

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層に同様の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層に同様の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

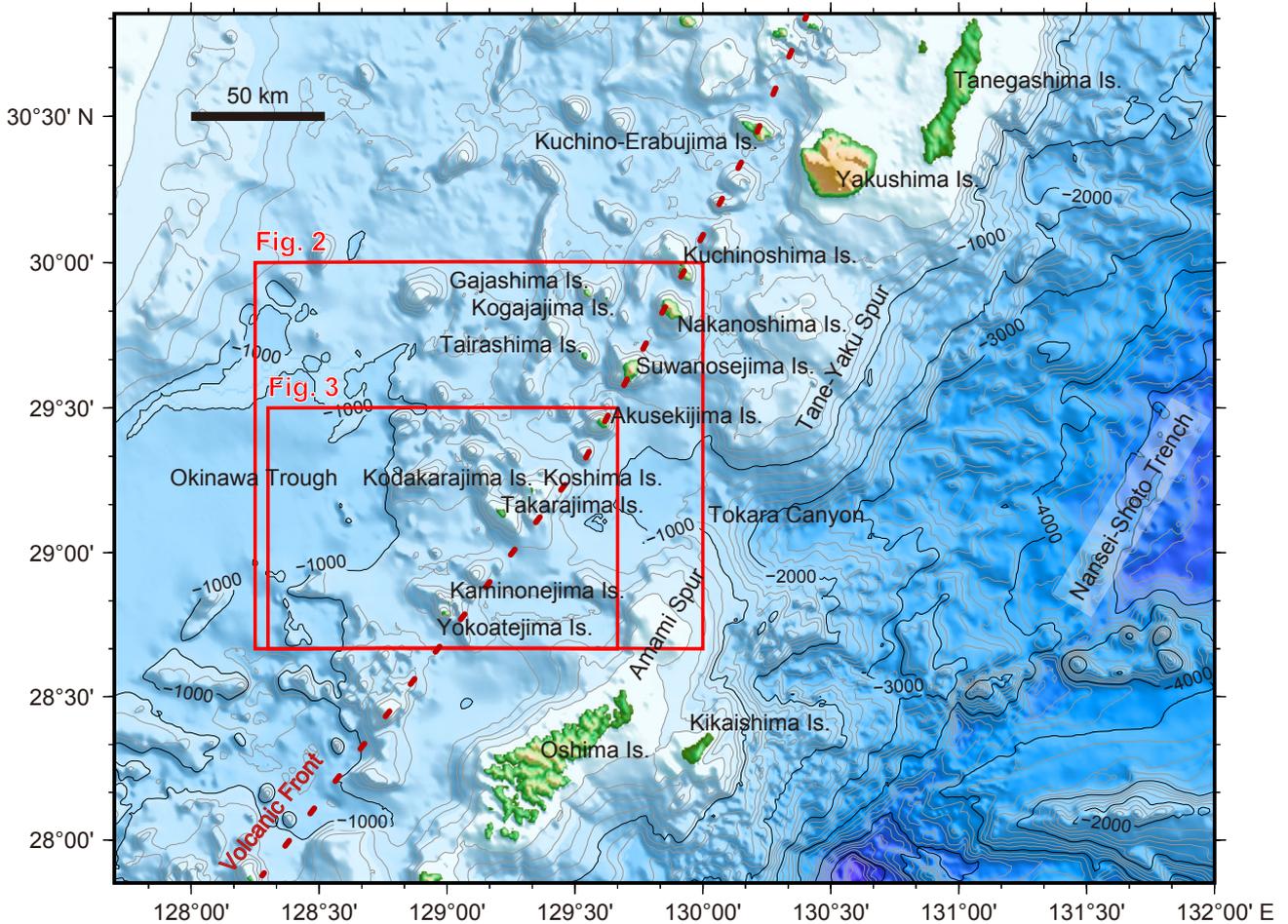
方向に伸展する。また、調査範囲の南西端には西横当海丘が北西側及び南側に急崖を伴って位置している。これらの高まりの周囲は水深700-1,000 mの比較的平坦な海底が広がり、海丘が複数点在する。この海丘はトカラ列島と並列する海丘群と比較すると規模は小さい。調査範囲西部は水深1,000 mの北部沖縄トラフ東縁が海丘の点在する平坦部と接する。宝島及び小宝島の周囲は水深500 m以上の複雑な地形を呈する高まりを形成し、急崖に囲まれている。宝島の東方は傾斜が緩やかで南東方向に張り出した高まりが広がり、さらに東方には大島新曾根が、南方には奄美舟状海盆が位置する。

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).

