

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

石野 沙季^{1,*}・針金 由美子¹・三澤 文慶¹・井上 卓彦¹

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

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

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

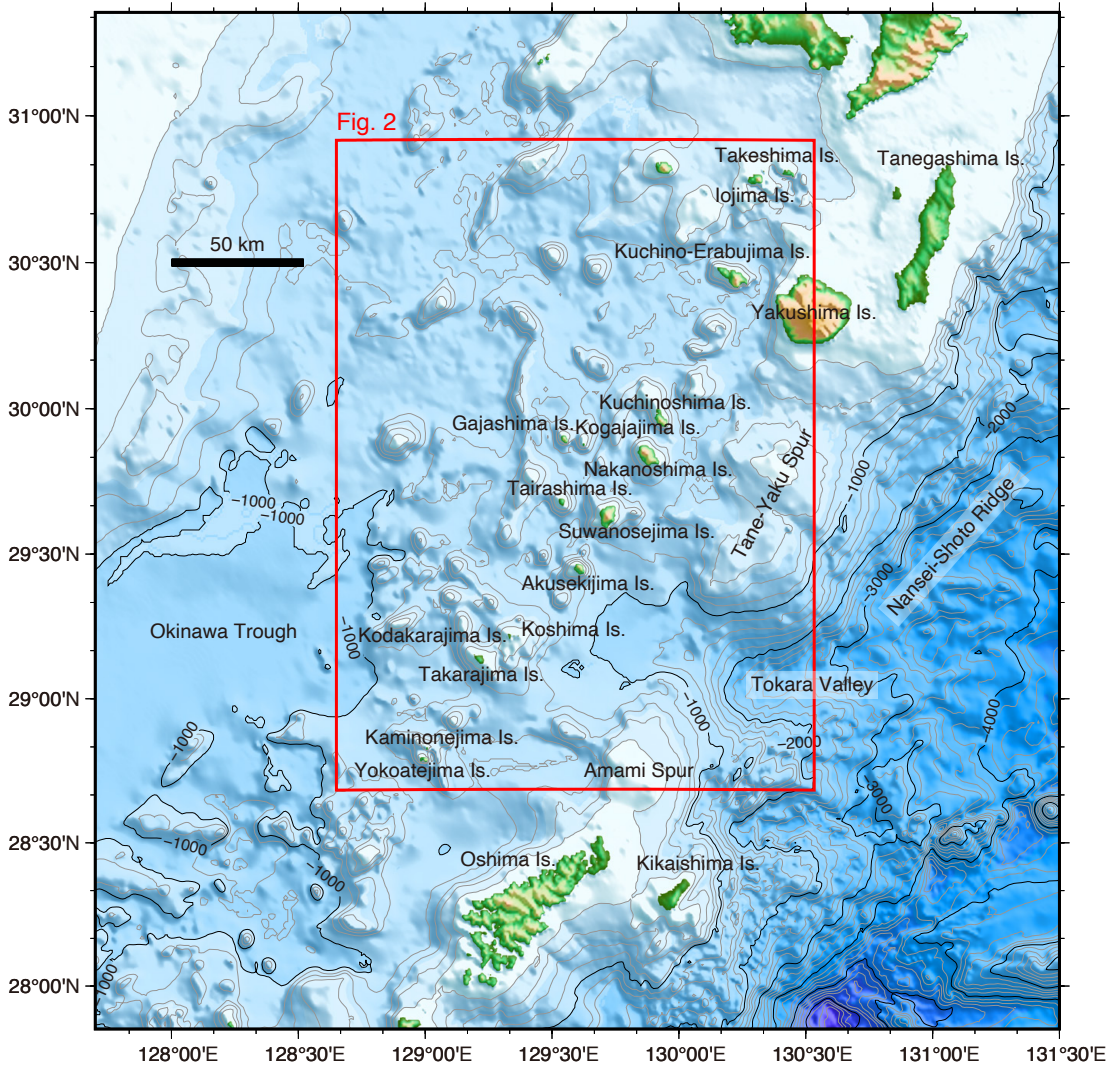
要 旨

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

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

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

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



