, 373–380.
- 小田啓邦・板木拓也・片山 肇・鈴木 淳・兼子尚知 (2010) 沖繩島西方海域の採泥地点の音速プロファイルと水深. 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, 23–33.
- 小田啓邦・佐藤太一 (2013) GH12 調査航海海域の音速度構造. 荒井晃作 (編) 「沖繩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—, 地質調査総合センター速報, no. 61, 10–17.
- 小田啓邦・佐藤太一 (2015) GH14 調査航海海域でのCTD観測及び海中音速度観測. 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成26年度研究概要報告書—奄美大島, 徳之島, 沖永良部島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 67, 28–46.
- 佐藤雅彦・佐藤太一・小田啓邦 (2016) GH15 調査航海におけるCTD及び海中音速度観測の概要. 板木拓也 (編) 「沖繩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, 5–14.
- 佐藤雅彦 (2018) GH17 調査航海におけるCTD及び海中音速度観測の概要. 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, 6–16.
- 佐藤太一・小田啓邦 (2012) GH11 航海 (沖繩トラフ-東シナ海) 海域の海底地形. 荒井晃作 (編) 「東シナ海沖繩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—北部沖繩トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 19–28.
- 佐藤太一 (2014) GH13 調査航海海域でのCTD観測及び海中音速度観測. 荒井晃作 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成25年度研究概要報告書—徳之島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 64, 66–75.
- 佐藤太一・高下裕章・佐藤雅彦 (2020) GH19 航海 (与那国島周辺海域) 及び GK19 航海における海底地形観測の概要. 井上卓彦 (編) 「沖繩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, 6–17.
- 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, EM.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康弘・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: 2021年1月14日; 受理: 2022年7月7日)

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

高下 裕章^{1,*}・佐藤 太一¹・横山 由香^{2,1}・佐藤 悠介^{2,3}・三澤 文慶¹

KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori (2022) Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-1 and GK20 cruises. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 211–217, 3 figs, 2 tables.

Abstract: The magnetic observation was observed using shipboard three-component magnetometer (STCM) as a part of an ongoing geological mapping of the southern region of the Tokara Islands region. In this cruise, we used the data of the STCM for the calculation instead of the cesium magnetometer. We tried to conduct the corrections with the existing data Magnetic Anomaly Map of East Asia (CCOP 3rd). As a result, because the data observed by the STCM was very accurate, and the total magnetic anomaly analyzed by this method was almost the same accurate as the cesium magnetometer, and was free from errors at the intersections that usually appear. Therefore, this correction method could improve to also the observation of cesium magnetometers. In the island arc area, many dipole-type magnetic anomalies were observed. With bathymetrical observation, it suggests active volcanism. On the other hand, the trench side was almost flat magnetically. On the trough side, the significant positive magnetic anomalies were observed. This area has a small knoll, but it is not so distinct, which might reflect large-scale igneous activity beneath the seafloor that is not currently visible on land.

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

要 旨

トカラ列島南部海域において、海域地質図作成を目的とした地磁気観測を実施し、三成分磁力計の観測値に基づき全磁力異常図を作成した。全磁力の計算には東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版を用いた補正を試みた。フラックスゲート型船上三成分磁力計の観測値が精度よく観測されていたこともあり、曳航型セシウム磁力計と同程度の全磁力値を得ることができた。さらに本手法で解析した結果には、測線交点部のエラーがほぼ存在しなかった。今回試した補正方法はセシウム磁力計の観測等でも応用できると考える。島弧部では多くのダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から活発な火山活動が推測される。一方で海溝側は磁氣的に起伏が小さく島弧部ほど顕著ではなかった。また、トラフ側では正の磁気異常の目玉が見られた。地形的には海丘のような地形があるが、さほど明瞭でないことから考えると海底面に現在現れていない海底下の大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。

1. はじめに

GB21-1 及び GK20 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30度10分、東経128度20分から東経130度00分の範囲、中之島、臥蛇島、諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺海域において、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、両航海でのフラックスゲート型船上三成分磁力計により得られた磁力データの処理方法とその一次解析結果についての報告を行う。なお、GB21-1 航海では曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製) での全磁力観測は機器不調により実施することができなかった(第2.2.2節にて後述)。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

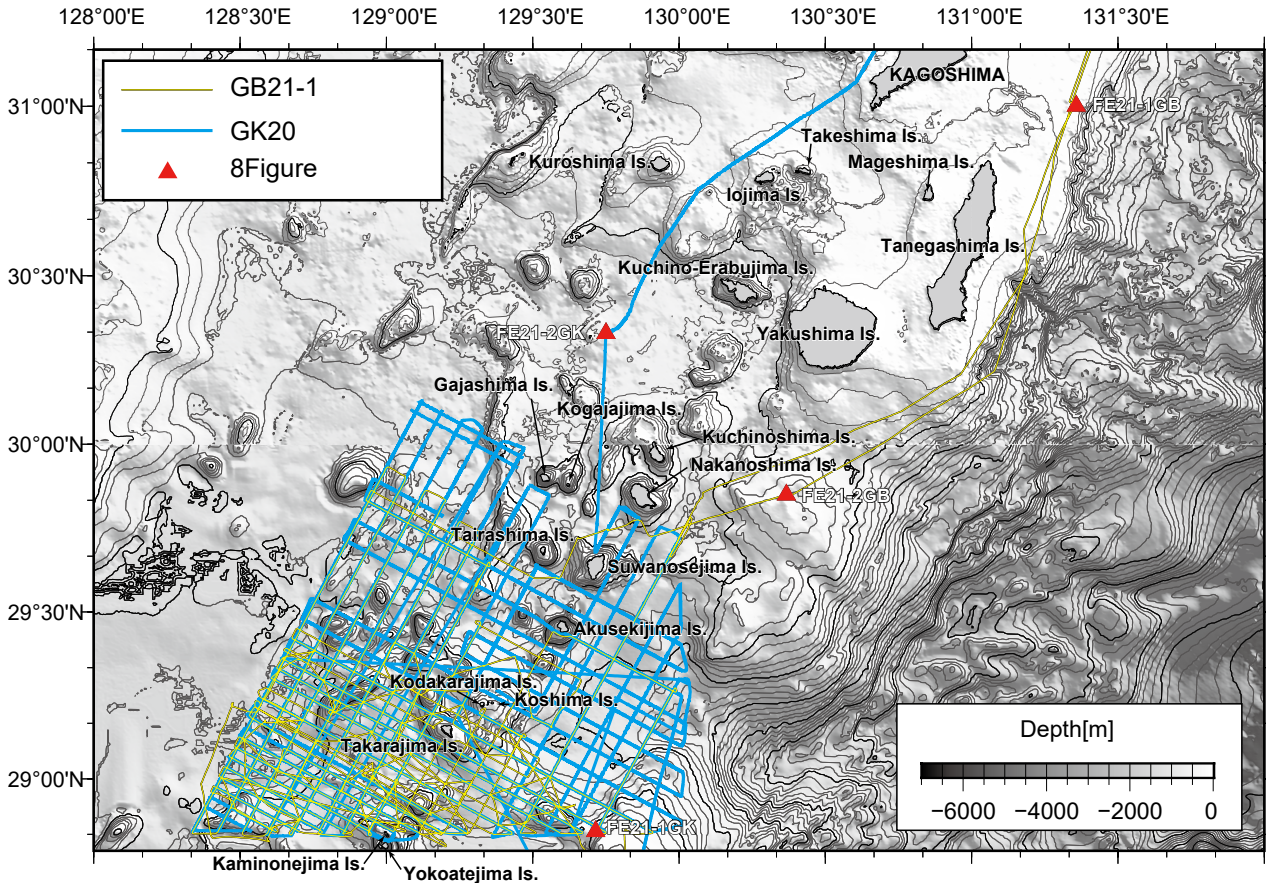
GB21-1 調査航海では東海大学所有の海洋調査研修船「望星丸」を使用した。船の全長は87.98 m、幅は12.80 mである。GK20 航海では海洋エンジニアリング株式会社

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 東海大学海洋学部 (School of Marine Science and Technology, Tokai University)

³ 株式会社 マリン・ワーク・ジャパン (Marine Works Japan, Ltd.)

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



第1図 GB21-1, GK20調査航海における磁気異常観測の全測線図。黄線はGB21-1, 水色線はGK20の測線を示す。赤三角形は8の字航走を実施した位置。地形は岸本(2000)による250 m統合グリッドを使用した。なお、北緯30度に東西方向に存在する線は地形ではなく、岸本(2000)グリッドにおけるデータ境界である。

Fig.1 All track lines of magnetic anomaly observations during the GB21-1 and GK20 cruise. The yellow and light blue lines indicate the GB21-1 and GK20 survey lines, respectively. The red triangle indicates the position of the figure-8 correction. Bathymetry data was used the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000). The east-west slice line at 30° N is not a topographic feature, but a data boundary.

所有の「第二開洋丸」を使用した。船の全長は72.85 m幅は12.60 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。

2.1 フラックスゲート型船上三成分磁力計によるベクトル観測とデータ処理

2.1.1. 観測機器及びデータ観測

船上三成分地磁気測定には産総研が所持する深海三成分磁力計(SFG-2009型, テラテクニカ社製)を使用した。磁力計にはフラックスゲートセンサーを用いており、センサーの測定精度は±200 nTである。磁力計の温度安定性は0.5 nT/°Cであり、出力データの分解能は1 nTである。磁力計の座標系は船首方向が+X, 右舷方向が+Y, 船底方向が+Zであり、直交度は±20分以内である。また船の姿勢に関しては、ジャイロの方位は右回頭方向がプラス, ロールは左舷上げ方向がプラス, ピッチは船首下げ

方向がプラスとして固定した。船体動揺データにはマルチビーム音響測深観測(MBES)で使用されている船体動揺船首方位測定装置を用いた。望星丸では地磁気三成分のサンプリング周波数は8 Hz, 船体動揺データおよび位置データは航法装置基準点の位置での船のGPSデータが4 Hz間隔で測定される。また、第二開洋丸では地磁気三成分のサンプリング周波数は8 Hz, 船体動揺データとGPSによる位置データはマルチビーム測深器にて収録されたデータ(.allファイル)内から、動揺センサーデータを抽出したものを使用した。ヘディングは1 Hz, ロールとピッチは100 Hz間隔のデータが得られている。なお、両航海データに用いられたMRU5+は内部の3軸加速度センサーと3軸角速度センサーに基づき、ロールとピッチの絶対値を出力し、また、3軸方向の加速度・速度・相対位置の出力も行う。

三成分磁力計センサー部は、GB21-1調査航海におい

第1表 GB21-1, GK20調査航海における8の字航走一覧.

Table 1 List of figure-8 correction during the GB21-1 and GK20 cruise.

Site name	Longitude (deg.)	Latitude (deg.)	Depth (m)	Date(UT)	Time (UT)	
					Start	End
FE21-1GB	131°21.45'E	31°00.07'N	162	2021/3/7	1:45	2:06
FE21-2GB	130°22.03'E	29°50.98'N	188	2021/3/21	15:15	15:33
FE21-1GK	129°42.91'E	28°50.51'N	427	2020/11/25	2:43	2:56
FE21-2GK	129°45.03'E	30°19.77'N	632	2020/12/1	16:49	16:59

て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。またGK20調査航海においては第二開洋丸ブリッジデッキに設置した。両航海では船体磁気係数導出のために、8の字航走観測を調査海域で計4回実施した(第1表)。8の字航走は基本的に舵角15度、8 knot (14.8 km/h)で合計20分、転回角度としては1周半の450度をめどとして実施している。

2.1.2. データ処理

船上三成分地磁気測定で得られる値は地球磁場のほか船体の磁気を含んでいる。そのため、地磁気三成分値を求めるためには船体の磁気の影響を取り除く必要がある。Isezaki (1986)の方法に基づき、8の字航走中に得られる地磁気測定値および船体動揺データから船体磁気係数を出した。さらに、導出した船体磁気係数を用いて観測データの補正を行い、測線上の地磁気三成分値を計算した。また磁気異常値を求める際には、コサインテーパフィルター (bandpass長波長200 kmおよび短波長0.5 km ~ 0.2 kmで0)を適用し、極端な短波長・長波長成分を除去し、さらに国際標準磁場 (IGRF 13th generation; Alken *et al.*, 2021)を差し引くことで磁気異常値を求めた。地磁気全磁力異常はこうして得られた地磁気三成分異常をスカラー量に変換することで算出することが出来る。なお、地磁気は空間変化に加えて時間的にも変動するため、地磁気の日変化の補正を行う必要があるが、今回のような観測システムではデータの精度に対して地磁気日変化の影響は小さいと考えられるので、日変化補正は行っていない。

一般的なフラックスゲート型船上三成分磁力計の強みとして、ベクトル量である地磁気の三成分を測定できること、海況によって磁力計を曳航できない場合も観測可能なこと、測線間隔を密に取れない場合や測線方向にかかわらず磁気異常の変化をとらえることができることなどが知られている。一方で、センサーを船上に置くため船体磁気の影響が大きく、また現状の補正手法で得られる結果は補正が不十分であることが一般的であり、特に曳航型のプロトン磁力計やセシウム磁力計による全磁力観測値と絶対値においてその精度に差がある。ただし、

船上三成分地磁気測定で得られる磁気異常の相対変化は、GK20航海とGB21-1航海とで整合性が取れていることから、レベル補正の実施により、正確な全磁力異常値を求めることが出来ると考えた。

そこで今回はフラックスゲート型船上三成分磁力計から得られた全磁力観測値を東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版 (Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST, 2021; 以下CCOP and GSJ, AIST, 2021)を基準にし、レベル補正を実施した。なお東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版では複数航海のデータをレベル合わせて、2分間隔のグリッドデータに統合してある。レベル補正の具体的な手順としては以下の2段階の処理を各測線で実施した。まず①2各測線ごとに観測された全磁力と同じプロファイルのCCOP and GSJ, AIST (2021)による磁気異常値の全磁力とを引き算し、差のトレンドを得た。次に②得られたトレンドをもとに観測データからトレンド除去を実施した。処理にはMatlabのdetrendコマンドを用いて計算を行った。この処理結果の議論については第3節で行う。

さらに上記のレベル補正を経て得られた両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 kmの全磁力異常グリッドデータを作成した。なお、今回交点ごとの差が非常に小さいため交点補正は実施していない。こちらも第3節で議論を行う。

2.2 セシウム磁力計

2.2.1 観測機器及びデータ観測

地磁気全磁力観測には産総研の曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製)を使用した。本調査では船体磁気の影響を避けるために、磁力計を船尾左舷側から約300 m後方に曳航し、音波探査と同時に曳航観測を行った。データ収録はGeometrics社のデータ収録ソフト (MagLog)を用いて実施する。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の広域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。MagLog

第2表 GB21-1, GK20 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 figure-8 correction of GB21-1 and GK20.

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 _h	σ _s	σ _v
FE21-1GB	1.0393	0.0449	-0.079	0.0252	1.1891	0.0803	-0.148	0.0387	0.8544	-12885	9495	-16874	91	176	286
FE21-2GB	1.0485	0.026	-0.131	0.0591	1.1806	-0.031	-0.164	0.0461	0.9674	-9841	15763	-23744	98	249	222
FE21-1GB& FE21-2GB	1.048	0.0347	-0.124	0.043	1.1852	0.0153	-0.166	0.0439	0.9608	-10280	13231	-23193	237	276	308
FE21-1GK	1.0112	0.1204	-0.173	-0.035	1.1883	0.0594	0.1054	-0.092	0.7477	22153	4944	280	486	643	124
FE21-2GK	1.0075	0.1215	-0.191	-0.034	1.1891	0.0481	0.1036	-0.09	0.7328	23501	5310	1346	598	706	183
FE21-1GK& FE21-2GK	1.0308	0.0954	-0.005	-0.039	1.1946	0.0142	0.1201	-0.11	0.8699	15351	6794	-4659	575	673	210

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う。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する。今回はGB21-1調査航海では前述のとおり曳航型セシウム磁力計による全磁力データが得られなかったことから、処理の詳細は省略する。

2.2.2 機器不調に関して

GB21-1調査航海では、前述のとおり曳航型セシウム磁力計による全磁力データが得られなかった。セシウム磁力計の不調が2021年3月7日の観測初日の投入直後に発覚したためである。具体的にはSignal lowが表示され、全磁力の測定が困難な状態に陥った。通信システムのトラブルである可能性を疑い、ケーブルの交換ののち再投入を実施したが症状に変化はなかった。8日は電圧システムの点検のため各接続部の電圧を確認し、電気システムは正常であることを確認した。最終的にデバッグモードで点検を実施したところ通信がほとんど取れていないことが分かった。9日には接続部の掃除を行った後、再度投入したが状態が回復しなかったため観測を断念した。

製造元のGeometrics社での曳航式磁気センサーの点検修理によりRFトランジスタの経年劣化が要因の通信不良であることが分かった。修理では当該部品に加え、犠牲電蝕用垂鉛の交換、Oリングの交換が実施された。航海前には電圧および通信に関して点検を行っていたが、屋内やデッキでは鉄などの磁化された材料を多く含むため、セシウム磁力計が正常に動作している場合でもSignal lowが表示されてしまう。そのため、これまでの点検では今回の通信異常に関しては検知することができていなかった。

このように屋内での点検のみでは不十分であったので、修理から返却されたのち発電施設および遮蔽物のない野外 (国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所波崎海洋研究施設)での点検観測を実施し、正常に動いていることを確認した。その後、修理後実施されたGB21-2

航海において本装置を用いて観測を行った。

3. 結果と考察

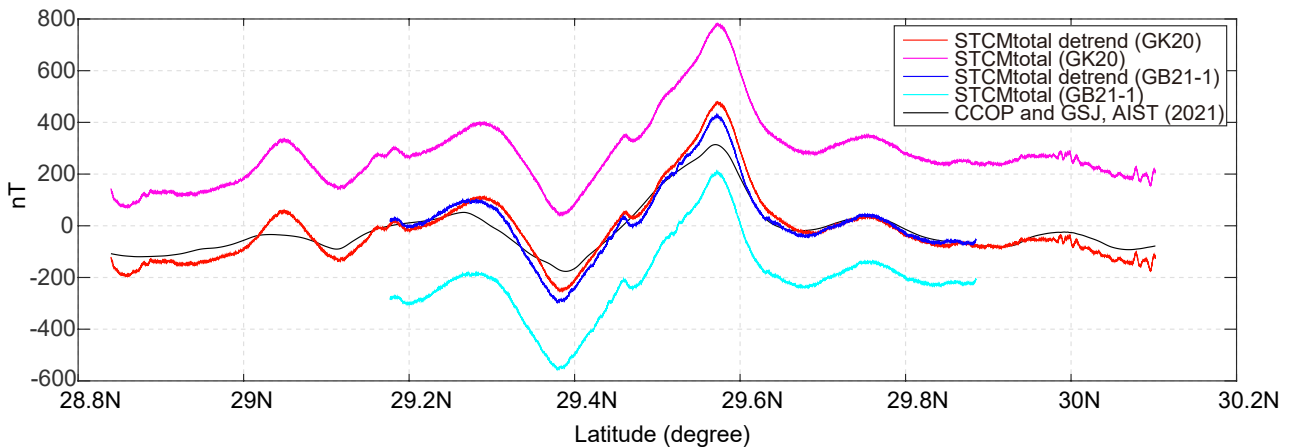
3.1 船体磁気係数

まずGB21-1及びGK20調査航海における8の字航走から算出した船体磁気係数を第2表に示す。8の字航走FE21-1GBにおいては、鉛直成分の標準偏差(σ_v)、右舷成分の標準偏差(σ_s)、船首成分の標準偏差(σ_h)、の順で大きい。8の字航走FE21-2GBでは、右舷成分の標準偏差(σ_s)、鉛直成分の標準偏差(σ_v)、船首成分の標準偏差(σ_h)、の順で大きくなっている。2回の8の字航走FE21-1GBとFE21-2GBを比較すると、標準偏差の大小関係に違いがあるが、おおまかな傾向は一致している。最終的には1回目と2回目の8の字の結果を混ぜて計算を実施した。GK20に関しても第2表にまとめた。こちらは1回目・2回目ともに鉛直成分の標準偏差(σ_v)、船首成分の標準偏差(σ_h)、右舷成分の標準偏差(σ_s)、の順で大きく、また鉛直成分の標準偏差(σ_v)が非常に小さい。こちらも最終的には1回目と2回目の8の字の結果を混ぜて計算を実施した。どちらの結果もB₁₁, B₂₂, B₃₃は1に近く、またその他の成分は0に近い、いわゆる単位行列に近い値が得られており、計算上非常に理想的な係数が得られた。

3.2 三成分磁力計による全磁力異常の精度検証

先述したように三成分磁力計は相対変化をよく測定することはできるが、その絶対値についてはセシウム全磁力計のような精度では求まらない。GB21-1航海ではセシウム磁力計が故障して全磁力データが得られなかったこと、GK20航海では三成分磁力計しか搭載していなかったことから精度の良い全磁力が得られていない。そこで構造を議論する前にまず三成分磁力計で測定されたデータの精度検証を行う。例として、測線1002の結果を示す(第2図STCMtotal, 測線の位置は第1図に示す)。補正前の全磁力異常(STCMtotal)を見るとGK20とGB21-1航海という異なる調査船・異なる時期に取得され導出された全磁力値が同一測線でよく似た相対変化をしていた。

Magnetic anomaly of the Line 1002



第2図 測線1002における全磁力異常の断面. 各データを色分けして示す.

Fig.2 Profiles of the total magnetic anomaly at line 1002.

これはCCOP and GSJ, AIST (2021)による磁気異常値とも整合性がある(第2図中CCOP and GSJ, AIST, 2021). よって両データを補正した全磁力異常値は使用可能と判断した. ただし先述の通り, 各データ間にオフセットが存在することから, 第2.1.2節で説明したトレンド除去・レベル補正が必要である. 今回はCCOP and GSJ, AIST (2021)の全磁力値を基準として処理を行った(第2図STCMtotal detrend).

なお, このように補正前の全磁力異常が精度よく取得された理由としては, 望星丸・第二開洋丸では三成分磁力計の設置位置が良かったことで, 船体磁化係数が精度よく求められていた可能性が高い. これまでの観測は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構所有の海洋資源調査船「白嶺」で行われていたが, 白嶺では高精度での船体磁化係数が求められておらず, 改善のために三成分磁力計の設置位置の移動が毎年行われていた(例えば佐藤・佐藤, 2016). 一方で, 望星丸・第二開洋丸では今後も GB21-1 及び GK20 と同じ設置場所で観測を続ける方が精度よく観測できると考えられる.

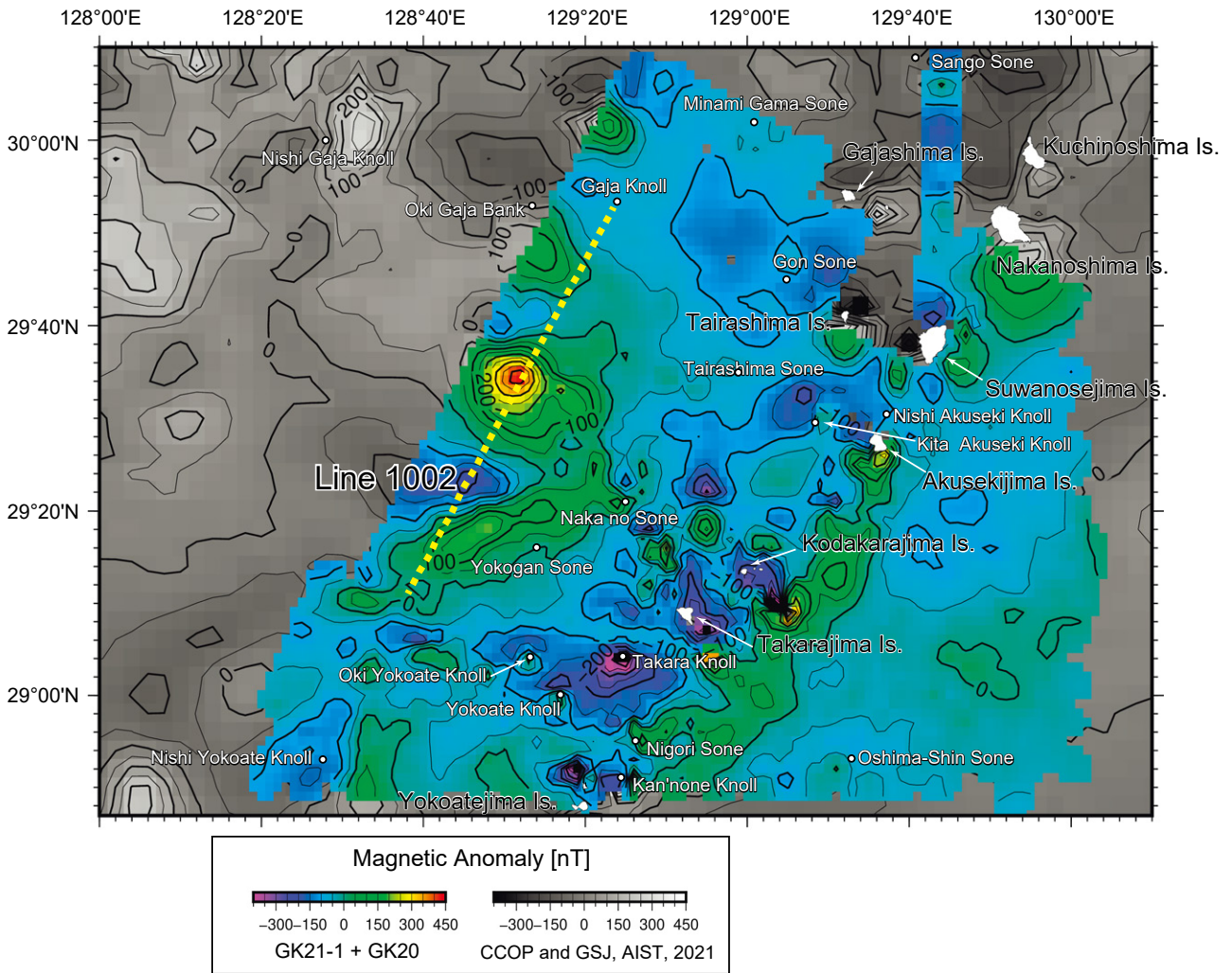
3.3 全磁力異常図

補正を行ったデータから, 間隔1 kmの全磁力異常グリッドデータを作成し, 全磁力異常図にまとめた(第3図). 一般的な磁気異常観測では, 測線の交点近傍部ではほぼ同じ観測値を示すはずが, 位置データの誤差や磁気異常値の時間変化などの影響で, 観測値に差が発生し, 結果として目玉状の磁気異常が発生する(例えばCCOP and GSJ, AIST, 2021). さらに三成分磁力計によるベクトル観測では船体磁化の時間変化(森尻・山崎, 1997など)も観測値に大きな影響を与える. これらはノイズの

一種であるため, 通常はGMTのx2sysパッケージ(Wessel *et al.*, 2019)で補正していたが, 今回は補正前の状態で目玉状の磁気異常がほとんど見られなかった(第3図). 交点のデータが非常によかった理由として, CCOP and GSJ, AIST (2021)のデータに基づいた補正をかけていることに依ると考えられる. 例えば, これまでの観測では2測線の交点部で値がずれている時, どちらの値を真とするかは非常に難しい判断であり, 完全に一致するような補正は難しかった. 今回に関してはCCOP and GSJ, AIST (2021)の全磁力値を基準として補正を行ったことで, 交点部分のデータでも差が発生しないような補正ができていたと考えている. この補正方法はセシウム磁力計の補正でも広く利用できる可能性が高い.

次に海域における磁気分布について述べる.

①島弧に沿って南が正, 北が負のダイポール型の磁気異常が多くみられる. 北から順番に記載する. 諏訪之瀬島, 悪石島など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 kmから20 kmである. 一方でこたから小宝島と宝島周辺でも同様のダイポール型磁気異常が見られるものの島自体は北側の負の異常の中に位置しており, 先述の2つの島とは異なる磁气的構造を持っていることが分かる. また, その北西部に同程度の波長で構成されるダイポール型磁気異常が存在している. 更に南のおきよこあて沖横当海丘と横当海丘ではより小さなスケール(<10 km)のダイポールが形成されている. 上ノかんの根海丘でも小さなスケールのダイポール型磁気異常が見られるものの, これまでみられたダイポール型磁気異常よりも北西-南東方向に形成されている. これらのダイポール型磁気異常はトカラ列島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



第3図 GB21-1, GK20で得られた全磁力磁気異常図。グリッド間隔は1 kmとした。コンター間隔は50 nTである。背景には東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版 (CCOP and GSJ, AIST, 2021) のデータを重ねた。

Fig.3 Total magnetic anomaly map integrated by GB21-1 and GK20. The grid space was set to 1 km. The contour interval is 50 nT. The data of Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition, CCOP and GSJ, AIST, 2021) is drawn on the background.

られる。小林 (2008) によると本海域内では^{くちの}口之島、中之島、諏訪之瀬島、悪石島、横当島は過去1万年以内に噴火した火山と考えられており、臥蛇島、小臥蛇島、平島はその山体の風化の様子からそれらより古い数十万年以内の活動と考えられている。臥蛇島、小臥蛇島に関しては今回の観測範囲では十分カバーできていないため、言及することができないが、平島に関しては、新しい火山よりも大きな波長 (>40km) かつコンターの傾斜が緩いダイポール型磁気異常が形成されている。

②海溝側は磁氣的に起伏が小さく、島弧のような顕著なダイポール型磁気異常は存在していない。悪石島の東側に比較的広く負の磁気異常が分布しているが、地形的に海盆部に一致していることから開口部は主に地形形成

と関連していると考えられる。

③トラフ側では横ガン曾根を含む正の磁気異常と、その北側の負の磁気異常がみられ、横ガン曾根の走向に沿ってシャープな正負の境界をなしている。このように磁気異常が非常にシャープに見える箇所は、磁性体が比較的浅い場所に存在している可能性が高い。また平島から西に見て、東経128度50分のところに正の磁気異常の目玉が見られる。この磁気異常に関してはバックグラウンドに描写したCCOP and GSJ, AIST (2021)の結果も踏まえて観察すると北側の負の磁気異常とオフセットでのダイポール磁気異常をなしているように見える。地形的には鋭く直線的な海底谷が形成されている箇所と一致しており、海丘のような地形があるが明瞭ではないこと、か

つ非常に高い正の磁気異常であるので、陸上に現在現れていない海底下の大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。西横当海丘^{にしよこあて}に関しては上ノ根海丘と同様に南北ではない東西方向でダイポール磁気異常が形成されており、このようなダイポールの方向のバリエーションを生むには、異なる時代で火山活動が同一地域で形成されていること、または回転を伴うローカルなテクトニクスが存在していたことが推定される。

4. まとめ

トカラ列島南部海域において地磁気観測を実施し、全磁気異常図を作成した。その際、セシウム磁力計で観測ができなかったため三成分磁力計のベクトル量を基に計算を行った。一般的に三成分磁力計のベクトル値はセシウム磁力計の観測値ほど精度よく求めることができない。そのため、今回の計算には既存のデータ（CCOP and GSJ, AIST, 2021）を用いた補正を試みた。補正の結果、CCOP and GSJ, AIST (2021) との比較から、三成分磁力計で取得したデータが従来の観測と比べても非常に精度よく観測されていたことが明らかになった。さらに今回試みた手法で補正・解析した結果には、通常現れる測線交点部のエラーがほぼ存在しなかった。このような補正方法はセシウム磁力計の観測でも応用できる可能性が高い。

島弧部では多くのダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から活発な火山活動が推測される。一方で海溝側は磁氣的に長周期成分が卓越している。さらにトラフ側では正の磁気異常の目玉が見られた。地形的には海丘のような地形があるが、さほど明瞭でないことから考えると現在海底の表面に現れていない大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。

謝辞： 今回の調査では、望星丸・第二開洋丸の船長をはじめ、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。また、査読者である森尻理恵氏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

- 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**, 1–21.
- Isezaki, N. (1986) A new shipboard three component magnetometer. *Geophysics*, **51**, 1992–1998.
- 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.
- 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).
- 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.
- 森尻理恵・山崎俊嗣 (1997) 白嶺丸における地磁気三成分測定の実状と問題点. *地質調査月報*, no. 48, 65–77.
- 佐藤雅彦・佐藤太一 (2016) GH15 調査航海における重力異常・磁気異常観測の概要. 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, 23–34.
- 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 : 2021 年 1 月 14 日 ; 受 理 : 2022 年 7 月 7 日)

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

石野 沙季¹・三澤 文慶¹・有元 純¹・井上 卓彦¹

ISHINO Saki, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun and INOUE Takahiko (2022) Seismic survey of GB21-1 Cruise off southwest Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73 (5/6), p. 219–234, 11 figs.

Abstract: A multi-channel seismic survey was conducted off southwest Tokara Islands by GB21-1 survey cruise for marine geological maps. The seismic stratigraphy and geological structures were compiled with reflection profiles, which were obtained by high-density spacing survey. West of the volcanic front is characterized by four sedimentary units (OT1–OT4) divided by unconformities. The faults found in the west of the volcanic front were divided into two types: normal faults affecting vertical displacement in the OT1 unit and affecting cumulative vertical displacement in the OT3 unit sediment layers. The former faults were recognized east of Nishi-Yokoate Knoll with NNE–SSW trending. The later faults are developed widely west of the volcanic front, and found with NE–SW trending along the east edge of Okinawa Trough and with ENE–SWS trending southwest of Takarajima island. The normal faults affecting cumulative vertical displacement in the OT3 unit are considered to be formed by intermittent NW–SE extension related to the back-arc rifting in the northern Okinawa Trough after formation of the OT2 unit. In the east of volcanic front, the sedimentary units are divided into four (TK1–TK4) based on unconformities and acoustic facies differences. Two types of faults were found in the east of the volcanic front: normal faults that trend E–W and affect cumulative vertical displacement in the TK4 unit sediment layers in the northern margin of the Amami Trough, and normal faults that trend WNW–ESE and cause vertical displacement through the TK3 and TK4 units in the southeast of Takarajima Island. Combining fault characteristics based on seismic stratigraphy with analysis of sedimentary age will provide further discussions on tectonics in the northern Ryukyu Arc.

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

要 旨

海洋地質図の作成を目的として、GB21-1航海はトカラ列島南西沖を中心にマルチチャンネル反射法音波探査を行った。高密度な測線間隔の反射断面をもとに、音響層序及び地下構造をまとめた。火山フロント西方では不整合面を基準にOT1層からOT4層の4層を区分した。火山フロント西方で認められた断層は、OT1層に変位を生じさせた正断層とOT3層に累積性のある変位を生じさせた正断層を識別した。OT1層に変位を生じさせた正断層は西横当海丘東方で北北東–南南西走向に分布する。OT3層に累積性のある変位を生じさせた断層は火山フロント西方に広く分布し、沖縄トラフ東縁部で北東–南西走向を、宝島南西沖で東北東–西南西走向を呈する。OT3層に累積性のある変位を生じさせた断層は、OT2層堆積後に北部沖縄トラフ背弧拡大に起因する北西–南東

方向の引張応力によって形成されていると考えられる。火山フロント東方では、音響的な層相の違い及び断層に伴って生じたと考えられる不整合面をもとにして地層をTK1層からTK4層の4層に区分した。火山フロント東方に分布する断層は、TK4層に累積性のある変位を与えた正断層とTK3層及びTK4層に同様な変位を与えた正断層に識別された。TK4層に累積性のある変位を与えた正断層は、調査海域南端である奄美舟状海盆の北縁にて東西走向で認められた。TK3層及びTK4層に同様な変位を与えた正断層は、宝島東方に西北西–東南東走向に分布する。調査海域で追跡可能であった断層の特徴は火山フロントの東西で異なることが明らかになった。今後、音響層序にもとづいた断層の特徴と堆積層の年代分析を組み合わせることにより、琉球弧北部のテクトニクスに関する議論の発展が期待される。

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., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ishino.saki@aist.go.jp

1. はじめに

地質情報整備の一環である海洋地質図の作成を目的として、GB21-1航海(2021年2月28日-3月29日)にて吐噶喇列島(以後トカラ列島と表記)周辺海域の海底地質調査を実施した。本調査航海では、トカラ列島南西部を中心に海底地質図の基礎データとして反射法音波探査やドレッジによる海底試料採取を行い、海底地質構造や音響層序に関する情報を得た。これらの情報は密な測線間隔で観測した反射断面を集約したものであり、トカラ列島周辺海域だけでなく、沖縄トラフや琉球弧のテクトニクスを明らかにする上で重要である。本稿では音波探査で得られた宝島南西沖の地質構造について報告する。なお、関連するドレッジの調査結果については石塚ほか(2022)、ドレッジで採取した堆積岩の年代分析については有元・宇都宮(2022)を参照されたい。

琉球弧の海域を対象とした研究は、東シナ海陸棚及び沖縄トラフの地質構造発達史を広域的に理解しようとしたものや、熱水活動が多く発見された沖縄トラフ南部海域における精密地質調査に関するものが多い(例えば、Ikegami *et al.*, 2015; Ishibashi *et al.*, 2015; Arai *et al.*, 2017; Nishizawa *et al.*, 2019; Fang *et al.*, 2020)。一方で、トカラ列島周辺は陸上露頭が少なく複雑な海底地形を有するにも関わらず、海底地質構造を詳細に調査した例は少ない(例えば、横瀬ほか, 2010; Arai, *et al.*, 2018b; Minami *et al.*, 2021)。琉球弧北部のテクトニクスや海底火山・断層の分布に関する知見は南部に比べて理解が進んでいるとは言い難い。トカラ列島周辺の海底地質調査は、地質情報の基盤整備だけでなく琉球弧における地質構造発達史の解明に寄与すると考えられる。

2. 地形概略

調査海域周辺の地形は、北北東-南南西方向に分布する琉球弧、火山フロント、背弧海盆に特徴付けられる。島弧沿いには北から順に種子島、屋久島、南西に伸びる種子・屋久海脚、北東に伸びる奄美海脚、及び奄美大島が位置し、海脚間はトカラ海峡によって区切られている(第1図)。これらの高まりから約20-30 km西方に火山フロントであるトカラ列島が並ぶ。トカラ列島は北からくちのえらぶじま口永良部島、くちのしま口之島、なかのしま中之島、すわのせじま諏訪之瀬島、あくせきじま悪石島が直線上に並び、こたからじま小島、たからじま宝島、よこあてじま横当島は西方にわずかに逸れる。トカラ列島の背弧側は、がじゃじま臥蛇島、こがじゃじま子臥蛇島、たいらしま平島、その他複数の海丘や曾根がトカラ列島に並列して発達する。さらに西方には水深1,000 m以深の平坦部を形成する沖縄トラフ(背弧海盆)の北部が広がる。

本調査海域の海底地形及び測線図を第2図に示す。宝島から横当島の間には濁り曾根及び上ノ根海丘が並び、横当島北西に上ノ根島が存在する。宝島西方には水深100-700 mの高まりを形成する横ガン曾根が北東-南西

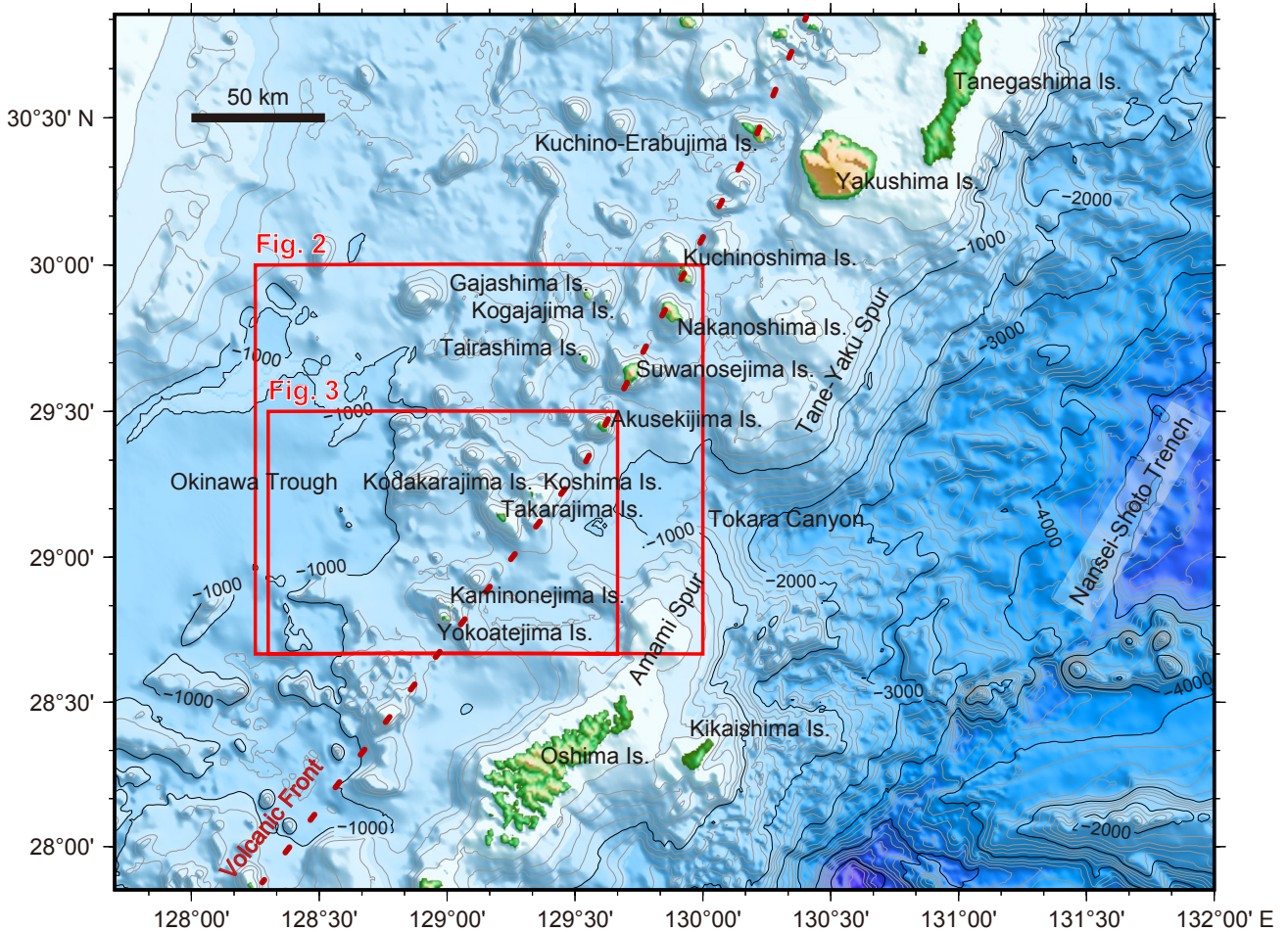
方向に伸展する。また、調査範囲の南西端には西横当海丘が北西側及び南側に急崖を伴って位置している。これらの高まりの周囲は水深700-1,000 mの比較的平坦な海底が広がり、海丘が複数点在する。この海丘はトカラ列島と並列する海丘群と比較すると規模は小さい。調査範囲西部は水深1,000 mの北部沖縄トラフ東縁が海丘の点在する平坦部と接する。宝島及び小宝島の周囲は水深500 m以上の複雑な地形を呈する高まりを形成し、急崖に囲まれている。宝島の東方は傾斜が緩やかで南東方向に張り出した高まりが広がり、さらに東方には大島新曾根が、南方には奄美舟状海盆が位置する。

3. 地質概略

本調査海域は琉球弧の北部に位置する。琉球弧は九州から台湾にかけて分布する島嶼を指し、東方に南西諸島海溝、西方に背弧海盆である沖縄トラフが存在する(第1図)。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典型的な海溝-島弧-背弧海盆系を形成している。琉球弧の陸域地質及び海底地形の特徴は島弧を胴切るトカラ海峡及び慶良間海裂を境に異なることから、種子島からトカラ海峡の間は北琉球、トカラ海峡及び慶良間海裂の間は中琉球、そして慶良間海裂より南部は南琉球に分けられる(小西, 1965; Kizaki, 1986; 古川, 1991)。本調査の航走観測は、諏訪之瀬島周辺から宝島南西沖にまたがっているため中琉球の北部及び北琉球にあたる(第2図)。

中・南琉球の陸域に露出する新第三系以上の層序は下位から順に、前期-中期中新世に形成し南琉球にのみ分布が認められる八重山層群、後期中新世-前期更新世に形成した島尻層群、前期-後期更新世に形成した琉球層群からなることが知られている(Kizaki, 1986; 兼子, 2007)。一方トカラ列島を中心とする北琉球では、宝島に分布する琉球層群を除いて、中・南琉球の陸域層序と対比可能な新第三系以上の堆積岩類が陸上に露出していないため、反射法地震探査を用いた海底構造調査や試錐による地質層序の検討が行われた。宝島北西沖の海底において石油公団により基礎試推「TO-KA-1」(2,958 m)が実施されており、構造調査の結果と合わせて、海底下には島尻層群及び琉球層群に対比される上部中新統-更新統が広く分布することが報告された(Nash, 1979; 古川, 1991; 木村ほか, 1999)。なお「TO-KA-1」最下部(2,910-2,958 m)からは、先中新統の花崗岩類及び変形した堆積岩類が得られており、トカラ列島周辺海域の音響基盤に対比されている(Nash, 1979; 木村ほか, 1999)。

北琉球から中琉球北部にかけての地域は、島弧のやや背弧側に火山フロントが発達し、トカラ列島を構成している(第1図)。トカラ列島の陸上火山は、第四紀の活動年代を示す火山がほとんどを占める(下司・石塚, 2007; 中野ほか, 2008)。中新世の火山は宝島及び小宝島にの



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。地形データは岸本(2000)を使用した。

Fig. 1 Bathymetric map with the name of islands and main undersea features around the survey area. The topographic data is based on Kishimoto (2000).

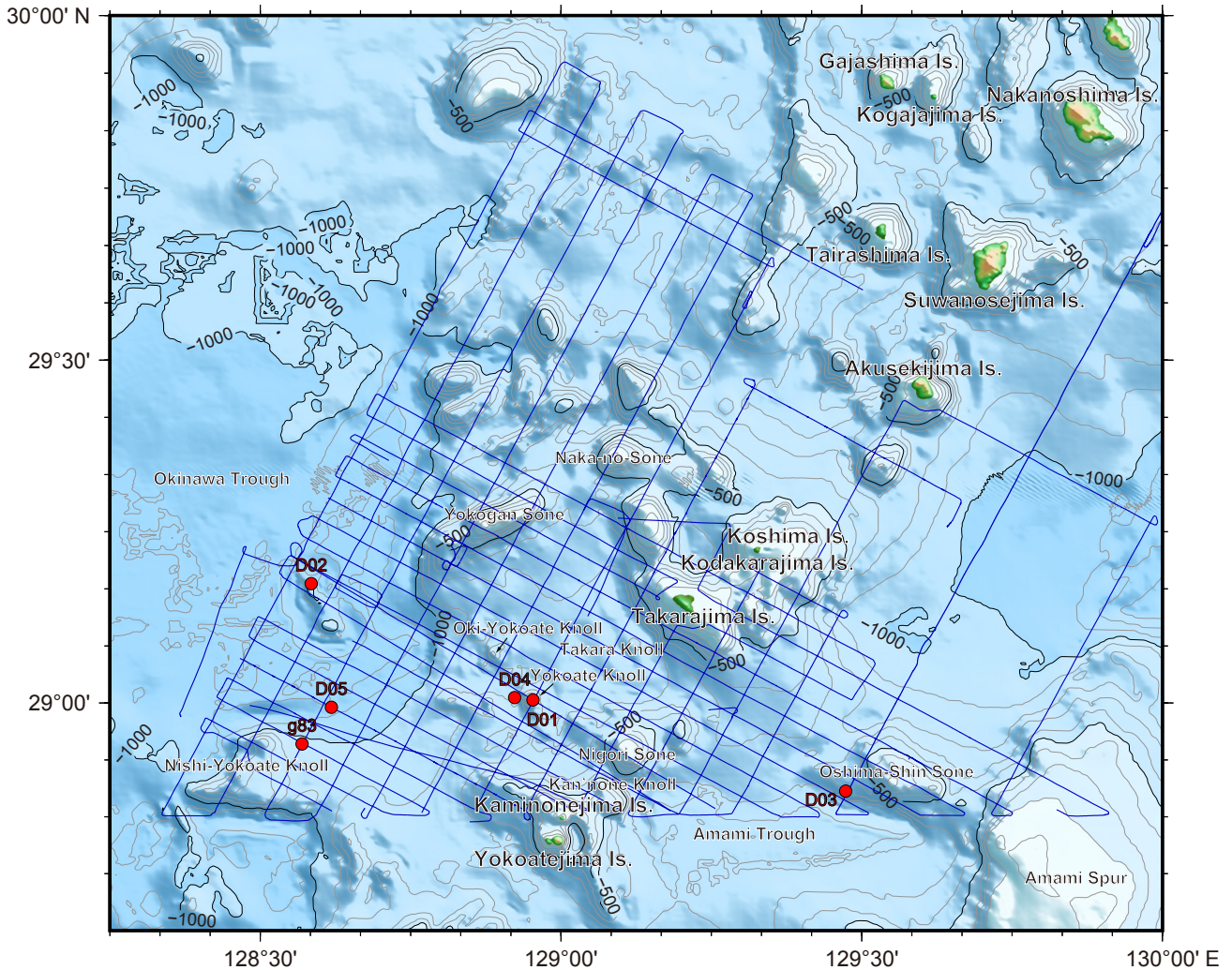
み認められ、琉球層群に覆われている(中野ほか, 2008)。また宝島の周囲には、海底のドレッジ試料を用いた年代分析から中期更新世以降に活動した火山の存在が示唆されている(横瀬ほか, 2010)。火山フロントの背弧側には、火山フロントと並行に分布する海丘群、及びトカラ海峡西方における北西-南東方向に並ぶ海丘群が認められ(横瀬ほか, 2010; Minami and Ohara, 2016; Minami *et al.*, 2021)、複雑な海底地形を呈する。

沖縄トラフは大陸リソスフェアの活動的なリフティング段階にある(例えば, Kimura, 1985)。北部沖縄トラフの拡大は中期-後期中新世に始まり、その後2.0-0.1Maと0.1-0Maに段階的な活動があったと考えられている(Miki, 1995; Sibuet *et al.*, 1998; Fang *et al.*, 2020)。沖縄トラフ中部から北部にかけて、北東-南西方向のリフティングによる伸張応力場に起因した北西-南東走向の正断層が雁行状に発達する(例えば, Kimura 1985; Fournier *et al.*, 2001; Kubo and Fukuyama, 2003)。また、沖縄トラフの中部及び北部における弓なりの形の島弧

域は海溝に並行な伸長応力場にあることも、近年の詳細な海底調査により示唆されている(Arai *et al.*, 2018a; Minami *et al.*, 2021)。

4. 調査方法

GB21-1航海では、東海大学が所有する海洋調査研修船「望星丸」を使用して海底地質構造を明らかにするためマルチチャンネル反射法音波探査を行なった。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(約3.7 km)間隔で、火山弧に並行する北北東-南南西測線を4マイル(約7.4 km)間隔で設定した(第2図)。本調査航海では反射法音波探査を合計13回行い、観測時間は約234時間、観測距離は約1,894.8マイル(約3,509.2 km)に達した。本調査航海の観測によって宝島の西方及び南方沖における測線を網羅した。また、斜面表層に堆積岩が露出している可能性のある地点や、周囲の堆積層形成年代を制約できる可能性のある火山を反射断面で確認し、ドレッジで



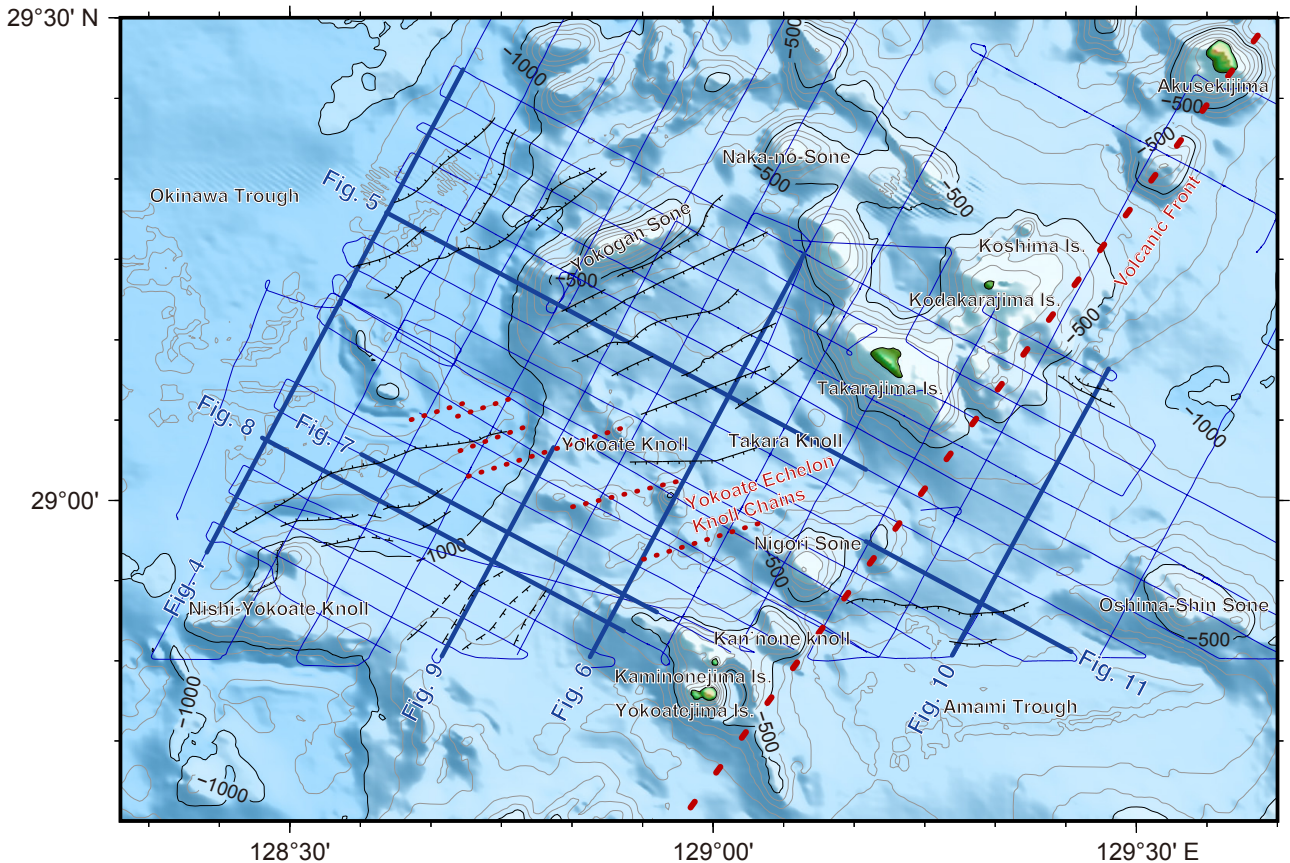
第2図 GB21-1航海の音波探査測線図。西北西-東南東方向および北北西-南南西方向の調査測線は2マイルおよび4マイルおきに設定した。D01-05はドレッジ地点を示す。地形データは岸本(2000)を使用した。

Fig. 2 Seismic survey lines observed during GB21-1 cruise. WNW-ESE and NNE-SSW survey lines were set at 2- and 4-mile intervals, respectively. Dredge points conducted in GB21-1 cruise are shown in D01-05. The topographic data is based on Kishimoto (2000).

堆積岩及び火成岩を採取した(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。音波の発振は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なったため、発振点間隔は約25 m,共通反射点(Common Midpoint: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形式で行なった。収録したSEG-DデータはSEG-Y形式に変換後、観測設定からCMPを設定するジオメトリ編集、音響反射面に由来する信号を抽出する

周波数バンドパスフィルタリング、深部で減衰した反射波の振幅を回復するための球面発散補正、発振波形特性に由来する短周期の多重反射を抑制するデコンボリューション、反射波を適正に強調するための速度解析を行なった上で、共通のCMPをもつ全ての波形トレースについて反射イベントの走時を合わせるNMO補正、そしてそれらをCMPごとに足し合わせてシグナル/ノイズ比を向上させるCMP重合処理及び4トレースずつの加算平均を行い、トレース間隔がField file identification number (FFID)と等間隔の反射断面を作成した。GIガンの卓越周波数が約35 Hzであり、音速1,500 m/sと仮定し、Reyleighの1/4波長則に従うと、本調査で取得した反射断面図の垂直分解能は約10 mとなる。



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。横当雁行海丘群の特徴及びGB21-1航海で取得した高解像度の地形は高下ほか(2022)参照。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 characteristics of Yokoate Echelon Knoll Chains and high-resolution topography observed in GB21-1 cruise are shown in Koge *et al.* (2022). The topographic data used in this map is based on Kishimoto (2000). Blue lines: Seismic survey lines. Dashed lines: Normal faults that do not reach the sea floor.

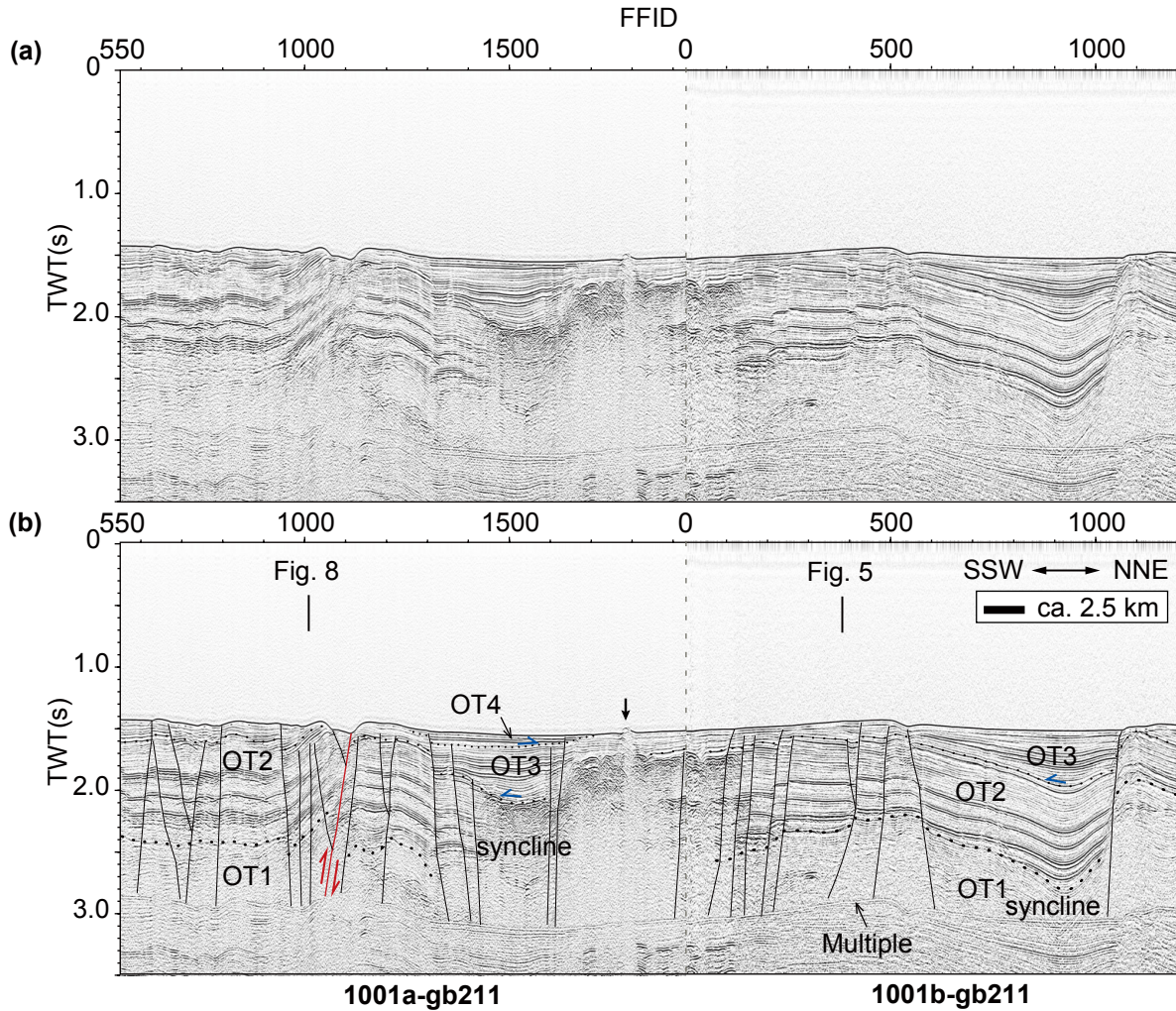
5. 反射法音波探査結果：海底下地質構造の解釈

本調査航海では、諏訪之瀬島周辺から宝島南西沖を中心に反射断面を得た。そのうち、2マイル間隔の東北東-西南西測線と4マイル間隔の北北東-南南西測線の双方の観測を終えた海域について調査結果をまとめる(第3図)。調査範囲は火山フロントをなす宝島および濁り曾根、上ノ根海丘が連なって位置し、島弧西方の海底平坦部を東西に大きく分断している。そこで、本稿では調査海域を火山フロント西方および東方に分け、音響的な層相の違いや主要な構造運動によって形成されたと考えられる不整合面をもとに各海域における地層を区分した。反射断面の解釈及び海底地形の明瞭なりニアメントから走向の追跡が可能であった断層は構造概略図(第3図)に記した。なお、小宝島から北部及び大島新曾根周辺海域においては、今後直交測線を網羅的に観測し、詳細な地

下構造を明らかにした際に反射断面の解釈をまとめる予定である。

5.1 火山フロント西方海域

火山フロント西方海域の地形は、西から順に沖縄トラフの東縁部、横ガン曾根および西横当海丘の地形的高まり、そして沖縄トラフ東縁部から濁り曾根にかけて雁行状に分布する小海丘群(以下、調査範囲の地形を詳細に記載した高下ほか(2022)に従い「横当雁行海丘群」と呼ぶ)で特徴付けられる(第3図)。横ガン曾根および西横当海丘周辺は北東-南西および東北東-西南西走向の正断層が複数分布し、断層の連続性は横当雁行海丘群付近で不明瞭になる。これらの断層に伴って生じたと考えられる不整合面が火山フロント西方の堆積層中に3面認められ、地層を下位から順にOT1層からOT4層の4層に区分した(第4図-第9図、縦軸は往復走時:TWT)。各層



第4図 (a) 沖縄トラフ東縁部の重合音波探査断面図(測線1001a-gb211及び1001b-gb211)及び(b)解釈線。北部では正断層が、南部ではフラワー構造がそれぞれ発達する。太矢印：横当雁行海丘郡の西方の小海丘。赤線：逆断層。黒線：正断層。青矢印：オンラップ。

Fig. 4 (a) Stacked seismic profiles on the eastern Okinawa Trough (Line 1001a-gb211 and 1001b-gb211) and (b) their interpretations. Normal faults and flower structures are developed on the north and south part of the area, respectively. Black bold arrow: The knoll located at the west of Yokoate Echelon Knoll Chains. Red line: Reverse faults. Black lines: Normal faults. Blue arrows: Onlap.

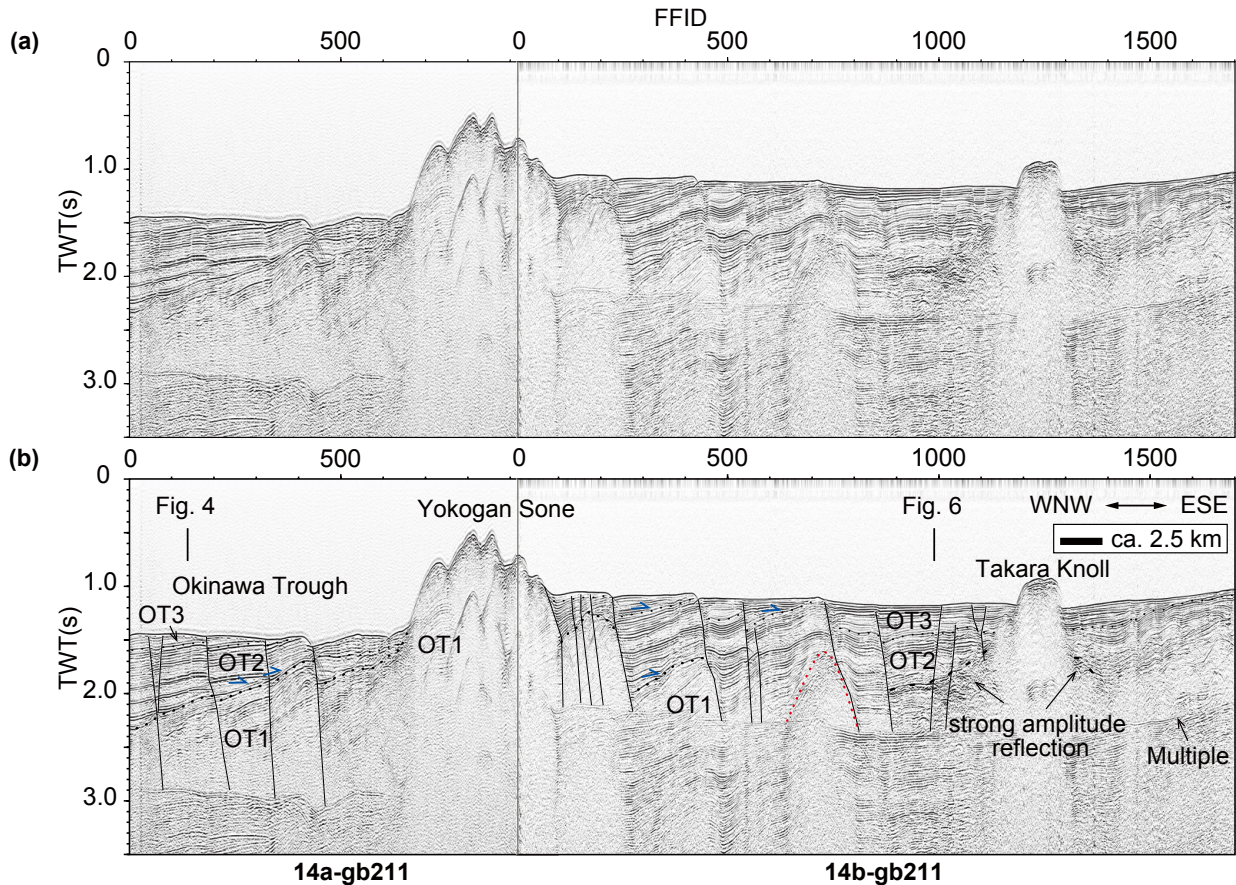
および断層分布の詳細な特徴について、沖縄トラフ東縁部、横ガン曾根周辺海域、西横当海丘東方海域に分けて以下に記載する。

5.1.1 沖縄トラフ東縁部

本海域は調査海域の西端に位置し、北北東-南南西方向に伸張する沖縄トラフの東縁部にあたる。沖縄トラフの東縁は横ガン曾根から西横当海丘に続く西傾斜の斜面によって東方の水深1,000 mに満たない海底平坦部と隔てられている(第3図)。中腹部に横当雁行海丘群が認められる。

本海域を縦断する北北東-南南西方向の反射断面を第4図に示す。海底下0.5-1.3秒(往復走時、以下同じ)を境

に層相の異なる地層が分布する(第4図、点線)。境界面の下位層には振幅が弱く短周期の内部反射面が境界面にほぼ平行に分布し、上位層には境界面に平行で明瞭な成層構造を示す内部反射面及び3つの強振幅を示す反射面が認められる。この境界面は横当雁行海丘群から西方の小規模な海丘付近(第4図太矢印、以下中央の海丘と呼ぶ)において不明瞭となるが、境界面の下位層及び上位層の音響的な層相の特徴は海丘の北部と南部で類似している。よって、北部と南部で同じ地層が分布していると推定し、境界面より下位層をOT1層、上位層をOT2層と区分する。OT1層とOT2層の境界は、後述する第5図及び第6図の反射断面の解釈からオンラップ不整合であると判定できる(5.1.2及び5.1.3参照)。また、OT2層にオ



第5図 (a) 横ガン曾根南部を横切る重合音波探査断面図(測線14a-gb211及び14b-gb211)及び(b)解釈線。全体に正断層が発達する。黒線: 正断層。青矢印: オンラップ。赤点線: カオティックな反射(もしくは内部構造)を示す岩体。

Fig.5 (a) Stacked seismic profile across the southern part of Yokogan Sone (Line 14b-gb211) and (b) its interpretation. Normal faults are developed over the area. Black lines: Normal faults. Blue arrows: Onlap. Red dotted line: Chaotic unit.

ンラップする堆積層が海底下0.1-0.5秒を境に上位に分布し、これをOT3層と区分する。OT3層には海底面に概ね平行な連続性の良い内部反射面が認められるが、OT2層のような特徴的な強振幅の反射面はない。OT3層の層厚は断面中央の海丘付近および断面北部で増している。さらに上位の地層として、OT3層にオンラップするOT4層が断面中央の海丘南部に認められる。OT4層の最大層厚は約0.1秒で、OT4層の分布域は調査海域の中では西端の約7km四方に限られる。

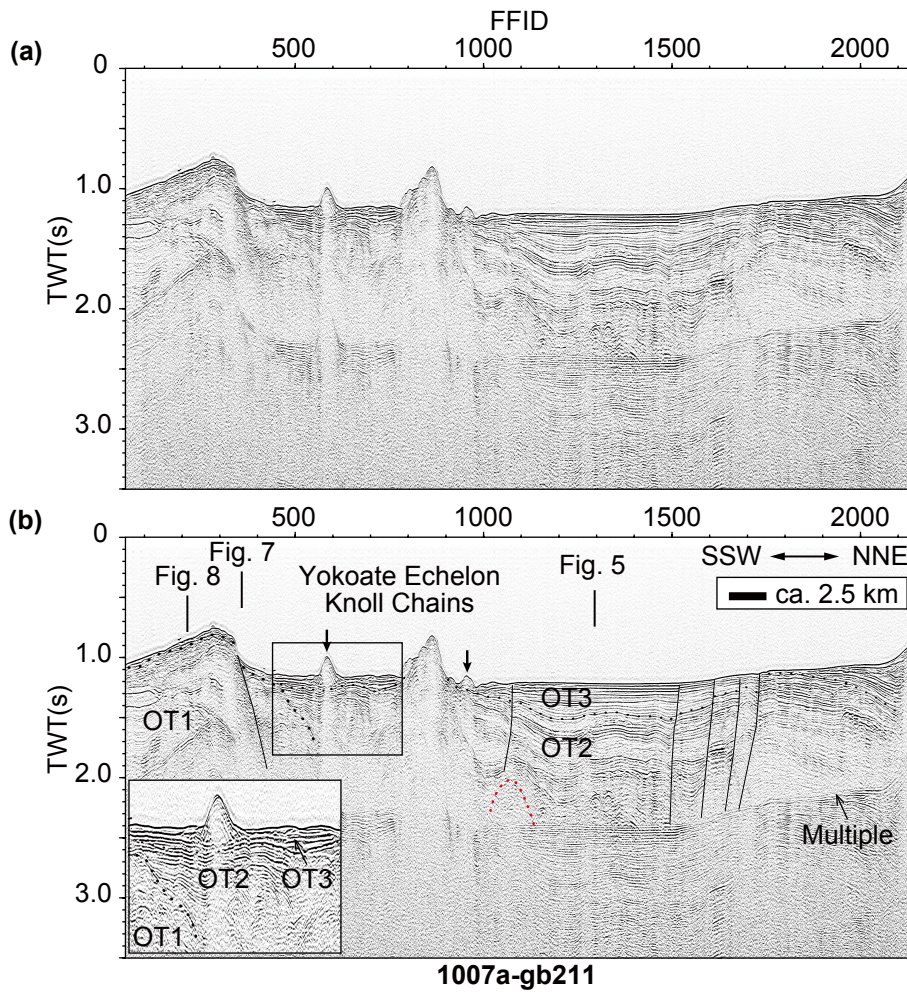
本海域は広域にわたって正断層が認められる(第4図)。さらに、第4図南部(Line 1001b-gb211のFFID 500地点より南)では複数の正断層が密に発達しており、主要な断層から分岐して断層が発達する形態が認められることから、横ずれ断層系にみられるフラワー構造(Woodcock and Fischer, 1986)を呈すると考えられる(第4図)。第4図南部(Line 1001a-gb211のFFID 1100地点)で逆断層が認められ(第4図、赤線)、断層が海底面に到達している。本調査範囲の沖縄トラフ東縁部において海底地形の線状構造

及び複数の反射断面の解釈で追跡可能な断層は、変位が比較的大きい北部の正断層のみであった(第3図)。フラワー構造は最も西の北北東-南南西測線でのみ観察されるため、その分布は本調査海域より西方の海底地形を参照することによって分布を確認できる可能性がある。

OT1層及びOT2層は沖縄トラフ東縁部の北北東-南南西断面(第4図)において不整合面に対して概ね平行な内部構造を呈し、全ての断層によって変位が生じている。さらに、断面中央部(Line 1001a-gb211のFFID 1500地点周辺)と北部(Line 1001b-gb211のFFID 900地点周辺)において内部構造に向斜が認められる。一方、OT3層の内部反射面は下位の層で向斜を示し、上位の層にかけて海底面と平行な反射面へと遷移するような累積性のある変形を示す。

5. 1. 2 横ガン曾根周辺海域

横ガン曾根は北北東-南南西方向に延びた高まりを呈している(第3図)。西側では水深1,000 mより上方で、東



第6図 (a) 横当雁行海丘群と横ガン曾根南方を切る重合音波探査断面図(測線1007a-gb211)及び(b)解釈線。横当雁行海丘群を構成する海丘の裾野がOT3層中に認められる。太矢印:本航海で認められた横当雁行海丘郡の海丘。黒線:正断層。

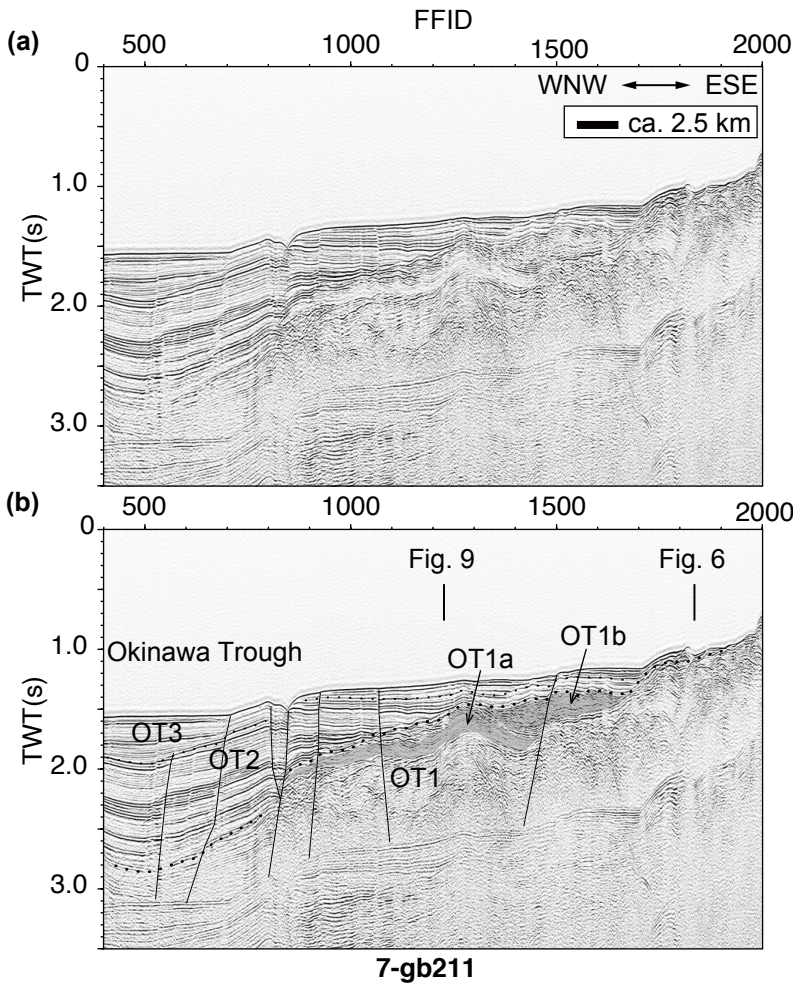
Fig. 6 (a) Stacked seismic profile across Yokote Echelon Knoll Chains and south of Yokogan Sone (Line 1007a-gb211) and (b) its interpretation. Small sized knoll bodies, which compose Yokote Echelon Knoll Chains, are recognized in the OT3 unit. Black bold arrows: The small sized knolls of Yokote Echelon Knoll Chains observed in this cruise. Black lines: Normal faults.

