

2022 年度海域地質図航海で行ったトカラ列島北方海域における 反射法音波探査及びドレッジ概要

石野 沙季¹・石塚 治²・針金 由美子¹・有元 純¹・三澤 文慶¹・井上 卓彦¹

ISHINO Saki, ISHIZUKA Osamu, HARIGANE Yumiko, ARIMOTO Jun, MISAWA Ayanori and INOUE Takahiko (2024) Overview of the seismic survey and dredge in the vicinity of Northern Tokara Islands conducted during geological map research cruises in 2022FY. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 75 (5/6), p. 167–196, 12 figs, 1 plate and 3 appendices.

Abstract: Multi-channel seismic and dredge surveys were conducted around the Northern Tokara Islands to construct marine geological maps at a scale of 1:200,000. We present an overview of the seismic survey and dredge results of three cruises (GS22, GB22-1, and GB22-2), and preliminary interpretations of the seismic stratigraphy and geological structures. Four sedimentary units (TY2, TY3, TY4) are continuously traced in the vicinity of Tane-Yaku Spur, which consists of acoustic basement (TY1). Normal faults with NNE-SSW trending develop widely along the western slope of Tane-Yaku Spur. To the north of the Tokara Islands, the lowermost sedimentary unit (NT1) occurs under a topographic high that extends from southwest of Kuroshima Island to Gon Sone, at the eastern edge of the Okinawa Trough. The overlying sedimentary units (NT2 and NT3) occur mainly in flat sea floor around the islands and the topographic highs. Unit NT2 is affected by normal faults and folds with NNE-SSW trending, which widely develop north of the Tokara Islands. The geological structures of units TY2, TY3, and NT2 suggest they deposited during formation of the half-graben that extends from the Ryukyu Arc to the western part of the Okinawa Trough. Outcrops of unit TY3, unit TY1, the lower part of unit NT2, and the upper part of unit NT2 were dredged at sites GB22-1-D07, GB22-1-D08, GB22-2-D09, and GB22-2-D10, respectively. We will combine precise correlations among profiles in the surveyed areas with age data from rock analysis to interpret the seismic stratigraphy. The results will be published as marine geological maps of the Tokara Islands.

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

要 旨

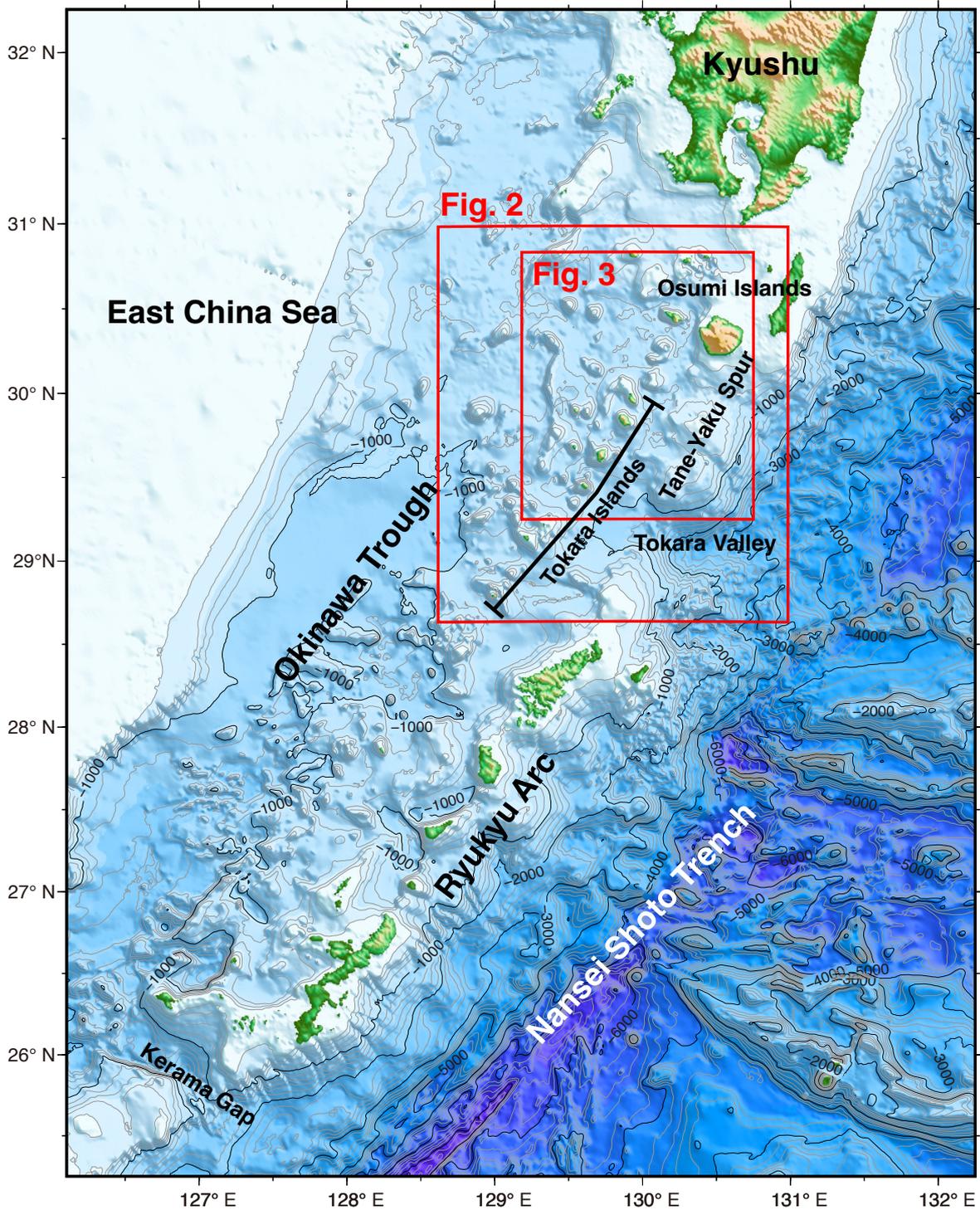
20万分の1海底地質図の作成を目的として、トカラ列島北部周辺海域においてマルチチャンネル反射法音波探査及びドレッジ調査を行った。本稿では、GS22, GB22-1及びGB22-2の3航海で取得した反射断面及びドレッジ調査の概要について報告する。特に、本調査で重点的に観測したトカラ列島北方及び種子・屋久海脚周辺海域に認められる層序・地質構造の特徴について予察的に記載する。種子・屋久海脚周辺海域では、海脚を構成する音響基盤 (TY1層) の西側斜面にて不整合面で明瞭に区別される3層の堆積層 (TY2層, TY3層及びTY4層) が認められる。西落ちの正断層が海脚西側の等深線に調和的な概ね北北東-南南西走向で複数分布する。トカラ列島北方海域では、不整合面及び音響的層相の異なる3層

(N1層, N2層及びN3層) を区分した。N1層は黒島南西沖から墓曾根及び権曾根にかけて連なる地形的高まりの深部に断続的に認められ、その上位NT2層及びNT3層が海底平坦部に広く分布する。トカラ列島北方海域は北北東-南南西走向の断層, 向斜, 及び背斜が発達し, NT2層中の地層が変形している。地質構造の特徴から, TY2層・TY3層とNT2層は, 琉球弧から沖縄トラフ西方にかけて広がるハーフグラベン形成時に堆積したと推測される。ドレッジ調査では, GB22-1-D07地点でTY3層が, GB22-1-D08地点でTY3層が, GB22-2-D09地点及びD10地点でNT2層の上部及び下部が露出していると思われる崖で岩石を採取した。今後, 断面における反射面の緻密な対比及び岩石の形成年代の解析を元に統合的な地質層序の解釈を進める。解釈結果はトカラ列島周辺海域の海底地質図として発表する予定である。

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

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



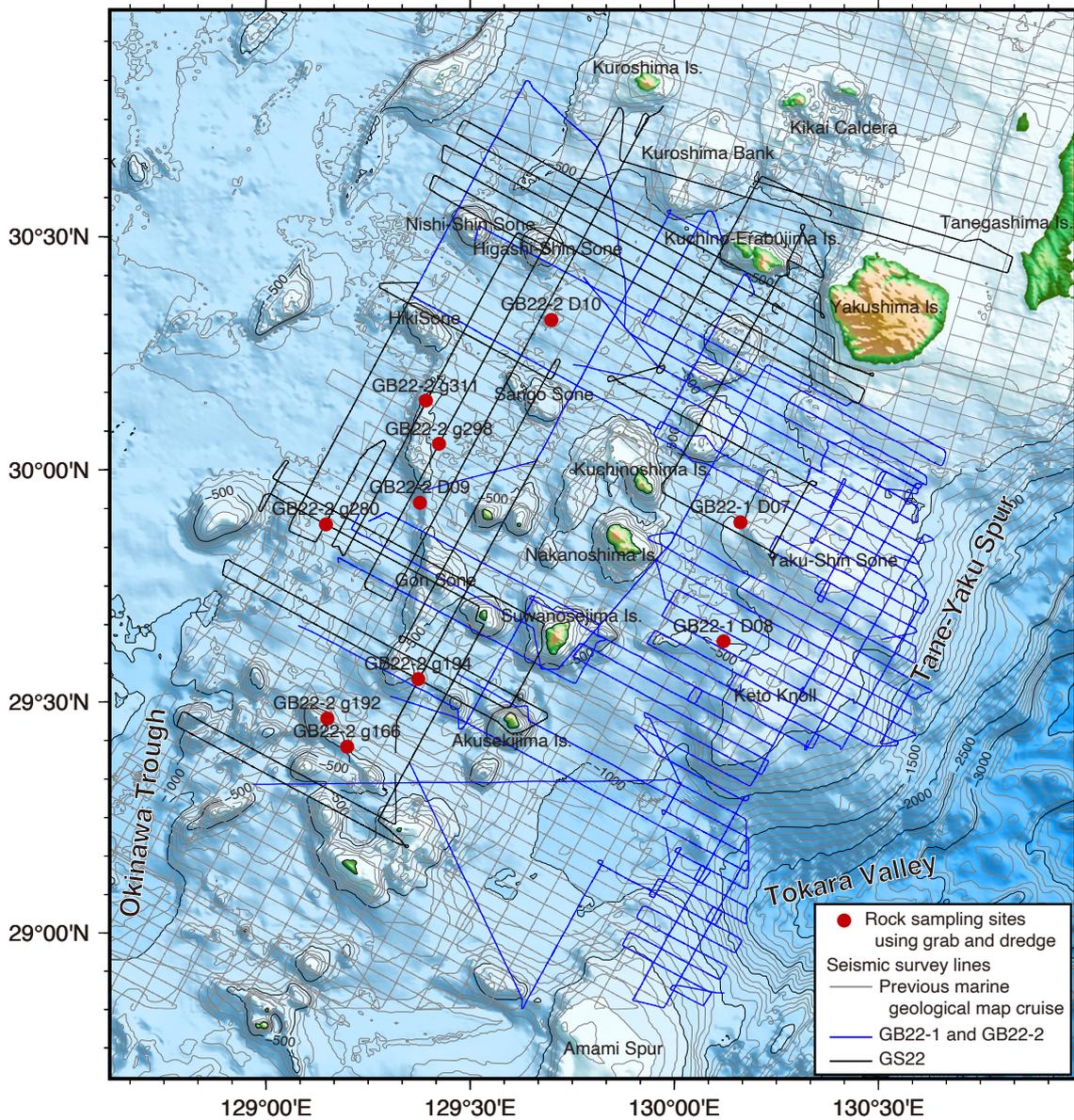
第1図 調査海域周辺の島嶼名及び主な地形名を記した海底地形図。地形データは岸本(2000)を使用した。