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

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

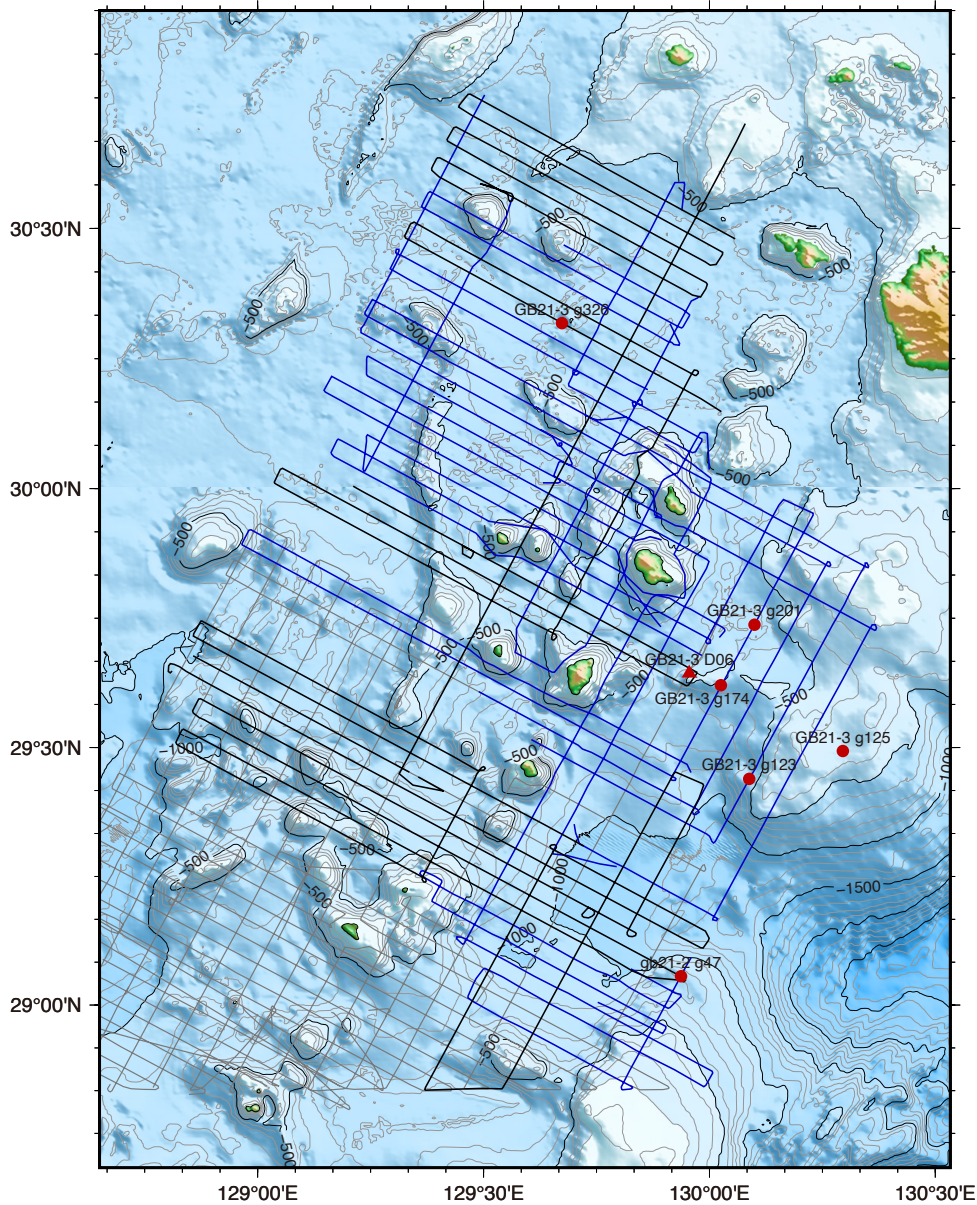
1. はじめに

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

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

2. 地形概略

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

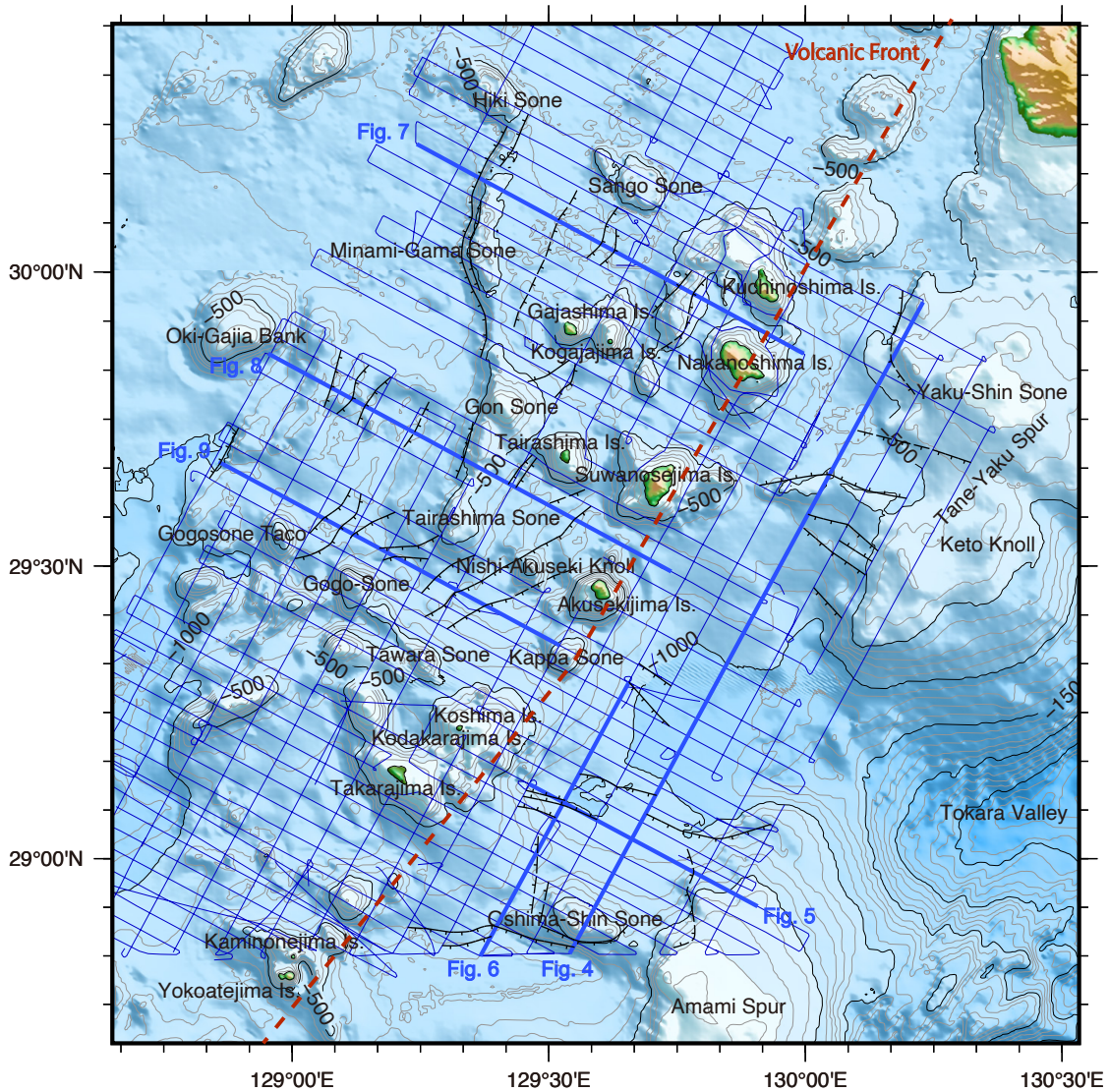


第2図 本調査で観測した音波探査測線図。地形データは岸本(2000)を使用した。青線：GB21-2航海及びGB21-3航海の測線。黒線：GS21航海の測線。灰色線：GB21-1航海測線(石野ほか, 2022)。赤丸：グラフ採泥による岩石採取地点。赤三角：ドレッジ地点。

