

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

三澤 文慶¹・古山 精史朗^{2,1}・高下 裕章¹・鈴木 克明¹

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

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

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

要 旨

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

が浸食によりむき出しとなったエリアが認められた。

1. はじめに

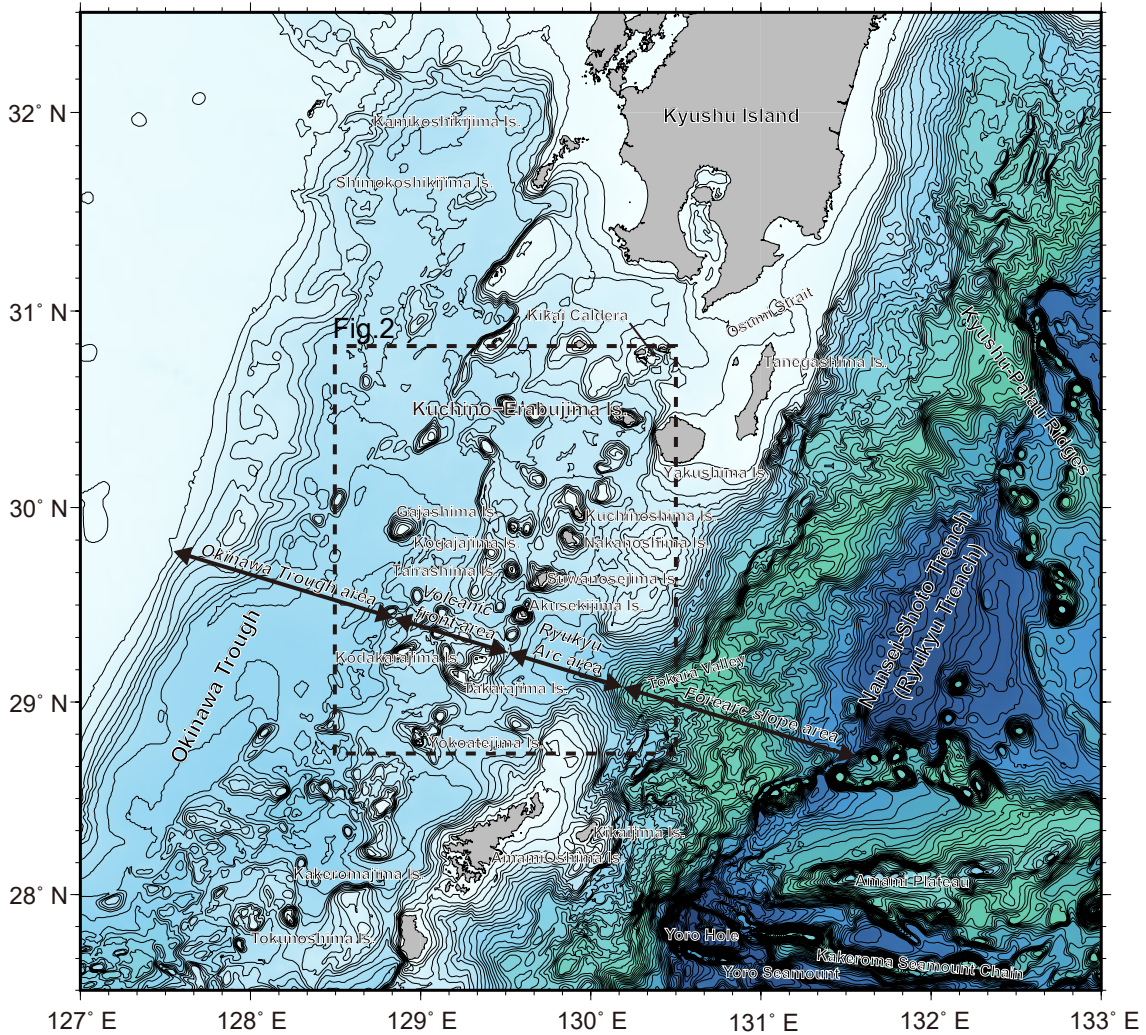
鹿児島県南部に位置する吐噶喇列島(以下、トカラ列島)は九州島と奄美大島の間に島嶼が断続的に発達し、北から口之島、臥蛇島、小臥蛇島、中之島、平島、諏訪之瀬島、悪石島、小宝島、宝島、及び横当島が存在する(第1図)。本海域には複数の島々が存在し、鹿児島側の桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、口之島、中之島、諏訪之瀬島、横当島、そして硫黄島島といった火山島が発達し、南九州から続く琉球弧の火山フロントを形成している(下司・石塚, 2007)(第2図)。なかでも、口之島・中之島・諏訪之瀬島は活火山であり、特に諏訪之瀬島は現在も活発な火山活動が継続している。また、海底にも海底火山に起源を持つ大小様々な規模の海山及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