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).

1. はじめに

産業技術総合研究所地質調査総合センターでは、2020年度より吐噶喇列島(以下、トカラ列島)周辺海域(第1

図)において3区画分の海洋地質図作成を目的とした海底地質調査を進めている。2022年度は主にトカラ列島北方海域においてマルチチャンネル反射法音波探査及びドレッジ調査を行い、海底地質構造データ及び海底岩石試



第2図 本調査で観測した音波探査測線図. 地形データは岸本 (2000) を使用した.

Fig. 2 Seismic survey lines obtained from this survey. The topographic data is based on Kishimoto (2000).

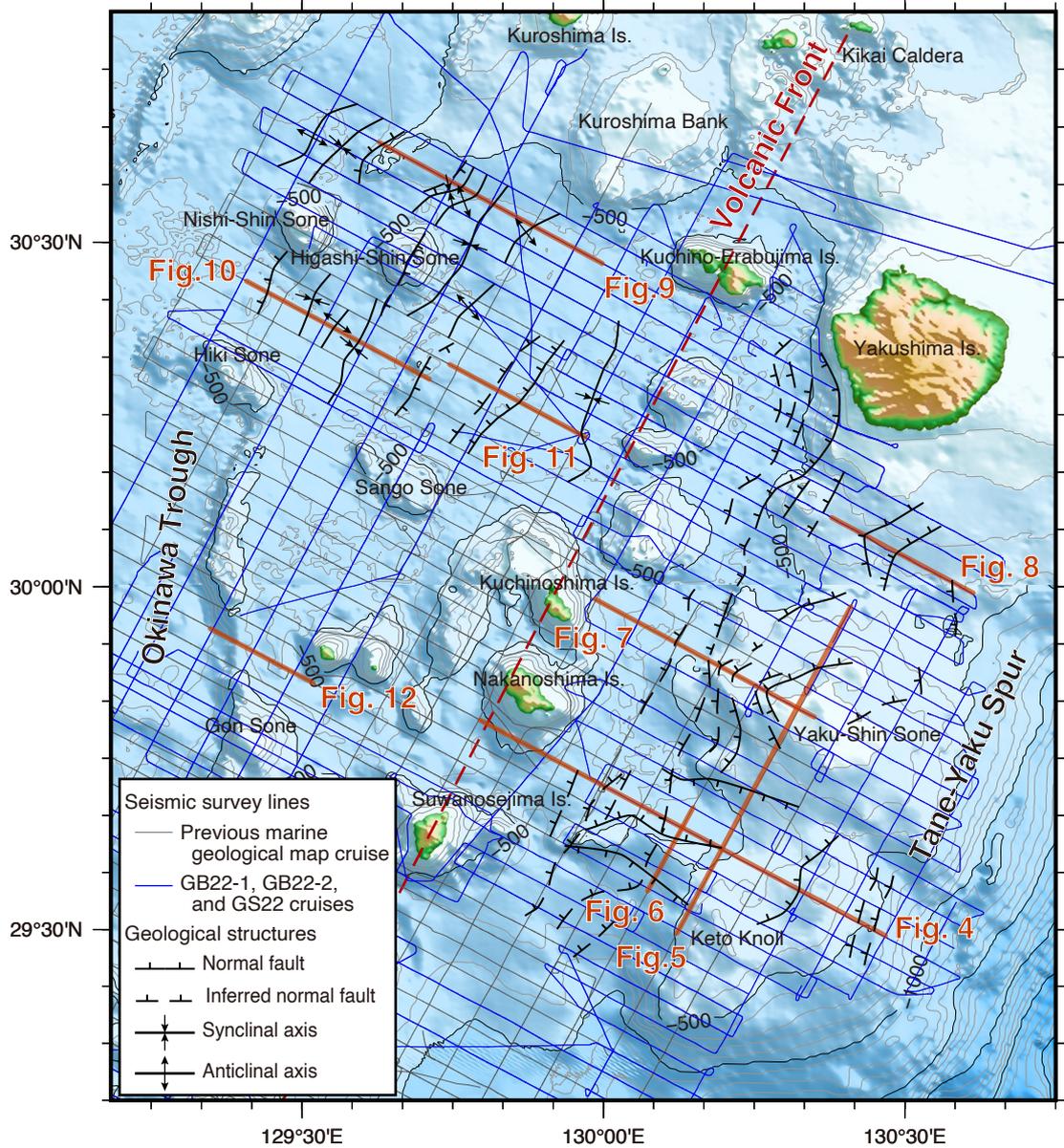
料を取得した(第2図). 一部の地点では, 同調査航海で実施されたグラブ採泥器を用いた採泥調査でも岩石試料が採取されている(鈴木ほか, 2024). 本年度の調査を終えて, 取得した反射断面はトカラ列島周辺で予定している海洋地質図の区画を網羅した. 反射断面に基づく音響層序や地質構造の特徴, 岩石試料に基づくそれらの地質年代の詳細な検討結果は, 海底地質図として今後公表する予定である.

本稿では, 2022年度の反射法音波探査及びドレッジ調査結果を報告するとともに, 本調査で重点的に観測したトカラ列島北方及び種子・屋久海脚周辺海域(第3図)に

おける層序・地質構造について予察的に考察する. ドレッジ及びグラブ採泥器にて採取した堆積岩の年代分析結果については有元・田中(2024)を参照されたい.

2. 地形概略

本調査海域は, 九州南方から台湾にかけて分布する琉球弧の北部に位置する(第1図). 東方には, 水深3,000 m以深の南西諸島海溝が, 西方には水深1,000 m以深の平坦部を形成する沖縄トラフ(背弧海盆)が分布する. 南部には琉球弧を胴切る大規模な構造であるトカラ海底谷が位置している.



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。本地図の地形データは岸本（2000）を使用した。

Fig. 3 Distribution map of faults and folds observed in seismic profiles. The topographic data used from Kishimoto (2000).

調査海域の地形は、種子・屋久海脚、大隅諸島及びトカラ列島に代表される(第2図)。本海域東部の種子・屋久海脚は、大隅半島沖の大陸棚から南南西に伸びる琉球弧上に位置付けられ、約100 kmに渡って水深500 m以浅の高まりを成す。種子・屋久海脚中部及び南部には、それぞれ水深約200–300 mの屋久新曾根及びケトウ曾根が孤立した地形的高まりを形成する。種子・屋久海脚の斜面は東西で地形的特徴が異なる。東側は概ね南東傾斜の様な傾斜角度を持つ一方で、西側は屋久島南西沖、屋久新曾根、及びケトウ曾根周辺で西方に張り出ししており、斜面の傾斜角度が一様でない複雑な地形を呈す

る。調査海域中部及び西部には、急峻な崖に囲まれた大隅諸島(口永良部島)及びトカラ列島(口之島、中之島、諏訪之瀬島及び悪石島)が琉球弧と並列して点在する。口永良部島と口之島を結ぶ直線上には比高約300–400 mの高まりが、西方には比高約300–500 mの東新曾根及び西新曾根、サンゴ曾根及び墓曾根が点在しており、どれも頂部は平な形状をなしている。これらの島嶼及び高まりの周囲には、水深約600–700 mの平坦部が広がっている。その北端は、九州の大陸棚南方沖に位置する黒島堆及びその西方の南西方向に張り出した水深500 m以浅の地形的高まりに囲まれている。

3. 地質概略

3.1 琉球弧の地質層序

琉球弧は、南西諸島海溝においてフィリピン海プレートがユーラシアプレートへ沈み込むことで形成した島弧-海溝系である。周辺の地質学的な特徴として、東から順に、前弧域における非火山性の島嶼及び海底地形の連続した高まりから構成される琉球弧(南西諸島海嶺)、第四紀の火山フロント(下司・石塚, 2007; 中野ほか, 2008; 横瀬ほか, 2010)、リフティング段階にある背弧海盆の沖繩トラフ(木村, 1990; Nishizawa *et al.*, 2019)が位置し、これらは概ね北北東-南南西方向の帯状に区分される(例えば, Nash, 1979; Kizaki, 1986)。このうち火山フロント及び琉球弧の島嶼にて層序が明らかにされており、地層の海域への延長は反射法音波探査による地質構造の特徴及び基礎試錐による年代対比をもとに検討されてきた。