側では水深700 mより上方で急崖を呈する。横ガン曾根の北西沖では水深900-1,000 mの舌状に延びる台地が沖縄トラフと接し、また、横ガン曾根の東方は緩やかに西傾斜した平坦面が宝島周辺の高まりまで続く。横ガン曾根と宝島間の平坦面には宝島海丘が位置し、その南方には横当雁行海丘群が西北西-東南東方向に平坦面を切るように分布する。本航海で観測した詳細な地形には、横ガン曾根周囲の水深900mほどの海底平坦部に概ね北東-南西方向のリニアメントが見られる(高下ほか, 2022)。横ガン曾根周囲の西北西-東南東方向の反射断面を第5図に、直交する横ガン曾根南東沖の北北東-南南西断面を第6図に示す。

横ガン曾根西方の海底下には西傾斜の不整合面が2面

認められ(第5図)、沖縄トラフ域の直交断面である第4図中の反射断面と対比すると、この不整合面は前項(5.1.1)にて認められたOT1層とOT2層及びOT2層とOT3層の境界と一致する。OT1層は不整合面に対して概ね並行な西傾斜の地層であることがわかる。同じ層相の地層が横ガン曾根の内部(Line 14a-gb211のFFID 650-900地点, Line 14b-gb211のFFID 0-50地点)にも認められる。OT2層はOT1層にオンラップし、OT2層内部はOT1層より緩やかな西傾斜を呈しながら西方に向かって厚く堆積している。

横ガン曾根東方にもOT1層からOT3層の3層が認められる(第5図及び第6図)。横ガン曾根東方におけるOT1層の分布は、横ガン曾根東側斜面付近(第5図Line 14b-



第7図 (a) 横当島西方の西北西-東南東方向の重合音波探査断面図(測線7-gb211)及び(b)解釈線。全体に正断層が発達する。OT1層東部に褶曲した火山砕屑物と思われるOT1-2層及びOT1-3層が分布する。黒線：正断層。

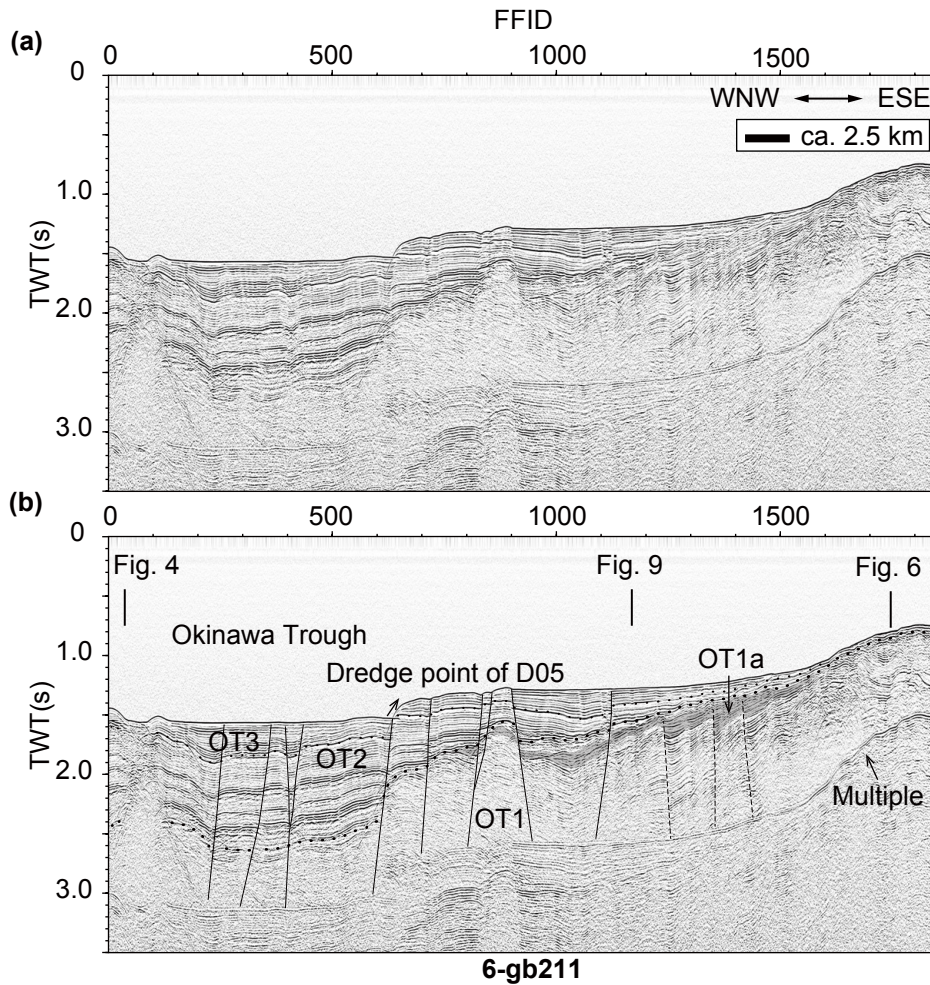
Fig. 7 (a) WNW-ESE stacked seismic profiles off west of Yokoatejima Island (Line 7-gb211) and (b) their interpretations. Normal faults are developed over the area. The Subunits OT1-2 and OT1-3, which suggest volcanic products distributed in the eastern part of the OT1 unit. Black lines: Normal faults.

gb211のFFID 50-500地点)及び横当雁行海丘群南部(第6図Line 1007a-gb211のFFID 0-500地点)で一部確認できるが、本海域全体における分布は多重反射により詳細に認識できない。横当雁行海丘群南部におけるOT1層の特徴については次項(5.1.3)に記す。OT1層の上位にはOT2層がオンラップで覆い、OT2層の層厚は最も厚いところで1.0秒以上を示す。横ガン曾根東方におけるOT2層内部には、沖縄トラフ東縁部で観察される3つの強振幅を示す反射面は認められないが、OT3層との境界面に概ね平行で明瞭な成層構造を示す内部反射面が認められる。OT2層は宝島南西沖(第5図と第6図の交点付近)において東北東-西南西方向を軸として向斜している(第6図)。OT3層は最大層厚が0.3秒ほどで横ガン曾東方の海底平坦部表層に広く分布する。沖縄トラフ東縁部と同様に横ガン曾根東方においても、OT3層内部の変位に下位から上位にかけて累積性が認められる。

横ガン曾根南東沖には横当雁行海丘群や宝海丘が分布し、本調査で取得した反射断面ではそれらに対応する山体を確認した。横当雁行海丘群には、第6図(Line 1007a-gb211のFFID 600-950地点付近)に示すような比高約

100-250 mの海丘が複数認められる。比高約100 mの小海丘(第6図、矢印)は成層した弱い内部反射面もしくは振幅の弱いカオティックな内部構造を特徴とし、OT3層中に火山からの噴出物と考えられる裾野が存在する。比高約250 mの海丘はカオティックな内部構造を持つ岩体を特徴とし、火成岩などの岩体であると推察できる。比高約250 mの海丘周囲では堆積層の反射面が不明瞭になるため、火山活動とOT2層及びOT3層形成との前後関係は不明である。本海域東方の宝海丘は、カオティックな内部反射の山体を呈する(第5図)。周囲のOT2層内部に不連続な強振幅の反射面が複数認められ(第5図、太点線より下位)、周囲の反射面が明瞭な堆積層と指交関係にあり、宝海丘周辺で層厚を増すことから、宝海丘を起源とする火山砕屑物の可能性がある。よって、宝海丘をなす火山はOT2層の堆積時以前に活動した可能性が示唆される。宝海丘西方および南方の海底下には、カオティックな内部構造を持つ岩体が認められた(第5図及び第6図、赤点線)。カオティックな内部構造は音波が減衰しやすい火成岩などの貫入岩体が存在すると解釈ができる。

本海域では、海底地形の線状構造及び複数の反射断面



第8図 (a) 横当島西方の西北西-東南東方向の重合音波探査断面図(測線6-gb211)及び(b)解釈線。黒線：正断層。破線：海底面まで達しない正断層。

Fig. 8 (a) WNW-ESE stacked seismic profiles off west of Yokoatejima Island (Line 6-gb211) and (b) their interpretations. Black lines: Normal faults. Dashed lines: Normal faults that do not reach the sea floor.

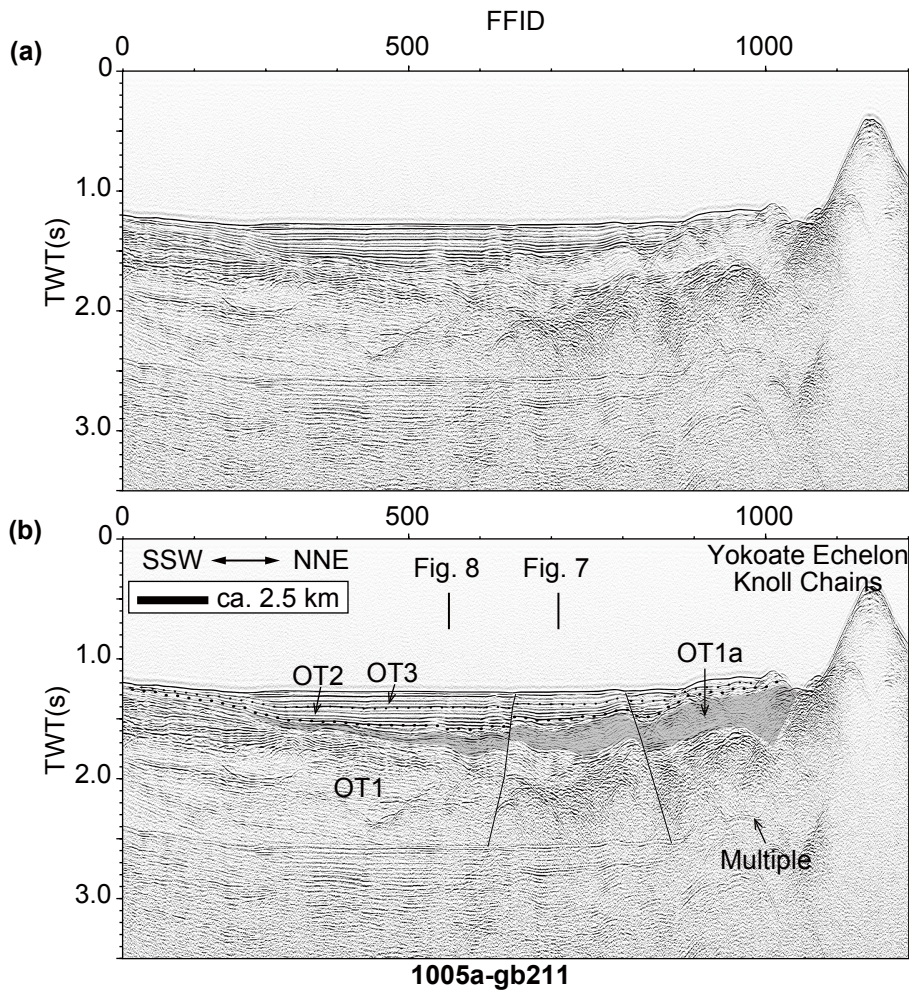
の解釈で追跡可能な正断層が複数認められ、断層周囲のOT3層内部に累積性のある変位が生じていた(第3図-第6図)。正断層は主に沖縄トラフ東縁部や横ガン曾根東方の海底平坦部に分布し、走向は沖縄トラフ東縁部では北東-南西方向、横ガン曾根東方では横当雁行海丘群の海丘配列方向に概ね平行な東北東-西南西方向であった。

5.1.3 西横当海丘東方海域

本海域の西端には沖縄トラフ東縁部が位置し、東端は上ノ根島が存在する(第3図)。本海域西部に位置する西横当海丘は、西側斜面が急崖を呈し沖縄トラフ東縁部と接しており、東側斜面が緩やかな傾斜を呈し平坦部へと続いている。上ノ根島西方には、北西方向に伸張した水深500-800mの地形的高まりが存在する。

西横当海丘北方から上ノ根島西方の高まりにかけて

の西北西-東南東断面を第7図及び第8図に、北北東-南南西断面を第9図に示す。第8図の西端は第4図の南方と直交しており、第7図及び第8図で認められた不整合面をOT1層からOT3層の3層の各境界と対比した結果、OT1層からOT3層の3層は本海域の全域に認められた。沖縄トラフ東縁付近におけるOT1層内部は連続性が良く振幅の弱い内部反射面で特徴付けられるが、沖縄トラフ東方の海底平坦部から北西方向に伸張した地形的高まり(第7図Line 7-gb211のFFID 1700-2000地点及び第8図Line 6-gb211のFFID 1550-1850地点)にかけて層相が変化する。地形的高まり北側斜面では内部反射面の連続性が悪くなり、褶曲が認められる(第7図)一方で、地形的高まり南側斜面では断層による変位が複数認められる(第8図)。OT1層内上部には下層にオンラップする堆積体が2つ存在することから、下位からOT1a層、OT1b層

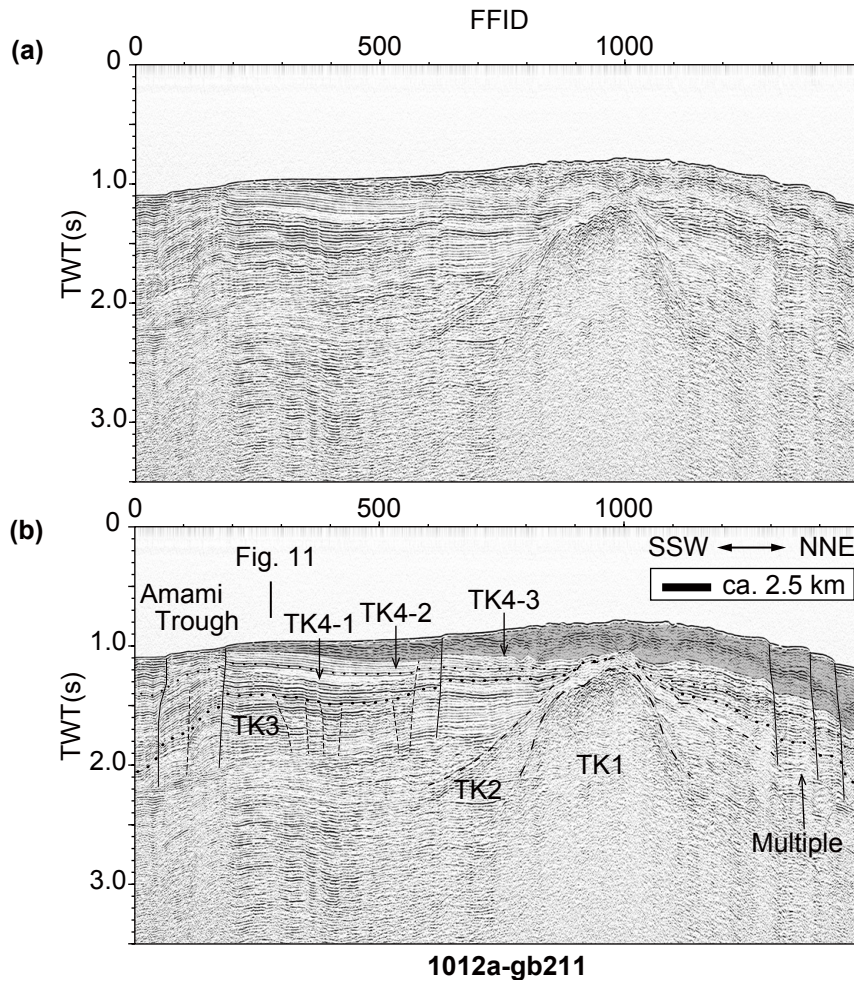


第9図 (a) 横当島西方の北北東-南南西方向の重合音波探査断面図(測線 1005a-gb211)及び(b)解釈線. 火山碎屑物(OT1-2層)がOT1層上部に分布する. 太矢印: 横当雁行海丘郡を構成する小海丘. 黒線: 正断層.
 Fig. 9 (a) NNW-SSE stacked seismic profile off west of Yokoatejima Island (Line 1005a-gb211) and (b) its interpretation. The volcanic product (the OT1-2 subunit) distributed on the top of the OT1 unit. Black bold arrow: the knolls of Yokoate Echelon Knoll Chains. Black lines: Normal faults.

のサブユニットに区分した(第7図, 第8図, 及び第9図). OT1a層は振幅の弱い成層した内部反射が特徴で, その分布は横当雁行海丘群南部に広く分布する. OT1a層の層厚は横当雁行海丘から南方に向かって薄くなる(第9図). OT1b層は断続的な内部反射面を特徴とし, その分布はOT1a層より限定的である. OT1a層及びOT1b層は横当雁行海丘群付近において層厚を増す特徴を考慮すると, 横当雁行海丘群周辺の火山活動によって供給された碎屑物層の可能性ある. OT2層及びOT3層の西横当海丘西方における分布は, 沖縄トラフの堆積中心に向かって層厚を増す傾向がある(第7図及び第8図).

本海域における海底地形の線状構造及び複数の反射断面の解釈で追跡可能な断層については, OT3層内部に累積性のある変位を生じさせた正断層が多く分布する(第

7図, 第8図, 及び第9図). OT3層に累積性のある変位を生じさせた断層は主に沖縄トラフ東縁部に認められる. 上ノ根島西方の北西方向に伸張した形的高まり内部では, OT1層に変位を生じさせた断層が分布し(第8図, 破線), そのほとんどは反射面の変位が海底面に達していない. OT1層に変位を生じさせた断層は複数の反射面に渡って認められ, 追跡した結果, 概ね北北東-南南西走向と推定した(第3図, 破線の正断層). 以上の断層の種類・分布を横ガン曾根周辺海域と比較すると, OT3層に累積性のある変位を伴う断層が沖縄トラフ東縁部より東方に分布しない点特徴的と言える. なお, 本航海ではOT2層及びOT3層が露出している可能性のある沖縄トラフ東縁部の崖(第8図, D05地点)にてドレッジを行い, 年代を推定するための堆積物試料を得たため, 今後OT2層の



第10図 (a) 宝島東方の北北東-南南西方向の重合音波探査断面図(測線1012a-gb211)。(b) 解釈線。断面の北部及び南部に正断層が認められる。TK4層の最上部に火山碎屑物層(TK4-3層)が認められる。黒線：正断層。細波線：海底面まで達しない正断層。

Fig. 10 (a) NNE-SSW stacked seismic profile (Line1012a-gb211) off east of Takarajima Island and (b) their interpretations. Normal faults are recognized in the northern and southern parts of the profile. The volcanoclastic deposits (the TK4-3 subunit) are recognized on the top of the TK4 unit. Black lines: Normal faults. Thin dashed lines: Normal faults that do not reach the sea floor.

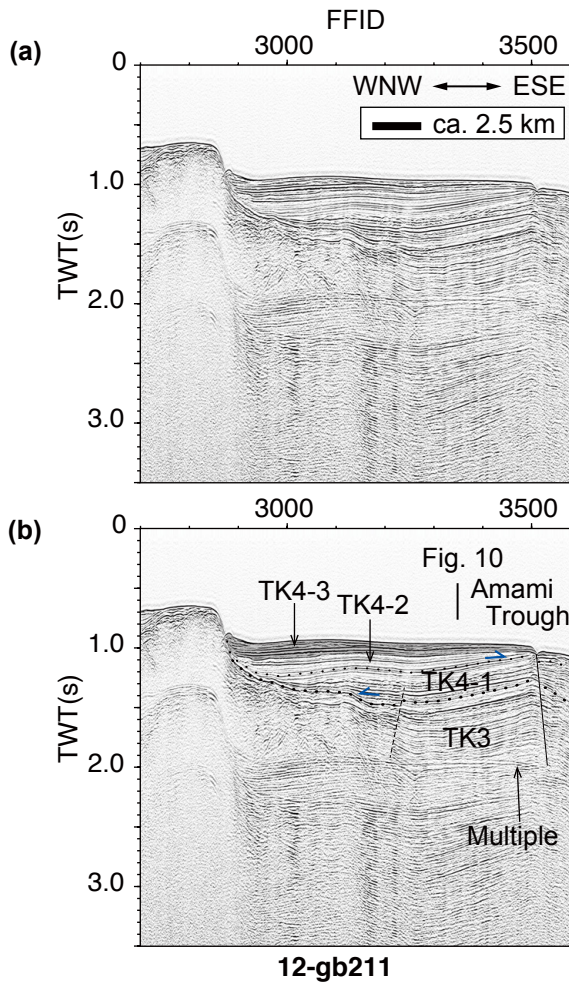
形成年代及びOT3層に累積性のある変位を生じさせた断層の活動年代を制約できる可能性がある。試料の記載については石塚ほか(2022)、堆積層の年代分析結果については有元・宇都宮(2022)を参照されたい。

5.2 火山フロント東方海域

火山フロント東方の地形は、北から順に宝島東方の緩やかな傾斜を示す水深500-800 mの高まり、濁り曾根東方の水深約800 mの平坦部、奄美舟状海盆の北縁部に特徴付けられる。本海域では音響的な層相の違い及び正断層に伴って形成したと考えられる不整合面を4面認定し、地層を下位から順にTK1層からTK4層の4層に区分した(第10図及び第11図)。各層の特徴および分布の詳細に

ついて以下に記載する。

本海域を北北東-南南西方向に縦断する反射断面を第10図に、濁り曾根東部から奄美舟状海盆まで西北西-東南東方向に横断する反射断面を第11図に示す。第10図北部の頂部が平らな高まり(Line 1012a-gb211のFFID 800-1100地点)の海底下0.5秒から深部にかけて、反射強度が強く断続な反射面が認められる。この地層をTK1層とした。TK1層は周囲の堆積層の基盤である可能性がある。TK1層をオンラップ不整合で覆い、背斜構造を呈する地層が認められ、TK2層とした。TK1及びTK2層の分布は、本海域では宝島東方沖に限られる。さらに上位には、成層構造が明瞭で側方に連続的な内部反射面を持つ堆積層が断面の南北に渡って広く分布し、奄美舟状海



第11図 (a) 宝島東方の西北西-東南東方向の重合音波探査断面図(測線 12-gb211)。(b) 解釈線。TK4層の最上部に火山碎屑物層(TK4-3層)が分布する。黒線: 正断層。破線: 海底面まで達しない正断層。

Fig. 11 (a) WNW-ESE stacked seismic profile (Line 12-gb211) off east of Takarajima Island and (b) their interpretations. The volcanoclastic deposits (the TK4-3 subunit) are distributed on the top of the TK4 unit. Black lines: Normal faults. Dashed lines: Normal faults that do not reach the sea floor.

盆に向かって層厚を増す(第10図)。第10図及び第11図においてこの堆積層中に不整合面が2面認められる。下位の不整合面を境に周囲の断層に伴って生じた変位の特徴が変わるため、地層を下位から順にTK3層及びTK4層と区分した。さらに、TK4層内部は不整合面及び音響的な層相の差異を基準に下位からサブユニットTK4-1層、TK4-2層、及びTK4-3層とした。TK3層の内部は概ね南北方向を軸として向斜している(第11図)。TK4-1層はTK3層オンラップで覆い(第11図)、南方に向かって層厚を増す(第10図)。TK4-2層は奄美舟状海盆北方で

TK4-1層にオンラップする(第11図)。宝島東方沖において、TK4-2層の上位には振幅が弱く断続的な内部反射を特徴とするTK4-3層が分布する(第10図)。TK4-3層の分布は火山フロントに沿っており宝島周辺の高まりに向かって層厚を増す傾向にあることから、宝島周辺を起源とする火山碎屑物層の可能性がある。

本海域に広く認められたTK3層及びTK4層には、北北東-南南西断面を観察すると正断層による変形が多く認められた。海底地形の線状構造及び複数の反射断面の解釈で追跡可能な断層として、本海域ではTK4層に累積性のある変位を生じさせた正断層とTK3層及びTK4層に同様の変位を生じさせた正断層を識別した。TK4層に累積性のある変位を生じさせた断層は、海域南部の奄美舟状海盆の北縁にて東-西走向の南落ちで観察される(第3図、第10図Line 1012a-gb211のFFID 0-600地点)。奄美舟状海盆北部から濁り曾根東方の範囲(第10図Line 1012a-gb211のFFID 300-600地点)においては、TK3層内部の地層に変位を生じさせ、TK4層下部に撓曲を発達させた正断層が分布しており、これらの断層はTK4層に累積性のある変位を生じさせた正断層と活動開始時期が同じと考えられる。次に、TK3及びTK4層に同様の変位を与えた正断層は、主に宝島東方の高まりの北東側斜面にて西北西-東南東走向の北落ちで分布する(第3図及び第10図Line 1012a-gb211のFFID 1300-1500地点)。TK3及びTK4層に同様の変位を与えた正断層は本調査海域の東端に認められ、東及び北方向に連続するかどうかについてはさらなる調査が必要である。

6. 調査海域に認められる地質構造の議論及びまとめ

前章では、火山フロントの東西で海域を分けて地層を区分し、地質構造の特徴を代表する反射断面の解釈を記載した。さらに、本調査で観測した海底地形(高下ほか、2022)に見られる線状構造と対比することで複数の反射断面に認められる断層を追跡し、断層の走向や分布を特定した。その結果、調査海域で追跡可能であった断層の特徴は火山フロントの東西で異なることが明らかになった。本章では、各海域で認められた断層の特徴と区分した地層の関係を整理し、地域的なテクトニクスについて予察的な議論をまとめる。

6.1 火山フロント西方

火山フロントである宝島及び濁り曾根の西方から沖縄トラフ内部にかけて、不整合面をもとに地層をOT1層からOT4層の4層に区分し、そのうちOT1層からOT3層の3層が本海域に広く分布していた。さらに、断面に認められる正断層には、OT1層に変位を生じさせた正断層とOT3層にのみ累積性のある変位を生じさせた正断層が認められた。OT1層に変位を生じさせた正断層は西横当海

丘東方に概ね北北東-南南西走向で分布し(第3図及び第8図Line 6-gb211のFFID 1200-1450地点), その多くは海底まで変位が達していない断層であった。OT3層にのみ累積性のある変位を生じさせた正断層は沖縄トラフ東縁部において北東-南西走向で, 横ガン曾根東方において東北東-西南西走向で分布する(第3図)。

北部沖縄トラフから火山フロントにかけての海域の全体的な傾向としては, トラフの中央部が落ちる形で正断層が発達し, 最上位の堆積ユニットがトラフ中心部に向かって厚く堆積する(Kimura, 1985)。この傾向にOT2層及びOT3層の分布及び断層による変形は一致しており, OT2及びOT3層は北部沖縄トラフの発達過程で形成されたと考えられる。OT3層に累積性のある変位を生じさせた正断層のうち本調査海域西部の北東-南西走向を呈するものは, 北部沖縄トラフに広く見られる北北東-南南西走向から北東-南西走向の雁行状に分布して沖縄トラフ東縁部を形作る断層(Kimura, 1985)と特徴が概ね一致し, OT2層形成後から現在まで沖縄トラフの背弧拡大に伴って形成されたと考えられる。一方で, OT3層に累積性のある変位を生じさせた正断層のうち, 横ガン曾根東方から宝島南西沖に分布するものは横当雁行海丘群の火山の並びと同様の東北東-西南西走向を示す。よって, この断層分布の特徴は, 既存の研究(Kimura, 1985; 古川, 1991)で知られている沖縄トラフ東縁部を形作る構造運動と同時期に, 宝島南西沖においても西北西-東南東方向の伸張によって沈降が起きていることを示唆する。

本調査航海では宝島南西沖において, 海底表層部の横当雁行海丘群に記載された火山及び地層内部に火山と思われる山体を反射断面で確認した(第4図-第6図, 及び第9図)。横当雁行海丘群に属する海丘のうち比高約100mほどの海丘は, 裾野がOT3層内部に確認されるためOT3層と同時期の形成年代を持つと考えられる(第6図)。横当雁行海丘群南方には, 火山碎屑物層と考えられるOT1-2層及びOT1-3層が分布することがわかった。横当雁行海丘群の形成年代や地層内部に認められる火山の分布や活動記録を特定し, 周囲の断層分布や断層形成年代と統合して解釈することで, 今後宝島南西沖のテクトニクスが詳細に明らかになることが期待される。

6.2 火山フロント東方

火山フロント東方では, 音響的な層相の違い及び正断層に伴って生じたと考えられる不整合面をもとにして地層をTK1層からTK4層の4層に区分した。TK1層及びTK2層は宝島東方沖でのみ確認され, TK3層及びTK4層は本海域に広く分布する。TK3及びTK4層は断層によって形成したと考えられる不整合面で区分し, 各層内部に変位を与えた断層を分類した結果, 本調査ではTK4層に累積性のある変位を生じさせた正断層とTK3層及びTK4層に同様の変位を生じさせた正断層を識別した。

TK4層に累積性のある変位を生じさせた正断層は, 調査海域南端である奄美舟状海盆の北縁にて東-西走向の南落ちて認められた(第3図及び第10図Line 1012a-gb211のFFID 0-600地点)。TK4層は不整合面をもとに2つのサブユニット(TK4-1層及びTK4-2層)に分けられることから, TK3層形成後に断続的に南-北方向の伸張応力が働いていることを示唆する。同様の東-西走向の断層は奄美大島西方の海盆で発達していることが報告されており(井上ほか, 2016), 本調査で認められた東-西走向の断層も同じ形成過程を経たと考えられる。

TK3層及びTK4層に同様の変位を生じさせた正断層は, 宝島東方に西北西-東南東走向の北落ちて分布する(第3図及び第10図Line 1012a-gb211のFFID 1300-1500地点)。この特徴は島弧である奄美海脚の伸びの方向に沿った伸張応力の存在を示唆する。宝島と小宝島間の地形には, 西北西-東南東方向のリニアメントによって隔てられたグラーベンが報告されており(Minami *et al.*, 2021), TK3層及びTK4層に同様の変位を生じさせた正断層はそのグラーベンの南部を形成するものと考えられる。また, トカラ海峡は横ずれ断層の存在も指摘されており(木村ほか, 1993; 松本ほか, 1996), 概ね東西走向の断層の分布や成因を明らかにするには, トカラ海峡周辺や奄美海脚北部における音響層序・構造も比較して議論する必要がある。このような地層区分に基づいて周囲の断層の形成過程を明らかにすることで, 今後さらに琉球孤北部の広域的なテクトニクスと関連づけた議論へ展開できる可能性がある。

火山活動に関わる解釈としては, 宝島東方において火山碎屑物と考えられるTK4-3層が認められる(第10図及び第11図)。TK4-3層は宝島東方にて最表層に分布しており, 第四紀に火山活動があったことが示唆される。宝島は中期中新世に形成した火山岩が基盤を構成している(中野ほか, 2008)が, 海底試料のドレッジ調査により中期更新世以降の軽石が発見されており, 宝島周辺は従来の研究より若い火山活動があったと予察的に報告されている(横瀬ほか, 2010)。本研究によって区分した地層の年代を推定し, 火山碎屑物の詳細な分布を明らかにすることで, 火山フロントにおける火山活動の知見が詳細に得られると期待される。

謝辞: 本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職員の方々, 反射法音波探査の観測作業をお手伝いいただいた東海大学の学生や海洋技術開発株式会社の皆様, 及びGB21-1航海の乗船研究者の方々に献身的なご協力を頂きました。また, 査読者である活断層・火山研究部門の松本 弾博士には建設的な意見をいただき, 本稿を改善することができました。皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Arai, R., Kodaira, S., Yuka, K., Takahashi, T., Miura, S. and Kaneda, Y. (2017) Crustal structure of the southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano, and potential mantle accretion in the continental back-arc basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122**, 622–641.
- Arai, K., Inoue, T. and Sato, T. (2018a) High-density surveys conducted to reveal active deformations of the upper forearc slope along the Ryukyu Trench, western Pacific, Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **5**, 1–15.
- Arai, R., Kodaira, S., Takahashi, T., Miura, S. and Kaneda, Y. (2018b) 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 (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.
- Fang, P., Ding, W., Lin, X., Zhao, Z., Fang, Y. and Li, C. (2020) Neogene subsidence pattern in the multi-episodic extension systems: insights from backstripping modelling of the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **111**, 662–675.
- Fournier, M., Fabbri, O., Angelier, J. and Cadet, J. P. (2001) Regional seismicity and on-land deformation in the Ryukyu arc: Implications for the kinematics of opening of the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **106**, 13751–13768.
- 古川雅英 (1991) 琉球弧と沖縄トラフの発達史 —とくに沖縄トラフの形成年代について—. 地学雑誌, **100**, 552–564.
- 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.
- 井上卓彦・佐藤智之・古山精史朗 (2016) GH15 航海における反射法音波探査概要. 地質調査総合センター速報, no. 70, 43–58.
- Ikegami, F., Tsuji, T., Kumagai, H., Ishibashi, J. I. and Takai, K. (2015) Active rifting structures in Iheya Graben and adjacent area of the Mid-Okinawa Trough observed through seismic reflection surveys. In: J. Ishibashi, K. Okino and M. Sunamura (eds.) *Subseafloor biosphere linked to hydrothermal systems*, Springer, 361–368.
- Ishibashi, J. I., Ikegami, F., Tsuji, T. and Urabe, T. (2015) Hydrothermal activity in the Okinawa Trough back-arc basin: Geological background and hydrothermal mineralization. In: J. Ishibashi, K. Okino and M. Sunamura (eds.) *Subseafloor biosphere linked to hydrothermal systems*, Springer, 337–359.
- 石塚 治・石野沙季・鈴木克明・横山由香・三澤文慶・有元 純・高下裕章・井上卓彦 (2022) トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴. 地質調査研究報告, **73**, 249–265.
- 兼子尚知 (2007) 沖縄島及び琉球弧の新生界層序. 地質ニュース, no. 633, 22–30.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **2**, 222–240.
- 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—沖縄トラフ北部の東縁のテクトニクス—. 第9回深海シンポジウム報告書, 283–307.
- 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.
- 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).
- Kizaki, K. (1986) Geology and tectonics of the Ryukyu Islands. *Tectonophysics*, **125**, 193–207.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. 地質学雑誌, **105**, 286–296.
- 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. and Ohara, Y. (2016) Detailed morphology and bubble plumes of Daiichi-Amami Knoll in the central Ryukyu Arc. *Marine Geology*, **373**, 55–63.
- 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.
- 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.
- Nash, D. F. (1979) The geological development of the North Okinawa Trough area from Neogene times to recent. *Journal of the Japanese Association of Petroleum Technologists*, **44**, 341–351.
- 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.
- Sibuet, J. C., Deffontaines, B., Hsu, S. K., Thureau, N., Le Formal, J. P. and Liu, C. S. (1998) Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **103**, 30245–30267.
- 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・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 : 2021年12月21日 ; 受 理 : 2022年12月7日)

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

三澤 文慶^{1,*}・鈴木 克明¹

MISAWA Ayanori and SUZUKI Yoshiaki (2022) Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GK20 cruise. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73 (5/6), p. 235–248, 10 figs.

Abstract: The GK20 cruise was conducted using the research vessel Kaiyo-Maru No.2 (Kaiyo Engineering Co., Ltd.) around the Tokara Islands area from early November to early December in 2020. In this cruise, a high-resolution subbottom profiler (SBP) survey was conducted to clarify the shallow submarine structure in the Okinawa Trough, the Volcanic front area, and the Ryukyu Arc area around the Tokara Islands. This paper reports on the shallow geological structures around the Tokara Islands as revealed by SBP profiles. In the Okinawa Trough area, the structure of well-stratified trough-fill sediments of the Okinawa Trough and the development of normal faults were confirmed. The bathymetric features of the volcanic front area can be roughly divided into islands or topographic high and flat plains. The internal structure of the islands and the topographic high was unclear, but there was a well-stratified sedimentary layer on the flat plain. On the flat surface located on the south side of the Takarajima Island, the development of the Yokoate Echelon Knoll Chains, six slanting lines organized by submarine volcanoes, was identified. In the Ryukyu Arc area, sand wave-like faces were recognized on the northern rim of the Oshima-Shin Sone. In the Amami Trough, the well-stratified sedimentary beds and the graben bounded by the normal fault were identified.

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

要 旨

GK20航海では、2021年3月に実施した望星丸GB21航海に先行して、2020年11月初旬から12月初旬に第二開洋丸(海洋エンジニアリング株式会社)を用いて、トカラ列島周辺海域の沖縄トラフ域・火山フロント域・琉球弧にて高分解能サブボトムプロファイラー探査を行い、本海域の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海底下浅部の地質構造をまとめる。沖縄トラフ域では、よく成層したトラフ充填堆積層の構造と正断層の発達を確認した。火山フロント域では島嶼や地形の高まり部分では内部構造は不明であったが、平坦面部分では成層した堆積層の詳細な構造及び宝島南方に位置する6列の海丘群である横当雁行海丘群(仮称)の存在を確認した。琉球弧では、大島新曾根の北縁部でサンドウェーブとみられる層相を確認した。奄美舟状海盆では成層した堆積層と正断層によって区切られた凹地状の地形の発達が明らか

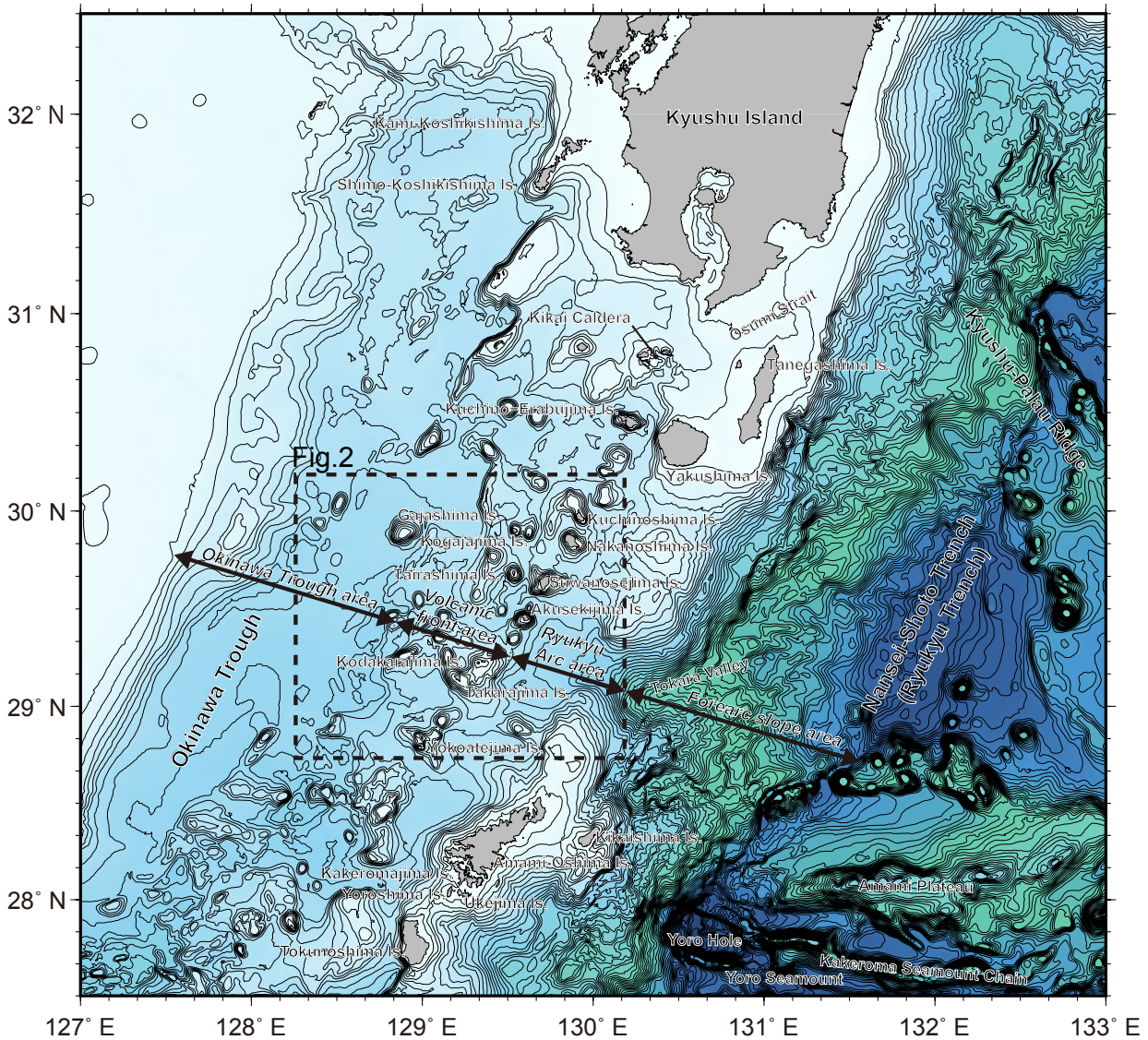
かになった。

1. はじめに

トカラ列島は鹿児島県の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)。本地域では西から東に向かい、背弧海盆である沖縄舟状海盆域(以下、沖縄トラフ域)、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たる琉球弧、及び南西諸島海溝側の斜面域である前弧斜面域に大きく区分される(例えば、Ishibashi *et al.*, 2015)。南西諸島海溝で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「沈み込み帯」であり、九州から台湾にかけての全長約1,200 km、最大水深約7,500 m以上におよぶ。フィリピン海プレートの沈み込みに伴って、ユーラシアプレート上には非火山性で特徴付けられる琉球弧が形成されている。琉球弧

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



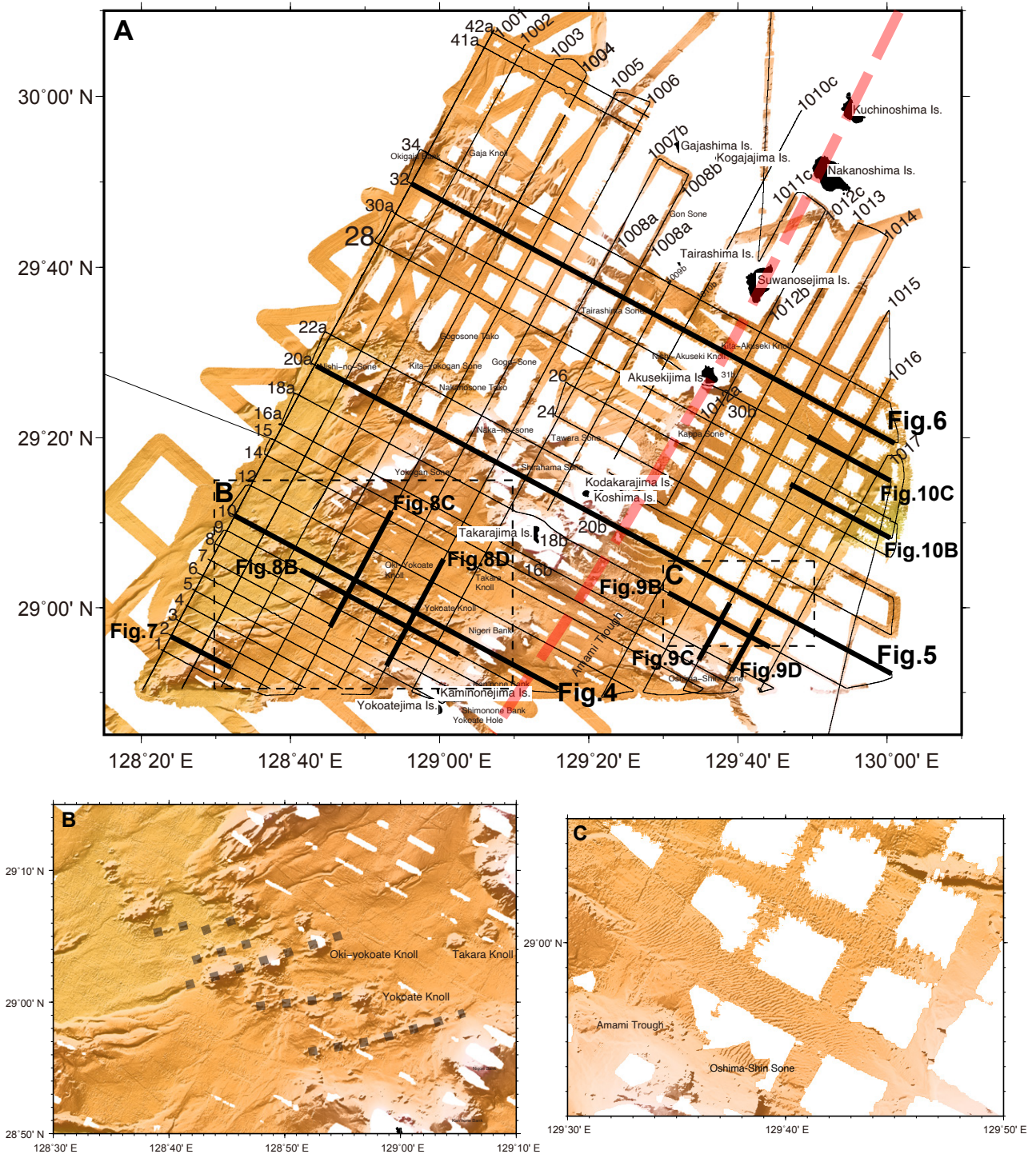
第1図 調査地域広域海底地形図. 本図面で使用した海底地形データは、財団法人日本水路協会海洋情報研究センター刊行のJTOPO30を使用した.

Fig.1 Bathymetric map of the northern Okinawa Trough. This bathymetric map used JTOPO30 grid data.

はトカラ海峡及び慶良間海裂により北琉球、中琉球、南琉球の3つのエリアに大別され(小西, 1965), 今回調査を行ったトカラ列島周辺海域は北琉球に位置する. 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, 悪石島と宝島の上に位置し, 琉球列島と日本列島との地質構造境界に相当し, かつ生物地理学的にはいわゆる「渡瀬線」に相当する(松本ほか, 1996). トカラ列島周辺海域には複数の島々が存在するが, 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と考えられている(下司・石塚, 2007) (第2図A).

なかでも, 口之島・中之島・諏訪之瀬島は活火山として注目され, 今日でも火山活動の集中的な観測が実施されている. 火山フロントを構成する島々の西側には背弧リフティングが進行する背弧海盆の沖縄トラフが位置し, 現在断続的なリフティングの状態にあると考えられている.

GK20航海(2020年11月5日~12月2日)では, 鹿児島県・トカラ列島周辺海域にて海洋地質調査を行い, 今後本海域で実施される木下式グラブ(K-グラブ)採泥及び大口径コアラー採泥予定地点を通る測線を中心に, 高分解能サブボトムポロファイラー(以下, SBP)探査, 海底地形調査, 三成分磁力計による地磁気観測を実施した. 本論では, GK20航海で取得したSBP断面及び海底地形デー



第2図 高分解能海底地形図及び探査測線図。A. 海底地形図及び探査測線図。図中の黒線が探査測線を示し、黒太線が本論中で使用した断面図の位置を示す。また、赤破線は火山フロントの位置を示す(例えば、Minami *et al.*, 2021)。B. 横断雁行海丘群周辺の拡大図, C. 大島新曾根北縁部の拡大図。本図面で使用した海底地形データは、GK20航海で取得したものにGH11航海及びGB21-1航海で取得した各データを統合した50 mグリッドデータを使用した(高下ほか, 2022)。

Fig. 2 Bathymetric maps around the Tokara Islands area. A: High-resolution bathymetric map around Tokara Islands area and GK20 cruise survey lines. Black lines indicate SBP survey track. Bold black lines indicate SBP profiles in this study. Dashed bold red line indicates the position of the volcanic front (ex. Minami *et al.*, 2021). B: Close up bathymetric map around the Yokoate Echelon Knoll Chains. C: Close up bathymetric map in northern rim of the Oshima-Shin Sone. All bathymetric maps used integrated 50 m grid data made by integrating the data acquired in the GK20 cruise with the data acquired in the GH11 and the GB21-1 cruises (Koge *et al.*, 2022).

タを用いて、トカラ列島周辺海域の海底下浅部の地質構造について速報的な結果をまとめる。

2. 地質概説

トカラ列島周辺海域には複数の島々が存在し、その多くが火山島である。トカラ列島に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の火山活動に起源がある。トカラ列島周辺海域の火山活動は、前期鮮新世(4 Ma前後)と中期更新世(0.7 Ma以降)を中心とした時期に集中しているが、火山活動は中期更新世以降まで継続していた可能性もある(横瀬ほか, 2010)。トカラ列島の火山岩類は溶岩流を主体とし、大部分は両輝石安山岩から構成されるが、カンラン石もまれに認められている(横瀬ほか, 2010)。各島々で観察される岩石も複数の種類が認められ、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している(中野ほか, 2008)。

トカラ列島周辺海域の海洋地質研究に関しては、海底に点在する海底火山や構成岩類に関する研究が多い。火山フロント域から沖縄トラフにかけては無数の海底火山が存在し様々な報告がなされている(例えば、横瀬ほか, 2010, Minami *et al.*, 2021) (第2図)。本海域の海底火山には現在でも未記載の海底火山地形があり、詳細な海底地形調査により、例えば白浜曾根の北方では海底カルデラの存在が新規に報告されている(Minami *et al.*, 2014)。トカラ列島周辺海域の層序・地質構造に関しては加藤ほか(1989)で報告され、堆積層を計7層に区分し、基礎試錐To-ka-1との比較より下位の2層を島尻層群と対比可能な鮮新世の堆積層とし、上位の5層を島尻層群より新しい更新世の堆積層とした。Arai *et al.* (2018)では、沖縄トラフから火山フロント域を通る反射法地震探査結果を報告し、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縄トラフ縁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を指摘した。

3. 調査概要

GK20航海は、2020年11月5日から2020年12月2日の期間において、海洋エンジニアリング株式会社所有の海洋調査船「第二開洋丸(842トン)」を使用して実施した。調査にあたっては、第二開洋丸に搭載されたサブボトムプロファイラー(Subbottom Profiler; 以下、SBP)であるKongsberg社製のTOPAS PS18を使用した。SBP探査時にはナローマルチビーム音響測深装置(Multibeam echosounder, 以下MEBS)であるEM304の同時収録を行っている。調査測線は、本海域における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琉球弧を

直交方向に切る西北西-東南東方向及び琉球弧に平行な北北東-南南西方向の測線を用いた。特に、西北西-東南東方向の測線については採泥点が主に設定されている偶数番号の測線を優先し、奇数番号の測線の一部も探査を実施した(第2図A)。調査時の船速は8ノットを基本とし、海況に応じて前後させ、SBPデータ取得に最適な船速とした。なお、第二開洋丸にはSBPとMBESの干渉を防ぐために同期装置が搭載されているが、本装置を用いたデータ取得試験を行った結果、両装置を同期させることによりSBPの発振間隔が長くなることが明らかになった。そのため、SBP断面を構成するトレース数が少なくなることが確認されたため、本同期装置は使用しなかった。

本調査で使用したSBP装置であるTOPAS PS18は、パラメトリック方式のSBPである。この方式のSBPでは、音源から一次高周波数(Primary High Frequency; 以下、PHF)と二次低周波数(Secondary Low Frequency; 以下、SLF)の2種類の波を発生させ、この2つの波の重ね合わせることで二次的に差の成分(SLF)と和の成分(SHF)を合成することで、堆積物中により深く透過できる波長のSLFをSBPに、SHFを水中音響異常などのwater column解析に使用している(例えば、井上ほか, 2017)。今回使用したTOPAS PS18では、PHFは15-21 kHz、SLFは0.5-6 kHzの帯域を使用している。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取りまとめを行った。

4. 結果

4.1 海底地形概要

本地域の地形は西から東に向かい、沖縄トラフ域・火山フロント域・琉球弧・前斜斜面域(例えば、Ishibashi *et al.*, 2015)に区分されているが、今回の調査では沖縄トラフ域・火山フロント域・琉球弧を対象とした(第2図A)。本調査では調査範囲西縁の沖縄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、GK20航海を含む本海域の海底地形調査結果の詳細に関しては、高下ほか(2022)を参照されたい。

沖縄トラフのうち、本調査では沖縄トラフ東縁部を主に調査を行っている。このエリアでは沖縄トラフと火山フロントの境界部分に地形的高まりの存在により隔られている箇所もあるが、境界部が不鮮明なエリアも存在する(第2図A)。沖縄トラフ底は概ね平坦な地形であるが、部分的に海底火山と考えられる地形的高まりが点在している。次に、沖縄トラフ東縁部から島嶼部の間の部分が火山フロント域である。火山フロント域の大部分は概ね緩やかに西傾斜もしくは東傾斜した平坦面から構成されるが、火山島からなる島嶼と海底火山と考えられる

地形的高まりが点在している(第2図A)。また、既存の海底地形データで認識されていない海底火山も多数存在することが推察される。このうち、沖横当海丘や横当海丘の周辺部にはこれまで報告の無い6列の地形的高まりの連なりが存在することが明らかになり、この連なりを横当雁行海丘群と仮称している(高下ほか, 2022)(第2図B)。なお、島嶼と琉球弧間には比較的平坦な地形からなる奄美舟状海盆が存在する(第2図C)。奄美舟状海盆のうち、大島新曾根の北縁部分では概ね北東-南西走向の細かい凹凸の繰り返し認められ、この地形はサンドウェーブと考えられる。

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A)。調査海域北西側の沖臥蛇曾根及び臥蛇海丘の周辺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。また、測線28の南側の沖縄トラフから火山フロント域の部分には、概ね北東-南西走向もしくは東北東-西南西走向のリニアメントが多数発達している。琉球弧の東側では盆地部分に部分的に概ね東西走向のリニアメントが認められる。

4.2 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30本、トカラ列島に並行な北北東-南南西方向測線を21本、合計51本の測線にて観測を行い、約2,060 miles(約3,815 km)分のデータ取得を行うことができた(第2図A)。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、海底面の反射パターンを3パターン、内部構造の反射パターンを3パターンに区分し、これらの組み合わせから音響的層相を8パターンに区分した。この8パターンに加えて、井上ほか(2017)で追加された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を9つ目の音響的層相として取り扱った。9パターン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(Facies)1, 2, 4, 5, 7, 及び9の6パターンが認められた。本調査で得られたSBP断面に適用した池原ほか(1990)及び井上ほか(2017)の計6パターンの音響的層相について以下にまとめ、代表的な断面を第3図に示す。

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5: よく成層した構造を示し、ブロック状を呈するもので、海底面は平坦面であるが、ステップ状の地形

を呈することが多い。反射面の間隔は粗い。

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。

第4図から第6図は、調査範囲の北部・中部・南部を通る代表的な西北西-東南東方向の断面である。これらの断面を中心に、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、エリアごとにその詳細をまとめる。

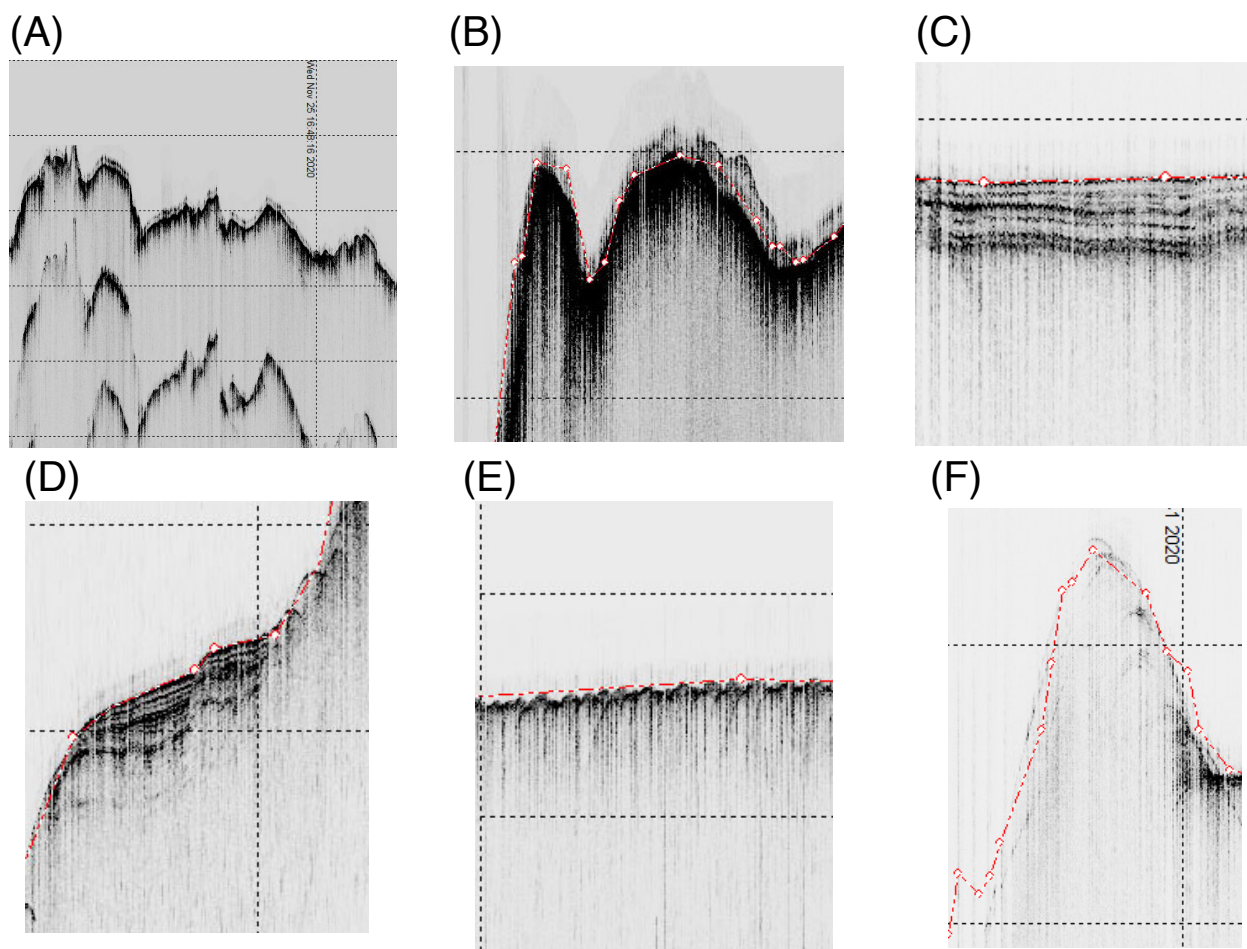
4.2.1 沖縄トラフ域

沖縄トラフ底は比較的平坦な地形を示している(第2図A)。この部分では層相4の特徴的な層相が卓越する(第4図A・第5図A・第6図A)。この堆積層はトラフ充填堆積層であると考えられる。充填堆積層の東縁部には部分的に急斜面が存在し、トラフ域と火山フロント域を隔てており、この部分では層相1, 層相2及び層相9が認められる。層相1及び層相2の箇所は地形的高まり部分に多く見られ、地形的高まりの地形を反映させたものである(第6図A)。層相9の箇所では急斜面により海底面が弱くなったことに起因する(第4図A・第5図A)。3つの層相はともに地形的高まりの内部構造に関しては不鮮明であった。また、調査範囲南部に位置する測線2などでは、斜面部分に層相5が認められる箇所もある(第7図)。

トラフ充填堆積層の内部反射面は、概ね海底面と平行で連続性の良い内部反射面で特徴付けられ、海底面下100 m以上の部分を捉えている箇所も存在する(例えば、第4図A)。堆積層中には部分的に明瞭な不整合面の存在も認められた(第4図A)。調査範囲の南部では、トラフ充填堆積層中に比高約100 m程度の地形的高まりが点在し、主に層相1及び層相9を示すことから、この部分は海底火山であることが推察される(第4図A)。沖縄トラフと火山フロント域の境界部分には、部分的に西落ちの正断層の発達し(第5図A)、かつ部分的に境界部分の斜面にも西落ちの正断層の存在が認められる(第7図)。また、トラフ充填堆積層内では部分的に反射面が不連続になる箇所が認められ、この部分には正断層が発達する(第5図A及び第7図)。これらの正断層は、沖縄トラフのリフティングに伴う引張応力の関与が示唆される(例えば、Lee *et al.*, 1980)。なお、これらの正断層は海底面に到達しているもしくは限りなく海底付近まで到達しているため比較的最近の断層活動が示唆されるが、その累積性などは不明である。

4.2.2 火山フロント域

火山フロント域の地形は、島嶼及び海丘などの地形的高まりと平坦部から構成されている。島嶼部分では層相1もしくは層相2が卓越する(第4図・第5図・第6図)。



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4, D:層相5, E:層相7, F: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 4, D: facies 5, E: facies 7, F: facies 9. The acoustic facies classification is based on Ikehara *et al.* (1990) and Inoue *et al.* (2017).

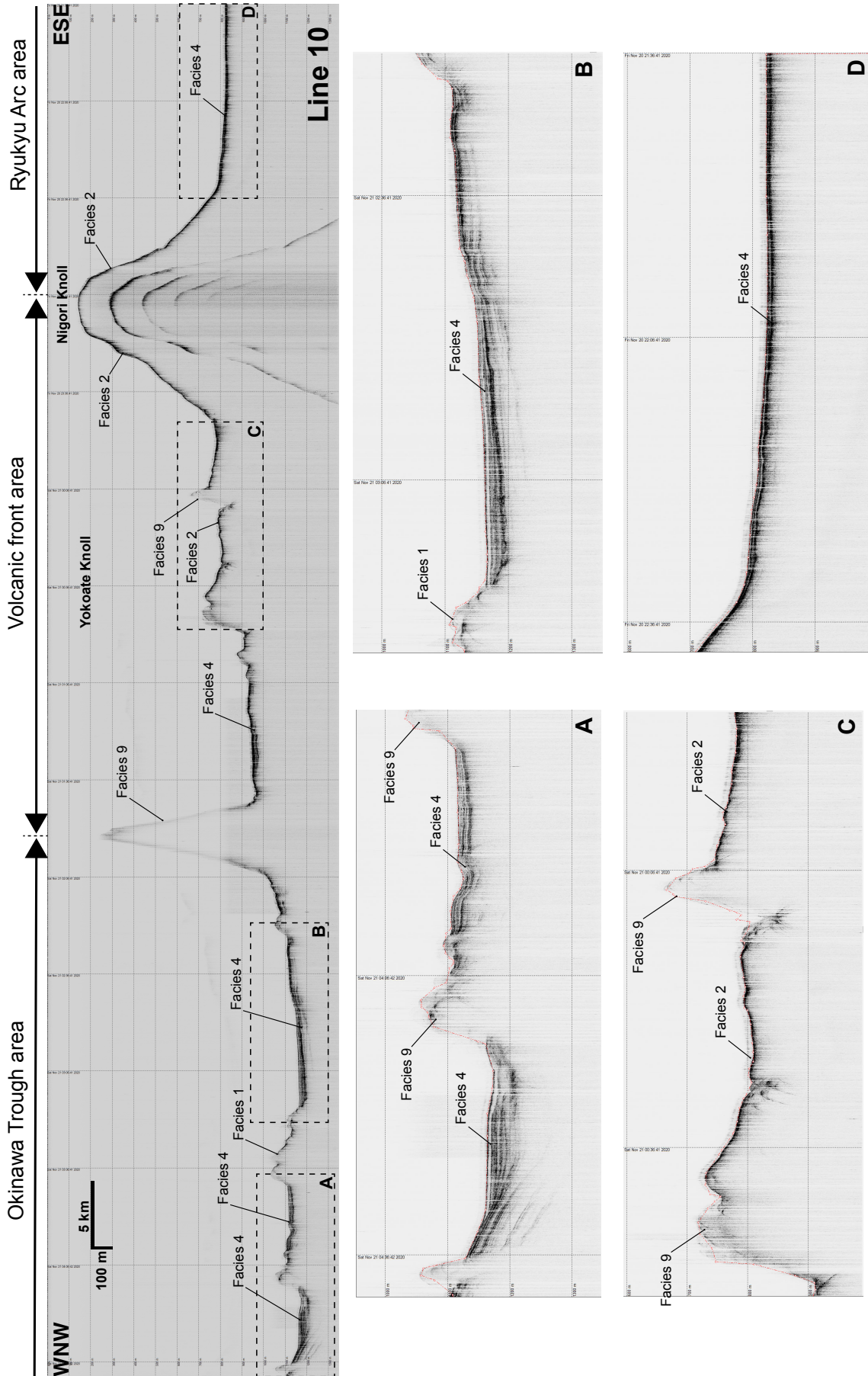
また、急斜面部分では部分的に層相9も認められる。一方、平坦部では堆積層が発達し、主に層相4が認められるが(第4図B・第6図B)、部分的に層相2が認められる箇所もある(第4図C)。加えて、地形的高まりの間に局部的に堆積層が存在し、層相4を示す(第5図B)。

島嶼及び地形的高まりの部分は層相1、層相2及び層相9が認められるため、内部構造は不明である。一方、平坦面に発達する堆積層では、海底面下最大で約100 m程度の部分を捉えている(例えば、第4図B)。平坦面を構成する堆積層は、成層した海底面に平行な連続性の良い内部反射面で特徴付けられる(例えば、第4図B及び5B)。宝島南方の平坦面のうち、横当雁行海丘群(仮称)の部分では堆積層に下部からの貫入により形成されたと考えられる急斜面からなる地形的高まりが複数認められる(第8図)。この海丘群の部分では層相2もしくは層相9が認められることから、表層での堆積層の被覆は少ない

ものと考えられる。また、平坦面を構成する堆積層では部分的に不連続になる箇所が認められ、これらの部分では正断層が存在するものと考えられる(第6図C及び第8図C)。これらの断層は火山フロント域での地下からのマグマ貫入に起因した伸張応力により形成されたものと考えられ、伊豆小笠原弧の背弧リフトでみられる断層活動と類似したものと考えられる(例えば、岡村ほか、1991)。なお、これらの断層は海底面に到達しているが、断層活動の累積性などは不明である。しかしながら、第6図Cの断層部分では比高差約60 m程度の明瞭な断層崖が残存するため、比較的最近の断層活動により形成されたものと考えられる。

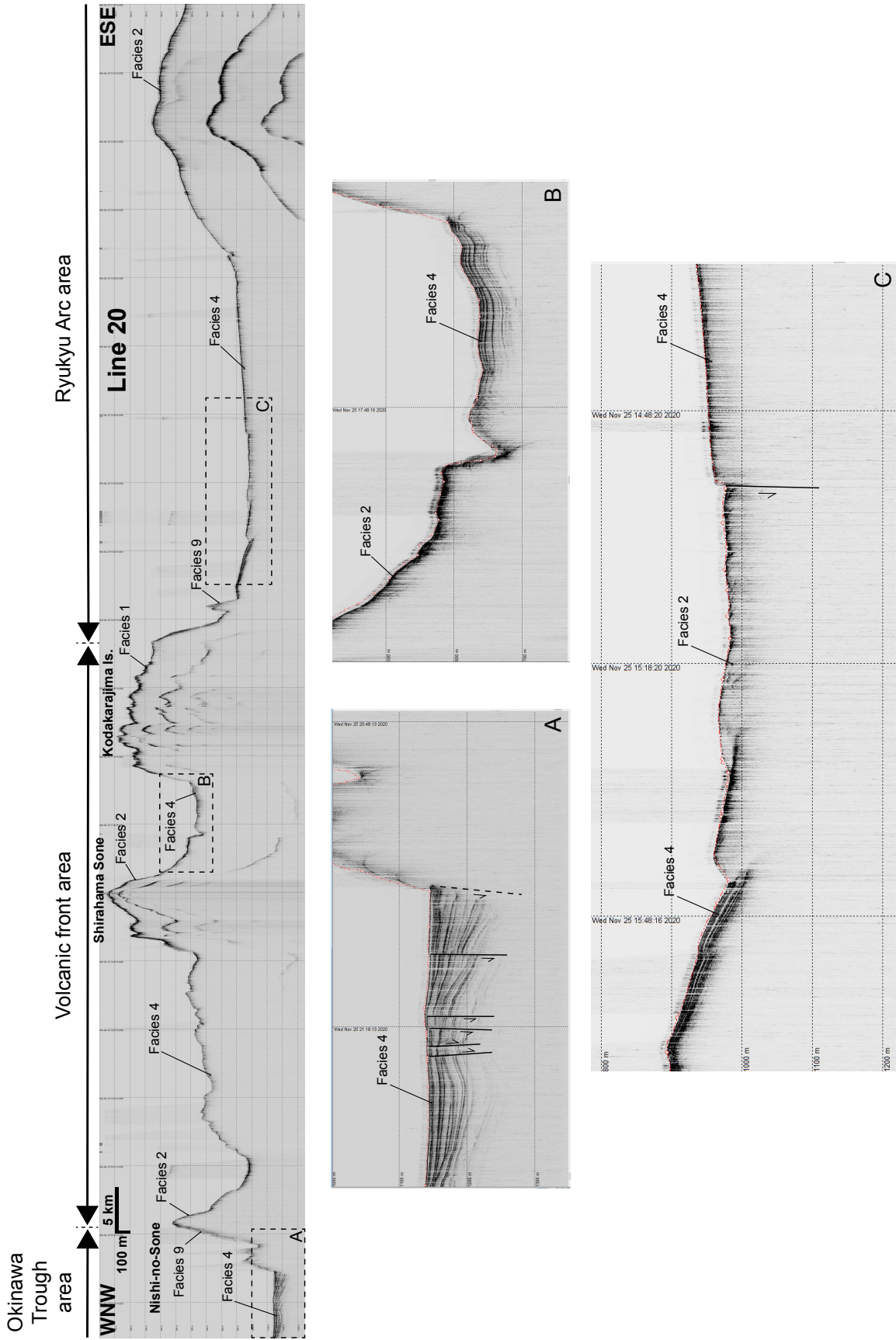
4.2.3 琉球弧

琉球弧は主に島嶼東方の斜面域及び奄美舟状海盆部分を調査している。島嶼の斜面部分及び琉球弧を構成する



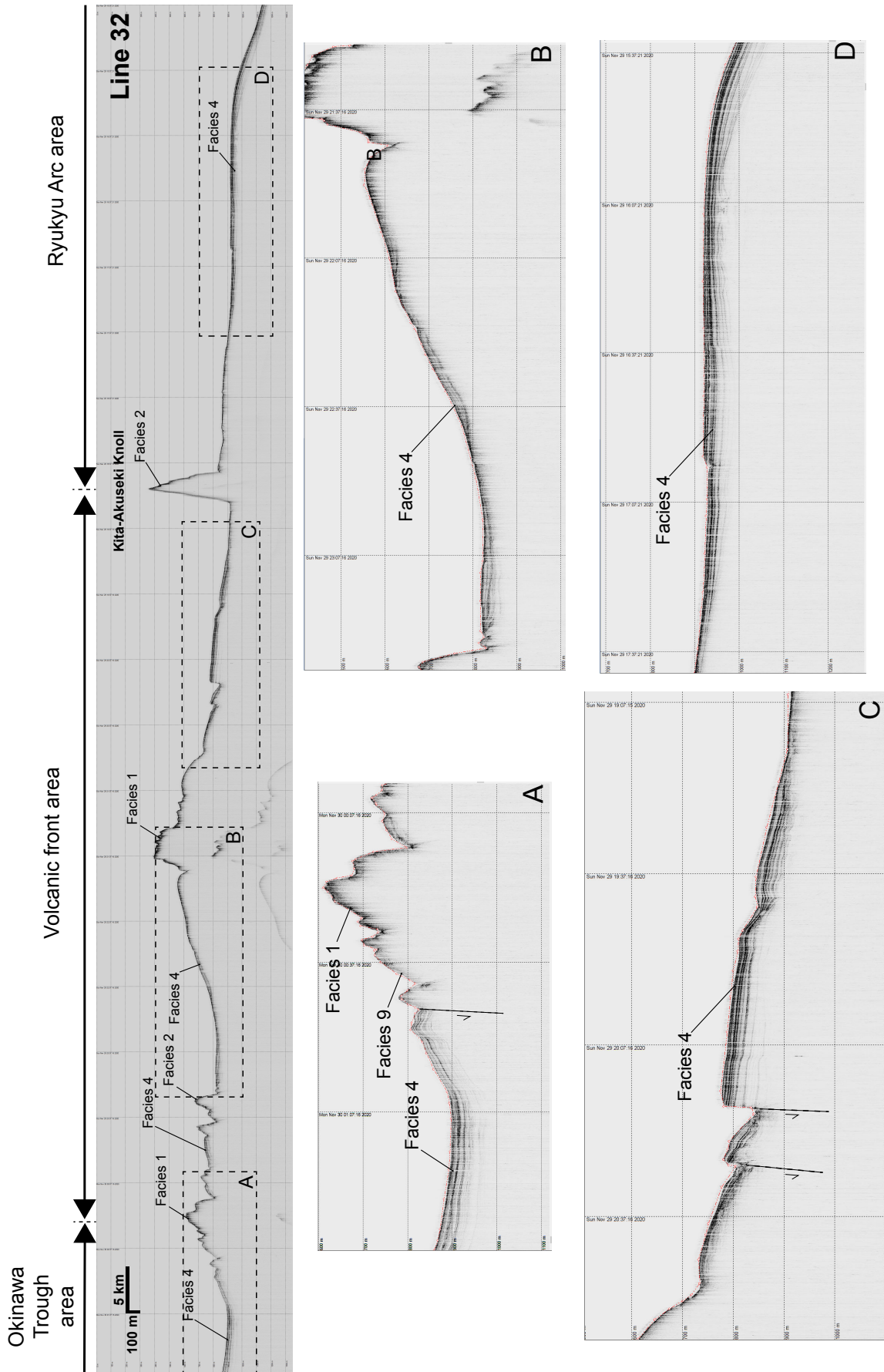
第4図 測線10のSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探査測線の位置は、第2図Aを参照されたい。

Fig. 4 SBP profile of Line 10 and close up profiles. The location of the SBP profile is shown in Figure 2A.