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

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

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



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

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

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

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

3. 地質概略

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

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

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

4. 調査方法

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

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

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

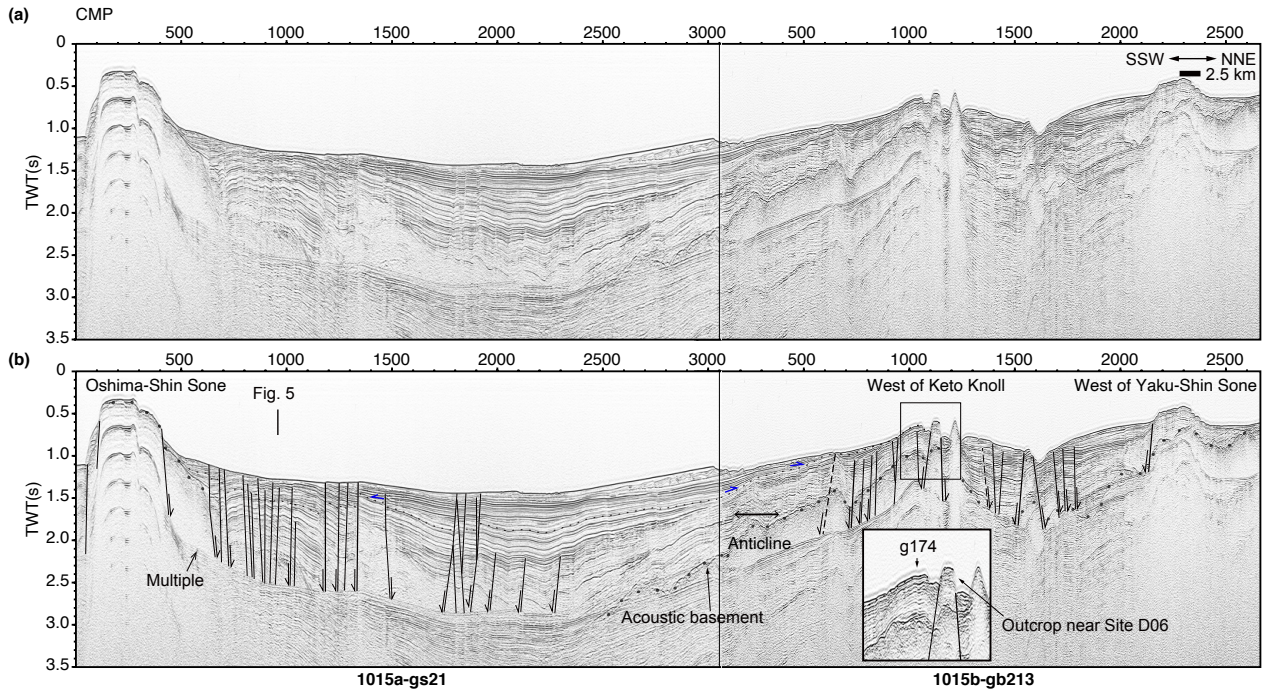
ドレッジは堆積岩が露出している斜面を反射断面で確認し、周囲の海底地形を考慮して実施地点を決定した(例えばGB21-3 D06地点について第2図を参照). 本調査では内径約60 cmの円筒型チェーンバッグ式ドレッジおよび小型円筒ドレッジを用いた(付図1). 付図2に岩石試料採取地点の地形、付表1にオペレーションに関するデータリストを掲げた.

5. 反射法音波探査およびドレッジ調査結果

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

5.1 トカラ列島東方沖

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



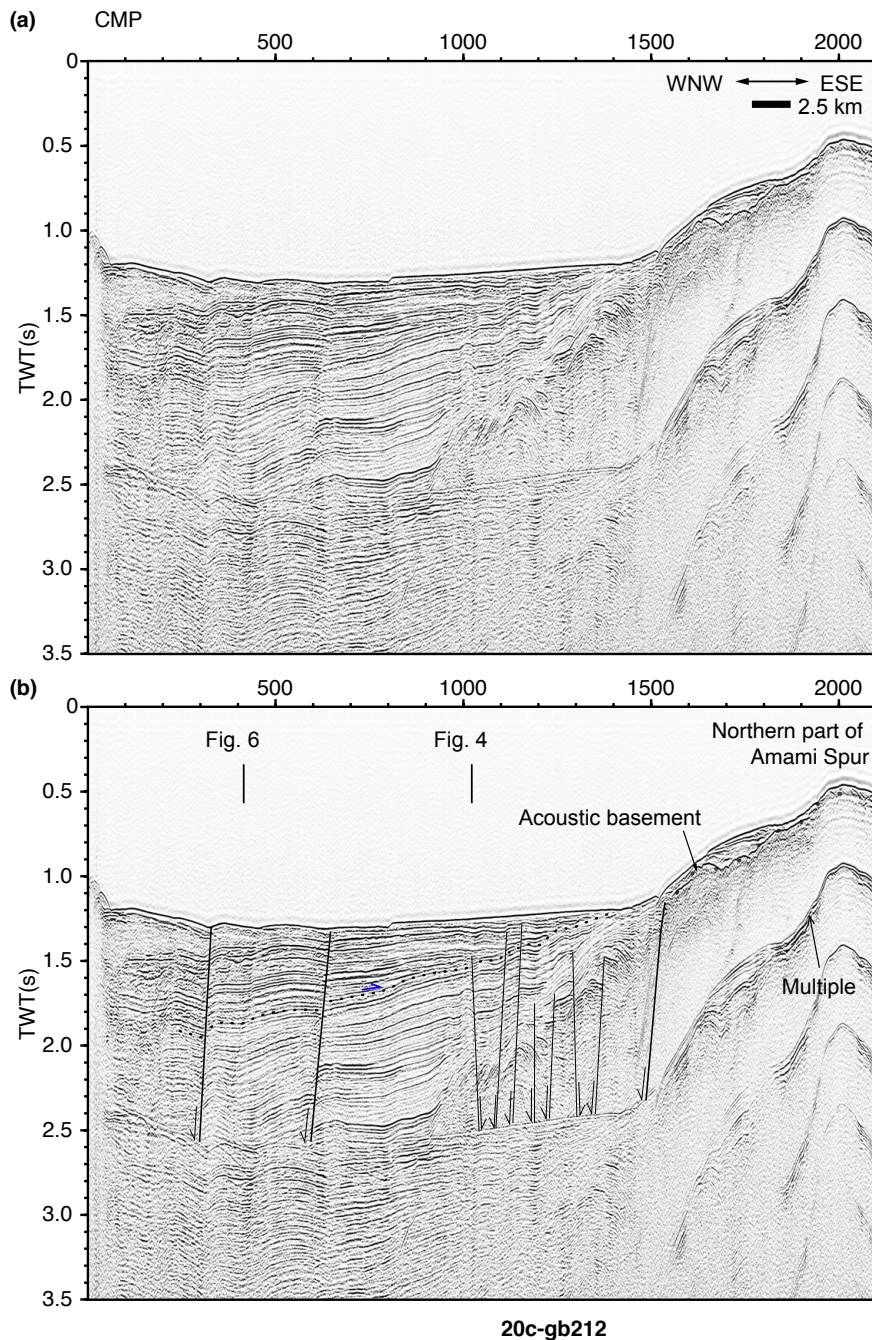
第4図 (a)トカラ列島東方沖の海盆における重合処理断面図(測線1015a-gs21及び1015b-gb213)及び(b)解釈線。CMP: common midpoint. TWT: two-way travel time. 実線:断層(太線は第3図にマッピングした断層)。破線:推定断層。青矢印:オンラップ。
 Fig. 4 (a) Stacked seismic profiles across the basin east of Tokara Islands (Lines 1015a-gs21 and 1015b-gb213) and (b) their interpretations. CMP: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