琉球弧の陸域では、先中新統の基盤岩とその上位に不整合で覆う中新統-完新統が広く分布している。沖繩島や奄美大島、屋久島、種子島では、基盤岩類としてジュラ紀から始新世の堆積岩が報告されている(竹内, 1994; 斎藤ほか, 2007; 中江ほか, 2010)。前期-中期中新世の地層は琉球弧において限定的であり、堆積岩は八重山層群が琉球弧南部に、茎永層が種子島の南東部に、火成岩は宝島及び屋久島に分布する(斎藤ほか, 2007; 中野ほか, 2008)。中期中新世-前期更新世には、大陸棚外縁部の沈降に伴って堆積した島尻層群が、前期-後期更新世には隆起に伴って琉球層群が形成された(Kizaki, 1986)。九州南部から続く第四紀の火山フロントは、鬼界カルデラ、口永良部島及びトカラ列島に連続する(川辺ほか, 2004; 下司・石塚, 2007; 斎藤ほか, 2007; 中野ほか, 2008; 横瀬ほか, 2010)。さらに南方では、火山フロント上の火山は陸域に認められないものの、海底地形の高まりや海底下のマグマの貫入として火山活動が認められる(Sato *et al.*, 2014; Nishizawa *et al.*, 2019; Minami *et al.*, 2022; Harigane *et al.*, 2023)。

海域の地質層序は、琉球弧西部から沖繩トラフにかけての琉球弧全体を対象としたもの(Kimura, 1985; Letouzey and Kimura, 1986)や、沖繩島周辺及び大隅諸島での密な調査測線に基づくもの(荒井ほか, 2015, 2018; 荒井・井上, 2022; 岡村, 2022a, 2022b)が提案されてきた。音響基盤は主に琉球弧上及び沖繩トラフ周辺域の深部に認められ、先中新統の付加体に相当すると解釈されている(古川, 1991; 木村ほか, 1993)。音響基盤の上位には中新世の堆積層が認められるが、その分布及び地質学的帰属は慶良間海裂の南北で異なる。慶良間海裂以南では、八重山諸島に分布する八重山層群及び九州北部に分布する佐世保層群相当層として広域的に認められ、大陸棚の沿岸域に堆積したと解釈されている(Kimura, 1985;

Kizaki, 1986)。慶良間海裂以北では、八重山層群相当層もしくは種子島に分布する茎永層群相当層として前弧東側斜面に認められ、琉球弧周辺の隆起に伴って削剥されたものが堆積したと解釈されている(荒井ほか, 2015, 2018; 岡村, 2022a)。大隅半島南方沖の大陸棚深部にも中新統と推測される地層の分布が示されている(岡村, 2022b)が、慶良間海裂以南に認められる中新統との関係は不明である。これらの地層の上位には、九州南方沖から南部沖繩トラフにかけて島尻層群相当層、琉球層群相当層、第四紀の堆積層が分布し、堆積層を分ける不整合面は現在の沖繩トラフの発達過程に伴って形成したと考えられている(Kimura, 1985)。

3.2 琉球弧の海底地質構造

琉球弧における海底地質構造は、沖繩トラフのリフティングに伴って発達した断層や褶曲に特徴付けられる。俯瞰的に見れば、琉球弧西側に北東-南西走向の西落ち正断層が、東シナ海大陸棚付近に東落ちの正断層が分布し(Nash, 1979; Kimura, 1985; Sibuet *et al.*, 1998; Shang *et al.*, 2017; 荒井ほか, 2018; 荒井・井上, 2022)、島尻層群相当層の堆積層に変位を与えて、琉球弧西方の海盆である「広義の沖繩トラフ」を形成している(木村, 1990)。「広義の沖繩トラフ」の内部には正断層が複数発達し、琉球層群相当層の堆積層を変位させる断層も存在する。琉球弧北部では、2列の主要な断層帯が存在し、西方から順に、薩摩半島南西沖からトカラ列島西側の北東-南西走向及び北北東-南南西走向の線構造、及び大隅半島南方沖から琉球弧西側斜面をなす線構造に沿って、西落ちのリストリック正断層が発達し、ハーフグレーベンを形成する(Nash, 1979; 岡村, 2022b)。2列の主要な断層帯によって切られる海盆は島尻層群相当層堆積時には沈降を開始しており、琉球弧西側斜面付近に発達する正断層は琉球層群相当層の堆積時にも継続して活動した(岡村, 2022b)。

琉球弧前弧域には、弧に沿った北北東-南南西走向の断層の他に、弧に垂直な西北西-東南東走向の断層や線構造の存在も知られている。琉球弧を分断する主要な構造としてトカラ海底谷、慶良間海裂が挙げられ、それぞれ地形的特徴、断層による地層の変位の特徴から横ずれ成分を持つことが示唆されている(松本ほか, 1996; 荒井・井上, 2022)。小規模な西北西-東南東走向の断層は琉球弧東側斜面にも認められ、多くが正断層である(Matsumoto, 2009; 荒井ほか, 2015, 2018; 荒井・井上, 2022)。これらの琉球弧に垂直な走向の断層の成因は、南西諸島海溝南部における琉球弧に斜交して沈み込むフィリピン海プレートの運動、及び沖繩トラフのリフティングに伴って海溝側へ琉球弧が周長を広げる運動に求められてきた(Kubo and Fukuyama, 2003; Otsubo *et al.*, 2008; Matsumoto *et al.*, 2009)。しかし、これらの発達史

を明らかにするには海底下の地質情報の取得が必要である。

4. 調査方法

2022年度は海底地質調査を3航海実施した。GS22航海(2022年5月16日-6月4日)では、東京海洋大学が所有する練習船「神鷹丸」を使用し、マルチチャンネル反射法音波探査やマルチビーム音響測深等の航走観測を行なった。GB22-1航海(2022年7月10日-7月29日)及びGB22-2航海(2022年11月1日-11月29日)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、昼間にドレッジ調査およびグラブ採泥を行い、夜間にマルチチャンネル反射法音波探査やマルチビーム音響測深等の航走観測を行った。各調査航海で行った調査内容の詳細は井上ほか(2024)を参照されたい。

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-東南東方向に2マイル間隔、トカラ列島に並行する北北東-南南西方向に4マイル間隔でそれぞれ設定している。加えて、調査時に一部では測線間を補完するように航走観測を行った。GS22航海では約1,560マイル、GB22-1航海では約950マイル、GB22-2航海では約1,108マイルに渡る音波探査データを取得した。音源には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、受振部には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12.5m)を用いた。GeoEel SolidはCNT-2探鉱器に接続して信号を記録した。GIガンの発振は6秒間隔で繰り返し、対地船速約8ノットを維持して航走観測を行なったため、発振点間隔は約25 m、共通反射点(Common Mid Point: CMP)間隔は約6.25 mとなる。なお、格子状からなる計画測線以外の補助測線では9ノットで航走して収録した。受振データはGPSデータを加えてSEG-D形式で収録し、その後SEG-Y形式への変換、信号処理(ジオメトリ編集、バンドパスフィルタリング、球面発散補正、デコンボリューション、速度解析、NMO補正、及びCMP重合、4トレース水平重合)を施して解釈用反射断面を作成した。本稿で扱う反射断面の横軸(CMP番号)は25 m間隔となる。

ドレッジ地点は、地質図調査航海で取得した反射断面上で音響層序の年代制約に寄与する斜面を検討し、地質図調査航海で取得した詳細な地形(Koge *et al.*, 2024)から露頭を推定して実施した(第2図, D07-D10地点)。本調査では内径約60 cmの円筒型チェーンバッグ式ドレッジおよび小型円筒ドレッジを用いた(付図A1)。付表A1にオペレーションに関するデータリスト、付表A2及び船上での肉眼観察によって記載した採取岩石試料のリスト、図版1に採取した試料の一覧写真を示す。

5. 反射法音波探査およびドレッジ調査結果

本稿では、重点的に調査を実施した海域を種子・屋久海脚周辺海域とトカラ列島北方海域とに分け、それぞれに認められる層序・地質構造の特徴・ドレッジ結果を記す。種子・屋久海脚周辺海域については、石野ほか(2022, 2023)に北北東-南南西方向の測線に基づいた地質構造の解釈が記されているが、本調査によって琉球弧に対して垂直な西北西-東南東方向の測線を取得したため、さらに詳細な特徴が明らかになった。複数の反射断面に認められる一連の地質構造は第3図に記す。