GS21航海(2021年10月5日～10月23日)では、トカ

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

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

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



第1図 調査地域広域海底地形図。図中の等深線の間隔は100 mである。

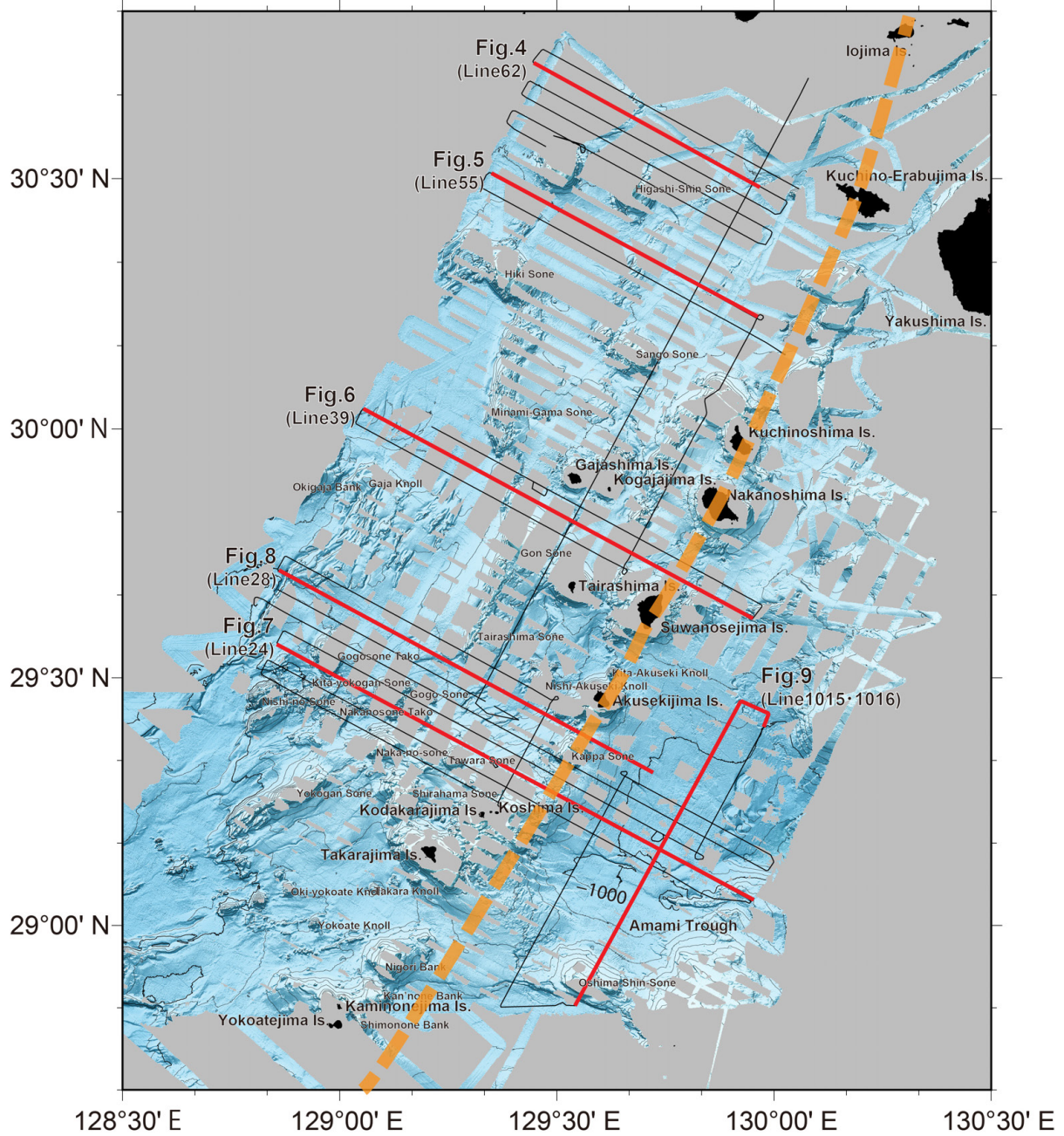
Fig. 1 Bathymetric map of the northern Okinawa Trough. The spacing between contour lines in the figure is 100 m.