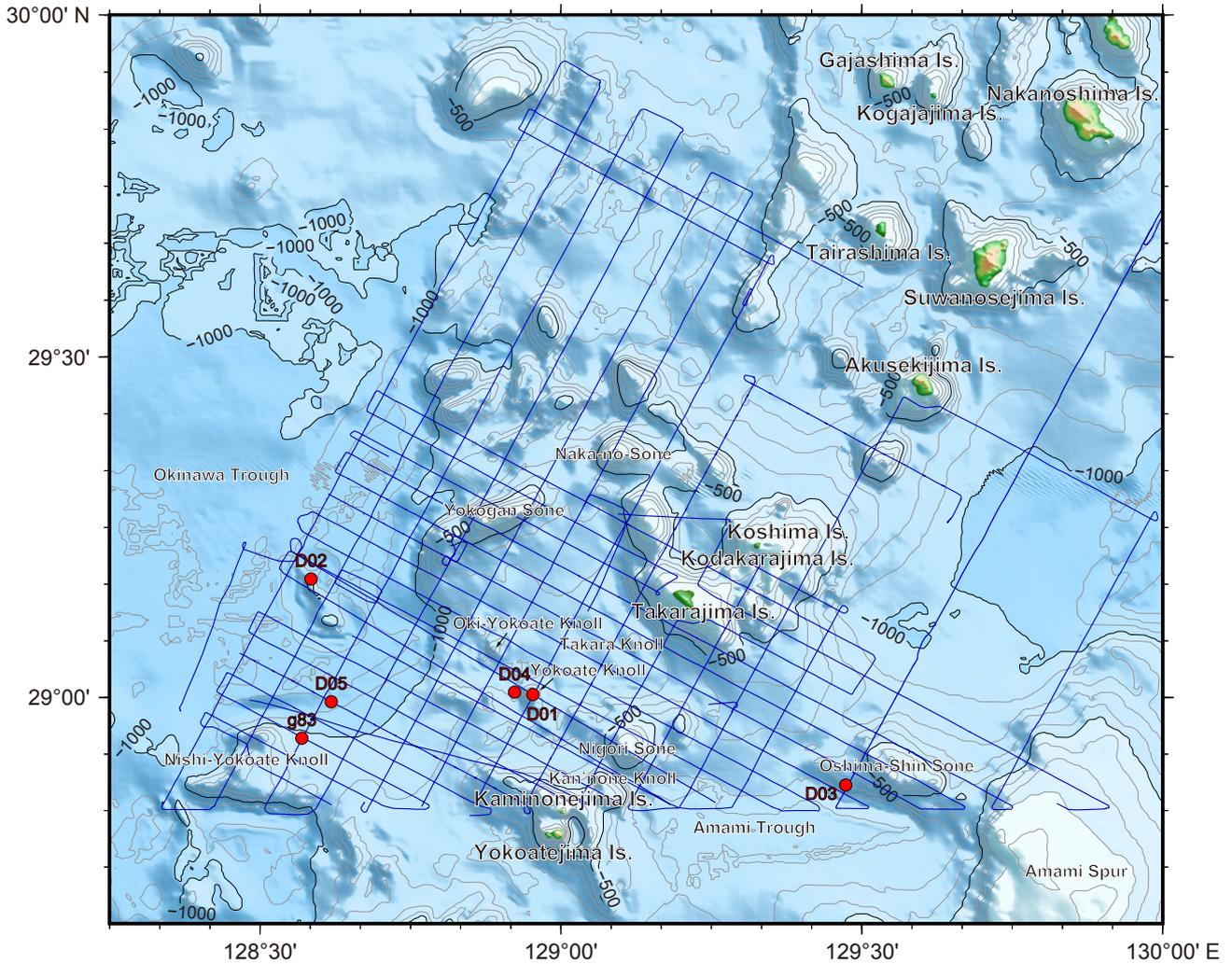
み認められ、琉球層群に覆われている(中野ほか, 2008)。また宝島の周囲には、海底のドレッジ試料を用いた年代分析から中期更新世以降に活動した火山の存在が示唆されている(横瀬ほか, 2010)。火山フロントの背弧側には、火山フロントと並行に分布する海丘群、及びトカラ海峡西方における北西-南東方向に並ぶ海丘群が認められ(横瀬ほか, 2010; Minami and Ohara, 2016; Minami *et al.*, 2021)、複雑な海底地形を呈する。