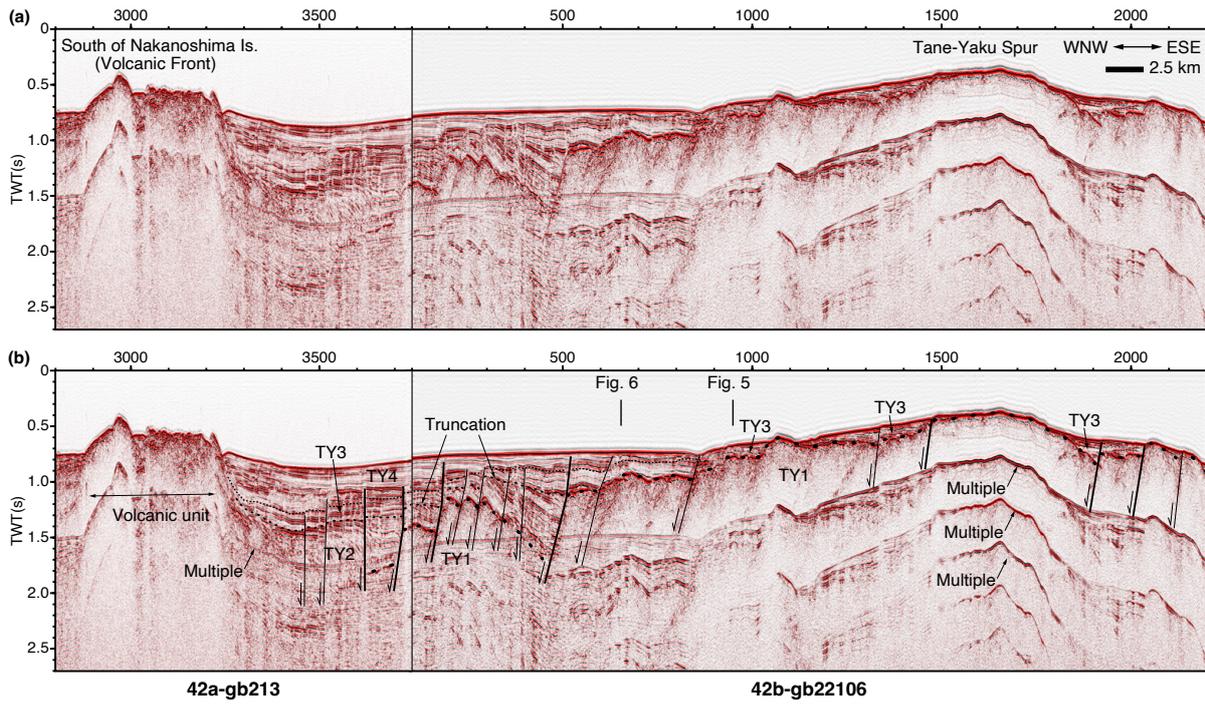
5.1 種子・屋久海脚周辺海域

5.1.1 音響層序及びドレッジ点の詳細

種子・屋久海脚南部を横断する西北西-東南東方向の反射断面を第4図に、種子・屋久海脚の伸びに平行な北北東-南南西方向の反射断面を第5図に示す。第6図及び第7図にはドレッジをした崖の反射面を示す。トカラ列島東方沖の層序は、明瞭なオンラップ不整合によって種子・屋久海脚の基盤をなす下位層とその上位の海脚西方の海盆を埋める堆積層に大別される。

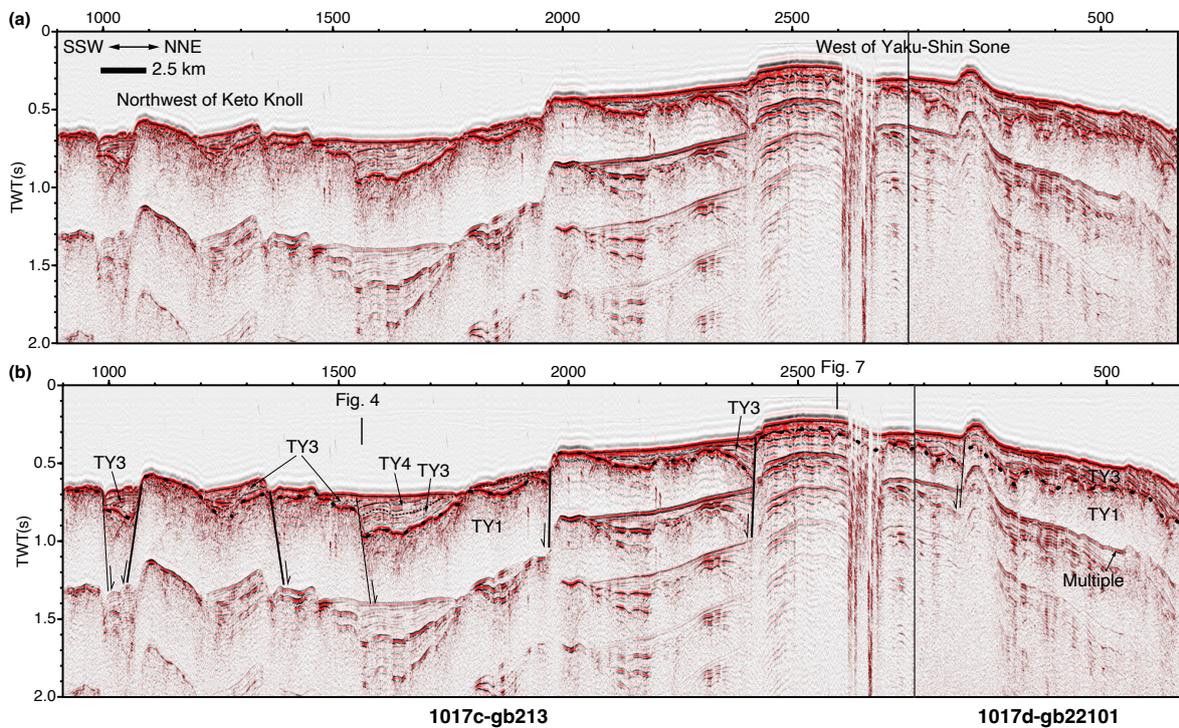
下位層上面は高振幅で比較的連続性の良い反射面を特徴とする。本稿ではこの下位層をTY1層とする。TY1層内部には一部で境界面に並行で低振幅の連続的な反射面が認められるが、多くが無秩序もしくは断続的に変形した低振幅の内部反射を示し、分布深度を増すと反射面が認識できない(第4図及び第5図)。TY1層の分布は概ね種子・屋久海脚の地形に調和的で、海脚中軸部においては海底面に露出する(第4図)。海脚西方のTY1層上面は概ね平坦で、海脚斜面から火山フロントにかけて東方に傾斜しながら断続的に分布深度を増す(第4図)。

TY1層の上位には、連続性の良い内部反射を示す、複数の堆積層が分布し、その堆積層はそれぞれTY1層にオンラップしている(第4図)。この堆積層の内部には不整合面が2面認められるため、本稿ではこの堆積層を下位から順にTY2層、TY3層、及びTY4層とする。TY2層は、種子・屋久海脚西側斜面におけるTY1層に変形を及ぼす断層面にオンラップし、その内部反射面は東傾斜を示す(第4図、第7図)。海盆内部の火山フロントから5-7.5 km東方における内部反射面は断続的で低い振幅を示す(第4図、第7図)。TY2層の分布は、海脚中軸部では北方に向かって、海脚斜面から火山フロントにかけては西方に向かって層厚を増す傾向にあり(第4図、第7図、第8図)、海脚西方では層厚が約0.5秒(往復走時)を越える(第4図、第7図)。TY2層の上面はトランケーションを示す。TY3層は、連続性の良い内部反射面を持ち、種子・屋久海脚西方においてTY2層を覆い、さらに種子・屋久海脚南部の水深約500 m未満の浅部においてはTY1層にオンラップしている(第4図、第5図)。TY3層の分布は、



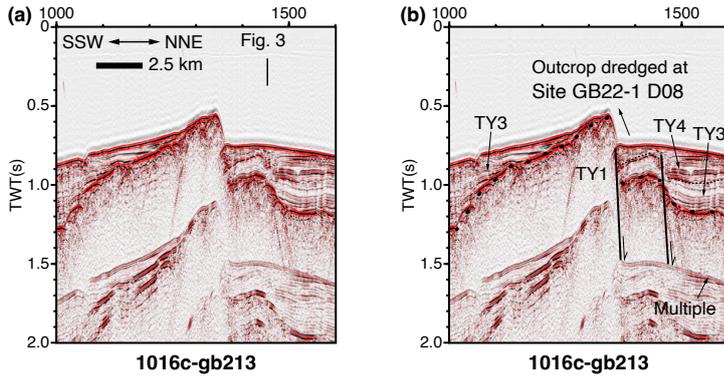
第4図 (a) 種子・屋久海脚を胴切る方向の重ね音波探査断面図 (測線42a-gb213及び42b-gb22106) 及び(b) 解釈線. 実線: 断層 (太線は第3図にマッピングした断層).

Fig. 4 (a) Stacked seismic profile across Tane-Yaku Spur (Lines 42a-gb213 and 42b-gb22106) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).

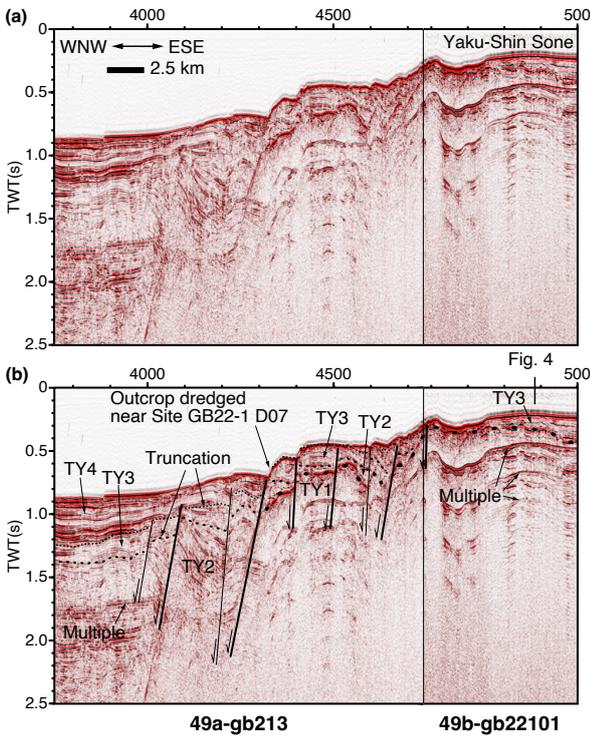


第5図 (a) 種子・屋久海脚上の重ね音波探査断面図 (測線1017c-gb213及び1017d-gb22101) 及び(b) 解釈線. 実線: 断層 (太線は第3図にマッピングした断層).

Fig.5 (a) Stacked seismic profile along Tane-Yaku Spur (Lines 1017c-gb213 and 1017d-gb22101) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).



第6図 種子・屋久海脚南部の重合音波探査断面図 (測線1016c-gb213) 及び(b) 解釈線。実線：断層 (太線は第3図にマッピングした断層)。
Fig. 6 (a) Stacked seismic profile along south of Tane-Yaku Spur (Line 1016c-gb213) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).



第7図 (a) 種子・屋久海脚西側斜面の重合音波探査断面図 (測線49a-gb213 及び49b-gb22101) 及び(b) 解釈線。実線：断層 (太線は第3図にマッピングした断層)。
Fig. 7 (a) Stacked seismic profile across the western slope of Tane-Yaku Spur (Lines 49a-gb213 and 49b-gb22101) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).