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

2. 調査概要

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

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



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

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

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

3. 地質概説

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

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

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

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

4. 海底地形概要

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

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

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

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

5. SBP 探査結果

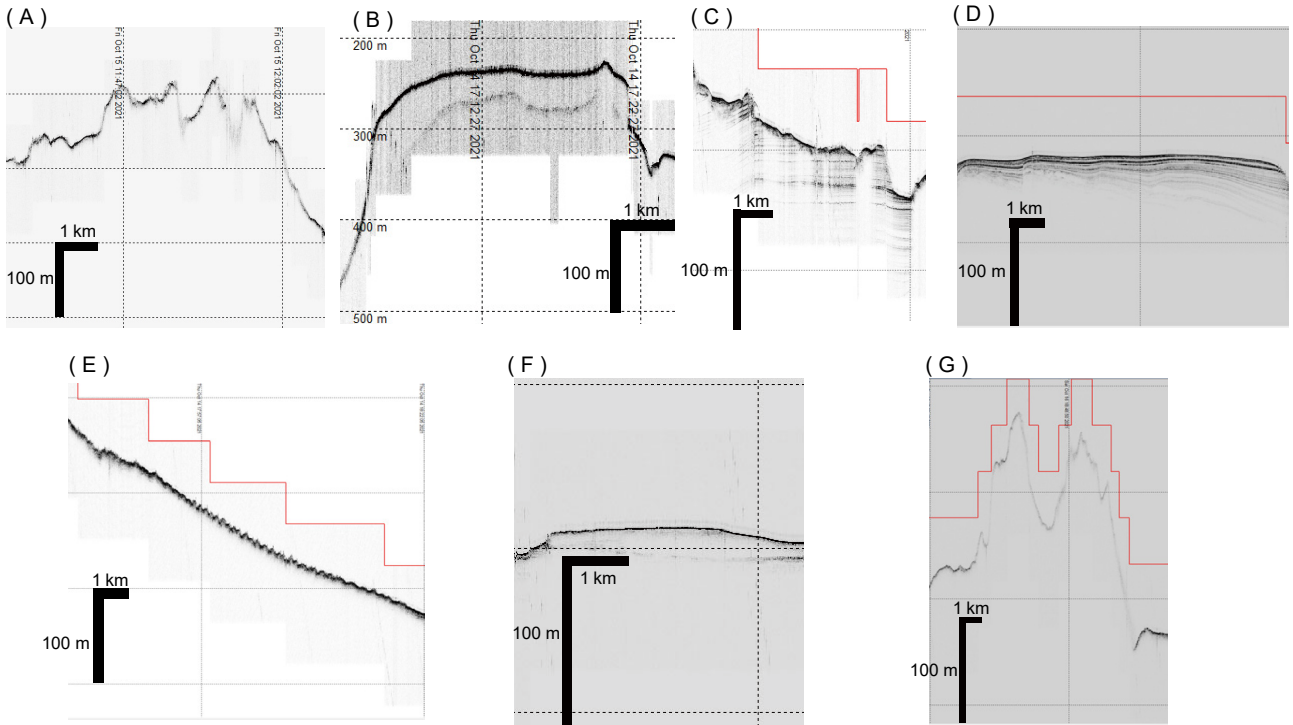
本調査では、トカラ列島を直交方向に切る西北西-東南東方向の測線を21本、トカラ列島に並行な北北東-南南西方向測線を6本、合計27本の測線にて観測を行い、約1,095 miles(約2,028 km)分のデータを取得した(第2図)。本調査では海底面下最大約100 m部分の構造に関する地質情報を取得することができた。