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



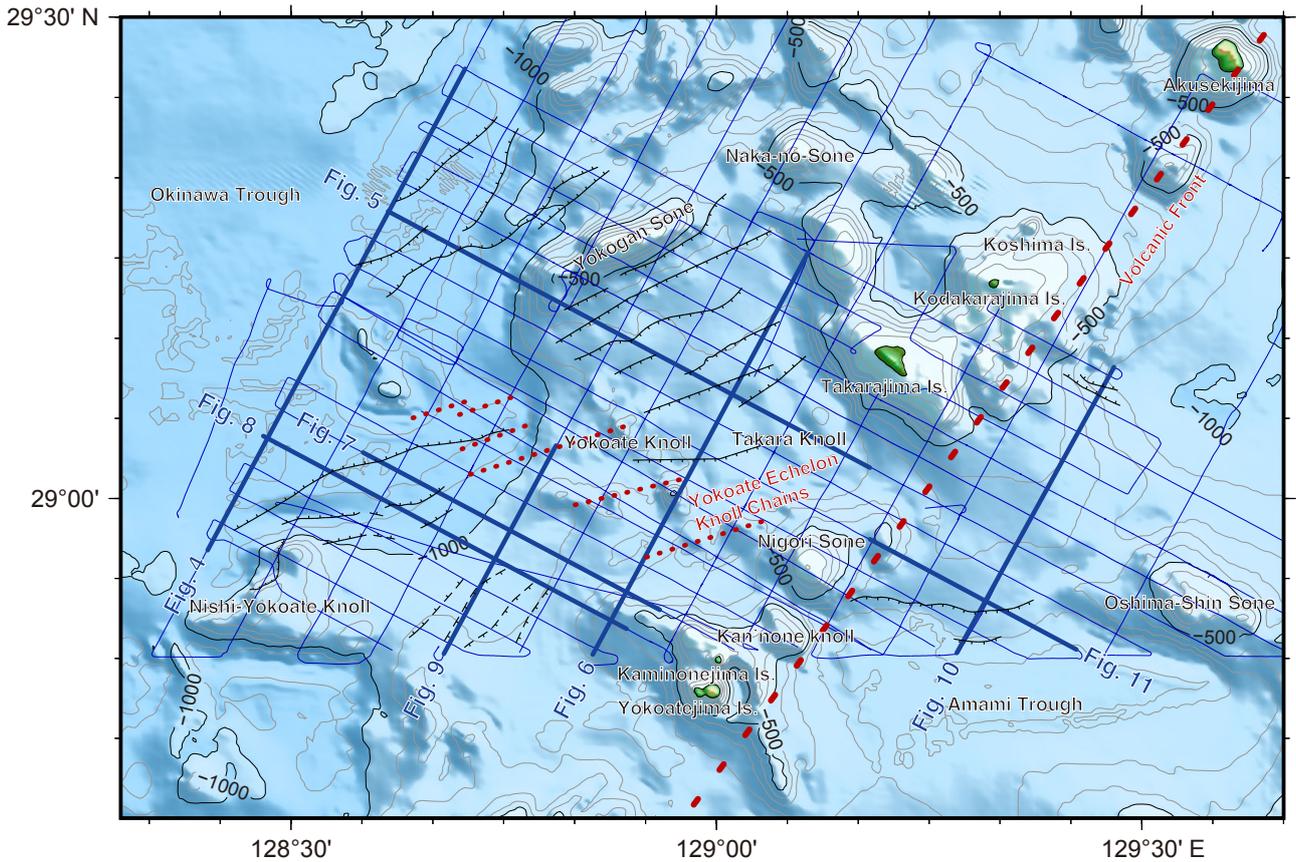
第2図 GB21-1航海の音波探査測線図。西北西-東南東方向および北北西-南南西方向の調査測線は2マイルおよび4マイルおきに設定した。D01-05はドレッジ地点を示す。地形データは岸本(2000)を使用した。

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.