海脚西側斜面から火山フロントにかけての海盆に広く認められ、概ね一定の層厚 (往復走時で約0.2秒) を示す (第4図, 第7図, 第8図)。海脚中軸部では海底面にて内部反射面のトランケーションが認められる (第5図, 第6図, 第8図)。本海域の最上位には、海底面に並行で連続的な内部反射面を特徴とするTY4層が覆う。TY4層は、種子・屋久海脚及び西方の海盆の最上位にて断層によって形成された低地を埋めるように堆積している。海脚西方の

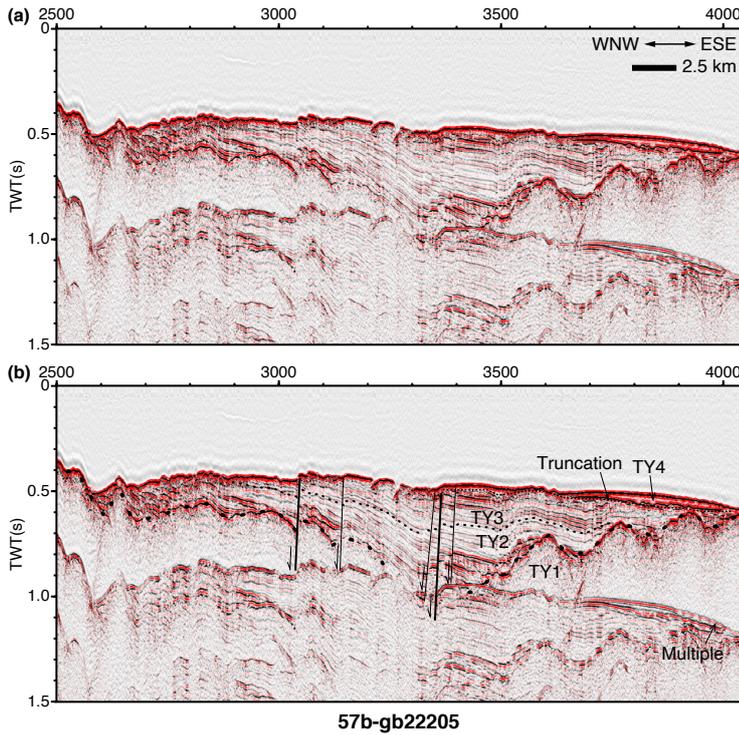
海盆におけるTY4層の堆積中心は、口之島・中之島・諏訪之瀬島の並びから5 kmほど東方に位置し (第4図, 第7図)、最大層厚は約0.5秒 (往復走時) で、北方に向かって層厚が薄くなる傾向がある。

火山フロント付近では、表層から往復走時で約0.1–0.4秒の間に、内部反射が透明もしくは無秩序構造を特徴とする地層が認められる (第4図)。これらの構造の特徴及び分布域から、この地層は火山岩や火山噴出物からなる層と推測でき、本稿では火山性ユニットと呼ぶ。火山フロント周辺部におけるTY2層, TY3層及びTY4層下部は、火山性ユニットの東側にて東へ傾動しており (第4図)、火山活動による地殻変動の影響を受けていると推察できる。TY4層上部は火山性ユニット及び急傾斜するTY3層にオンラップしており、火山活動による変形が少ない。

TY1層はケトウ曾根西方沖にて東西方向の断層によって急斜面表層に露出しているのが確認できる (第6図)。そのため、ドレッジ調査 (GB22-1-D08地点) を行った。D08地点では固結が進んだ硬質な砂岩が主に採取された (図版1)。得られた岩石試料の総重量は約52 kg、記載した岩石試料の大きさは最大で30 cm × 21 cm × 15 cm、最小で34.5 cm × 3.5 cm × 2 cmであった (付表2)。また、TY3層上面より下位の地層が露出している種子・屋久海脚西側斜面 (第7図) のGB22-1 D07地点にてドレッジ調査を実施した。D07地点では凝灰角礫岩及び石灰岩が採取された (図版1)。得られた岩石試料の総重量は約13 kg、記載された岩石試料の大きさは最大で19 cm × 16 cm × 9 cm、最小で16 cm × 10 cm × 4 cmであった (付表2)。採取した試料の大きさや形状、マンガンの被覆状態を考慮すると、D07及びD08地点では露頭を構成する岩石を採取していると考えられる。

5.1.2 地質構造

本海域では、西北西–東南東方向と北北東–南南西方向の断面で認められる断層の特徴が異なる。西北西–東南東方向の反射断面には、種子・屋久海脚中軸部や西方の海盆深部に西落ちの正断層が複数認められる (第4図, 第7図)。これらの正断層の分布は、種子・屋久海脚西側の



第8図 (a) 種子・屋久海脚北部の重合音波探査断面図(測線57b-gb22205)及び(b)解釈線。実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 8 (a) Stacked seismic profile across the northern part of Tane-Yaku Spur (Line 57b-gb22205) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).

水深500 m以浅において地形と調和的で北東-南西走向や北西-南西走向に屈曲するように断続的に発達し、海脚西方の海盆では北北東-南南西走向に比較的連続して認められる(第3図)。これらの正断層によって、TY2層の内部反射には上位に向かって累積的な傾斜の変化が表れている(第4図、第7図)。また、TY3層内部に一貫した断層による変位が認められ、TY4層内部は海底面に向かって徐々に反射面の変位が少なくなる(第4図、第7図)。種子・屋久海脚海脚の南部では、概ね東-西及び西北西-東南東走向に正断層が認められ、明瞭な線構造として海底地形にも現れている。この線構造に垂直な北北東-南南西方向の断面(第5図、第6図)では、TY1層上面に変形を及ぼす断層面にTY3層及びTY4層がオンラップしている様子が観察される(第5図、第6図)。

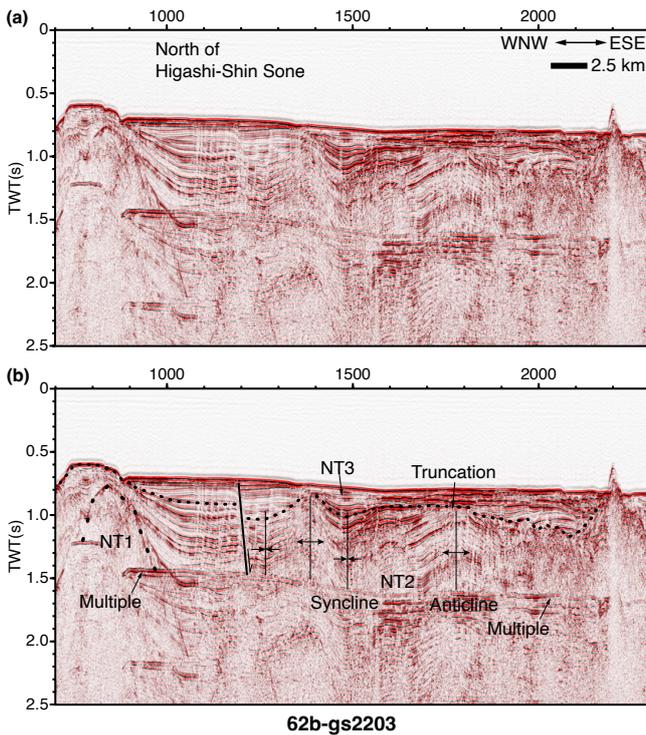
5.2 トカラ列島北方海域

5.2.1 音響層序及びドレッジ点の詳細

本稿では、口之島、サンゴ曾根、及び藁曾根から北方の水深約500-800 mの海域に分布する堆積盆に限定して記載する(第3図)。この海域は、広義での沖縄トラフ(木村, 1990)の北部、及びNash (1979)のTokara Sub-basin北部にあたる。西北西-東南東方向の反射断面を第9図から第12図に示す。第10図及び第12図にはドレッジ調査をした崖の反射断面を示す。本稿では、構造運動によって形成したと考えられる不整合面を基準に、地層を下位から順にNT1層、NT2層、NT3層に区分した。

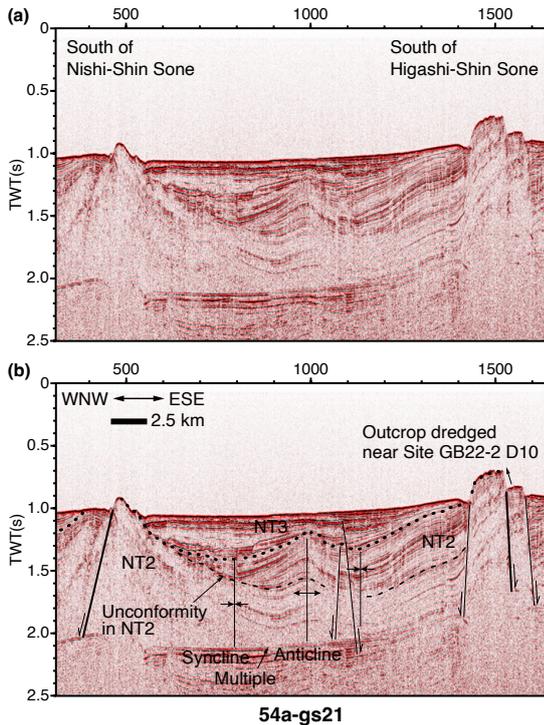
NT1層は黒島南西沖の南西に張り出した地形的高まり

の深部に認められる(第9図)。NT1層内部には低振幅の断続的な反射面を示す部分と無秩序構造を示す部分があり、内部に不整合面を含む可能性がある。NT1層は、本海域南方の藁曾根から権曾根にかけて連なる地形的高まりの深部にも分布する。NT2層は、連続性が良く高振幅の内部反射面を特徴とし、NT1層にオンラップしているのが黒島南西沖の南西に張り出した地形的高まりの深部にて確認できる(第9図)。NT2層は不整合面により上位と下位に分けられるものの、上位層と下位層はどちらも東に向かって層厚を増しており、その特徴が一致するため本稿では一括して扱うこととした(第9図、第10図)。本海域北部ではNT2層上面に一部でトランケーションが認められる(第9図)。本海域東方の火山フロント周辺ではNT2層内部反射面が変化し、口之島南西沖では無秩序構造が、サンゴ曾根北方では低振幅で急傾斜する内部反射面が認められる(第11図)。NT2層は層厚約0.5秒(往復走時)以上で堆積盆内部に広く認められ、東方では概ね東傾斜で海底下往復走時0.3-0.5秒程(第11図)の深さに、本海域西方では海底下往復走時0.3秒未満(第9図及び第10図)の深さに分布し、さらに、東新曾根周辺の地形的高まりや、サンゴ曾根北方沖では断層による変形を受けて海底面に露出している(第10図、第11図)。NT2層は本海域南方の、藁曾根から権曾根にかけて連なる地形的高まりの表層にも分布している(第12図)。NT3層は、NT2層にオンラップし、内部構造は概ね連続性が良く水平で振幅の強い反射を示し、複数の不整合面が認められるが、NT2層上面の凹地や断層によって形作られ



第9図 (a)トカラ列島北方の海底平坦部北部を西北西-東南東方向に横断する重合音波探査断面図(測線62b-gs2203)及び(b)解釈線. 太線は第3図にマッピングした断層.