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

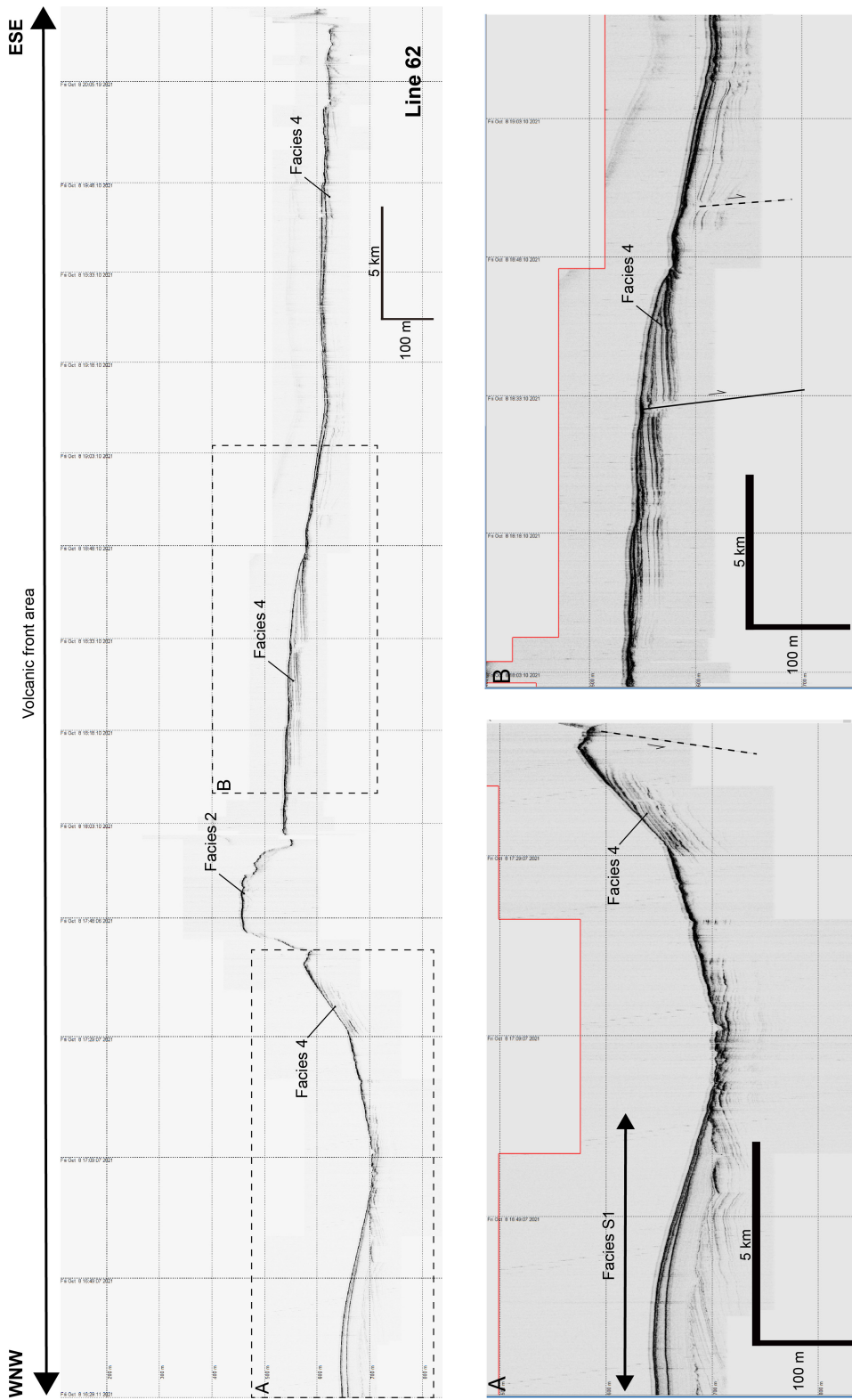
本報告では、調査範囲を北から東新曾根周辺部、臥蛇島南方域、五号曾根周辺部、及び奄美舟状海盆域の4区画に分けて、詳細な音響的層相の分布や海底下浅部の地質構造についてまとめる。

5.1 東新曾根周辺部