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

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

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

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



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

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

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

第1表 船上での肉眼観察によって記載した岩石試料のデータリスト。

Table 1 Data list of rock samples described onboard.

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

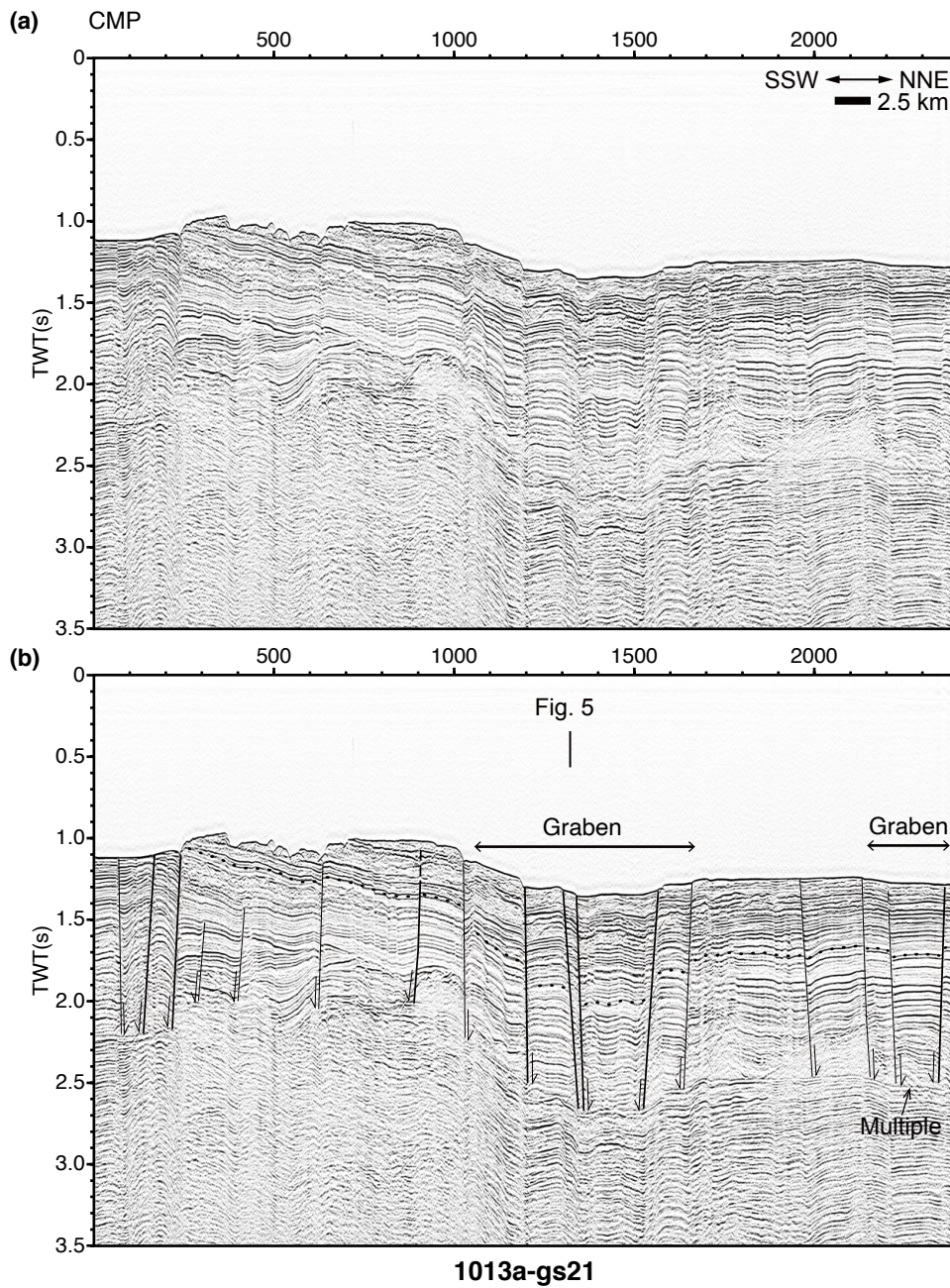
認められる(第6図Line 1013a-gs21 CMP 1000-1650及び1900-2400付近)。この正断層の多くは海底地形図上にリニアメントとして認められるため(第3図)、海底まで変位が達していると考えられる。