Fig. 9 (a) Stacked seismic profile across the northern flat seafloor in the north of Tokara Islands in WNW-ESE direction (Line 62b-gs2203) and (b) their interpretations. Bold lines indicate tracked faults in Fig. 3



第10図 (a)トカラ列島北方の海底平坦部西部を西北西-東南東方向に横断する重合音波探査断面図(測線54a-gs21)及び(b)解釈線. 太線は第3図にマッピングした断層.

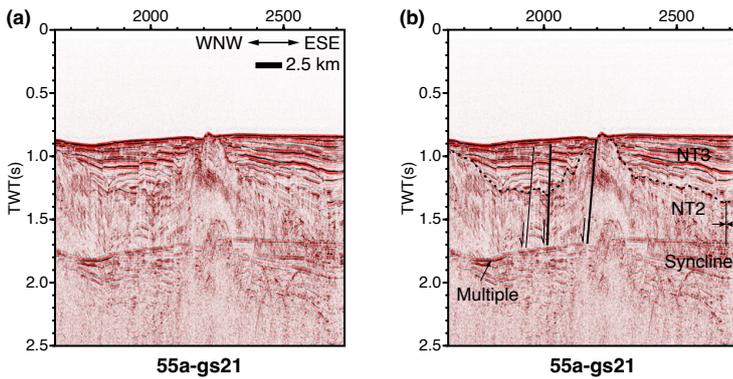
Fig. 10 (a) Stacked seismic profile across the western flat seafloor in the north of Tokara Islands in WNW-ESE direction (Line 54a-gs21) and (b) their interpretations. Bold lines indicate tracked faults in Fig. 3

る低地に厚く累重するのが特徴である。NT3層の層厚は、本海域東方の火山フロント付近で最も厚く、約0.5秒(往復走時)で認められる(第11図)。

本海域では、藁曾根から権曾根にかけて連なる地形的高まりの西側斜面にNT2層下部が露出しているのが確認できる(第12図)。そのため、GB22-2 D09地点にてドレッジ調査をして岩石を採取した。D09地点では主に半固結の砂岩が採取された(図版1)。得られた岩石試料の総重量は約97 kg、記載された岩石試料の大きさは最大で44 cm × 17 cm × 16.5 cm、最小で8 cm × 5 cm × 3.5 cmであった(付表2)。さらに、東新曾根の南方沖の急崖においてNT2層の上部が露出しており(第10図)、GB22-2 D10地点でドレッジ調査を行った。D10地点では主に泥岩が採取された(図版1)。得られた岩石試料の総重量は約31 kg、記載された岩石試料の大きさは最大で14 cm × 11 cm × 3 cm、最小で5 cm × 4 cm × 2 cmであった(付表2)。採取した試料の大きさや形状、マンガンの被覆状態を考慮すると、D09及びD10地点では露頭を構成する岩石を採取していると考えられる。

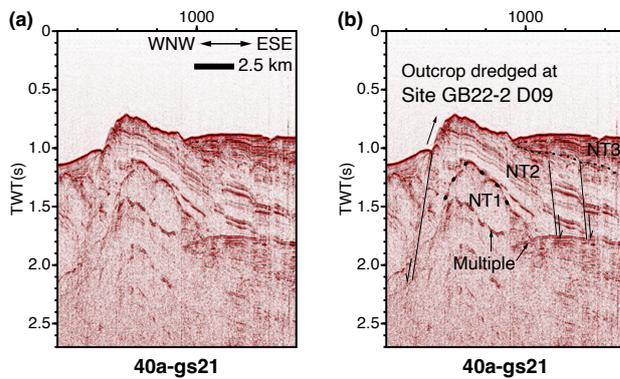
5.2.2 地質構造

トカラ列島北部の特徴的な地質構造として、NT2層内部及びNT3層下部に変位を与えている、正断層、向斜、及び背斜が複数認められる(第9図、第10図、第11図)。これらの構造は全て火山フロントの並びと並行な北北東-南南西走向に発達する(第3図)。NT2層内部に不整合面が認められるが、内部の地層は上位層も下位層も東に向



第11図 (a)トカラ列島北方の海底平坦部東部を西北西-東南東方向に横断する重合音波探査断面図(測線55a-gs21)及び(b)解釈線。実線:断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 11 (a) Stacked seismic profile across the eastern flat seafloor in the south of Tokara Islands in WNW-ESE direction (Line 55a-gs21) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).



第12図 (a)中之島西方の地形的高まりを西北西-東南東方向に横断する重合音波探査断面図(測線40a-gs21)及び(b)解釈線。実線:断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

Fig. 12 (a) Stacked seismic profile across the topographic high in the west of Nakanoshima Island in WNW-ESE direction (Line 40a-gs21) and (b) their interpretations. Solid lines: Faults (bold lines indicates tracked faults in Fig. 3).

かって層厚を増しており(第10図), 褶曲及び断層が形成する前に海盆の東方に堆積中心があったことが推察される。

本海域東方の火山フロント付近ではNT2層内部の反射面が顕著に変形を受けている。口永良部島南西沖では、透明層の山体の裾野の西側にてNT2層の内部が西へ傾動している(第9図 CMP 2100地点付近)。サンゴ曾根北方においては、NT2層は断続的で急傾斜の反射面を示し、深部には透明層もしくは無秩序な反射面の層相が認められる(第11図)。

6. 層序対比と構造発達史の議論

種子・屋久海脚周辺海域では、海脚基部を構成するTY1層の上位に堆積層(TY2層, TY3層, 及びTY4層)が分布している。西落ちの正断層が海脚西側の等深線に調和的な概ね北北東-西南西走向で複数認められ、ハーフグラベンを形成している。北北東-西南西走向の正断層はTY1層上面, TY2層及びTY3層内部に顕著な変位を与えている。トカラ列島北方海域では、黒島南西沖から蓼曾根及び権曾根にかけての北北東-南南西方向の地形的高まりの深部にNT1層が断続的に認められ、その上位に堆積層(NT2層及びNT3層)が広く分布する。北北東-南南西走向の断層, 向斜, 及び背斜が発達し, NT2層中

に変形が認められる。NT2層中の不整合面の分布及び地層の東方傾斜の様子から、褶曲及び断層による変位形成前は東方に堆積中心があったことが推察される。双方の海域においてTY3層・TY2層とNT2層は、北北東-南南西走向の西落ち正断層の形成に伴って堆積したと考えられる点、及び火山フロント周辺部において同じ構造の特徴を持つ点が一貫している。従って、TY3層・TY2層及びNT2層は、種子・屋久海脚西側に沿って分布する正断層を主断層とする、西新曾根・蓼曾根東方周辺にかけて広がるハーフグラブンの活動に伴って形成された可能性がある。

以上の考察を踏まえて本海域に認められる地層の特徴から構造発達史をまとめる。TY1層及びNT1層の形成後、後の種子・屋久海脚周辺にて西側が沈降し、ハーフグラベンが形成されるとともに、TY2層及びNT2層が堆積した。TY2層の層厚分布から、沈降は種子・屋久海脚中軸部の北部(屋久島南方沖)でも局所的に起こっていたと考えられる。その後、一度正断層の活動が停止し、もしくは堆積速度が沈降運動に対して急激に増加したことで、TY3層及びNT2層上部が形成された。種子・屋久海脚より西方にて正断層を伴う沈降運動が再度起こったことで、断層及び褶曲で形成された低地を埋めるようにTY4層及びNT3層の堆積が始まった。海脚を胴切る東-西走向及

び西北西-東南東走向の正断層及び現在のトカラ列島をなす火山フロントの山体は、それぞれTY3層及びTY4層の堆積以降に形成した可能性がある。

本海域で区分した層序・地質構造に基づく構造発達史は、沖縄トラフから琉球弧の広域的に認められる層序に基づく構造発達史と整合的で、各地層と対比できる可能性が高い。TY1層は、過去の北部沖縄トラフの構造探査(Nash, 1979; 木村, 1990)に報告されている音響基盤と同様の音響的特徴・分布を示し、トカラ列島周辺で行った基礎試錐「TO-KA-1」で得られた先中新統(Nash, 1979; 古川, 1991)に相当すると考えられる。トカラ列島北方のNT1層の分布は限定的であるが、地形の連続性から岡村(2022b)で報告されている黒島隆起帯の基盤に相当する可能性が高い。種子・屋久海脚周辺のTY2層及びTY3層、トカラ列島北方のNT2層及びNT3層は、琉球弧西方のハーフグラベンを形成していることから、島尻層群相当層(Nash, 1979; Kimura, 1985; 荒井ほか, 2015, 2018; Kikunaga *et al.*, 2021; 荒井・井上, 2022; 岡村, 2022a, 2022b)以上の層準に見られる、沈降・隆起に伴って形成した堆積層と対比できる。さらに、本調査では琉球弧を胴切る東-西走向及び西北西-東南東走向の正断層も認められた。このような琉球弧を胴切る走向の断層の詳細な記載は琉球弧北部において報告は無かった。今後、採取した堆積岩の年代に基づき音響層序および地質構造の年代を制約することで、北部琉球弧周辺海域における詳細な地質構造発達過程の解明が期待される。