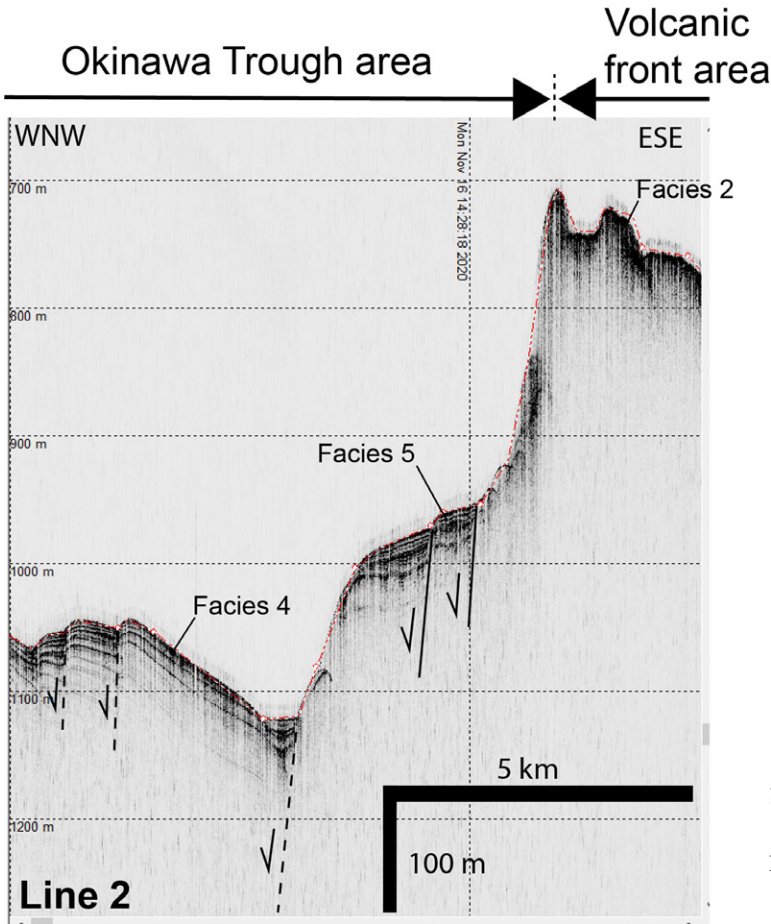
第5図 測線20abのSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探查測線の位置は、第2図Aに示す。

Fig. 5 SBP profile of Line 20ab and close up profiles. The location of the SBP profile is shown in Figure 2A.



第6図 測線32ab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Aに示す。

Fig. 6 SBP profile of Line 32ab and close up profile. The location of the SBP profile is shown in Figure 2A.



第7図 測線2のSBP断面図. 探査測線の位置は、第2図Aに示す.

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

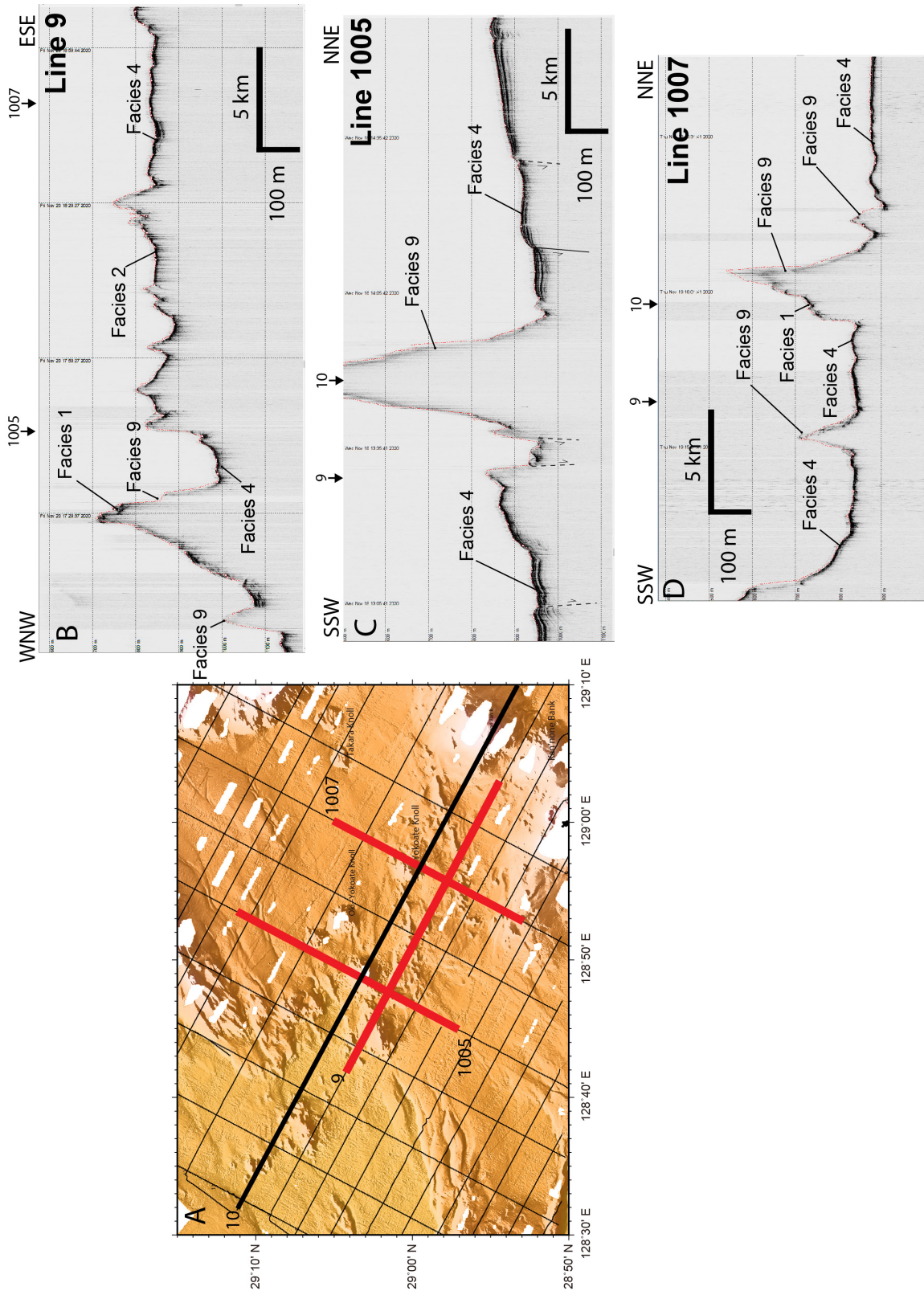
地形的高まり部分は層相1もしくは層相2が卓越する(第5図). 一方、奄美舟状海盆部分は層相4が卓越する(第5図・第6図). 大島新曾根の北縁部分には層相7が認められる(第9図). この部分では、大島新曾根の北縁部分に東西方向に約18 km、南北方向に約11 kmの範囲で、波長200~300 mで振幅1 m程度のサンドウェーブが海底地形図で認められることから(第2図C)、この層相7の部分はサンドウェーブを捉えたものと考えられる(第9図)(鈴木ほか, 2022, 高下ほか, 2022). サンドウェーブの周辺では海底地形上のサンドウェーブの他にも、GB21-1航海で実施された海底写真撮影においてリップルや、一定の流向の底層流において成長する八放サンゴの生態写真などが観察され、そのほとんどが北西から南東に向かう、黒潮の蛇行に伴う底層流の存在を示唆する(鈴木ほか, 2022).

奄美舟状海盆では表層を構成する堆積層を海底面下最大で70 m程度の部分まで捉えている(第6図D). 堆積層は、成層した海底面に平行な連続性の良い内部反射面で特徴付けられ、火山カルデラ域で見られたような地形的高まりはほぼ存在しない. 堆積層の東縁側には海底地形図上に明瞭な崖が認められ、かつ凹地状の地形が形成されている. 崖の部分では堆積層の断面が海底面に露出していることが考えられる. また、この崖の麓には概ね崖

に平行な正断層が発達するため、これらの崖は断層崖と考えられる(第10図). これらの断層崖は比高約110 m~150 mの高低差があり、比較的最近の断層活動により形成されたものと考えられる. 第10図Aで認められる崖が連続して存在しているものであるなら、その全長は約13 km程度になる. 今後海底地形データの空白部を埋めていくことで、この断層崖に関するより詳細な議論が可能になると期待される.

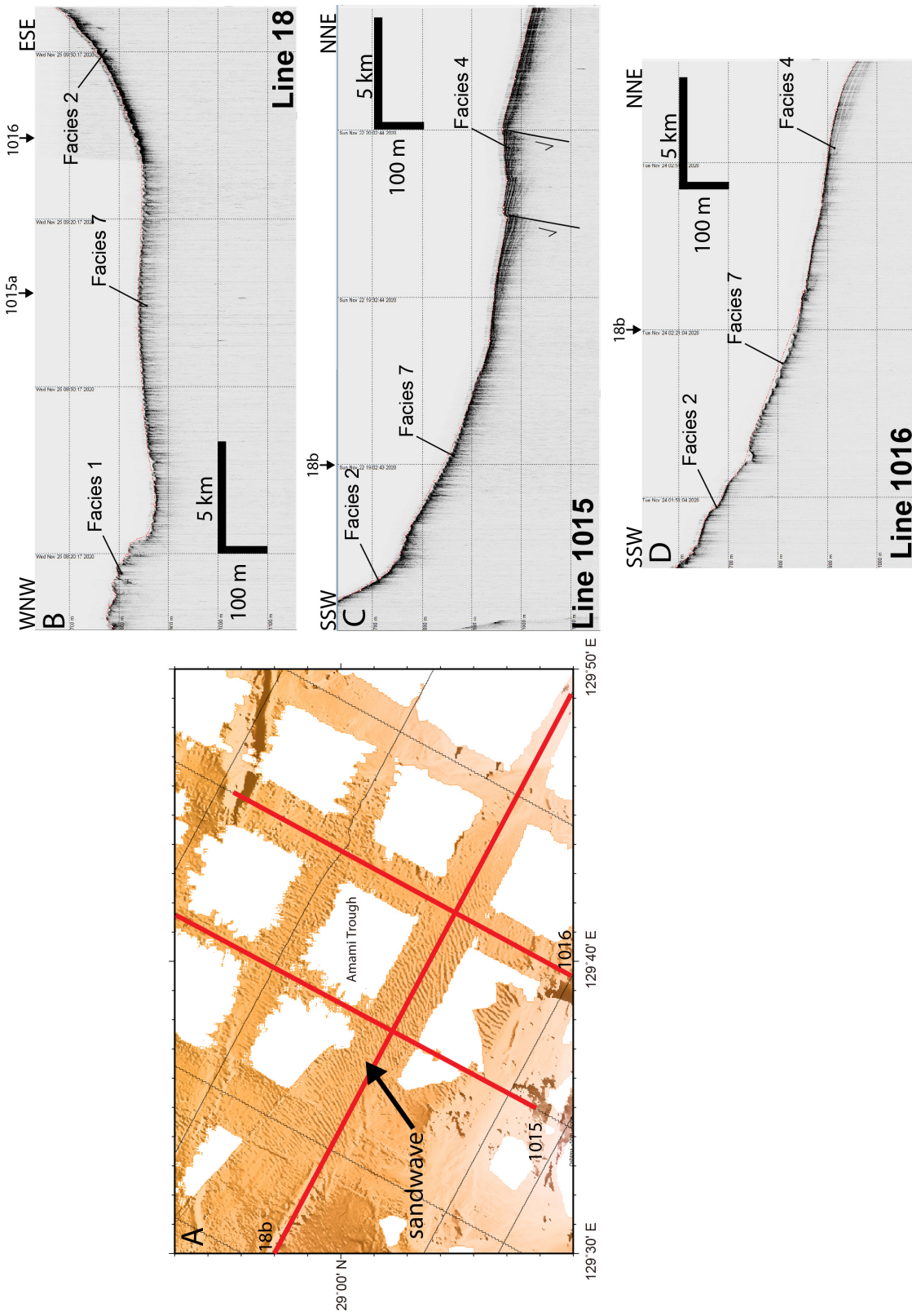
5. まとめ

GK20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・琉球弧のエリアを対象として高分解能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得した. 調査海域の西部の沖縄トラフ域では、よく成層した沖縄トラフのトラフ充填堆積層と堆積層内に発達する沖縄トラフのリフティングに伴う引張応力によって形成された正断層が認められた. 火山フロント域では島嶼や地形的高まり部分では海底面の反射が強く、内部構造は不明であった. 一方、平坦面部分では成層した堆積層の構造が認められ、部分的に下部からのマグマ貫入により形成されたと考えられる海底火山が点在する. なかでも、宝島南方には横貫雁行海丘群と仮称される6列からなる海丘群の存在を確認したが、山体の内部構造



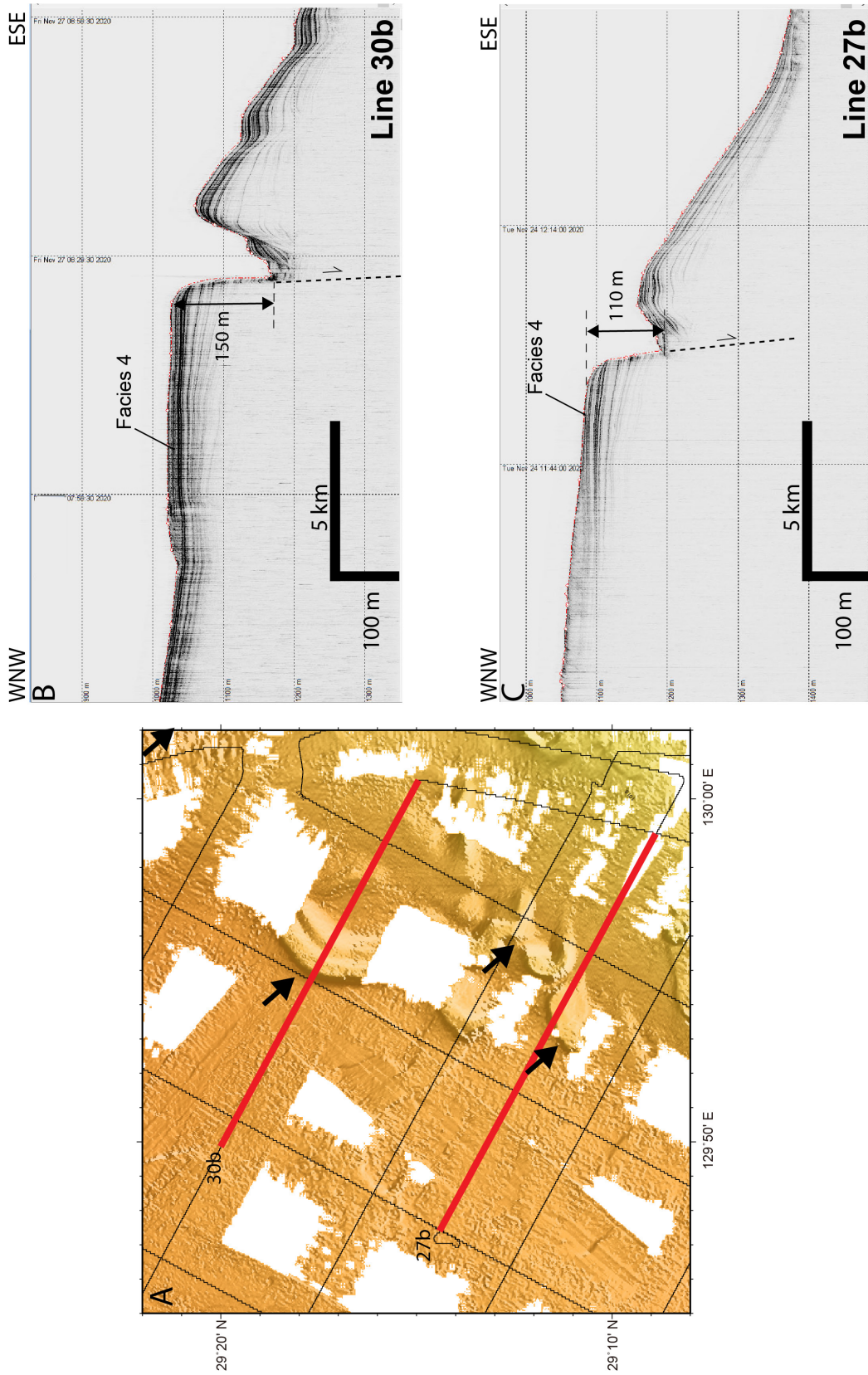
第8図 横当雁行海丘群周辺部のSBP探査断面。A: 該当エリアを拡大した海底地形図, B: 測線9のSBP断面図, C: 測線1005のSBP断面図, D: 測線1007のSBP断面図。探査測線の位置は、第2図Aと8Aに示す。

Fig. 8 SBP profiles around the Yokote Echelon Knoll Chains. A: Close up bathymetric map around the Yokote Echelon Knoll Chains. B: Close up profile of Line 9. C: Close up profile of Line 1005. D: Close up profile of Line 1007. The location of the SBP profile is shown in Figures 2A and 8A.



第9図 大島新曽根北縁部を通るSBP探査断面。A: 該当エリアを拡大した海底地形図, B: 測線18のSBP断面図, C: 測線1015のSBP断面図, D: 測線1016のSBP断面図。探査測線の位置は、第2図Aに示す。

Fig. 9 SBP profiles through the northern rim of the Oshima-Shin Sone. A: Close up bathymetric map around the northern rim of the Oshima-Shin Sone. B: Close up profile of Line 18. C: Close up profile of Line 1015. D: Close up profile of Line 1016. The location of the SBP profile is shown in Figure 2A.



第10図 奄美舟状海盆東縁部を通るSBP探査断面。A: 該当エリアを拡大した海底地形図, B: 測線30bのSBP断面図, C: 測線27bのSBP断面図。第10図A内の矢印は海底地形図上に認められた海底崖の箇所を示している。探査測線の位置は、第2図Aに示す。

Fig. 10 SBP profiles through the southern rim of the Amami Trough. A: Close up bathymetric map around the southern rim of the Amami Trough. Black arrows indicate the position of the fault scarp. B: Close up profile of Line 30b. C: Close up profile of Line 27b. The location of the SBP profile is shown in Figure 2A.

までは不明だった。琉球弧のうち、大島新曾根の北縁部での斜面部分に海底面の強い反射もしくは小さな双曲線状の反射パターンが認められ、海底地形で認められるサンドウェーブに起因するものと考えられる。奄美舟状海盆では、成層した堆積層と正断層によって区切られた比高差110 m～150 mの断層崖と凹地状の地形が存在することが明らかになった。

本調査範囲のうち、調査範囲南部では海底地形が十分に取得されているため、横当雁行海丘群の存在が明らかになっている。一方、調査範囲の東部は今後も調査が継続して実施されるため、より海底地形も明らかになり、前述した断層崖や凹地状の地形の規模などの詳細も明らかになるものと期待される。

謝辞：本調査を行うにあたり、海洋エンジニアリング株式会社の第二開洋丸の五十嵐 泰船長をはじめとする乗組員の皆様、高橋 実氏及び蛭原 周氏をはじめとする調査員の皆様には大変お世話になりました。また、本原稿のうち、海底地形図のグリッドデータには地質情報研究部門の高下裕章博士と佐藤太一博士に、GK20航海での取得データにGH11航海及びGB21-1航海の海底地形データを追加した統合グリッドデータを整備して頂き、使用しました。以上の方々に厚く御礼申し上げます。なお、本原稿の海底地形図の作成には、ハワイ大学提供のGMT (The Generic Mapping Tools) (Wessel and Smith, 1991)を使用した。

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., Ikegami, F., Tsuji, T. and Urabe, T. (2015) Hydrothermal activity in the Okinawa Trough back-arc basin: Geological background and hydrothermal mineralization, in *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*, edited by J. Ishibashi, *et al.*, pp. 337–359. doi:10.1007/978-4-431-54865-2_27
- 加藤幸弘・小川正泰・大島章一 (1989) 沖縄トラフ、吐噶喇火山列西方海域の層序. 水路部研究報告, **25**, 123–131.
- 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.
- 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.
- Lee, C. S., Shor Jr, G. G., Bibee, L. D., Lu, R. S. and Hilde, T. W. (1980) Okinawa Trough: origin of a back-arc basin. *Marine Geology*, **35**, 219–241.
- 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*, 106623.
- 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.
- 岡村行信・村上文敏・西村 昭 (1991) スミスリフトの第四紀後期の堆積過程と断層運動. 地学雑誌, **100**, 464–474.
- 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.
- 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.
- 横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, E. M.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康弘・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.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1991) Free software helps map and display data. *Eos Transactions of American Geophysical Union*, **72**(41), 441. doi:10.1029/90EO00319

(受 付 : 2022年2月7日 ; 受 理 : 2022年10月18日)

トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴

石塚 治¹・石野 沙季²・鈴木 克明²・横山 由香²・
三澤 文慶²・有元 純²・高下 裕章²・井上 卓彦²

ISHIZUKA Osamu, ISHINO Saki, SUZUKI Yoshiaki, YOKOYAMA Yuka, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun, KOGE Hiroaki and INOUE Takahiko (2022) Submarine rock samples recovered during GB21-1 cruise in the southern Tokara Islands area. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73 (5/6), p. 249–265, 6 figs, 3 tables and 5 plates.

Abstract: Dredge sampling to recover submarine rocks was conducted in the southern Tokara Islands area as part of an ongoing geological mapping campaign for the region. The sampling targets were submarine volcanoes found by bathymetric survey, and sedimentary rock units revealed by seismic reflection survey. Dredge sampling at 2 volcanic edifices mainly recovered rhyolitic pumice and lava, and basaltic spatter. Sampling along the major fault scarps recovered mudstone containing microfossils, which are useful for age determination of the rocks. Whole rock chemical compositions of basalts recovered from the edifice near the volcanic front of the Ryukyu Arc show similar alkali metal element concentrations to the basalts from the front. Rhyolites from the edifice in the Okinawa Trough show higher alkali metal element concentrations than those from the frontal arc volcanoes.

Keywords: Tokara Islands, Okinawa Trough, Submarine volcano, sedimentary rock, dredge sampling

要 旨

トカラ列島南部海域において、海域地質図作成に資する目的で、ドレッジによる海底岩石の採取を行った。火山体と考えられる海山及び海丘についてその噴出物を採取してその火山活動を理解することと、音波探査で認識された堆積物層の年代決定を主な目的として実施した。その結果、琉球弧火山フロント近傍及び沖縄トラフ内の2つの火山体で主に流紋岩及び玄武岩からなる噴出物が採取された。また断層崖と考えられる2地点で、露頭を構成する泥岩を採取した。火山岩類の全岩主成分分析を実施した結果、琉球弧の火山フロントに近い火山体で採取した玄武岩は、琉球弧火山フロントと同レベルかつ沖縄トラフ内の玄武岩よりやや少ないアルカリ金属元素濃度を示す一方、沖縄トラフ内の流紋岩溶岩は、火山フロント近傍の流紋岩類に比べてアルカリ金属元素濃度が高い特徴を持つことが明らかになった。

1. はじめに

トカラ列島南部海域において、海底地形調査で確認された海底の火山体や、音波探査の結果見いだされた堆

積物層の構成岩石とその形成時期を明らかにする目的で、合計5地点でドレッジによる岩石採取を試みた(第1図, 第2図, 第1表)。ドレッジ対象は、火山フロント西方の独立した海山、海丘(D01, 02)、東北東-西南西方向に配列する小海丘(D04)、前弧域の東西方向の断層崖(D03)、沖縄トラフ東縁部の東北東-西南西方向の断層崖(D05)とした。以下に採取試料の概略を述べる。

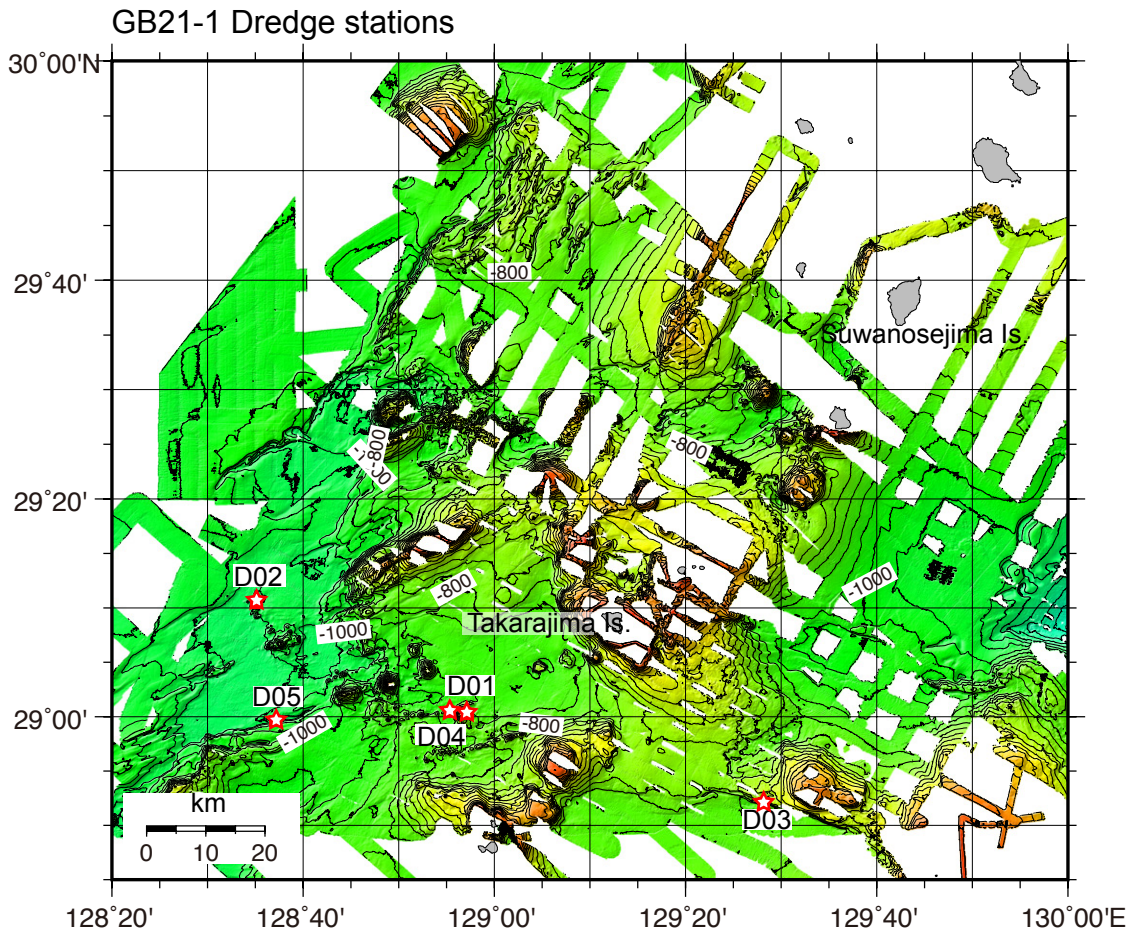
2. ドレッジ点の概略および採取試料

ドレッジによる岩石試料採取は、東海大学所有の望星丸により、GB21-1航海において実施された。岩石試料採取に用いたドレッジャーはさつき型ドレッジャー(D01のみ)及び内径約60 cmの円筒型チェーンバッグ式ドレッジャーである(第3図)。おもりとして200 kgの俵型のものを使用した。第1表にドレッジオペレーションのリスト、第2表に採取岩石試料リスト、第4図にドレッジ地点付近の音波探査プロファイル、図版1-4に代表的な海底写真、第5図にドレッジカメラの深度センサーデータを掲げた。

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

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 author: ISHIZUKA, O., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: o-ishizuka@aist.go.jp



第1図 トカラ列島におけるドレッジ地点位置図 (D01-05).

Fig. 1 Locality map of the dredge stations during the GB21-1 cruise in the Tokara Islands.

2.1 D01 (横当海丘)

D01では、横当島北方に位置する底径約3 km、比高約400 mの横当海丘を調査対象とした(第1図, 第2図)。山頂部は比較的平坦であるが、西側に開口した火口様地形を持つ。水深約800–600 mに急峻な斜面を持つ。

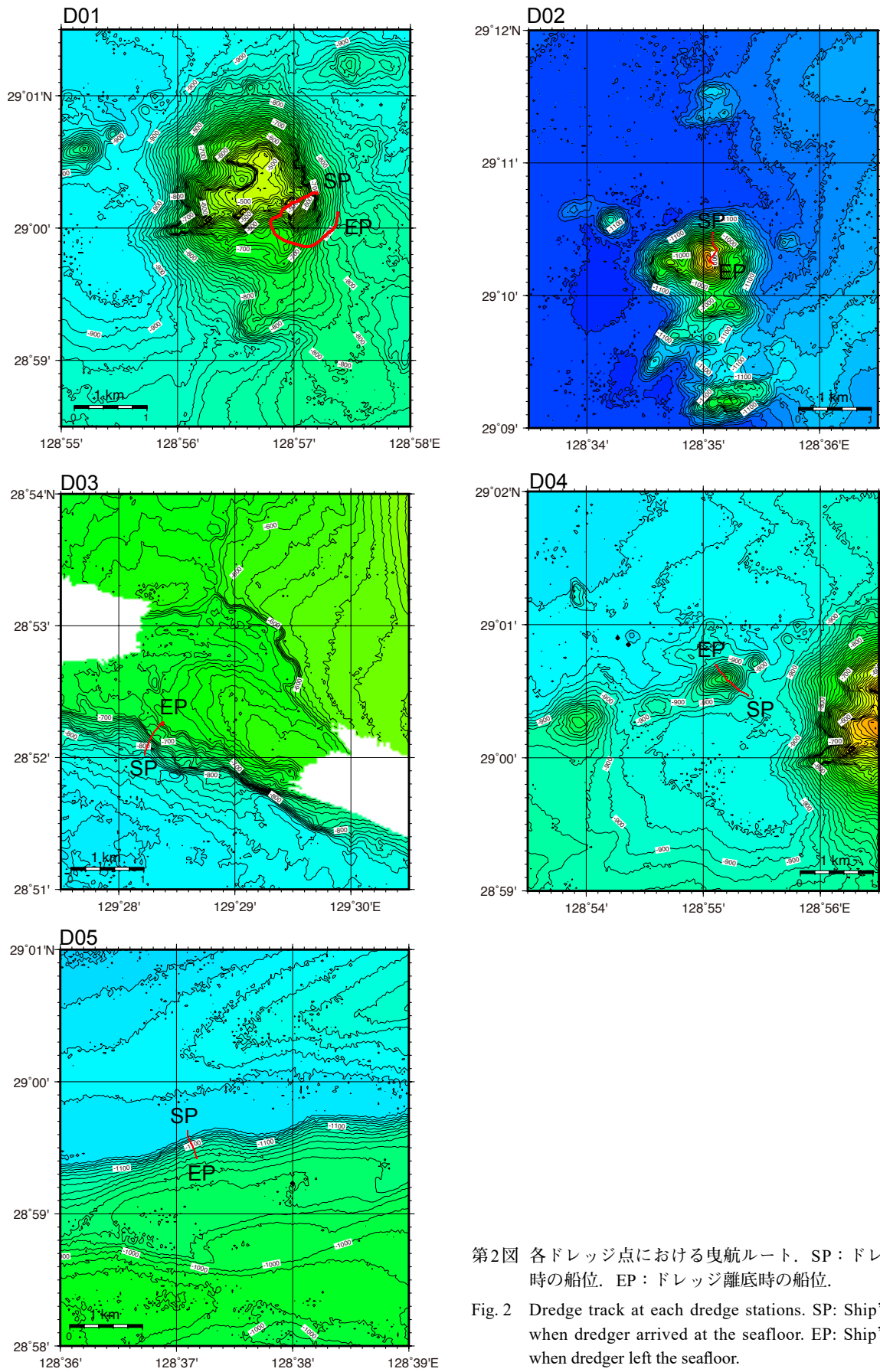
ドレッジは山体南東部の水深約700 mの地点から、南西方向に斜面を登りながら行った。強いあたり(最大4 ton)が複数回あったが、途中でドレッジャーが斜面に拘束され、船を大きく回してドレッジャーを海底から外す操作をせざるを得なかった。深度センサーのデータから水深約580 mに斜面でドレッジャーが拘束され、拘束が外れた際約100 m、斜面をドレッジャーが転落したことが明らかになった(第5図)。恐らくその際、ドレッジャーが大きなダメージを受け、前扉を失い、回収できた試料は軽石が一つのみであった。この軽石については、現地性の試料であるか判断できないため、今後の分析、解釈には使用しない。また海底撮影用照明の電池不具合により海底映像の取得に失敗した。

2.2 D02 (沖縄トラフ内の海丘)

D02で調査対象としたのは、宝島西方の沖縄トラフ内に位置する底径2 km弱、比高約300 mの海丘である(第1図, 第2図)。D02は山体の北側急斜面水深約1,030 mの地点から山頂部へ向けて南向きに曳航した(第2図)。曳航中1.4–2 ton程度の当たりが繰り返した。採取された試料は約25 kgで、ほぼ全て流紋岩であった。試料の最大径は35 cm、最大重量は8.2 kgであった。軽石質のよく発泡した主として直方輝石、斜長石を含む流紋岩(図版5a, b)であるが、少量斑晶鉍物は同様だが発泡度が低い溶岩片も回収された(GB21-1D02R17等)。海底映像には、薄く堆積物に被覆された流紋岩塊が分布している様子が捉えられていた(図版1)。採取試料の中でR11のみ直方輝石単斜輝石安山岩(図版5c, d)であったが、流紋岩溶岩との関係は不明である。

以上の結果から、この海丘は、流紋岩マグマの活動により形成された火山であると考えられる。

トカラ列島南部の海底岩石 (石塚ほか)



第2図 各ドレッジ点における曳航ルート. SP: ドレッジ着底時の船位. EP: ドレッジ離底時の船位.

Fig. 2 Dredge track at each dredge stations. SP: Ship's position when dredger arrived at the seafloor. EP: Ship's position when dredger left the seafloor.

第1表 ドレッジオペレーションに関するデータリスト.
Table 1 Summary of dredge operation during GB21-1 cruise.

Site	Date	Dredge in water		on bottom		wire		Lat. (°N)		Lon. (°E)		depth (m)		stop wire		off bottom		wire		Lat. (°N)		Lon. (°E)		depth (m)		on deck		Sample Description
		UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	UTC	min.	
D01	2021/3/10	7:03:39	29	0:24:70	128	57:16:58	573	7:17:12	16:17:12	711	29	0:25:69	128	57:20:05	619	7:25	8:23:08	773	29	0:10:93	128	57:37:36	700	8:45:15	Yokoate Knoll	a piece of pumice (may not be in-situ)		
D02	2021/3/17	0:15:04	29	10:50:90	128	35:09:73	959	9:34:38	10:37:29	10:47:69	128	35:08:61	935	10:50	1:08:34	893	29	10:24:25	128	35:09:28	846	1:25:17	knoll in the Okinawa Trough	large amount of pumiceous rhyolite lava blocks, dense rhyolite and andesite lava				
D03	2021/3/18	5:40:16	28	52:03:03	129	28:56:91	697	6:16:35	15:16:35	790	28	52:02:58	129	28:23:34	791	8:00	6:53:47	690	28	52:26:00	129	28:39:79	646	7:07:13	Amamioshima	large amount of fossiliferous sandy siltstone, mudstone, pumice		
D04	2021/3/19	3:06:37	29	0:64:58	128	55:28:16	798	3:35:53	12:35:53	908	29	0:46:26	128	55:38:46	897	9:20	4:11:16	820	29	0:69:10	128	55:10:13	819	4:30:25	ENE-WSW trending knoll NNW of Yokoatejima	ol-cpx basalt spatter, rhyolite pumice blocks		
D05	2021/3/19	23:59:01	28	59:66:27	128	37:10:86	1139	0:19:03	9:19:03	1150	28	59:63:27	128	37:09:86	1131	11:62	0:42:29	1080	28	59:42:72	128	37:17:66	1041	1:02:03	fault scarp in the eastern margin of the Okinawa Trough	sandy siltstone		

Lat. : latitude; Lon. Longitude; min. : minute

2.3 D03 (横当島東方の海底崖)

D03で調査対象としたのは、横当島東方に位置する比高120 m程度の南落ちの海底崖である(第1図, 第2図)。

ドレッジャーは海底崖南側の水深約790 mの地点に着底し、崖を登るように北北東に向け曳航した(第2図)。途中最大3 tonのあたりが何度かあった。崖の最上部まで曳航したのちドレッジを終了した。ドレッジャーほぼ満杯(コンテナ10箱)の試料が採取され、試料の最大径は30 cm, 最大重量は8 kgであった。採取試料は、有孔虫を含む半固結のシルト-砂質シルト岩であった。一部には生痕や翼足類の化石、凝灰質な部分が認められる。海底映像では、崖の下部では、主に平板状の堆積岩ブロックが堆積しており、崖の上部から崩落したものと推定されるが、上部では堆積岩露頭が確認できた(図版2)。試料にマンガン酸化物の被覆がほとんど認められないことから、現在も崩落が続いているものと考えられる。

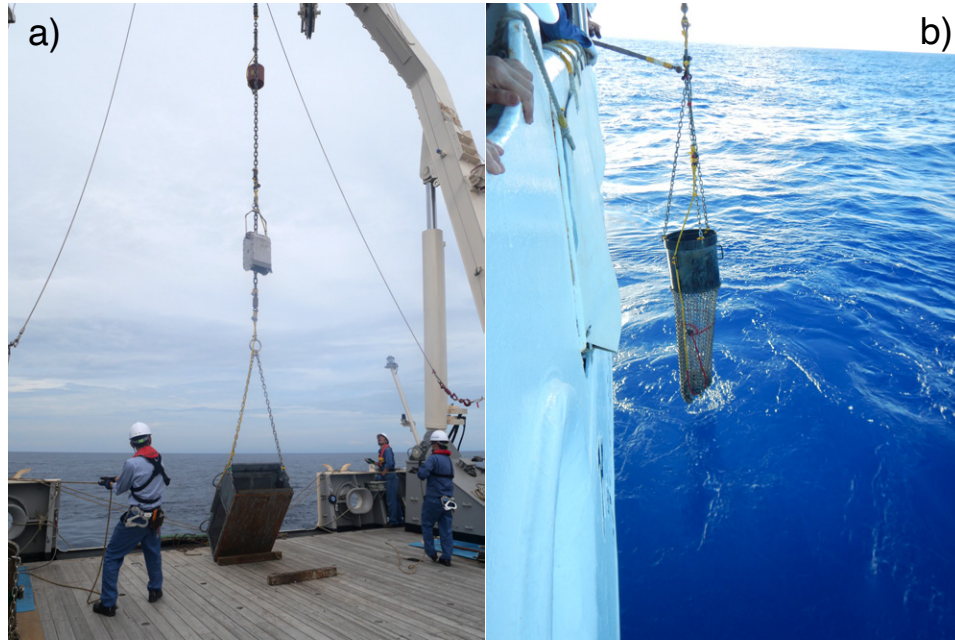
堆積岩以外には、ごく少量の軽石が少量採取されたが、現地性の試料ではないと考えられる。

2.4 D04 (横当島北西の小海丘列)

D04はD01でドレッジを行った海丘の西側に位置する小海丘で実施した(第1図, 第2図)。この海丘は、トカラ列島と沖縄トラフの間の地域でGB21-1航海により複数確認された東北東-西南西方向に配列する海丘列の一つに属する。D04地点を含む海丘列は約20 km程度追跡可能である。D04を実施した海丘は、長径約1 km, 短径約0.6 km, 比高約100 mで、北東-南西方向に伸びた形状を示す(第2図)。ドレッジャーは山頂南東側でかつ山体外側の平坦な海底面に着底後、山頂に向かい斜面を登るように北西方向に曳航された。曳航中最大2.1 tonのあたりがあったが、回数は少なかった。

採取岩石は、コンテナ7箱分の流紋岩質軽石および玄武岩質の火山弾、スバッターであった。海底映像では、大きな軽石ブロックが雑然と海底上に分布しているが、山体上部の斜面に玄武岩質火山弾が分布している様子が見られる(図版3)。軽石質の岩塊は流紋岩であり、最大径32 cm, 最大重量は7.5 kgで、斑晶として斜長石(3-4%), 直方輝石(1-3%)等を含む(図版5e, f)。一方玄武岩はかんらん石単斜輝石玄武岩で、発泡度が高いものがほとんどである。最大径は48 cm, 最大重量は15.5 kgで、マンガン酸化物の被覆はなく、極めて新鮮である。産状から流紋岩は異地性(漂着したもの)、玄武岩は現地性の火山噴出物である可能性が高いと考えられる。

D04の結果は、この海丘が玄武岩マグマの活動により形成されたことを強く示唆する。地形的特徴の類似性から、東北東-西南西方向に配列する火山列は玄武岩マグマの活動により形成された可能性が高いと考えられる。



第3図 岩石試料採取に使用したドレッジシステム。a) さつき型ドレッジ，b) 円筒型ドレッジ。

Fig. 3 Dredge system applied during the GB21-1 cruise. a) Satsuki-type dredger, b) Cylindrical-type dredger.

2.5 D05 (沖縄トラフ東縁部の海底崖)

D05は、横当島北西方の沖縄トラフ東縁部の北落ちの海底崖で実施した(第1図, 第2図)。海底崖の比高は130 m程度だが、傾斜が比較的急な部分は比高60 m程度である。ドレッジは海底崖北側の水深約1,130 mに着底、南向きに崖を登るように曳航した。曳航中ほとんどワイヤー張力の上昇は見られなかった。

採取された試料は、総量0.2 kg程度の半固結の砂質シルト岩であった。海底映像からは、海底は固結していない堆積物に覆われており、露頭は認められなかった(図版4)。

3. 化学組成

分析にたえる新鮮な火山岩が十分な量がえられたドレッジ点(D02及びD04)について、典型的な岩石の全岩化学分析を行った。

3.1 測定方法

採取された試料の新鮮な部分を岩石カッターにより切り出したのち、コンタミネーションを避けるために切断時の刃による擦痕をダイヤモンドパッドにより除去した。超音波洗浄の後、約70℃の脱イオン水で約4-5日間脱塩処理を行った。その後安井器械株式会社製マルチビーズジョッカーにより、アルミナロッドとポリカーボネート製容器を用いて粉末化した。

主要元素組成分析は、粉末試料：リシウムフラックス = 1:10の混合比で作成されたガラスビードを用いて行っ

た。分析は産業技術総合研究所地質調査総合センター共同利用実験室(GSJ-Lab.)設置の波長分散蛍光X線分析装置Panalytical社Axiosにより行った。分析誤差(2s.d.)はNa以外の元素で2%以下、Naでは最大7%程度である(e.g., Ishizuka *et al.*, 2020参照)。

3.2 測定結果

測定結果を第3表及び第6図に示す。第6図には、これまで沖縄トラフ及びトカラ列島地域(琉球弧)から報告されているデータを合わせて示している(GEOROC, <https://georoc.eu/georoc/new-start.asp> 閲覧日: 2022年12月21日)。今回採取された火山岩類は、D02では1試料を除き流紋岩、D04では玄武岩と流紋岩であった。主成分組成で見ると、D04の玄武岩は、琉球弧火山フロントと同レベルかつ沖縄トラフ内の玄武岩よりやや少ないアルカリ金属元素濃度を示す(第6図)。より詳しくみると、同じSiO₂量で硫黄鳥島よりは高いが横当島と同等である。

一方沖縄トラフ内の火山体由来のD02の流紋岩溶岩は、火山フロント近傍の流紋岩類に比べてアルカリ金属元素濃度が高い。この関係は公表されている沖縄トラフと火山フロントの流紋岩の組成の関係と同様である。

今後火山岩類の年代や同位体組成と微量成分組成の間関係も合わせて検討し、これらの火山岩類が、琉球弧の活動に関連するのか、あるいは沖縄トラフのリフティングに関連するのか、明らかにしていきたい。

謝辞：上河内信義船長をはじめとする望星丸の乗組員の

第2表 ドレッジ採取試料リスト。
Table 2 List of dredged samples and their descriptions.

2021/3/10 29°00.2569' N 128°57.2005' E depth: 619 m												
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight (kg)	colour	alteration	Mn coating	phenocryst	vesiculation	Memo
D01-R01	pumiceous opx rhyolite	angular	4	2.5	2	0.06	white	fresh	0	pl:2%, opx:2-3%	strongly 30-40%	
2021/3/17 29°10.4769' N 128°35.0867' E depth: 940 m												
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight (kg)	colour	alteration	Mn coating	phenocryst	vesiculation	Memo
D02-R01	pumiceous opx rhyolite lava	angular	35	23	20	8.2	dark gray and white	fresh	0	pl:3-4%, opx 1%	strongly 30-40%	
D02-R02	pumiceous hb-opx rhyolite lava	angular	22	20	15	4	light and dark gray	fresh	0	pl:3-4%, opx 1%, hb<1%	strongly 30-40%	
D02-R03	pumiceous opx rhyolite	angular	19	19	14	2	yellowish white	weakly altered	0	pl:3-4%, opx:1-2%	strongly 40-50%	
D02-R04	pumiceous opx rhyolite lava	angular	16	14	9	1.5	light to dark gray	weakly altered	0	pl:3-4%, opx:1	strongly 30-40%	
D02-R05	pumiceous opx rhyolite lava	angular	13	10	7	1	white to dark gray	fresh	0	pl:2-3%, opx<1%	strongly 30-40%	
D02-R06	pumiceous opx rhyolite lava	angular	17	11	8	1	white to dark gray	fresh	0	pl:3-4%, opx 1%	strongly 20-30%	
D02-R07	pumiceous opx rhyolite lava	angular	10	8	6	0.5	light to dark gray	fresh	0	pl:2-3%, opx<1%	strongly 20-30%	
D02-R08	pumiceous opx rhyolite lava	angular	10	8	5	0.5	white to gray	fresh	0	pl:1-2%, opx<1%	strongly 20-30%	
D02-R09	pumiceous opx rhyolite lava	angular	16	6	6	0.8	white to gray	fresh	0	pl:2-3%, opx<1%	strongly 30-40%	
D02-R10	pumiceous opx rhyolite lava	subangular	9	9	6	0.5	light gray	weakly altered	0	pl:2-3%, opx<1%	strongly 30-40%	
D02-R11	opx-opx andesite with rhyolite lava groundmass attached	subangular	9	6	4	0.5	dark gray	fresh	0	pl:5-7%, opx: 1%, opx<1%	strongly 15-20%	It seems to be a xenolith in the rhyolite lava
D02-R12	pumiceous opx rhyolite	subangular	7	7	5	0.2	white to gray	fresh	0	pl:2-3%, opx 1%	strongly 20-30%	
D02-R13	pumiceous opx rhyolite lava	subrounded	10	7	7	0.7	dark gray	moderately altered	0	pl:6-8%, opx:1-2%	strongly 25-30%	
D02-R14	pumiceous opx rhyolite lava	subangular	9	6	5	0.5	white to dark gray	fresh	0	pl:2-3%, opx<1%	strongly 30-40%	
D02-R15	pumiceous opx rhyolite lava	angular	12	6	6	0.3	white to dark gray	weakly altered	0	pl:3-4%, opx<1%	strongly 30-40%	
D02-R16	opx-pl-phyrlic rhyolite lava	subangular	11	9	7	0.9	gray	weakly altered	film	pl:8-9%, opx:2-3%, hb<1%	strongly 30-40%	dark gray xenolith, may be dacite(size:2 cm, pl:3-5%, vesiculation: 5% poorly)
D02-R17	opx-pl-phyrlic rhyolite lava	subrounded	12	6.5	5	0.5	dark gray	fresh	film	pl:6-8%, opx:2-3%	poorly <5%	
D02-R18	hb-bearing opx rhyolite breccia	subangular	10	6	3.5	0.5	gray	weakly altered	film	pl:6-8%, opx:1-2%, hb<1%	moderately 10-15%	clast support
D02-R19	opx-pl-phyrlic rhyolite	subangular	6	5.5	4	0.3	gray	fresh	film	pl:6-8%, opx:1-2%	poorly 10-15%	
D02-R20	opx rhyolite lava	subrounded	8	6	3	0.2	gray	fresh	0	pl:4-6%, opx:2-3%	moderately 20-25%	clast support
D02-R21	opx-pl-phyrlic rhyolite	subrounded	6	3	3	0.1	gray	fresh	0	pl:6-8%, opx:1-2%	moderately 10-15%	clast support
D02-R22	pumiceous opx rhyolite lava	subrounded	6	3.5	3.5	0.1	light gray	fresh	0	pl:3-4%, opx:1-2%	strongly 30-40%	clast support
D02-R23	pumiceous opx rhyolite	subangular	6.5	5	3	0.1	dark gray	moderately altered	film	pl:3-4%, opx 1%	strongly 30-40%	clast support
D02-R24	hb-bearing opx rhyolite lava	subrounded	6.5	4	4	0.1	dark gray	moderately altered	film	pl:4-6%, opx:1-2%, hb<1%	strongly 30-40%	clast support
D02-R25	pumiceous opx rhyolite	subangular	6	4	3	<0.1	light to dark gray	fresh	0	pl:3-4%, opx 1%	strongly 30-40%	clast support
D02-R26	lapilli stone	subangular	4	3	2	<0.1	dark gray	weakly altered	film		moderately 15-20%	clast (max 1.5cm, dark gray, pl:5-7%, opx:3-4%, dacite clast, matrix: volcanic sand)
D02-R27	rhyolite pumice	subangular	4	1.5	1.5	<0.1	light gray	moderately altered	film		strongly 40-50%	
Others												

トカラ列島南部の海底岩石 (石塚ほか)

2021/03/18 28°52.2600'N 129°28.3879'E depth: 646 m												
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight (kg)	colour	alteration	Mn coating	phenocryst	vesiculation	Memo
D03-R01	semi-consolidated siltstone	-	30	22	17	8	dark gray/ish yellow		0			Forams, fossil fragments (5-10 mm), brachiopods shell beds
D03-R02	semi-consolidated siltstone	-	24	17	15	5	dark gray/ish yellow		0			Forams, fossil fragments (5-10 mm), brachiopods shell beds
D03-R03	mudstone	-	26	18	14	7	dark gray/ish yellow,		0			Burrows (10 mm, modern), Mn coating (brownish black rock)
D03-R04	mudstone	-	26	16	8	2.5	2.5Y5/2		0			Forams, fossil fragments (5-10 mm)
D03-R05	mudstone	-	21	16	8	2.5	dark gray/ish yellow		0			Forams, fossil fragments (5-10 mm)
D03-R06	pumice	angular	16	13	9	0.6	yellowish brown		0			Forams
others	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021/03/19 29°00.4641'N 128°55.3833'E depth: 885 m												
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight (kg)	colour	alteration	Mn coating	phenocryst	vesiculation	Memo
D04-R01	ol-cpx basalt	angular	48	25	19	15.5	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:4-6%, cpx:2-4%	moderately 10-15% strongly 25-35%	
D04-R02	ol-cpx basalt	angular	25	21	7	3.5	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:4-6%, cpx:2-3%	strongly 25-35%	
D04-R03	ol-cpx basalt	angular	12	9	6	0.5	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:5-7%, cpx:3-4%	strongly 25-35%	
D04-R04	ol-cpx basalt	angular	11	9	5	1	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:4-6%, cpx:3-4%	strongly 25-35%	
D04-R05	ol-cpx basalt	subangular	11	6	6	0.5	black	fresh	0	ol:1-2%, pl:4-6%, cpx:2-5%	strongly 20-30%	
D04-R06	ol-cpx basalt	angular	9	8	4	0.5	black	fresh	0	ol:1-2%, pl:1-2%, cpx:3-4%	strongly 30-40%	
D04-R07	ol-cpx basalt	angular	9	6	4	0.3	black	fresh	0	ol:1-2%, pl:1-2%, cpx:3-4%	strongly 30-40%	
D04-R08	ol-cpx basalt	angular	11	9	4	0.5	black	fresh	0	ol:1-2%, pl:4-6%, cpx:2-3%	strongly 30-40%	
D04-R09	ol-cpx basalt	angular	12	8	7	0.5	black	fresh	0	ol:3-4%, pl:5-7%, cpx:3-4%	strongly 30-40%	
D04-R10	ol-cpx basalt	angular	10	6	5	0.3	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:4-5%, cpx:3-4%	strongly 30-40%	glassy margin
D04-R11	ol-cpx basalt	angular	11	7	6	0.5	black	fresh	0	ol:2-4%, pl:4-6%, cpx:2-4%	moderately 20-30%	glassy margin
D04-R12	cpx-ol basalt	angular	10	6	5	0.3	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:3-5%, cpx:1-2%	strongly 30-40%	
D04-R13	ol-cpx basalt	angular	9	6	6	0.3	black	fresh	0	ol:2-3%, pl:4-6%, cpx:3-5%	strongly 30-40%	glassy margin
D04-R14	ol-cpx basalt	angular	8	7	4	0.3	black	fresh	0	ol:1-2%, pl:4-6%, cpx:3-5%	strongly 25-35%	glassy margin
D04-R15	pumiceous opx rhyolite	subangular	32	27	17	7.5	light gray	fresh	0	pl:3-4%, opx:2-3%	strongly 40-50%	glassy margin
D04-R16	banded pumiceous opx rhyolite	subangular	19	18	11	2.5	white to dark gray	fresh	0	pl:2-3%, opx:2-3%	strongly 40-50%	banded
D04-R17	pumiceous opx rhyolite	subangular	29	16	13	3	light gray	fresh	0	pl:3-4%, opx:2-3%	strongly 40-50%	
D04-R18	hb-bearing opx rhyolite	subangular	17	15	14	2	light gray	fresh	0	pl:3-4%, hb <1%, opx:2-3%	strongly 40-50%	
D04-R19	pumiceous opx rhyolite	subrounded	18	10	10	1.5	white	fresh	0	pl:3-4%, opx:2-3%	strongly 40-50%	
D04-R20	pumiceous opx rhyolite	subangular	29	17	16	3.2	light gray	fresh	0	pl:3-4%, opx:2-3%	strongly 40-50%	
D04-R21	pumiceous opx rhyolite	subangular	20	16	13	2.2	white	fresh	0	pl:3-4%, opx:2-3%	strongly 40-50%	
D04-R22	pumiceous opx rhyolite	subrounded	22	15	12	2.2	white	fresh	0	pl:2-3%, opx:1-2%	strongly 40-50%	
D04-R23	banded pumiceous opx rhyolite	subangular	12	12	12	1	white to dark gray	fresh	0	pl:2-3%, opx:1-2%	strongly 40-50%	
D04-R24	pumiceous opx rhyolite	subangular	11	10	8	0.2	light gray	fresh	0	pl:3-4%, opx:1-2%	strongly 40-50%	
others	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

方々、またGB21-1航海乗船の研究者及び学生の方々には大変お世話になりました。ここに御礼申し上げます。

文献

Ishizuka, O., Taylor, R.N., Umino, S. and Kanayama K. (2020) Geochemical evolution of arc and slab following subduction initiation: a record from the Bonin Islands, Japan. *Journal of Petrology*, **61**, ega050. doi:10.1093/ptrology/egaa050

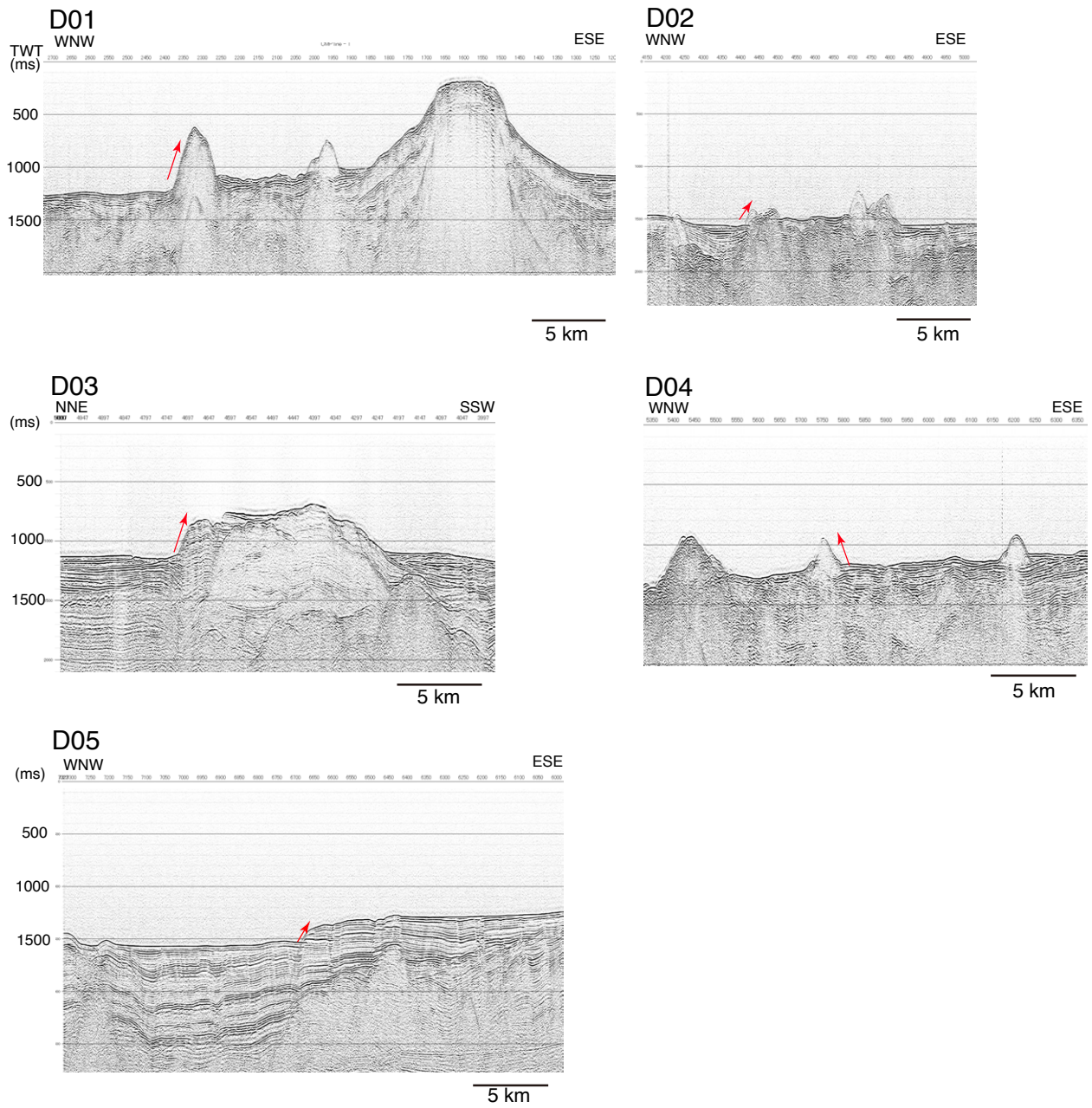
(受付：2021年12月22日；受理：2022年12月12日)

第2表 続き。
Table 2 Continued.

GB21-1 D05	2021/3/20	28°59.6327'N	128°37.0986'E	depth: 1131 m	size			weight	colour	alteration	Min coating	phenocryst	vesiculation	Memo
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	size Z (cm)	(kg)							
D05-R01	semi-consolidated sandy siltstone		9	5	4	0.2		2.5Y5/2 dark grayish yellow	fresh	0			Forams, fossil fragments 2-10 mm)	
D05-R02	semi-consolidated sandy siltstone		7	6	5	0.1		2.5Y5/2 dark grayish yellow	fresh	0			Forams, fossil fragments 2-10 mm)	
D05-R03	semi-consolidated sandy siltstone		6	5	3	0.1		2.5Y5/2 dark grayish yellow	fresh	0			Forams, fossil fragments 2-10 mm)	
D05-R04	semi-consolidated sandy siltstone		6	4	3	0.08		2.5Y5/2 dark grayish yellow	fresh	0			Forams, fossil fragments 2-10 mm)	
D05-R05	semi-consolidated sandy siltstone		6	5	3	0.06		2.5Y5/2 dark grayish yellow	fresh	0			Forams, fossil fragments 2-10 mm)	
Others	semi-consolidated sandy siltstone					0.2		2.5Y4/3 olive brown	fresh	0			sediments stuck to camera	

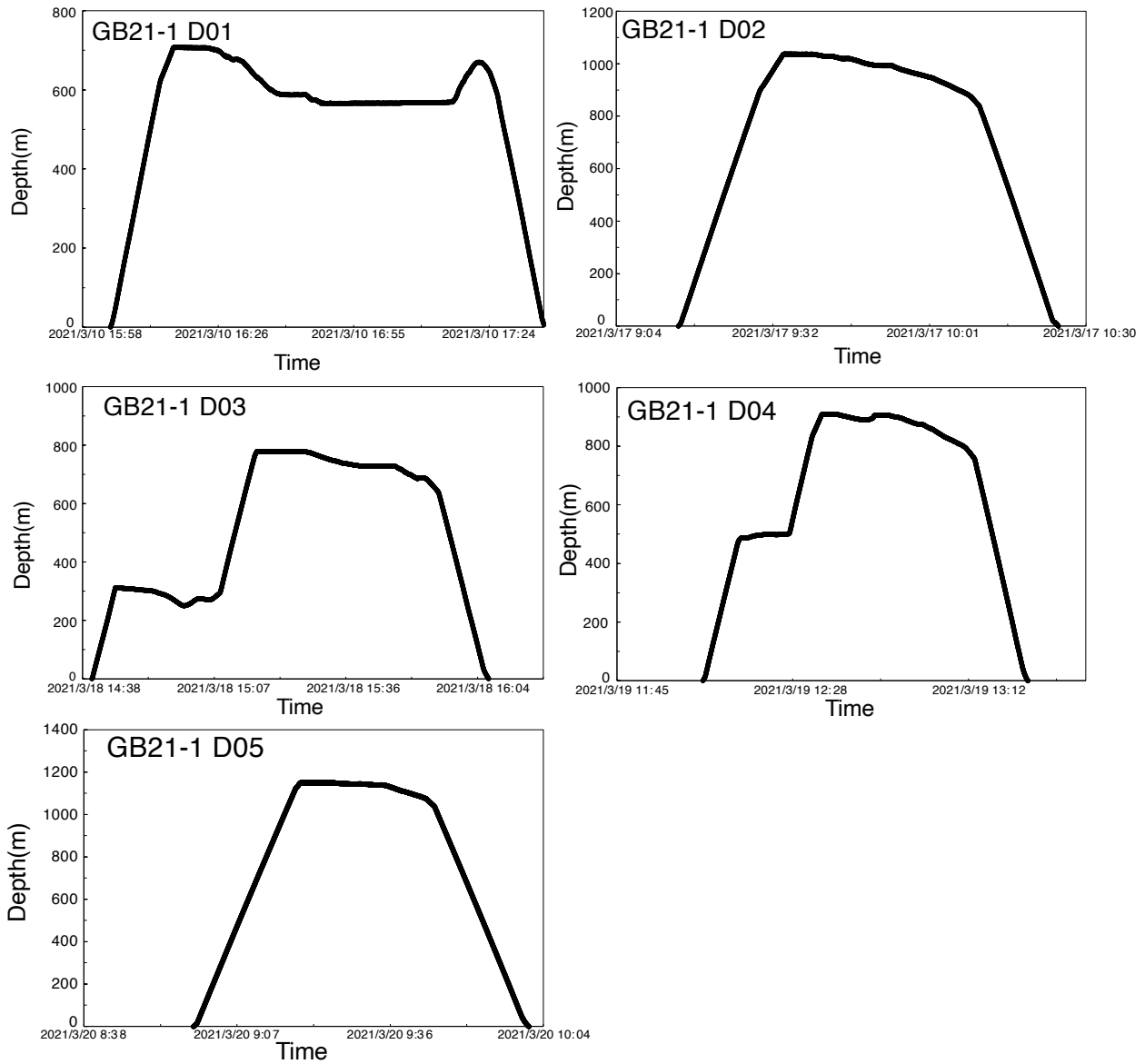
ol: olivine, opx: orthopyroxene, cpx: clinopyroxene, pl: plagioclase, hb: hornblende.

トカラ列島南部の海底岩石（石塚ほか）



第4図 ドレッジ地点の音波探査プロファイル。ドレッジコースを矢印で示してある（音探測線上でドレッジを実施しておらず、投影している場合を除く）。TWT：往復走時。

Fig. 4 Seismic reflection profile along the dredge track. Since the dredge track of D04 is not on the seismic survey line, the track is projected on the closest seismic survey line. TWT: two-way travel time



第5図 各ドレッジ点における深度センサーデータ (ドレッジカメラ深度)

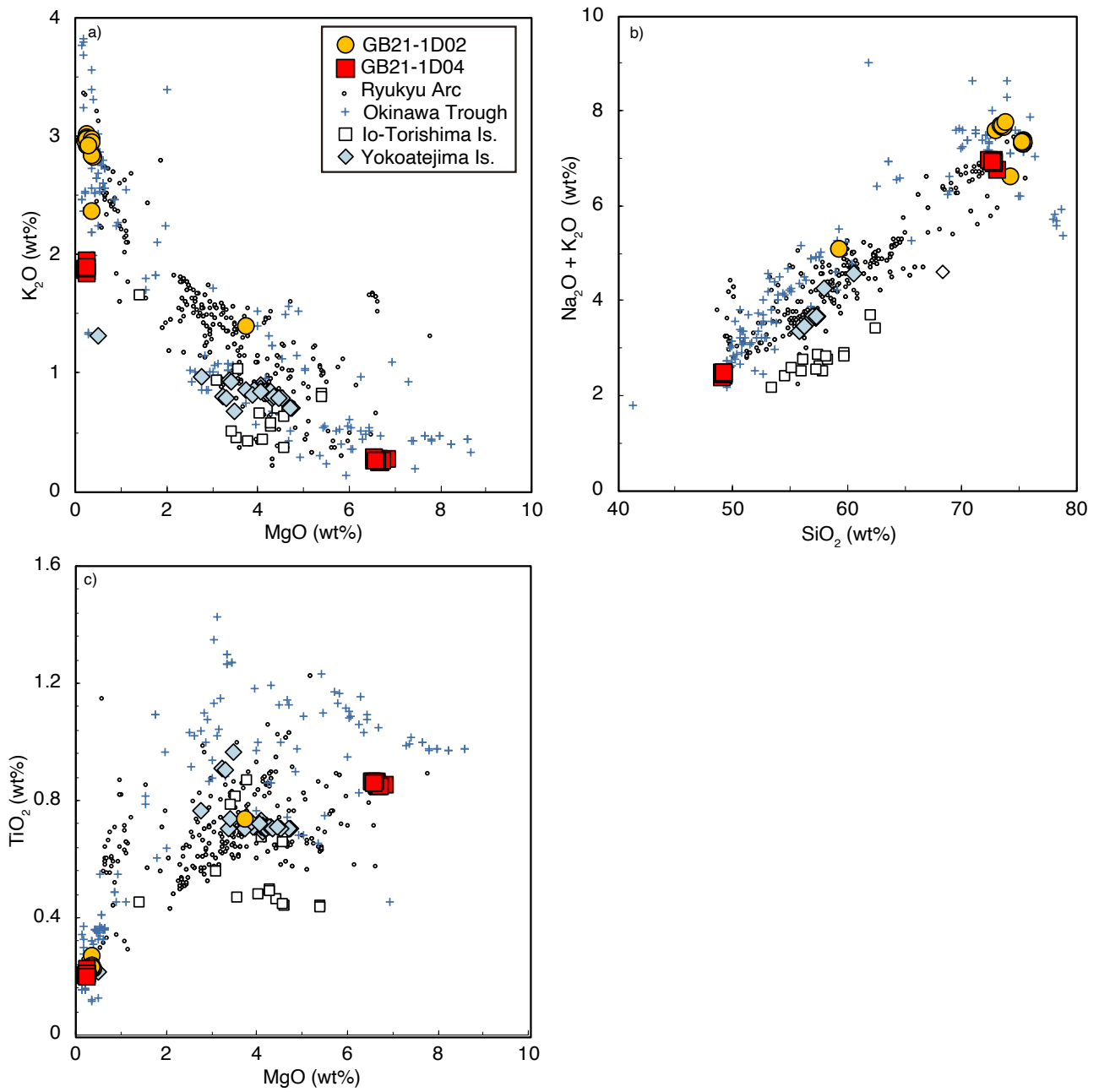
Fig. 5 Depth sensor profile for each dredge operation.

トカラ列島南部の海底岩石 (石塚ほか)

第3表 岩石試料の全岩化学組成.

Table 3 Whole rock composition of dredged volcanic rocks.