5.2 トカラ列島西方沖

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

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

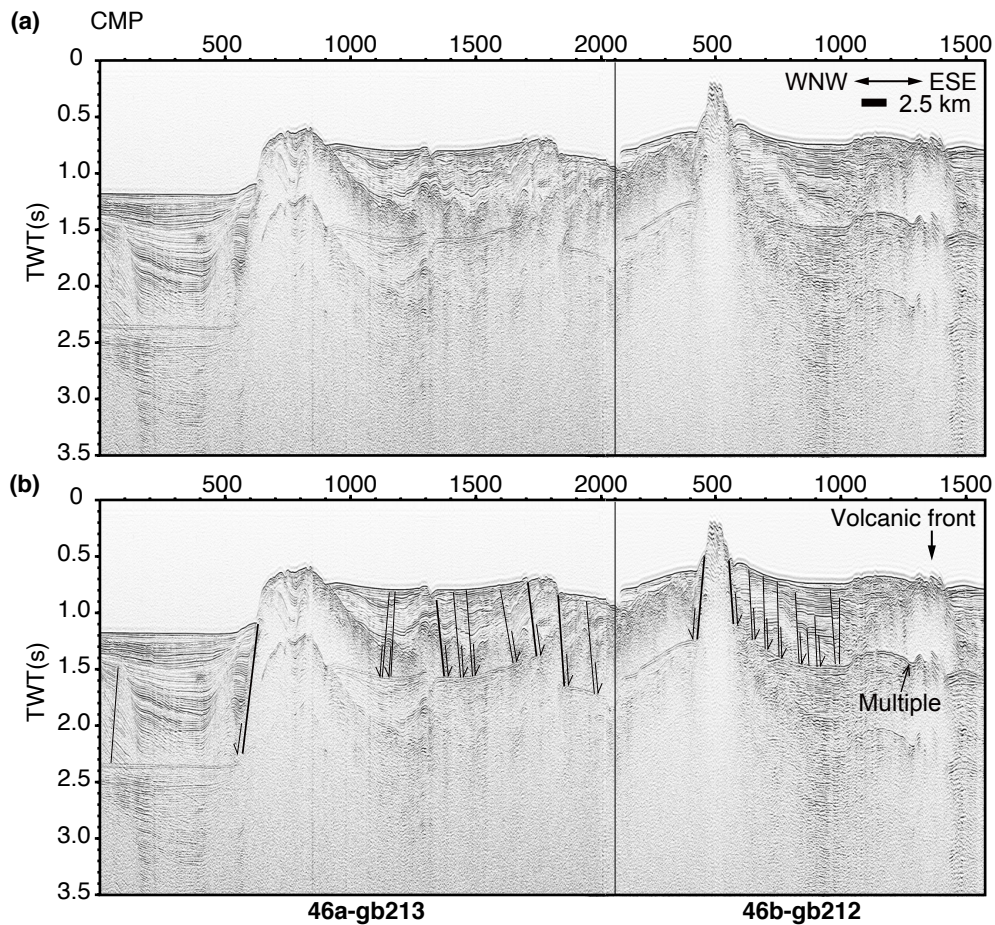
諏訪之瀬島西方沖及び悪石島西方沖では、口之島西方沖と同様に、連続的な内部反射を特徴とする堆積層が広く分布し、概ね東落ちの北北東-南南西走向の正断層によって変位が生じているが、一部で断層による変形の特徴が異なっている。火山フロントと北北東-南南西方向