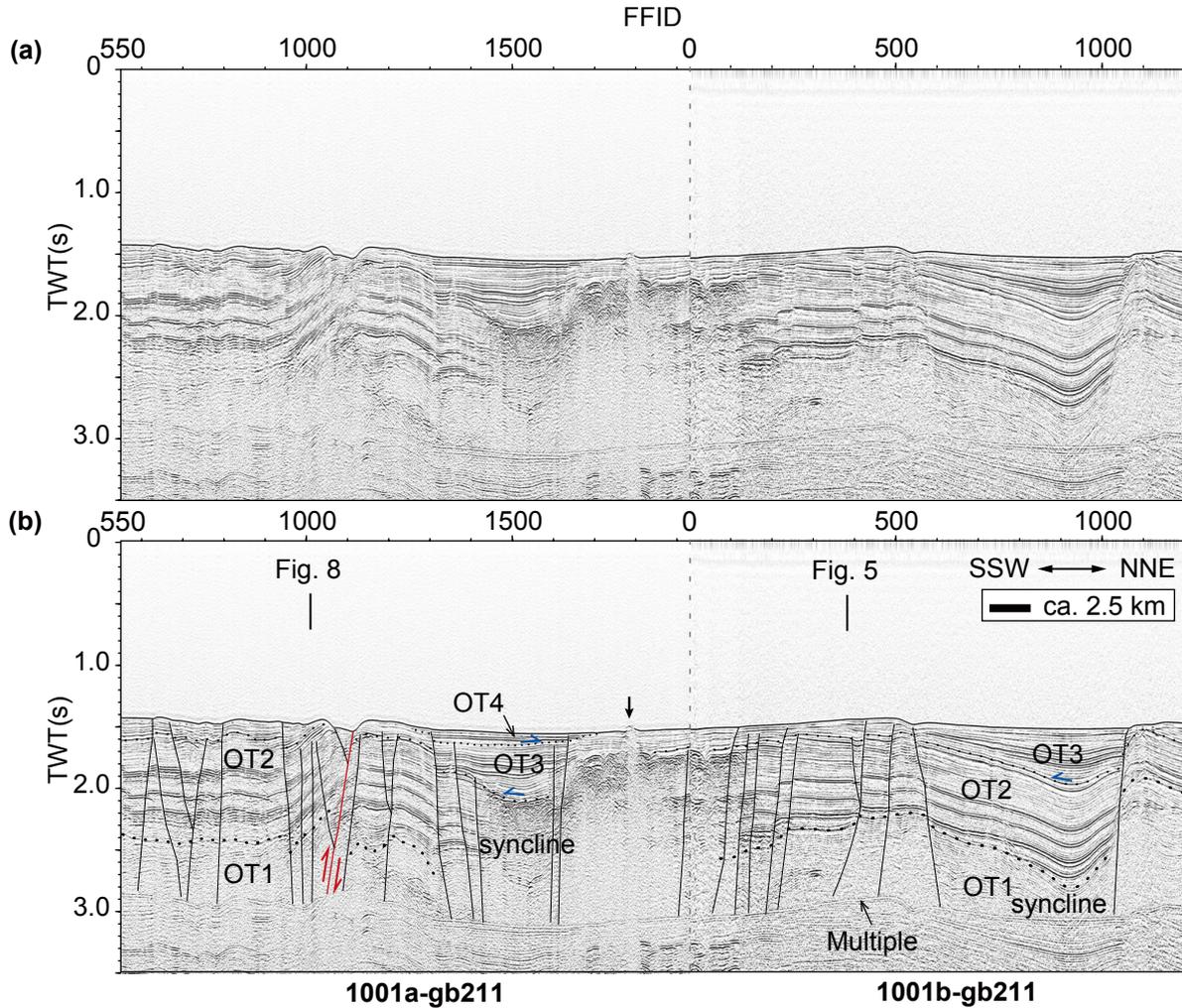
5. 反射法音波探査結果：海底下地質構造の解釈

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ね音波探査断面図(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.

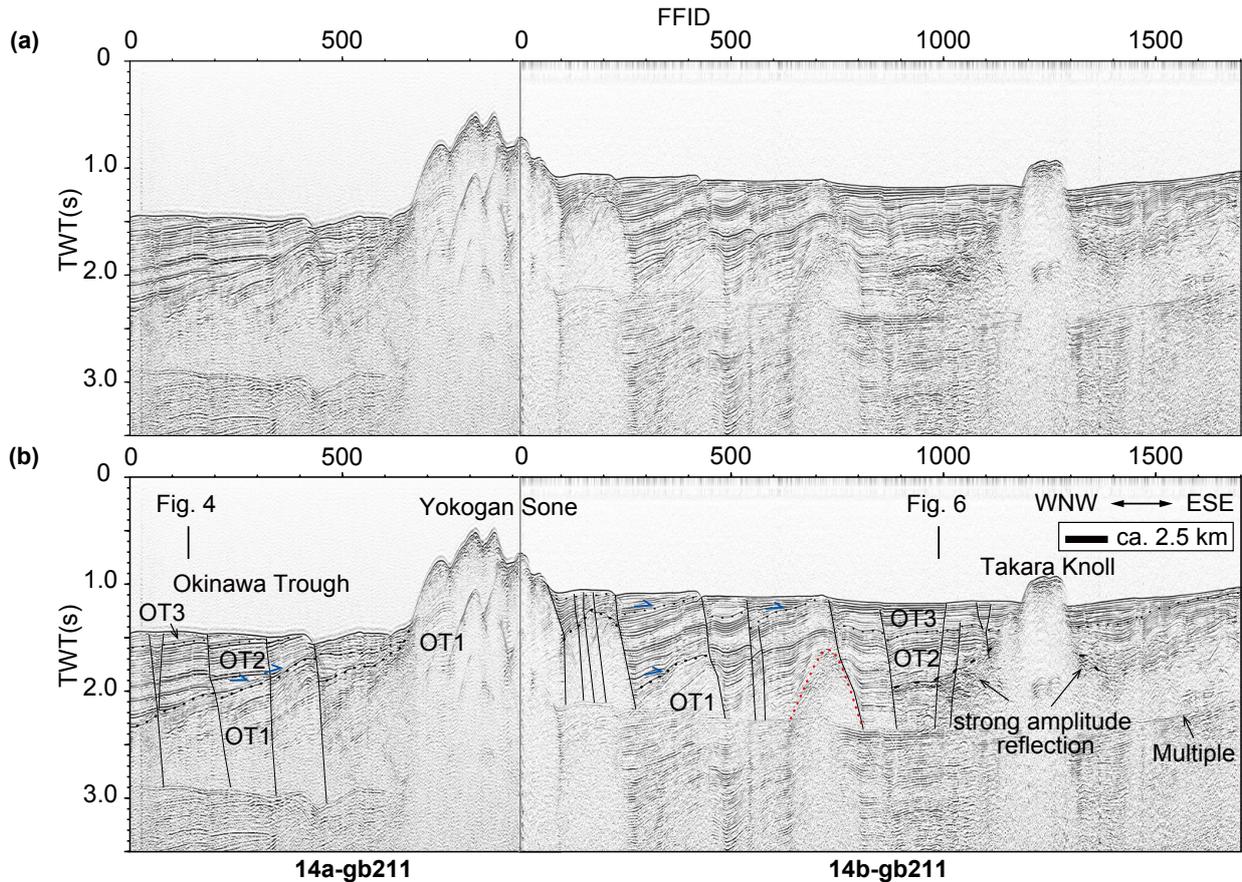
および断層分布の詳細な特徴について、沖縄トラフ東縁部、横ガン曾根周辺海域、西横当海丘東方海域に分けて以下に記載する。