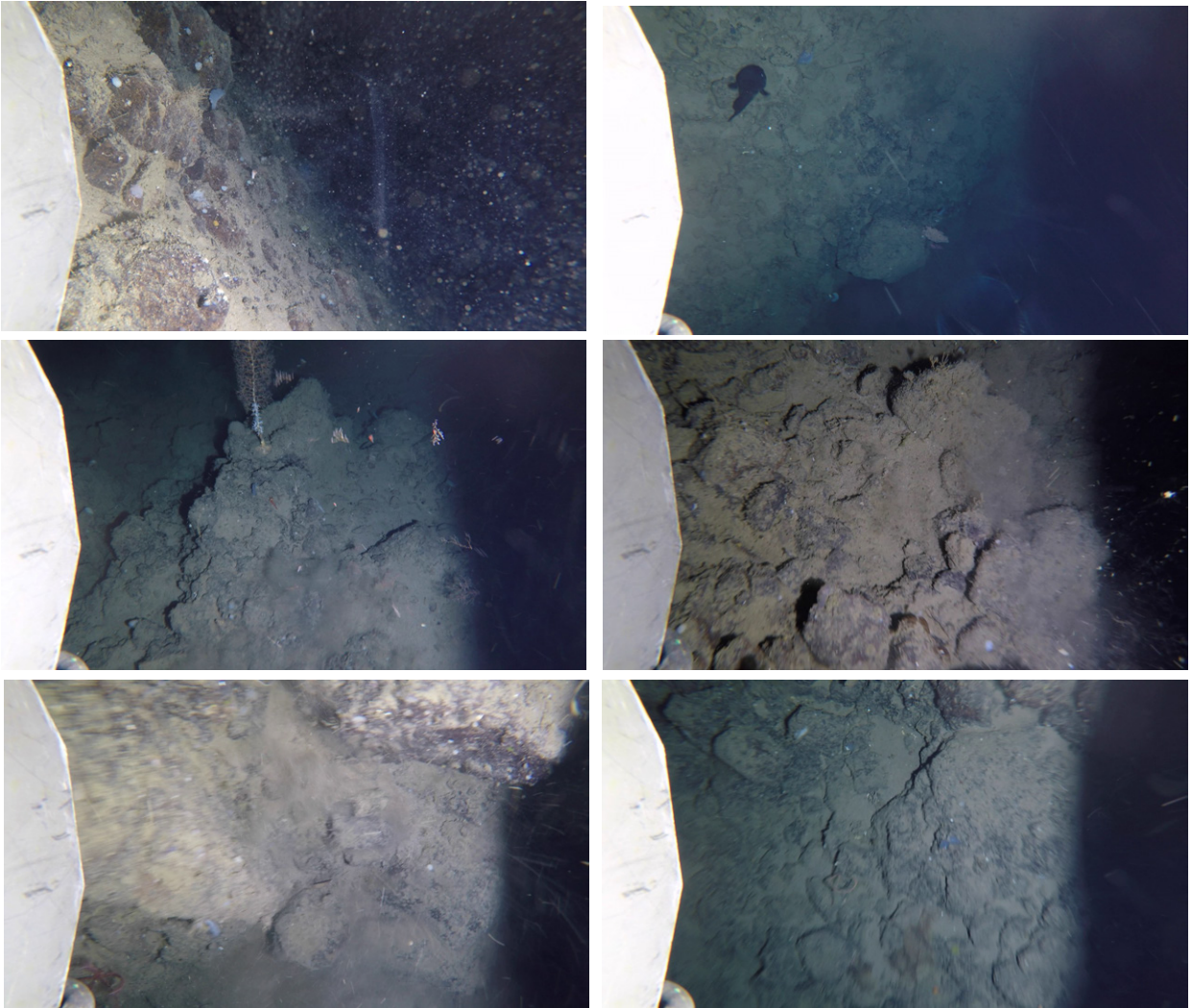
Sample No.	latitude (°N)	longitude (°E)	Major element (wt.%)										Total	L.O.I
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅		
D02R01	29.175	128.585	76.19	0.21	13.48	1.75	0.06	0.27	1.55	4.42	2.98	0.03	100.93	2.70
D02R02	29.175	128.585	75.98	0.21	13.42	1.76	0.15	0.28	1.53	4.37	2.99	0.03	100.70	2.69
D02R03	29.175	128.585	75.66	0.27	13.78	2.50	0.06	0.39	2.23	4.28	2.40	0.05	101.61	2.85
D02R04	29.175	128.585	75.75	0.20	13.41	1.73	0.16	0.29	1.53	4.31	3.01	0.03	100.42	2.79
D02R05	29.175	128.585	76.49	0.21	13.51	1.78	0.06	0.28	1.52	4.39	2.97	0.03	101.25	2.81
D02R06	29.175	128.585	76.09	0.20	13.41	1.78	0.06	0.28	1.52	4.38	3.03	0.03	100.78	2.73
D02R07	29.175	128.585	75.99	0.20	13.40	1.74	0.05	0.27	1.54	4.41	2.92	0.03	100.56	2.59
D02R08	29.175	128.585	76.25	0.20	13.49	1.77	0.05	0.27	1.53	4.36	2.98	0.03	100.93	2.95
D02R09	29.175	128.585	75.62	0.21	13.48	1.80	0.07	0.27	1.54	4.35	2.98	0.03	100.34	2.85
D02R11	29.175	128.585	60.10	0.74	16.20	7.28	0.14	3.82	7.60	3.70	1.40	0.12	101.11	0.97
D02R12	29.175	128.585	76.04	0.21	13.45	1.74	0.06	0.25	1.52	4.38	2.98	0.04	100.65	2.98
D02R13	29.175	128.585	73.69	0.23	13.99	2.76	0.30	0.44	1.73	4.79	2.83	0.05	100.81	3.33
D02R14	29.175	128.585	76.27	0.20	13.44	1.76	0.06	0.27	1.52	4.39	2.99	0.03	100.93	2.75
D02R15	29.175	128.585	75.66	0.20	13.41	1.78	0.07	0.29	1.53	4.37	2.97	0.03	100.29	2.92
D02R16	29.175	128.585	74.30	0.24	13.97	2.48	0.13	0.41	1.64	4.69	2.99	0.04	100.88	3.57
D02R17	29.175	128.585	74.53	0.23	13.92	2.44	0.08	0.38	1.63	4.84	2.86	0.04	100.93	2.51
D02R19	29.175	128.585	74.20	0.24	14.00	2.52	0.08	0.39	1.67	4.87	2.85	0.04	100.86	2.77
D02R20	29.175	128.585	74.07	0.23	13.86	2.47	0.08	0.40	1.66	4.75	2.95	0.04	100.50	3.05
D02R21	29.175	128.585	74.73	0.21	14.00	2.27	0.08	0.31	1.60	4.86	2.93	0.03	101.02	2.93
D04R02	29.008	128.923	49.75	0.87	17.61	10.93	0.20	6.63	12.21	2.20	0.25	0.09	100.73	-0.18
D04R04	29.008	128.923	49.88	0.87	17.54	11.04	0.20	6.76	12.18	2.20	0.25	0.09	101.00	-0.05
D04R05	29.008	128.923	49.80	0.85	17.75	10.95	0.19	6.80	12.27	2.16	0.24	0.08	101.09	-0.16
D04R06	29.008	128.923	49.69	0.87	17.68	10.92	0.21	6.63	12.13	2.15	0.27	0.09	100.63	0.04
D04R07	29.008	128.923	49.89	0.86	17.66	10.95	0.20	6.76	12.22	2.16	0.26	0.09	101.05	-0.04
D04R08	29.008	128.923	49.82	0.87	17.62	11.02	0.19	6.75	12.17	2.19	0.25	0.08	100.96	-0.12
D04R09	29.008	128.923	49.73	0.86	17.68	10.92	0.20	6.73	12.22	2.20	0.24	0.08	100.87	-0.11
D04R10	29.008	128.923	49.63	0.86	17.51	11.03	0.21	6.93	12.10	2.13	0.26	0.08	100.72	0.32
D04R11	29.008	128.923	49.81	0.86	17.67	11.01	0.19	6.82	12.17	2.20	0.25	0.09	101.07	-0.18
D04R12	29.008	128.923	49.84	0.87	17.72	11.03	0.21	6.64	12.06	2.16	0.27	0.09	100.88	0.12
D04R13	29.008	128.923	49.40	0.87	17.46	11.01	0.20	6.67	12.28	2.21	0.25	0.09	100.42	-0.18
D04R14	29.008	128.923	49.81	0.87	17.71	10.96	0.20	6.67	12.18	2.21	0.25	0.08	100.94	-0.12
D04R15	29.008	128.923	74.89	0.23	14.50	3.27	0.13	0.28	2.03	4.99	1.88	0.06	102.26	1.90
D04R16	29.008	128.923	73.41	0.20	14.49	3.13	0.11	0.26	2.14	5.06	1.87	0.05	100.73	1.62
D04R17	29.008	128.923	73.13	0.21	14.29	3.11	0.11	0.28	2.10	5.01	1.94	0.05	100.24	1.51
D04R18	29.008	128.923	72.98	0.21	14.30	3.16	0.12	0.28	2.12	5.05	1.87	0.06	100.14	1.61
D04R19	29.008	128.923	72.97	0.21	14.50	3.16	0.11	0.28	2.20	5.07	1.85	0.05	100.40	1.84
D04R20	29.008	128.923	72.46	0.20	14.49	3.16	0.11	0.29	2.21	5.10	1.83	0.06	99.90	1.77
D04R21	29.008	128.923	73.34	0.20	14.35	3.07	0.11	0.26	2.09	5.06	1.88	0.06	100.42	1.55
D04R22	29.008	128.923	73.50	0.21	14.43	3.11	0.11	0.27	2.11	5.05	1.90	0.06	100.74	1.66
D04R23	29.008	128.923	73.31	0.21	14.40	3.12	0.13	0.29	2.12	5.02	1.89	0.06	100.54	1.93
D04R24	29.008	128.923	71.85	0.19	14.14	3.04	0.18	0.27	2.08	4.93	1.86	0.05	98.60	2.00



第6図 火山岩試料の化学組成の特徴。琉球弧及び沖縄トラフのデータはGEOROCデータベース(<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>)による。a) MgO- K₂O, b) SiO₂-Na₂O+K₂O, c) MgO-TiO₂.

Fig. 6 Whole rock composition of the dredged samples. Compositional range for the volcanic rocks from the volcanic front and Okinawa Trough are shown from GEOROC data base. Compositional range of the volcanic rocks for the Ito-Torishima and Yokoatejima Islands. a) MgO- K₂O, b) SiO₂-Na₂O+K₂O, c) MgO-TiO₂.

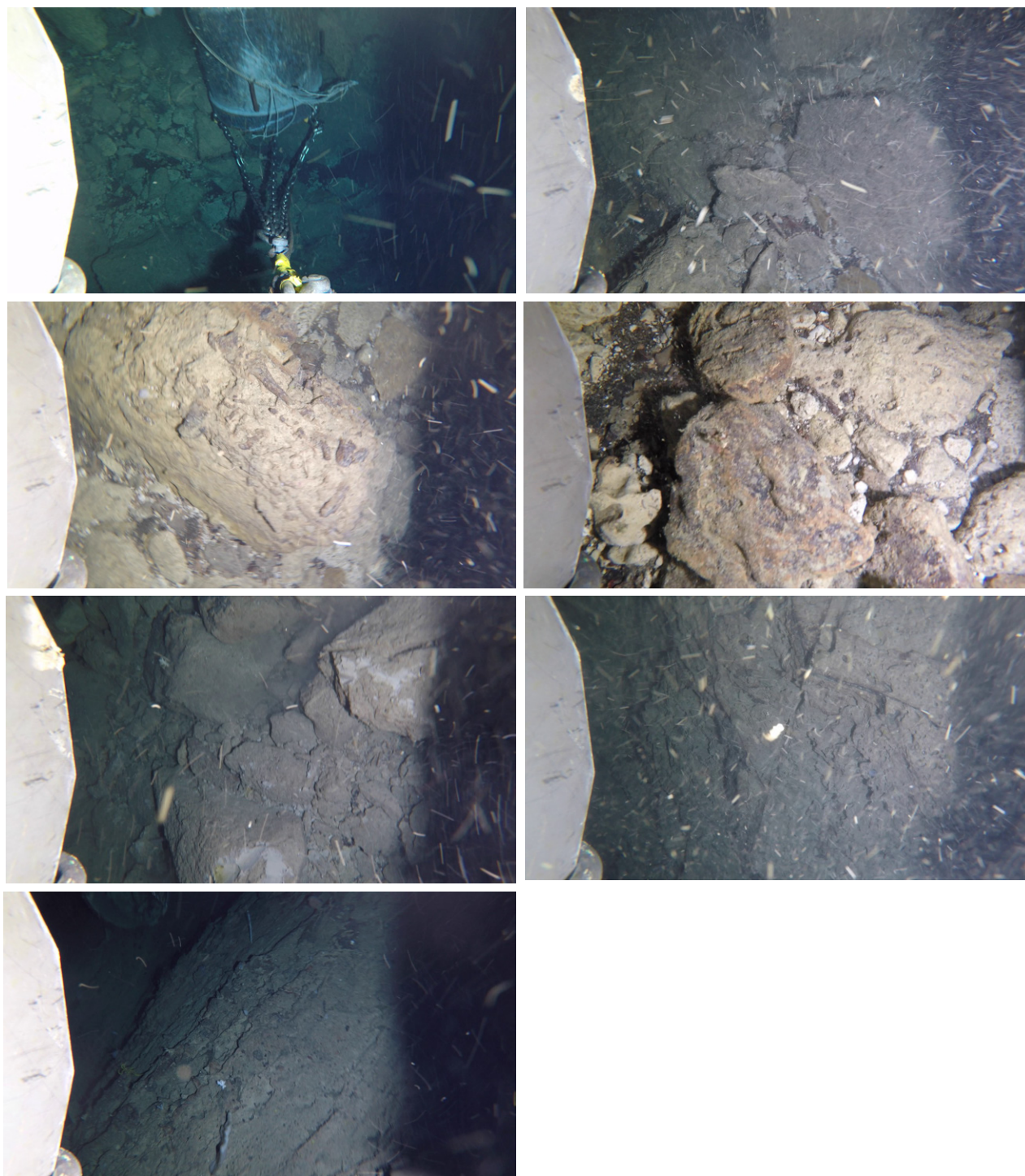
GB21-1 D02



図版1 ドレッジ地点GB21-1 D02の代表的な海底面の様子.

Plate 1 Selected seafloor images observed during dredge haul GB21-1 D02.

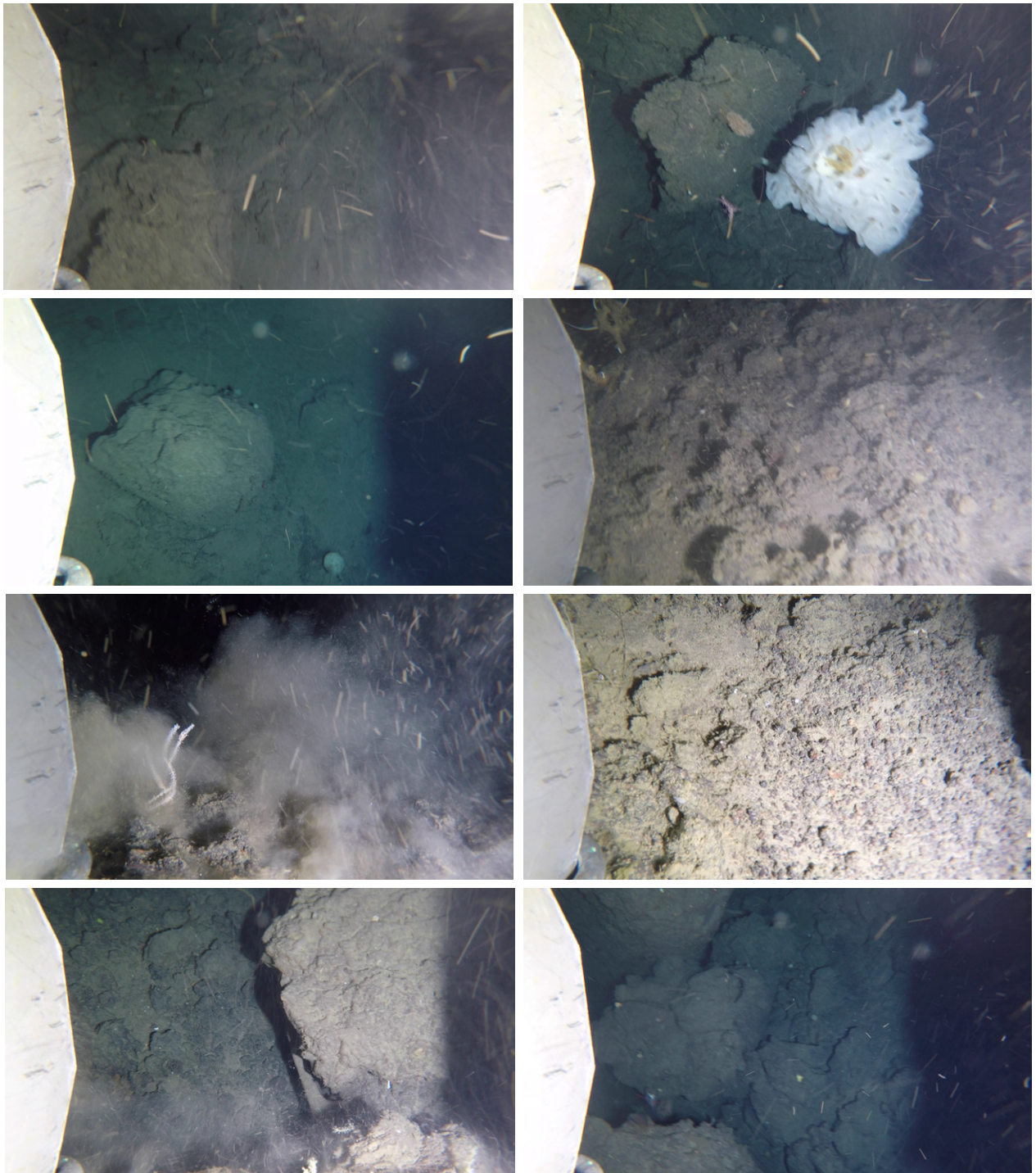
GB21-1 D03



図版2 ドレッジ地点GB21-1 D03の代表的な海底面の様子.

Plate 2 Selected seafloor images observed during dredge haul GB21-1 D03.

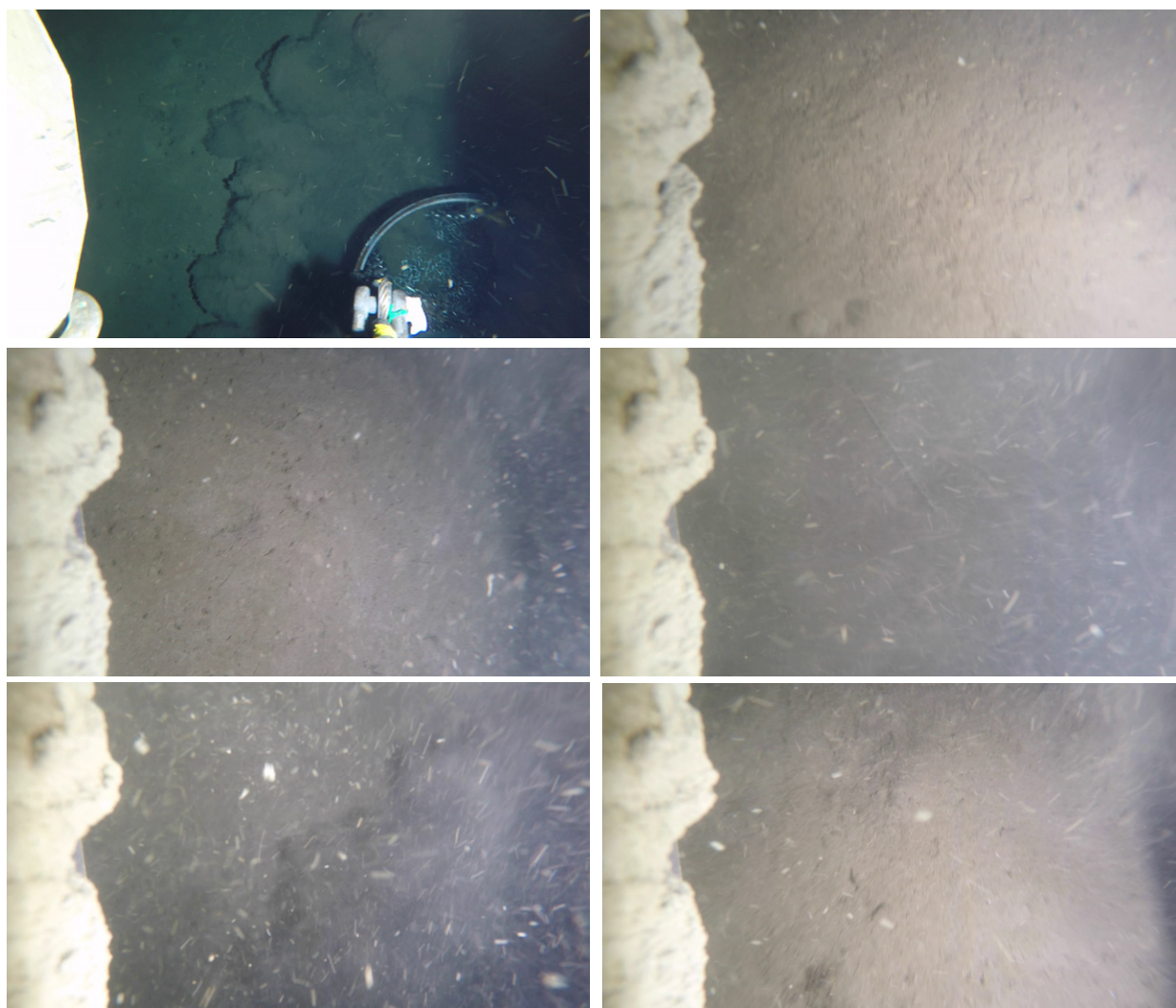
GB21-1 D04



図版3 ドレッジ地点GB21-1 D04の代表的な海底面の様子.

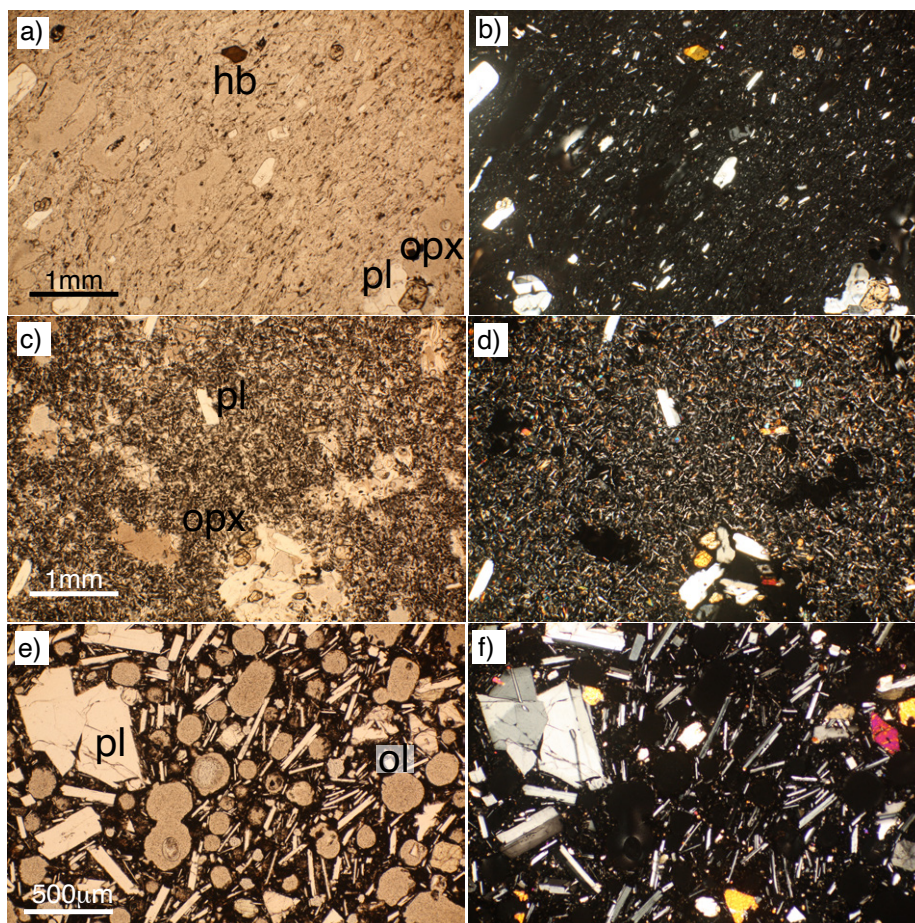
Plate 3 Selected seafloor images observed during dredge haul GB21-1 D04.

GB21-1 D05



図版4 ドレッジ地点GB21-1 D05の代表的な海底面の様子.

Plate 4 Selected seafloor images observed during dredge haul GB21-1 D05.



図版5 岩石試料の薄片写真. a, b) D02R19, a) オープンニコル, b) クロスニコル. c, d) D02R11, c) オープンニコル, d) クロスニコル. e, f) D04R03, e) オープンニコル, f) クロスニコル. ol: かんらん石, opx: 直方輝石, pl: 斜長石, hb: 角閃石.

Plate 5 Photomicrograph of rock samples. a,b) D02R19, a) plane-polarized light, b) cross-polarized light. c,d) D02R11, c) plane-polarized light, d) cross-polarized light. e,f) D04R03, e) plane-polarized light, f) cross-polarized light. ol: olivine, opx: orthopyroxene, pl: plagioclase, hb: hornblende.

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

有元 純^{1,*}・宇都宮 正志¹

ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki (2022) Depositional ages of sediment and sedimentary rock samples obtained from the seafloor around the Tokara Islands during GB21-1 cruise, based on calcareous microfossil assemblages. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 267–274, 1 figure, 2 tables.

Abstract: Calcareous nannofossil and planktic foraminiferal assemblages were examined to determine the depositional ages for some seafloor sediments and sedimentary rock samples obtained during GB21-1 cruise at around the Tokara Islands, northern Ryukyu arc. Seven samples from three localities, one in the forearc side and two in the back-arc, were prepared for biostratigraphic study. Unconsolidated and partially consolidated muddy samples from the back-arc sites represent the depositional age younger than Middle Pleistocene (0–0.29 Ma). On the other hand, the depositional age of latest Early to Middle Pleistocene is indicated for calcareous microfossil assemblages in the sedimentary rocks dredged at both forearc and back-arc sites, most likely constrained from 0.9 or 0.8 Ma to 0.43 Ma.

Keywords: biostratigraphy, biochronology, Quaternary, Pleistocene, calcareous nannofossil, planktic foraminifera, Tokara Islands, Ryukyu arc, GB21-1

要 旨

GB21-1航海においてトカラ列島周辺海域から採取された海底堆積物・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。前弧側1地点および背弧側2地点から得られた計7試料のうち、背弧側で得られた採泥試料およびドレッジ試料の一部は0.29 Ma以降の堆積年代を示し、未固結部は現世の表層堆積物と考えられる。一方、前弧側のドレッジ試料および背弧側のドレッジ試料の一部は下部-中部更新統に対比される可能性が高く、示準化石の産出状況から堆積年代は約0.9 Ma(一部は0.8 Ma以降)から0.43 Maの間に制約される。

1. はじめに

新生界の海成層において、石灰質ナノ化石や浮遊性有孔虫化石などの石灰質微化石は年代決定に有効である。2021年3月に琉球弧北部トカラ列島周辺海域において実施されたGB21-1航海では、ドレッジャーあるいはグラブ採泥器を用いて、複数地点の海底から試料採取が行われた(石野ほか, 2022; 石塚ほか, 2022; 鈴木ほか, 2022, 本特集号)。本概報ではこれらの堆積物・堆積岩試料に含まれる石灰質微化石群集を検討し、堆積年代に

ついて考察を行う。

2. 試料と方法

2.1 試料

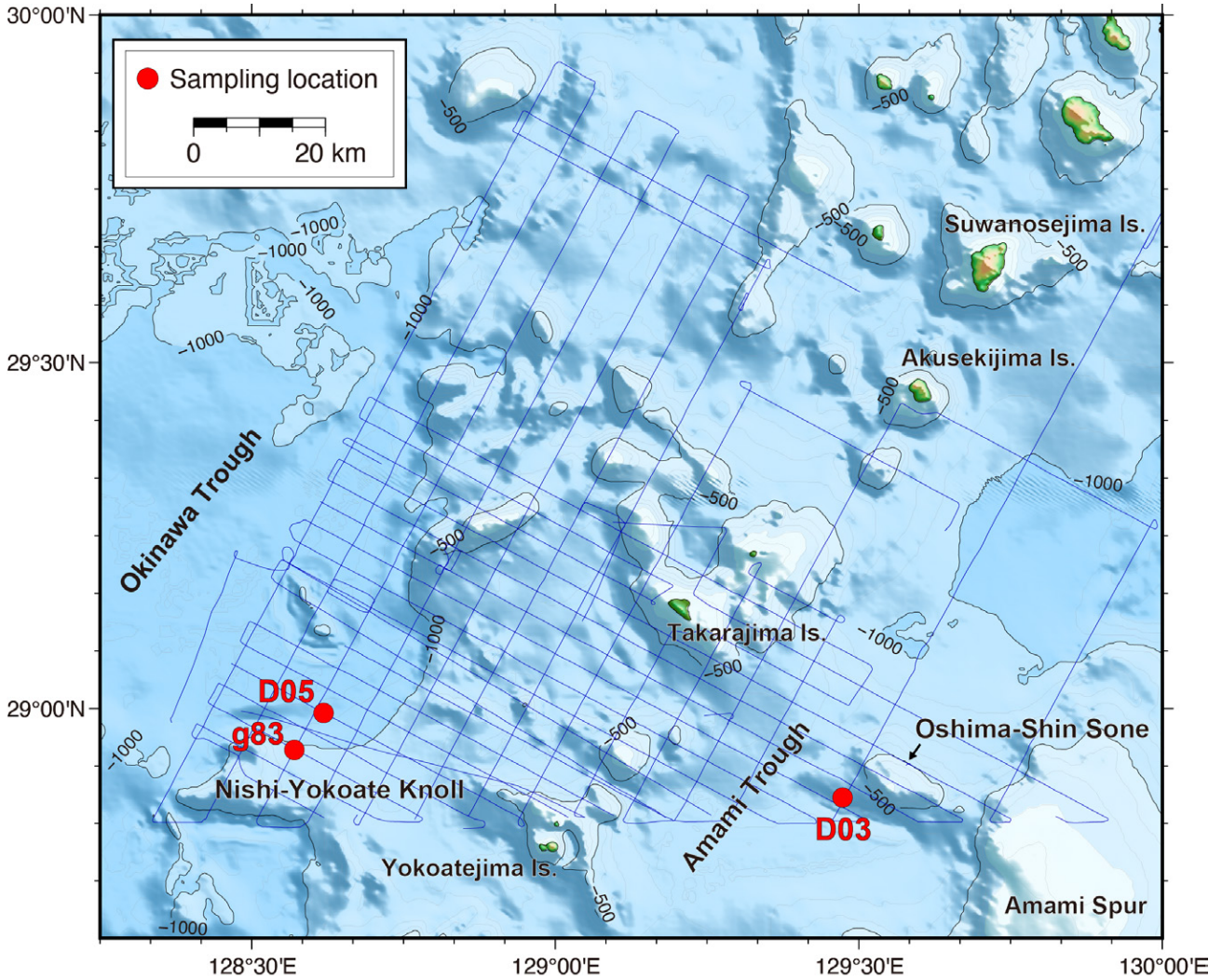
検討に用いた堆積物・堆積岩試料は、GB21-1航海調査海域における3地点の海底から採取されたものである(第1図)。海底地形の記載や試料採取地点の詳細な位置情報については、石野ほか(2022, 本特集号)、石塚ほか(2022, 本特集号)および鈴木ほか(2022, 本特集号)を参照されたい。

前弧側のドレッジ地点D03は、横当島東方約50 kmに位置する、大島新曾根の南西部である(第1図)。水深646–791 mの海底崖から、やや固結したシルト岩あるいは砂質シルト岩と少量の軽石が得られた(石塚ほか, 2022)。これらのうち堆積岩試料から岩相の異なる4種類を識別し、それぞれについて検討を行った(D03-R01, D03-other-A, D03-other-BおよびD03-other-C)。

背弧側のドレッジ地点D05は、横当島北西方約43 kmの沖繩トラフ東縁部に位置する小規模な海底崖である(第1図)。水深1,041–1,131 mの海底からやや固結した砂質シルト岩が得られた(石塚ほか, 2022)。D05地点では堆積岩試料(D05-R03)に加えて、ドレッジャーに取り付けた海底観察用カメラケースに付着した未固結の泥質堆

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., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: j-arimoto@aist.go.jp



第1図 調査海域図と試料採取地点. 等深線(単位:m)は岸本(2000)に基づく. 青の実線は航走観測時の航跡を示す.
 Fig. 1 Map showing sampling localities for this study and ship tracklines (blue line) during GB21-1 survey. Water depth contourlines (in meter) are based on Kishimoto (2000).

積物(D05-others)についても検討を行った.

なおドレッジャーによる試料採取は、急傾斜部において着底から離底までの区間の海底を削り取るように行われたため、試料採取層準にある程度の不確実性がある。各々の検討試料の分取に際しては、1試料あたりひと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。

一方、グラブ採泥地点g83は横当島西北西約43 kmの西横当海丘東部に位置する(第1図)。試料採取地点の水深は852 mであり、やや固結した泥岩と未固結の泥が混在した不均質な試料が得られた(鈴木ほか, 2022)。

2.2 方法

計7試料の堆積物・堆積岩について、石灰質微化石群

集を検討するため試料処理、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7試料のそれぞれについて、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。

2.2.2. 浮遊性有孔虫化石

試料が少量のみ得られたD03-other-Aを除く計6試料の

第1表 GB21 航海で採取された堆積物・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。

Table 1 Distribution chart of calcareous nannofossil identified from GB21-1 samples. Abundance; A: abundant, C: common, F: few. Preservation; G: good, M: moderate, P: poor. Occurrence; +: present; R: rework.

Sample ID	g83	D03-R01	D03-other-A	D03-other-B	D03-other-C	D05-R03	D05-others
Abundance	A	A	A	A	A	A	A
Preservation	G	G	G	G	M	G	G
<i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray and Blackman)	+	+	+	+	+	+	+
<i>Emiliana huxleyi</i> (Lohmann)	+						+
<i>Gephyrocapsa oceanica</i> Kamptner	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gephyrocapsa parallela</i> Hay and Beaudry	+	+	+	+	+	+	+
<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich)			+	+	+	+	
<i>Helicosphaera wallichii</i> (Lohman)	+						+
<i>Helicosphaera hyalina</i> Gaader	+			+		+	+
<i>Helicosphaera inversa</i> (Gartner)		+		+		+	
<i>Pseudoemiliana lacunosa</i> (Kamptner)	R	+	+	+	+	+	
<i>Syracosphaera</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+
Small placolith (<2 μm)	+	+	+	+	+	+	
<i>Umbilicosphaera</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+
CN zone (Okada and Bukry, 1980)	CN15	CN14a	CN14a	CN14a	CN14a	CN14a	CN15

それぞれについて、乾燥重量3–14 g程度を処理に用いた。やや固結した試料については、風化面を極力除いて1–2 cm大まで碎き、ボロン法 (Hanken, 1979) により堆積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晚以上乾燥させた。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、処理の前で生物源粒子の著しい破損が起きないことを慎重に確認した上で、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。一方、未固結の堆積物試料については凍結乾燥の後、同様に開口径63 μmの篩上で水洗、乾燥して残渣化した。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。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・染色等の程度により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。その際、化石表面に染色や鉱物粒子による被覆が認められるなど、著しく保存状態の悪い個体は別個に計数を行った。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。形態種分類にあたって、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。

3. 結果

各試料における産出量、保存状態および産出した化石群集の概要を、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫に分けてそれぞれ第1表と第2表に示す。

3.1 石灰質ナノ化石

検討した7試料には石灰質ナノ化石が豊富に含まれており、保存状態はいずれも良好であった (第1表)。全体として7属9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 (第1表)。このうち、*Emiliana huxleyi*, *Pseudoemiliana 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、*Ge. parallela* や *Helicosphaera inversa* も年代推定において有効である。年代推定に直接的に関与しない随伴種としては、*Calcidiscus leptoporus* や *He. carteri* などが全ての検討試料から産出した。

3.2 浮遊性有孔虫化石

検討した6試料のうち、D03およびD05地点の検討試料には浮遊性有孔虫化石が豊富に含まれ、やや固結した試料についても保存状態は良好であった (第2表)。残渣の分割数、抽出個体数および試料乾燥重量から計算された個体密度は試料ごとに異なるが、乾燥試料1 gあたり約2,900–8,400個体であった。一方g83地点で得られた試料については、乾燥試料1 gあたり約200個体程度と、他地点に比べて個体密度が少ないことが特徴である。また

第2表 GB21航海で採取された堆積物・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)。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の残渣の定性的検討でのみ確認された種について+で示したほか。見かけ上保存状態の著しく悪い個体は丸括弧で括って区別した。

Table 2 Distribution chart of planktic foraminifera identified from GB21-1 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 qualitatively checked by rough scanning, it is represented by the signature +. The number of apparently dirty specimens (e.g., heavily coated by some kinds of minerals) are separately indicated within parentheses.

Sample ID	g83	D03-R01	D03-other-B	D03-other-C	D05-R03	D05-others
Abundance	C	D	D	D	D	D
Preservation	M-P	VG	VG	G	G-M	M
<i>Candeiina nitida</i> d'Orbigny		+		(1)		
<i>Dentoglobigerina altispira</i> (Cushman and Jarvis)	(1)			+		
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny	2 (2)	5 (1)	9	7	7 (1)	17 (11)
<i>Globigerina falconensis</i> Blow	21 (73)	58 (5)	60 (2)	27 (3)	64 (11)	33 (27)
<i>Globigerinella adamsi</i> (Banner and Blow)		+				
<i>Globigerinella calida</i> (Parker)			+		+	2
<i>Globigerinella obesa</i> (Bolli)			+		1 (1)	
<i>Globigerinella pseudobesa</i> Salvalorini					2	1
<i>Globigerinella siphonifera</i> d'Orbigny	(2)			(1)	+	+ (2)
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	10 (19)	35 (3)	58 (1)	28 (4)	50 (6)	38 (30)
<i>Globigerinita minuta</i> (Natland)						(1)
<i>Globigerinita parkerae</i> (Bermúdez)						2
<i>Globigerinita uvula</i> (Ehrenberg)		2	2	2		3
<i>Globigerinoides bollii</i> (Blow)	(3)				1	1
<i>Globigerinoides conglobatus</i> (Brady)			+	2	+	1 (1)
<i>Globigerinoides elongatus</i> (d'Orbigny)	(5)	1	1	4 (2)	7	5 (6)
<i>Globigerinoides eoconglobatus</i> Stainbank, Spezzaferri, Kroon, de Leau and	(1)					1
<i>Globigerinoides extremus</i> Bolli and Bermúdez				+	2	
<i>Globigerinoides cf. italicus</i> Mosna and Vercesi				1		
<i>Globigerinoides kennetti</i> (Keller and Poore)	1 (5)			2	2 (1)	2 (2)
<i>Globigerinoides obliquus</i> Bolli				+	1	
<i>Globigerinoides ruber</i> (d'Orbigny)	(17)	22	22 (1)	19 (5)	17 (3)	38 (17)
<i>Globigerinoides tenellus</i> Parker	1 (10)	3 (1)	5	9	1 (1)	8 (3)
<i>Globigerinoides cf. tenellus</i> Parker	(2)					
<i>Globigerinoides</i> sp.					1 (2)	
<i>Globoconella inflata</i> (d'Orbigny)	(2)	2	3	4 (1)	4 (1)	3 (1)
<i>Globoconella puncticulata</i> (Deshayes)	+	4	3		3	
<i>Globoconella triangula</i> (Theyer)	(1)		5	5	7	(2)
<i>Globorotalia bermudezi</i> Rögl and Bolli					2	
<i>Globorotalia crassaconica</i> Hornibrook				+		
<i>Globorotalia crassaformis</i> (Galloway and Wisler)	(+)	4	6	+	2 (2)	+
<i>Globorotalia cf. crassaformis</i> (Galloway and Wisler)		2				
<i>Globorotalia hirsuta</i> (d'Orbigny)		+				+
<i>Globorotalia limbata</i> (Fornasini)					(1)	
<i>Globorotalia margaritae</i> Bolli and Bermúdez	(1)					
<i>Globorotalia menardii</i> (Parker, Jones and Bradt)		+		2	2	+ (1)
<i>Globorotalia cf. merotumida</i> Blow and Banner			+			
<i>Globorotalia pachythea</i> Blow					1	
<i>Globorotalia ronda</i> Blow						1
<i>Globorotalia scitula</i> (Brady)	(+)	7	10	1	6	
<i>Globorotalia tenuitheca</i> Blow					1	
<i>Globorotalia tosaensis</i> Takayanagi and Saito		+	+	+	+	
<i>Globorotalia truncatulinoides</i> (d'Orbigny)	(1)	+		+	+	(+)
<i>Globorotalia cf. truncatulinoides</i> (d'Orbigny)						(1)
<i>Globorotalia tumida</i> (Brady)	(1)	+	+	1	+	1 (2)
<i>Globorotalia unguolata</i> Bermúdez		+	+	3	+	
<i>Globorotalia viola</i> Blow		2	2	2 (1)	2	
<i>Globorotaloides hexagonus</i> (Natland)			1			
<i>Globorotaloides variabilis</i> Bolli				1		
<i>Globorotaloides</i> sp.				1	3	
<i>Globoturborotalita cf. connecta</i> (Jenkins)		2		1		
<i>Globoturborotalita decoraperta</i> (Takayanagi and Saito)		6 (2)	3	7	11	
<i>Globoturborotalita cf. nepenthes</i> (Todd)	(2)			1 (1)		

第2表 続き.

Table 2 Continued.

Sample ID	g83	D03-R01	D03-other-B	D03-other-C	D05-R03	D05-others
Abundance	C	D	D	D	D	D
Preservation	M-P	VG	VG	G	G-M	M
<i>Globoturbotalita rubescens</i> (Hofker)	4 (1)					4
<i>Globoturbotalita woodi</i> Jenkins	2 (5)	8	9	19 (2)	21 (3)	
<i>Globoturbotalita</i> cf. <i>woodi</i> Jenkins	6	2		4	3	6
<i>Hastigerina pelagica</i> (d'Orbigny)						+ (1)
<i>Neogloboquadrina acostaensis</i> (Blow)	2 (1)	1			1	(1)
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> (d'Orbigny)	1 (6)		3	5 (4)	7 (1)	6 (8)
<i>Neogloboquadrina humerosa</i> (Takayanagi and Saito)	(2)	1	2	1	7	(1)
<i>Neogloboquadrina incompta</i> (Cifelli)	2 (7)	22 (3)	22 (1)	13	29 (4)	14
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (Ehrenberg)			3			
<i>Orbulina universa</i> d'Orbigny		3	+	+	+	+ (2)
<i>Paraglobotralita contiua</i> (Blow)				(1)		
<i>Pulleniatina finalis</i> Banner and Blow	(1)		+		+	
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i> (Parker and Jones)	2 (7)	+	1	11 (1)	3	6 (3)
<i>Pulleniatina</i> cf. <i>obliquiloculata</i> (Parker and Jones)	(1)					
<i>Pulleniatina okinawaensis</i> Natori	1 (5)	3	2	4 (2)	6 (1)	5 (5)
<i>Pulleniatina primalis</i> Banner and Blow	3 (4)	1	3	1	2	1 (2)
<i>Sphaeroidinella dehiscentes</i> (Parker and Jones)		+	+	+	+	
<i>Tenuitella fleisherii</i> Li	2					
<i>Tenuitella iota</i> (Parker)	3 (3)	1	9	2	5	1 (2)
<i>Tenuitella parkerae</i> (Brönnimann and Resig)	2 (1)	4	5		2	1
<i>Trilobatus immaturus</i> (LeRoy)	+ (1)			2 (1)	1	2 (3)
<i>Trilobatus quadrilobatus</i> (d'Orbigny)	1 (1)		2	1		2
<i>Trilobatus sacculifer</i> (Brady)	(3)	1		(1)	2	2 (1)
<i>Trilobatus trilobus</i> (Reuss)	(7)			2 (2)	2	2 (6)
<i>Turbotalita clarkei</i> (Rögl and Bolli)	1					
<i>Turbotalita humilis</i> (Brady)	2				1	2 (1)
<i>Turbotalita quinqueloba</i> (Natland)	(1)	2 (2)	1		2	1
Total examined PF specimens*	277	221	259	232	339	358
PF identified (non-stained)	69	204	252	195	294	210
PF identified (stained)	208	17	5	36	41	147
PF indet. (non-stained)			2	1		
PF indet. (stained)					4	1
Bulk sample weight (g)	14.1	11.4	11.5	3.3	8.3	5.4
Total PF density (#/g)	157	4982	2891	4545	5145	8427
PF zone (Wade et al., 2011)	PT1b	PT1a	PT1a	PT1a	PT1a	PT1b

*Not includes specimens with occurrence "+". (産出数"+の個体は含まない)

変色あるいは鉱物による被覆が著しく、保存状態の悪い個体も他に比べて多かった。保存状態の悪い個体や、定性的検討により産出のみ確認された種も含め、全体として19属73種が同定された(第2表)。重要な示準種としては*Dentoglobigerina altispira*, *Globoturbotalita margaritae*, *Gt. tosaensis*および*Gt. truncatulinoidea*が認められたが、いずれも産出は稀であった。また*Globigerinoides extremus*, *Gs. obliquus*, *Globoconella puncticulata*および*Tenuitella iota*など年代推定の参考となる種が産出した。その他、ほとんどの検討試料で*Globigerina falconensis*, *Globigerinita glutinata*, *Gs. ruber*, *Globoturbotalita woodi*および*Neogloboquadrina incompta*が産出した。検討試料群に産出した*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タクサごとに記述し、得られた試料群の堆積年代を

考察し、その地質学的意義について簡単に述べる。石灰質ナノ化石について、Okada and Bukry (1980)による帯区分(CNシリーズ)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シリーズ)を用いた。化石帯境界やその他の示準面の数値年代較正は、原則としてGeologic Time Scale 2020 (Raffi et al., 2020)に従った。その他、Kameo et al. (2006)による千葉県銚子地域で掘削された大深度ボーリングコアのデータや、Lam and Leckie (2020)による北西太平洋シャツキー海台におけるODPコアのデータも参考とした。

4.1 石灰質ナノ化石帯

試料g83(グラブ採泥、未固結部分)とD05-others(ドレッジ試料の表層部、未固結)は*Emiliania huxleyi*を含むことから、同種の初産出(0.29 Ma)を下限とするCN15帯に対比される(第1表)。g83には*Pseudoemiliania lacunosa*がわずかに含まれるが、同種の終産出層準(0.43 Ma)は

CN14a亜帯上限(あるいはCN14b亜帯下限)を定義する示準面であり*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。

半固結のドレッジ試料D03シリーズおよびD05-R03は、*Ps. lacunosa*と*Gephyrocapsa oceanica*および*Ge. parallela*の共産が認められる一方、*E. huxleyi*を含まない。*Ge. oceanica*の初産出はCN14a亜帯下限を規定し、*Ps. lacunosa*の終産出は同亜帯の上限を規定することから、これらの試料群はCN14a亜帯に対比される(第1表)。さらに、CN14a亜帯上部(1.25 Ma)に終産出層準をもつ大型の*Gephyrocapsa*属(ココリスの長径が5.5 μm以上)と、CN14a亜帯下部に終産出層準(~0.9 Ma)をもつ*Reticulofenestra asanoi*が産出しなことから、これらの試料群はCN14a亜帯の上部に対比され、堆積年代下限は約0.9 Maに制約される。

また上記試料のうちD03-R01, D03-other-Bおよび-Cには、*Helicosphaera inversa*の産出が確認された。本種はCN14a亜帯上部に産出することが知られているが、その産出下限は最も古い太平洋低緯度海域で約0.8 Ma、北大西洋中緯度海域では0.51 Ma以降と数10万年の地域差があり、温暖な海域で低塩分な水塊を好む本種の生態特性により解釈されている(Maiorano *et al.*, 2013)。本調査海域において本種の産出下限の年代は明らかでないが、海洋酸素同位体ステージ(MIS)との関係が明らかにされている千葉県銚子地域のポーリングコアにおいては、本種の産出下限はMIS16(約0.6–0.7 Ma)とされる(Kameo *et al.*, 2006)。本種を年代示準として用いるならば、D03-R01, D03-other-Bおよび-Cの堆積年代は0.8 Maより若いと考えられる。

4.2 浮遊性有孔虫化石帯

今回得られた試料群の浮遊性有孔虫化石に基づく分帯において、最も重要な決め手となるのは*Globorotalia tosaensis*の産出である。同種の終産出層準はPT1b亜帯下限を定義し、試料g83およびD05-othersは同種の産出を欠くことからPT1b亜帯に対比される(第2表)。同種の終産出年代は、北西太平洋中緯度の黒潮統流域において、およそ0.4–0.6 Maと見積もられている(Lam and Leckie, 2020)。

一方D03シリーズおよびD05-R03試料には、わずかながら*Gt. tosaensis*の産出が認められることと、その終産出がPT1a亜帯の下限を定義する*Globigerinoidesella fistulosa*が産出しなかったことから、PT1a亜帯に対比される(第2表)。下限の解釈を支持する根拠として、全ての試料に*Tenuitella iota*が産出する(第2表)ことが挙げられる。本種は一般的には年代示準として利用されないものの、北西太平洋中緯度では初産出の下限(1.3–1.4 Ma)がPT1a亜帯相当層準に位置することが明らかになっている(Lam and Leckie, 2020)。また下部更新統(標準化石帯のPL6

帯近傍)に初産出層準をもつ*Gt. truncatulinoides*が、D03-other-Bを除く全ての試料で認められる(第2表)ことも整合的である。化石帯上限の解釈については、試料によって産出状況にむらがあるものの、*Globigerinoides extremus*, *Gs. obliquus*および*Globoconella puncticulata*など、いずれも下部更新統(PT1a亜帯)に終産出層準をもつ種が認められる(第2表)ことにより支持される。

その他に、下部–中部鮮新統に終産出をもつ重要な示準化石である*Dentoglobigerina altispira*, *Gt. margaritae*および*Globoturborotalita nepenthes*類似種などがわずかに認められたが、再堆積による混入と判断される。

4.3 堆積年代と地質学的意義

今回検討した試料について、g83およびD05-othersはCN15帯/PT1b亜帯に対比され、石灰質ナノ化石*E. huxleyi*の産出から堆積年代は0.29 Ma以降に制約される。一樣に未固結のD05-othersについては、試料の状態からも堆積岩が破碎されたものではなく、表層堆積物であると考えられる。g83試料の未固結部も同様に表層堆積物と考えられるが、試料全体としてはやや固結した部分を含む不均質な状態である。しかしながら、石灰質微化石群集において中期更新世以前の絶滅種は明らかに多くは認められない。このことから、g83試料は表層あるいは中期更新世以降の堆積物であるが、何らかの原因により部分的に続成作用による固結が進行したものである可能性がある。

一方、ドレッジにより得られた堆積岩試料D03シリーズ(-R03, -other-A, -other-B, -other-C)およびD05-R03は、いずれもCN14a亜帯/PT1a亜帯に対比されることが明らかとなり、数値年代は約0.43–0.9 Maあるいは0.43–0.8 Maと見積もられる。試料採取地点間および各試料(各試料採取層準)の層位関係は、石灰質微化石の観点からは識別し難い。しかし、初産出が約0.8 Ma以降である石灰質ナノ化石*He. inversa*の産出の有無から、D03-R01, -other-BおよびD05-R03採取層準はD03-other-Aおよび-Cよりも上位に位置する可能性がある。

Geologic Time Scale 2020に基づく最新の年代層序区分では、今回得られた堆積岩試料の年代は前期更新世カラブリアン期の末期から中期更新世チバニアン期の中頃に相当し(Gibbard and Head, 2020)、房総半島東部に露出するチバニアン階基底の模式層序断面を含む上総層群上部(Suganuma *et al.*, 2018ほか)と同時代に形成されたといえる。琉球弧における石灰質ナノ化石CN14a亜帯のシルト岩相は、宮古島から与那国島周辺にかけての南琉球弧海域にも広く分布していることが報告されている(宇都宮, 2019, 2020)。一方、琉球弧陸域には同亜帯相当層準として、琉球層群主部の礁性石灰岩相が広域に分布していることが知られている(Iryu *et al.*, 2006)。すなわち今回検討された堆積岩試料の属する地質体は、琉球弧

における下部-中部更新統を代表する陸棚相(浅海性石灰岩)と対をなす沖合相(海成シルト岩)として位置付けることができる。そして、琉球弧の陸-海に広く追跡される同時代の堆積体は、北半球氷床拡大に伴う中期更新世の大規模気候遷移(Mid-Pleistocene Transition : MPT ; Elderfield *et al.*, 2012ほか)を背景とする環境変動や、いわゆる島尻変動(氏家, 1980 ; 兼子, 2007)以降の琉球弧テクトニクス・堆積作用を解明するために重要であるといえる。

5. まとめ

トカラ列島周辺海域において実施された、GB21-1航海で得られた採泥・ドレッジ試料の一部について、石灰質ナノ化石および浮遊性有孔虫化石群集の検討を行った。3地点で回収された計7試料の泥質あるいはシルト質の堆積物・堆積岩には、いずれも豊富に石灰質微化石が含まれており、特にドレッジ試料の堆積岩に含まれる微化石は保存状態が良好であった。ドレッジ地点D05(背弧側、沖縄トラフ東縁部)において得られた堆積物、および採泥地点g83(背弧側、西横当海丘北部)において得られた堆積岩試料は、石灰質ナノ化石帯CN15帯および浮遊性有孔虫化石帯PT1b帯帯に対比され、中期更新世(古くとも0.29 Ma)以降現世にかけての堆積物と解釈される。一方、ドレッジ地点D03(前弧側、大島新曾根南西部)およびD05で得られた堆積岩試料は、下部-中部更新統(カラブリアン期末期-チバニアン期中期)に相当するCN14a帯上部およびPT1a帯に対比され、堆積年代はおおよそ0.9 Ma(一部試料は0.8 Ma以降)から0.43 Maの間に制約される可能性が高い。今年代が明らかとなった堆積岩試料の相当層準は、琉球弧陸域および周辺海域に広域に分布しており、更新世以降の琉球弧周辺における環境変動・テクトニクスなど地史を検討する上で重要と考えられる。

謝辞: GB21-1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、堆積物および堆積岩試料をご提供いただきました。また石野沙季研究員には、第1図の原図である航跡および試料採取位置図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、及び担当編集委員である井上卓彦研究グループ長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

Elderfield, H., Ferretti, P., Greaves, M., Crowhurst, S., McCave, I. N., Hodell, D. and Piotrowski, A. M. (2012) Evolution of ocean temperature and ice volume through

the mid-Pleistocene climate transition. *Science*, **337**, 704–709.

Gibbard, P. L. and Head, M. J. (2020) The Quaternary Period. *In Geologic Time Scale 2020*, 1217–1255, Elsevier.

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・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.

石塚 治・石野沙季・鈴木克明・横山由香・三澤文慶・有元 純・高下裕章・井上卓彦(2022)トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴. 地質調査研究報告, **73**, 249–265.

Kameo, K., Okada, M., El-Masry, M., Hisamitsu, T., Saito, S., Nakazato, H., Ohkouchi, N., Ikehara, M., Yasuda, H., Kitazato, H. and Taira, A. (2006) Age model, physical properties and paleoceanographic implications of the middle Pleistocene core sediments in the Choshi area, central Japan. *Island Arc*, **15**, 366–377.

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.

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).

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.

Maiorano, P., Tarantino, F., Marino, M. and Girone, A. (2013) A paleoecological and paleobiogeographic evaluation of *Helicosphaera inversa* (Gartner) Theodoridis and the diachrony of its First Occurrence. *Marine Micropaleontology*, **104**, 14–24.

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 Vernyhorova, Y. V. (2020) The Neogene Period. *In Geologic Time Scale 2020*, 1141–1215, Elsevier.

Suganuma, Y., Haneda, Y., Kameo, K., Kubota, Y., Hayashi, H., Itaki, T., Okuda, M., Head, M.J., Sugaya, M., Nakazato, H., Igarashi, A., Shikoku, K., Hongo, M., Watanabe,

- M., Satoguchi, Y., Takeshita, Y., Nishida, N., Izumi, K., Kawamura, K., Kawamata, M., Okuno, J., Yoshida, T., Ogitsu, I., Yabusaki, H. and Okada, M. (2018) Paleoclimatic and paleoceanographic records through Marine Isotope Stage 19 at the Chiba composite section, central Japan: A key reference for the Early–Middle Pleistocene Subseries boundary. *Quaternary Science Reviews*, **191**, 406–430.
- 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.
- 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.
- 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.
- 宇都宮正志 (2020) GH19航海及びGK19航海において石垣島・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」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, 75–78.
- 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.
- Young, J. R., Wade, B. S. and Huber B. T., eds. (2017) pforams@mikrotax. <http://www.mikrotax.org/pforams> (閲覧日: 2021年8月2日)
- (受付: 2021年12月22日; 受理: 2022年9月6日)

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

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

SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, TOKUDA Yuki and SENTOKU Asuka (2022) Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Takarajima Island and the Suwanosejima Island. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 275-299, 11 figs, 3 tables.

Abstract: As part of geological survey cruise GB21-1 around the southern area off the Tokara Islands, we conducted surface sediment sampling at 61 sites and sediment core sampling at 2 sites. Muddy sediments subjected to strong biological disturbance were found at depths of 800 m or more. Core sample analysis revealed that this biological disturbance extended to at least 2 m below the seafloor. The distribution of sandy sediments, gravel and outcrops were not necessarily limited by water depth. Rather, sediment distribution appeared to be influenced by the existence of submarine volcanoes, which can act as sources of sediment under the seafloor, in addition to sediment from islands in the region. Bedforms such as ripples, local concentrations of biological remains, and the distribution of outcrops and gravel deposits, which were frequently observed around Takarajima Island, suggest that the meandering Kuroshio Current has a marked effect on sediments in the area. To the southwest of Suwanosejima Island, muddy deposits were found below a rippled volcanic ash sand layer. Based on assessments of sediment particle size and composition, it is possible that these muddy sediments were deposited by geological event(s), such as slope failure from Suwanosejima Island.

Keywords: Tokara Islands, East China Sea, Northwest Pacific, Sedimentology, Event deposit, Bryozoa, Planktonic foraminifera, Coral

要 旨

トカラ列島南部海域において実施した海底地質調査航海GB21-1では、61地点で表層採泥、2地点で柱状試料採泥を実施した。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。コア試料分析によれば、生物擾乱の影響は少なくとも海底下約2 m程度まで見られる。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。こうした底質分布は島嶼部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。宝島周辺で多く見られるリップルなどのベッドフォーム、生物遺骸の局所的な濃集、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。諏訪之瀬島南西方では、海底表面にリップルを呈する火山灰質砂層の下位に泥質堆積層が存在し、その粒径コン

トラストや粒子組成から、諏訪之瀬島など近傍の陸地から、例えば斜面崩壊などを起源としてイベント的に堆積した可能性がある。

1. はじめに

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」の周辺に位置する島嶼群の総称であり、トカラ列島の主要な島としてくちのしま口之島、なかのしま中之島、すわのせじま諏訪之瀬島、たいらじま平島、あくせきじま悪石島、こたからじま小宝島、たからじま宝島が挙げられる。

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

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 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)

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

から海底火山地形が新規に報告されている(Minami *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2021). これらの火山, 海底火山群の活発な活動により火山起源碎屑物が海域全体にわたり供給されていると考えられる. しかしこれらの火山群からもたらされる堆積物が, 本海域においてどのように分布しているかの詳細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.

トカラ列島周辺海域の海洋, 海底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). しかし, 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挙動実態や, 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」は悪石島と宝島の間に位置し, 地形的境界だけでなく, 九州本土と沖縄・奄美群島の生物分布を区切る「渡瀬線」と呼ばれる分布境界線で区別されている(Komaki and Ebach, 2021; 木村, 1996). 陸上で地形に規制されているように引かれている生物分布境界線が, 海中, 海底生態系においてどのように存在するのか, あるいは存在しないのかは本海域における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.

産業技術総合研究所では, 日本周辺海域における20万

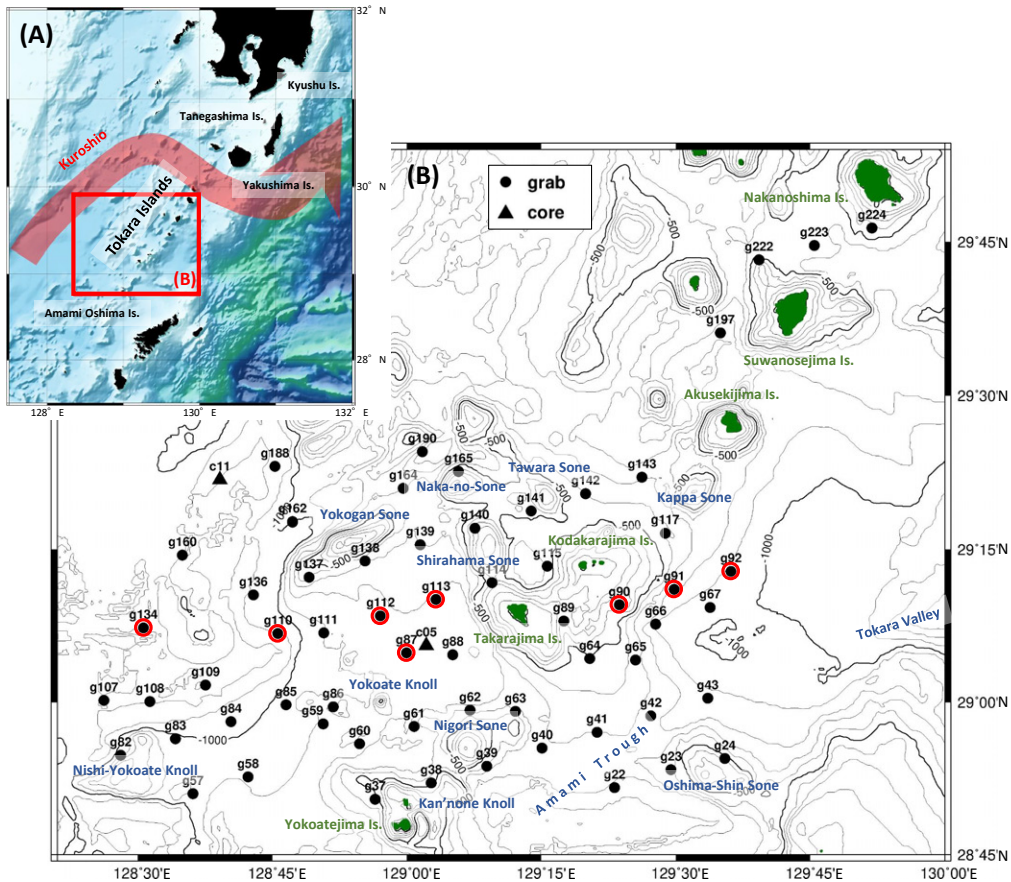
分の1海洋地質図の網羅的な作成を目的とした海域地質図プロジェクトの一環として, 2021年3月に東海大学の調査実習船「望星丸」を使用してトカラ列島周辺海域において海底地質調査航海(GB21-1)を実施した. 南西諸島において, 屋久島・種子島以北及び奄美大島以南の海域は詳細な地質調査が完了しており, 表層堆積図を含む海域地質図の出版が進んでいる(例えば, 池原, 2014; 板木, 2015). 本海域での調査を行うことで, 南西諸島での縦断的な海域地質調査が完了する. トカラ列島周辺における海域地質調査は2020~2022年度の三年間にわたり実施する予定であり, GB21-1航海はその1年目として, トカラ列島周辺海域の南部, 宝島周辺海域を主な調査対象範囲として実施された. 本論文では, GB21-1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.

2. 調査・分析方法

2.1 表層試料採泥

トカラ列島南部に位置する宝島, ^{よこあてしま}横当島周辺及び西方海域と, 諏訪之瀬島周辺海域において, 表層堆積物の組成や分布を把握するため, 木下式グラブ採泥器(K-グラブ)による表層採泥を61地点で実施した(第1図). K-グラブには海底カメラ, ニスキン採水器, CTD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-グラブは海中下降時の動揺により着底前に誤作動する可能性がある. これを防ぐため, 超音波高度計と連動して海底上7mで解除される電磁石式の誤作動防止システム(板木, 2018)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2m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7m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を装着し, 水中音速度の直接観測を行った(高下ほか, 2022).

K-グラブの揚収後, 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5cm, 横6cm, 高さ30cm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に分割(厚さ1cmのスラブ試料と, 5cm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



第1図 (A)トカラ列島位置図。(B) GB21-1航海実施範囲におけるGrab, コア試料採取地点図。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 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).

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、イシサンゴ類、浮遊性有孔虫、底生有孔虫、貝形虫、ウシオダニ類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ットに移し、おおよその試料体積を確認した。バケットに移した試料は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、塩分濃度測定及び水素・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 柱状試料採泥

本海域での典型的な堆積速度や堆積物組成、堆積環境の時代変化を把握するため、沖縄トラフ東縁のサイトc11と宝島西方の海盆に位置するサイトc05において大口径グラビティコアラ（バレル長5 m）を用いた柱状試料採泥を行った（第1図）。採取時に欠損するコア最上部を擾乱なく採取するため、パイロットとして簡易式マルチプルコアラ（アシュラ式採泥装置）を用いた。グラビティコアラ本体のフリーフォールは3 mに設定し、ヘッド部には方位傾斜計を装着した。

採取したグラビティコアラ試料は船上でアーカイブハーフとワーキングハーフに分割し、ワーキングハーフからは軟X線像撮影による堆積構造解析のため、厚さ1 cm、幅5 cm、長さ20 cmのスラブ試料を採取した。その後L字アングル2本を組み合わせたLLチャンネルを用いた一辺1.5 cmの角柱型試料の採取と、定容量のキューブ試料2列（岩石磁気的研究及び含水率、乾燥かさ密度測定に用いる）を採取し、残余をキューブ試料の境界にあわせて

約2.2 cm間隔で分取した。アーカイブハーフは表面を整形後、実験室内で写真撮影、肉眼記載、分光測色計コニカミノルタCM-600dを用いた1 cm間隔での色測定を行った。キューブ試料のうち1列は湿潤重量と凍結乾燥機による乾燥重量を測定し、含水率及び乾燥かさ密度を算出した。

アシュラ式採泥装置で取得した3本の表層堆積物コアのうち、1本目はアーカイブ及びCT像取得用としてホールコアのまま保管した。2本目はアーカイブハーフとワーキングハーフに分割して、ワーキングハーフからはスラブ試料採取と含水率・乾燥かさ密度測定用のキューブ試料採取を行った後、2.2 cm間隔でスライスした。アーカイブハーフは表面を整形後、グラビティコア試料と同様に実験室内での写真撮影、肉眼記載、1 cm間隔での色測定を行った。3本目は厚さ1 cmでスライスしてユニパックに保管した。ただしサイトc05ではアシュラ式採泥装置から2本のコアしか得られなかったため、1 cmスライスは実施しなかった。

コア試料は採取、半割後に自然ないし人工的な変形を受けるため、試料の長さは一定ではなく、例えばキューブ採取時に測定した「コアトップから10.0 cm」と色測定時の「コアトップから10.0 cm」は同一層準であるとは限らない。そこで各試料及びデータの取得位置について、半割試料断面に10 cm間隔で打ったピン、コアトップ及びコアボトムとの間の相対的な位置関係を記録することで、約5 mm以下の精度で対比できるようにした。スライス試料及びキューブ試料の採取位置、色データの測定位置はこれらの位置記録に基づいて写真撮影時に写り込んだスケールに投影したものをを用いた。

2.3 軟X線像及びCT像取得

グラブ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。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像撮影を実施した。CT像撮影には有田式サブコアより分割した角柱試料と、コア試料のアーカイブハーフ(グラビティコア)及びホールコアで持ち帰ったアシュラ試料を用いた。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。

2.4 コケムシ類分析

採泥器が船上に揚収された後、約100 ccの堆積物試料を分取し、常温保存した。採泥時及び持ち帰った50試

料の目視観察では、ほとんどの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g39(水深657 m)について、試料を開口0.125 mmの篩で水洗し、篩上に残った碎屑物を自然乾燥した。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炭酸塩骨格破片を双眼実体顕微鏡下で拾い出した。コケムシ類の同定を行うとともに、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。

2.5 浮遊性有孔虫分析

本海域での浮遊性有孔虫の分布の概要を把握するため、宝島周辺海域の8測点を選定して浮遊性有孔虫の群集解析を行った(第1図)。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。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 °C)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 °C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。

2.6 サンゴ類分析

K-グラブにより採泥した全61地点中、堆積物試料が十分量あった47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。また、船上において各種分析用に堆積物を分取した残りの堆積物を5 mmの目合いで水洗して、その残渣からもほぼ全てのサンゴ個体を採集した。骨格試料については水洗後乾燥させ、地点ごとにチャック袋に入れ保存した。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を用いて種の同定を行った。

3. 堆積物採取・分析結果

3.1 表層堆積物採取結果

GB21-1調査では計61地点(水深173 ~ 1169 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、61地点のうち57地点で海底写真の撮影に成功した。サイトg62, g87, g115, g117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g62, g83, g87ではグラブ採泥器が作動しなかったため、それぞれ2回、2回、3回の投入を行った。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、g62-2, g83-2, g87-3とした。グラブ不作動の原因は「採泥試料上面の蓋の跳ね戻りを防ぐため取り付けられたゴム板の弾力が強すぎ、グラブの作動を阻害した」「誤作動防止装置作動により解除される仮止め用リングが摩擦により抜けなかった」などであり、それぞれゴム板の一部を切除して弾力を弱める、リングに摩擦低減のためグリスを塗布するなどの対応を講じた。サイトg62ではグラブ不作動の原因が誤作動防止装置の不具合であった。このサイトg62では音速度計Midasを装備しての投入を実施しており、誤作動防止装置の不具合の原因としてMidasと超音波高度計（海底上7 mで誤作動防止装置を解除する設計）との干渉が懸念されたため、2回目の投入では誤作動防止装置をあらかじめ解除した状態で採泥器投入を行った。なお、他にMidasを装備した採泥を実施した4地点（g24, g107, g141, g197）ではこのような問題は発生せず、誤作動防止装置が正常に作動したため、サイトg62での誤作動防止装置の不具合は、結線の不備や高度計バッテリーの残量不足など別の原因で発生したと考えられる。g164及びg223では一回目の離底時に張力計の変化が乏しく、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巻き上げたのちに再度着底させた。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、グラブ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-グラブ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）、「D」（暗色岩片）、「B」（生物遺骸）の文字で示

した。残渣がごく少量、あるいは全く得られなかった地点は「-」で示した。残渣が全く得られなかったのはg87-3のみである。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。

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、12地点が露頭、5地点が礫質堆積物と分類された。採取水深範囲は露頭が173～1034 m、礫質堆積物323～714 mで、様々な水深に分布している。礫質堆積物及び露頭は、宝島、小宝島周辺の浅海部及び、宝島から南東の大島新曾根に連なる尾根上、南西の濁り曾根に向かう尾根上、北西の白浜曾根、中ノ曾根を経て横ガン曾根に連なる尾根上に分布する。また横当海丘南東方の地形的な高まりでも露頭が観察された。

露頭と認定された12地点のうち11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（サイトg65の例：第3図A）。西横当海丘東方のサイトg83のみ、グラブ採泥器作動時に露頭から剥離したと見られる半固結泥岩の岩片が採取された（第3図B）。なお、泥岩の堆積年代は浮遊性有孔虫及び石灰質ナノ化石群集解析によれば0.29～0 Maに堆積したと推定される（有元・宇都宮，2022）。

礫質堆積物は宝島～小宝島周辺（サイトg64, g114, g117）及び横ガン曾根南側斜面（サイトg137, g138）から採取され、いずれも主にパミス質の礫を主要成分とする（第3図C, D）。サイトg137, g138で採取された礫の表面は暗灰色から暗褐色に変色している。サイトg64で採取された礫は暗黄褐色に変質している。またサイトg117で採取されたパミス質礫は強い変質を受けており、全体が黄土色に変色し、脆く崩れやすい。サイトg114では暗褐色に変色したパミス質礫に加えて生物遺骸が採取された。

3.3 砂質堆積物

調査海域における主たる底質として、26地点が砂質堆積物と分類された。うち5地点が極細粒～細粒砂質（水深705～932 mで採取）、15地点が中粒砂質（水深416～868 mで採取）、6地点が粗粒～極粗粒砂質（水深222～1071 m）である。砂粒子は主に火山灰、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と近い組成を持ち、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

第1表 GB21-I 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き主要構成物, 5mm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-I 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.