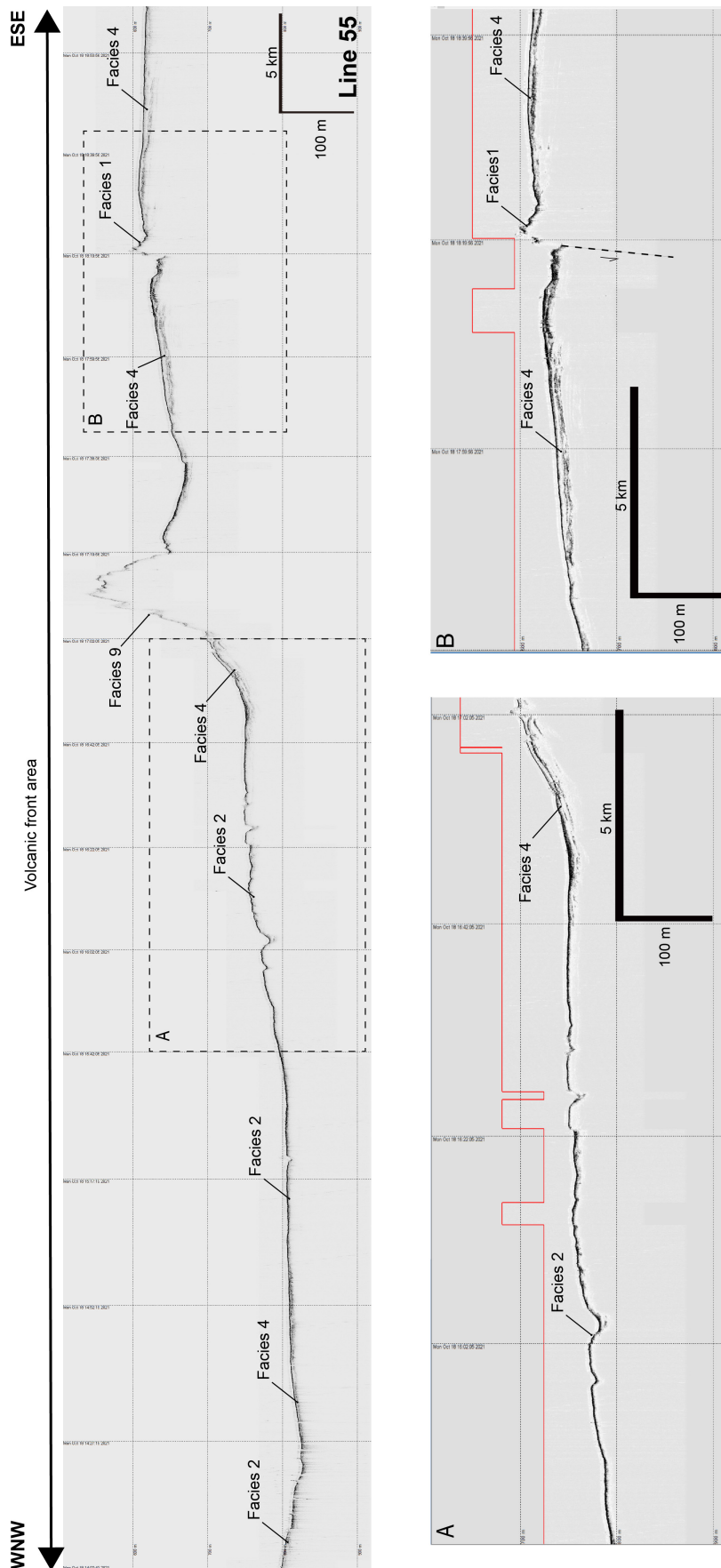
東新曾根は火山フロント域に位置し、曾根部分を除き、その周辺部は水深600 m程度は比較的なだらかな平坦面を示す(第2図)。測線62の中央部に位置する地形的高まりの頂部は比較的平坦な地形を示し、層相2が認められる(第4図)。また、測線55の中央部に位置する地形的高まり部分では、急斜面であるために起因して海底面の反