謝辞: GB22-1航海及びGB22-2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東海大学職員の方々、及び作業をお手伝いいただいた東海大学の学生の皆様に安全な運行を遂行いただきましたことを感謝申し上げます。海洋技術開発株式会社の職員の方々、乗船者研究者の方々には、手作業による音響機器の投入揚収作業時に献身的なご協力を頂きました。また、GS22航海では、宮崎唯史船長をはじめとする神鷹丸運行に関わった東京海洋大学の職員の方々、サイスガジェット株式会社の乗船職員の方々、東京海洋大学の鶴 哲郎教授、酒井久治教授、古山精史郎助教及び乗船学生の方々に24時間体制での航走観測を支えていただき、長距離にわたる測線の物理探査データを取得することができました。皆様のお陰で安全に調査航海を終えたことに厚く御礼申し上げます。

文 献

- 荒井晃作・佐藤智之・井上卓彦(2015) 沖縄島北部周辺海域海底地質図。海洋地質図, no. 85 (DVD), 産総研地質調査総合センター。
- 荒井晃作・井上卓彦・佐藤智之(2018) 沖縄島南部周辺海域海底地質図。海洋地質図, no. 90 (CD), 産総研地質調査総合センター。
- 荒井晃作・井上卓彦(2022) 久米島周辺海域海底地質図。海洋地質図, no. 92, 産総研地質調査総合センター。
- 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。
- 有元 純・宇都宮正志(2023) GB21-3航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義。地質調査研究報告, **74**, 245-257。
- 有元 純・田中裕一郎(2024) GB21-3航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義。地質調査研究報告, **75**, 209-222。
- 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。
- Harigane, Y., Ishizuka, O., Shimoda, G., Conway, C. E., and Sato, T. (2023) Morphology, petrology and geochemistry of submarine volcanoes around Kumejima Island: Implications for arc-related volcanism in the southern Central Ryukyu Arc. *Marine Geology*, **458**, 107014。
- 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。
- 石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦(2023) 2021年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ調査の概要。地質調査研究報告, **74**, 211-230。
- 川辺禎久・阪口圭一・斎藤 眞・駒澤正夫・山崎俊嗣(2004) 20万分の1地質図幅「開聞岳及び黒島の一部」。産総研地質調査総合センター, 1 sheet。
- 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)。
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **2**, 222-240。
- 木村政昭(1990) 沖縄トラフの発生と形成。地質学論集, 堆積盆地と褶曲構造—形成機構とその実験的研究一, **34**, 77-88。
- 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。
- Kikunaga, R., Song, K. H., Chiyonobu, S., Fujita, K., Shinjo, R. and Okino, K. (2021) Shimajiri Group equivalent

- sedimentary rocks dredged from sea knolls off Kume Island, central Ryukyus: Implications for timing and mode of rifting of the middle Okinawa Trough back-arc basin. *Island Arc*, **30**, e12425.
- Kizaki, K. (1986) Geology and tectonics of the Ryukyu Islands. *Tectonophysics*, **125**, 193–207.
- Koge, H., Sato, T., Arimoto, J., Otsubo, M., Ishino, S., Suzuki, Y., Ishizuka, O., Harigane, Y., Misawa, A., Inoue, T., Yamashita, M., Furuyama, S., Yokoyama, Y., Sato, Y., Mori, T., Minami, H. and Tamura, C. (2024) Inception of ridge–ridge–ridge triple junctions: morphostructural analysis and dynamics in the early back-arc extension of the northern Okinawa Trough, *Geology*, G52640. doi: 10.1130/G52640.1
- 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.
- Letouzey, J. and Kimura, M. (1986) The Okinawa Trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, **125**, 209–230.
- 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.
- Matsumoto, T., Shinjo, R., Nakamura, M., Kimura, M. and Ono, T. (2009) Submarine active normal faults completely crossing the southwest Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, **466**, 289–299.
- Minami, H., Okada, C., Saito, K., and Ohara, Y. (2022) Evidence of an active rift zone in the northern Okinawa Trough. *Marine Geology*, **443**, 106666.
- 中江 訓・兼子尚知・宮崎一博・大野哲二・駒澤正夫 (2010) 20万分の1地質図幅「与論島及び那覇」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- 中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄 (2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- 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**, 109–119.
- 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.
- 岡村行信 (2022a) 種子島付近海底地質図. 海洋地質図, no. 91, 産総研地質調査総合センター.
- 岡村行信 (2022b) 野間岬沖海底地質図. 海洋地質図, no. 93, 産総研地質調査総合センター.
- Otsubo, M., Yamaji, A., Kubo, A. (2008) Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, **457**, 150–160.
- Sato, T., Oda, H., Ishizuka, O. and Arai, K. (2014) Detailed bathymetry and magnetic anomaly in the Central Ryukyu Arc, Japan: implications for a westward shift of the volcanic front after approximately 2.1 Ma. *Earth, Planets and Space*, **66**, 1–9.
- 斎藤 眞・小笠原正継・長森英明・下司信夫・駒澤正夫 (2007) 20万分の1地質図幅「屋久島」. 産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- Shang, L. N., Zhang, X. H., Jia, Y. G., Han, B., Yang, C. S., Geng, W. and Pang, Y. M. (2017) Late Cenozoic evolution of the East China continental margin: Insights from seismic, gravity, and magnetic analyses. *Tectonophysics*, **698**, 1–15.
- 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.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・針金由美子・齋藤直輝・岩谷北斗・松井浩紀・石塚 治・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・池内絵里・井口亮・鈴木 淳・清家弘治 (2024) トカラ列島西方海域及び屋久島南方海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **75**, 223–248.
- 竹内 誠 (1994) 20万分の1地質図幅「奄美大島」. 産総研地質調査総合センター.
- 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 : 2024年1月19日 ; 受理 : 2024年9月26日)

GB22-1 D07

1/2



D07 all



D07-R01



D07-R02



D07-R03



D07-R04



D07-R05



D07-R06



D07-R07

図版1 GB22-1航海及びGB22-2航海で採取した岩石試料の一覧。

Plate A1 List of rock samples obtained by dredge of GB22-1 and GB22-2 cruises.