Site	Sampler	date (YYYY/MM/DD)	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	Depth (m)	Wire out (m)	Sample volume (L)	major component based on VCD	Organic residue
g22	K-grab	2021/3/18	28-51.5995	129-23.1519	823	838	22	scoriaceous poorly sorted coarse to fine sand (15 cm)	Organic remains
g23	K-grab	2021/3/18	28-53.3643	129-29.4443	572	579	2	scoriaceous pebbles and very coarse to medium sand	Coral, Organic remains
g24	K-grab	2021/3/18	28-54.4605	129-35.4605	473	486	13	poorly sorted scoriaceous pebbly sand and very coarse sand (11 cm)	Mollusk, Shark, Sea Urchin, Brachiopod, Coral
g37	K-grab	2021/3/10	28-50.4589	128-56.4466	543	550.9	9	scoria pebbly and bioclastic medium to coarse sand (9 cm)	Pteropod, Snail, Coral
g38	K-grab	2021/3/10	28-52.0545	129-2.7093	489	503.8	15	bioclastic very coarse to medium sand and pumice gravels (16 cm)	Pteropod, Shell, Sponge, Coral
g39	K-grab	2021/3/19	28-53.7013	129-8.9014	657	675	18	medium to fine sand with scoria gravels (15cm)	Mollusk, Crinoid, Barnacles, Brachiopod, Sponge, Coral
g40	K-grab	2021/3/19	28-55.4893	129-15.0624	702	712	18	medium to fine sand with scoria pebbles (14 cm)	Snail, Coral
g41	K-grab	2021/3/18	28-57.0398	129-21.2051	705	713	22	fine to very fine sand (16 cm)	Coral, Organic remains
g42	K-grab	2021/3/18	28-58.6501	129-27.2013	735	748	9	medium to fine sand and pumice gravels (8cm)	Mollusk, Sea Urchin, Barnacles, Brachiopod, Coral
g43	K-grab	2021/3/18	29-0.3873	129-33.5522	861	873	36	medium to coarse sand interbedded by coarse to very coarse sand (20 cm)	Mollusk, Brachiopod, Sponge, Coral
g57	K-grab	2021/3/20	28-51.0051	128-36.1302	1005	1012	0	pebbles and fine sand	Mollusk
g58	K-grab	2021/3/20	28-52.6583	128-42.2701	960	966	36	silty clay (21 cm)	Mollusk
g59	K-grab	2021/3/10	28-57.8635	128-50.6561	849	853.5	36	very fine sandy silt (21 cm)	Mollusk, Coelenterata, Barnacles, Sponges, Sponge
g60	K-grab	2021/3/10	28-55.9058	128-54.7102	841	845.4	36	very fine sandy silt patched by fine sandy silt (21 cm)	Mollusk, Fish, Barnacles, Sponge, Coral
g61	K-grab	2021/3/19	28-57.61	129-0.7988	759	772	0	gravels and bioclasts	Sponge, Coral
g62-2	K-grab	2021/3/19	28-59.2091	129-7.0376	746	758.5	13	medium to fine sand (9 cm)	Fish, Barnacles
g63	K-grab	2021/3/19	28-59.0953	129-12.1	587	599	4	bioclastic very coarse sand and gravels	Organic remains
g64	K-grab	2021/3/23	29-4.2796	129-20.3852	524	543	9	poorly sorted very coarse sandy gravels	Sponge
g65	K-grab	2021/3/23	29-4.1381	129-25.4945	638	646	4	poorly sorted very coarse sand and pumice gravels	Fish, Barnacles
g66	K-grab	2021/3/23	29-7.6533	129-27.7371	896	904	36	very fine sandy silt (22 cm)	Organic remains
g67	K-grab	2021/3/16	29-9.286	129-33.8176	943	953	31	very fine sandy silt (20 cm)	Sponge
g82	K-grab	2021/3/20	28-54.7817	128-28.0658	942	952	36	silty clay (21 cm)	Sponge
g83-2	K-grab	2021/3/14	28-56.4046	128-34.1743	852	859	0	semi-consolidated mud(stone) and very fine sandy clay	Pteropod, Bivalve, Sponge
g84	K-grab	2021/3/20	28-58.0798	128-40.3693	958	970	36	very fine sandy clay (17cm)	Sponge
g85	K-grab	2021/3/14	28-59.7399	128-46.5112	942	952	36	silty clay (21 cm)	Sponge
g86	K-grab	2021/3/10	28-59.5391	128-51.7776	847	851.6	36	very fine sandy silt (22 cm)	Sponge, Organic remains
g87-3	K-grab	2021/3/9	29-4.8281	128-59.9481	883	888.1	36	silty clay (top 2cm) and fine sandy silt (22 cm)	Mollusk, Crinoid, Bryozoa, Sponge, Coral, Ragworm
g88	K-grab	2021/3/19	29-4.6494	129-5.106	699	702	16	coarse to fine sand (12 cm)	Brachiopod
g89	K-grab	2021/3/23	29-9.615	129-17.4972	248	274	0	bioclastic medium to fine sand	Organic remains
g90	K-grab	2021/3/23	29-9.5475	129-23.7009	353	364	7	bioclastic fine to very fine sand and gravels (6 cm)	Shark
g91	K-grab	2021/3/16	29-11.0639	129-29.8061	808	808.1	7	poorly sorted to fine sand (5 cm)	Sponge
g92	K-grab	2021/3/16	29-12.8182	129-36.1468	924	933	27	silty fine to very fine sand (17 cm)	Shell, Sponge
g107	K-grab	2021/3/20	29-0.1751	128-26.1948	1077	1087	36	silty clay (19 cm)	Shell, Sponge
g108	K-grab	2021/3/14	29-0.0568	128-31.3265	1169	1174	36	very fine sandy silt (18 cm)	Sponge
g109	K-grab	2021/3/14	29-1.682	128-37.5274	1163	1170	36	silty clay (23 cm)	Shell, Sponge
g110	K-grab	2021/3/9	29-6.741	128-45.6022	1071	1054.2	31	poorly sorted coarse sand (20.5 cm)	Sponge
g111	K-grab	2021/3/9	29-6.794	128-50.7253	915	920	31	poorly sorted coarse to fine sand (23 cm)	
g112	K-grab	2021/3/9	29-8.4644	128-57.0307	836	844	25	gravel overlapped by silty medium to fine sand (13 cm)	
g113	K-grab	2021/3/23	29-10.0701	129-3.2352	828	836	18	poorly sorted very coarse to very fine bioclastic sand (12 cm)	
g114	K-grab	2021/3/23	29-11.7201	129-9.4828	323	326	0	cemented bioclastic very coarse sand and gravels	

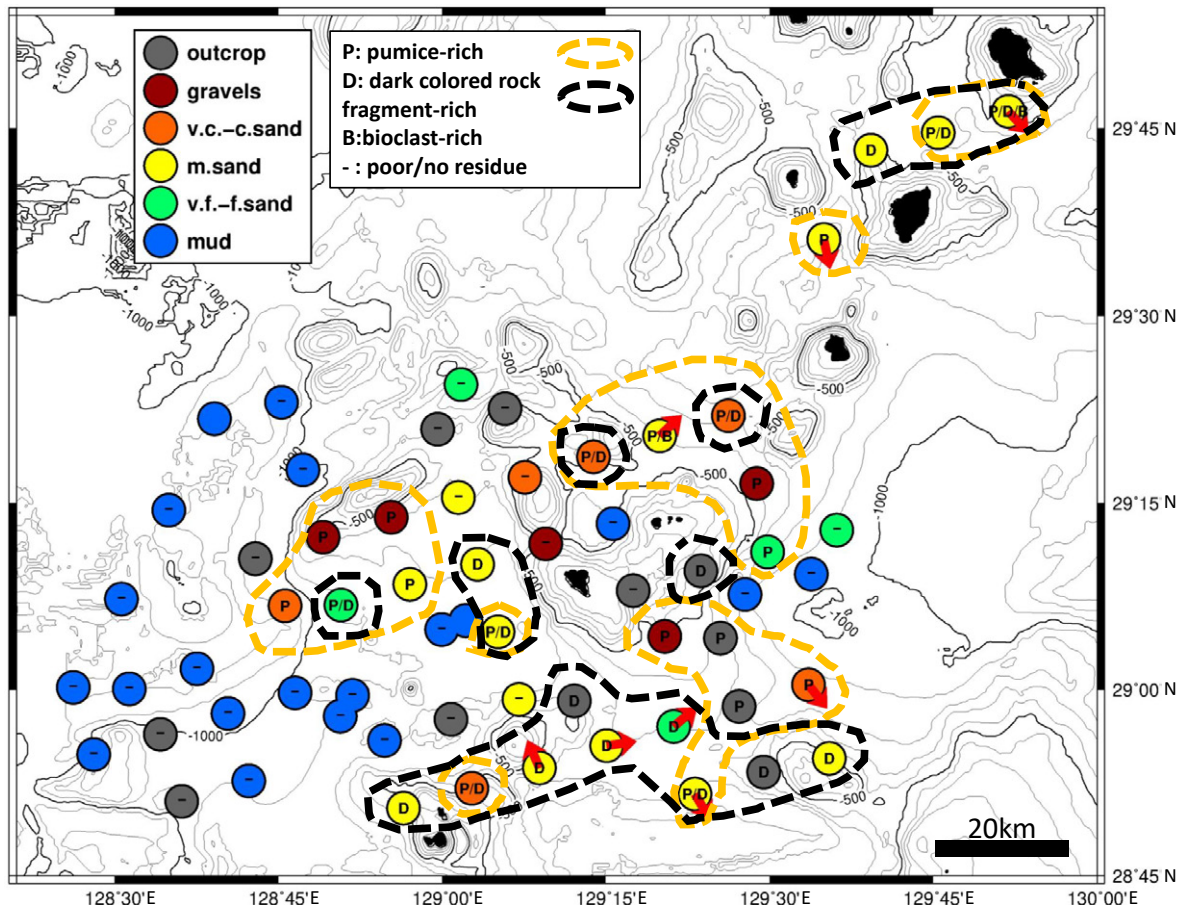
第1表 続き.
Table 1 Continued.

Site	Sampler	date (YYYY/MM /DD)	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	Depth (m)	Wire out (m)	Sample volume (L)	major component based on VCD	Organic residue
g115	K-grab	2021/3/23	29-13.3392	129-15.6489	614	630	33	very fine sandy silt (17 cm)	Organic residue
g117	K-grab	2021/3/16	29-16.5603	129-28.8117	576	612	7	gravels (deformed pumice?) and medium sand (7 cm)	Mollusk
g134	K-grab	2021/3/14	29-7.2858	128-30.6054	1151	1156	36	silty clay (21 cm)	Brachiopod, Organic remains
g136	K-grab	2021/3/17	29-10.5208	128-42.8744	1034	1040	0	pebbles	
g137	K-grab	2021/3/15	29-12.252	128-49.0771	677	685	18	bioclastic medium to fine sand and pumice gravels	Shell, Sponge
g138	K-grab	2021/3/15	29-13.8414	128-55.3223	714	722	5	poorly sorted medium to very coarse sand (6 cm)	Pteropod, Shell, Sponge
g139	K-grab	2021/3/15	29-15.4348	129-1.4751	709	715	16	bioclastic medium sand (13 cm)	Organic remains
g140	K-grab	2021/3/15	29-17.0461	129-7.5794	222	216	0	rich bioclasts, gravels and very coarse to medium sand	
g141	K-grab	2021/3/16	29-18.6921	129-13.86	475	483	15	bioclastic medium to coarse sand with scoria gravels (11 cm)	Pteropod, Shell, Barnacles, Sponge, Coral, Ragworm
g142	K-grab	2021/3/16	29-20.3808	129-19.929	583	593	36	bioclastic medium sand (20 cm)	Pteropod, Bivalve, Sea Urchin, Sponge
g143	K-grab	2021/3/16	29-21.9974	129-26.2133	669	681	5	very coarse sand and gravels (9 cm)	
g160	K-grab	2021/3/17	29-14.4154	128-34.9465	1125	1133	36	silty clay (18 cm)	
g162	K-grab	2021/3/15	29-17.652	128-47.2356	1003	1012	36	silty clay (21 cm)	
g164	K-grab	2021/3/15	29-20.9138	128-59.5821	682	693	0	medium to coarse sand	
g165	K-grab	2021/3/15	29-22.5597	129-5.7507	173	180	0	rich bioclasts, gravels and very coarse to medium sand	
g188	K-grab	2021/3/17	29-23.0617	128-45.2755	1145	1153	36	silty clay (19 cm)	
g190	K-grab	2021/3/15	29-24.4932	129-1.7208	932	935	36	silty very fine sand (18 cm)	Organic remains
g197	K-grab	2021/3/24	29-36.1061	129-34.9611	868	884	18	coarse to fine sand (depth: 0-5cm), laminated very fine sandy silt (depth: 5-9cm) and very fine sand (total length: 12 cm)	
g222	K-grab	2021/3/24	29-43.235	129-39.2688	509	541	22	bioclastic medium sand (14 cm)	Mollusk, Sea Urchin, Coelenterata, Bryozoa, Sponge
g223	K-grab	2021/3/24	29-44.631	129-45.4393	563	585	9	bioclastic medium to fine sand (9 cm)	Mollusk, Coral
g224	K-grab	2021/3/24	29-46.3369	129-51.8721	416	426	27	bioclastic coarse to medium sand (18 cm)	Mollusk, Echinodermata, Bryozoa, Sponge
c05	GC / AS	2021/3/23	29-5.5537	129-2.1562	873	870	-	silty clay patched by very fine sandy silt (ash?). Total length: 227cm + 25cm ashura	
c11	GC / AS	2021/3/17	29-21.7496	128-39.1298	1144	1142	-	silty clay. Total length: 389cm + 35cm ashura	

第2表 グラブ採泥器着底時の方位、傾斜及び海底から2m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。

Table 2 Orientation, inclination and orientation data at 2m above the seafloor (2m asb) at the time of landing of K-grab. Seafloor characteristics at each point recognized by the seafloor photograph are also shown.

Station	Direction (bottom) (degree)	X-tilt (bottom) (degree)	Y-tilt (bottom) (degree)	Direction (2m asb) (degree)	characteristics of seafloor	flow direction based on ripple (degree)
g22	116.3	6	3.65	117.5	rippled bed	149.5
g23	244.2	8.33	-3.47	238.1	outcrop	
g24	30.8	-1.19	0.69	29.4	flat bed (sediment)	
g37	334.2	-1.43	2.64	347.4	flat bed (sediment)	
g38	107	-1.77	5.43	104.4	flat bed with gravels	
g39	201.1	1.93	3.08	201.6	rippled bed	336.6
g40	80.8	0.36	2.29	75.6	rippled bed	81.6
g41	262.8	-1.72	0.46	259.3	rippled bed	50.3
g42	333.6	-10.32	2.57	333.8	outcrop with gravels	
g43	170.7	4.88	-8.51	161.5	rippled bed	141.5
g57	305.8	-32.32	-0.86	293.3	outcrop	
g58	3.9	0.19	3.13	8.4	flat bed?	
g59	233.7	0.32	1.9	254.5	flat bed?	
g60	33.9	0.42	4.6	38.2	flat bed (sediment) with rich burrows	
g61	106.2	-4.43	-2.54	103.0	outcrop	
g62-2	62.2	-12.75	5.52	61.1	no photo	
g63	279.7	-0.24	4.14	274.3	outcrop covered by gravels	
g64	241.5	-8.23	6.49	264.2	gravels	
g65	16.3	5.95	2.14	28.4	outcrop	
g66	141.8	-0.45	0.72	150.6	flat bed (sediment)	
g67-2	169.2	0.52	2.54	166.4	flat bed (sediment)	
g82	256.1	0.66	1.48	263.6	flat bed (sediment) with rich burrows	
g83-2	168.8	-2.36	1.29	166.6	outcrop	
g84	246.2	0.47	4.23	244.0	flat bed (sediment) with burrows	
g85	265.4	-0.18	2.84	263.1	flat bed?	
g86	114.1	-1.69	-0.76	125.3	flat bed (sediment) with burrows	
g87-3	241.8	2.26	3.9	246.6	no photo	
g88	344.7	1.09	3.64	346.3	flat bed (sediment)	
g89	40.5	2.36	3.36	57.2	outcrop with rich organism	
g90	230.5	-7.63	3.54	225.6	outcrop(?) with sand and gravels	
g91	161.7	1.42	1.8	163.6	flat bed (sediment)	
g92	166.2	0.1	2.24	169.2	flat bed (sediment)	
g107	25.1	0.48	0.84	26.1	flat bed with burrows	
g108	135	-0.72	0.33	140.3	flat bed?	
g109	37.3	2.44	2.43	40.9	flat bed (sediment)	
g110	232.3	0.2	11.06	227.7	flat bed?	
g111	24.9	-0.08	-0.01	34.5	flat bed with burrows	
g112	298.5	-0.38	2.85	302.0	flat bed with gravels	
g113	285.9	0.96	1.28	287.5	flat bed (sediment)	
g114	66.3	1.41	3.12	61.8	gravels	
g115	60.8	1.92	-3.17	87.4	no photo	
g117	359	-2.02	4.62	356.5	no photo	
g134	66	0.86	1.87	72.0	flat bed with burrows	
g136	255.4	0.56	-6.03	252.9	outcrop	
g137	89.5	-6.35	0.15	91.4	gravels	
g138	139.9	0.94	1.2	155.8	gravels (outcrop?)	
g139	300.1	0.12	-1.52	312.2	flat bed (sediment)	
g140	245.8	1.49	2.55	250.9	flat bed with rich organism	
g141	40.5	-0.23	4.6	28.9	flat bed with gravels	
g142	277.5	0.58	8.5	277.2	rippled bed	47.2
g143	237.1	-0.65	0.87	268.6	flat bed with gravels	
g160	212.2	0.21	4.79	207.3	flat bed (sediment)	
g162	38.6	0.71	1.11	42.8	flat bed (sediment)	
g164	317.8	53.61	-11.05	315.6	outcrop	
g165	246.4	1.35	1.35	267.3	outcrop with rich organism	
g188	11.3	-0.45	2.43	341.2	flat bed with burrows	
g190	77.5	0.94	6.54	98.6	flat bed with burrows	
g197	0.9	3.28	-2.93	3.1	rippled bed	168.1
g222	340.2	1.5	0.45	325.3	flat bed (sediment)	
g223	190.3	-0.35	2.02	184.9	flat bed (sediment)	
g224	151.5	1.95	2.61	148.1	rippled bed	137.1



第2図 調査海域における主たる底質の分布. 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作成した. 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. 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.

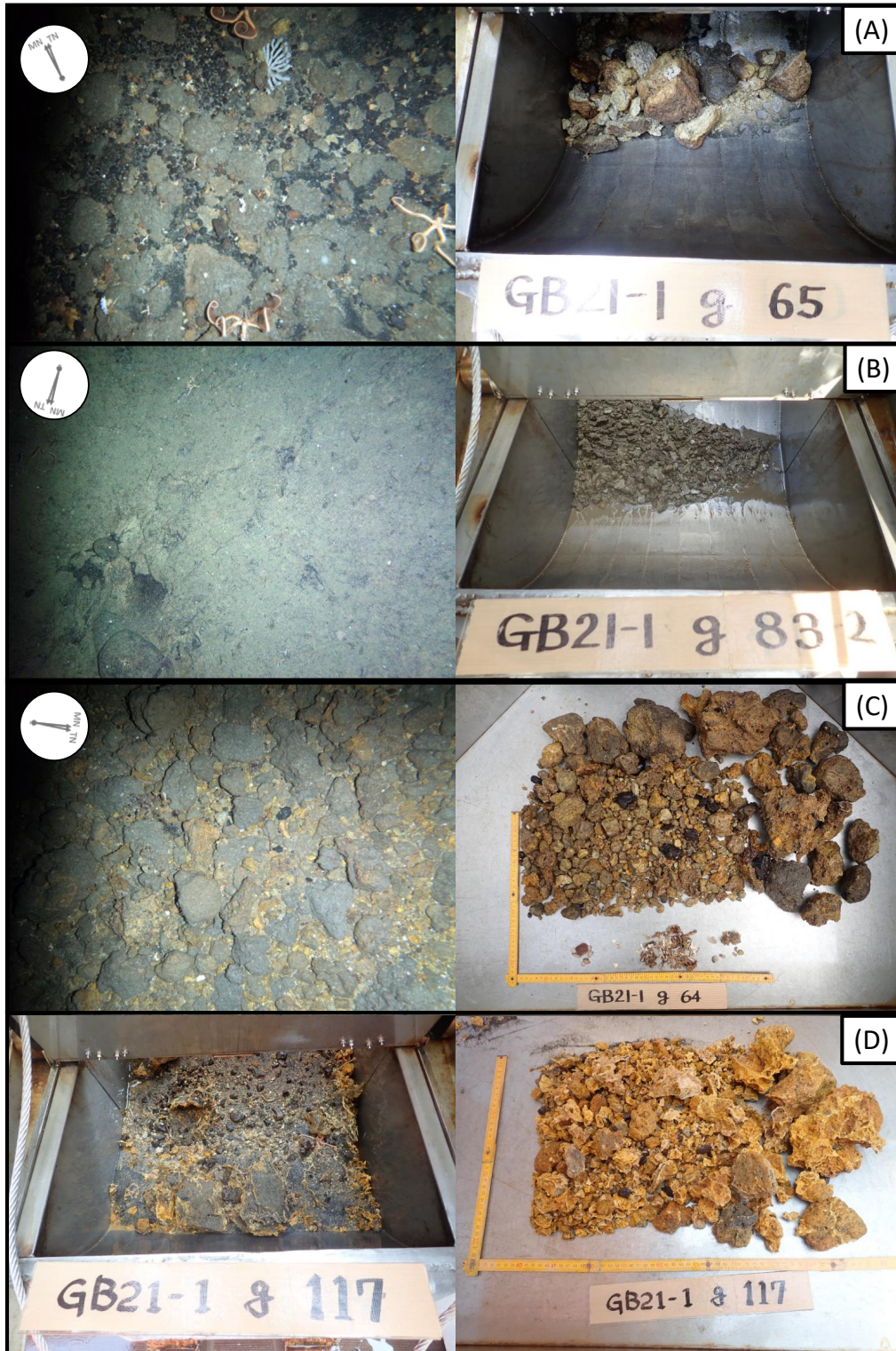
Fig. 2 The distribution of major sediment types in the survey area of GB21-1 cruise. Major sediment types are classified mainly based on the visual core description of sub-core samples and observation of seafloor photos. Red arrows and their directions indicate positions and directions of rippled beds. The orange and black dashed lines indicate the areas where pumice and dark-colored rock fragment deposits are found, respectively.

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(サメの歯など)などが採取された. 俵曾根東方のサイトg142では, 火山性碎屑物に匹敵する量の生物遺骸(主に翼足類の殻から構成される)が得られた(第4図D). 砂質堆積物が採取された地点のうち, 濁り曾根東側斜面から大島新曾根西側斜面にかけての5地点(サイトg22, g39, g40, g41, g43), 小島島北方の1地点(サイトg142), 諏訪之瀬島周辺の2地点(サイトg197, g224)ではリップル

が観察された(第2図). リップルはその峰に対して非対称な断面形状を持っていた. 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)は傾向として海域の東西で異なっており, より西側の地点(g39)では北北西, 中間的な位置(g40, g41, g142)では東北東向き, さらに東側(g22, g43, g197, g224)では南南東-南東向きの傾向を持つ.

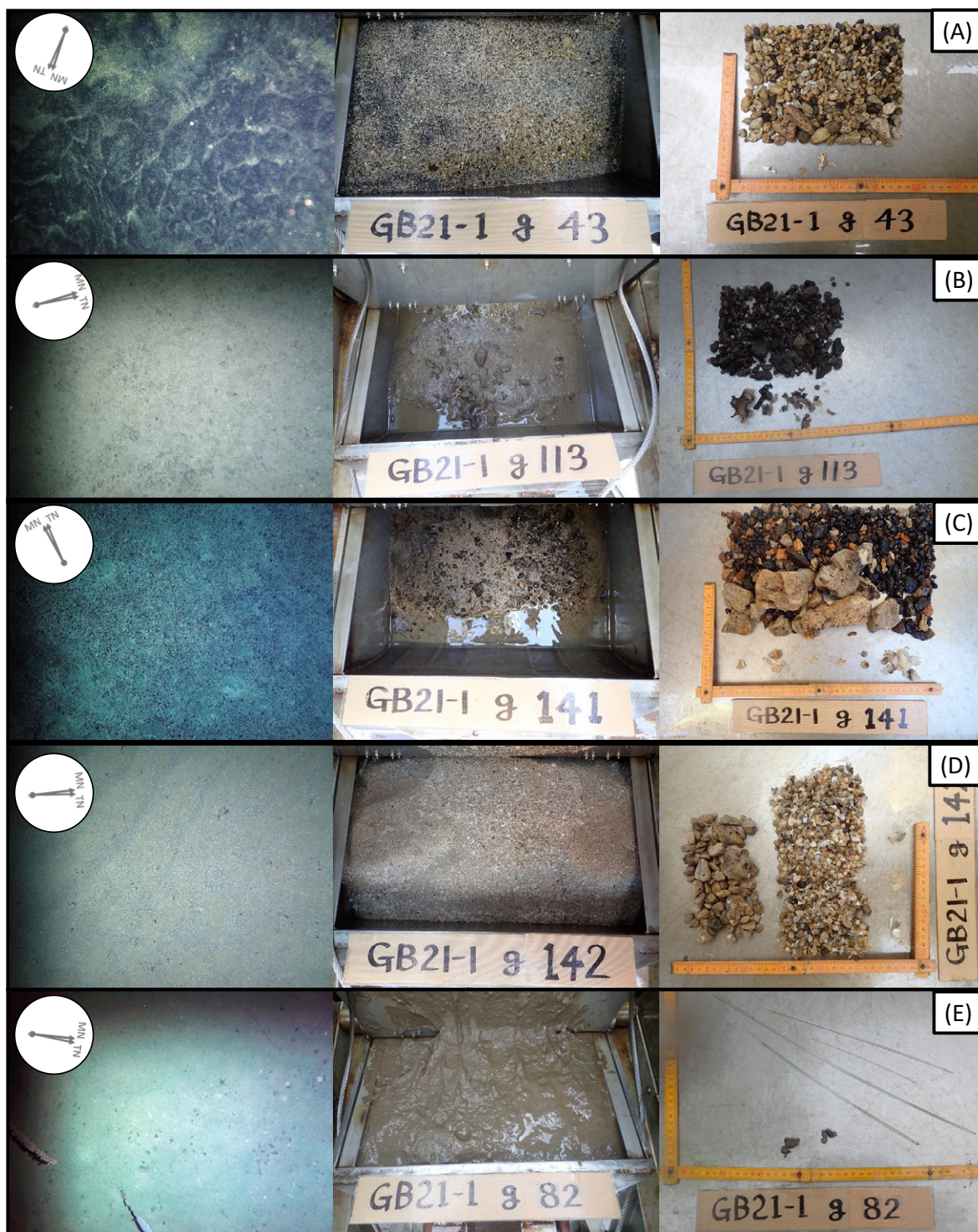
3.4 泥質堆積物

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18地点が泥質堆積物と分類された. また柱状試料を採取した2地点についても泥質堆積物が採取されたため, これらを含む20地点について本節で一括して記載する. 泥質堆積物を得た20地点のうち19地



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。(A)(B)露頭と認定されたサイトg65, g83の海底写真及びグラブ表面写真。(C)礫質堆積物と認定されたサイトg64の海底写真及び5mmメッシュで洗浄後の残渣写真。(D)礫質堆積物と認定され、明褐色に変質したパミス質礫を主成分とするサイトg117のグラブ表面写真及び5mmメッシュで洗浄後の残渣写真。

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). (A)(B) Seafloor photos and grab surfaces of site g65 and g83, classified as the outcrop. (C) A seafloor photo and residues (>5 mm) of site g64, classified as gravels. (D) Grab surface and residues (>5mm) taken on the site g117. The major component of site g117 is crushed pumice gravels with their color turning to bright brown.



第4図 砂質堆積物、泥質堆積物と認定された地点の海底写真、グラブ表面写真及び5mm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)~(D)砂質堆積物と認定されたg43, g113, g141, g142の写真。それぞれ残渣写真に観察できるように、パミス質、暗色岩片質、パミス質と暗色岩片質の混合、生物源碎屑物を主要な粒子組成とする。(E)泥質堆積物と認定されたg82の写真。海底写真上に巣穴や底生生物が観察され、残渣として海綿骨針が採取された。

Fig. 4 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)–(D) photos taken on sites g43, g113, g141 and g142, classified in their major sediment types as sand. Residues indicate that their major components are pumice, dark-colored rock fragments, the mixture of these two, and bioclasts. (E) photos taken on the site g82, classified in the major sediment types as mud. Burrows and benthos are found in the seafloor photo. Sponge spines are collected as residues (>5 mm).

点は、水深800 mよりも深い地点から採取された。このうち17地点は横ガン曾根、白浜曾根、宝島に囲まれた海盆から沖縄トラフに向かう平坦な海底に分布しており、2地点は奄美舟状海盆からトカラ海底谷に向かう、宝島東方の海盆の西淵部に位置する。泥質堆積物を得た地点のうち水深が800 mよりも浅かったのはグラブ採泥サイトg115 (水深614 m)のみである。ただし、水深800 m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岩相として認定された地点もある。

泥質堆積物を得られた地点の海底写真では、エビ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。また肉眼観察でも粒径がパッチ上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(第4図E)。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。5 mm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、パミス質ないし暗色岩片質の礫や海綿骨針が多くの地点で採取され、一部の地点では魚類の歯や耳石なども観察された(第4図E)。

本調査において、柱状試料を2地点で採取した。柱状試料採泥サイトc05は横ガン曾根、白浜曾根、宝島に囲まれた海盆に位置し、コア長227 cmのグラビティコア試料及びコア長25 cmのアシュラ試料を採取した(第5図)。このコア試料は主に粘土質シルトから構成され、深度95 ~ 102 cm、深度189 ~ 224 cmには極細粒砂質シルト層が挟在する。また最下部の深度224 ~ 227 cmは火山灰質の極細粒砂層である。それ以外にもコア全体にわたり極細粒砂のパッチを多く含む。CT像観察によれば、コア最上部から深度185 cmまでは生痕が発達する様子が観察され、それより下位では生痕の発達は弱い。深度106.5 ~ 106.8 cm及び深度108.9 ~ 110.6 cmにシルト~中粒砂サイズの火山灰層が存在する。

柱状試料採泥サイトc11は沖縄トラフ北縁部に位置し、コア長389 cmのグラビティコア試料及びコア長35 cmのアシュラ試料を採取した。このコア試料はほぼ全て火山灰や浮遊性有孔虫遺骸を含むシルト質粘土で構成されており、380 ~ 389 cmには火山灰質の極細粒砂質シルト層が見られる。極細粒砂質シルト層の上位10 cmには上方細粒化の傾向が観察できる。コア最上部から深度190 cmまでは生痕が発達する様子が見られる(第6図)。これより下位では生痕の発達は弱く、CT画像及び軟X線像では不明瞭な層状構造が観察される。また深度160.0 cm、195.5 cm、310.8 cmには火山灰質の薄層が認められる。その他肉眼では認定できなかったが周囲よりも高密度(X線透過度が低く、CT画像上では白く見える)な薄層が数枚見られた。

以上に述べた20地点の他、諏訪之瀬島南西沖のサイトg197 (主たる底質としては中粒砂質に分類)では、最表層の砂質堆積物の下位に厚さ5 cm程度の極細粒砂から泥質の堆積物が見られた。この堆積物の詳細は4.3節で検討する。

3.5 コケムシ試料分析結果

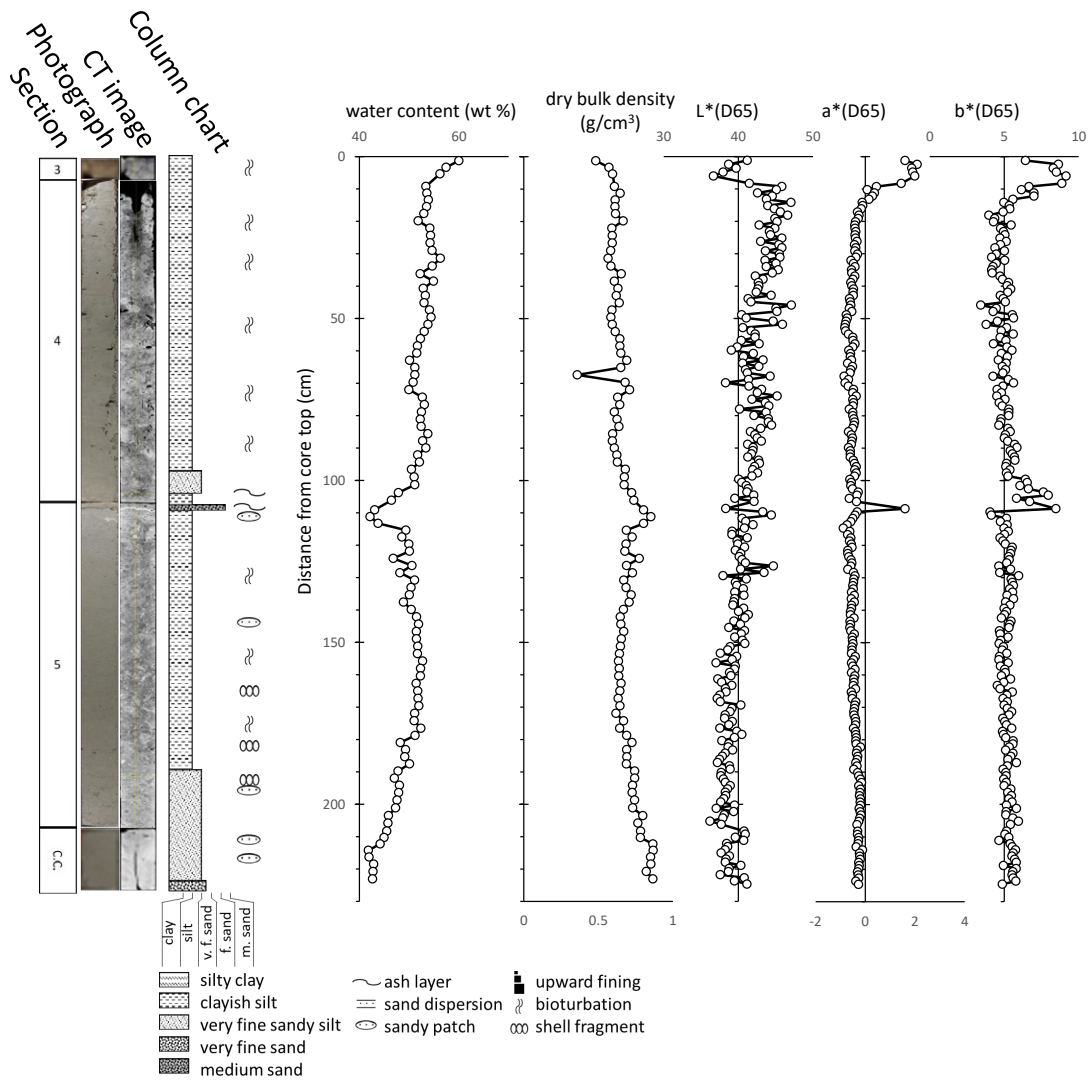
サイトg39 (中粒砂質、水深657 m)では、18属5種のコケムシ類を識別した。多くが変色・摩耗して保存の悪い状態であるため、種レベルまでの同定は困難なものが多数を占めた。コケムシ骨格が堆積物中に占める重量は、2.9%であった。また、採泥時の観察ではサイトg140 (粗粒砂質、水深222 m)とサイトg165 (露頭、水深173 m)にコケムシ骨格が豊富に含まれていたものの、試料の全体量が少なかったため、コケムシ用試料の分取、分析は実施していない。

3.6 浮遊性有孔虫分析結果

本調査海域の8試料(第7図a)から産出した浮遊性有孔虫は13属29種である。10%以上の頻度を示す種は*Globigerinita glutinata* (Egger), *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny), *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), *Pulleniatina obliquiloculata* (Parker and Jones), *Globigerina bulloides* d'Orbigny, *Trilobatus sacculifer* (Brady)の6種である(第7図b~g)。またこれらの種に加え、*Globigerina falconensis* Blow, *Turborotalita quinqueloba* (Natland), *Globigerinoides tenellus* Parkerと*Globoconella inflata* (d'Orbigny)が最大4~9%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*, *G. ruber*, *G. bulloides*と*N. dutertrei*の4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。

3.7 イシサンゴ類分析結果

採泥を行った61地点(水深173~1169 m)のうち17地点でイシサンゴ類が採集された(第8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473~868 mであった。採集されたイシサンゴ標本を検討した結果、13科17属17種が同定された(第3表)。採集されたイシサンゴは全てが骨格遺骸であった。本調査域内において採集されたイシサンゴの種数が最も大きかった地点はサイトg38 (水深489 m)であり、10属10種が採集された。採集されたイシサンゴの個体数が最大であったのはサイトg24 (水深473 m)であり、29個体確認された。サイトg224 (水深416 m)は有光層以下の水深であるが、有藻性イシサンゴ(*Merulinidae* gen. et sp. indet)が1群体採集された。また、ヒドロサンゴ類Family *Stylasteridae* (Cnidaria: Hydrozoa: Anthoathecata: Filifera)はサイトg24, g38, g39, g42, g222から採集され、特にサイトg38では多量



第5図 グラビティコア試料c05の断面写真, CT像, 柱状図及び, 含水率, 乾燥かさ密度, 測色計で得た L*a*b*の測定値.

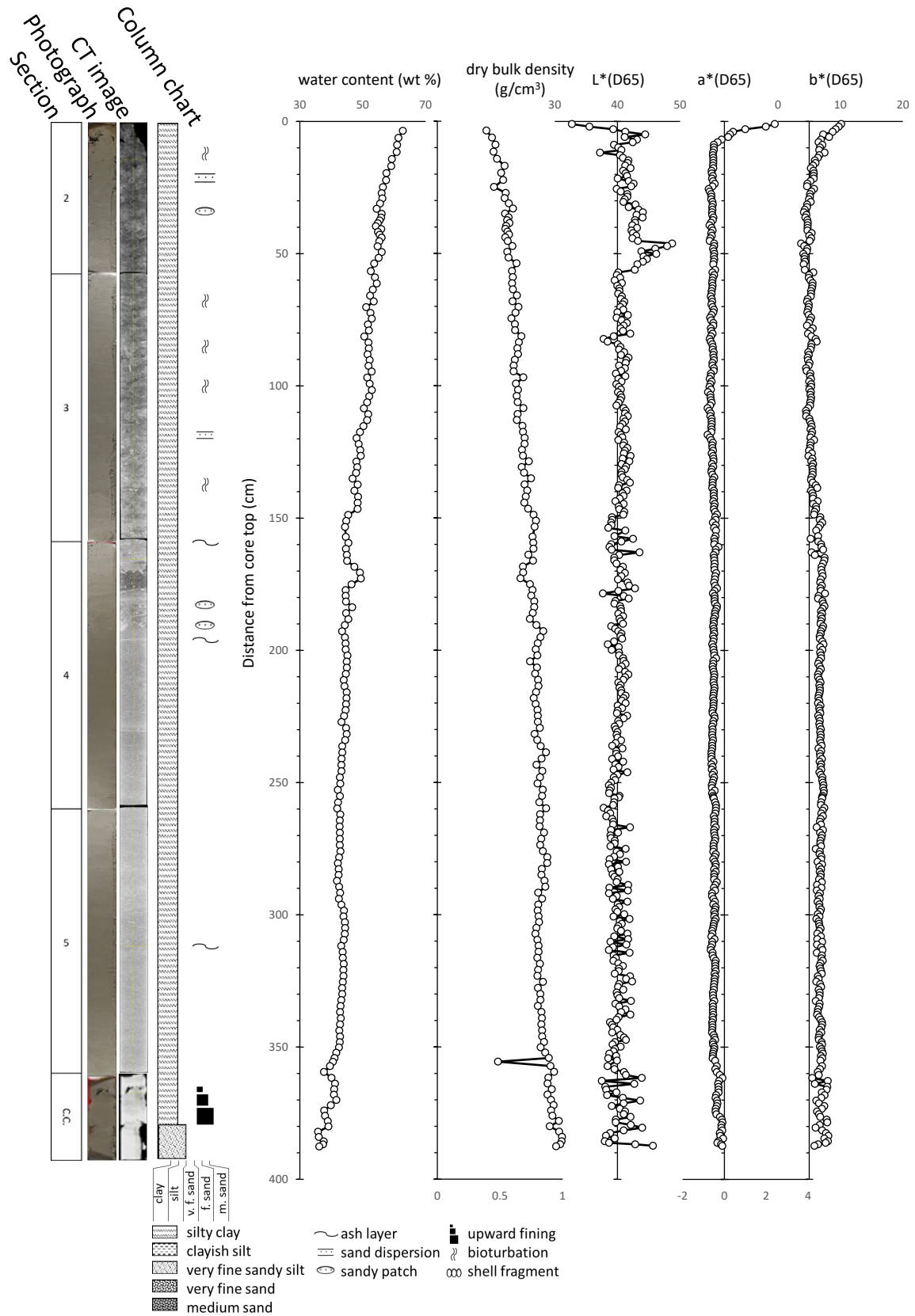
Fig. 5 Cross-sectional photograph, CT image, column chart, water content (wt%), dry bulk density (g/cm³) and L*-a*-b* values obtained by colorimeter CM-600d of the gravity core sample c05.

のヒドロサンゴ類が確認された。採集されたヒドロサンゴは、そのほとんどが骨格表面が赤褐色に変色していたが、g38においては保存の良い骨格も採集された。また、g114, g140, g165における海底写真では海綿動物に混じり、ヒドロサンゴが礫に固着している様子が、さらにサイトg114では海底表面にヒドロサンゴ類と思われる遺骸が大量に集積している様子が認められた。八放サンゴ類はトクササンゴ科Family Isididae (Cnidaria: Anthozoa: Octocorallia: Alcyonacea)と考えられる骨軸の一部がサイトg24, g42, g222から採集された。また、サイトg23, g24, g63, g85, g89, g107, g114, g164の各海底写真においては、生体の八放サンゴ類が認められた。サイト

g24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3群体認められた。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 $328.7 \pm 4.0^\circ$ (mean \pm SE; N = 3)と、ほぼ北北西-南南東方向であった。

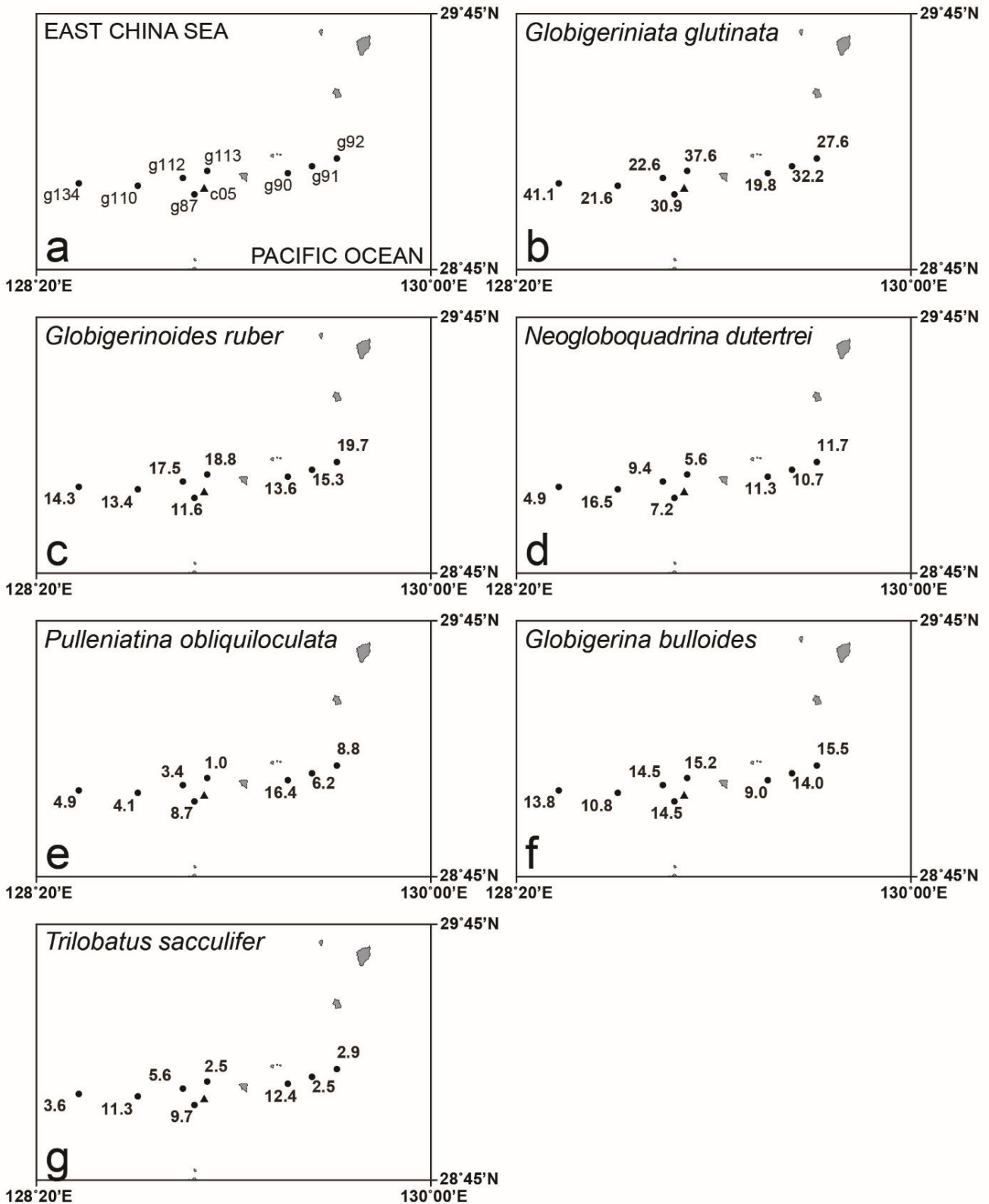
4. 議論

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した後、諏訪瀬島南西方で採取した特徴的な砂泥互層堆積物についてその成因を検討する。



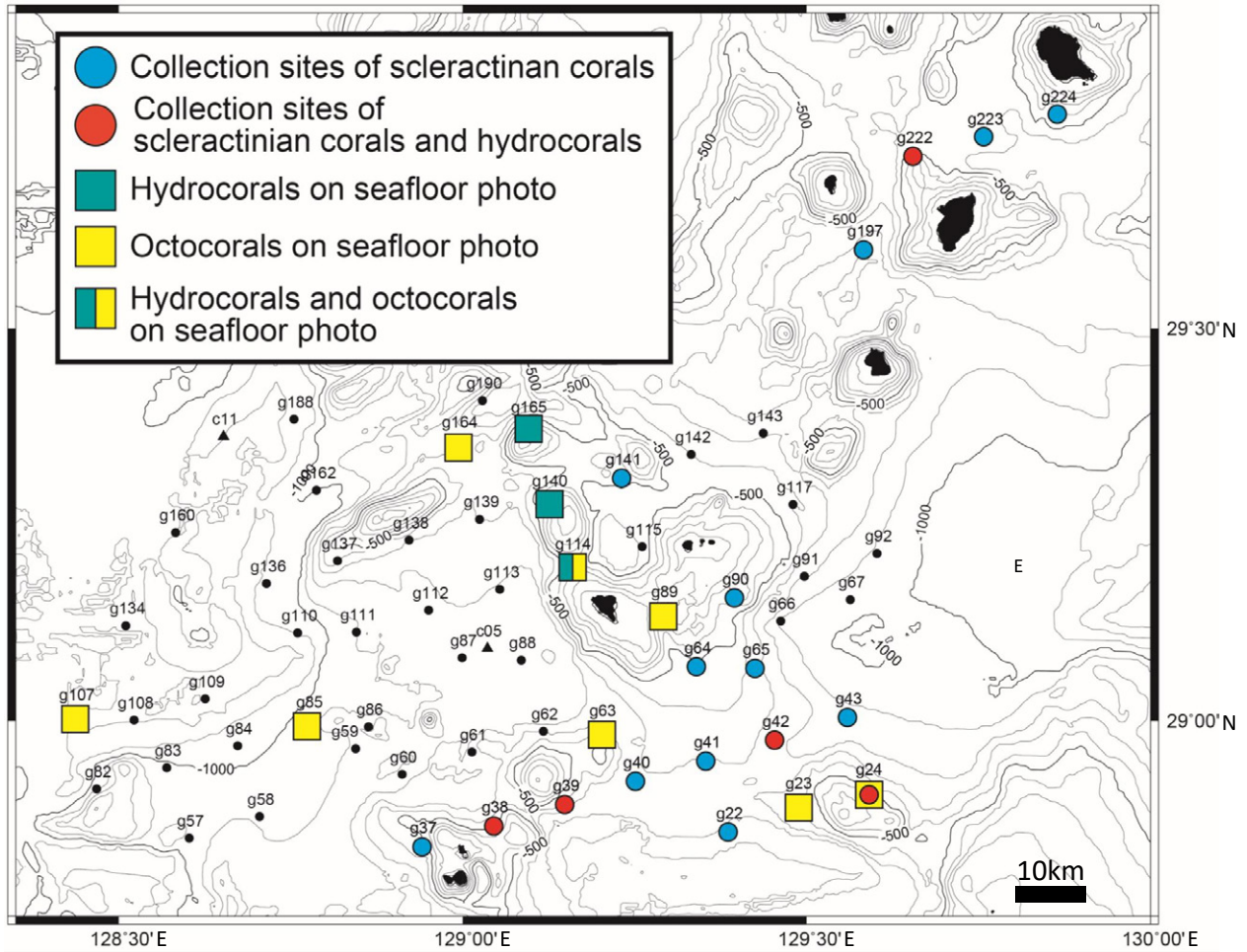
第6図 グラビティコア試料c11の断面写真, CT像, 柱状図及び, 含水率, 乾燥かさ密度, 測色計で得たL*a*b*の測定値.

Fig. 6 Cross-sectional photograph, CT image, column chart, water content (wt%), dry bulk density (g/cm³) and L*-a*-b* values obtained by colorimeter CM-600d of the gravity core sample c11.



第7図 宝島周辺海域における表層堆積物のうち浮遊性有孔虫分析実施地点 (a) と浮遊性有孔虫の相対頻度分布 (b ~ g). b ~ gの数値は各試料中の産出頻度 (%) を示す.

Fig. 7 The distribution of six major planktic foraminifera around Takarajima Island. (a) Sampling points of K-grab. (b)-(g) Relative abundance (%) of major planktic foraminifera.



第8図 GB21-1航海でサンゴ類が採集されたサイト(丸印)及び海底写真でサンゴ類が確認されたサイト(四角印)。

Fig. 8 Map of the survey area of GB21-1 cruise with localities where corals were collected (open circles) or identified (open squares) on seafloor photos.

4.1 底質分布の規定要因1：島嶼部及び海底地形

本調査海域において、主たる底質として泥質堆積物は水深614～1169 m、細粒砂質堆積物は水深705～932 m、中粒砂質堆積物は水深416～868 m、粗粒砂質堆積物は水深222～1071 m、礫質堆積物は水深323～714 m、露頭は水深173～1014 mの範囲で確認された。泥質堆積物はサイトg115(水深614 m)を除くと全てが水深800 m以上の水深に位置する。サイトg115は宝島、小宝島及び白浜曾根、俵曾根に囲まれた小規模な凹地内に位置しており、局所的に他の地点と異なる堆積環境を形成していると考えられる。

それぞれの底質は、粒径が小さくなるにつれ分布する最も浅い水深は深くなる傾向にあるが、それぞれの底質が分布する最も深い水深は粒径と明瞭な関係性が見られない。すなわち、「細粒物質は深い水深にしか堆積分布しないが、粗粒物質は水深を問わず分布する」のが本

海域の特徴である。ただし、主たる底質として露頭、礫、粗粒砂が観察された地点は海域全体に散在しているわけではなく、宝島、小宝島、俵曾根、中ノ曾根、白浜曾根及び中ノ曾根から横ガン曾根に連なる尾根を形成する地形的高まりの周縁部、濁り曾根周辺の地形的な高まり、西横当海丘東側斜面など、海丘や海底火山の周辺部に局所的に存在している。こうした粗粒物質の分布を規定する要因の一つとして考えられるのは、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である。これらの地形を構成するのは火山、海底火山やサイトg83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。ただしパミス質の礫は黄色から褐色がかかった変質を受けているものが多く、異地性のものである可能性もある。

GB21-1 航海における表層採泥調査結果 (鈴木ほか)

第3表 GB21-1 航海で採集されたイシサンゴ類のリスト.

Table 3 List of coral species with sampling sites

ORDER	
Family	
Species	Collection locality (St.)
SCLERACTINIA	
Meruliniidae	
gen. et sp. indet.	g224
Fungiacyathidae	
<i>Fungiacyathus (Fungiacyathus) paliferus</i> (Alcock, 1902)	g24, g222
<i>Fungiacyathus (Bathyactis) turbinolioides</i> Cairns, 1989	g22, g40, g41, g197
<i>Fungiacyathus</i> sp.	g141
Micrabaciidae	
<i>Letepsammia formosissima</i> (Moseley, 1876)	g24, g90, g141
<i>Stephanophyllia fungulus</i> Alcock, 1902	g38, g224
Anthemiphylliidae	
<i>Anthemiphyllia dentata</i> (Alcock, 1902)	g38
<i>Anthemiphyllia</i> sp.	g24
Oculinidae	
<i>Madrepora oculata</i> Linnaeus, 1758	g38, g64
<i>Madrepora</i> sp.	g43
Deltocyathidae	
<i>Deltocyathus vaughani</i> Yabe & Eguchi, 1937	g24, g38
<i>Deltocyathus heteroclitus</i> Wells, 1984	g141, g222
<i>Deltocyathus stella</i> Cairns & Zibrowius, 1997	g38
<i>Deltocyathus</i> cf. <i>taiwanicus</i> Hu, 1987	g37, g40, g64
<i>Deltocyathus</i> sp.	g24, g39, g141
Caryophylliidae	
<i>Caryophyllia (Caryophyllia)</i> sp.	g24, g42, g224
<i>Caryophyllia (Caryophyllia)</i> cf. <i>marmorea</i> Cairns, 1984	g24
<i>Conotrochus</i> ? sp.	g24
<i>Goniocorella dumosa</i> (Alcock, 1902)	g223
Turbinoliidae	
<i>Cyathotrochus pileus</i> (Alcock, 1902)	g24
<i>Deltocyathoides orientalis</i> (Duncan, 1876)	g38
<i>Idiotrochus kikutii</i> (Yabe & Eguchi, 1941)	g24, g38
Gardineriidae	
<i>Gardineria</i> ? sp.	g24
Stenocyathidae	
<i>Stenocyathus vermiformis</i> (Pourtalès, 1868)	g64
<i>Truncatoguynia irregularis</i> Cairns, 1989	g38, g222
Flabellidae	
gen. et sp. indet.	g38
<i>Flabellum (Flabellum) pavoninum</i> Lesson, 1831	g38
<i>Flabellum (Flabellum)</i> sp.	g90
<i>Flabellum (Ulocyathus)</i> sp.	g90, g224
<i>Flabellum</i> sp.	g24, g39
<i>Truncatoflabellum</i> cf. <i>vigintifarium</i> Cairns, 1999	g37
<i>Truncatoflabellum dens</i> (Alcock, 1902)	g38
<i>Truncatoflabellum</i> sp.	g39, g40
<i>Rhizotrochus</i> sp.	g43
Dendrophylliidae	
<i>Balanophyllia</i> sp.	g224

すでに海丘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(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マイル)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。

4.2 底質分布の制御要因2：黒潮に伴う底層流

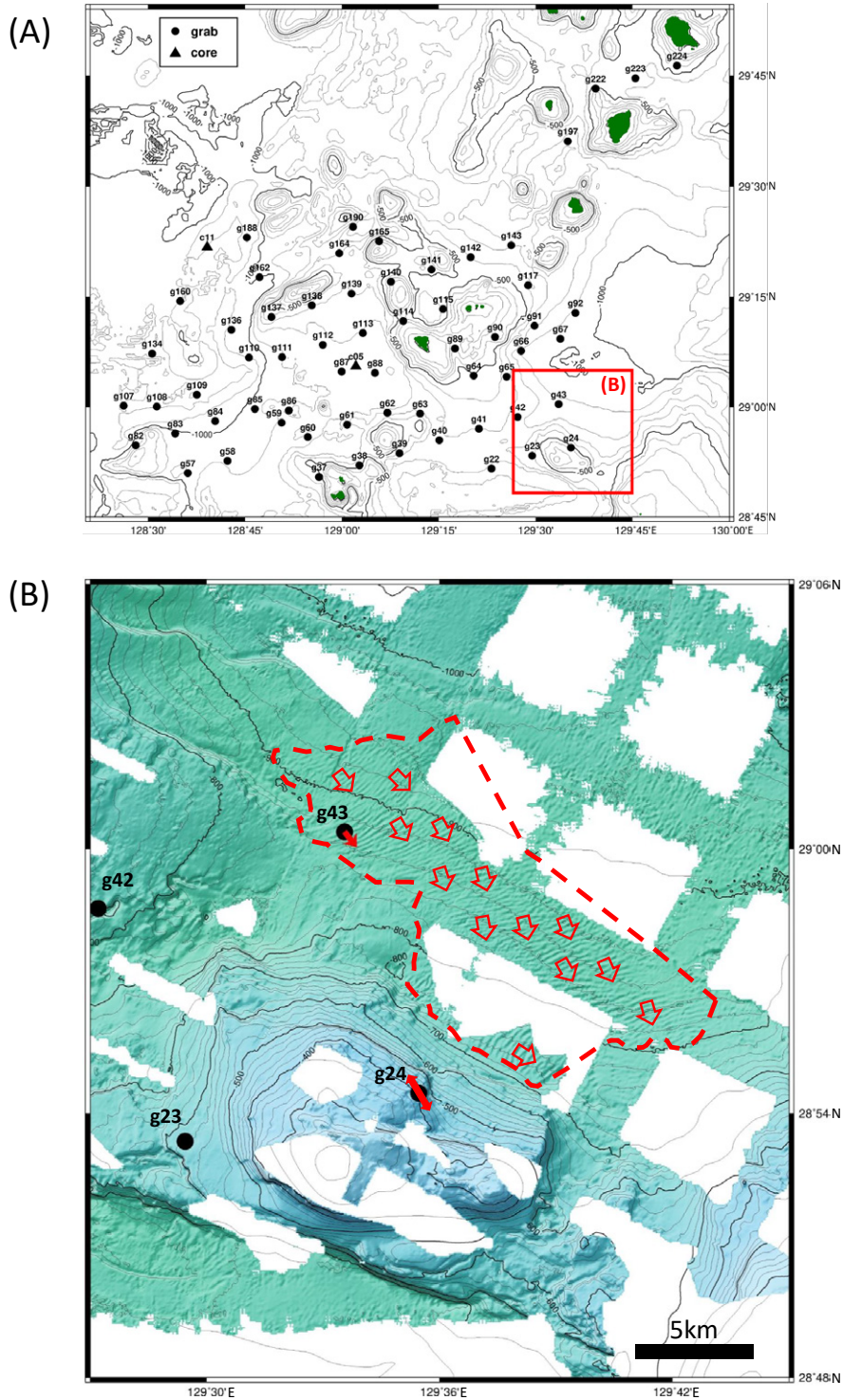
砂質堆積物の章で記述した通り、濁り曾根、奄美舟状海盆、大島新曾根にかけての海底と、諏訪之瀬島周辺、俵曾根東方の計8地点においてリップルが観察された。これらのリップルが観察される地点の水深は、g22が823 m, g39が657 m, g40が702 m, g41が705 m, g43が861 m, g142が583 m, g197が868 m, g224が416 mとなっている。この水深では潮汐の影響は考えにくく、また前述したようにリップルの形状が非対称性を持つ。従ってこれらのリップルはいずれも、潮汐によるウェーブリップルではなく、底層流により形成されたカレントリップルと考えられる。リップルが観察される地点は水深500～800 mに集中しており(第2図, 第2表)、これらの水深では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。リップルが観察される地点近傍でより水深が浅い地点では、主たる底質として露頭や礫質堆積物が多く観察された。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、ほぼ無堆積ないし侵食作用が卓越する場となっていると考えられる。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, 2022)及びSBPによる浅層音波探査の結果(三澤・鈴木, 2022)によれば、大島新曾根の北東側斜面には東西方向約18 km, 南北方向約11 kmの範囲にわたり、波長200～300 m, 振幅1 m程度のサンドウェーブの発達認められる(第9図)。サンドウェーブの形状から推定される流向はおおむね南東から南南東で、大島新曾根北東の急斜面付近では等深線と平行であり、等深線に沿う底層流が存在することを示唆する。

海域を北北東-南南西に縦断しているトカラ列島の一部である宝島及び周辺の高丘において、コケムシ類など生物遺骸の産状や分布などの分析結果も黒潮やそれに伴う底層流の強い影響を示唆しているため、以下に列挙する。

コケムシ類の分析を実施したg39(水深657 m)に含まれるコケムシ骨格の含有率2.9%は、この水深においては高い部類と言えるが、多くが変色・摩耗して保存の悪い状態であった。この地点ではサンゴ類もコケムシ類と同様、骨格表面が変色摩耗しており、骨格の一部が破損しているなど保存は悪かった。こうした特徴は、これらの生物遺骸が異地性または長期間海底に露出していたことを示している。これは本地点において海底面にリップルが観察されたこととも整合的である。本調査航海の採泥地点は大半が300 m以深であり、コケムシ類はこのような水深では元々少ない傾向がある。一方、水深が100～300 mで、底質が中粒砂～細礫のような地点においてもコケムシ類は検出されなかった。通常、このような環境ではコケムシ類が含まれる可能性が高いが、未検出の要因として①底層の流速が大きい、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。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、堆積物に埋められると生存不可となるためである。水深100～200 m台の採泥点はその多くが露頭ないし礫質堆積物と認定されていることから、コケムシ類の未検出は①底層の水流速度が大きいことに起因すると考えられる。

また、浮遊性有孔虫の検討を実施した試料の群集は、いずれも亜熱帯から漸移帯を特徴づける種群(Bé, 1977)によって構成されているが、黒潮を特徴づける*N. duertrei*や*P. obliquiloculata*(Xu & Oda, 1999など)が宝島東方のサイトg90, g91, g92でも多産する。この傾向は、本調査海域では太平洋側(南西諸島東側)にまで黒潮の影響がおよんでいることを示唆している。

サンゴ類はサイトg24(水深473 m)及びサイトg38(水深489 m)で多産した。とくにサイトg24の海底写真では、その海底表面に礫なども数多く認められ、平面的な樹状形態を示す生体の八放サンゴ3群体が礫上に固着している様子も認められた。それら3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ほぼ北北西-南南東方向を示した。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g24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、北北西-南南東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g24を含む地形的高まりの北東側斜面下では、前述した通りサンドウェーブの形状から等深線に沿う北西から南東向きの底層流(等深線流)の存在が示唆され、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と整合的である。サイトg24はサンドウェーブの形成領域よりも水深が浅く、より強



第9図 (A) 調査範囲図。 (B) 大島新曾根周辺でGB21-1航海及びGK20航海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, 2022)。大島新曾根北東側の斜面, 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。赤矢印はサイトg43で観察されたカレントリップル形態及びサイトg24の海底写真のサンゴの方向から推定される流向。

Fig. 9 (A) Index map. (B) Seafloor shaded topographic map acquired by a multibeam echo sounder during GB21-1 cruise and GK20 cruise around Oshima-Shin Sone. On the northeastern slope of Oshima-Shin Sone, surrounded by the red dotted line, Sand waves are prominent. Red open arrows indicate flow directions estimated by the form of sand waves. Red arrows indicate the flow directions estimated from the form of rippled bed observed at site g43 and from the orientation of coral observed at site g24.

い流れが生じていると推定されるが、八放サンゴにおいては、流速が0.2 m/sec程度の流れであっても、一方向流により供給されたプランクトンなどの餌を採餌可能である(Patterson, 1984)。これらのことから、サイトg24における強い底層流は、細粒な堆積物を堆積させないだけでなく、プランクトンやデトリタスなどをこの場に供給していると考えられる。そのため堆積物に脆弱なサンゴ類は、採餌のためにこの強い底層流や地形的な高まり上を活用して多数生息しており、その遺骸がサイトg24に集積している可能性がある。

採集されたイシサンゴ類の多様性が最も大きく、かつ保存のよいヒドロサンゴ類が多数採集されたg38(水深489 m)は、横当島と上ノ根海丘に挟まれた鞍部から連続する北側の谷の入り口付近に位置する。海底写真では、多数の礫が認められ、写真中央付近にイシサンゴ類の*Flabellum* sp.の骨格が認められる。この骨格は骨格に色彩が残り、摩耗などはあまり認められないため、死後あまり時間が経過していないと推測される。また採集されたヒドロサンゴ類の中にも保存の良いものが存在した。また、サイトg38で採集されたヒドロサンゴ類は全て固着性であり、生息には海底面に露出する礫や露岩などの硬底質が必要となるが、海底写真からサイトg38においては海底面に多数の露出した礫が認められ、ヒドロサンゴ類の固着基盤となりうると考えられる。採集試料においても本サイトの東に隣接するサイトg39では、海底面のリップルから、南から北に向かう底層流の存在が推定される。サイトg38においても同様の流向となるならば、地形的に狭く通路状となる鞍部に、ある程度強い流れが生じ、サンゴの成長を支えるプランクトンやデトリタスなどが供給される。また、鞍部における南から北向きの底層流を想定するならば、サイトg38地点は、鞍部全域に生息していたサンゴ類の遺骸や、サイトg38の東西にある両方の地形的高まりから鞍部に移動したサンゴ遺骸が、北向きの流れによって運搬・掃き寄せられ、谷の入り口であるサイトg38に集積した可能性も考えられる。いずれにせよ、遺骸が多数集積するためにはその供給源となる、多数の生体サンゴの生息が必須であるため、このサイトの周辺域には多くのサンゴが生息しているものと考えられる。

サイトg114では多数のヒドロサンゴ骨格が海底に堆積している様子が海底写真より認められた。このサイトg114も南側に位置する宝島と北側の白浜曾根の間に位置する地形的鞍部であり、サイトg38と同様に、この両地形的高まり上もしくは鞍部に生息する多数のヒドロサンゴ類が死後に集積している可能性が高い。

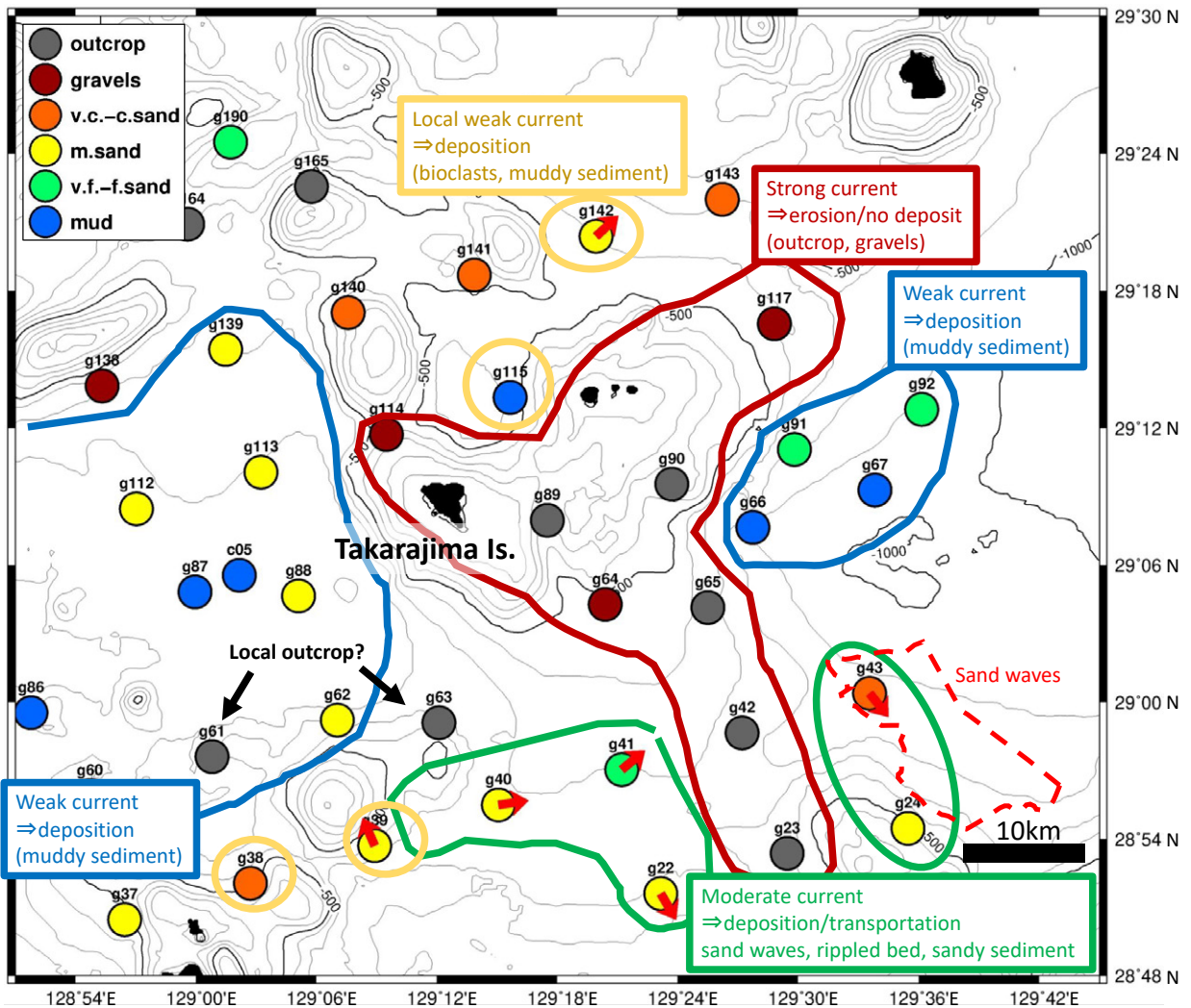
本地域においては、多くのサイトでサンゴの固着基盤となりうる露岩や礫が確認されるが、サンゴ類が多産するサイトは限定的である。このことは、この地域に生息するサンゴ類の個体数の増加や多様性の増加に底層流に

よる餌の供給が重要な役割をはたしていることを示唆する。

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北西側から南東側に通過する方向を示しており、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。

また、リップルが観察された地点には、コケムシ類が多く検出された濁り曾根南方のサイトg39、火山性碎屑物に匹敵する量の生物遺骸(翼足類をはじめとする軟体動物が主)が採取された俵曾根東方のサイトg142と中之島南方のサイトg224も含まれる。こうした特徴的な堆積物組成は、底層流に伴って特定の流体力学的性質を持つ粒子(これらの地点の場合は、比較的サイズが大きく密度が低い生物源碎屑物)が移動し、狭い範囲に濃集している可能性を示唆する。また、諏訪之瀬島北方のサイトg224(水深416 m)は有光層以下の水深であるが、有藻性イシサンゴ(*Merulinidae* gen. et sp. indet.)が採集された。有藻性サンゴは体内に共生する褐虫藻が光合成を行うため、本来は日光が届く浅海域にのみ生息する。そのため、サイトg224には、有藻性イシサンゴ骨格遺骸などを含んだ浅海域の堆積物も移動し堆積していると推測される。以上のような堆積構造や堆積物組成から、黒潮を起源とする強い底層流は、堆積構造や粒径分布だけでなく、粒子組成に対しても力学的に大きな影響を与えていると考えられる。

本調査で底質情報を取得した主要範囲である宝島周辺について、ここまで述べたような堆積構造や堆積物組成は黒潮の蛇行に関連して下記のような一連の解釈ができる(第10図)。①黒潮は奄美大島北方からトカラ列島周辺海域を通過する際、北東向きから南東向きに急激に蛇行する。②このとき、南東向きに転じた黒潮流がぶつかるトカラ列島周辺の相対的に浅い水深では、底層流の流速が上昇して細粒物質は移動し、粗粒物質のみが残される堆積環境となる。③この際、流速が特定範囲の値を取ると、リップルなどの特徴的なベッドフォームが形成される(g22, g39, g40, g41, g142)。④底層流の障壁ないし影となる地点では、上流側と比べて局所的に低い流速をとり、運搬されてきた流体力学的に軽い生物遺骸や細粒



第10図 宝島周辺海域における底質、堆積構造の分布と、これらにより大局的に推定される底層流の強さ。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。

Fig. 10 The distribution of bottom sediment and sedimentary structures around the Takarajima Island. The strength of the bottom current estimated from these properties are also shown. Red arrows and their directions indicate positions of rippled beds and directions of bottom currents inferred from the form of the rippled beds.