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

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

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



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

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

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

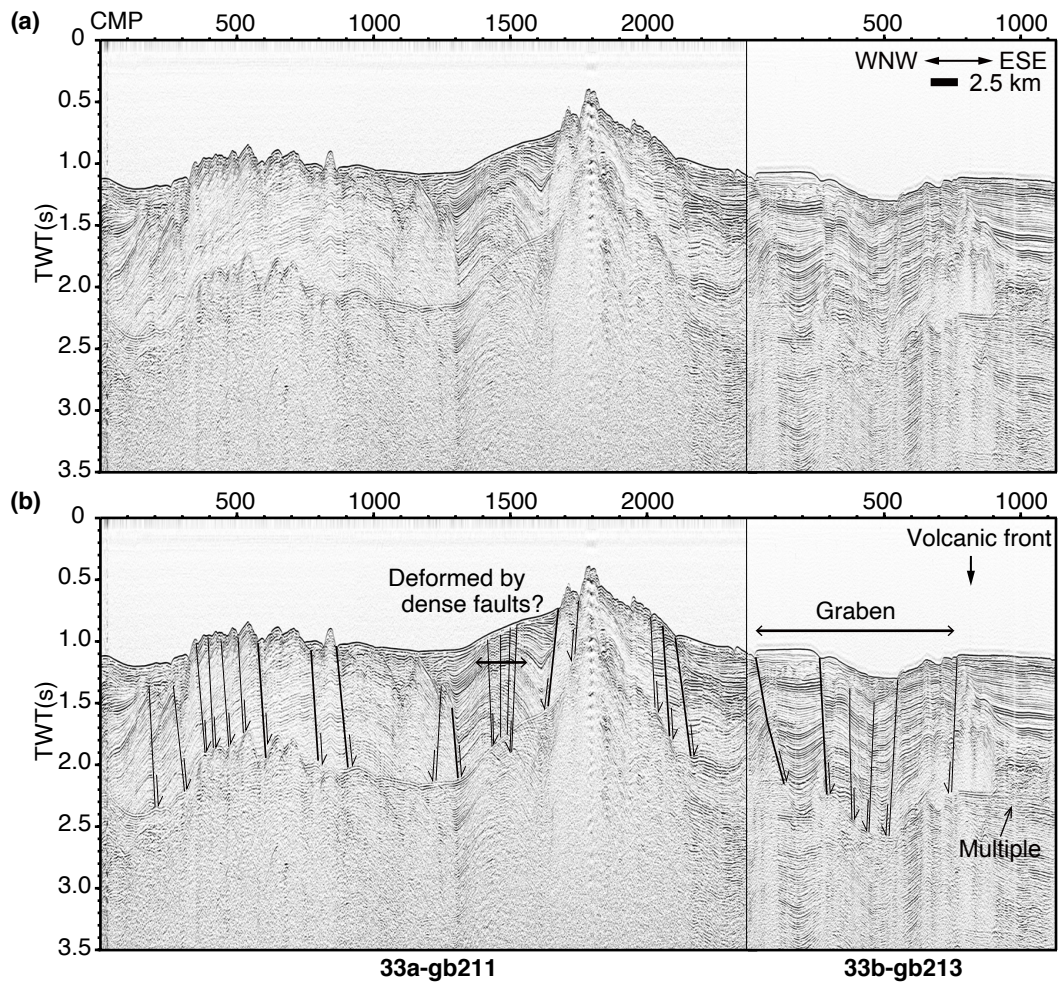
6. 地質構造の議論及びまとめ

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

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

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

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



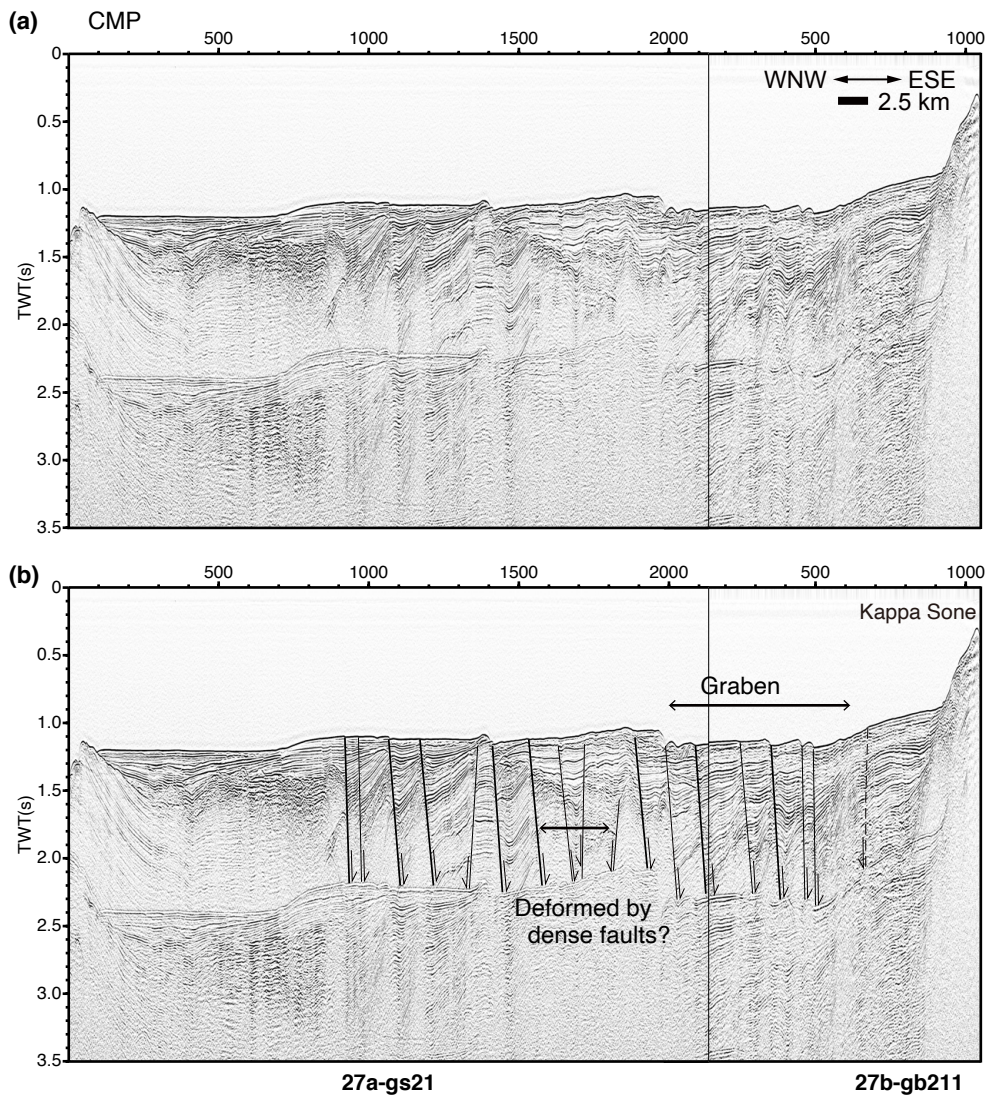
第8図 (a) 諏訪之瀬島西方沖の重合処理断面(測線33a-gb211及び33b-gb213)及び(b)解釈線。
実線：断層(太線は第3図にマッピングした断層)。