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.

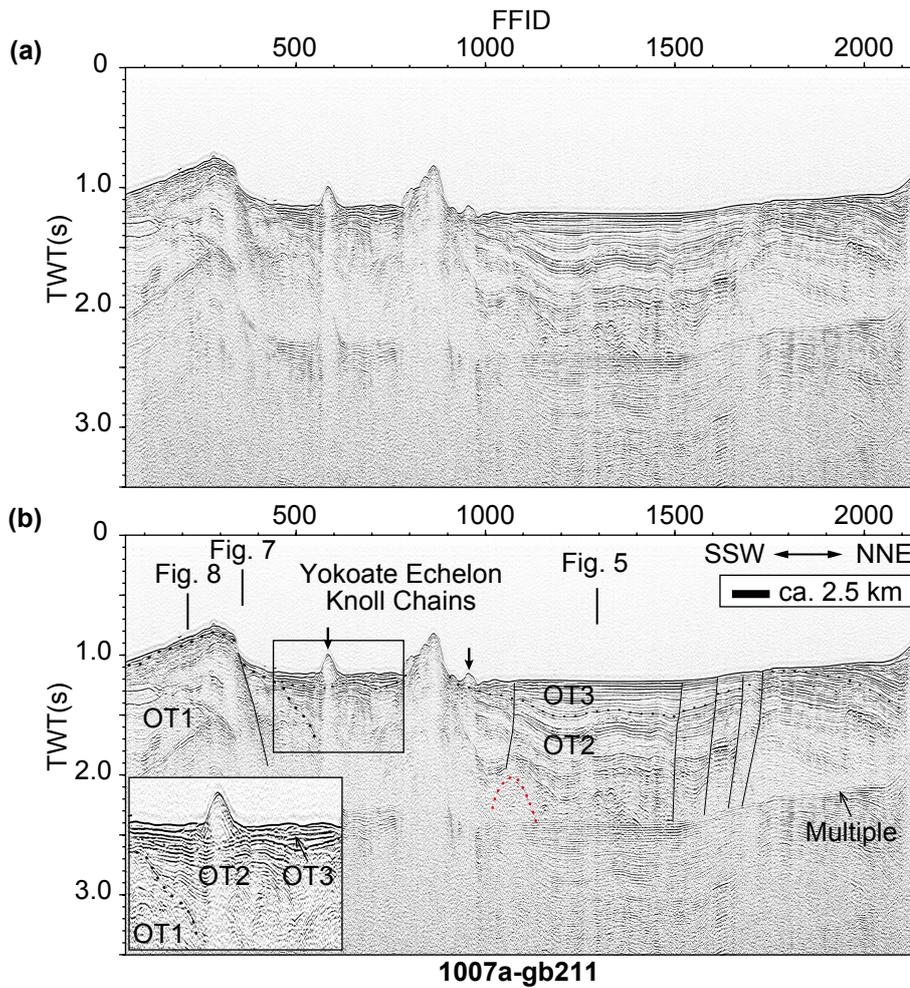
本海域は広域にわたって正断層が認められる (第4図). さらに, 第4図南部 (Line 1001b-gb211のFFID 500地点より南) では複数の正断層が密に発達しており, 主要な断層から分岐して断層が発達する形態が認められることから, 横ずれ断層系にみられるフラワー構造 (Woodcock and Fischer, 1986) を呈すると考えられる (第4図). 第4図南部 (Line 1001a-gb211のFFID 1100地点) で逆断層が認められ (第4図, 赤線), 断層が海底面に到達している. 本調査範囲の沖縄トラフ東縁部において海底地形の線状構造