物質が局所的に濃集した堆積構造を形成する (g38, g39, g115, g142)。⑤トカラ列島の稜線部では流速が最大値を取り、ほぼ無堆積の場となって露頭が卓越する底質となる (g23, g42, g64, g65, g89, g117)。⑥稜線部を通過した後、水深及び水路幅の増大とともに流速が低下する。⑦底層流の流速が低下してある値をとる範囲では、リップルやサンドウェーブなどのベッドフォームが形成される (g43 及び周辺海底地形)。⑧水深がさらに増加するとともに流速が低下し、細粒物質も堆積する環境となる (g66, g67, g91, g92)。こうした海峡部における底層流通過に伴う一連の堆積構造変化は例えば赤道太平洋のサモア水路などで直接観測が実施されている (Hollister *et al.*, 1974)。⑤に相当する無堆積ないし侵食場における底

層の流速は、サモア水路における観測では0.2～0.5 m/sec程度とされる。海面から海面下50 m程度の領域において、黒潮の大局的な流速は2～4ノット (約1～2 m/sec)程度と観測されており、流軸から南側に外れた宝島周辺海域では1ノット (約0.5 m/sec)程度である (日本海洋データセンター, 2021; 気象庁, 2021)。また、トカラ列島周辺海域で黒潮の流軸に近い口之島・中之島間の水深60 m以浅の海域では、海面から海底にわたり0.6～1 m/sec程度の流速が報告されている (小牧ほか, 2013)。トカラ列島横断時は水深が浅くなって海底面と黒潮の流軸がかなり接近し、局所的に高い流速となり得ること、一方で海底付近では海面よりも流速が低下することなどを考慮すると、宝島周辺の底質とサモア水路の底質との比

較から推測される底層流の最大流速(0.2～0.5 m/sec)は、黒潮に起因する底層流の流速としておおむね整合的な値と言える。ただし、海域により粒子の組成や密度は異なるため、本来は他地域での観測結果を単純に本海域に投影することは難しい。より正確な議論を行うためには底層における流速の直接観測などを実施する必要があるが、少なくとも黒潮の蛇行と島嶼部の通過に伴う流速の変化が本海域の堆積構造に大きく影響していることは明らかである。

GB21-1調査における採泥地点は多くが宝島周辺から西側に集中しているが、この海域は蛇行する黒潮に対して、やや流軸を外れた南側に位置している。今後調査範囲を海域東側、北側に広げ、例えば本調査において未探査の領域である悪石島、口之島、中之島周辺海域や、リップルの形状から示唆される流向の下流側に位置するトカラ海底谷上流の海盆において底質や堆積構造を調査することで、黒潮蛇行に伴う本海域特有の堆積環境とその空間分布をより詳細に解明できると考えられる。

4.3 サイトg197で得られた砂泥互層の成因

K-グラフによる採泥で得られた粒径分布は、その粒径や淘汰度において多様な特徴を示すが、鉛直方向の変化(サブコア取得範囲：最大20 cm程度)はおおむね均質(ϕ スケールで ± 1 程度：例えば、粗粒砂及び中粒砂)で、明瞭な堆積相変化は見られなかった。例外的に、諏訪之瀬島西方のサイトg197から得られたグラフ採泥試料には、サブコア試料でカバーする深度範囲内で大きな堆積相変化が認められたため詳しく記載し、成因を考察する。

サイトg197において撮影された海底写真、取得したグラフ試料から分取したサブコア試料(コア長12.3cm)の断面写真、CT像、サブコア表面のスケッチを第11図に示す。サイトg197の海底写真上ではカレントリップルが観察される。g197の最表層には、火山ガラス及び岩片主体で暗褐色の粗粒～中粒砂と、それよりもやや暗い中粒～細粒砂の互層が厚さ4.5 cmにわたり堆積する。粗粒砂層の下位には、極細粒砂質シルトで構成される黄灰色の泥質堆積物が厚さ5 cmにわたり認められる(コア深度4.5～9.0 cm)。粗粒砂層と極細粒砂質シルト層の境界は荷重痕のような構造が認められるが、この構造はサブコア試料の周縁部ではサブコア側面壁に沿っているため、有田式角柱容器を堆積物表面に押し込んだ際に引き起こされた人工的な変形であると思われる。この極細粒砂質シルト層の下部3 cm程度(コア深度6.0～9.0 cm)は、4～5 mm程度の周期性で繰り返される級化構造が認められる。極細粒砂質シルト層のさらに下位には、淘汰のよい火山灰質で暗灰黄色から暗褐色の極細粒砂層がサブコア試料の下端(コア深度12.3 cm)まで、約3.3 cm堆積する。この極細粒砂層も0.5～1 cm程度のスケールで異なる色の砂層が互層を形成している。

サイトg197の北東に位置する諏訪之瀬島は現在活発な噴火活動が継続している活火山である。とくに1957年以降は活発な活動が続いており、2020年は764回の爆発が観測されている(福岡管区気象台, 2021)。したがって、g197サブコア試料上部4.5 cm及び下部3.5 cmの砂層に多く含まれる火山ガラスは、近年の諏訪之瀬島噴火を主要起源とする可能性が高い。砂層の主要構成粒子を諏訪之瀬島起源と考えた場合、火山灰層に挟在する極細粒砂質シルト堆積物の成因として、次の2通りの仮説が考えられる。仮説①諏訪之瀬島噴火活動の停滞期に、島嶼部ないし周辺から比較的遅い速度で供給される陸起源細粒堆積物が、比較的長い時間をかけて堆積した。仮説②噴火活動により継続的に火山灰等の粗粒物質が供給される環境下において、イベント的に泥質物質が供給され、泥質な堆積相を形成した。

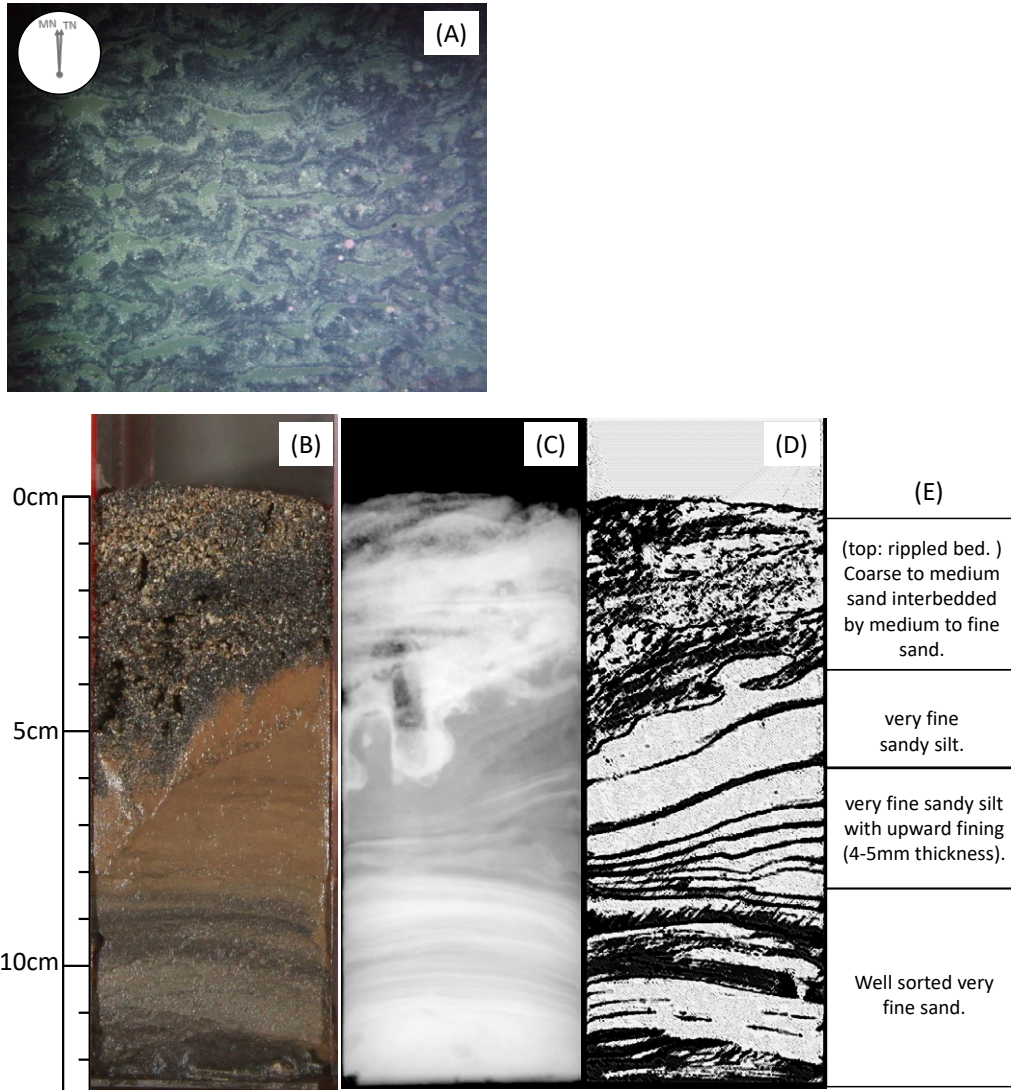
サイトg197はリップルの存在とその流向から、4-2節で主に検討した宝島周辺の各地点と同様に、蛇行する黒潮を主要因とする強い底層流の影響下にある地点と考えられる。したがって、仮説①で細粒堆積物が長時間をかけて堆積する前提となる、細粒物質がある程度の期間保持される静穏な堆積環境が安定的に存在したとは考えにくい。むしろ仮説②で述べるように、継続的に火山灰等の粗粒物質が供給される環境下においてイベント的に短時間で泥質物質が堆積し、高い堆積速度で供給され続ける火山灰等の粗粒物質によって上位を覆われることで底層流の影響から免れ、堆積物として保存された可能性が高い。リップルを形成する最表層の砂質堆積物の淘汰が良く、極細粒砂や泥などの泥質物質をほとんど含まないこともこの可能性を支持する。

今後、砂質堆積物、泥質堆積物それぞれの粒子組成や鉱物・元素組成、堆積年代を詳細に検討することで、それぞれの堆積物の主要起源を制約することができれば、この仮説を検証することができると考えられる。また、もし本堆積場における泥質堆積物が、島嶼部からの斜面崩壊や土砂流出などを起源とするイベント性堆積物であることが示されれば、本地点周辺でより長尺の堆積物コアを取得して泥質堆積物の産状を時系列で把握することで、過去のイベント堆積物や、その成因となった土砂流出現象の履歴を解明できる可能性がある。

5. まとめ

GB21-1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の南部において61地点での表層採泥、2地点での柱状試料採泥を実施した。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おり、柱状試料の分析によれば海底下約2 mまでの堆積物は強い生物擾乱を受けている。

礫質堆積物、露頭は必ずしも浅い水深のみに分布する



第11図 諏訪之瀬島南西方のサイトg197で取得された(A)海底写真と、グラブ試料より取得したサブコア試料の(B)断面写真、(C)軟X線像、(D)スケッチ及び(E)肉眼記載。

Fig. 11 (A) The sea bottom photograph acquired at site g197 southwest of the Suwanosejima Island, (B) cross-sectional photograph of sub-core sample acquired from grab sample, (C) soft X-ray image, (D) sketch and (E) visual core description.

わけではなく、宝島周辺を含む島嶼部周辺に加えて、横ガン曾根周辺や西横当海丘東側斜面など、深海底に存在する地形の高まりの付近にも分布しており、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、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500～800 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ほか、宝島周辺の海域を中心として、生物遺骸が濃集する地点が複数見られた。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と考えられる。本調査で主対象とした宝島周辺海域は、本海域で蛇行する黒潮の流軸からはやや南に外れた位置にあり、今後調査範囲を広げることで、黒潮蛇行に伴う底層流の影響範囲や堆積物の分布を網羅的に解明できると期待される。

諏訪之瀬島西方のサイトg197からは砂質堆積物と泥質堆積物の互層が採取され、本地点でもリップルが観察されていることから、泥質堆積物はイベント的に瞬時に堆

積したものである可能性が高い。今後粒子組成や堆積年代を詳しく検討することでこうした堆積物の成因を解明できる可能性がある。

今後はグラブ試料について粒度分析、粒子組成解析、生物群集解析などの定量分析を行い、堆積物の組成をより定量的に把握する。また柱状試料に関しては放射性炭素年代測定や火山灰層の同定を行って海域の典型的な堆積速度を把握し、表層堆積図作成のための情報を整備していく予定である。

謝辞:石塚 治氏, 山本浩万氏, 飯塚 睦氏, 池内絵里氏, 及川一真氏, 中野太賀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, 井上卓彦調査団長, 石野沙季氏, 高下裕章氏, 三澤文慶氏, 有元 純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コアリング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清家弘治氏, 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

- 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.
- Bé, A.W.H. (1977) An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In Ramsay, A.T.S., ed., *Oceanic Micropalaeontology*, **1**. Academic Press, London, 1–100.
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター鹿児島県地方気象台(2021) 令和2年(2020年)の諏訪之瀬島の火山活動。 <https://www.jma.go.jp/> (閲覧日: 2021年12月21日)
- 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
- Hollister, C. D., Johnson, D. A. and Lonsdale, P. F. (1974) Current-Controlled Abyssal Sedimentation: Samoan Passage, Equatorial West Pacific. *The Journal of Geology*, **82**, 275–300. doi:10.1086/627965
- 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。
- 板木拓也(2018) 超音波高度計によるK-グラブ採泥器の誤作動防止システム, 地質調査総合センター速報, no. 75, 143–146.
- 板木拓也(2015) 沖縄島北部周辺海域海洋地質図及び説明書, 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・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(1996) 琉球弧の第四紀古地理。地学雑誌, **105**, 259–285.
- 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) 50 m深の流速の実況図と30日先までの予想図 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/current_HQ.html (閲覧日: 2021年9月27日)
- Komaki, S. and Ebach, M. (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
- 小牧裕幸・山城 徹・城本一義・仁科文子・中村啓彦・広瀬直毅(2013) 海流発電適地選定のためのトカラ海峡周辺海域における黒潮調査。土木学会論文集B3(海洋開発), **69**, I_109–I_113. doi:10.2208/jscejoe.69.I_109
- 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.
- 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
- Minami, H., Oikawa, M. and Ito, K. (2014). Newly discovered submarine volcano near the Tokara Islands. *Report of*

- Hydrographic and Oceanographic Researches*, **51**, 145–151.
- 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.
- 日本海洋データセンター (2021) 海流観測データの統計値 (水平分布) https://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html (閲覧日: 2021年9月27日)
- Patterson, M. R. (1984) Patterns of whole colony prey capture in the octocoral, *Alcyonium siderium*. *The Biological Bulletin*, **167**, 613–629.
- 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
- Xu, X. and Oda, M. (1999) Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years. *Marine Geology*, **156**(1–4), 285–304. doi:10.1016/S0025-3227(98)00183-2

(受 付 : 2021年12月21日 ; 受 理 : 2022年7月7日)

宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境

板木 拓也^{1,*}・鈴木 克明¹・池内 絵里¹・及川 一真²・
片山 肇¹・飯塚 睦^{1,3}・鈴木 淳¹・高柳 栄子²

ITAKI Takuya, SUZUKI Yoshiaki, IKEUCHI Eri, OIKAWA Kazuma, KATAYAMA Hajime, IIZUKA Mutsumi, SUZUKI Atsushi and TAKAYANAGI Hideko (2022) Oceanographic environments around Takarajima Island and Suwanosejima Island. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 301-311, 8 figs and 1 table.

Abstract: CTD observations and bottom water samplings were conducted at a total of 61 sites in the waters surrounding the Tokara Islands during GB21-1 cruise (February 28 to March 30, 2021). The survey area is located in the pathway where the Kuroshio Current flows out from the East China Sea to the Philippine Sea, and is divided into the Kuroshio water, North Pacific Subtropical Mode Water, North Pacific Intermediate Water, and North Pacific Deep Water from the surface to the bottom. The surface layer around Yokoatejima Island is characterized by low temperature and high salinity, which is thought to be the effect of vertical mixing caused by topographic high. Off the east coast of Takarajima Island, a high turbidity layer with several tens of meters thick is observed near the seafloor, which is thought to be caused by sediment suspension due to currents on the seafloor.

Keywords: Tokara Strait, Kuroshio Current, North Pacific Subtropical Mode Water, North Pacific Intermediate Water, North Pacific Deep Water

要 旨

GB21-1航海(2021年2月28日～3月30日)において、トカラ列島周辺海域の計61地点でCTD観測と底層水サンプリングを実施した。調査海域は、黒潮が東シナ海からフィリピン海に流出する流路に位置しており、表層から底層にかけて、黒潮水、北太平洋亜熱帯モード水、北太平洋中層水、北太平洋深層水に区分される。横当島周辺の表層は低温・高塩分で特徴付けられ、これは地形的高まりによる鉛直混合の影響と考えられる。宝島東方沖では、海底付近に厚さ数十メートルの高濁度層が観測されており、海底面上の流れによる懸濁作用によるものと考えられる。

1. はじめに

堆積作用や環境変動など、海域の地質情報を多角的に解釈するためには現在の海洋環境に関する詳細な情報が必要である。地質調査総合センターが知的基盤情報のひとつとして整備している表層堆積図の作成に当たっては、木下式グラフ採泥器(K-グラフ)にCTD(Conductivity-

Temperature-Depth profiler)と底層採水器(ニスキン採水器)を設置し、表層堆積物の採取と同時に各種環境データを取得している(西田ほか, 2015; 味岡ほか, 2016; 天野ほか, 2018; 片山ほか, 2020)。CTDからは、水柱の水温、塩分、溶存酸素、濁度のデータが取得され、また採水器で採取された海水試料からは塩分とpHが測定されている。

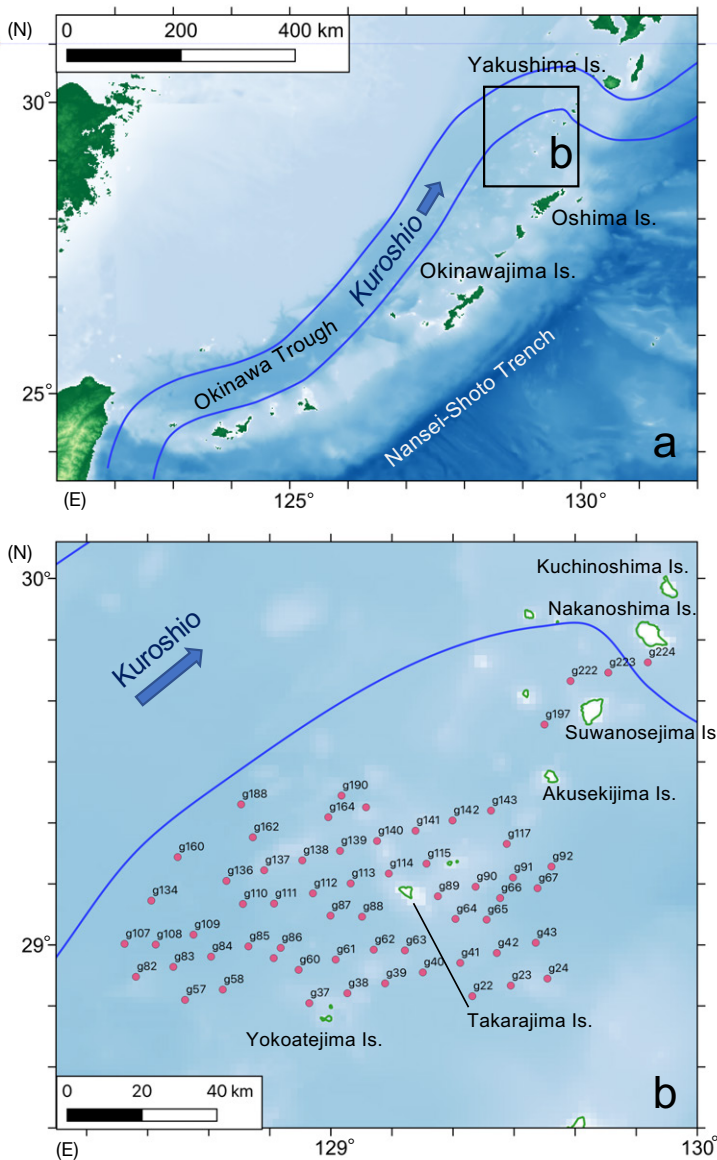
東海大学の望星丸を用いて実施されたGB21-1航海(2021年2月28日～3月30日)では、トカラ列島周辺海域の計61地点(水深173～1,169 m)で表層採泥が行われた(第1図, 鈴木ほか, 投稿中)。トカラ海峡は、北部琉球弧のトカラ列島付近で東シナ海とフィリピン海を繋ぐ水深690 mの海峡であり、東シナ海を北上してきた黒潮がフィリピン海に抜ける主要な流路となっている。トカラ海峡の黒潮流軸は、北緯29°30'～30°30'付近を通過する(Nakamura *et al.*, 2003)。その際、島嶼や岩礁に当たって湧昇が起り、表層に栄養塩が供給されることで、この海域の高い生産性に寄与している(Hasegawa *et al.*, 2021)。このようなトカラ海峡における黒潮の流動は、当該海域における底質分布や生物相にも影響すると考えられる。

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)

² 東北大学 大学院理学研究科(Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Sendai 980-8578 Japan)

³ 北海道大学 低温科学研究所(Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819, Japan)

* Corresponding author: ITAKI, T., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: t-itaki@aist.go.jp



第1図 調査海域周辺の地形と主な海流 (a) 及び採泥点 (b)
海底地形は岸本 (2000) に基づく。
Fig. 1 Topography and main currents around the study area (a) and sampling stations (b).
Sea-bottom topography is based on Kishimoto (2000).

本稿では、表層堆積物の性状を明らかにするための基礎情報として、GB21-1航海においてCTD及び底層採水で観測された海洋環境の概要について報告する。

2. 方法

CTD観測には、Sea & Sun Marine Tech社製CTD 90Mを使用した。本装置は圧力(水深)、温度、電気伝導度(塩分)のセンサーのほか、オプションとして濁度及び溶存酸素のセンサーが付属している。圧力センサーの精度は-5~35℃において0.1%、温度センサーの測定レンジは-2~35℃、精度は±0.005℃である。濁度センサーは光源波長880nm、測定レンジは0~25FTUである。溶存酸素センサーの測定レンジは0~240%、精度は±2%である。ただし溶存酸素については校正を行っていないため、測定値は参考扱いとし、変化の傾向のみ議論する。これらのセンサーを搭載したCTDは、センサー類が下向きにな

るようにK-グラフに取り付け、採泥中に0.2秒間隔の連続モードで観測を行った。K-グラフは投入後、線速1.0m/s程度で下降させ、海底面上30m前後で一旦停止させてワイヤー傾角を調整した後、線速0.5m/s程度で着底させた。投入から着底までの間、船の位置は投入点から約0.2kmの円内を維持するよう操船したが、St. g117では東向きの流れが強く、投入から着底の間に約1.3km流された。測定データのうち、着底時の懸濁の影響を受けないようにするため、投入後水面から海底までの下降中のデータを採用した。なお、表層水は、一時的な降水などの影響を受けにくい水深2~5mの平均値とし、また底層水は、着底時の濁度の影響を受けず、後述するニスキン採水器の作動位置付近に当たる海底面上の5~7mの平均値の値として第1表にまとめた。

K-グラフに設置したニスキン採水器は、超音波距離計により海底面上7mで作動するように設定されており(板

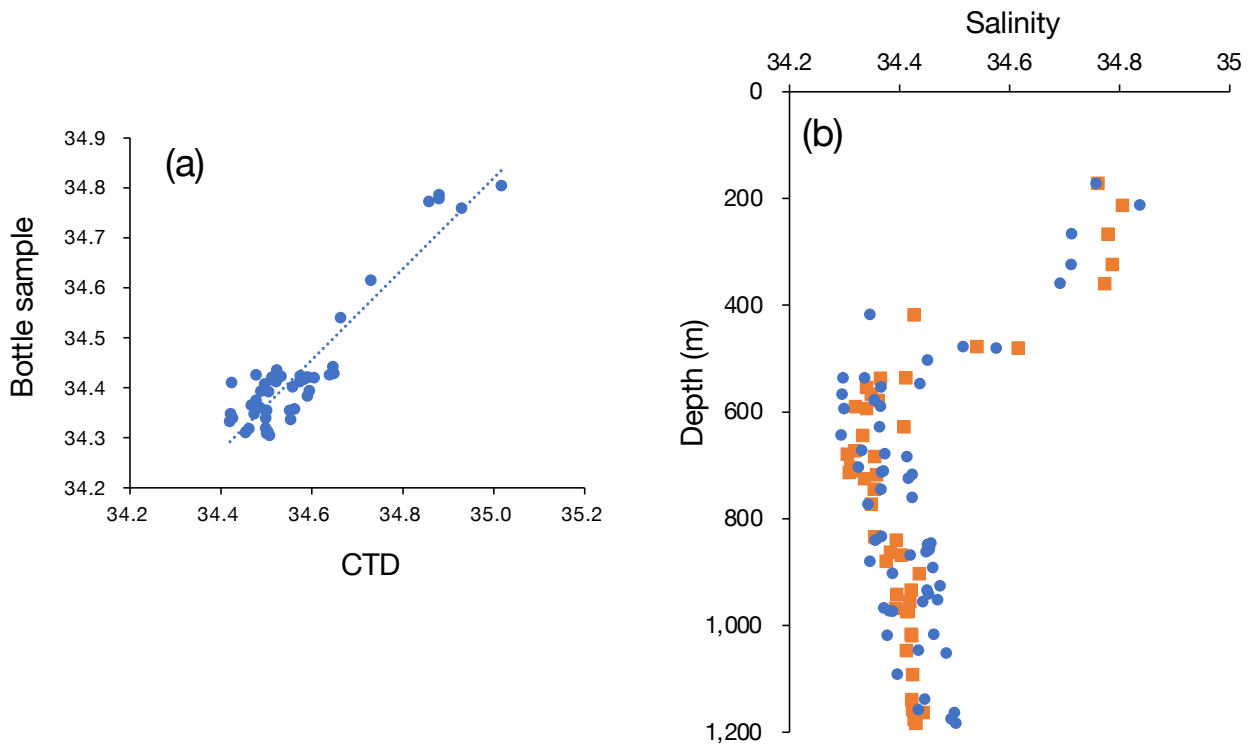
第1表 CTDで取得された表層(水深2~5mの平均)と底層(海底面上5~7mの平均)の水温(Temp)、塩分(未補正: Sal_raw, 補正済み: Sal_cal)、濁度(Turb)、溶存酸素(DO)、及び採水器で採取した海底直上水(海底面上7m)の実測塩分(Salinity)とpH。採取日時及び位置、水深はグラブ着底時のものを示した。

Table 1 List showing water temperature (Temp), salinity (uncorrect: Sal_raw, correct: Sal_cal), turbidity (Turb), and dissolved oxygen (DO) in the surface layer (averaged over 2-5 m depth from the sea-surface) and bottom layer (averaged over 5-7 m above the seafloor) acquired by CTD profiler, and measured salinity (Salinity) and pH values of the seawater above the seafloor (7 m above the seafloor) collected by the water sampler. Time, location, and water depth when the grab sampler reached to the seafloor are shown.

Site	Date	JST	Lat (N)	Long (E)	Depth (m)	CTD surface (2-5 m below seafloor)				CTD bottom (5-7 m above seafloor)				Bottle sample			
						Temp (°C)	Sal raw	Sal cal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Temp (°C)	Sal raw	Sal cal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Salinity	pH
g22	2021/3/18	13:37:06	28.860	129.386	823	22.92	34.85	34.69	1.45	4.45	5.82	34.50	34.37	1.23	2.35	34.355	7.625
g23	2021/3/18	17:08:13	28.889	129.491	572	23.02	34.84	34.68	1.47	4.49	9.40	34.49	34.35	1.17	3.18	34.361	7.780
g24	2021/3/18	8:15:51	28.908	129.591	473	22.01	34.88	34.72	1.90	4.50	14.50	34.73	34.58	1.15	3.96	34.615	7.830
g37	2021/3/10	10:00:06	28.841	128.941	543	20.69	34.98	34.80	1.30	4.47	10.68	34.58	34.44	1.01	3.38		
g38	2021/3/10	8:35:07	28.868	129.045	489	20.53	35.01	34.83	1.43	4.50	11.32	34.59	34.45	1.02	3.49		
g39	2021/3/19	9:06:22	28.895	129.148	657	22.82	34.83	34.67	1.70	4.45	6.97	34.46	34.33	1.17	2.63	34.319	7.675
g40	2021/3/19	7:44:27	28.925	129.251	702	21.57	34.87	34.71	1.73	4.64	6.21	34.50	34.37	1.21	2.46	34.312	7.595
g41	2021/3/18	12:13:55	28.951	129.353	705	22.41	34.84	34.67	1.43	4.50	6.04	34.50	34.37	1.23	2.40	34.309	7.640
g42	2021/3/18	10:54:06	28.978	129.453	735	21.53	34.88	34.71	2.32	4.54	5.93	34.50	34.37	1.19	2.36	34.354	7.600
g43	2021/3/18	9:34:37	29.006	129.559	861	21.63	34.88	34.71	1.73	4.57	3.85	34.56	34.42	1.30	1.90	34.403	7.680
g57	2021/3/20	14:06:03	28.850	128.602	1005	23.03	34.81	34.65	1.49	4.58	4.83	34.51	34.38	1.20	2.14	34.422	7.550
g58	2021/3/20	12:35:36	28.878	128.705	960	22.82	34.82	34.65	1.76	4.50	4.86	34.52	34.38	1.22	2.15	34.416	7.555
g59	2021/3/10	12:50:00	28.964	128.844	849	20.81	34.98	34.81	1.73	4.44	5.23	34.60	34.45	1.02	2.14		
g60	2021/3/10	11:27:03	28.932	128.912	841	20.69	34.97	34.79	6.22	4.58	5.25	34.59	34.45	1.02	2.14		
g61	2021/3/19	10:51:38	28.960	129.013	759	22.93	34.83	34.67	1.69	4.47	6.09	34.47	34.34	1.18	2.41	34.348	7.640
g62	2021/3/9	17:20:28	28.987	129.117	746	20.76	34.97	34.80	3.61	4.62	6.15	34.56	34.42	1.02	2.35		
g63	2021/3/19	16:37:46	28.985	129.202	587	22.03	34.85	34.68	2.83	4.60	8.79	34.43	34.30	1.19	3.11	34.339	7.800
g64	2021/3/23	11:04:37	29.071	129.340	524	22.44	34.80	34.64	1.54	4.54	10.36	34.47	34.34	1.27	3.41	34.365	7.850
g65	2021/3/23	9:54:29	29.069	129.425	638	22.45	34.80	34.64	1.57	4.50	7.38	34.42	34.29	1.27	2.73	34.333	7.760
g66	2021/3/23	8:33:36	29.128	129.462	896	22.45	34.81	34.65	1.60	4.46	3.63	34.52	34.39	1.33	1.89	34.436	7.510
g67	2021/3/16	16:09:55	29.155	129.564	943	21.76	34.93	34.76	1.35	4.58	3.74	34.58	34.44	1.77	1.87	34.418	7.535
g82	2021/3/20	15:46:36	28.913	128.468	942	22.94	34.80	34.64	1.73	4.51	4.91	34.51	34.37	1.19	2.17	34.393	7.555
g83	2021/3/14	16:05:10	28.940	128.570	852	22.98	34.86	34.70	1.67	4.41	5.07	34.59	34.45	1.09	2.16	34.384	7.720
g84	2021/3/20	11:03:30	28.968	128.673	958	23.03	34.83	34.67	1.66	4.44	4.84	34.52	34.39	1.20	2.15	34.413	7.360
g85	2021/3/14	8:05:07	28.996	128.775	942	21.81	34.93	34.76	2.20	4.45	4.89	34.61	34.47	1.08	2.09		7.765
g86	2021/3/10	14:02:47	28.992	128.863	847	20.80	34.98	34.80	1.55	4.46	5.20	34.60	34.45	1.02	2.14		
g87	2021/3/9	14:59:41	29.080	128.999	883	20.81	34.99	34.81	1.11	4.51	5.10	34.60	34.46	1.02	2.11		
g88	2021/3/19	15:08:31	29.077	129.085	699	23.02	34.84	34.68	1.77	4.41	6.69	34.45	34.33	1.20	2.54	34.311	7.655
g89	2021/3/23	12:07:30	29.133	129.292	248	22.53	34.82	34.66	1.42	4.47	19.17	34.88	34.71	1.28	4.26	34.779	8.050
g90	2021/3/23	7:24:23	29.159	129.395	353	22.42	34.83	34.67	1.62	4.47	17.02	34.86	34.69	1.27	4.07	34.773	8.040
g91	2021/3/16	14:54:37	29.184	129.497	808											34.323	7.480
g92	2021/3/16	17:56:16	29.214	129.602	924	21.80	34.89	34.72	1.57	4.59	3.55	34.59	34.45	1.58	1.85	34.421	7.530
g107	2021/3/20	17:17:30	29.003	128.437	1077	22.92	34.78	34.62	1.81	4.49	4.46	34.53	34.40	1.20	2.11	34.424	7.595
g108	2021/3/14	13:37:42	29.001	128.522	1169	23.00	34.86	34.70	1.46	4.34	4.34	34.65	34.50	1.08	2.05	34.429	7.705
g109	2021/3/14	9:53:00	29.028	128.625	1163	21.91	34.91	34.74	1.34	4.42	4.40	34.64	34.49	1.09	2.05	34.426	7.290
g110	2021/3/9	8:40:09	29.112	128.760	1071	21.15	34.95	34.77	1.36	4.45	4.72	34.63	34.48	1.01	2.03		
g111	2021/3/9	10:12:59	29.113	128.845	915	21.30	34.95	34.77	1.57	4.40	5.02	34.62	34.47	1.03	2.09		

第1表 続き.
Table 1 Continued.

Site	Date	JST	Lat (N)	Long (E)	Depth (m)	CTD surface (2-5 m below seasurface)				CTD bottom (5-7 m above seafloor)				Bottle sample			
						Temp (°C)	Sal raw	Sal cal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Temp (°C)	Sal raw	Sal cal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Salinity	pH
g112	2021/3/9	11:49:22	29.141	128.951	836	21.46	34.91	34.74	1.93	4.42	5.24	34.60	34.46	1.03	2.13		
g113	2021/3/23	15:42:18	29.168	129.054	828	22.40	34.82	34.66	2.27	4.55	5.30	34.49	34.36	1.28	2.24	34.393	
g114	2021/3/23	14:28:09	29.195	129.158	323	22.39	34.82	34.66	1.67	4.52	18.49	34.88	34.71	1.27	4.18	34.786	8.040
g115	2021/3/23	13:16:51	29.222	129.261	614	22.47	34.79	34.63	1.58	4.61	11.40	34.50	34.36	1.29	3.60	34.408	7.575
g117	2021/3/16	13:37:58	29.276	129.480	576	21.69	34.92	34.74	1.52	4.53	9.60	34.50	34.37	1.11	3.23	34.340	7.730
g134	2021/3/14	11:47:14	29.121	128.510	1151	22.95	34.88	34.71	1.51	4.38	4.33	34.65	34.50	1.10	2.04	34.443	7.310
g136	2021/3/17	11:46:50	29.175	128.715	1034	22.97	34.89	34.72	1.59	4.39	4.70	34.57	34.43	1.14	2.10	34.412	7.465
g137	2021/3/15	16:21:41	29.204	128.818	677	22.99	34.89	34.72	2.06	4.44	6.19	34.55	34.41	1.16	2.42	34.355	7.575
g138	2021/3/15	14:49:55	29.231	128.922	714	22.31	34.94	34.76	1.65	4.43	6.28	34.55	34.42	1.12	2.42	34.336	7.880
g139	2021/3/15	13:24:09	29.257	129.025	709	21.23	35.00	34.82	1.34	4.54	6.25	34.56	34.42	1.11	2.40	34.358	7.945
g140	2021/3/15	12:05:41	29.284	129.126	222	21.43	35.05	34.87	1.62	4.59	19.00	35.02	34.84	1.12	4.03	34.805	8.315
g141	2021/3/16	8:57:22	29.312	129.231	475	21.64	34.93	34.76	1.45	4.49	12.78	34.66	34.52	1.13	3.71	34.540	7.850
g142	2021/3/16	10:11:47	29.340	129.332	583	21.67	34.93	34.76	1.69	4.54	9.36	34.50	34.37	1.13	3.18	34.320	7.845
g143	2021/3/16	11:25:57	29.367	129.437	669	22.12	34.93	34.76	1.45	4.47	6.74	34.51	34.37	1.13	2.52	34.305	7.710
g160	2021/3/17	13:39:24	29.240	128.582	1125	22.83	34.83	34.67	1.63	4.40	4.51	34.59	34.45	1.15	2.07	34.422	7.560
g162	2021/3/15	17:52:10	29.294	128.787	1003	23.08	34.88	34.72	1.27	4.41	4.62	34.61	34.46	1.14	2.08	34.421	7.205
g164	2021/3/15	8:40:52	29.349	128.993	682											34.351	7.905
g165	2021/3/15	11:01:14	29.376	129.096	173	21.72	34.96	34.78	1.19	4.56	20.24	34.93	34.76	1.11	4.24	34.760	8.240
g188	2021/3/17	18:00:23	29.384	128.755	1145	23.18	34.85	34.69	1.48	4.41	4.49	34.57	34.43	1.15	2.07	34.424	7.570
g190	2021/3/15	9:56:00	29.408	129.029	932	21.70	34.94	34.77	1.67	4.44	5.35	34.59	34.45	1.13	2.20	34.395	7.785
g197	2021/3/24	8:16:44	29.602	129.583	868	22.52	34.73	34.57	1.56	4.48	5.22	34.48	34.35	1.38	2.22	34.376	7.595
g222	2021/3/24	9:49:23	29.721	129.654	509	22.57	34.72	34.57	1.49	4.48	9.01	34.42	34.30	1.32	3.14	34.411	7.895
g223	2021/3/24	11:35:04	29.744	129.757	563	22.67	34.73	34.58	1.65	4.50	8.73	34.42	34.30	1.37	3.02	34.348	7.850
g224	2021/3/24	12:46:22	29.772	129.865	416	22.60	34.75	34.59	1.62	4.55	10.55	34.48	34.35	1.31	3.37	34.426	7.860



第2図 底層のCTD塩分とニスキンボトル採水試料の実測塩分の関係 (a), 及び補正CTD塩分 (青) と実測塩分 (橙) の深度分布 (b)

Fig. 2. Relationship between CTD salinity and measured salinity from Niskin bottle sampling in the bottom layer (a), and depth distribution of corrected CTD salinity (blue) and measured salinity (orange) (b).

木, 2018), 採取された海底直上水からは, pHと塩分が測定された. pHは, 温度変化や大気二酸化炭素との交換反応によって容易に変化するため, pHメーター2機を用いて採水直後に速やかに測定した. 測定に用いたのは, 堀場製作所 (HORIBA) 製のコンパクトpHメーター (LAQUAtwin pH-33B) である. 両pHメーターは, pH標準溶液3種類 (pH=4.01, 6.86, 9.18; 富士フイルム和光純薬株式会社製) によって, 2点または3点校正を定期的に行い (少なくとも1回/日), 測定値の確認をした. IAPSO標準溶液 (pH=7.41) の繰り返し測定による本pHの測定の確度・精度は 7.41 ± 0.02 であった. 各地点の海水のpHは, pHメーター2機を用いてそれぞれ3回ずつ繰り返し測定した結果 (全6データ) の平均値とした. また, 塩分測定用試料は, 採水後プラスチック瓶で常温保存され, 実験室に持ち帰って卓上型電気伝導度式塩分計 (DIGI-AUTO MODEL-5, 株式会社鶴見精機) を用いて計測された.

3. 結果と考察

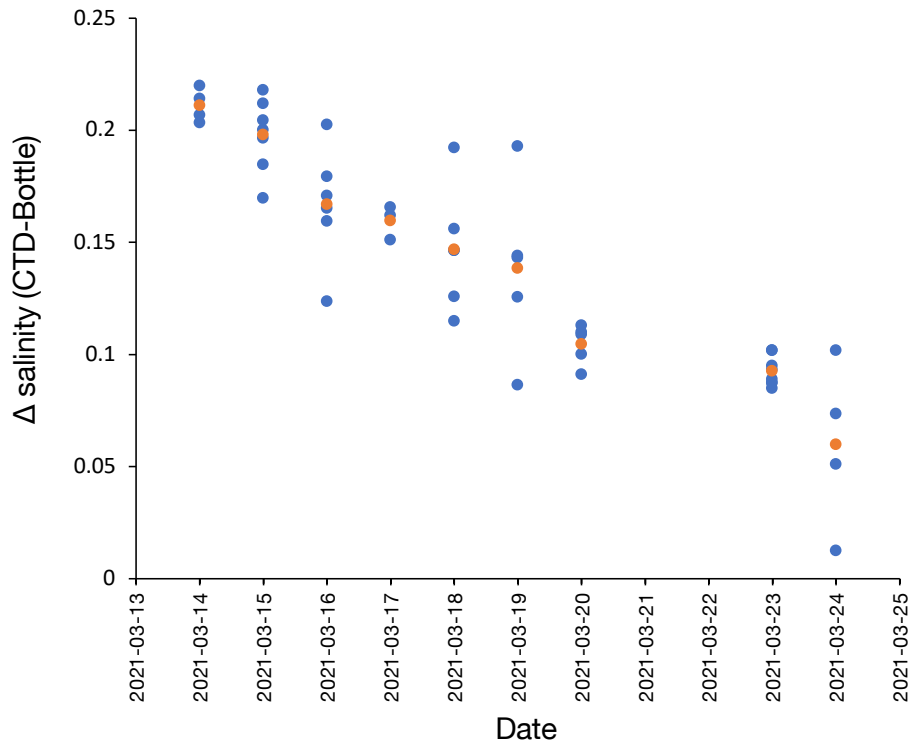
3.1 CTD塩分の補正

CTDの塩分センサーは, 実際の塩分とは系統的に異な

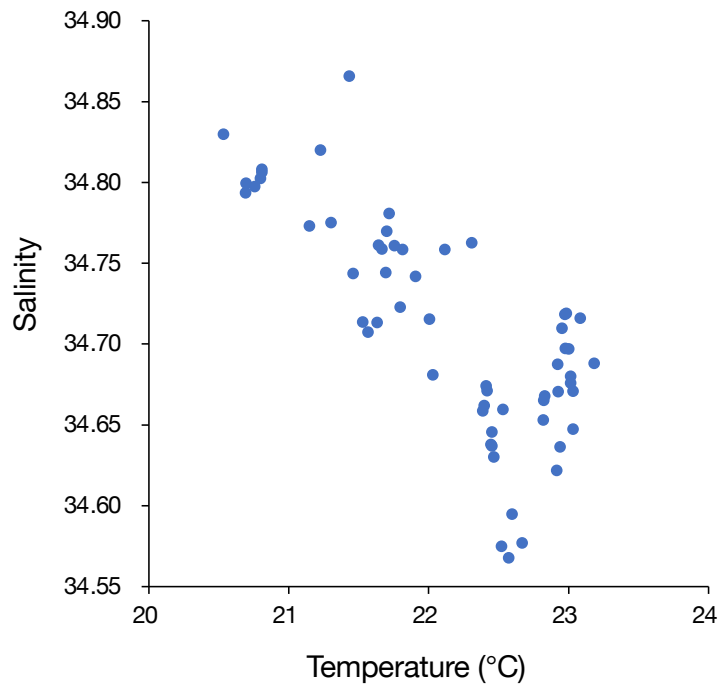
る値を示す場合があり, 海水の測定値と比較して補正する必要がある. そのために, 海底直上水の実測塩分を底層のCTD塩分 (海底面上5~7mの平均) と比較して補正することとした. 観測を開始した当初の3月9~10日の採水は, 採水器のベント (空気穴) に不具合があったため正常な採水が出来ず, データからは除外した. その上で底層のCTD塩分と実測塩分の関係 (第2図a) から以下の補正式を構築した. なお, 両者の相関係数は $r=0.93$ であった.

$$\text{補正CTD塩分} = 0.9096 \times \text{CTD塩分} + 2.9852$$

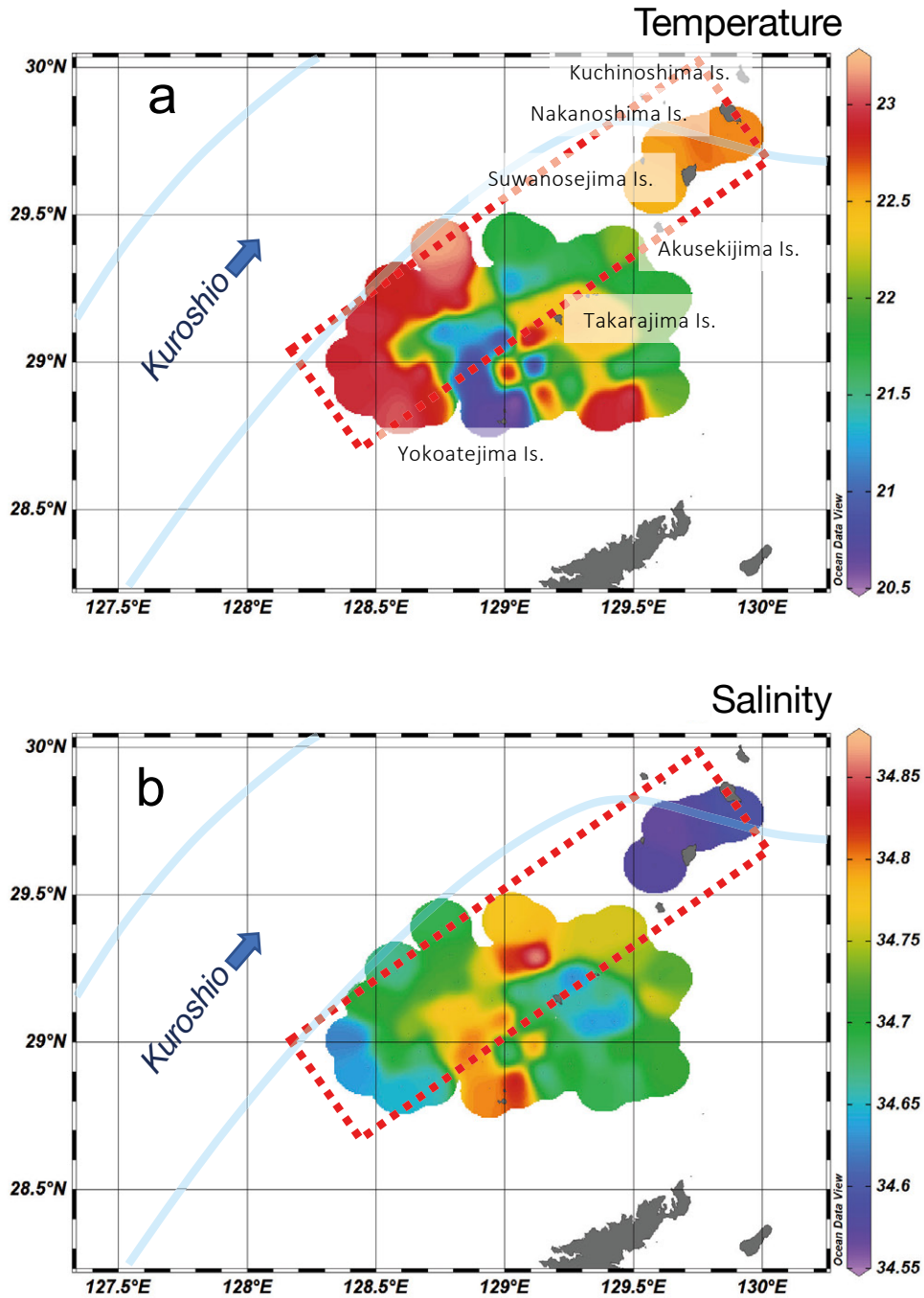
ところで, 底層のCTD塩分は, 実測塩分と比べると約0.1の幅でプロットが分散している (第2図a, b; CTD塩分と実測塩分の差の標準偏差は0.05). 水深500m以深における底層水の実測塩分値は比較的安定していることから, この分散はCTD塩分センサーの精度に ± 0.05 程度の誤差があることを示している. そこでCTD塩分と実測塩分値との差を時系列で比較すると, その差が1日当たり平均約0.02で低下する傾向が認められた (第3図). CTD塩分センサーの電気伝導度セルは, 長期間の観測で



第3図 CTD塩分と実測塩分値との差 (Δ salinity CTD-Bottle)の時系列変化 (青)と日毎の平均 (橙)
 Fig. 3 Time series (blue) and daily average (orange) of the difference between CTD salinity and measured salinity (Δ salinity CTD-Bottle).

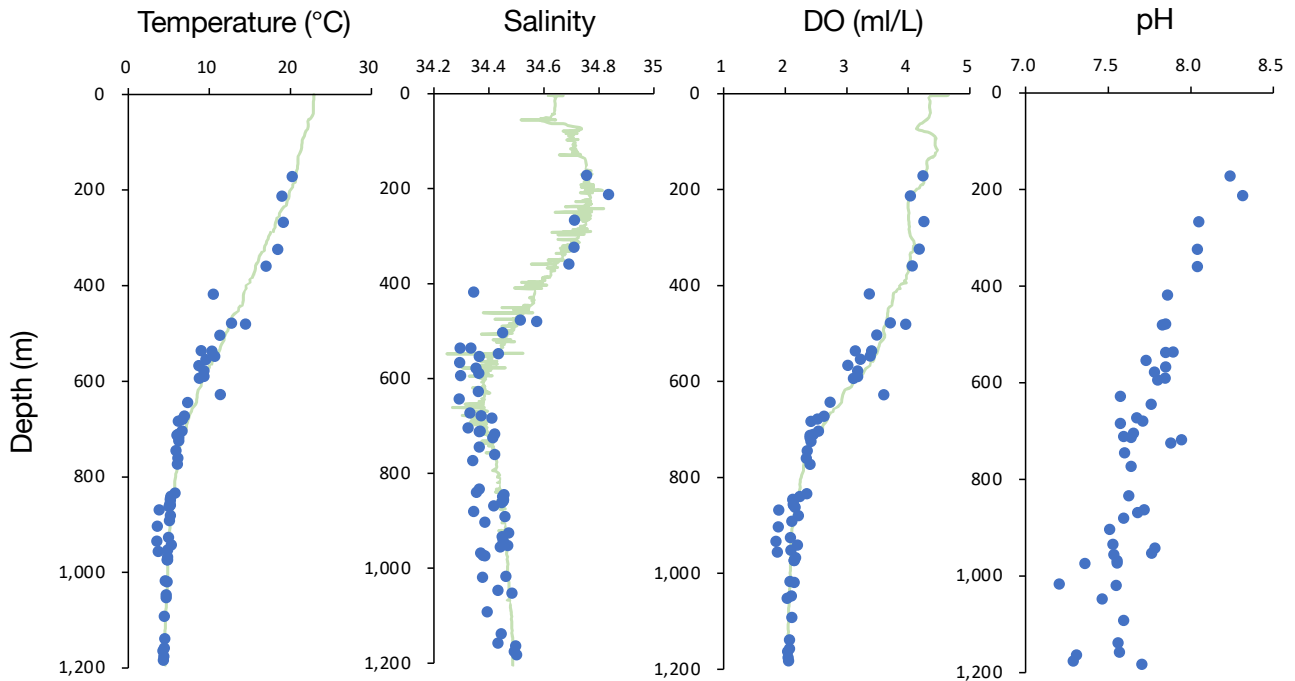


第4図 CTDで観測された表層水 (2 ~ 5 mの平均)のT-Sダイアグラム
 Fig. 4 A T-S diagram of surface water (averaged over 2-5 m below the sea-surface) observed by CTD.



第5図 表層の水温 (a) 及び塩分 (b) の分布 (破線の四角枠は、第7図で選択されたエリアを示す) (Ocean Data Viewにより作図)

Fig. 5 A map showing distribution of sea-surface temperature (a) and salinity (b) (dashed square box indicates the area selected in Fig. 7). Figure was created by Ocean Data View.



第6図 底層水の水温、塩分、溶存酸素 (DO)、pHの深度プロット (薄緑線は、St. g108の水柱プロファイル)

Fig. 6 Depth plots of bottom water temperature, salinity, dissolved oxygen (DO), and pH (light green line indicates the water column profile at St. g108).

電氣的流動から発生する石灰質などで被膜されることがある。上述のデータの分散の原因として、このような塩分センサーの汚れによる電気伝導度の減少が考えられ、測定精度に影響を及ぼした可能性がある。より正確な数値を得るために観測日毎の補正式を構築することも可能ではあるが、表層堆積物の性状を明らかにするための基礎情報としては、±0.05でも十分な精度であるので、本報告では日毎の再補正は行わないものとする。

3.2 表層水

CTDで観測された表層水は、水温が20.5～23.2℃、塩分が34.57～34.87の範囲であり、両者は逆相関 ($r = -0.76$)する傾向が認められる (第4図)。

高温・低塩分水は、沖縄舟状海盆と諏訪之瀬島～中之島付近に認められ、特に諏訪之瀬島～中之島付近の塩分は、調査海域で最も低い値を示した (第5図b)。東シナ海の陸棚縁辺を北上してきた黒潮は、揚子江の影響を受けて塩分が低く、これがトカラ海峡の諏訪之瀬島付近から太平洋に流出する黒潮の流路をとるために塩分が低くなっていることと調和的である。

一方、低温・高塩分水は、横当島周辺に分布する (第5図a, b)。Hasegawa *et al.* (2021)によれば、黒潮がトカラ海峡を通過する際に、島や岩礁などの急峻な地形の高まりによって乱流が引き起こされ、下層から栄養塩の豊富

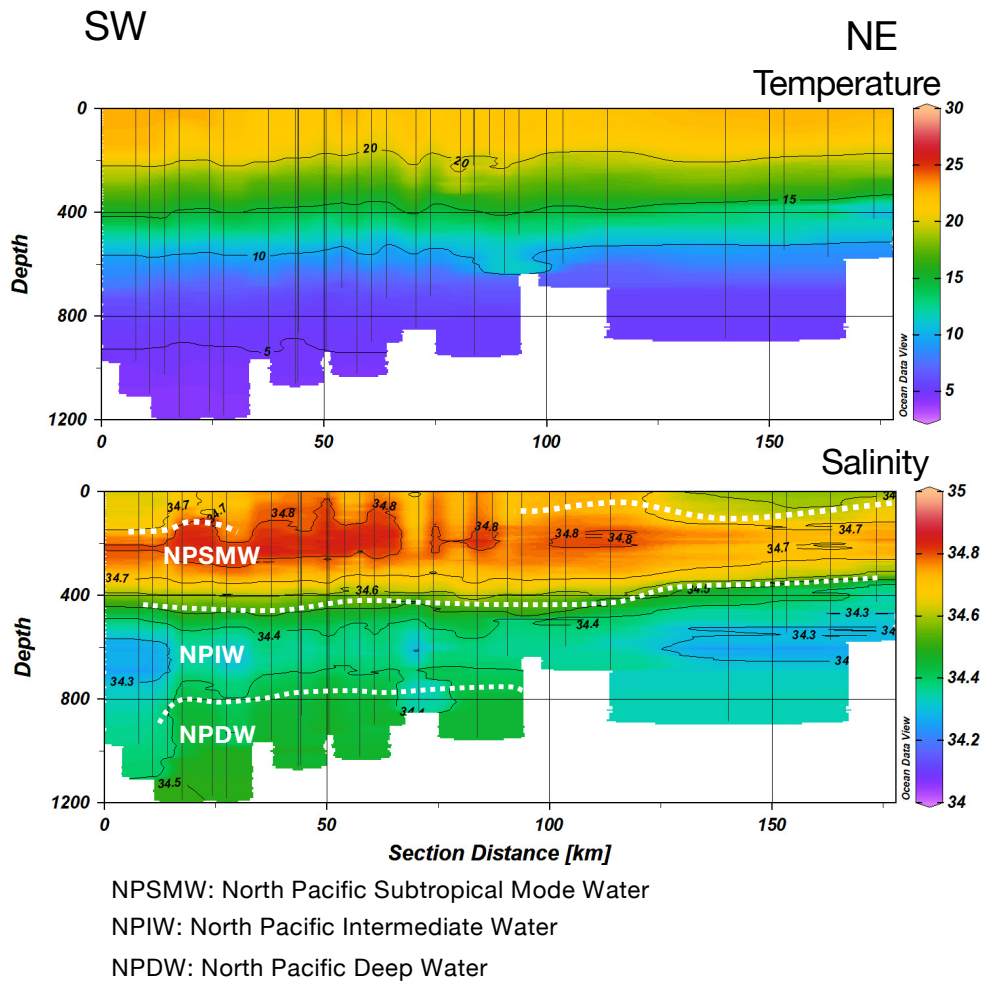
な水塊が表層に供給される。今回観測された低温・高塩分の表層水は、このような下層との混合によるものと考えられる。

3.3 底層水

海底の生物や堆積作用に関係すると考えられる底層の海洋環境として、各採泥点における底層水の水温、塩分、溶存酸素、及びpHの深度プロットを第6図に示す。このうち、水温、塩分、溶存酸素については、今回の観測点で最深 (1,169 m) のSt. g108において取得された水柱の鉛直プロファイルと同時に示す。173 m以深の底層水の値は、水柱のプロファイルと概ね同じ傾向を示しており、基本的に鉛直方向の水塊構造に依存していることがわかる。これらの鉛直分布の特徴から、調査海域における3つの水塊、すなわち北太平洋亜熱帯モード水、北太平洋中層水、北太平洋深層水を区分することが出来る。

北太平洋亜熱帯モード水 (下限350～500 m) : 水温15℃以上、塩分34.5以上の高温、高塩分で特徴付けられ、溶存酸素とpHがそれぞれ4 ml/L以上、8以上を示す。この水塊は、北西太平洋亜熱帯循環域における冬季混合で形成されたものが起源とされている (例えば、Suga and Hanawa, 1995)。

北太平洋中層水 (上限350～500 m, 下限800～900 m) : 水温は、水深200 m付近の20℃から深度とともに低下し、



第7図 沖縄舟状海盆東縁部～中之島周辺 (第5図の四角枠内)における水温と塩分の横断面 (Ocean Data Viewにより作図。横軸は、第5図四角枠の長径の距離としてプロット)

Fig. 7 Cross section of water temperature and salinity around the eastern edge of the Okinawa Trough to Nakanoshima Island (area of inside the square box in Fig. 5). Figure was created by Ocean Data View. The horizontal axis is plotted as the distance of the major axis of the rectangle in Figure 5.

水深800 m以深で約5℃となる。溶存酸素とpHも同様に、それぞれ2.5 ml/L以下、7.6付近にまで低下する。この間で塩分が34.4を下回る塩分極小層で特徴付けられている。この水塊は、北太平洋中層水と呼ばれ、オホーツク海において海氷形成の際に排出された高密度水(ブライン)が北太平洋中層に移入したものが起源とされている(例えば、Talley, 1993)。

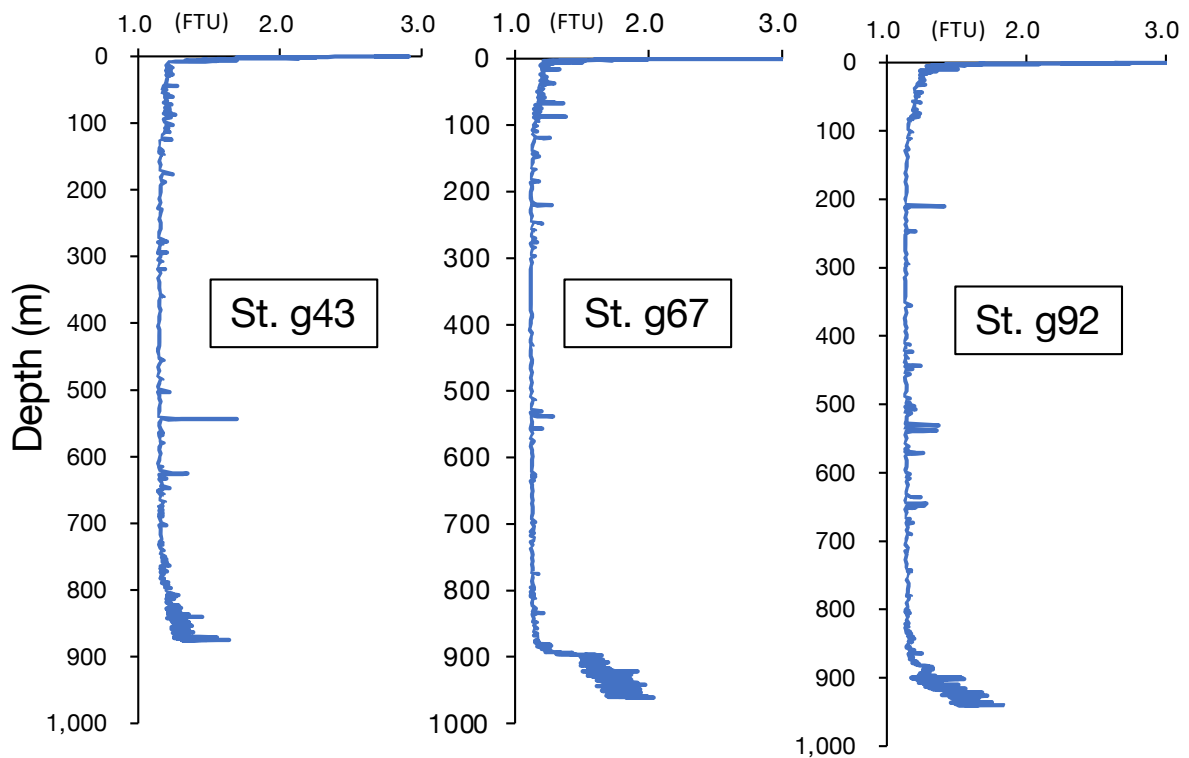
北太平洋深層水 (上限800～900 m) : 水温5℃付近、塩分34.4付近の様な水塊で特徴付けられる。溶存酸素は、2～2.5 ml/Lと比較的に低く、pHは多くが7.6を下回る値を示す。この水塊は、北太平洋深層水と呼ばれ、北大西洋深層水(North Atlantic Deep Water, NADW)を起源とする古い水塊のため、二酸化炭素を多く含む。その結果としてpHは低くなり、沖縄海域では炭酸塩鉱物のアラレ石

の補償深度は、この水塊の上限深度である水深800 m付近に相当している(鈴木ほか, 2010)。

3.4 鉛直水塊分布

CTDで得られた水温と塩分の鉛直プロファイルについて、沖縄舟状海盆東縁部から中之島周辺までの南西～北東方向(第5図の四角枠内)の横断面を第7図に示す。この断面は、表層水の高温・低塩分水と低温・高塩分水を横断するように設定している。

この図からは、沖縄舟状海盆東縁と諏訪瀬島～中之島周辺の表層に認められる高温・低塩分域では、北太平洋中層水の塩分極小層が明瞭に認められるのに対し、横当島周辺の低温・高塩分域では、塩分極小層の厚さは薄くなり、また北太平洋亜熱帯モード水が厚く分布する傾向



第8図 宝島東方沖 (St. g43, g67, g92)における濁度の鉛直分布

Fig. 8 Vertical turbidity profiles off the east of Takarajima Island (St. g43, g67, g92).

がある。後者のような水塊構造は、前述の地形的高まりによる鉛直混合の影響と考えられる。

3.5 濁度

調査海域における水柱の濁度は、多くの場合、表層付近はプランクトンの繁殖で比較的に高い値を示す以外は懸濁物が低いことで特徴付けられる。しかし、宝島東方沖のSt. g43, g67, g92では、海底付近にも厚さ数十mの高濁度層が認められる(第8図)。これは、海底の流れによる堆積物の懸濁によるものと考えられる。

4. まとめ

トカラ列島周辺海域で実施されたGB21-1航海(2021年2月28日～3月30日)では、木下式 grabs 採泥器に設置されたCTD及び採水器により計61地点で水温、塩分、溶存酸素、濁度、底層水pHの計測が行われた。観測の結果、当該海域の表層は、黒潮の影響を受けていることが確認され、横当島周辺では周囲より水深が浅くなることによって生じたと考えられる鉛直混合の影響で表層に低温・高塩分で特徴付けられる水塊が認められた。また、173～1,169 mの海底は、北太平洋亜熱帯モード水(下限350～500 m)、北太平洋中層水(上限350～500 m, 下限800～900 m)、北太平洋深層水(上限800～900 m)で

区分される。宝島東方沖では、海底付近の流れによるものと考えられる厚さ数十mの高濁度層が認められた。

文献

- 天野敦子・杉崎彩子・鈴木 淳・味岡 拓・板木拓也・片山 肇(2018) CTD観測による奄美大島西方海域の海洋環境。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, 97–105.
- 味岡 拓・西田尚央・鈴木 淳・板木拓也(2016) CTD観測による奄美大島周辺海域の水塊構造。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, 80–87.
- Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., Yoshie, N., Nakamura, H., Nishina, A., Kobari, T., Nagai, T. and XGuo, X. (2021) How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophysical Research Letters*. doi: 10.1029/2020GL092063
- 板木拓也(2018) 超音波高度計によるK-grabs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.
- 片山 肇・板木拓也・鈴木 淳・藤岡 大・西尾拓哉 (2020) GK19航海で観測された石垣島・西表島・与那国島周辺海域の海洋環境. 井上卓彦 (編) 「沖縄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, 87–93.
- 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).
- Nakamura, H., Ichikawa, H., Nishina, A. and Lie, H.-J. (2003) Kuroshio path meander between the continental slope and the Tokara Strait in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, **108**(C11), 3360. doi: 10.1029/2002JC001450
- 西田尚央・片山 肇・板木拓也・鈴木 淳・松崎賢史 (2015) GK14航海におけるCTD観測. 板木拓也 (編) 「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成26年度研究概要報告書—奄美大島, 徳之島, 沖永良部島周辺海域—。地質調査総合センター速報, no. 67, 82–88.
- Suga, T. and Hanawa, K. (1995) Interannual variation of North Pacific subtropical mode water in the 137E section. *Journal of Physical Oceanography*, **25**, 1012–1017.
- 鈴木 淳・牛江裕行・新免浩太郎・天野敦子・兼子尚知・板木拓也・片山 肇・稲村明彦・安原正也・吉永弓子・村山昌平・宇佐美哲之 (2010) 沖縄本島西方海域GH09における海水の地球化学的分析. 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—沖縄北西方海域—。地質調査総合センター速報, no. 51, 76–85.
- 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.
- Talley, L.D. (1993) Distribution and formation of North Pacific intermediate water. *Journal of Physical Oceanography*, **23**, 517–537.

(受 付 : 2022年2月10日 ; 受 理 : 2022年11月11日)

Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques

MIYAJIMA Toshihiro^{1,*}, HAMAGUCHI Masami², NAKAMURA Takashi³,
KATAYAMA Hajime⁴ and HORI Masakazu⁵

MIYAJIMA Toshihiro, HAMAGUCHI Masami, NAKAMURA Takashi, KATAYAMA Hajime and HORI Masakazu (2022) Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 313–321, 3 figs and 1 table.

Abstract: Vegetated coastal habitats such as seagrass meadows, macroalgal beds, and mangroves export large amounts of organic carbon (OC) to offshore regions. The exported OC may be consumed as a food source by various pelagic and benthic organisms, enhancing secondary production, or may settle and be buried in offshore sediment, contributing to carbon sequestration. Hence, OC export is an important ecosystem service of coastal wetlands supporting connectivity from coastal to offshore habitats. We studied the dispersal of detrital organic matter derived from coastal macrophytes to offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands (subtropical western North Pacific) using DNA probing techniques and compared the results with the bulk OC concentration and granulometric properties of the sediment. The results showed that dispersal of macrophyte detritus was constrained hydrographically by the strong Kuroshio current flowing near the study areas. Mangrove- and seagrass-derived organic matter exported from coastal habitats of the Yaeyama Islands was detected around the Yaeyama Islands and accumulated in deep-basin sediments (>1000 m) of the southern Okinawa Trough; however, its dispersal seemed to be confined by the Kuroshio. By contrast, sediments around the Tokara Islands often contained macroalgal materials that were rarely found in those around Yaeyama Islands. Most of the macroalgal organic matter found in the sediments of the Tokara area likely originated in coastal habitats of continental China and was transported by the Kuroshio across the shelf of the East China Sea to the northern Okinawa Trough, where it was trapped within sediment. The bulk OC concentrations in the sediment of both areas were constrained by the granulometric properties of the sediment, such as specific surface area. However, the abundance of macrophyte-derived organic matter did not correlate with the concentration or stable isotope ratio of the bulk-sediment OC, implying that macrophyte OC represents a minor fraction of the bulk OC stored in the sediment of the study areas.

Keywords: Blue carbon, Carbon sequestration, Coastal wetland, Environmental DNA, Kuroshio, Macroalga, Mangrove, Outwelling, Seagrass

1. Introduction

Macrophyte-dominated coastal ecosystems such as seagrass meadows, macroalgal beds, mangroves, and tidal marshes play quantitatively important roles in the

oceanic carbon cycle due to their prominent capacity to capture and sequester organic carbon (OC). It has been estimated that mangroves and seagrass meadows, which occupy only about 0.2 % of the world's ocean area, sequester OC in their sediments at an average rate of

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, 277-8564, Japan

² National Research Institute of Fisheries Technology, Japan Fisheries Research and Education Agency, Hatsukaichi, 739-0452, Japan (Present address: Faculty of Marine Science and Technology, Fukui Prefectural University, Obama, 917-0116, Japan).

³ School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8552, Japan

⁴ AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation

⁵ National Research Institute of Fisheries Resources, Japan Fisheries Research and Education Agency, Yokohama, 236-0004, Japan

* Corresponding author: MIYAJIMA, T., Email: miyajima@aori.u-tokyo.ac.jp

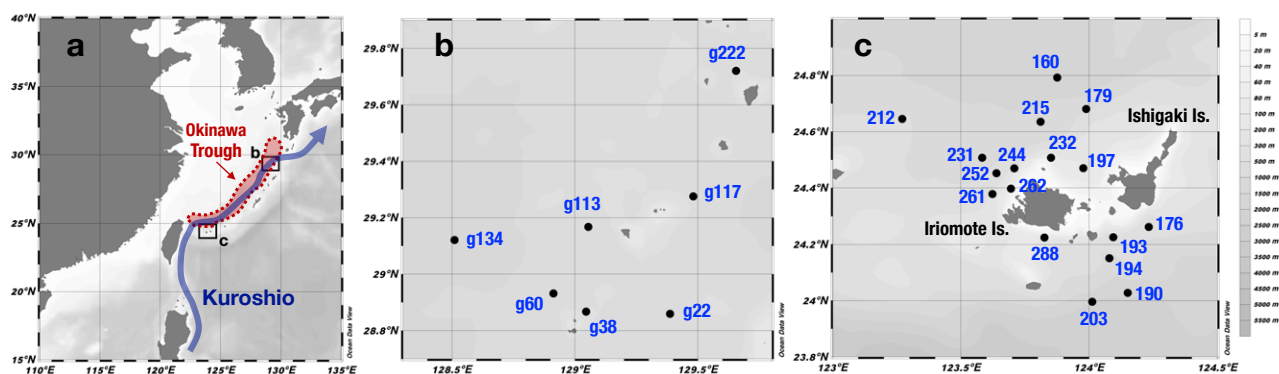


Fig. 1 Regional map (a) indicating the locations of the two study areas and the Okinawa Trough, together with the flow path of the Kuroshio current. Sediment sampling sites are shown in local maps of the area around the Tokara Islands (b) and Yaeyama Islands (c). The maps were generated using Ocean Data View ver. 5.5.2.

more than $100 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (Alongi, 2018), that is, two or three orders of magnitude higher than the average OC burial rate in open ocean sediment, which illustrates the disproportionately large contribution of these two habitats to the entire oceanic carbon budget. Furthermore, because net primary production in macrophyte-dominated ecosystems largely exceeds consumption and respiration within the ecosystems (Cebrian, 1999), the export flux of OC from these ecosystems to the outer ocean can be quite large and represent an important pathway of energy and carbon from the coastal region to pelagic realms. The export of macrophyte-derived OC may influence the pelagic marine ecosystem in two mutually exclusive ways. First, exported OC may be consumed as a food source by heterotrophic animals and microorganisms, thereby enhancing secondary production and the complexity of both pelagic and benthic food webs in the open ocean (Heck *et al.*, 2008; Queirós *et al.*, 2019). Second, a portion of the exported OC may be stored for a long time as buried OC in deep-sea sediment or refractory dissolved OC in the water column and thereby contribute to increasing carbon sequestration in the ocean (Reichardt, 1987; Jennerjahn and Ittekkot, 2002; Santos *et al.*, 2021). The recent advent of molecular biological tools such as deoxyribonucleic acid (DNA) metabarcoding and quantitative polymerase chain reaction (qPCR) has enabled researchers to trace organic matter derived from specific primary producers and exported outside their original habitats (Reef *et al.*, 2017; Queirós *et al.*, 2019; Ortega *et al.*, 2020). However, available data are still insufficient to constrain the spatial extent of export of macrophyte-derived OC to the deep ocean and evaluate the importance of these two roles quantitatively.

In this study, we compared the spatial extent of dispersal of macrophyte-derived materials to offshore sediments in two different subtropical waters with contrasting hydrographic settings. To detect and quantify macrophyte-derived materials in the offshore sediment, we used specific DNA-probing techniques based on qPCR

(Hamaguchi *et al.*, 2022). One study area surrounding the subtropical Yaeyama Islands, southwest Japan, is characterized by abundant mangroves and seagrass meadows in shallow nearshore habitats (Nakasuga *et al.*, 1974; Tanaka and Kayanne, 2007) that are supposed to export a large amount of OC to the surrounding offshore area. The other study area, the Tokara Islands, is located to the northeast of the Yaeyama Islands, where coastal macrophytes are relatively sparse (Kawano *et al.*, 2012; Terada and Watanabe, 2017) and the oceanic environment is directly influenced by the Kuroshio (Chen *et al.*, 1992), one of the world's strongest ocean currents, which might have a strong influence on the dispersal and accumulation of macrophyte OC. We compared the abundance and composition of macrophyte-derived materials between these two areas. We also examined the relationships among macrophyte-derived materials and bulk sediment characteristics, such as OC and granulometric properties, to infer the quantitative role of the exported OC in carbon burial in the offshore sediment.

2. Materials and Methods

2.1 Sample collection and pretreatment

Seven surface sediment samples were collected around the Tokara Islands ($28.85\text{--}29.72^\circ \text{ N}$, $128.51\text{--}129.66^\circ \text{ E}$; Fig. 1b) during cruise GB21-1 in March 2021 using a grab sediment sampler ($40 \times 40 \times 20 \text{ cm}$). Portions of the collected samples were packed in prewashed plastic containers and immediately frozen. The samples were kept in a freezer below -20° C until they were freeze-dried. Additional 17 surface sediment samples collected around the Yaeyama Islands ($23.99\text{--}24.80^\circ \text{ N}$, $123.27\text{--}124.24^\circ \text{ E}$; Fig. 1c) during cruise GK19 in June and July 2019 were used for comparison. However, the latter group of samples had been stored at room temperature for 5 months prior to freeze-drying, which might have resulted in partial degradation of delicate organic matter, including DNA, and possible underestimation of OC concentrations and

DNA copy numbers.

After freeze-drying, the dried sediment was gently crushed and passed through a 1-mm-mesh stainless-steel sieve to remove pebbles and shells. The fraction of the sediment < 1 mm was homogenized using an agate mortar and pestle, and then stored in pre-cleaned and tightly capped 30-mL glass vials in a desiccated room for subsequent analyses.

2.2 Analytical methods

The concentrations and stable isotope ratios of bulk OC and total nitrogen (TN) in non-carbonate sediments (< 40 wt.% carbonate) were determined using an elemental analyzer–isotope ratio mass spectrometer (EA–IRMS; Flash 2000/ConFlo IV/DELTA V Advantage, Thermo, Germany) after acid decarbonation. A 20–100-mg portion of each homogenized sediment sample was weighed into a silver cup for elemental analysis, and 2 M HCl was added dropwise to remove carbonate as CO₂. Then the silver cup was dried at 60°C and packed into a tin capsule for elemental analysis before being subjected to EA–IRMS. For carbonate sediments, OC and TN were analyzed for acid (4 M HCl)-soluble and insoluble fractions separately, according to the method described in Miyajima *et al.* (2015). Concentrations and isotope ratios of bulk OC and TN were calculated as the sum and the weighted average of the values for the acid-soluble and insoluble fractions, respectively.

To determine the carbonate concentration in sediment, a preweighed (ca. 100-mg) portion of homogenized sediment was dissolved in 1 M HCl. After appropriate dilution with ultrapure water, insoluble materials were removed by centrifugation (2000 g, 20 min, 15°C), and concentrations of major cations in the supernatant were determined by ion chromatography (881 Compact IC pro, Metrohm, Switzerland). The content of (Ca, Mg)/CO₃ in the original sample was calculated from the measured concentrations of Ca²⁺ and Mg²⁺ after correction for porewater-derived Ca and Mg, assuming that the measured Na⁺ was derived solely from porewater.

Analyses of sediment granulometric properties, such as specific surface area (BET method) and mesopore distribution, were performed via N₂ adsorption measurement (BELSORP mini II, MicrotracBEL, Japan) following the preparation protocol described in Miyajima *et al.* (2017).