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

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

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

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



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

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

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

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

るものと考えている。

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

文 献

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

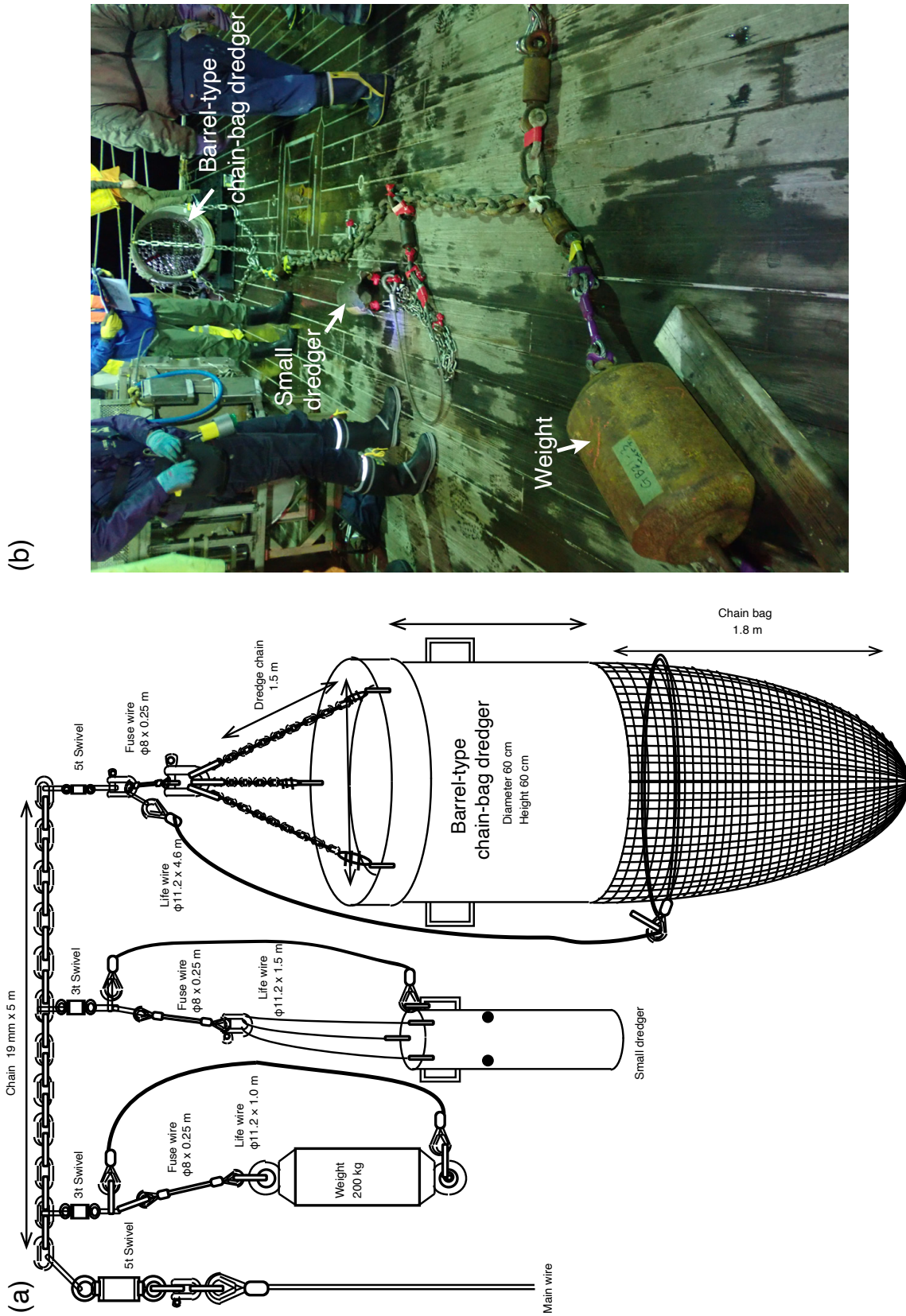
竹内 誠(1994) 20万分の1地質図幅「奄美大島」. 地質調査所.

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

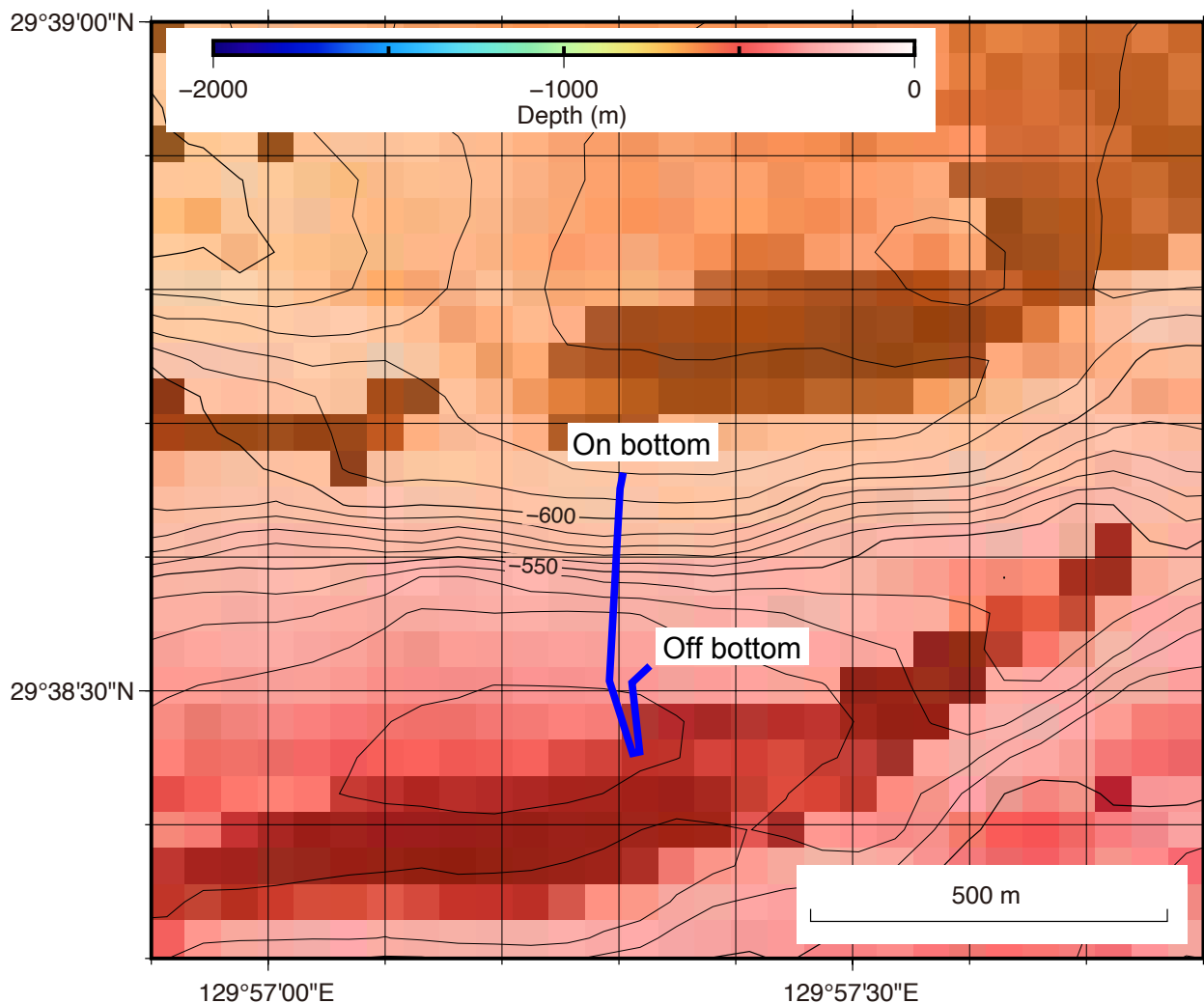
横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.