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

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

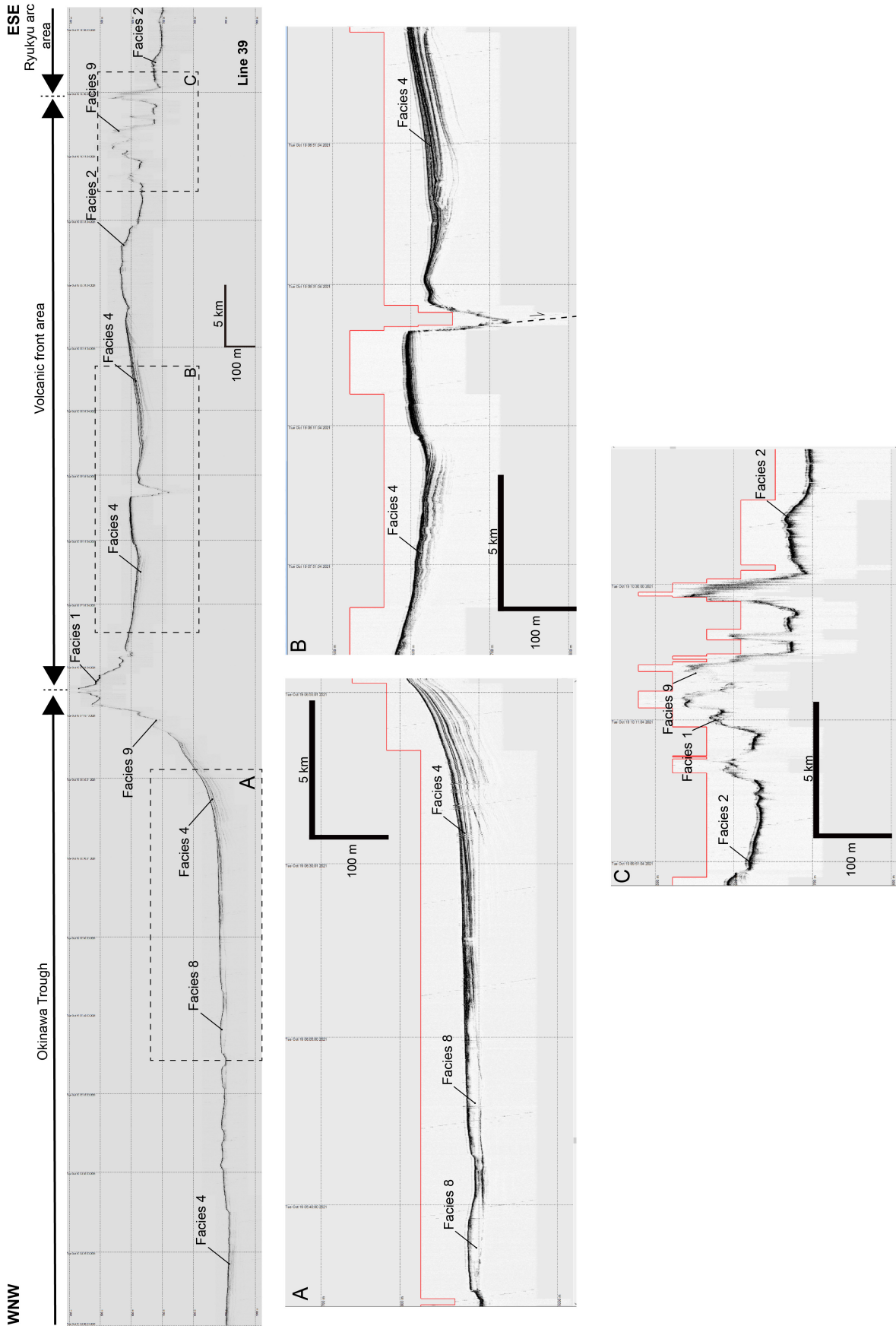


第4図 測線62のSBP断面図と各エリアの拡大断面図。探査測線の位置は、第2図を参照されたい。
 Fig. 4 SBP profile of Line 62 and close-up profiles. The location of the SBP profile is shown in Fig. 2.



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

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



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

5.2 臥蛇島南方域

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