GB22-1 D07

2/2



D07-R08



D07-R09



D07-R10



D07-R11



D07-R12



D07-R13



D07-R14

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-1 D08

1/2



D08 all



D08-R01



D08-R02



D08-R03



D08-R04



D08-R05



D08-R06



D08-R07

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-1 D08

2/2



D08-R08



D08-R09



D08-R10



D08-R11



D08-R12



D08-R13



D08-R14

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D09

1/5



D09 all1



D09 all2



D09-R01



D09-R01 slab



D09-R02



D09-R02 slab



D09-R03



D09-R03 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D09

2/5



D09-R04



D09-R04 slab



D09-R05



D09-R05 slab



D09-R06



D09-R06 slab



D09-R07



D09-R07 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D09

3/5



D09-R08



D09-R08 slab



D09-R09



D09-R09 slab



D09-R10



D09-R10 slab



D09-R11



D09-R11 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D09

4/5



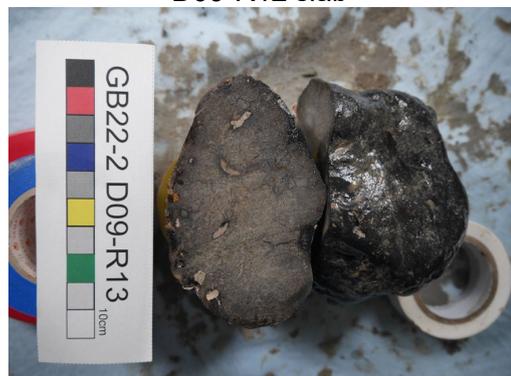
D09-R12



D09-R12 slab



D09-R13



D09-R13 slab



D09-R14



D09-R14 slab



D09-R15



D09-R15 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D09

5/5



D09-R16



D09-R16 slab



D09-R17



D09-R17 slab



D09-R18



D09-R18 slab



D09 others



D09 others mago

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D10

1/4



D10 all1



D10 all2



D10-R01



D10-R01 slab



D10-R02



D10-R02 slab



D10-R03



D10-R03 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D10

2/4



D10-R04



D10-R04 slab



D10-R05



D10-R05 slab



D10-R06



D10-R06 slab



D10-R07



D10-R07 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D10

3/4



D10-R08



D10-R08 slab



D10-R09



D10-R09 slab



D10-R10



D10-R10 slab



D10-R11



D10-R11 slab

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

GB22-2-D10

4/4



D10-R12



D10-R12 slab



D10-R13



D10-R13 slab



D10-R14



D10-R14 slab

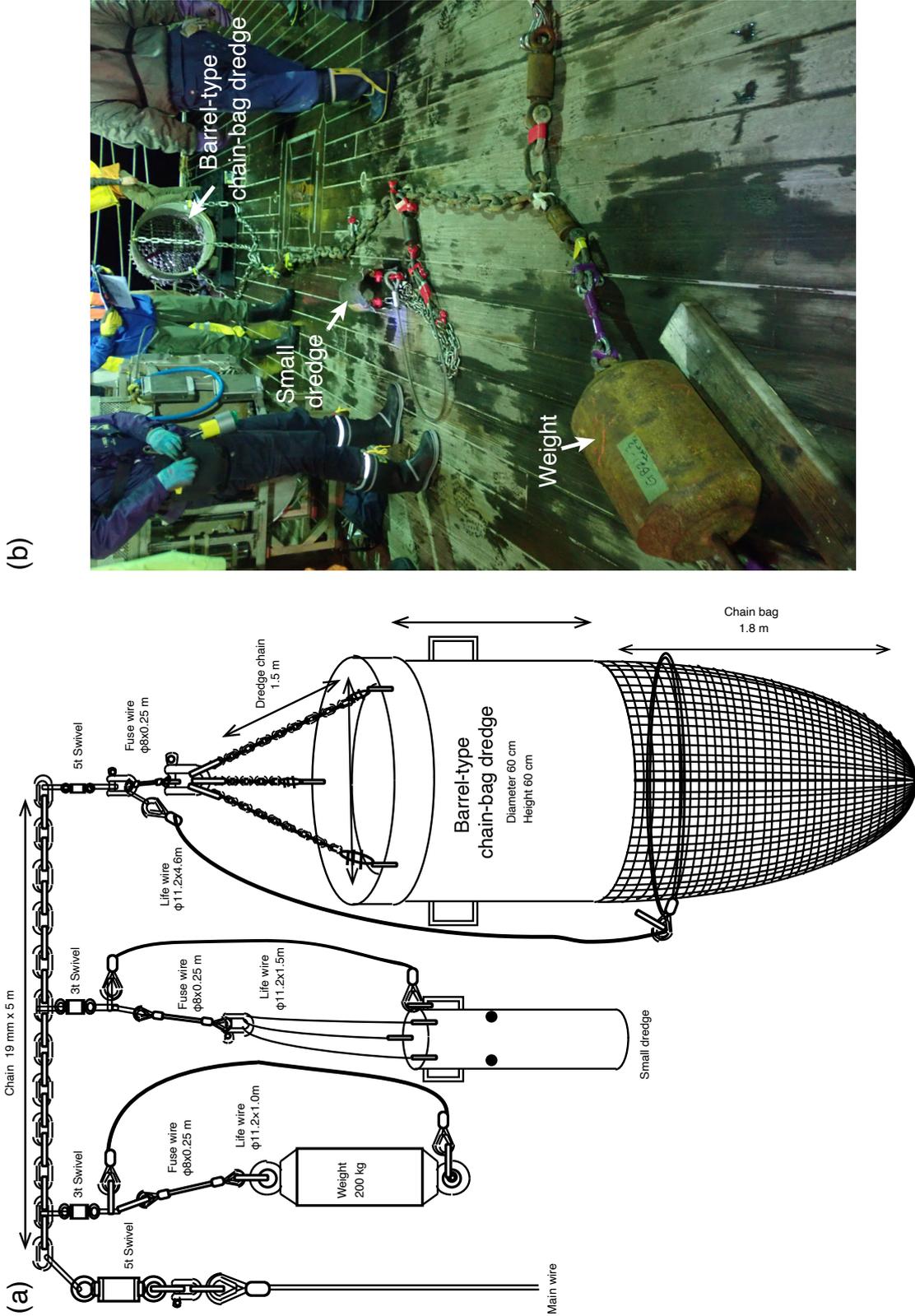


D10 others

図版1 続き.

Plate A1 Continued.

G SJ Dredge sampler system



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

付表A2 船上での肉眼観察によって記載した岩石試料のデータリスト。
Table A2 Data list of rock samples described onboard.

July 15 2022													
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight(kg)	colour	Mn coating	remarks				
D07R01	tuff breccia	platy	19	16	9	1.5	white	film	matrix supported, epiclastic				
D07R02	tuff breccia	subrounded	16	12	10	0.9	white	film	matrix supported, epiclastic				
D07R03	tuff breccia	platy	32	18	10	3.5	brownish white	0	matrix supported, poorly-vesiculate-4d porphyritic andesitic clast dominant				
D07R04	tuff breccia	platy	21	15	8	1	brownish white	film	matrix supported, poorly-vesiculate-4d porphyritic andesitic clast dominant				
D07R05	tuffaceous sandstone	subangular	20	12	7	1.8	grayish white	film	minor amount of volcanic clast				
D07R06	tuff breccia	subrounded	16	7	6	0.4	grayish white	0	matrix supported, epiclastic				
D07R07	pumice tuff	subrounded	16	12	5	0.3	dark gray	0	matrix supported, andesite-dacite clasts present				
D07R08	tuffaceous sandstone	rounded	13	9	6	0.2	grayish white	film					
D07R09	pumice tuff	subrounded	19	14	8	1.2	gray	0					
D07R10	pumice tuff	platy	22	13	6	1	gray	0					
D07R11	pumice tuff	angular	10	8	6	0.3	grayish white	film					
D07R12	pumice tuff with calcareous matrix	subangular	16	8	7	0.4	grayish white	film					
D07R13	limestone	angular	16	8	5	0.5	gray	film	hard and compact				
D07R14	calcareous sandstone	platy	16	10	4	0.3	gray						
July 23 2022													
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight(kg)	colour	Mn coating	remarks				
D08R01	sandstone (meta-?)	angular	30	21	15	14	dark gray						
D08R02	sandstone (meta-?)	angular	26	24	13	12	dark gray		fine grained				
D08R03	metastone	angular	29	19	10	6	pale gray		with angular mudstone xenolith				
D08R04	sandstone	subangular	20	14	10	6		film	cross lamination, vein, pale brown muddy vein				
D08R05	sandstone (meta-?)	angular	24	13	10	4	dark gray		white vein rich, looks like R01/R02				
D08R06	metastone	angular	15	13	7	1	pale gray	film	minor vein, mm-order mudstone(?) xenolith				
D08R07	metastone	angular	19	15	8	1.5	pale gray	film	looks like R06				
D08R08	matrix-supported conglomerate	subangular	23	10.5	10	2.5	dark gray	film	1-2 cm sub-angular to sub-rounded pebble (sandstone and mudstone?)				
D08R09	metastone	subangular	16	11	9.5	1.5		film	Arkose sand sebene?, mudstone patch				
D08R10	sandstone (meta-?)		17	9.5	9	1.5		film	looks like R01, coarse-grained, white vein, mudstone patch				
D08R11	carbonate rock	angular	13	13	7.5	1.5	palebrown	film	fossiliferous (mollusc, coral), angular xenolith rich (sandstone, mudstone), very fine matrix, consolidated, not porous				
D08R12	sands	subangular	7	5.5	3.5	0.5	gray	film	looks like R02, fine-grained, minor vein				
D08R13	sandstone		6	4	2.5	0.3	gray	film	fine-vert fine, cross lamina (muddy-sandy sil)				
D08R14	muddy sandstone		4.5	3.5	2	0.3			meta-?, cross lamination				
November 21 2022													
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight(kg)	colour	Mn coating (mm)	remarks				
D09R01	sandstone	subrounded	44	23	17	16.5	gray and reddish brown	film	burrows				
D09R02	sandstone	subrounded	43	22	13	7	gray	film	burrows, medium sand to coarse sand in size				
D09R03	sandstone	subrounded	30	19	13	4	gray	film	burrows, medium sand to coarse sand in size				
D09R04	sandstone	subrounded	28	20	18	7	gray	film	burrows				
D09R05	sandstone	subrounded	38	16	11	4	yellowish gray with gray	film	burrows, fine sand to medium sand in size, porous				
D09R06	sandstone	subrounded	31	17	9	4	gray and yellowish gray	film	burrows, fine sand to medium sand in size, massive				
D09R07	sandstone	platy	25	21	9	3	yellowish gray and gray	film	burrows, medium sand to coarse sand in size, porous				

付表A2 続き.

Table A2 Continued.

GB22-2-D09 November 21 2022										
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight(kg)	colour	Mn coating (mm)	remarks	
D09-R08	sandstone	platy	26	18	6	2.5	yellowish gray	patch	burrows	
D09-R09	sandstone	subangular	26	19	8	3.5	gray	10	rich organism on surface	
D09-R10	sandstone	subrounded	19	14	12	3	gray and yellowish brown	film	burrows, oxidized grains (orange-color)	
D09-R11	layered mudstone	platy	26	14	5	1.5	gray and pale gray	film	burrows, interbedding of light colored (silty?) layer and dark colored (clay?) layer with sandy burrow (light colored)	
D09-R12	sandstone	subangular	17	11	6	0.8	gray and yellowish gray	film	burrows, porous, poorly sorted	
D09-R13	sandstone	subrounded	12	10	7	1	gray and dark brown	5	burrows	
D09-R14	sandstone	subangular	11	7	6	0.5	gray and dark brown	5		
D09-R15	layered mudstone	subrounded	11	7	5	<0.5	gray	film	burrows, interbedding of light colored (silty?) layer and dark colored (clay?) layer with sandy burrow (light colored)	
D09-R16	sandstone	subangular	10	7	6	0.5	dark gray	3	sandstone impregnated with Mn	
D09-R17	plutonic rock	rounded	9	6	3	<0.5	gray	film	Biomaterial (coral?) attached on surface of R17. Dione?	
D09-R18	sandstone	rounded	8	5	3.5	<0.5	dark gray	2	sandstone impregnated with Mn	
D09_others						38				
GB22-2-D10 November 22 2022										
sample No.	rock type	shape	size X (cm)	size Y (cm)	size Z (cm)	weight(kg)	colour	Mn coating (mm)	remarks	
D10-R01	mudstone	rounded	23	14	11	3	gray and reddish brown			
D10-R02	mudstone	rounded	21	12	11	2	pale brown		burrows	
D10-R03	mudstone	rounded	21	11	11	2	gray			
D10-R04	mudstone	rounded	16	10	7	1	gray and pale brown			
D10-R05	mudstone	rounded	11	7	6	1	pale brown		burrows	
D10-R06	mudstone	subrounded	10.5	6.5	3.5	0.5	reddish brown and gray			
D10-R07	purlice	rounded	8.5	7	5.5	0.5	pale brown and gray			
D10-R08	sandstone	subrounded	7.5	6.5	4.5	0.5	reddish brown		including fragments?	
D10-R09	sandstone	subrounded	7	5	4.5	<0.5	ivory	film	burrows	
D10-R10	mudstone	subrounded	6.5	4.5	4.5	<0.5	reddish brown		including fragments?	
D10-R11	purlice	subrounded	5.5	4.5	4	<0.5	reddish brown			
D10-R12	purlice	subrounded	5	4.5	3	<0.5	reddish brown			
D10-R13	sandstone	subrounded	5.5	3.5	2.5	<0.5	ivory		including lithic fragments	
D10-R14	sandstone	subangular	5	4	2	<0.5	ivory		burrows	
D10-others						20				