The concentrations of macrophyte-derived DNA fragments were determined in clean laboratories at the National Research Institute of Fisheries Technology (Hatsukaichi Station) using qPCR techniques applied to the freeze-dried sediment samples (Hamaguchi *et al.*, 2018). The specific primers and probes were designed based on the deposited or originally determined internal transcribed spacer (ITS) region sequences for detecting and quantifying DNA fragments of three dominant mangrove species found in the Yaeyama Islands (i.e., *Rhizophora stylosa*, *Sonneratia alba*, *Bruguiera gymnorrhiza*), three subtropical (*Thalassia hemprichii*, *Enhalus acoroides*,

Cymodocea rotundata), and one temperate (*Zostera marina*) species of seagrass commonly found in Japan, as well as six groups of macroalgae that commonly occur or are cultivated around Japan (see Table 1). Among the macroalgae groups, subtropical and temperate *Sargassum* are represented by the subgenera *Sargassum* and *Bactrophyucus*, respectively (Stiger *et al.*, 2003), and the *Ulva* group, cultivated *Porphyra*, temperate kelps, and *Saccharina* group were defined based on published or originally determined ITS-region sequences for *Ulva* spp., *Porphyra yezoensis*, *Ecklonia* spp. and *Eisenia bicyclis*, and *Saccharina* spp., respectively. Details of the design of probes and primers can be found elsewhere (Hamaguchi *et al.*, 2022). Triplicate qPCR runs were executed for each combination of samples and probes. The detection (3 σ) and quantitation (10 σ) limits of DNA fragments were tentatively defined based on the standard deviation (σ) of the log-transformed copy number of *E. acoroides* gene fragments determined for three representative samples with eight repetitive qPCR runs, and these were 190 and 890 copies g⁻¹, respectively. It should be noted that the detectability of specific DNA fragments from sediment depends, to some extent, on the choice of probe sequence. In our experience, the detectability of tropical seagrass DNA using probes specific to the ITS region of the nucleus DNA is somewhat lower than the detectability with probes specific to the region coding maturase K (MatK) of the plastid DNA of the same species. Therefore, our abundance data of tropical seagrass DNA may be considered conservative estimates.

3. Results and Discussion

3.1 Spatial distribution of bulk sediment properties

The concentration of bulk OC in the surface sediment did not exceed 1.0 mmol C (g dry weight)⁻¹ in either the Tokara or Yaeyama areas (Fig. 2a). OC was depleted at sites shallower than 700 m but increased with increasing depth ($r = 0.653$, $p = 0.006$). By contrast, concentrations of inorganic carbon (IC; calcium + magnesium carbonate) were quite high (> 70 wt.%) at sites shallower than 700 m and decreased with depth in the Yaeyama area ($r = -0.858$, $p = 0.005$; Fig. 2b). In the Tokara area, carbonate concentrations were always lower than 50 wt.%, and did not correlate with depth. TN concentrations were closely and positively correlated with OC concentrations in both the Tokara ($r = 0.999$) and Yaeyama ($r = 0.965$) areas. The OC/TN atomic ratio varied between 7.1 and 11.4, and it was negatively correlated with depth ($r = -0.677$, $p = 0.019$) in the Yaeyama area.

The bulk carbon stable isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) of OC in the surface sediment ranged from -23 ‰ to -19 ‰, with most samples falling between -22 ‰ and -20 ‰ (Fig. 2c). This range closely coincides with the range of $\delta^{13}\text{C}$ of suspended particulate organic matter (POM) collected from Sekisei Lagoon between Ishigaki and Iriomote Islands (Fig. 1c; unpublished data). The nitrogen stable

Table 1 Concentrations of DNA fragments detected in surface-sediment samples collected in coastal waters of the Yaeyama and Tokara areas (arranged from shallow to deep sites). Symbols: +++++, > 30,000; +++++, 10,000–30,000; +++, 3,000–10,000; ++, 890–3,000; +, 190–890; ±, 1–190; -, < 1 (unit: copies per gram dry weight of sediment). See text for a detailed description of the macroalgal categories. The tentatively defined detection and quantitation limits are 190 and 890 copies per gram (see text), respectively.

Area	Site ID	Depth (m)	Mangroves			Seagrasses				Macroalgae						
			<i>Rhizophora stylosa</i>	<i>Sonneratia alba</i>	<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	<i>Thalassia hemprichii</i>	<i>Enhalus acoroides</i>	<i>Cymodocea rotundata</i>	<i>Zostera marina</i>	<i>Sargassum</i> (subtropical)	<i>Sargassum</i> (temperate)	<i>Ulva</i> group	Cultivated <i>Porphyra</i>	Temperate kelps (<i>Ecklonia</i> , etc.)	<i>Saccharina</i> group	
Yaeyama coastal waters (cruise GK19)	288	75	+++++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	262	110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	197	235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	232	253	++++	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±
	193	327	++++	-	-	-	-	++	++	-	-	-	-	-	-	-
	261	444	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-
	244	610	-	-	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	-
	176	676	-	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	+++	-	-
	212	832	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	252	952	++++	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	-	-
	194	987	-	-	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	-
	231	1242	+++++	-	-	-	-	++	+++	-	-	-	+	-	-	-
	215	1665	++++	-	-	-	-	+++	++++	-	-	++	-	-	-	-
	179	1759	++++	-	++++	-	-	+++	++	-	-	-	-	-	-	-
	203	1839	++++	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-
	160	1887	+++++	-	+++	-	-	-	++++	-	-	-	-	-	-	-
	190	1985	++++	±	++++	-	-	-	-	±	++++	-	-	-	-	-
Tokara coastal waters (cruise GB21-1)	g38	489	-	-	-	-	-	-	-	+++++	++	-	±	-	+	
	g222	509	-	-	-	-	-	-	-	++++	+++	-	±	-	+	
	g117	576	-	-	-	-	-	-	-	+++	-	±	-	-	-	
	g22	823	-	-	-	-	-	-	-	+++++	-	-	-	-	+	
	g113	828	-	-	-	-	-	-	-	+++	-	++	+	-	-	
	g60	841	-	-	-	-	-	-	+++	+	+	-	±	-	+	
	g134	1151	-	-	-	-	-	-	-	++	+++	+++++	-	±	-	

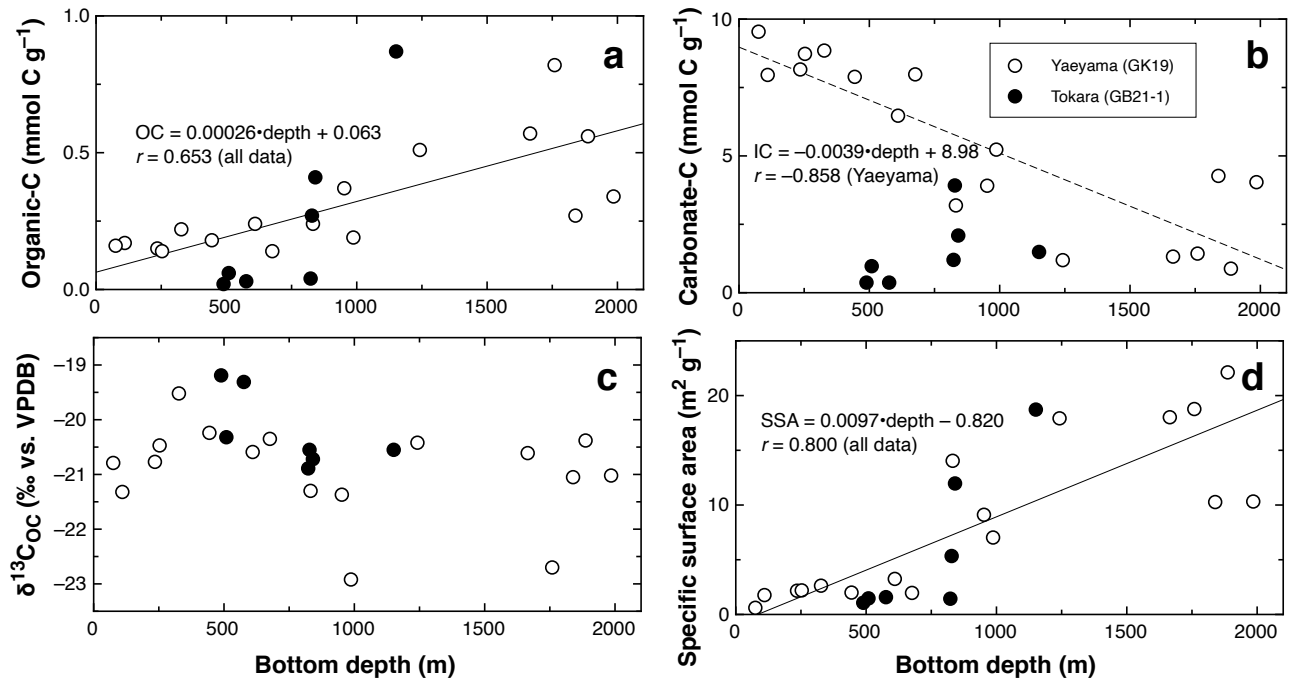


Fig. 2 Concentrations of bulk organic (a) and inorganic (b) carbon in sediment, carbon stable isotope ratios of sediment bulk organic carbon ($\delta^{13}C_{OC}$; c), and specific surface areas of sediment (d) plotted against bottom depths of the sampling sites. Circle, Yaeyama area; dot, Tokara area.

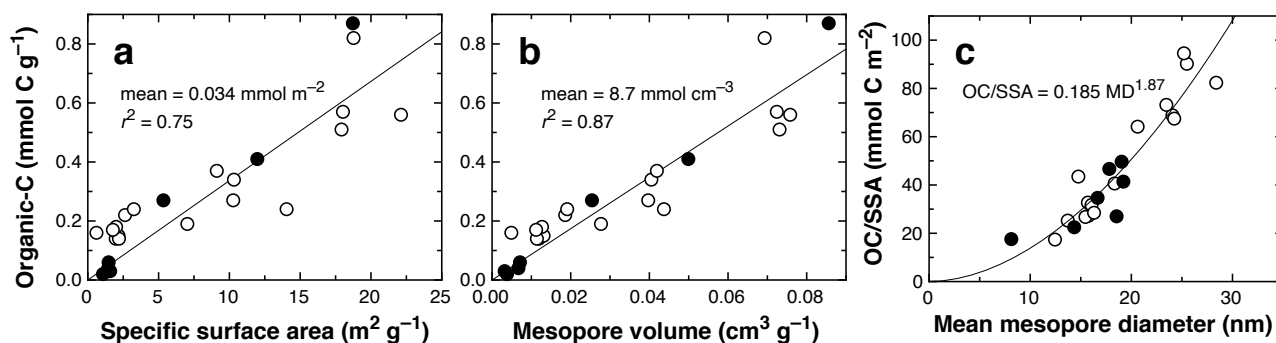


Fig. 3 Relationships between bulk organic carbon concentrations (OC) and granulometric properties of the sediment. (a) Correlation between OC and specific surface area (SSA); (b) correlation between OC and total mesopore volume; and (c) curvilinear relationship between the OC/SSA ratio and mean mesopore diameter. Circle, Yaeyama area; dot, Tokara area.

isotope ratio ($\delta^{15}\text{N}$) of TN ranged from +4.8 ‰ to +6.8 ‰, with three outliers between +7.2 ‰ and +9.3 ‰. The $\delta^{15}\text{N}$ values of sediment TN were higher than those of the POM collected from Sekisei Lagoon (0 ‰ to +3 ‰; unpublished data). The isotope ratios did not show a significant depth trend and collectively imply that the majority of the sediment organic matter in these areas originated from autochthonous suspended POM (i.e., phytoplankton), and was affected to some extent by post-depositional bacterial reworking (early diagenesis), as indicated by the increase in $\delta^{15}\text{N}$ values.

The specific surface area (SSA; Fig. 2d) and total mesopore volume (TMV) of the sediment, as determined by N_2 adsorption analysis, were commonly low for the samples collected from shallow (< 700 m) sites (< 5 m² g⁻¹ and < 0.02 cm³ g⁻¹, respectively). Both SSA and TMV were positively correlated with depth ($r = 0.800$, $p = 0.001$ and $r = 0.761$, $p = 0.002$, respectively). Mean mesopore diameters (MMDs) were generally higher for carbonate than non-carbonate sediments and therefore correlated positively with carbonate concentration ($r = 0.832$, $p = 0.001$) and negatively with depth ($r = -0.602$, $p = 0.010$). These results show that sediment granulometry is constrained by water depth, with the average sediment grain size becoming finer with increasing depth.

The concentrations of bulk OC in the sediments depended closely on the SSA ($r = 0.888$, $p = 0.0004$; Fig. 3a). Such a relationship has frequently been reported for continental shelf sediments and has been interpreted to indicate a close association between OC and mineral surfaces as a principal mechanism for stabilization of OC in sediment (Keil and Mayer, 2014). The ratio of OC to SSA is usually close to 0.07 mmol C m⁻² for non-carbonate shelf sediments (Mayer, 1994) and a bit higher for shallow-water carbonate sediments (Suess, 1973). However, the average OC/SSA ratio for our samples (0.034 mmol C m⁻²) was only half the typical value of shelf sediments. We also found that the bulk OC concentration of our sediment samples depended even more closely on TMV

($r = 0.936$, $p = 0.0002$; Fig. 3b). The OC/SSA ratio was not always constant and clearly depended on MMD (Fig. 3c), which implies that the bulk OC is not only associated with mineral surfaces but is also embedded in mesopore spaces present on mineral surfaces. Assuming that the bulk OC in sediments has the same density as glucose (1.58 g cm⁻³), the average OC/TMV ratio of 8.7 mmol C cm⁻³ (Fig. 3b) indicates that about one-sixth of the available mesopore spaces in our sediment samples were filled with OC. These findings imply that the sediment OC in the study areas is preserved in close association with the steric surface structure of sediment minerals, although the exact mechanism of the association might be somewhat different from the well-known cases of shelf non-carbonate sediment and shallow-water carbonate sediment.

3.2 Detection of macrophyte-derived DNA from sediments

The existence of macrophyte-derived materials in the offshore sediments was successfully demonstrated by detecting DNA sequences specific to macrophyte species in both the Tokara and Yaeyama areas (Table 1). The original samples from the Yaeyama area (GK19) were stored at room temperature for several months before freeze-drying, which might have resulted in DNA degradation by bacteria and fungi. However, the abundance of total macrophyte DNA detected from Yaeyama samples was similar to or even higher than that from the Tokara samples (GB21-1), suggesting that the storage temperature did not seriously influence the detectability of DNA in stored sediments. Based on the correlation of OC with SSA and TMV, the bulk OC in the analyzed samples was preserved in sediment through interactions with mineral surfaces and mesopores (Fig. 3). It is similarly presumed that DNA molecules contained in these samples were also effectively protected from microbiological enzymatic hydrolysis by sorptive interactions with sediment minerals (Cai *et al.*, 2006).

Mangrove and subtropical seagrass species were detected in the surface sediments of the Yaeyama area but not in those from the Tokara area. The mangrove species *Rhizophora stylosa* and *Bruguiera gymnorrhiza* and the seagrasses *Enhalus acoroides* and *Cymodocea rotundata* were often detected in relatively high abundance in sediment samples from deeper than 1,000 m in the Yaeyama area (Table 1). This implies that the deep basin of the Okinawa Trough to the north of the Yaeyama Islands represents an important offshore sink of OC derived from the coastal vegetated habitats that are abundant around these islands. By contrast, DNA fragments of macroalgae were frequently detected in sediments from the Tokara area but were relatively scarce in sediments from the Yaeyama area. The abundance of macroalgal DNA fragments did not correlate with depth. DNA fragments of *Bactrophyucus*, a temperate subgenus of brown algae, were most abundant around the Tokara Islands. Notably, traces of cultivated *Porphyra* and *Saccharina* were also detected at some sites.

The abundances of DNA fragments of the groups of macrophytes listed in Table 1 did not show significant correlations with the bulk OC concentrations or SSA values of the sediments. Although the abundances of DNA fragments of the mangrove species *R. stylosa* and the seagrass *C. rotundata* were marginally correlated ($p = 0.04$), no significant correlation was detected for any other combination of macrophyte groups. The ranges of $\delta^{13}\text{C}$ values typical of seagrasses and mangroves are considerably higher and lower, respectively, than the typical range of pelagic phytoplankton. Therefore, the contribution of these macrophytes to the sediment OC pool might be evidenced by the variation in $\delta^{13}\text{C}$. However, the $\delta^{13}\text{C}$ values of the sediment bulk OC did not correlate with the abundance of DNA fragments derived from any group of the macrophytes examined. This implies that the fraction of macrophyte-derived OC in the bulk OC pool in most of the offshore sediments is consistently small.

The sediment concentration of DNA fragments derived from a specific plant species or group should be correlated with the concentration of OC derived from the same species or group. For example, Hamaguchi *et al.* (2018) found that the concentration of *Zostera marina* DNA fragments in an eelgrass bed sediment core showed a significant positive correlation with the concentration of seagrass-derived OC estimated by carbon isotope mass balancing, being approximated by the following relationship:

$$\begin{aligned} &[\text{DNA concentration (copies (g dry sediment)}^{-1})] \\ &= 4.7401 [\text{seagrass-OC } (\mu\text{mol (g dry sediment)}^{-1})]^{2.072}. \end{aligned}$$

Assuming that the same relationship can be applied to the subtropical seagrass DNA–OC relationship in offshore sediments, it follows that 0–34 % (average, 9.4 %) of OC detected in sediments of the Yaeyama area originated from detritus derived from seagrasses (*Thalassia hemprichii* + *E. acoroides* + *C. rotundata*). However, this estimation is still at a very preliminary stage. More reliable and extensive datasets of relationships between macrophyte-derived OC and DNA preserved in sediments are needed

to quantify the contribution of macrophyte-derived OC in the sedimentary OC stock.

3.3 Factors constraining dispersion of macrophyte-derived organic matter

The contrasting distribution of macrophyte-derived DNA fragments between the Yaeyama and Tokara areas evidences strong control by the Kuroshio current of the dispersal of macrophyte-derived detritus to the open ocean. The Kuroshio current originates from the tropical Philippine Sea (Gordon *et al.*, 2014), flows northward between the Yaeyama Islands and Taiwan, enters the East China Sea (ECS), and then turns eastward to the north of the Yaeyama Islands (Fig. 1a). It then flows northeastward, passes through the Tokara Islands leaving the ECS, and enters the Pacific Ocean, hydrographically isolating the Yaeyama as well as the Miyako, Okinawa, and Amami islands from Taiwan, continental China, the Korean Peninsula, and the main islands of Japan (Ichikawa and Beardsley, 1993). Therefore, most of our sampling sites in the Yaeyama area were to the south of the Kuroshio, and many sites in the Tokara area were just below it.

Our DNA data (Table 1) imply that mangrove- and seagrass-derived material dispersed from vegetated coastal habitats around the Yaeyama Islands is not extensively transported by the Kuroshio current but accumulates mainly within a confined region to the south of the Kuroshio, likely due to hydrodynamic forcing typical of this region (Hasunuma and Yoshida, 1978; Hsin *et al.*, 2008). Because mangrove and seagrass detritus are typically relatively dense and fibrous, it can settle rapidly to deeper layers and accumulate in sediment before being transported long distances by ocean currents.

By contrast, DNA fragments derived from macroalgae were found mainly in the area around the Tokara Islands and were relatively rare in the Yaeyama area. This implies that the source of macrophyte-derived materials in the Tokara area is in the vicinity of the Tokara Islands or somewhere upstream of the Kuroshio current. In fact, small patches of subtropical *Sargassum* spp. are present around the Tokara Islands (Terada and Watanabe, 2017), and these may have been sources of the DNA fragments of this group detected in the sediments of this area. However, temperate *Sargassum* and *Ulva* groups rarely occur in this area (Terada and Watanabe, 2017). The other macrophyte groups for which DNA fragments were detected from Tokara samples, such as *Porphyra*, *Saccharina*, and *Z. marina*, are absent in the Ryukyu Archipelago, including the Tokara Islands. *Porphyra* is an edible seaweed that is cultivated extensively near the mouth of the Changjiang River, as well as on Penghu Island to the west of Taiwan. Therefore, it is possible that detritus and DNA fragments of *Porphyra* were exported by the Taiwan warm current from these aquaculture areas (Zhu *et al.*, 2004), transported by the Kuroshio across the shallow ECS, and eventually trapped within the deep Okinawa Trough near the Tokara Islands. Direct hydrographic connectivity from

the coast of Taiwan to the area surrounding the Tokara Islands has also been supported by model simulations of particle dispersion (Horoiwa *et al.*, 2022). Similarly, *Saccharina* is an industrially important seaweed that is cultivated extensively along the northern Yellow Sea (Bo Hai) coast (Yang *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2021). It is possible that detritus derived from cultivated *Saccharina* was transported by a surface current flowing southward to the east of the Shandong Peninsula toward the area near the Changjiang River mouth (Beardsley *et al.*, 1985), and then carried northeastward by the Kuroshio and eventually trapped in sediment of the deep basin near the Tokara Islands (Hu *et al.*, 2021). A similar pathway could also be assumed for transportation of detritus of *Z. marina*.

In fact, naturally occurring brown algae such as *Sargassum* species are much more abundant along the coast of continental China than in the Ryukyu Archipelago. Thus, it is likely that most of the DNA fragments of temperate *Sargassum* that were abundant in sediments of the Tokara area also originated in continental China and were transported as drifting algae by the Kuroshio (Mizuno *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2022). Thus, it is evident that the Kuroshio current is the principal agent determining the dispersal and accumulation in sediments of macrophyte-derived organic matter, at least in the northern part of the Okinawa Trough near the Tokara Islands (Fig. 1a).

Although our carbon isotope results suggested that macrophyte-derived organic matter represents a relatively minor fraction of the bulk sediment OC in our study areas, it is still possible that the offshore sediment is a quantitatively important sink of the excess OC produced in coastal macrophyte-dominated habitats. Macrophyte detritus exported from these habitats and accumulated in offshore sediment may be an important source of carbon and energy for benthic organisms living in the sediment. The origin and composition of such macrophyte detritus clearly differ between the southern and northern regions of the Okinawa Trough due to the dominant hydrographic influence of the Kuroshio. Such a difference may not only influence sediment organic chemistry but also affect the abundance, composition, and metabolic activity of benthic animals and microorganisms in deep-sea sediment. This is an interesting problem raised by this study that should be addressed in the future.

Acknowledgments: This study was supported financially by JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research No. 18H03354 and project JPJ008722 commissioned by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan.

References

- Alongi, D. (2018) *Blue Carbon: Coastal Sequestration for Climate Change Mitigation*. Springer, Cham, 88p.
- Beardsley, R. C., Limeburner, R., Yu, H. and Cannon, G. A. (1985) Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Research*, **4**, 57–76. doi:10.1016/0278-4343(85)90022-6
- Cai, P., Huang, Q.-Y. and Zhang, X.-W. (2006) Interactions of DNA with clay minerals and soil colloidal particles and protection against degradation by DNase. *Environmental Science & Technology*, **40**, 2971–2976. doi:10.1021/es0522985
- Cebrian, J. (1999) Patterns in the fate of production in plant communities. *The American Naturalist*, **154**, 449–468. doi:10.1086/303244
- Chen, C., Beardsley, R. C., and Limeburner, R. (1992) The structure of the Kuroshio southwest of Kyushu: velocity, transport and potential vorticity fields. *Deep-Sea Research*, **39**, 245–268. doi:10.1016/0198-0149(92)90108-6
- Gordon, A. L., Flament, P., Villanoy, C. and Centurioni, L. (2014) The nascent Kuroshio of Lamon Bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**, 4251–4263. doi:10.1002/2014JC009882
- Hamaguchi, M., Shimabukuro, H., Hori, M., Yoshida, G., Terada, T. and Miyajima, T. (2018) Quantitative real-time polymerase chain reaction (PCR) and droplet digital PCR duplex assays for detecting *Zostera marina* DNA in coastal sediments. *Limnology and Oceanography: Methods*, **16**, 253–264. doi:10.1002/lom3.10242
- Hamaguchi, M., Miyajima, T., Shimabukuro, H. and Hori, M. (2022) Development of quantitative real-time PCR for detecting environmental DNA derived from marine macrophytes and its application to a field survey in Hiroshima Bay, Japan. *Water*, **14**(5), 827. doi:10.3390/w14050827
- Hasunuma, K. and Yoshida, K. (1978) Splitting of the subtropical gyre in the western North Pacific. *Journal of the Oceanographic Society of Japan*, **34**, 160–172. doi:10.1007/bf02108654
- Heck Jr, K. L., Carruthers, T. J. B., Duarte, C. M., Hughes, A. R., Kendrick, G., Orth, R. J. and Williams, S. W. (2008) Trophic transfers from seagrass meadows subsidize diverse marine and terrestrial consumers. *Ecosystems*, **11**, 1198–1210. doi:10.1007/s10021-008-9155-y
- Horoiwa, M., Nakamura, T., Yuasa, H., Kajitani, R., Ameda, Y., Sasaki, T., Taninaka, H., Kikuchi, T., Yamakita, T., Toyoda, A., Itoh, T. and Yasuda, N. (2022). Integrated population genomic analysis and numerical simulation to estimate larval dispersal of *Acanthaster cf. solaris* between Ogasawara and other Japanese regions. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 688139. doi:10.3389/fmars.2021.688139
- Hsin, Y.-C., Wu, C.-R. and Shaw, P.-T. (2008) Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982–2005: A numerical study. *Journal of Geophysical Research*, **113**. doi:10.1029/2007jc004485
- Hu, Z., Shan, T., Zhang, J., Zhang, Q., Critchley, A. T., Choi, H., Yotsukura, N., Liu, F. and Duan, D. (2021)

- Kelp aquaculture in China: a retrospective and future prospects. *Reviews in Aquaculture*, **13**, 1324–1351. doi:10.1111/raq.12524
- Ichikawa, H. and Beardsley, R. C. (1993). Temporal and spatial variability of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea. *Deep-Sea Research I*, **40**, 583–605. doi:10.1016/0967-0637(93)90147-u
- Jennerjahn, T. C. and Ittekkot, V. (2002) Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften*, **89**, 23–30. doi:10.1007/s00114-001-0283-x
- Kawano, T., Igari, T., Imayoshi, Y., Tanaka, T., Tokunaga, S., Yoshimitsu, S. and Terada, R. (2012) Distribution of temperate/tropical seagrass in Satsunan Islands and adjacent waters, Kagoshima Prefecture, Japan. *Aquaculture Science*, **60**, 359–369 (in Japanese with English summary). doi:10.11233/aquaculturesci.60.359
- Keil, R. G. and Mayer, L. M. (2014) Mineral matrices and organic matter. In: Holland, H. D. and Turekian, K. K., eds., *Treatise on Geochemistry, Second edition*, Elsevier, Vol. 12: *Organic Geochemistry*, 337–359. doi:10.1016/B978-0-08-095975-7.01024-X
- Mayer, L. M. (1994) Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 1271–1284. doi:10.1016/0016-7037(94)90381-6
- Miyajima, T., Hori, M., Hamaguchi, M., Shimabukuro, H., Adachi, H., Yamano, H. and Nakaoka, M. (2015) Geographic variability in organic carbon stock and accumulation rate in sediments of East and Southeast Asian seagrass meadows. *Global Biogeochemical Cycles*, **29**, 397–415. doi:10.1002/2014GB004979
- Miyajima, T., Hori, M., Hamaguchi, M., Shimabukuro, H. and Yoshida, G. (2017) Geophysical constraints for organic carbon sequestration capacity of *Zostera marina* seagrass meadows and surrounding habitats. *Limnology and Oceanography*, **62**, 954–972. doi:10.1002/lno.10478
- Mizuno, S., Ajisaka, T., Lahbib, S., Kokubu, Y., Alabsi, M. N. and Komatsu, T. (2014) Spatial distributions of floating seaweeds in the East China Sea from late winter to early spring. *Journal of Applied Phycology*, **26**, 1159–1167. doi:10.1007/s10811-013-0139-8
- Nakasuga, T., Oyama, H. and Haruki, M. (1974) Studies on the mangrove community. I. The distribution of the mangrove community in Japan. *Japanese Journal of Ecology*, **24**, 237–246 (in Japanese with English summary). doi:10.18960/seitai.24.4_237
- Ortega, A., Geraldi, N. R. and Duarte, C. M. (2020) Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to Blue Carbon sediments. *Limnology and Oceanography*, **65**, 3139–3149. doi:10.1002/lno.11579
- Queirós, A. M., Stephens, N., Widdicombe, S., Tait, K., McCoy, S. J., Ingels, J., Rühl, S., Airs, R., Beesley, A., Carnovale, G., Cazenave, P., Dashfield, S., Hua, E., Jones, M., Lindeque, P., McNeill, C. L., Nunes, J., Parry, H., Pascoe, C., Widdicombe, C., Smyth, T., Atkinson, A., Krause-Jensen, D. and Somerfield, P. J. (2019) Connected macroalgal-sediment systems: blue carbon and food webs in the deep coastal ocean. *Ecological Monographs*, **89**, e01366. doi:10.1002/ecm.1366
- Reef, R., Atwood, T. B., Samper-Villarreal, J., Adame, M. F., Sampayo, E. M. and Lovelock, C. E. (2017) Using eDNA to determine the source of organic carbon in seagrass meadows. *Limnology and Oceanography*, **62**, 1254–1265. doi:10.1002/lno.10499
- Reichardt, W. T. (1987) Burial of Antarctic macroalgal debris in bioturbated deep-sea sediments. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, **34**, 1761–1770. doi:10.1016/0198-0149(87)90024-0
- Santos, I. R., Burdige, D. J., Jennerjahn, T. C., Bouillon, S., Cabral, A., Serrano, O., Wernberg, T., Filbee-Dexter, K., Guimond, J. A. and Tamborski, J. J. (2021) The renaissance of Odum’s outwelling hypothesis in ‘Blue Carbon’ science. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **255**, 107361. doi: 10.1016/j.ecss.2021.107361
- Stiger, V., Horiguchi, T., Yoshida, T., Coleman, A. W. and Matsuda, M. (2003) Phylogenetic relationships within the genus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae), inferred from ITS-2 nrDNA, with an emphasis on the taxonomic subdivision of the genus. *Phycological Research*, **51**, 1–10. doi:10.1046/j.1440-1835.2003.00287.x
- Suess, E. (1973) Interaction of organic compounds with calcium carbonate - II. Organo-carbonate association in Recent sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **37**, 2435–2447. doi:10.1016/0016-7037(73)90290-1
- Tanaka, Y. and Kayanne, H. (2007) Relationship of species composition of tropical seagrass meadows to multiple physical environmental factors. *Ecological Research*, **22**, 87–96. doi:10.1007/s11284-006-0189-3
- Terada, R. and Watanabe, Y. (2017) Seaweeds and coastal environment in the Osumi Islands. In: Kawai, K., Terada, R. and Kuwahara, S., eds., *The Osumi Islands*, Kagoshima University, Kagoshima, 104–108.
- Xiao, J. (2019) *Final report on progress of drifting Sargassum horneri in Yellow Sea*. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China, 30p.
- Yang, C.-M., Tung, Y.-F., Li, J.-J., Miyazawa, H. and Hiroyoshi, K. (2009) Brief survey on the aquaculture of Japanese-kelp (Konbu) in China and the Konbu-market in Taiwan. *The Review of Agricultural Economics (Hokkaido University)*, **64**, 41–51 (in Japanese with English summary).
- Yuan, C., Xiao, J., Zhang, X., Fu, M. and Wang, Z. (2022) Two drifting paths of *Sargassum* bloom in the Yellow Sea and East China Sea during 2019–2020. *Acta Oceanologica Sinica*, **41**, 1–10. doi:10.1007/s13131-021-1894-z
- Zhu, J., Chen, C., Ding, P., Li, C. and Lin, H. (2004) Does the Taiwan warm current exist in winter? *Geophysical*

Research Letters, **31**. doi:10.1029/2004gl019997

Received December 22, 2021

Accepted June 16, 2022

Published on-line September 9, 2022

定量的 DNA 検出技術を利用したトカラ列島・八重山諸島近海堆積物における 沿岸植生帯由来有機物の分散・貯留状況の解析

宮島 利宏・浜口 昌巳・中村 隆志・片山 肇・堀 正和

要 旨

沿岸海浜部に発達する海草藻場・大型藻類群落・マングローブ等の植生帯からは、その一次生産物が外洋域に多量に流出しており、深海への炭素貯留や深海生物生産の駆動に貢献することを通して沿岸植生帯による生態系サービスの重要な媒体となっていると考えられるが、その実態は断片的にしか分かっていない。本研究では、新たに開発した定量的 PCR 技術を応用して、八重山諸島近海及びトカラ列島近海の外洋表層堆積物における植物由来 DNA 分子の面的分布を定量的に評価することにより、沿岸植生帯に由来する有機物の深海底への供給を植物種別に立証し、起源推定を行うとともに、その分散過程を支配する要因としての黒潮の役割について考察した。また、比較のために底質中の全有機炭素、炭素・窒素安定同位体比、炭酸塩、比表面積等の分布を調査し、外洋底質への有機炭素貯留とそれに対する沿岸植生帯の潜在的寄与に関して検討を行った。

トカラ列島周辺の深海域における表層堆積物の微生物群集構造

池内 絵里^{1,*}・鈴木 克明¹・井口 亮¹・鈴木 淳¹

IKEUCHI Eri, SUZUKI Yoshiaki, IGUCHI Akira and SUZUKI Atsushi (2022) Microbial community structure of surface sediments in the deep-sea area around the Tokara Islands, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 323–328, 2 figs, 1 table.

Abstract: To accumulate distribution information for microbes around Japan, we analyzed the microbial community in the surface sediments of the marine geological survey in the waters surrounding the Tokara Islands, Japan (GB21-1). DNA was successfully obtained from 42 of 47 samples collected, sequenced by high-throughput sequencer, and analyzed by R. The results of the analysis showed that many DNA sequences were identified as belonging to *Gammaproteobacteria* and *Alphaproteobacteria* of the phylum *Proteobacteria*, followed by *Actinobacteria* of the phylum *Actinobacteriota*. Microbial community structure tends to be grouped according to the depth zone and the type of substrate. It may be possible to compare geographical differences in microbial communities by increasing the number of sites. This study is the first comprehensive and quantitative assessment of the microbial community structure in the Tokara Islands and is expected to be used as basic information for future understanding of deep-sea communities and environmental impact assessment.

Keywords: Tokara Islands, Deep-sea, Microbial communities, Metabarcoding, Sediments

要 旨

日本周辺の深海域における表層堆積物の微生物分布情報の蓄積のため、トカラ列島周辺海域で実施した海域地質調査(GB21-1)において、表層堆積物の微生物の群集解析を行った。採取した表層堆積物47試料のうち42試料からのDNA抽出に成功し、ハイスループットシーケンサーによる塩基配列の決定、R(R Core Team, 2021)による解析を行った。解析の結果、*Proteobacteria*門の*Gammaproteobacteria*綱と*Alphaproteobacteria*綱、次いで*Actinobacteriota*門の*Actinobacteria*綱に同定されるDNA配列が多く検出された。微生物群集構造は水深帯及び底質の種類でグループが分かれる傾向にあることが示され、水深と底質に影響を受ける可能性が示唆された。今後調査地点を増やすことで微生物群集の地理的な違いも比較できる可能性がある。本研究はトカラ列島海域において初めて網羅的かつ定量的に底質の微生物群集構造を評価した点で貴重な知見であり、今後の深海域の生物多様性の把握や、環境影響評価を行う上で基礎的な情報として活用されることが期待される。

1. はじめに

環境中の生物群集構造や種多様性を把握することは、生態学や生物地理学、保全生物学的な観点からも重要な課題である。深海域においても、様々な生物種から構成される生態系が成り立っており、その現状把握や環境影響評価には主に底生生物が用いられてきた。しかし、深海域での底生生物の目視による形態学的同定は時間がかかり、高度な専門知識が必要である。近年の遺伝子解析技術の進展により、海水や表層堆積物などの環境試料に残存するDNAを抽出し解析することで、環境中に生息している生物種の存在を把握可能な、いわゆる環境DNA解析が注目されている(Jackson *et al.*, 2016; Pawlowski *et al.*, 2020ほか)。細菌等の微生物においても、環境DNA解析を通じて深海域における多様性評価が世界各地で進んでいる(Wu *et al.*, 2013; Lindh *et al.*, 2017ほか)。我々はこの手法を、コバルトリッチクラストや表層メタンハイドレートなどの海洋エネルギー・鉱物資源の開発に係る環境ベースライン調査及び影響評価手法へ応用する研究を進めているが、日本周辺海域における深海域の表層堆積物の微生物の多様性情報の蓄積はほとんどなく、地域間での比較を実施する上での障害となっている。海域

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: IKEUCHI, E., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: e.ikeuchi@aist.go.jp

地質図プロジェクトで実施している海底表層堆積物採取調査では、稠密な採泥点の配置、不攪乱の試料の採取、水深・水温・粒度・堆積物組成等の充実した随伴情報など、環境DNA解析に最適な試料が得られる。本研究では、戦略的な知的基盤整備の一環として、トカラ列島周辺海域を対象に、深海域における表層堆積物の微生物の多様性情報の収集を目的とした調査を行った。

2. 方法

2.1 表層採泥

東海大学所有の望星丸を備船し、2021年3月6日から3月25日にかけてトカラ列島周辺海域において海域地質調査航海GB21-1を実施した。本調査での表層採泥は第1表及び第1図に示す61地点において木下式グラブ採泥器(K-グラブ)を用いて行った(鈴木ほか, 2022)。DNA解析用の試料は、充分量の底質試料が回収できた47地点において、使い捨ての滅菌済みプラスチックスプーンを用いてユニパックに湿重量10 g程度を採取した。底質は船上でのグラブ試料表面の肉眼観察に基づき礫、砂、泥の3種類に簡易的に分類した。採取した試料は船内の-60℃の冷凍庫内で保存、下船時に-15℃以下で保冷して輸送し研究室に持ち帰った。

2.2 DNA抽出

研究室にて底質試料のDNA抽出は、DNAeasy Power Soil Kit (QIAGEN, Valencia, CA, USA)を用いた。抽出の主な操作はキットの手順書に従った。細胞等の破碎はキット付属のPowerBeadと、FastPrep Beads Beater (FastPrep-24 5G, M. P. Biomedicals, CA, USA)を用いた。底質を破碎後、遠心分離により上澄みを回収して、タンパク質変性、フミン等の除去操作を行い、スピニングカラムフィルターによる精製を行った。得られたDNAは10 µLのTE溶液(10 mM Tris-HCl, 1 mM EDTAの混合液:pH 8.0)に溶出した。Qubit 2.0フルオロメーター(Invitrogen, Carlsbad, USA)及びQubitアッセイ(dsDNA用, ThermoFisher Scientific, Waltham, USA)を使い、キット付属の手順書に従って二本鎖DNA濃度を測定した。濃度測定の結果、得られた値をもとに、0.5 ng/µLのDNA濃度として調整し、後述するPCR用の水で希釈して0.5 ng/µL濃度のDNA溶液として調製した。

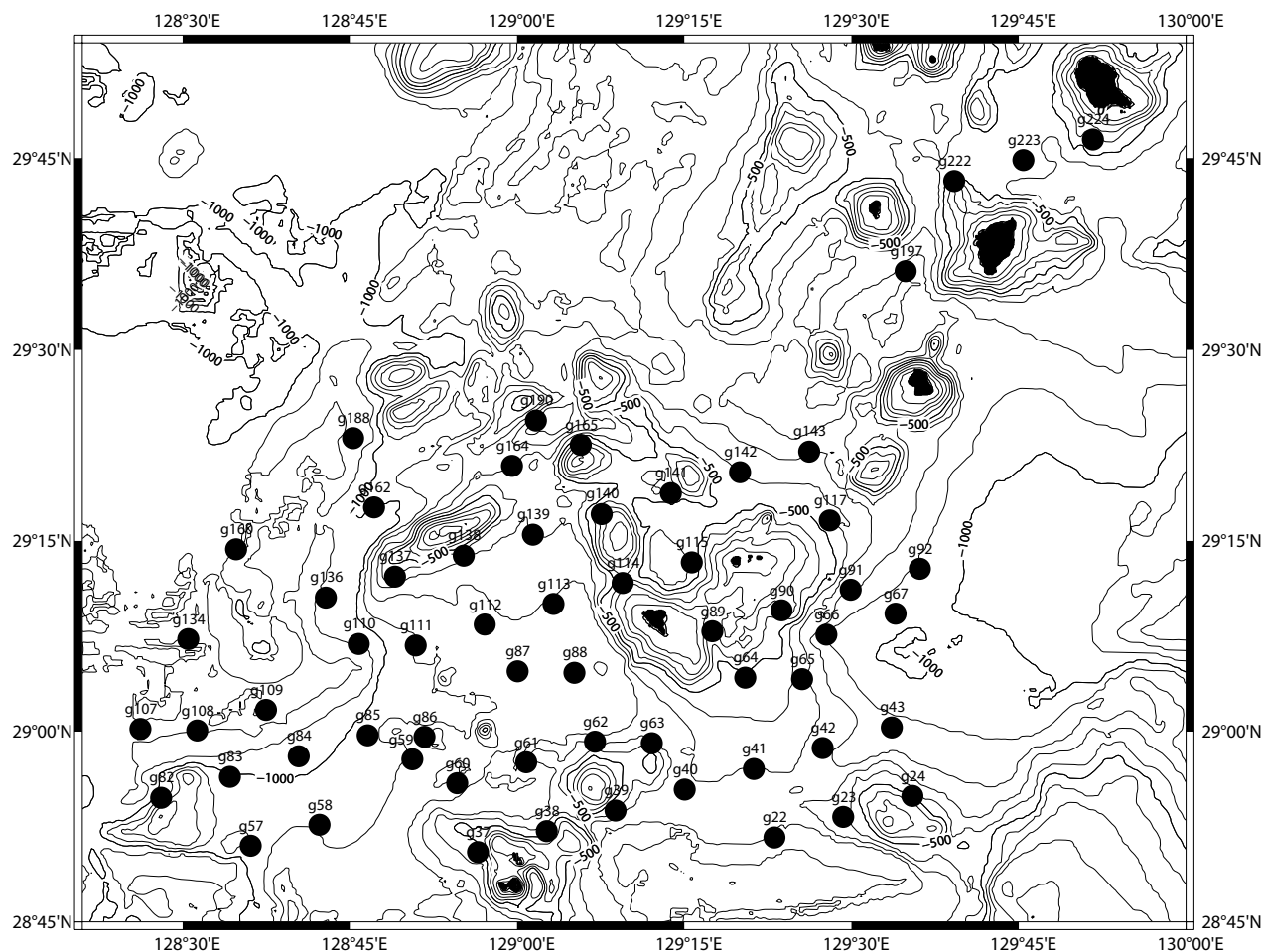
2.3 PCR (Polymerase Chain Reaction)

PCR操作からハイスループットシーケンサーによる解析までの主な手法はTakahashi *et al.* (2014)によった。細菌及び古細菌の16S rRNA遺伝子塩基配列V3領域を増幅する、イルミナ社Miseqシーケンサー用アダプター配列を付属したプライマーである、フォワードプライマー Pro341F (5'-ACACTCTTTCCTACACGACGCTCTCCG ATCTCCTACGGGNBGCASCAG)とリバースプライマー

第1表 本調査(GB21-1)でK-グラブを用いて表層採泥を実施した地点の緯度経度と水深。

Table 1 Latitude/longitude and water depth of the sites where surface sediment sampling was carried out using K-grabs in this survey (GB21-1).

Site	latitude (°N)	longitude (°E)	Depth (m)
g22	28.515995	129.231519	823
g23	28.533643	129.294443	572
g24	28.544605	129.354605	473
g37	28.504589	128.564466	543
g38	28.52545	129.27093	489
g39	28.537013	129.89014	657
g40	28.554893	129.15624	702
g41	28.57398	129.212051	705
g42	28.586501	129.272013	735
g43	29.03873	129.335522	861
g57	28.5151	128.361302	1005
g58	28.526583	128.422701	960
g59	28.578635	128.506561	849
g60	28.559058	128.547102	841
g61	28.576100	129.07988	759
g62	28.592091	129.7376	746
g63	28.59953	129.121000	587
g64	29.42796	129.203852	524
g65	29.41381	129.254945	638
g66	29.76533	129.277371	896
g67	29.92860	129.338176	943
g82	28.547817	128.28658	942
g83	28.564046	128.341743	852
g84	28.58798	128.403693	958
g85	28.597399	128.465112	942
g86	28.595391	128.517776	847
g87	29.48281	128.599481	883
g88	29.46494	129.51060	699
g89	29.79615	129.174972	248
g90	29.95475	129.237009	353
g91	29.11639	129.298061	808
g92	29.128182	129.361468	924
g107	29.01751	128.261948	1077
g108	29.0568	128.313265	1169
g109	29.16820	128.375274	1163
g110	29.67410	128.456022	1071
g111	29.67940	128.507253	915
g112	29.84644	128.57307	836
g113	29.10701	129.32352	828
g114	29.117201	129.94828	323
g115	29.133392	129.156489	614
g117	29.165603	129.288117	576
g134	29.72858	128.306054	1151
g136	29.105208	128.428744	1034
g137	29.122520	128.49771	677
g138	29.138414	128.553223	714
g139	29.154348	129.14751	709
g140	29.17461	129.75794	222
g141	29.186921	129.138600	475
g142	29.203808	129.199290	583
g143	29.219974	129.262133	669
g160	29.144154	128.349465	1125
g162	29.176520	128.472356	1003
g164	29.209138	128.595821	682
g165	29.225597	129.57507	173
g188	29.23617	128.452755	1145
g190	29.244932	129.17208	932
g197	29.361061	129.349611	868
g222	29.432350	129.392688	509
g223	29.446310	129.454393	563
g224	29.463369	129.518721	416



第1図 各試料採取地点の位置関係を示す地図。各試料採取地点の位置関係を示す地図。岸本 (2000) より改訂。

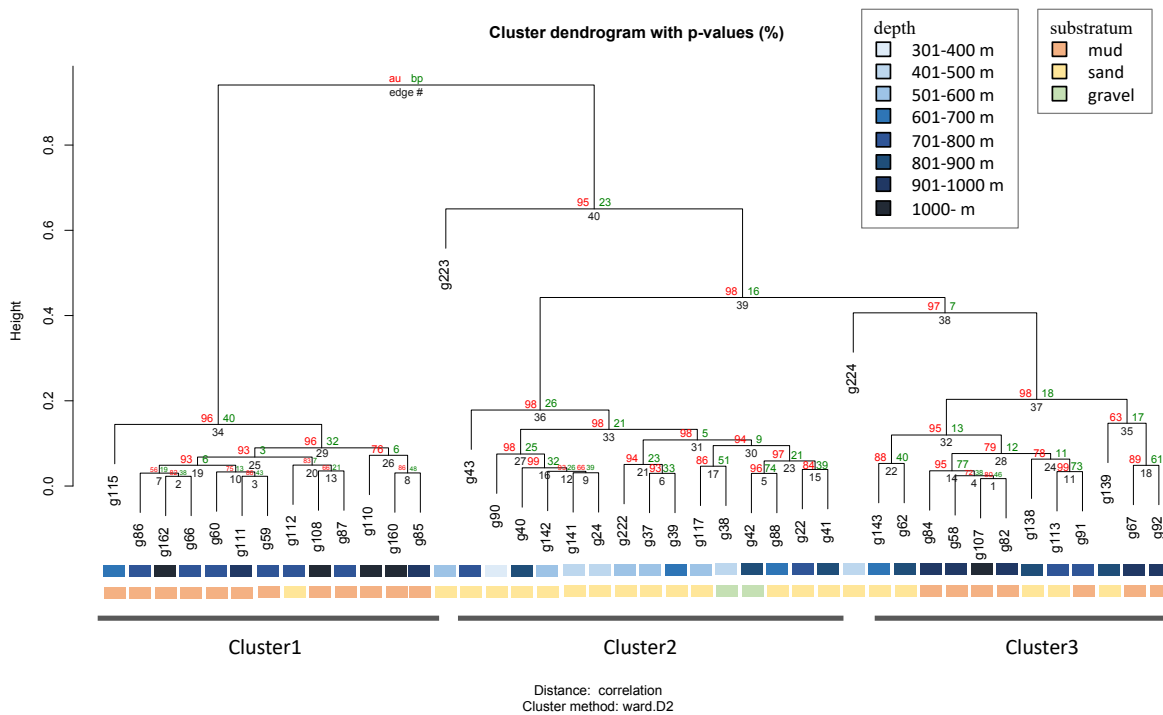
Fig. 1 Map showing the location of each sampling site. Map showing the location of each sampling site. Modified from Kishimoto (2000).

Pro805R (5' -GTGACTGGAGTTCAGACGTGTGCTCTTCCG ATCTGACTACN VGGGTATCTAATCC) を用いた (Takahashi *et al.*, 2014). PCR用の酵素としては, Mighty Amp[®] DNA Polymerase Ver.2 (Takara Bio Inc., Shiga, Japan) を用い, 1 ngの鋳型DNA及び0.25 mMのプライマーセットを加えた (Takahashi *et al.*, 2014). 1st PCRのサーマルサイクルの条件として, タッチダウンPCR法を用いた (Muyzer *et al.*, 1993). 具体的には98℃, 2分間で酵素を活性化させたのち, 熱変性 (98℃, 10秒), アニール (15秒), 伸長反応 (68℃, 30秒) のサイクルのうち, 最初のサイクルをアニール温度65℃で開始し, 以降1サイクルごとに1℃下げながら56℃まで行い, 次いで55℃で25サイクルを実施した. PCR増幅によるバイアスを把握する目的で1st PCR反応は1試料あたり2本を用いて行い, 増幅産物の有無をアガロースゲル電気泳動で確認後, 2本分の試料を1本にまとめて取り扱った. さらに磁気ビーズ試薬Agencourt AMPure XP (Beckman-Coulter, Villepinte, France) により精製し, それを2nd PCRのための鋳型DNA

溶液とした. 2nd PCRでは, ハイスループットシーケンサーで並列解析する際に必要な試料ごとに個別のタグ配列 (Index) を付加した. 2nd PCRの諸条件は, 1st PCRのときと同様とした. なお, 本調査では, アンプリコンのフォワード側及びリバース側の両方にタグ配列を付与するペアエンド解析とし, タグ配列はフォワード側及びリバース側の両方で完全に異なるように組み合わせた. 2nd PCR産物は, 磁気ビーズ試薬Agencourt AMPure XP (Beckman-Coulter, Villepinte, France) により精製し, 各ライブラリを4 nMになるように濃度調整して, 1本のマイクロチューブにまとめた.

2. 4 ハイスループットシーケンサー解析

ハイスループットシーケンサー用に調製したアンプリコンをプールしたライブラリを用いて, イルミナMiSeqによる塩基配列解析を実施した. 解析用のキットはMiseq Reagent Kit V3 (600サイクル; Illumina) を用い, ランクオリティーの改善のためにPhix Control V3 (Illumina,



第2図 地点ごとの微生物群集構造の類似度から作成した樹形図。採泥地点の水深、グラブ表面の状態を色で分けて表示している。各エッジの上の数値は、右の緑はマルチスケールでのブートストラップ値 (BP)、左の赤は近似的に普遍的ブートストラップ値 (AU) を示す。各エッジの下の灰色の数値はエッジ番号を示す。

Fig. 2 Dendrogram based on the similarity of microbial community composition between sites. The water depths at the condition of the grab surface are indicated by different colors. Numbers above each edge indicate multi-scale bootstrap values (BP; green on the right) and approximately unbiased P-values (AU; red on the left). Gray numbers below each edge indicate the edge number.

San Diego, CA) を調製したアンプリコンプールと等量混合した。これを塩基長301 bpのペアードエンドシーケンスとしてIllumina Miseq Sequence System (Illumina, San Diego, CA) で配列を取得した。

2. 3 データ解析

イルミナMiSeqによって、塩基配列とそのクオリティスコアが記述されたfastqファイルを試料毎に出力した。フォワード配列のfastqファイルについて、ソフトウェアパッケージQiime2 2021.4 (Bolyen *et al.*, 2019) に実装されたCutadapt (Martin, 2011) を用いてプライマー配列の除去を行った後、DADA2 (Callahan, 2016) を用いてエラー配列・低品質配列 (Q値 < 20) ・キメラ配列・重複配列の除去を行った。得られたアンプリコン配列変異体 (amplicon sequence variant, ASV) に対して、16S rRNA遺伝子の配列データベース Silva 138 SSURef NR99 full-length sequences (Quast *et al.*, 2013 ; Yilmaz *et al.*, 2014 ; Robeson *et al.*, 2020) を参照し、単純サイズ分類器 (Bokulich *et al.*, 2018) を用いて生物名の割り当てを行った。QIIME2で出力された各地点とASVをまとめたcsvファイルを用いて、ソフトウェアR (R Core team, 2021) によるデータ処理を

行った。各群集データについて希薄化曲線を描き、同じもしくは同等のサンプリングエフォートの下で群集間の比較可能性を確認した上で、低頻度 (0.1%) のASVを削除した。群集の類似度を比較するために、Ward法によるクラスター解析を実施した。また、水深を100 mごとにカテゴリー分けし、水深と底質を説明変数としたPermutational analysis of variance (PERMANOVA) による検定を行った。

3. 結果と考察

配列が決定した42試料から、4,479,105のASVが得られた。解析の結果、全ての地点でProteobacteria門のGammaproteobacteria綱とAlphaproteobacteria綱、次いでActinobacteriota門のActinobacteria綱に同定されるDNA配列が多く検出された。Actinobacteria門及びGammaproteobacteria綱は海洋でもよく見られているバクテリアを含む分類群である (Blackall *et al.*, 2015 ; Ainsworth *et al.*, 2015 ; Bourne *et al.*, 2016) 。Rによるクラスター解析を行った結果、非階層クラスターとして検出すると2つのグループが確認されたが、階層クラスターの場合はおよそ3つのクラスターに分かれた (第2

図). なお, 調査地点g223とg224はこれら3つのクラスターのどれにも属さない位置にあった. また, クラスタ1はg112を除き全ての底質試料は泥質であり, クラスタ2は砂質と礫質であった. また, クラスタ1は比較的水深が深く, クラスタ2は比較的水深が浅かった. 非階層クラスタ解析で抽出されたグループ1には *Gammaproteobacteria*綱が, グループ2 (主に第2図のクラスタ2) には *Actinobacteriota*門が比較的多く見られた. PERMANOVAによる検定を行った結果, 微生物群集は水深と底質で有意な差異が検出された ($p < 0.01$) が, 水深と底質の交互作用項は有意ではなかった ($p > 0.1$). 以上の結果より, 深海の表層堆積物の微生物群集構造は, 水深や底質に影響を受けている可能性が示唆された. さらにg223とg224は他の調査地域と比べて北側に位置しており, 今後周辺の調査地点を増やすことで微生物群集の地理的な違いも比較できる可能性がある.

水深200 m以上の深海は, 地球上で体積・面積ともに最大の生物の生息地であるが, アクセスの困難さから微生物群集を把握するための十分なデータの蓄積ができていない. 本研究はトカラ列島海域において初めて網羅的かつ定量的に底質の微生物群集構造を評価した点で貴重な知見である. 今回の研究成果は, 今後の深海生物群集の把握や, 環境影響評価を行う上で基礎的な情報として活用されることが期待される.

謝辞: 本研究は, 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による「海域地質図プロジェクト」の一環として, また, 国立研究開発法人産業技術総合研究所・環境調和型産業技術研究ラボ (E-code) の支援を受けて実施されたものである. 調査航海にあたって, 団長である井上卓彦研究グループ長には多大なるご協力, ご支援をいただいた. 東海大学の海洋調査研修船「望星丸」の船長ならびに乗組員, 練習生, 乗船研究者の方々には安全な調査の実施及び快適な船内生活を送る上でたいへんお世話になった. また, 遺伝子実験の手法について産総研テクニカルスタッフの西島美由紀博士, データの解析には産総研特別研究員の水山 克博士にご指導いただいた. この場を借りて厚く御礼申し上げる.

文 献

- Ainsworth, T. D., Krause, L., Bridge, T., Torda, G., Raina, J. B., Zakrzewski, M., Gates, R. D., Padilla-Gamiño, J. L., Spalding, H. L., Smith, C., Woolsey, E. S., Bourne, D. G., Bongaerts, P., Hoegh-Guldberg, O. and Leggat, W. (2015) The coral core microbiome identifies rare bacterial taxa as ubiquitous endosymbionts. *The ISME journal*, **9**, 2261–2274.
- Blackall, L. L., Wilson, B. and van Oppen, M. J. (2015) Coral—the world's most diverse symbiotic ecosystem. *Molecular Ecology*, **24**, 5330–5347.
- Bokulich, N. A., Kaehler, B. D., Rideout, J. R., Dillon, M., Bolyen, E., Knight, R., Huttley, G. A. and Caporaso, J. G. (2018) Optimizing taxonomic classification of marker-gene amplicon sequences with QIIME 2's q2-feature-classifier plugin. *Microbiome*, **6**, 90.
- Bolyen, E., Rideout J. R., Dillon, M. R., Bokulich, N. A., Abnet, C. C., Al-Ghalith, G. A., Alexander, H., Alm, E. J., Arumugam, M., Asnicar, F., Bai, Y., Bisanz, J. E., Bittinger, K., Brejnrod, A., Brislawn, C. J., Brown, C. T., Callahan, B. J., Caraballo-Rodríguez, A. M., Chase, J., Cope, E. K., Silva, R. D., Diener, C., Dorrestein, P.C., Douglas, G. M., Durall, D. M., Duvallet, C., Edwardson, C. F., Ernst, M., Estaki, M., Fouquier, J., Gauglitz, J. M., Gibbons, S. M., Gibson, D. L., Gonzalez, A., Gorlick, K., Guo, J., Hillmann, B., Holmes, S., Holste, H., Huttenhower, C., Huttley, G. A., Janssen, S., Jarmusch, A. K., Jiang, L., Kaehler, B. D., Kang, K. B., Keefe, C. R., Keim, P., Kelley, S. T., Knights, D., Koester, I., Kosciulek, T., Kreps, J., Langille, M. G. I., Lee, J., Ley, R., Liu, Y., Loftfield, E., Lozupone, C., Maher, M., Marotz, C., Martin, B. D., McDonald, D., McIver, L. J., Melnik, A. V., Metcalf, J. L., Morgan, S. C., Morton, J. T., Naimey, A. T., Navas-Molina, J. A., Nothias, L. F., Orchanian, S. B., Pearson, T., Peoples, S. L., Petras, D., Preuss, M. L., Pruesse, E., Rasmussen, L. B., Rivers, A., Robeson II, M. S., Rosenthal, P., Segata, N., Shaffer, M., Shiffer, A., Sinha, R., Song, S.J., Spear, J. R., Swafford, A. D., Thompson, L. R., Torres, P. J., Trinh, P., Tripathi, A., Turnbaugh, P. J., Ul-Hasan, S., van der Hoof, J. J. J., Vargas, F., Vázquez-Baeza, Y., Vogtmann, E., von Hippel, M., Walters, W., Wan, Y., Wang, M., Warren, J., Weber, K. C., Williamson, C. H. D., Willis, A. D., Xu, Z. Z., Zaneveld, J. R., Zhang, Y., Zhu, Q., Knight, R. and Caporaso, J. G. (2019) Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature biotechnology*, **37**, 852–857.
- Bourne, D. G., Morrow, K. M. and Webster, N. S. (2016) Insights into the coral microbiome: underpinning the health and resilience of reef ecosystems. *Annual Review of Microbiology*, **70**, 317–340.
- Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A. and Holmes, S. P. (2016) DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature methods*, **13**, 581–583.
- Jackson, M. C., Weyl, O. L. F., Altermatt, F., Durance, I., Friberg, N., Dumbrell, A. J., Piggott, J. J., Tiegs, S. D., Tockner, K., Krug, C. B., Leadley, P. W. and Woodward, G. (2016) Recommendations for the next generation of

- global freshwater biological monitoring tools. *Advances in ecological research*, **55**, 615–636.
- 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).
- Lindh, M. V., Maillot, B. M., Shulze, C. N., Gooday, A. J., Amon, D. J., Smith, C. R. and Church, M. J. (2017) From the surface to the deep-sea: bacterial distributions across polymetallic nodule fields in the clarion-clipperton zone of the Pacific Ocean. *Frontiers in microbiology*, **8**, 1696.
- Martin, M. (2011) Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet. journal*, **17**, 10–12.
- Muyzer, G., De Waal, E. C. and Uitterlinden, A. (1993) Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Applied and environmental microbiology*, **59**, 695–700.
- Pawlowski, J., Apothéloz-Perret-Gentil, L. and Altermatt, F. (2020) Environmental DNA: What's behind the term? Clarifying the terminology and recommendations for its future use in biomonitoring. *Molecular Ecology*, **29**, 4258–4264.
- Quast, C., Pruesse, E., Yilmaz, P., Gerken, J., Schweer, T., Yarza, P., Peplies, J. and Glöckner, F.O. (2013) The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. Opens external link in new windowNucl. *Nucleic acids research*. **41**, D590–D596.
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (閲覧日:2021年9月25日).
- Robeson, M. S., O'Rourke, D. R., Kaehler, B. D., Ziemski, M., Dillon, M. R., Foster, J. T. and Bokulich, N. A. (2020) RESCRIPt: Reproducible sequence taxonomy reference database management for the masses. bioRxiv. 2020.10.05.326504. doi: 10.1101/2020.10.05.326504
- 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.
- Takahashi, Y., Nagata, N. and Kawata, M. (2014) Antagonistic selection factors induce a continuous population divergence in a polymorphism. *Heredity*, **112**, 391–398.
- Wu, Y. H., Liao, L., Wang, C. S., Ma, W. L., Meng, F. X., Wu, M. and Xu, X. W. (2013) A comparison of microbial communities in deep-sea polymetallic nodules and the surrounding sediments in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **79**, 40–49.
- Yilmaz, P., Parfrey, L. W., Yarza, P., Gerken, J., Pruesse, E., Quast, C., Schweer, T., Peplies, J., Ludwig, W. and Glöckner, F. O. (2014) The SILVA and “all-species living tree project (LTP)” taxonomic frameworks. *Nucleic acids research*, **42**, D643–D648.

(受付 : 2021年12月22日 ; 受理 : 2022年9月6日)

トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集 (予報)

中野 太賀^{1,*}・岩谷 北斗^{1,*}・鈴木 克明²・板木 拓也²・久保 観¹・佐々木 聡史³

NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KUBO Nozomi and SASAKI Satoshi (2022) Preliminary report of recent ostracode assemblages from the adjacent sea of Tokara Gap. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 329–335, 3 figs, 2 tables.

Abstract: We studied the spatial distribution of the recent ostracode in the adjacent sea of Takarajima Island, Japan. This is the first study to report the recent ostracode assemblages in the study area. We examined the ostracode faunal composition in 5 surface sediments collected by GB21-1 cruise (AIST). As a result, at least 60 ostracode taxa were identified. Most of the assemblages were subtropical and tropical water species that have been reported from the East China Sea. Three ostracode bioassociations and two biofacies were discriminated based on R-mode and Q-mode cluster analyses. Ostracode bioassociations and biofacies were correlated with the water depth and the mud content. Thus, it is likely that recent ostracode assemblages in the adjacent sea of Takarajima Island were affected by surface sediment variations accompanied by water depth changes.

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

要 旨

本研究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する。解析にはGB21-1航海によって採取された表層堆積物5試料を用い、トカラ列島に属する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、研究海域から貝形虫が初めて認められ、60属以上を同定した。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った。R-modeクラスター分析の結果、3つの貝形虫種群に分類され、Q-modeクラスター分析では2つの貝形虫相が認定された。これらの種群や貝形虫相は水深や含泥率と相関関係を示したことから、宝島周辺の貝形虫群集は水深に伴い変化する底質の影響を受けると推測される。

1. はじめに

南西諸島は、アジア大陸と日本列島を弧状につなぐ島嶼群である。この弧状列島にはトカラギャップ、ケラマギャップと呼ばれる2つの海底地形上の境界があり(第1

図)、これらの“ギャップ”は、水深1000 mを超える海底谷により特徴づけられる(木村, 1996)。トカラギャップ、ケラマギャップは、それぞれ渡瀬線、蜂須賀線と呼ばれる陸棲動物の生物地理区境界と一致することが知られている(Komaki, 2021)。とくに小宝島と悪石島の間に位置するとされるトカラギャップ上に置かれる渡瀬線は、熱帯系生物の北限と暖帯系生物の南限を区分する重要な生物地理区の境界として広く認識されてきた(例えば、黒田, 1931; 木村, 1996)。しかしKomaki (2021)によると、最近では文献調査の結果、渡瀬線の制定に明確な根拠が認められず、さらに、さまざまな陸棲生物(貝類、昆虫類、両生類、爬虫類、鳥類、植物)の分布情報を基に生物地理学的解析を行った結果、渡瀬線の南北で陸棲動物相に明瞭な変化はないとされる。すなわち、渡瀬線は生物地理区の境界ではない可能性が指摘されている。

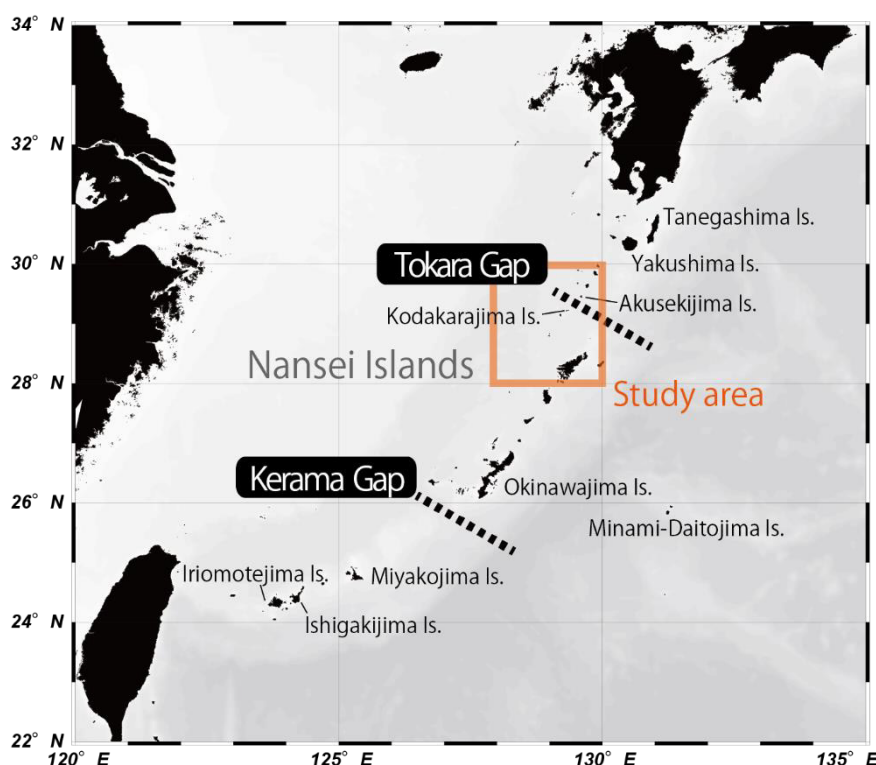
渡瀬線は、一般に陸棲生物に適応される生物地理区境界である。しかしながら、渡瀬線が、トカラギャップと呼ばれる海底地形により規制される以上、海洋生物の地理分布に影響を与えている可能性は十分にある。実際に、トカラギャップは、浅水性魚類の生物地理境界に一致するとされており(坂井ほか, 2005)、南西諸島から九州・四国・本州太平洋沿岸にかけて大きく変化する海洋生物

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)

³ 島根大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻地球科学・地球環境コース (Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690–8504, Japan)

* Corresponding author: NAKANO, T., Email: taigamofumofu@gmail.com, IWATANI, H., Email: hokuto_i@yamaguchi-u.ac.jp



第1図 南西諸島全域図とトカラ・ケラマギャップ位置図. 地図は Ocean Data Viewにより作成 (Schlitzer, 2021).

Fig. 1 Entire map of Nansei Islands and location of Tokara and Kerama gaps. Map was created using Ocean Data View (Schlitzer, 2021).

相を把握する上で重要な位置にある。しかしながら、南西諸島における海洋生物の地理分布とその形成機構の詳細について、これまで十分に議論されてきたとは言えない。これは、海洋生物の空間的な拡散のしやすさに起因すると考えられる。例えば、海洋生物の中でも移動性が高い魚類などは、生物地理上の境界線を明確にとらえることは難しい。水深1000 mを超える海底谷であっても、遊泳能力のある海洋動物であれば、容易にその障壁を乗り越えてしまう。また、幼生期に浮遊性の生活様式をとる貝類などの底生無脊椎動物の多くは、海流などの影響により容易に拡散をし、その生活範囲を拡大することができる(関口, 2009)。したがって、海洋生物の生物地理を考察するためには、浮遊性・遊泳性の生活史を持たない分散能力の低い動物群を選出する必要がある。

そこで本研究は、浮遊幼生期を持たず種の拡散範囲が狭いとされる貝形虫(安原, 2007)をモデル生物として用い、トカラギャップ周辺の海洋生物相とその地理分布について検討した。貝形虫とは体長0.5–1 mm以下程度の石灰質の殻を有する微小な甲殻類であり、生息する環境に応じてその種構成や多様性、殻の化学組成の変化が見られるため、精度の高い環境指標・生物指標として利用されている(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)。しかしながら、トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫の研究はこれまで行われておらず、その地理分布の詳細は明らかにされていない。

本研究は、トカラギャップ周辺海域から初めて現生貝形虫の産出を報告するものである。本海域における現生貝形虫の実態を明らかにすることは、南西諸島の海洋生物地理分布とその形成機構を明らかにするうえで重要な基礎資料となる。

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GB21-1航海にて、トカラ列島南西部に位置する宝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。調査海域の主たる底質としては泥質堆積物や砂質堆積物の他、火山性の礫などが確認された(鈴木ほか, 2022)。木下式グラブ採泥器を用いて採取された堆積物から金属製スパチュラにより表層約1 cmを取り分け、研究試料とした。GB21-1航海にて採取された61試料のうち、49試料を貝形虫分析試料として分取した。本研究では調査海域における水深毎の貝形虫群集の特徴を把握するために、最浅部から水深200 m毎に選定した5試料[試料採取地点: 90 (試料採取水深: 353 m), 64 (524 m), 42 (735 m), 190 (932 m), 108 (1169 m)]を貝形虫分析に用いた(第1表)。

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($Eq.$)、産出頻度を算出した。多様度、均衡度の解析には統計解析ソフトのPAST (Paleontological Statistics; Hammer *et al.*, 2001)を用いた。多様度指数は、次のように定義されるShannon-Wiener指

第1表 試料採取地点の詳細と含泥率の分析結果. W.D.は試料採取地点の水深 (m) を示す.

Table 1 Sample information and results of %mud analysis. W.D. :water depth (m).

site no.	latitude (° N)	longitude (° E)	W.D. (m)	sampler	bulk dry weight (g)	sand dry weight (g)	%mud
42	28.98	129.45	735	K-grab	90.44	83.08	8.13
64	29.07	129.34	524	K-grab	52.42	42.87	18.22
90	29.16	129.40	353	K-grab	80.21	80.41	ca. 0
108	29.00	128.52	1169	K-grab	50.40	2.52	95.00
190	29.41	129.03	932	K-grab	59.92	4.59	92.34

数を用いた: $H = -\sum p_i \ln p_i$, ここで p_i は試料 i 番目の分類群の割合である. 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. 本研究で用いた均衡度 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. 試料に各種が均等に産出するにつれ均衡度の値は高くなり, 最大値は 1 である. 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, その地点に産する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 クラスタ分析による群集解析を行った. さらに今回の分析で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 クラスタ分析を行った. いずれのクラスタ分析も各地点, 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 クラスタ分析により, 地点ごとの類似度, 種ごとの類似度を推定する手法は貝形虫の種構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).

分析には統計解析ソフトの PAST を用い, 1 試料から 3 個体以上産出する 38 の分類群を対象に検討を行った (第 2 表). クラスタ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, 湿潤状態の試料から 1-4 g 程度の堆積物を含水率測定用に分取した. 試料中の平均的な含水率を得るため, 生物遺骸などが包有される箇所を避け, 試料の中心部から基質のみを採取した. 分取した試料は, その湿潤重量を計量したのちに約 60°C に設定した恒温乾燥器内で完全に乾燥させ, 乾燥重量を計量した. 計測された湿潤重量と乾燥重量の差から, 分取した試料の含水率を算出した.

第 2 表 貝形虫の産出リスト (クラスタ分析に用いた 38 タクサ).