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

5.3 五号曾根周辺部

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

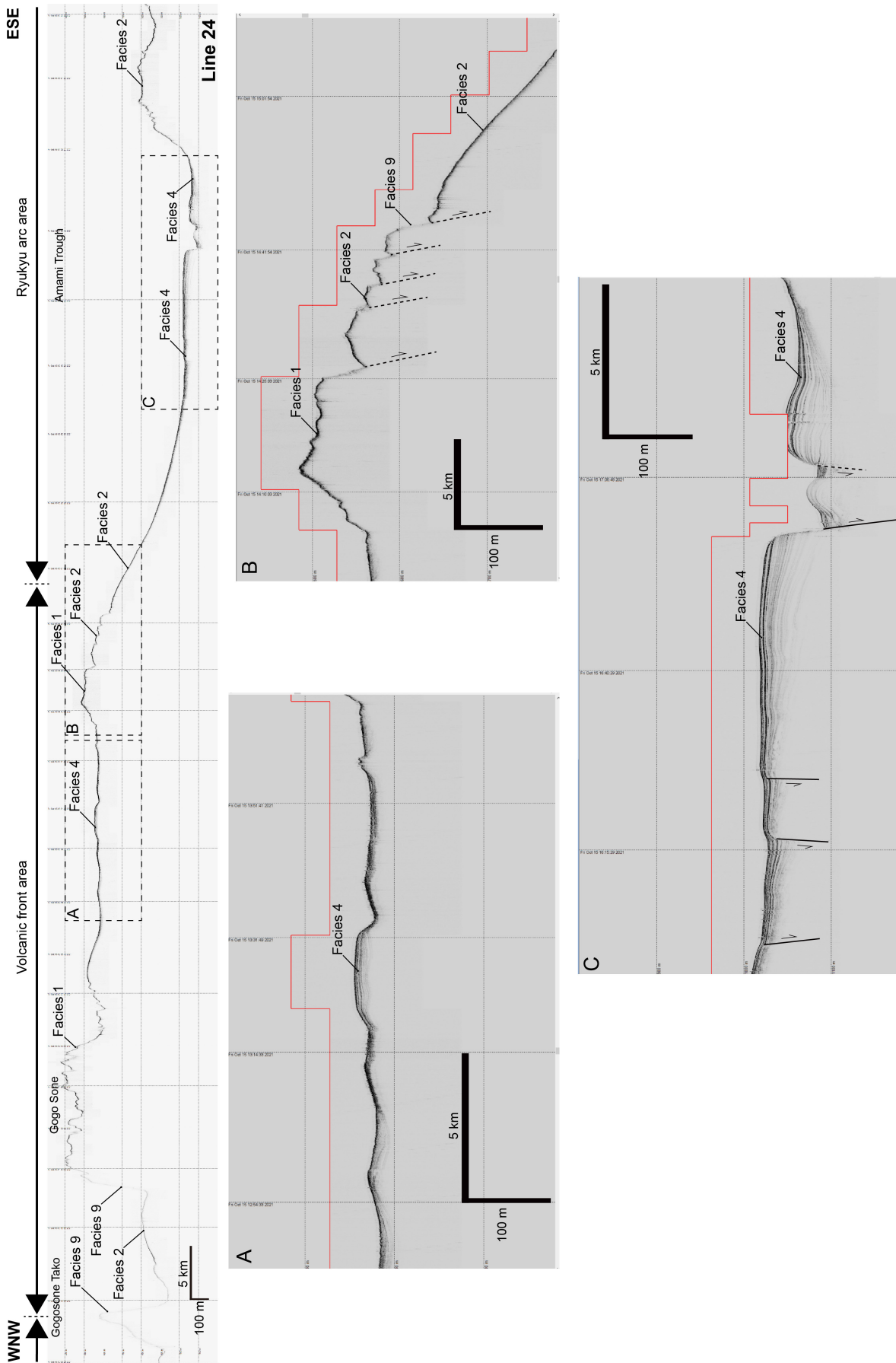
五号曾根の北側には水深800～900 mの平坦面が認められる。平坦部の西端部には最大比高200 mの凹地が存在し、その両端部には溝地形が発達している(第8A図)。凹地の中央部には堆積層が認められ、層相4の成層した海底面にほぼ平行で東傾斜した連続性の良い内部反射面が認められ、海底面下最大で約50 mの範囲が確認できる(第8A図)。また、溝地形部分には海底地形でも北北東-南南西方向に約40 kmに渡って追跡できる(第2図)。この溝地形の両端部には正断層の存在が示唆される(第8A図)。溝地形の東方には水深850 m程度の平坦面が存在し、層相4の成層した海底面にほぼ平行な連続性の良い内部反射面が認めら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