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。

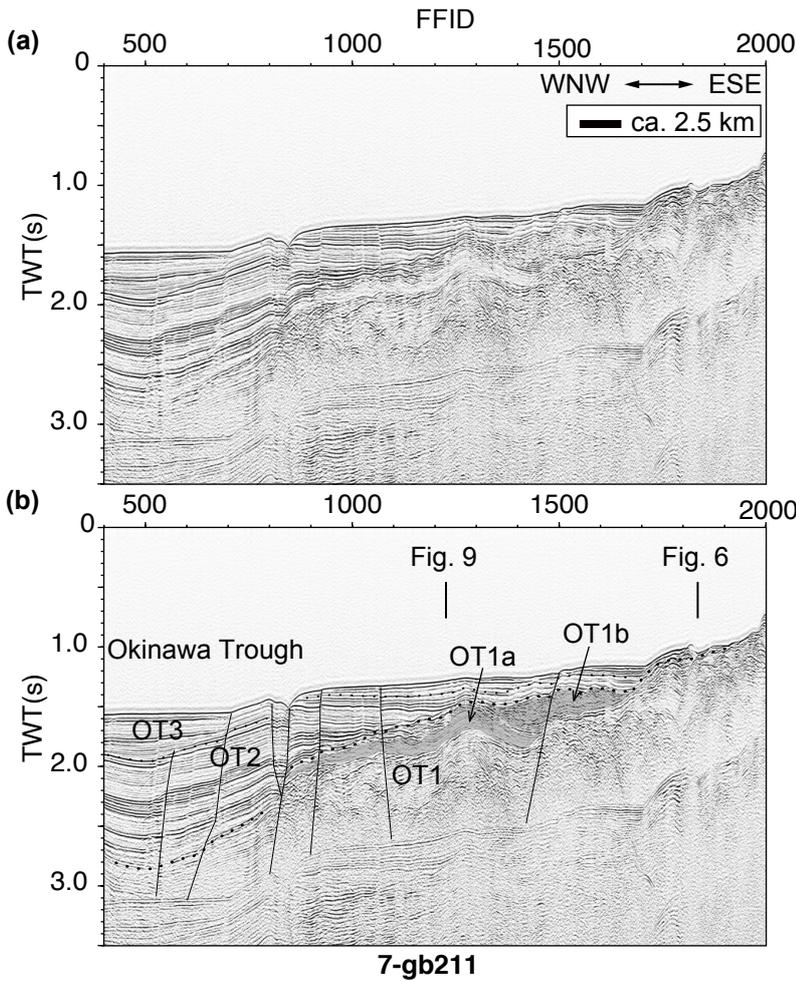
Fig. 6 (a) Stacked seismic profile across Yokote Echelon Knoll Chains and south of Yokogan Sone (Line 1007a-gb211) and (b) its interpretation. Small sized knoll bodies, which compose Yokote Echelon Knoll Chains, are recognized in the OT3 unit. Black bold arrows: The small sized knolls of Yokote Echelon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

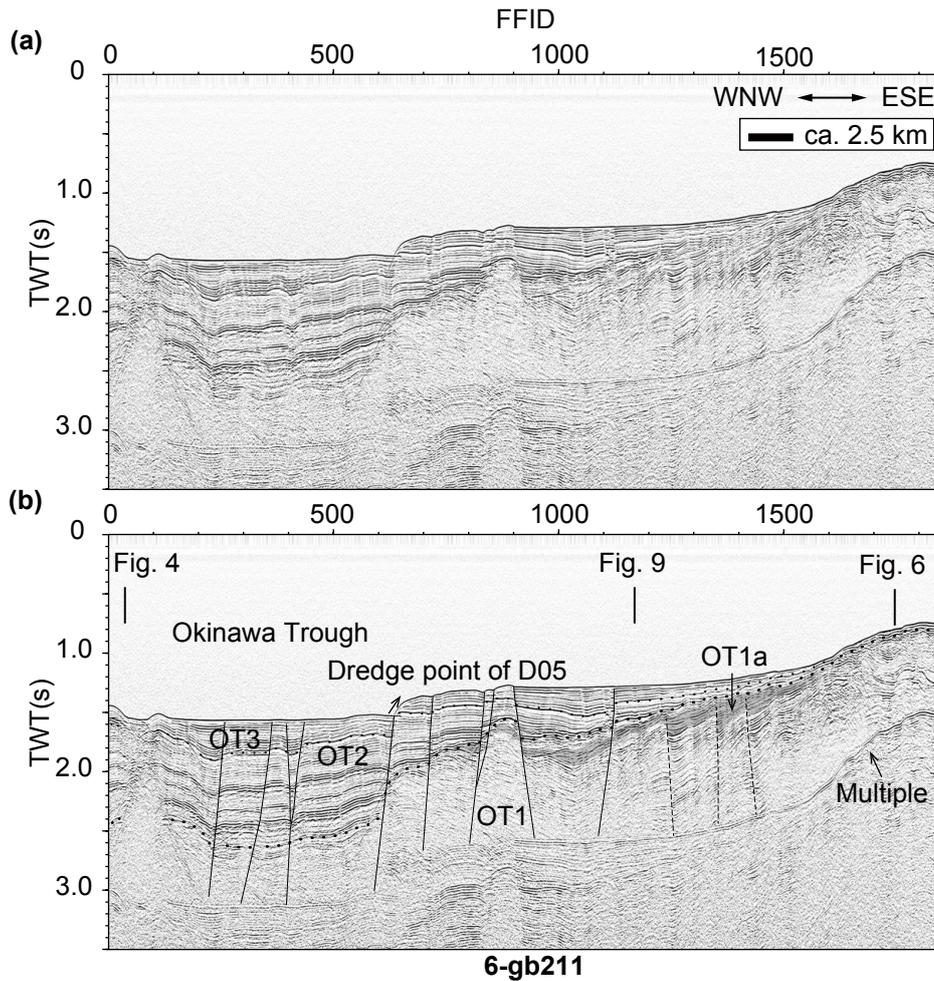
Fig. 7 (a) WNW-ESE stacked seismic profiles off west of Yokoatejima Island (Line 7-gb211) and (b) their interpretations. Normal faults are developed over the area. The Subunits OT1-2 and OT1-3, which suggest volcanic products distributed in the eastern part of the OT1 unit. Black lines: Normal faults.