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

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



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



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

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

付表1 ドレッジオペレーションに関するデータリスト.

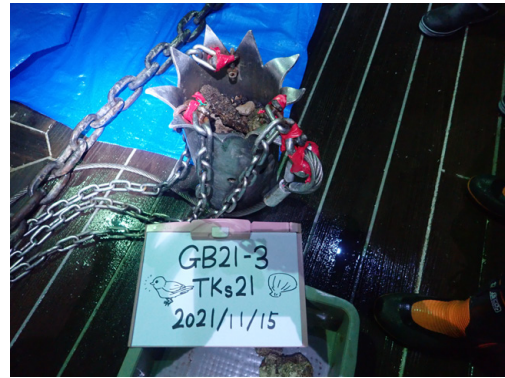
Table A1 Data list of dredge operations.

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

GB21-3 D06



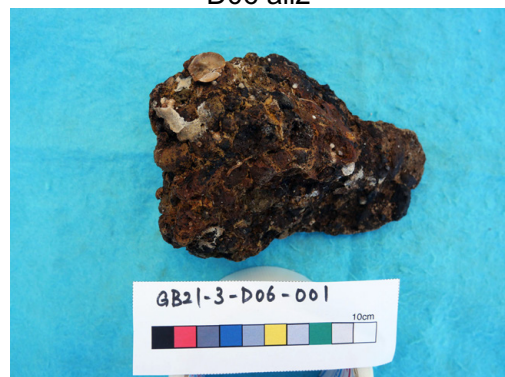
D06 all



D06 all2



D06 all3



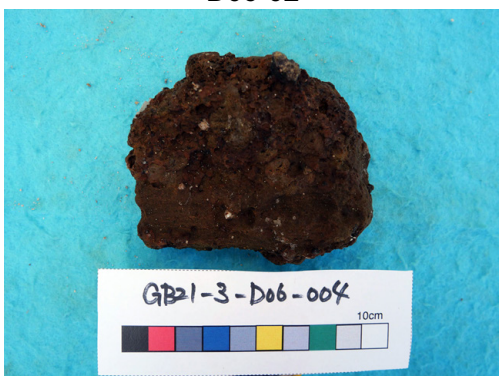
D06-01



D06-02



D06-03



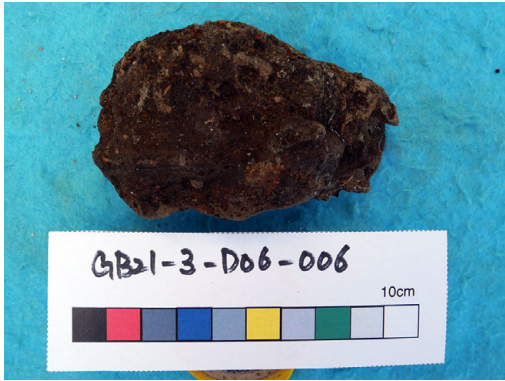
D06-04



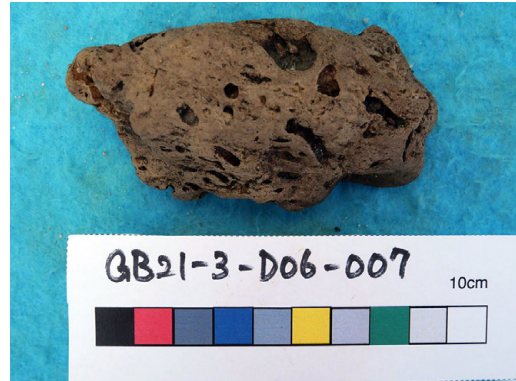
D06-05

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

GB21-3 D06



D06-06



D06-07



D06-08



D06-09



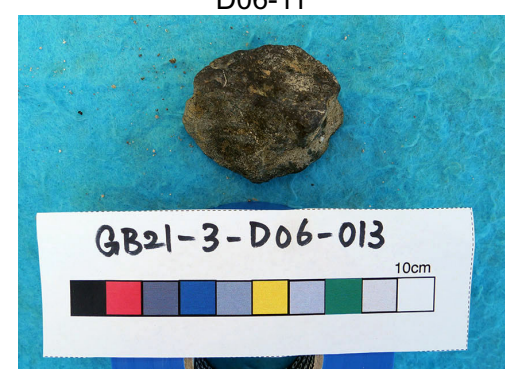
D06-10



D06-11



D06-12



D06-13

図版1 続き.
Plate 1 Continued.

GB21-3 D06



D06-14



D06-15



D06-16



D06-17



D06-18



D06-19



D06-20



D06 others

図版1 続き.
Plate 1 Continued.

GB21-3 D06



D06 bio

図版1 続き.
Plate 1 Continued.