5.4 奄美舟状海盆地

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

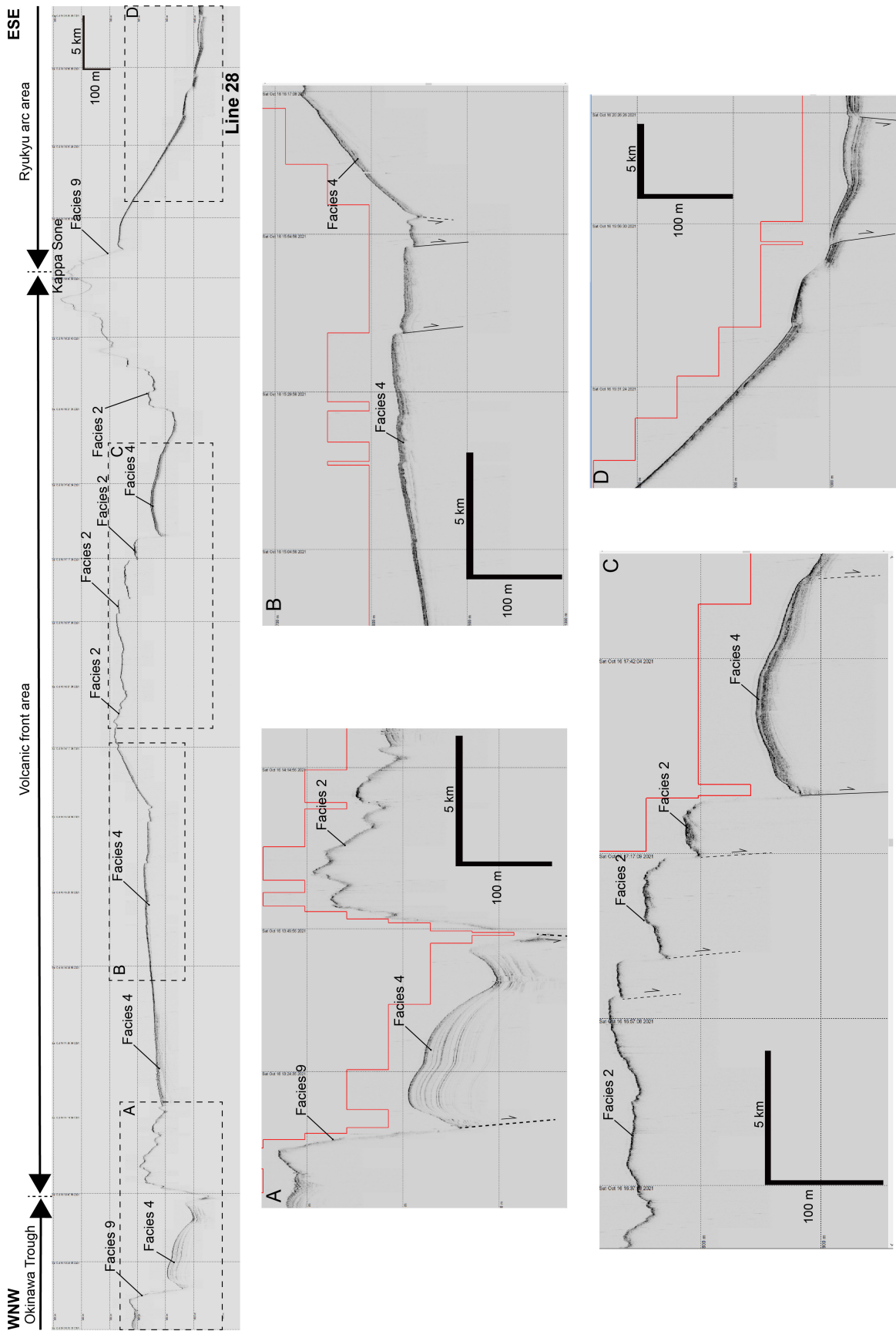
6. まとめ

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



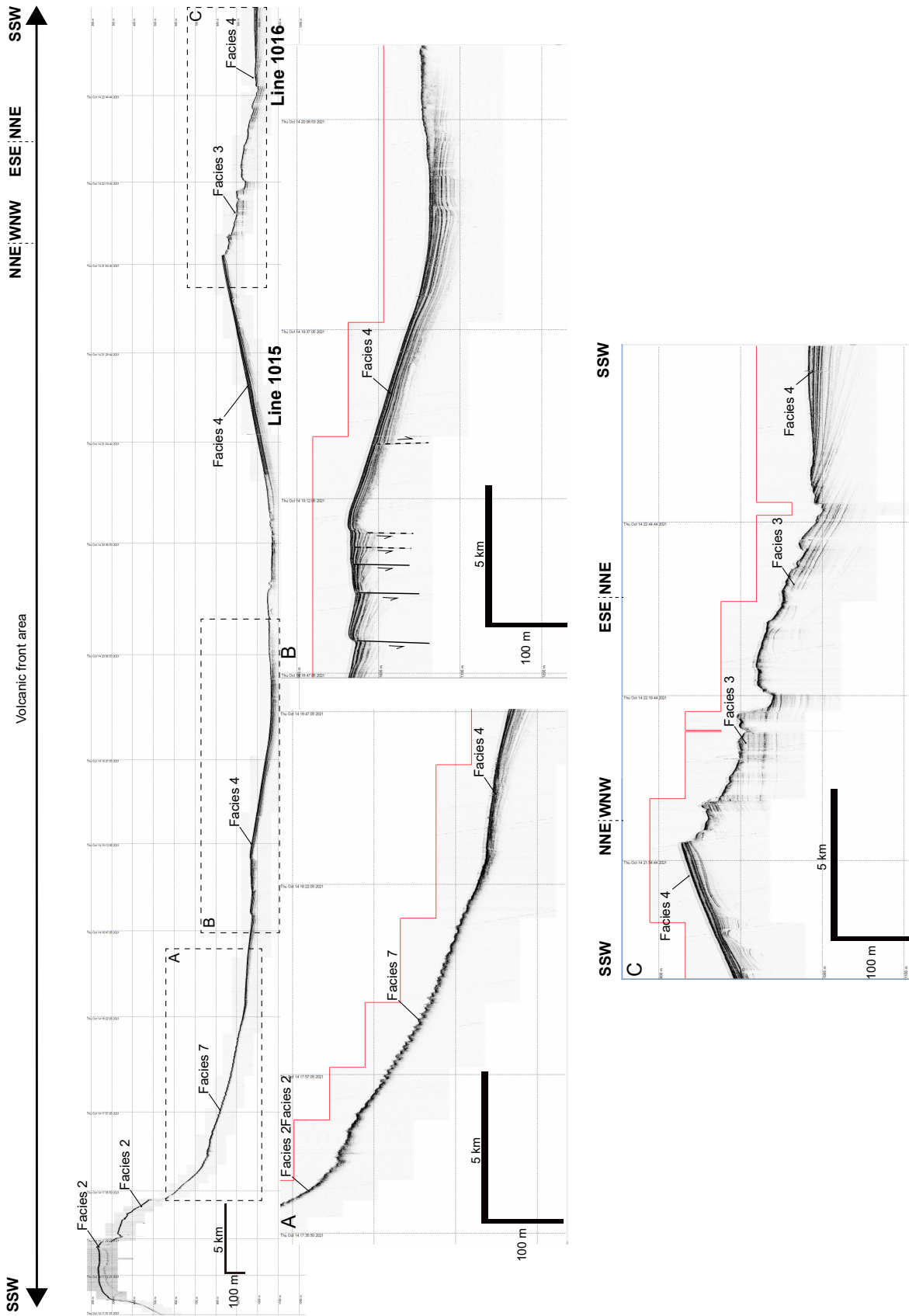
第7図 測線24のSBP断面図。探査測線の位置は、第2図に示す。

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



第8図 測線28のSBP断面図. 探査測線の位置は、第2図に示す。

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



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

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

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

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

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

文 献

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

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