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-東南東方向の重ね音波探査断面図(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.

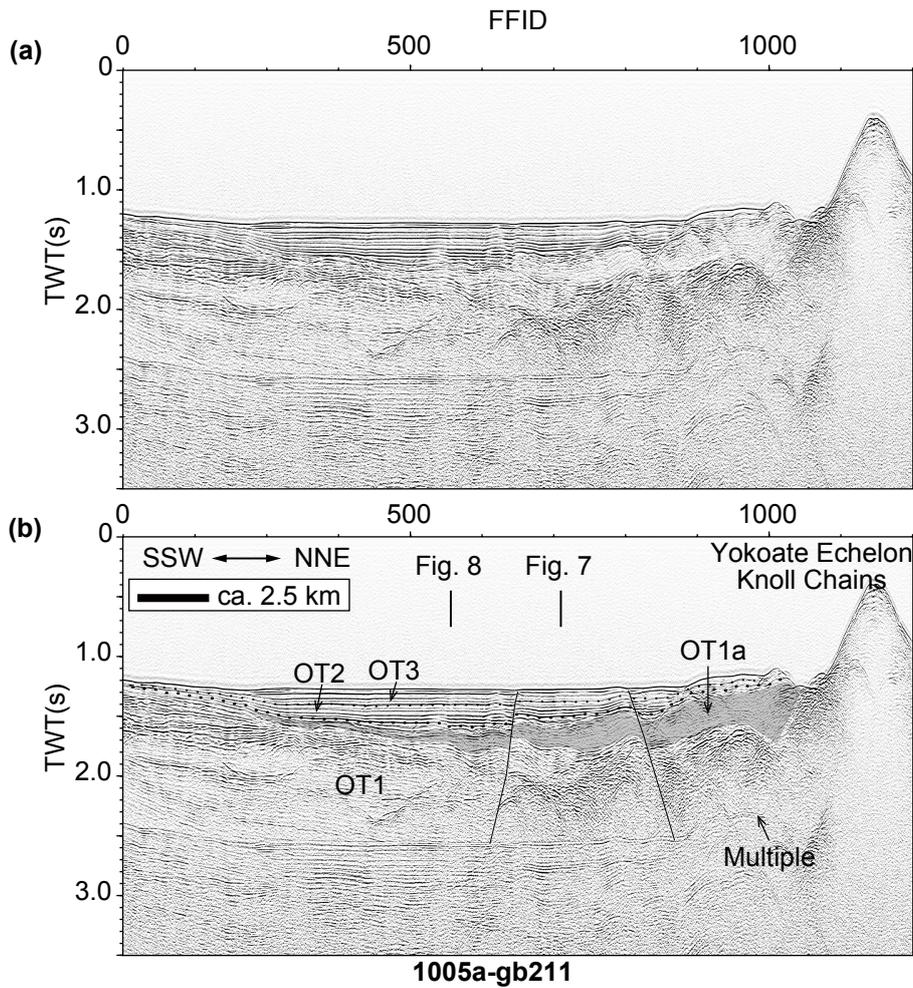
の解釈で追跡可能な正断層が複数認められ、断層周囲のOT3層内部に累積性のある変位が生じていた(第3図-第6図)。正断層は主に沖縄トラフ東縁部や横ガン曾根東方の海底平坦部に分布し、走向は沖縄トラフ東縁部では北東-南西方向、横ガン曾根東方では横当雁行海丘群の海丘配列方向に概ね平行な東北東-西南西方向であった。