Table 2 List of ostracodes from the adjacent sea of Tokara gap (The table displays 38 taxa used for cluster analyses).

site no.	42	64	90	108	190	
Genera	W.D. (m)	735	524	353	1169	932
<i>Arcacythere</i>					2	3
<i>Argilloecia</i>			2	4		2
<i>Aurila</i>	7	16	10			
<i>Aversoalva</i>	1			1		8
<i>Bradleya</i>				1		9
<i>Bythocypris</i>	4	24	5			
<i>Bythocypris?</i>				8		
<i>Bythocythere</i>		4				
<i>Cardobairdia</i>	2	7	6			
<i>Cornucoquimba</i>	7	9	5			1
<i>Cytherella</i>						8
<i>Cytherois</i>	4			3		1
<i>Cytheropteron</i>	6	8	7	2		25
<i>Eucythere</i>						3
<i>Eucytherura</i>	3	1	2			22
<i>Hemicytherura</i>	5	2	1			
<i>Hermanites</i>	5	3	4			
<i>Kangarina</i>	6	2	3			
<i>Kotoracythere</i>	3	1	6			
<i>Krithe</i>					2	37
<i>Loxoconcha</i>	10	45	18			1
<i>Loxocorniculum</i>	4	1	3			
<i>Neonesidea</i>	36	115	61	1		
<i>Orlovibairdia</i>						6
<i>Ornatoleberis</i>	2	3	4			
<i>Paracypris</i>	2	13	8			
<i>Paracytheridea</i>	11	9	10			
<i>Paradoxostoma</i>	2	1	4			
<i>Parakrithe</i>						3
<i>Paranesidea</i>	5	4	2			
<i>Perissocytheridea</i>		7	1			
<i>Pontocypris</i>		5	3			
<i>Propontocypris</i>			3			
<i>Pseudocythere</i>	1	3	1			1
<i>Saida</i>			3			2
<i>Schizocythere</i>	5	1	3			
<i>Sclerochilus</i>		12	3			
<i>Xestoleberis</i>	50	63	60			6
Others	17	22	17	8		10
fragments	66	32	74	16		3
total number of valves	264	415	348	33		145
total ostracodes (/1g)	2.33	5.74	148.60	0.24		0.85
%fragments	25.00	7.71	21.26	48.48		2.07
Shannon_H	2.82	2.59	2.89	2.43		2.40
Evenness_e^H/S	0.46	0.32	0.42	0.94		0.48

次に、試料全体の湿潤重量を計量後、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、その乾燥重量 [Sand_dry (g)] を計量した。先に得られた含水率から試料全体の水洗前の乾燥重量 [Bulk_dry (g)] を算出し、求めた試料全体の水洗前の乾燥重量と砂粒子より粗粒な画分の乾燥重量を用いて含泥率 [%MC] を算出した。すなわち、本研究による含泥率の算出法は次式によって示される：

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

2.2 貝形虫分析

本研究では、含泥率分析に用いた試料のうち粒径63 µmより粗粒な画分を貝形虫分析用試料に用いた。貝形虫分析用試料には、貝形虫殻のほか、礫や翼足類などの大型の生物遺骸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)や細かい破片殻も多く認められた。これらを除くために、さらに試料を篩過し、粒径125 µm以上かつ500 µm以下の画分を分析に用いた。篩過された試料は、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200個体を目安に貝形虫殻の抽出を行った。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。殻の破損が著しく、同定が不可能であった場合は“破片”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、宝島西方に位置する水深の最も深い地点(試料採取地点：108, 水深：1169 m)から得られた1個体を除いて付属肢などの軟体部が保存された標本は認められず、ほぼすべてが遺骸殻であった。したがって、本研究では、殻形態の特徴に基づき同定を行った。抽出された貝形虫は幼体が相当数産出し、種レベルの同定が困難であったため、本研究では属レベルの同定に留めた。

3. 結果と考察

3.1 含泥率

分析した全5試料の含泥率は、約0-95%の幅広い値を取ることが明らかになった(第1表)。調査海域東部(試料採取地点：42, 64, 90)では、含泥率は20%以下の低い値を示し、調査海域西部では90%以上の高い値を示した。含泥率と試料採取地点の水深は、高い正の相関($r = 0.89$)を示し、水深が深くなるほど含泥率が高くなる可能性がある。

3.2 貝形虫

本研究で分析した5地点の試料から、計1205個体の貝形虫殻を抽出した。属が不明であった個体や破片殻を除き、少なくとも60属の貝形虫が確認された。産出した貝形虫の多くは、東シナ海で一般的に報告されて

いる亜熱帯から熱帯域に生息する分類群であった(例えば、Ruan and Hao, 1988; Tabuki and Nohara, 1988; Hou and Gou, 2007; Iwatani *et al.*, 2013)。一方で、比較的冷温な深海域であっても好冷性の分類群(小沢, 2007)は、全く確認されなかった。最も多産したのは、*Neonesidea* であり、全個体数中17.7%を占めた。次いで*Xestoleberis*、*Loxoconcha*が多産し、それぞれの産出頻度は14.9%、6.1%であった。

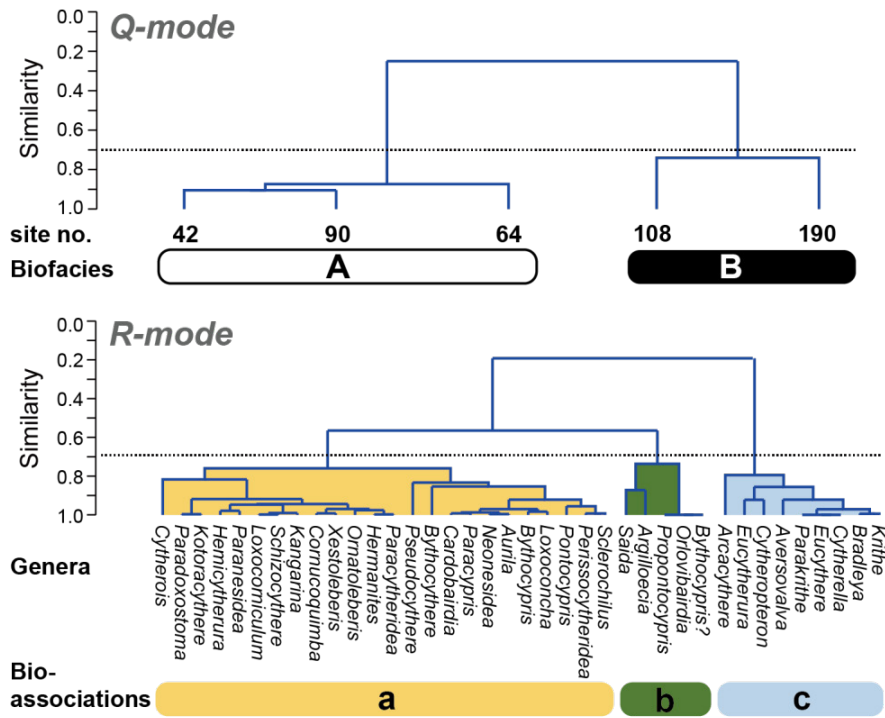
3.2.1. 群集構造

分析の結果を第2表に示す。多様度は、2.40-2.89の値を取り、平均値は2.62であった。均衡度は、0.32-0.94の広い値を示し、その平均値は0.52であった。産出頻度の平均値は31.55(個/g)であり、その値は0.24-148.60(個/g)と幅広い範囲を持つ。多様度は、試料採取地点の水深と強い逆相関を示し($r = -0.77$)、水深が増加するに従い、多様度は減少することが明らかになった。均衡度は、水深と高い正の相関を示し($r = 0.83$)、水深が増加するに従い、均衡度も増加することが明らかになった。一方、産出頻度は、水深との相関は認められなかった。

3.2.2. 貝形虫生物相

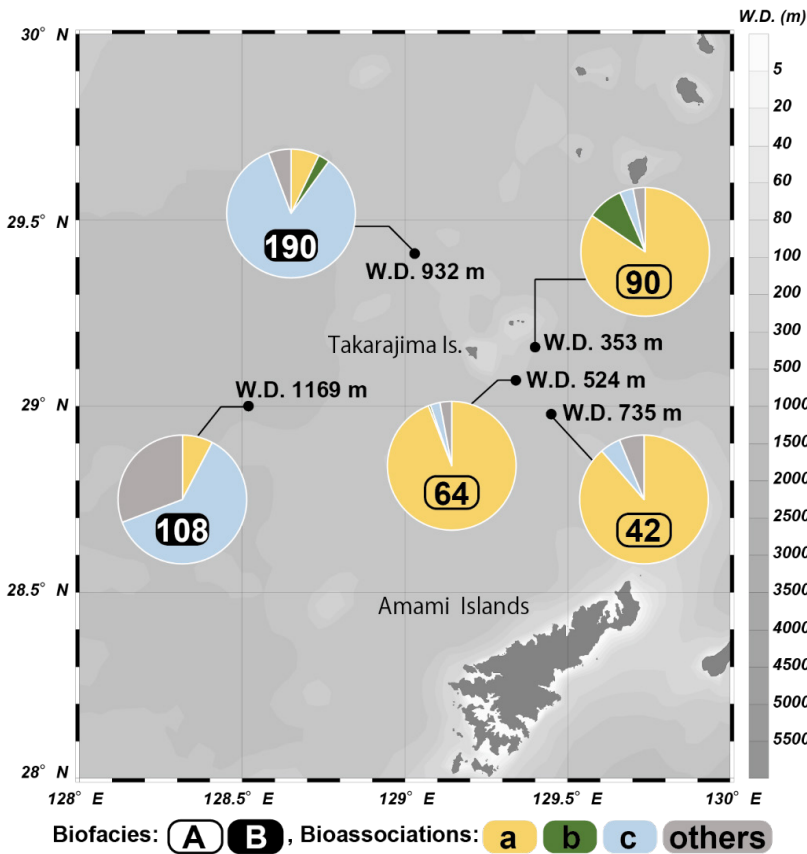
Q-modeクラスター分析の結果、類似度約0.7を境界に2つの貝形虫相(A, B)に区分された(第2図)。貝形虫相Aは、水深が相対的に浅い調査海域東部で採取された含泥率の低い3試料(42, 64, 90)より構成される(第3図)。貝形虫相Bは、相対的に深海域から採取された含泥率の高い2試料(108, 190)より構成される(第3図)。R-modeクラスター分析の結果、類似度約0.7を境に3つの種群(a, b, c)に区分された(第2図)。種群aは、*Paradoxostoma*、*Xestoleberis*などの海藻や石灰藻の表面に生息するとされる分類群(例えば、Yasuhara *et al.*, 2005; Sato and Kamiya, 2006)や、*Aurila*、*Loxoconcha*、*Neonesidea*などの浅海域に分布の中心を持つ貝形虫(例えば、Zhou, 1995; 鶴見・神谷, 2007)を含む24タクサによって特徴付けられる。種群bは、*Argilloecia*や*Saida*が含まれる5タクサより構成される。種群cは、*Cytheropteron*や*Bradleya*、*Krithe*などの深海域に分布の中心を持つ貝形虫(例えば、Whatley, 1983; Zhao and Whatley, 1997; 神谷, 2006)によって特徴づけられる9タクサよりなる。つまり、浅海性タクサが優占する種群aが、貝形虫相Aから多産し、深海性タクサによって特徴づけられる種群cが、貝形虫相Bに多く含まれる(第3図)。したがって、調査海域の貝形虫相は、主に水深変化の影響を受けている可能性が示唆された。一方で、種群bは、水深と関連付けられる産出傾向を示さなかった。種群bの構成種である*Argilloecia*は、低酸素で適度に有機物に富む堆積物中から報告され(Cronin, 1983)、低酸素環境の指標と考えられている(Alvarez Zarikian *et al.*, 2009; Angue Minto'o *et al.*, 2015; Iwatani *et*

トカラギャップの現生貝形虫（中野ほか）



第2図 Q-mode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.



第3図 調査海域の貝形虫相と貝形虫種群の相対頻度分布。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 ostracode biofacies and relative abundances (%) of ostracodes in each bioassociation in the study area. W.D.: water depth (m). Bathymetric map was created using Ocean Data View (Schlitzer, 2021).

al., 2018). したがって, 種群bは, 水深とは別の環境要素に規制されている可能性がある。

貝形虫相の分布は, 底質に強く依存することが広く知られている(池谷・塩崎, 1993)。本研究の分析地点において, 堆積物の含泥率と水深は高い正の相関を示すため, 水深の増加に伴い泥質堆積物が増えたことにより, 深海性の泥底種が優占的に産出するようになった可能性がある。つまり, 調査海域の貝形虫相は, 水深に伴い変化する底質によって規制されている可能性がある。ただし, 本研究の貝形虫分析に用いたのはトカラ列島東方の浅海域(水深300~700 m台)とトカラ列島西方の深海域(水深900~1100 m台)にて採取した試料であり, 調査海域全体を網羅的に分析したわけではない。したがって, 分析結果から得られた貝形虫群集の分布が, 水深だけでなく, 例えば海底火山や海峽などの海底地形, 海流, 島嶼部などとの空間的な位置関係などにより制約されている可能性も否定できない。海洋堆積物は, さまざまな海底地形に対応し変化をするため, トカラギャップのような海底地形上の障壁が, 貝形虫の分布に影響を与える可能性は十分に考えられる。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を進めると共に, 分類学的検討を進め, 南西諸島に知られている“ギャップ”と貝形虫相の関係性を明らかにすることが必要である。

現在のトカラギャップ, ケラマギャップは水深1000 mを超える海底谷であるが, 更新世後期(約2万年前)以前には現在よりも水深が浅かったとされる(木村, 1996)。そのため南西諸島は, 氷河期の海面低下によって中国大陸と日本とを繋ぎ, 陸上動物の移動を助ける陸橋として機能していた可能性が指摘されている(木村, 1996)。つまり, 南西諸島の“ギャップ”は, 地質時代を通じた生物相への普遍的な障壁として存在していたわけではない。今後, 南西諸島の現生貝形虫の情報が充足されることにより, “ギャップ”と呼ばれる障壁により海洋動物相がどのように影響を受けてきたのかを解明する上で重要な手がかりとなることが期待される。

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。望星丸乗組員の皆様, 並びに乗船研究者の皆様には, 試料採取において多大なご尽力を頂いた。また, 匿名の査読者からは有益なご指摘を頂いた。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ます。

文 献

- Alvarez Zarikian, C. A., Stepanova, A. Y. and Gruetner, J. (2009) Glacial-interglacial variability in deep sea ostracod assemblage composition at IODP Site U1314 in the subpolar North Atlantic. *Marine Geology*, **258**, 69–87.
- Angue Minto'o, C. M., Bassetti, M. A., Morigi, C., Ducassou, E., Toucanne, S., Jouet, G. and Mulder, T. (2015) Levantine intermediate water hydrodynamic and bottom water ventilation in the northern Tyrrhenian Sea over the past 56,000 years: New insights from benthic foraminifera and ostracods. *Quaternary International*, **357**, 295–313.
- 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: 2021年8月2日)。
- 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 abstract)
- 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 Takanabe 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 Micropalaeontology*, **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 Plio–Pleistocene boundary. *Quaternary Science Reviews*, **140**, 67–74.
- Iwatani, H., Yasuhara, M., Rosenthal, Y. and Linsley, B. K. (2018) Intermediate-water dynamics and ocean ventilation effects on the Indonesian Throughflow during the past 15,000 years: Ostracod evidence. *Geology*, **46**, 567–570.
- 神谷隆宏 (2006) 日本海の環境変化と海洋生物—ことに貝

- 形虫の進化について— 環日本海学 森・海・空のメッセージ, 33–40.
- 木村政昭 (1996) 琉球弧の第四紀古地理. 地学雑誌, **105**, 259–285.
- 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.
- 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.
- 小沢広和 (2007) 日本海的好冷性介形虫相の変遷と海洋環境. 化石, **82**, 21–28.
- 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・相良恒太朗・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.
- 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.
- 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.
- Whatley, R. (1983) Some aspects of the palaeobiology of Tertiary deep-Sea Ostracoda from the S. W. Pacific. *Journal of micropalaeontology*, **2**, 83–104.
- 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.
- Yasuhara, M., Yoshikawa, S. and Nanayama, F. (2005) Reconstruction of the Holocene seismic history of a seabed fault using relative sea-level curves reconstructed by ostracode assemblages: Case study on the Median Tectonic Line in Iyo-nada Bay, western Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **222**, 285–312.
- 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.
- Zhou, B. (1995) Recent ostracode fauna in the Pacific off Southwest Japan. *Memoirs of the Faculty of Science Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy*, **57**, 21–98.

(受付: 2021年12月21日; 受理: 2022年7月7日)

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

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 (2022) Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-1 Cruise), Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 337-347, 4 figs and 5 tables.

Abstract: The concentrations of 24 elements in the 56 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 rich in T-Fe₂O₃ (converted total iron concentration to Fe₂O₃), MgO and MnO, and the CaO concentration is relatively low, suggesting that the contribution of terrigenous clastic materials is greater than that of bioclasts. The analysis results of the relationship between the Al₂O₃ content and the CaO, K₂O, and T-Fe₂O₃ contents revealed that the contribution of terrigenous clastic materials is large in the shallow-water areas around Suwanosejima Island and Takarajima Island. The considerable enrichment of Mn, Ni, Cu, Zn, and Pb in silt-clay samples in the off western Takarajima Island, can be assumed to be due mainly to adsorption to particle surface by the early diagenesis.

Keywords: simultaneous multi-element analysis, clastic material, bioclast, mafic 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56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、過去に調査した沖縄本島周辺海域の海底堆積物に比べ、T-Fe₂O₃ (全鉄量をFe₂O₃に換算したもの)、MgO、MnO濃度が高くCaOの濃度が低い傾向がみられ、生物遺骸粒子より陸源性碎屑粒子の寄与が大きいと考えられた。Al₂O₃濃度とCaO、K₂O、T-Fe₂O₃濃度の関係から、特に諏訪之瀬島および宝島周辺の浅い海域では碎屑粒子の寄与が大きいことが分かった。宝島西部海域のシルト-粘土質試料についてMn、Ni、Cu、Zn、Pbの濃集が認められ、初期続成作用により堆積層表層部で粒子表面に吸着したものと考えられた。

1. はじめに

筆者らは、「本邦沿岸海域底質地球化学図」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,

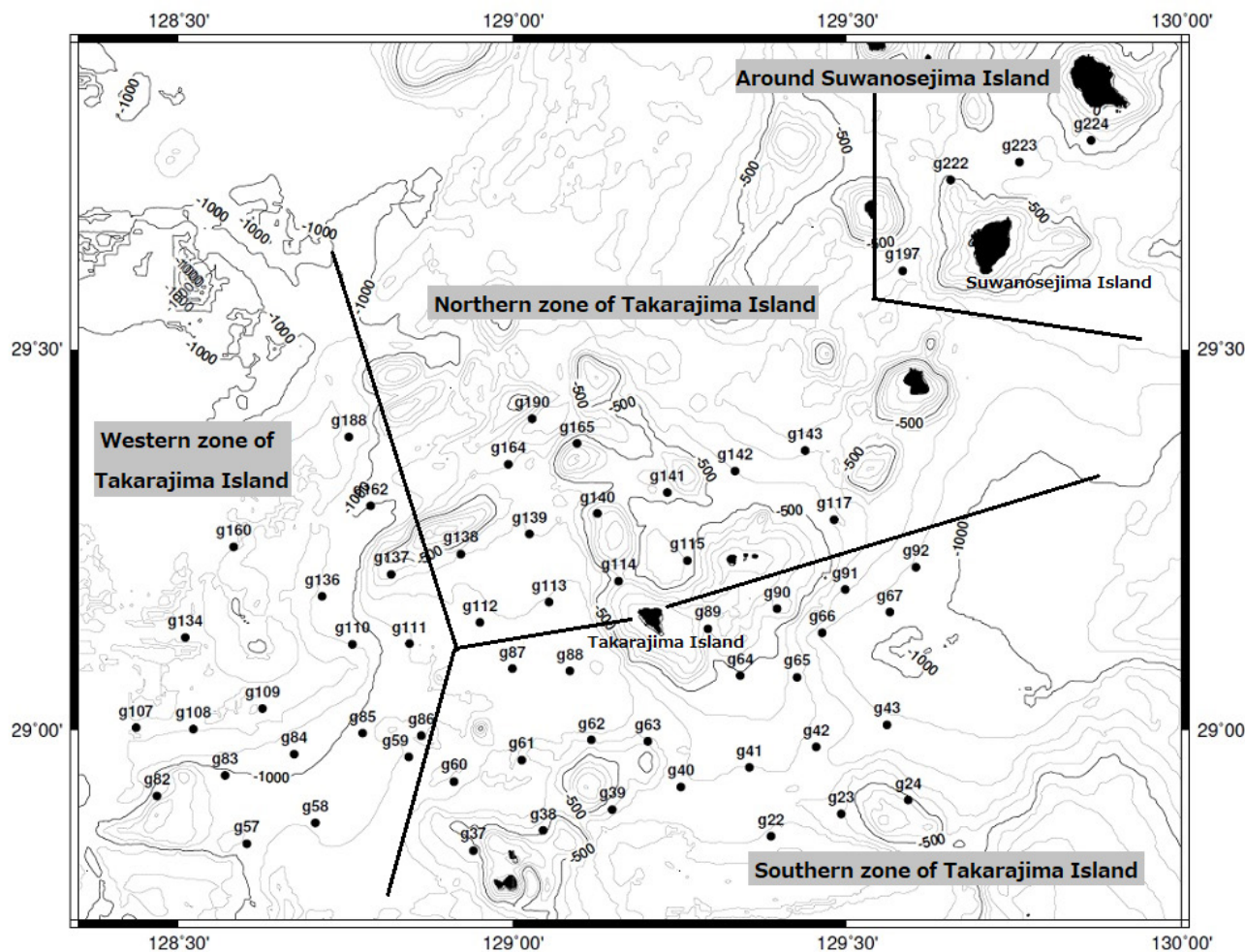
2013, 2016, 2017, 2019, 久保田, 2019)。GB21-1航海では、トカラ列島周辺海域の61地点(第1図)で木下式グラブ採泥器(K-グラブ採泥器)により海底表層堆積物が採取され(鈴木ほか, 2022)、このうち56地点の試料について53元素の化学分析を行った。本概要報告では、GB21-1航海で採取された海洋堆積物中の、主成分元素(Na₂O、MgO、Al₂O₃、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Total (T-) Fe₂O₃(全鉄量をFe₂O₃に換算したもの))といくつかの微量元素(Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Y、Mo、Ba、Pb)を分析した結果と化学組成の特徴について報告する。

2. 試料処理及び分析方法

K-グラブ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、石川式めうの粉碎機で約80メッシュ(約180 μm)以下に粉碎して分析試料とした。粉碎した試料0.2 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、No.5cの

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., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ran-kubota@aist.go.jp



第1図 トカラ列島周辺海域 (GB21-1 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 (GB21-1 Cruise). Submarine topographic map is based on Kishimoto (2000).

濾紙で残渣成分を濾過し、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 (Na₂O, MgO, Al₂O₃, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Total (T-) Fe₂O₃) 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 Na₂O は参考値として示している。

3. 結果と考察

3.1 トカラ列島周辺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。GB21-1航海では、中之島および諏訪之瀬島周辺海域、宝島および小宝島周辺海域から採取された。一部の試料は、粒度や採取深度にかかわらず、炭酸

塩の骨格や殻など生物遺骸碎屑片を含む。元素濃度は CaO (2.72–45.32 wt%) が高く、次いで T-Fe₂O₃ (0.456–29.1 wt%), Al₂O₃ (0.741–15.8 wt%), MgO (1.10–7.89 wt%) が高い濃度範囲を示した。微量元素では、Sr (148–2,834 mg/kg), V (12–895 mg/kg), Ba (19–604 mg/kg), Zn (13–332 mg/kg) が高く、他の微量元素は 100 mg/kg 以下であることが多い。海底表層堆積物は一般的に生物起源の炭酸塩鉱物が主成分であることが多く、今回もその傾向が確認された。ただし、30 wt% 以上の CaO 濃度を示したのは 5 試料のみ (20 wt% 以上の CaO 濃度を示したのは 12 試料のみ) であり、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) と比較した場合の本海域試料の特徴として、T-Fe₂O₃, MgO, MnO 濃度が高く、相対的に CaO が低いことが挙げられる。

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。海域区分は試料番号 g22–g43, g60–

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 (GB21-1 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 (GB21-1 Cruise).

Location no.	water depth 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%
g22	823	2.99	4.36	13.1	0.147	0.793	12.1	1.01	0.203	9.54
g23	572	3.13	3.23	13.6	0.163	0.960	15.0	1.04	0.175	8.65
g24	473	2.04	4.26	6.96	0.141	0.253	32.9	0.452	0.111	4.70
g37	543	3.11	5.40	15.8	0.097	0.741	10.2	0.643	0.180	9.21
g38	489	2.78	7.02	14.4	0.211	0.563	10.1	1.10	0.287	13.2
g39	657	3.40	3.91	14.2	0.150	0.580	16.7	0.631	0.172	7.11
g40	702	2.84	4.66	11.6	0.491	0.502	8.37	3.98	0.400	24.8
g41	705	3.17	2.56	12.1	0.139	0.766	19.4	0.570	0.155	5.49
g42	735	3.01	4.43	13.4	0.335	0.433	9.01	2.81	0.350	21.8
g43	861	3.39	4.71	15.5	0.274	0.413	8.23	1.41	0.291	12.5
g58	960	3.65	2.31	12.3	0.181	2.28	15.0	0.442	0.859	4.80
g59	849	3.16	2.37	12.7	0.160	1.80	16.1	0.538	0.779	5.30
g60	841	3.27	2.55	13.0	0.145	1.49	15.1	0.551	0.462	5.73
g61	759	6.31	1.61	11.2	0.184	1.64	4.0	0.523	0.710	7.16
g62	746	3.38	2.33	13.2	0.146	0.858	17.5	0.602	0.154	5.77
g63	587	1.82	6.99	7.62	0.644	0.231	14.9	3.55	0.587	25.2
g64	524	3.19	4.49	14.0	0.224	0.447	12.4	1.55	0.273	13.0
g65	638	4.05	3.76	14.7	0.244	0.825	7.69	1.56	0.260	12.5
g66	896	3.75	1.96	10.4	0.144	1.72	18.8	0.432	0.227	4.10
g67	943	3.19	1.87	9.95	0.117	1.29	21.3	0.447	0.153	4.52
g82	942	3.58	2.13	11.2	0.157	2.11	16.9	0.440	0.797	4.36
g83	852	2.31	3.07	13.9	0.150	2.98	4.69	0.777	0.237	7.51
g84	958	3.73	2.33	12.0	0.169	2.29	13.7	0.503	0.684	4.72
g85	942	3.78	2.38	12.3	0.174	2.24	13.7	0.524	1.32	4.74
g86	847	2.92	2.11	11.3	0.145	1.59	18.9	0.480	0.425	4.62
g87	883	3.17	2.26	11.9	0.166	2.15	15.4	0.484	1.18	4.63
g88	699	3.74	2.92	14.9	0.251	0.708	11.5	1.07	0.223	8.68
g90	353	2.05	3.65	4.68	0.119	0.434	42.4	0.231	0.167	1.83
g91	808	3.17	2.96	12.2	0.144	0.970	17.7	0.813	0.171	7.08
g92	924	3.42	2.12	10.8	0.124	1.23	20.6	0.496	0.174	4.61
g107	1077	3.92	2.28	12.5	0.161	2.44	13.5	0.515	0.660	4.70
g108	1169	3.95	2.34	12.8	0.161	2.53	11.7	0.515	0.846	4.81
g109	1163	4.27	2.48	12.9	0.167	2.56	9.38	0.522	2.30	4.88
g110	1071	3.72	2.12	11.5	0.150	1.90	18.9	0.457	0.486	4.48
g111	915	3.38	1.82	11.0	0.147	1.61	20.3	0.462	0.361	4.31
g112	836	3.51	1.72	10.6	0.140	1.34	20.7	0.543	0.256	4.53
g113	828	3.41	1.34	9.02	0.121	1.25	22.5	0.363	0.254	3.16
g115	614	3.22	2.22	4.93	0.138	0.850	34.3	0.213	0.549	2.13
g117	576	2.23	6.10	10.7	0.402	0.222	8.03	3.95	0.451	29.1
g134	1151	4.17	2.58	13.0	0.174	2.63	8.70	0.571	2.23	4.93
g136	1034	4.77	1.10	11.6	0.200	2.53	2.72	0.255	0.277	4.01
g137	677	2.76	2.36	8.95	0.179	0.590	26.7	0.708	0.165	5.73
g138	714	3.60	1.42	9.71	0.131	1.13	19.5	0.447	0.155	3.67
g139	709	3.80	1.62	10.1	0.130	1.05	18.5	0.586	0.126	4.30
g141	475	1.79	6.57	7.47	0.142	0.382	21.1	1.59	0.279	12.5
g142	583	2.02	1.71	3.87	0.074	0.456	37.8	0.200	0.109	1.76
g143	669	2.44	5.26	9.92	0.169	0.591	14.6	1.46	0.283	12.2
g160	1125	4.02	2.44	12.7	0.164	2.51	9.42	0.527	1.21	4.79
g162	1003	4.22	2.50	12.8	0.179	2.53	11.4	0.511	2.13	4.95
g165	173	1.43	3.54	0.741	0.107	0.164	45.3	0.051	0.028	0.456
g188	1145	3.90	2.40	12.8	0.165	2.48	11.2	0.537	0.845	4.90
g190	932	3.73	2.25	11.3	0.172	2.17	14.0	0.470	0.960	4.33
g197	868	3.11	4.20	15.0	0.094	1.13	9.53	0.593	0.144	7.20
g222	509	2.79	5.27	13.9	0.086	0.816	13.5	0.517	0.151	7.53
g223	563	2.62	5.28	13.4	0.092	0.857	10.7	0.862	0.187	11.1
g224	416	2.22	7.89	11.3	0.095	0.545	10.3	1.01	0.289	15.4

第2表 トカラ列島周辺海域 (GB21-1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 (GB21-1 Cruise).

Location no.	water depth 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
g22	823	15	0.8	34	181	22	23	11	14	105	26	520	23	0.5	122	8.5
g23	572	20	1.0	26	202	21	20	12	18	103	30	486	26	0.7	125	16
g24	473	6.9	0.4	15	95	16	13	12	7.7	54	6.6	1305	13	0.3	39	11
g37	543	12	0.8	35	216	23	30	15	40	79	23	246	23	0.6	105	8.3
g38	489	11	0.8	48	274	26	37	15	23	131	17	256	28	0.5	86	7.7
g39	657	11	0.8	26	125	12	17	7.2	14	78	17	599	21	0.5	93	8.5
g40	702	9.0	0.7	47	553	16	40	6.8	11	269	14	237	32	0.9	85	7.2
g41	705	13	0.9	20	82	10	12	8.1	10	75	24	948	21	0.6	134	15
g42	735	9.1	0.8	35	586	19	37	7.2	11	227	11	331	23	0.6	78	8.6
g43	861	9.4	0.9	33	247	10	24	5.1	8.2	144	10	252	22	0.4	78	6.5
g58	960	53	2.2	12	112	68	17	70	41	110	110	586	19	6.0	512	49
g59	849	37	1.7	17	138	53	20	52	44	95	88	544	23	3.4	387	31
g60	841	29	1.5	18	138	37	18	33	41	78	62	487	22	1.8	299	23
g61	759	29	1.5	14	55	9.2	8.4	30	21	94	51	167	38	4.4	211	23
g62	746	15	1.0	20	121	14	14	11	22	69	30	528	22	0.7	138	13
g63	587	6.6	0.4	63	393	14	50	13	11	297	5.8	870	35	1.0	40	19
g64	524	11	0.7	33	312	14	24	7.8	11	163	12	455	20	0.6	79	11
g65	638	12	0.9	30	306	11	23	5.2	12	161	23	262	25	0.8	122	8.9
g66	896	31	1.3	12	96	45	12	35	39	85	71	646	19	2.1	409	28
g67	943	21	1.0	13	103	29	13	21	25	67	49	608	19	1.4	285	21
g82	942	48	2.0	12	107	66	17	69	38	104	109	595	19	7.4	471	45
g83	852	69	3.0	16	149	104	21	73	23	120	152	172	20	2.0	424	37
g84	958	52	2.2	12	110	70	17	68	38	106	112	537	19	5.1	482	46
g85	942	52	2.2	12	109	65	16	68	37	106	105	549	19	9.5	505	44
g86	847	33	1.6	14	110	44	15	41	33	81	72	596	20	1.6	333	27
g87	883	50	2.1	11	98	62	16	63	35	97	99	601	17	6.8	497	42
g88	699	12	0.9	26	127	8.9	16	7.1	11	117	23	357	24	0.5	126	11
g90	353	12	0.3	5.3	49	14	5.0	24	13	96	12	2179	11	1.3	336	70
g91	808	16	0.8	20	175	40	17	18	18	91	34	564	19	0.8	249	17
g92	924	19	0.9	15	109	26	14	23	29	72	44	590	20	1.3	254	22
g107	1077	51	2.0	12	102	69	15	64	39	114	113	511	18	4.7	503	41
g108	1169	53	2.0	12	100	65	14	63	38	113	108	468	18	6.7	515	41
g109	1163	57	2.2	12	113	73	16	74	44	126	118	432	19	14	566	44
g110	1071	40	1.7	11	90	50	13	50	33	92	81	587	17	3.2	408	35
g111	915	32	1.4	11	87	39	12	41	28	82	67	605	20	2.1	338	29
g112	836	25	1.2	14	84	29	11	30	23	78	54	585	22	1.6	269	23
g113	828	22	1.0	10	56	22	9.2	29	20	62	48	692	21	1.8	242	19
g115	614	21	0.8	5.4	49	28	8.1	32	20	51	34	1686	10	2.8	252	25
g117	576	7.3	0.6	48	895	40	52	14	12	332	5.0	262	25	0.9	49	16
g134	1151	58	2.7	13	120	79	17	66	42	132	126	410	19	9.4	604	49
g136	1034	33	1.9	5.6	33	18	6.9	28	12	64	89	148	19	3.7	336	21
g137	677	12	0.8	17	96	18	13	14	9.4	78	20	833	16	0.6	105	15
g138	714	19	1.2	12	58	18	8.6	18	14	66	43	691	23	1.3	196	21
g139	709	17	1.1	14	72	14	9.2	12	11	70	37	653	23	0.9	184	18
g141	475	11	0.5	38	379	49	33	19	8.0	142	12	900	22	0.8	65	14
g142	583	9.1	0.4	4.5	36	9.3	5.4	19	7.0	33	14	1494	13	0.7	64	16
g143	669	14	0.8	29	317	43	31	24	11	132	18	439	18	0.7	109	21
g160	1125	57	2.6	13	111	74	17	69	48	127	120	407	18	10	518	49
g162	1003	68	2.5	13	114	75	17	77	42	131	119	482	19	22	550	54
g165	173	3.1	0.1	0.8	12	21	1.1	12	2.4	13	2.7	2834	3.9	7.9	19	5.5
g188	1145	60	2.5	12	107	69	15	63	36	116	112	443	19	7.9	511	46
g190	932	51	2.1	11	94	65	16	52	35	103	100	559	17	3.8	478	49
g197	868	16	0.8	27	198	43	23	21	47	74	32	366	20	1.8	164	13
g222	509	13	0.6	31	207	44	27	25	49	78	24	507	18	1.1	149	12
g223	563	12	0.6	30	198	43	26	23	48	75	23	359	18	1.0	132	12
g224	416	13	0.7	32	369	39	32	21	32	106	24	441	17	1.2	79	12

g67, g87-g92を宝島南部海域, g112-g117, g138-g143, g165, g190を宝島北部海域, g58-g59, g82-g86, g107-g111, g134-g137, g160, g162, g188を宝島西部海域, g197, g222-g224を諏訪之瀬島周辺海域とした。地殻起源と考えられる成分のうち, Al₂O₃, TiO₂, T-Fe₂O₃, Znは宝島南部海域および諏訪之瀬島周辺海域で濃度が高い。宝島北部海域では炭酸塩鉱物に由来するCaOの濃度が高く, CaOに伴って濃集すると考えられるSr濃度も高いことから, 他の海域に比べ生物生産が卓越することが推測される。また, 宝島西部海域の試料は比較的深いところで採取され, BaをはじめK₂O, MnO, Li, Be, Cr, Ni, Rb, Mo, Pbの濃度が高い。

第4表に, 船上記載データを基に, 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示した。中粒砂より細かい区分ではCaOが最も高い濃度を示し, 粗粒砂試料ではAl₂O₃ > T-Fe₂O₃ > CaOの順に濃度が高かった。K₂O, MnO, Li, Be, Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Pbなどは, シルト-粘土質試料で濃度が高い傾向を示した。一方で, 過去の航海試料のように, 細粒化に伴って高濃度(もしくは低濃度)になるといった明確なトレンドは認められなかった。

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まとめた。水深と元素濃度の間には明瞭な正の相関係数は認められたのは, K₂O, Be, Rb, Ba等である。一方, 碎屑性成分に多く含まれるAl₂O₃やTiO₂など多くの元素において, 水深と元素濃度の間にはほとんど有意な相関係数は認められなかった。第2図は, Al₂O₃, K₂O, CaO, MnO濃度と水深の関係を示したものである。CaO, MgO, Sr濃度は水深が増すにつれ緩やかに減少し, CaOを主成分とする生物遺骸粒子(炭酸塩鉱物)が浅海部に多く存在することを示唆する。しかしながら, 炭酸塩鉱物の主成分元素間の相関係数を見てみると, CaO-Sr濃度間は明瞭な正の相関係数があるが, CaO-MgO濃度間, MgO-Sr濃度間の相関係数は認められない。また, 本調査海域試料はCaO濃度が低く(30 wt%以上の試料は全体の1割), K₂O等の濃度が水深の増大とともに増加する傾向を示すことから, 碎屑粒子や生物遺骸粒子以外の寄与が水深とともに増加することが考えられる。

次に, Al₂O₃濃度と主要な他元素の濃度の関係を第3図に示した。Al₂O₃濃度に対するCaO濃度との間には明瞭な負の相関係数が認められ(第3図a), CaOを主とする生物遺骸粒子(炭酸塩鉱物)とAl₂O₃を主とする碎屑性粒子(ケイ酸塩鉱物)の単純な混合関係が認められる。Al₂O₃濃度とK₂O濃度の関係(第3図b)では緩やかな正の相関係数が, Al₂O₃濃度とT-Fe₂O₃濃度の関係(第3図d)ではT-Fe₂O₃

第3表 トカラ列島周辺海域 (GB21-1 航路) 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)	water 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	Rb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	V	Sc	Be	Li	Sr	Y	Mo	Ba	Pb	
			wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%		wt%	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
Southern zone	23	702.65	3.23	3.65	12.14	0.21	0.87	15.70	1.13	0.31	9.64		119.63	19.29	17.00	21.02	21.70	201.85	26.03	0.93	16.54	586.66	22.73	1.27	173.44	17.71	
Around Takarajima Island	11	646.27	2.83	3.07	8.03	0.16	0.87	23.31	0.90	0.31	7.10		98.36	14.87	23.76	16.77	30.79	186.56	16.87	0.89	18.07	981.39	17.93	2.11	175.25	20.77	
Western zone	18	993.33	3.68	2.28	12.14	0.17	2.20	13.49	0.52	0.92	4.92		105.37	34.75	58.17	15.53	60.98	106.11	12.64	2.07	48.07	494.71	18.90	6.65	448.13	38.97	
Around Suwanosejima Island	4	589.00	2.69	5.66	13.41	0.09	0.84	10.99	0.75	0.19	10.31		83.30	44.06	22.48	26.71	42.13	242.98	29.73	0.70	13.63	417.98	17.97	1.26	130.98	12.11	
All the samples	56	776.89	3.26	3.24	11.42	0.18	1.30	16.15	0.86	0.50	7.67		108.28	25.16	31.95	18.83	37.57	171.01	20.19	1.27	26.77	622.59	20.22	3.16	259.06	24.75	
Southern zone	23																										
Around Takarajima Island	11																										
Western zone	18																										
Around Suwanosejima Island	4																										
All the samples	56																										

※Southern zone: g22-g43, g60-g67, g87-g92, Northern zone: g112-g117, g138-g143, g165, g190, Western zone: g58-g59, g82-g86, g107-g111, g134-g137, g160, g162, g188, Around Suwanosejima Island: g197, g222-g224

第4表 GB21-1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, sandy clay, silty clay
		n=4	n=9	n=9	n=14	n=20
Na ₂ O	wt %	4.41	3.01	2.79	3.38	3.73
MgO	wt %	2.58	5.40	4.26	2.22	2.33
Al ₂ O ₃	wt %	11.4	14.0	12.1	10.3	12.4
P ₂ O ₅	wt %	0.192	0.224	0.119	0.145	0.163
K ₂ O	wt %	1.23	0.447	0.766	1.01	2.26
CaO	wt %	5.86	10.2	13.5	19.2	13.9
TiO ₂	wt %	0.389	1.41	0.570	0.594	0.513
MnO	wt %	0.269	0.289	0.155	0.199	0.821
T-Fe ₂ O ₃	wt %	5.59	13.2	7.20	5.13	4.76
Li	mg/kg	20.4	10.8	12.5	18.3	51.7
Be	mg/kg	1.18	0.762	0.640	1.02	2.11
Sc	mg/kg	9.54	34.7	26.9	15.7	12.3
V	mg/kg	44.2	312	181	99.7	110
Cr	mg/kg	14.3	19.2	15.9	25.1	65.6
Co	mg/kg	7.68	31.7	22.5	13.2	16.1
Ni	mg/kg	20.3	13.2	19.1	18.7	63.5
Cu	mg/kg	12.0	11.9	13.3	17.7	38.3
Zn	mg/kg	79.1	144	74.8	80.2	106
Rb	mg/kg	36.9	11.5	23.2	35.3	109
Sr	mg/kg	215	331	520	596	540
Y	mg/kg	21.9	23.0	17.8	21.5	18.9
Mo	mg/kg	4.02	0.612	0.883	0.856	5.56
Ba	mg/kg	167	78.7	132	190	489
Pb	mg/kg	14.8	8.62	12.0	18.6	42.8

の低濃度域で正の相関関係が確認できる。第3図a, b, d においては、Al₂O₃-CaO, Al₂O₃-K₂O, Al₂O₃-T-Fe₂O₃の各濃度間の直線的な傾向から外れた位置にプロットされる試料(破線で囲った)が一部存在し、そのほとんどは共通していた(g22, g23, g37, g38, g39, g40, g42, g43, g63, g64, g65, g88, g91, g117, g141, g143, g197, g222, g223, g224)。これらの試料はT-Fe₂O₃濃度が7 wt%以上を示すとともにMgO, Al₂O₃, TiO₂, Sc, V, Co, Znなどの元素を多く含み、K₂O, Rb, Baに乏しい特徴がある。また、これらは中之島・諏訪之瀬島周辺および宝島・小宝島周辺かつ浅い海域で採取された試料であり、主に粗粒砂である。中之島は中期更新世の輝石安山岩の成層火山であり、諏訪之瀬島は後期更新世ないし完新世の輝石安山岩をベースとする活動度の高い活火山である。また、宝島や小宝島は中新世の輝石安山岩(緑色変質)から構成される宝島層群を基盤とし、それを不整合で覆う中期更新世の堆積岩(琉球層群)および完新世の隆起サンゴ礁および砂丘堆積物が覆っている(中野ほか, 2008)。そのため、これらの島々から放出された苦鉄質火山性物質

を多く含む可能性がある。

Al₂O₃-MnO濃度間では相関関係は認められない(第3図c)。一方で、Ni-MnO濃度間、Pb-MnO濃度間では高い正の相関係数を示す(第5表)ことから、Mn酸化物の生成に伴いNiやPbを選択的に取り込んだ可能性がある。一方Al₂O₃濃度が10-14 wt%の範囲で0.75 wt%以上の高MnO濃度を示す試料が認められ、これらは宝島西部海域に多く分布する。宝島西部海域g58の地点から南西方向に約10 km離れた海域に、近年熱水活動の兆候が確認された第1奄美海丘があることから、本調査海域において熱水活動起源のMn酸化物が生成している可能性が考えられる。熱水活動の影響について、TiO₂濃度に対するT-Fe₂O₃濃度の関係を用いて考察を行う。第4図aでは良い相関関係が認められ、苦鉄質火山類由来の碎屑粒子の寄与を表す。そのため、この相関直線から大きなずれがある場合、熱水活動による鉄マンガン酸化物生成の可能性が考えられ、実際に第4図aにおいていくつかの試料がずれた位置にプロットされた。しかし、これらの試料で高いMnO濃度は認められなかった。さらに、T-Fe₂O₃と水

第5表 トカラ列島周辺海域 (GB21-1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 = 56).

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	
0.67																								
-0.60	-0.59																							
0.41	0.45	0.10																						
-0.04	0.36	0.06																						
0.85	0.62	0.30	0.06																					
-0.45	-0.50	-0.18	-0.84	-0.22																				
-0.25	-0.31	0.60	0.11	0.87	-0.44	-0.35																		
0.60	0.45	-0.22	0.18	0.09	0.66	-0.31	-0.09	-0.13																
-0.31	-0.31	0.74	0.22	0.79	-0.47	-0.44	0.96	0.75	-0.41															
0.79	0.51	-0.50	0.25	-0.17	0.97	-0.32	-0.38	0.75	0.41	0.87														
0.83	0.58	-0.51	0.37	-0.11	0.96	-0.45	-0.32	0.71	-0.35	0.97	-0.44													
-0.39	-0.36	0.84	0.33	0.66	-0.55	-0.42	0.83	-0.23	0.90	0.95	-0.51	-0.44												
-0.30	-0.35	0.71	0.19	0.65	-0.44	-0.38	0.92	-0.11	0.95	-0.37	-0.32	0.81												
0.60	0.17	-0.16	0.22	-0.18	0.80	-0.30	-0.21	0.65	-0.21	0.87	0.82	-0.28	-0.11											
-0.24	-0.36	0.82	0.33	0.67	-0.35	-0.49	0.86	-0.03	0.93	0.90	0.90	0.01												
0.71	0.39	-0.43	0.13	-0.20	0.91	-0.20	-0.38	0.75	-0.41	0.86	0.90	-0.35	0.91	-0.24										
0.55	0.35	-0.17	0.42	-0.32	0.67	-0.34	-0.36	0.53	-0.29	0.66	0.61	-0.23	0.71	-0.05	-0.24									
-0.01	-0.13	0.51	0.22	0.88	-0.16	-0.47	0.93	0.19	0.89	-0.07	0.66	0.05	0.86	0.05	0.83	0.71	-0.16							
0.82	0.53	-0.55	0.26	-0.20	0.99	-0.33	-0.41	0.69	-0.45	0.99	0.98	-0.23	0.73	0.05	0.83	-0.08	-0.16	-0.12						
-0.49	-0.50	-0.07	-0.86	-0.22	-0.34	0.93	-0.28	-0.20	-0.37	0.99	0.98	-0.41	0.86	-0.41	0.86	-0.31	0.67	-0.29	-0.37	-0.29				
0.07	0.32	0.20	0.46	0.59	-0.08	-0.62	0.56	-0.01	0.57	-0.12	-0.01	0.61	0.41	-0.23	0.52	-0.22	-0.09	0.55	-0.12	-0.63	-0.12			
0.52	0.41	-0.32	0.03	-0.08	0.67	-0.13	-0.27	0.86	-0.31	0.75	0.67	-0.41	-0.27	0.63	-0.23	0.76	0.50	-0.01	0.69	0.01	-0.21			
0.81	0.53	-0.58	0.18	-0.22	0.94	-0.19	-0.45	0.73	-0.51	0.95	0.91	-0.45	-0.45	0.80	-0.37	0.94	0.69	-0.14	0.95	-0.17	-0.20	0.71		
0.58	0.33	-0.45	-0.06	-0.14	0.76	0.02	-0.36	0.67	-0.43	0.82	0.75	-0.55	-0.37	0.71	-0.32	0.86	0.53	-0.04	0.79	0.06	-0.26	0.66	0.89	

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

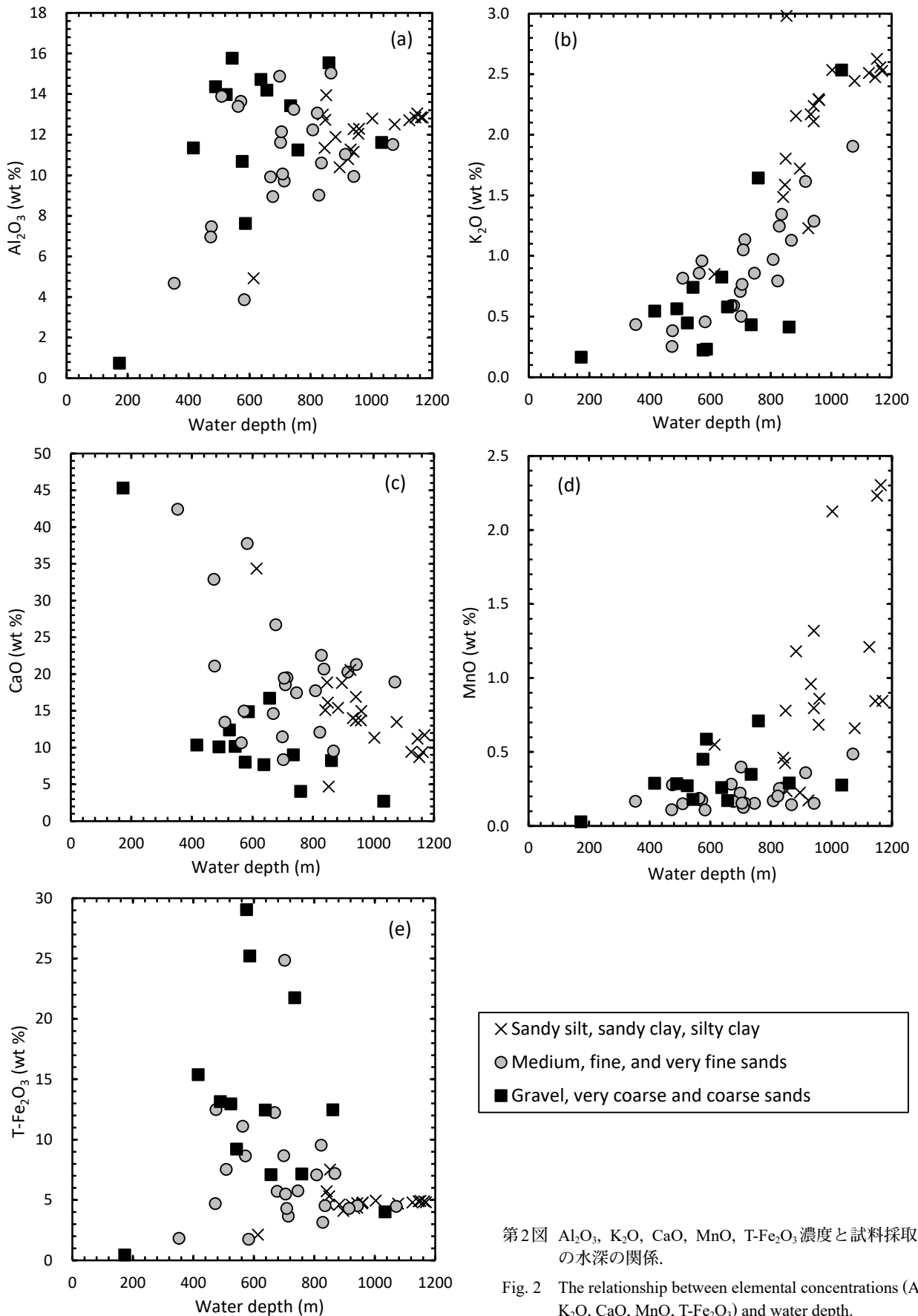
深の関係 (第2図e) を見ても、水深 850 m 以深で急激に高濃度化する MnO とは異なる傾向を示している。これらのことから、本調査海域では熱水活動による影響は低いと考えられる。

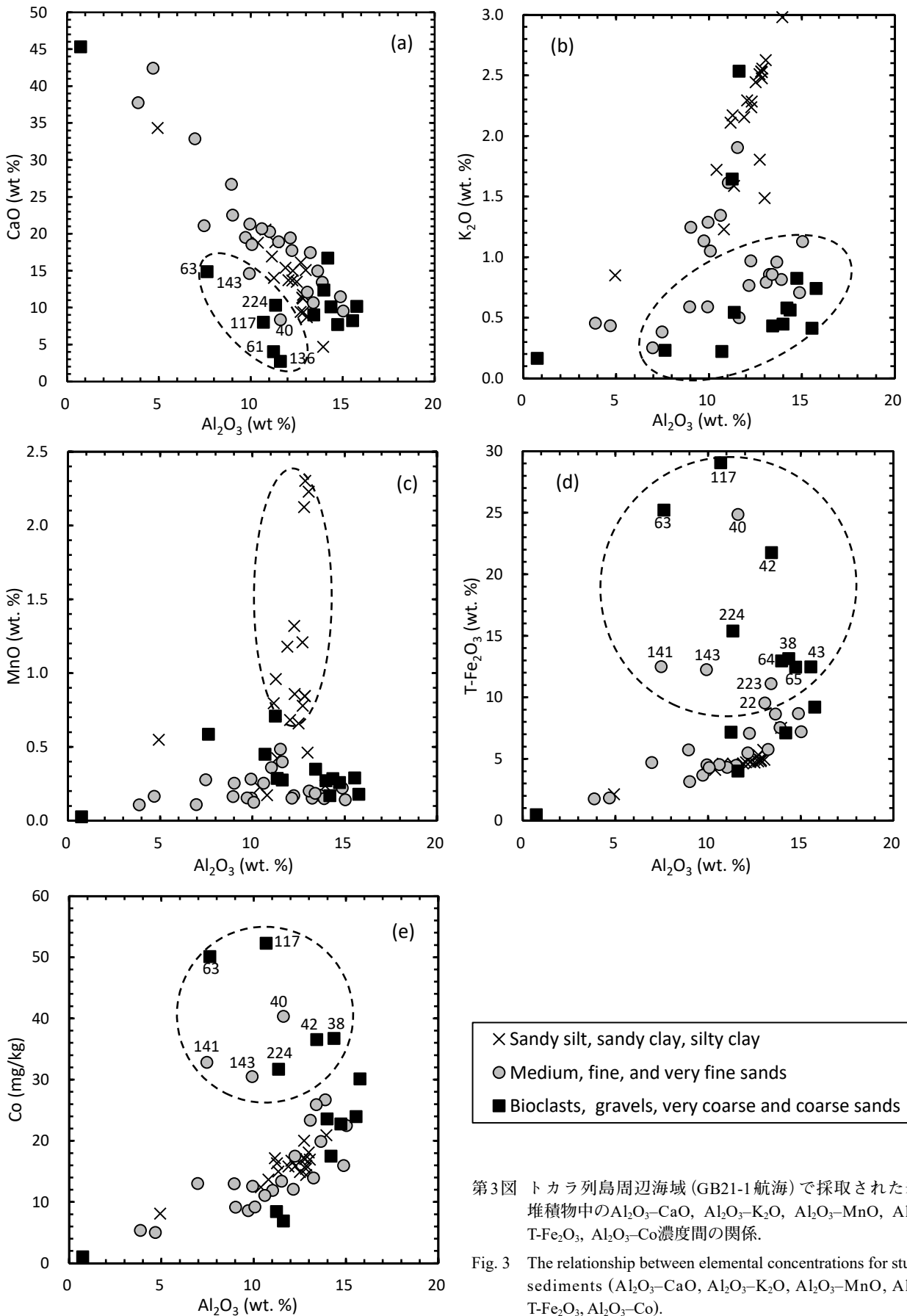
あらためて MnO 高濃度試料の特徴を検証すると、そのほとんどが深海域から採取されたシルト-粘土質の堆積物であることが分かる。このことから初期続成作用に伴う濃集により MnO が高濃度化した可能性が考えられる (太田ほか, 2013, 2016)。シルト-粘土質試料における続成作用の影響を調べるため、MnO 濃度と重金属元素濃度間の相関関係について検討を行う。まず MnO 濃度と Cu 濃度の関係を見ると (第4図b)、シルト-粘土質試料は系統的に高濃度 MnO・高濃度 Cu である一方で、明瞭な相関関係が認められない。Ni、Pb などと同様の結果を示す (第4図c, d)。また、水深 900 m 以深の細粒砂試料 (g110, g111) もシルト-粘土質試料と類似した傾向がある。MnO 低濃度域で Cu 濃度が高い試料が存在するが、これらは諏訪之瀬島周辺 (g197, g222, g223, g224) および上ノ根島付近 (g37) で採取された試料であり、陸源物質の影響を強く受けていると考えられる。次に MnO-Zn 濃度間の関係を見ると (第4図e)、二つのトレンドが確認できる。一つは粗粒砂・細粒砂試料の MnO 低濃度域における正の相関直線、もう一つはシルト-粘土質試料の Zn 低濃度域 (70-135 mg/kg) における緩やかな正の相関曲線である。これらの関係性から、Zn 高濃度化は続成作用の影響もあるが、苦鉄質火山岩由来の碎屑性粒子の影響を大きく受けていることが考えられる。

以上の結果をまとめる。初期続成作用によってマンガン酸化物が形成される際、Ni、Cu、Zn、Pb 等の重金属元素はマンガン酸化物に吸着され濃集する傾向があるが (Chester, 1999)、本調査海域ではその傾向は顕著ではない。すなわち、シルト-粘土質試料における Mn、Ni、Cu、Zn、Pb の濃集は、初期続成作用によって間隙水中に供給されたこれらの元素が、堆積層表層部で粒子表面に吸着したことによると考えられる。

4. まとめ

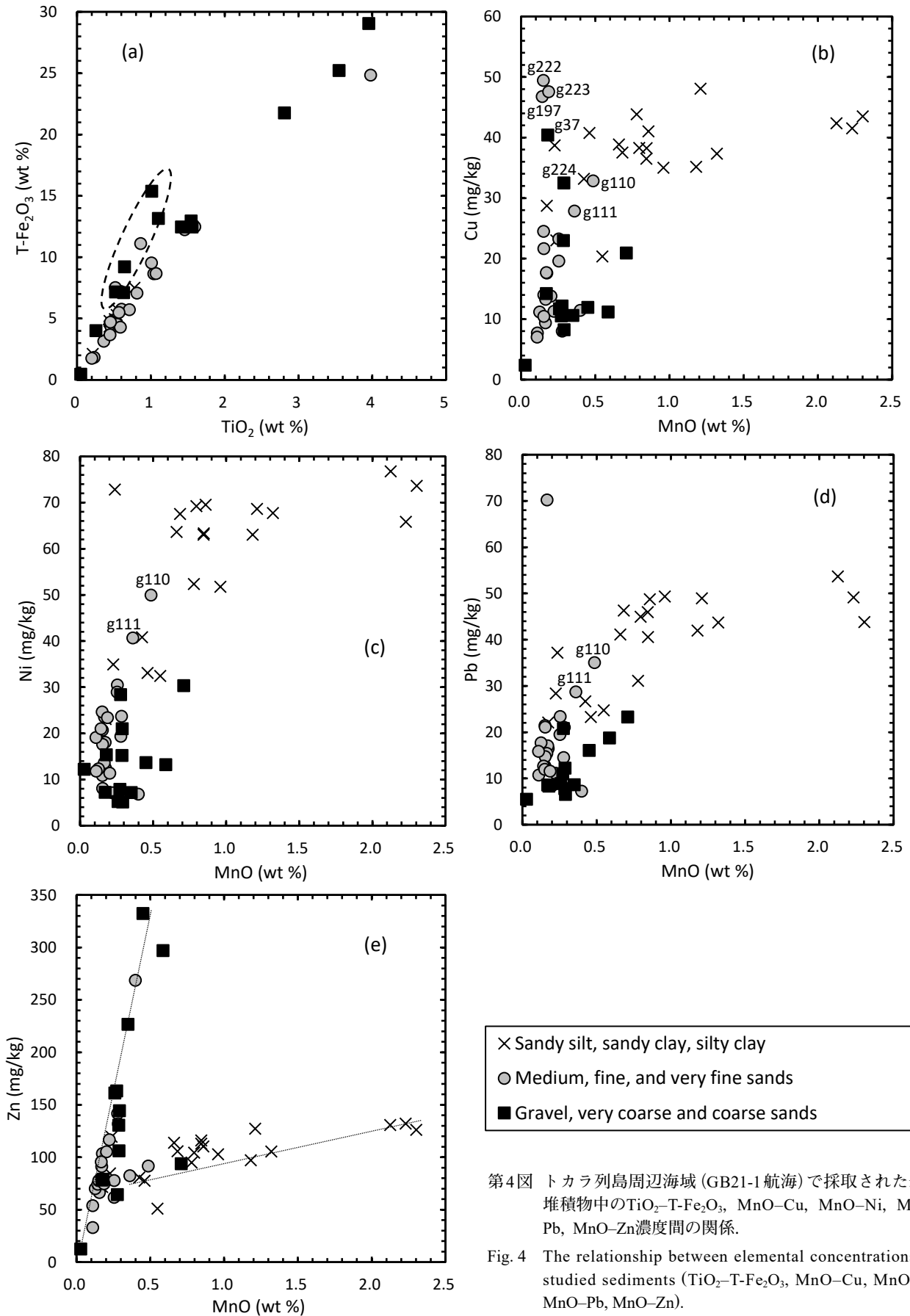
トカラ列島の中之島および諏訪之瀬島周辺海域、宝島および小宝島周辺海域から採取した海底表層堆積物 56 試料について 53 元素の化学分析を行い、主成分元素および微量元素 24 元素の化学組成の特徴や分布特性について検討を行った。本調査海域では、既報告の沖縄本島周辺海域と比較して、T-Fe₂O₃、MgO、MnO 濃度が高く、生物遺骸粒子に由来する CaO の濃度が低い傾向がみられた。調査海域を 4 つに区分して比較すると、宝島南部海域および諏訪之瀬島周辺海域では碎屑性粒子由来と考えられる Al₂O₃、TiO₂、T-Fe₂O₃ 等の元素濃度が高く、宝島西部海域では K₂O、MnO、Ba 等の元素濃度が高かった。Al₂O₃ 濃度に対する CaO、K₂O、T-Fe₂O₃ 濃度の関係では





第3図 トカラ列島周辺海域 (GB21-1 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 -MnO, Al_2O_3 -T- Fe_2O_3 , Al_2O_3 -Co 濃度間関係。

Fig. 3 The relationship between elemental concentrations for studied sediments (Al_2O_3 -CaO, Al_2O_3 - K_2O , Al_2O_3 -MnO, Al_2O_3 -T- Fe_2O_3 , Al_2O_3 -Co).



正の相関が認められ、各相関直線からずれた位置にプロットされる試料が一致していた。これらの試料は、他の元素を含めた化学組成の特徴も一致しており、採取地点に近い島々から供給される苦鉄質火山類由来の碎屑粒子の寄与が大きいと考えられた。宝島西部の深海域で採取されたシルト-粘土質堆積物は高濃度のMnを含み、Ni, Cu, Zn, Pbの濃集が認められた。この重金属元素の濃集のプロセスとして、熱水活動もしくは初期続成作用によって生成されたMn酸化物由来である可能性が考えられたが、初期続成作用によって元素が水中に放出された後、粒子表面に吸着したものと考えられた。

文 献

- Chester, R. (1999) *Marine Geochemistry*. Blackwell Science Inc, 520 pp.
- 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) 「沖繩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.
- 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) 沖繩島西方海域の海底表層堆積物の化学組成. 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, 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) 沖繩島周辺海域の海底表層堆積物の化学組成. 荒井晃作 (編) 「沖繩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—沖繩島西方沖海域—, 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) 「沖繩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) 「沖繩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—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) 「沖繩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.
- 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.
- 寺島 滋・板木拓也・片山 肇・池原 研・今井 登・太田充恒 (2009) 沖繩南東海域の表層堆積物等の化学組成. 荒井晃作 (編) 「沖繩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—沖繩島東方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 46, 99–106.

(受 付 : 2022年1月6日 ; 受 理 : 2022年6月16日)

地質調査研究報告 第73巻 (第1号—第5/6号)

第1号

[論文]

西三河平野西南部油ヶ淵低地下の更新統古地磁気層序
羽田裕貴・中谷是崇・水野清秀1-17

[論文]

埼玉県江南町での反射法探査—反射面傾斜角の深さ依存性の検出—
大滝壽樹・加野直巳・横倉隆伸19-28

第2号

[論文]

第2白嶺丸重力データの整備・公開
石原丈実・小田啓邦29-48

[論文]

東京都世田谷区で掘削された上用賀 GS-SE-1 及び駒沢 GS-SE-3 コアの更新統東京層の有孔虫・貝形虫化石群集
金子 稔・石川博行・原島 舞・野村正弘・中澤 努49-65

[概報]

北上山地中西部、盛岡市藪川地域の外山高原で見出されたチバニアン期後半のテフラ
内野隆之・工藤 崇・古澤 明・岩野英樹・檀原 徹・小松原 琢67-85

[概報]

パーミアンドトラップ法と水流法による水中非メタン炭化水素の測定：水流法データからの全濃度の計算
猪狩俊一郎87-92

第3号

[概報]

Late Triassic radiolarians and conodonts from a chert pebble within the Lower Pleistocene Higashihigasa Formation of the Kazusa Group, Boso Peninsula, Japan
ITO Tsuyoshi, MUTO Shun and UTSUNOMIYA Masayuki93-101

[概報]

Chemical compositions and ages of basalts from seamounts in the Northwest Pacific
YAMAOKA Kyoko, ISHIZUKA Osamu, MOROZUMI Haruhisa and HINO Hikari103-135

[概報]

埼玉県岩殿丘陵西縁部から採取された砂質シルト岩試料の珪藻化石年代
納谷友規137-142

第4号

[資料・解説]

巡検案内書：足尾山地南西部「桐生及足利」地域のジュラ紀付加体
伊藤 剛143-192

第5/6号 特集：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質—2020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—2020年度調査航海結果—
井上卓彦・天野敦子・板木拓也193-196

[論文]

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
高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶197-209

[論文]	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 高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶	211-217
[概報]	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 石野沙季・三澤文慶・有元 純・井上卓彦.....	219-234
[概報]	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 三澤文慶・鈴木克明.....	235-248
[資料・解説]	トカラ列島南部海域で得られた海底岩石試料の特徴 石塚 治・石野沙季・鈴木克明・横山由香・三澤文慶・有元 純・高下裕章・井上卓彦	249-265
[概報]	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 有元 純・宇都宮正志	267-274
[論文]	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 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	275-299
[概報]	宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境 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	301-311
[論文]	Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan : Evaluation using quantitative DNA probing techniques MIYAJIMA Toshihiro, HAMAGUCHI Masami, NAKAMURA Takashi, KATAYAMA Hajime and HORI Masakazu	313-321
[概報]	トカラ列島周辺の深海域における表層堆積物の微生物群集構造 池内絵里・鈴木克明・井口 亮・鈴木 淳	323-328
[概報]	トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集（予報） 中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也・久保 観・佐々木聡史	329-335
[概報]	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 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	337-347

CONTENTS OF VOLUME 73

No. 1

[Article]

Subsurface Pleistocene magnetostratigraphy under the Aburagafuchi Lowland in the southwestern Nishi-mikawa Plain, central Japan

HANEDA Yuki, NAKATANI Koretaka and MIZUNO Kiyohide1-17

[Article]

Seismic reflection survey at Konan Town, Saitama Prefecture, Japan: linear dependence of the dip angles of reflection layers with depth

OHTAKI Toshiki, KANO Naomi and YOKOKURA Takanobu19-28

No. 2

[Article]

Preparation and release of gravity data collected by R/V Hakurei-maru No.2

ISHIHARA Takemi and ODA Hirokuni29-48

[Article]

Fossil foraminiferal and ostracode assemblages from the Pleistocene Tokyo Formation in cores GS-SE-1, Kami-Yoga and GS-SE-3, Komazawa, Setagaya, Tokyo, central Japan

KANEKO Minoru, ISHIKAWA Hiroyuki, HARASHIMA Mai, NOMURA Masahiro and NAKAZAWA Tsutomu49-65

[Report]

Late Chibanian tephra recognized in the Sotoyama Plateau of Yabukawa area in Morioka City, Iwate Prefecture, mid-western Kitakami Massif

UCHINO Takayuki, KUDO Takashi, FURUSAWA Akira, IWANO Hideki, DANHARA Toru and KOMATSUBARA Taku67-85

[Report]

Measurement of non-methane hydrocarbon in water by purge and trap method and water flow method: calculation of total concentration based on data obtained using water flow method

IGARI Shunichiro87-92

No. 3

[Report]

Late Triassic radiolarians and conodonts from a chert pebble within the Lower Pleistocene Higashihigasa Formation of the Kazusa Group, Boso Peninsula, Japan

ITO Tsuyoshi, MUTO Shun and UTSUNOMIYA Masayuki93-101

[Report]

Chemical compositions and ages of basalts from seamounts in the Northwest Pacific

YAMAOKA Kyoko, ISHIZUKA Osamu, MOROZUMI Haruhisa and HINO Hikari103-135

[Report]

Diatom biochronology of the sandy siltstone samples collected from the western margin of the Iwadono Hills, Saitama Prefecture, central Japan

NAYA Tomonori137-142

No. 4

[Note and Comment]

Field excursion guide: Jurassic accretionary complex in the Kiryu and Ashikaga District, southwestern Ashio Mountains, central Japan

ITO Tsuyoshi143-192

No. 5/6 Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruise in 2020

[Preface]

Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruise in 2020

INOUE Takahiko, AMANO Atsuko and ITAKI Takuya193–196

[Article]

The bathymetry survey around Tokara Islands during GB21-1 and GK20 cruises

KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori197–209

[Article]

Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-1 and GK20 cruises

KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori211–217

[Report]

Seismic survey of GB21-1 Cruise off southwest Tokara Islands

ISHINO Saki, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun and INOUE Takahiko219–234

[Report]

Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GK20 cruise

MISAWA Ayanori and SUZUKI Yoshiaki235–248

[Note and Comment]

Submarine rock samples recovered during GB21-1 cruise in the southern Tokara Islands area

ISHIZUKA Osamu, ISHINO Saki, SUZUKI Yoshiaki, YOKOYAMA Yuka, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun, KOGE Hiroaki and INOUE Takahiko249–265

[Report]

Depositional ages of sediment and sedimentary rock samples obtained from the seafloor around the Tokara Islands during GB21-1 cruise, based on calcareous microfossil assemblages

ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki267–274

[Article]

Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Takarajima Island and the Suwanosejima Island

SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, TOKUDA Yuki and SENTOKU Asuka275–299

[Report]

Oceanographic environments around Takarajima Island and Suwanosejima Island

ITAKI Takuya, SUZUKI Yoshiaki, IKEUCHI Eri, OIKAWA Kazuma, KATAYAMA Hajime, IIZUKA Mutsumi, SUZUKI Atsushi and TAKAYANAGI Hideko301–311

[Article]

Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques

MIYAJIMA Toshihiro, HAMAGUCHI Masami, NAKAMURA Takashi, KATAYAMA Hajime and HORI Masakazu313–321

[Report]

Microbial community structure of surface sediments in the deep-sea area around the Tokara Islands, Japan

IKEUCHI Eri, SUZUKI Yoshiaki, IGUCHI Akira and SUZUKI Atsushi323–328

[Report]

Preliminary report of recent ostracode assemblages from the adjacent sea of Tokara Gap

NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KUBO Nozomi and SASAKI Satoshi329–335

[Report]

Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-1 Cruise), Japan

KUBOTA Ran, OHTA Atsuyuki, TACHIBANA Yoshiko, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, SUZUKI Yoshiaki and MANAKA Mitsuo337–347

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。

井口 亮・石塚 治・内野隆之・宇都宮正志・川辺能成・昆 慶明・坂田 将・田中源吾（熊本大学）・
田中裕一郎・中嶋 健・松本 弾・水野清秀・森尻理恵・横田俊之・渡辺真人
(敬称略)

地質調査総合センター研究資料集

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

地質調査総合センターの最新出版物

5 万分の 1 地質図幅	桐生及足利 和気 豊田
20 万分の 1 地質図幅	宮津 (第 2 版)
海洋地質図	No. 91 種子島付近海底地質図 No. 92 久米島周辺海域海洋地質図
火山地質図	No. 21 恵山火山地質図 No. 22 日光白根及び三岳火山地質図
海陸シームレス地質図	S-7 海陸シームレス地質情報集「相模湾沿岸域」
大規模火砕流分布図	No. 1 始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図
特殊地質図	No. 42 多摩川低地の沖積層アトラス
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

Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques

MIYAJIMA Toshihiro, HAMAGUCHI Masami, NAKAMURA Takashi, KATAYAMA Hajime and HORI Masakazu 313

Microbial community structure of surface sediments in the deep-sea area around the Tokara Islands, Japan

IKEUCHI Eri, SUZUKI Yoshiaki, IGUCHI Akira and SUZUKI Atsushi.....323

Preliminary report of recent ostracode assemblages from the adjacent sea of Tokara Gap

NAKANO Taiga, IWATANI Hokuto, SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KUBO Nozomi and SASAKI Satoshi 329

Chemical composition of marine surface sediments around Tokara Islands (GB21-1 Cruise), Japan

KUBOTA Ran, OHTA Atsuyuki, TACHIBANA Yoshiko, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, SUZUKI Yoshiaki and MANAKA Mitsuo 337

地質調査研究報告編集委員会

委員長	鈴木 淳
副委員長	佐々木 宗建
委員	宮城 磯治
	松本 弾子
	東郷 洋子
	持丸 華子
	藤井 孝志
	大谷 竜明
	長森 英明
	納谷 友規
	天野 敦子
	細井 淳
	森尻 理恵

Bulletin of the Geological Survey of Japan Editorial Board

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

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
地質情報基盤センター 出版室
<https://www.gsj.jp/inquiries.html>

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geoinformation Service Center Publication Office
<https://www.gsj.jp/en/>

地質調査研究報告 第73巻 第5/6号
令和4年12月27日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒305-8567
茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

Bulletin of the Geological Survey of Japan
Vol. 73 No. 5/6 Issue December 27, 2022

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. 73 No. 5/6 2022

CONTENTS

Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruise in 2020	
Special issue on marine geology around Tokara Islands in Kagoshima Prefecture: result of marine geological mapping survey cruise in 2020	
INOUE Takahiko, AMANO Atsuko and ITAKI Takuya	193
The bathymetry survey around Tokara Islands during GB21-1 and GK20 cruises	
KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori	197
Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-1 and GK20 cruises	
KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori	211
Seismic survey of GB21-1 Cruise off southwest Tokara Islands	
ISHINO Saki, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun and INOUE Takahiko	219
Shallow submarine structure around Tokara Islands based on the high-resolution subbottom profiler survey during the GK20 cruise	
MISAWA Ayanori and SUZUKI Yoshiaki	235
Submarine rock samples recovered during GB21-1 cruise in the southern Tokara Islands area	
ISHIZUKA Osamu, ISHINO Saki, SUZUKI Yoshiaki, YOKOYAMA Yuka, MISAWA Ayanori, ARIMOTO Jun, KOGE Hiroaki and INOUE Takahiko	249
Depositional ages of sediment and sedimentary rock samples obtained from the seafloor around the Tokara Islands during GB21-1 cruise, based on calcareous microfossil assemblages	
ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki	267
Submarine sediment distribution and its controlling factors around the Takarajima Island and the Suwanosejima Island	
SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya, KATAYAMA Hajime, KANEKO Naotomo, YAMASAKI Makoto, TOKUDA Yuki and SENTOKU Asuka	275
Oceanographic environments around Takarajima Island and Suwanosejima Island	
ITAKI Takuya, SUZUKI Yoshiaki, IKEUCHI Eri, OIKAWA Kazuma, KATAYAMA Hajime, IIZUKA Mutsumi, SUZUKI Atsushi and TAKAYANAGI Hideko	301

continued on inside back cover