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

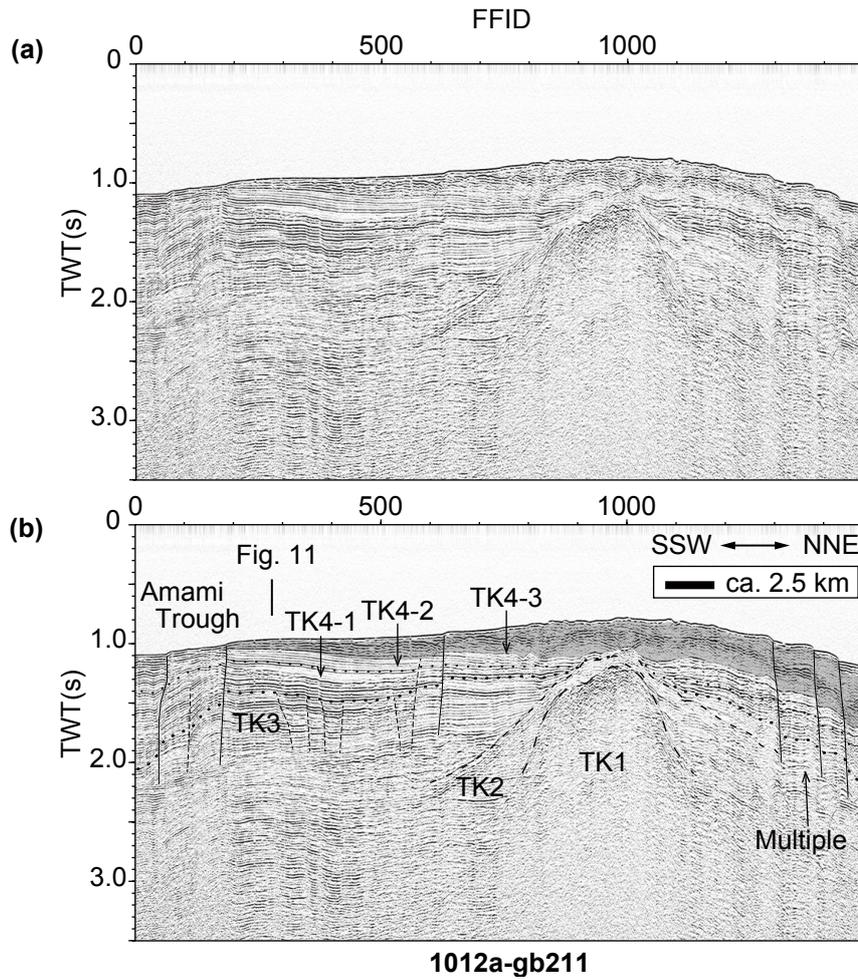


第9図 (a) 横当島西方の北北東-南南西方向の重合音波探査断面図(測線 1005a-gb211)及び(b)解釈線. 火山碎屑物(OT1-2層)がOT1層上部に分布する. 太矢印: 横当雁行海丘郡を構成する小海丘. 黒線: 正断層.
 Fig. 9 (a) NNW-SSE stacked seismic profile off west of Yokoatejima Island (Line 1005a-gb211) and (b) its interpretation. The volcanic product (the OT1-2 subunit) distributed on the top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

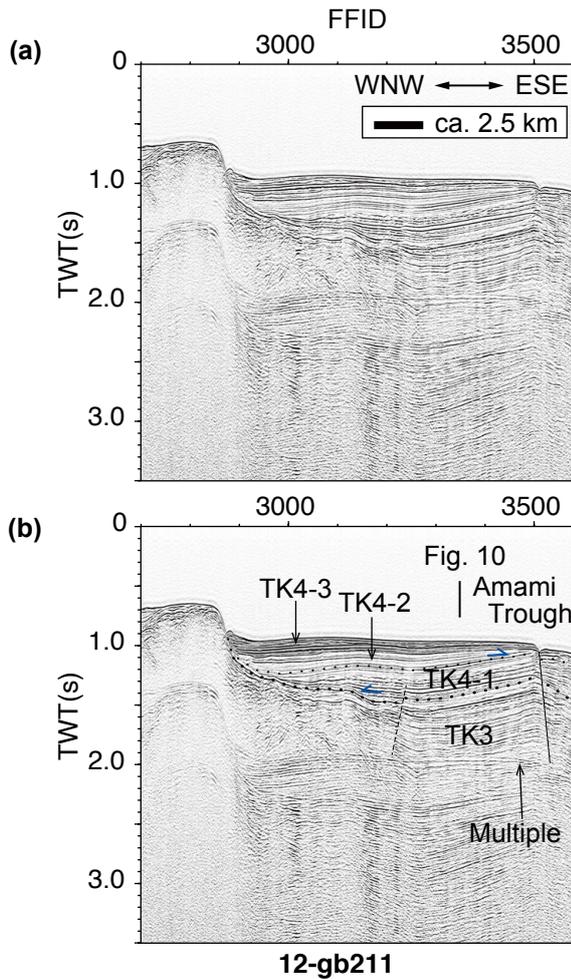
形成年代及びOT3層に累積性のある変位を生じさせた断層の活動年代を制約できる可能性がある。試料の記載については石塚ほか(2022)、堆積層の年代分析結果については有元・宇都宮(2022)を参照されたい。

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-西走向の南落ちで認められた(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で分布する(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)