

GB21-1 及び GK20 航海 (トカラ列島周辺海域) における海底地形観測

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

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

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

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

要 旨

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

1. はじめに

GB21-1 及び GK20 調査航海では主としてトカラ列島
周辺海域の北緯28度45分から北緯30度10分、東経128
度20分から東経130度00分の範囲、中之島、臥蛇島、
諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺海域にお

いてマルチビーム音響測深装置 (MBES) による海底地形
航走観測を実施した。第1図に本年度調査が行われた両
調査航海の全航跡図を示す。本報告書ではGB21-1を中
心に測深データの取得方法・データ処理・処理結果の報
告及び得られた結果に基づく調査海域の海底地形の記載
と予察的解釈を記す。また、海底地形データと同時に取
得された後方散乱強度データの処理結果についても報告
する。

2. 装置及びデータ処理

2.1 GB21-1 調査航海

2.1.1. 測位航法装置

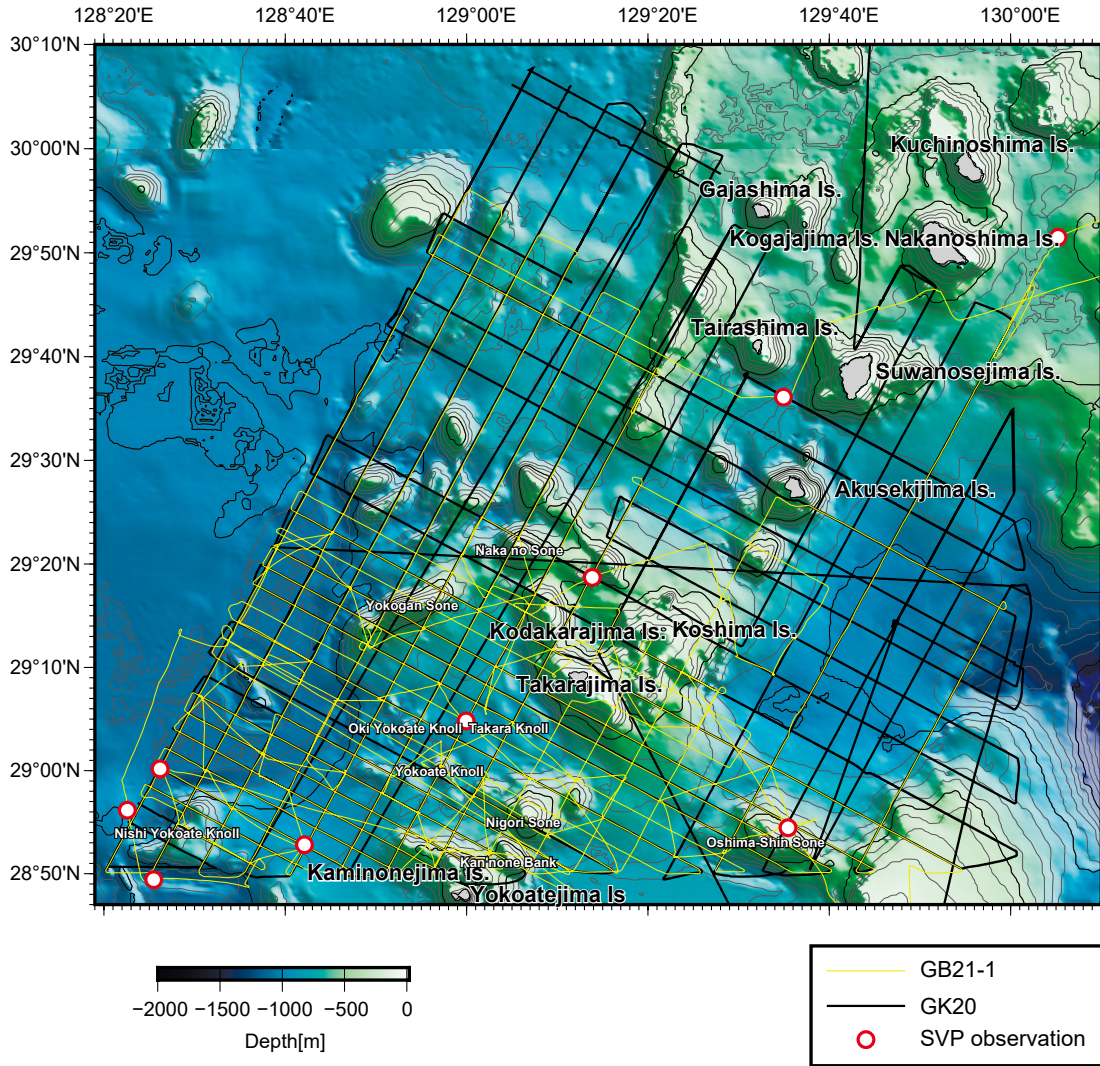
GB21-1 調査航海では東海大学所有の海洋調査研修船
「望星丸」を使用した。船の全長は87.98 m幅は12.80 mで
ある。測位と船体動揺データはSeapath380-5+ (船体動揺
船首方位測定装置:以下Seapath) で統合しており、ヘディ
ングはMBES専用のアンテナによるGPSコンパス機能、
ロール・ピッチ・ヒーブはMRU 5+MKII (動揺センサー)
によりそれぞれ観測している。測位に関し、2020年4月
以降に実施されたGB21-1 観測航海とGK20航海では、日
本の海域では準天頂測位衛星みちびきのL1S信号による

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

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

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

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



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

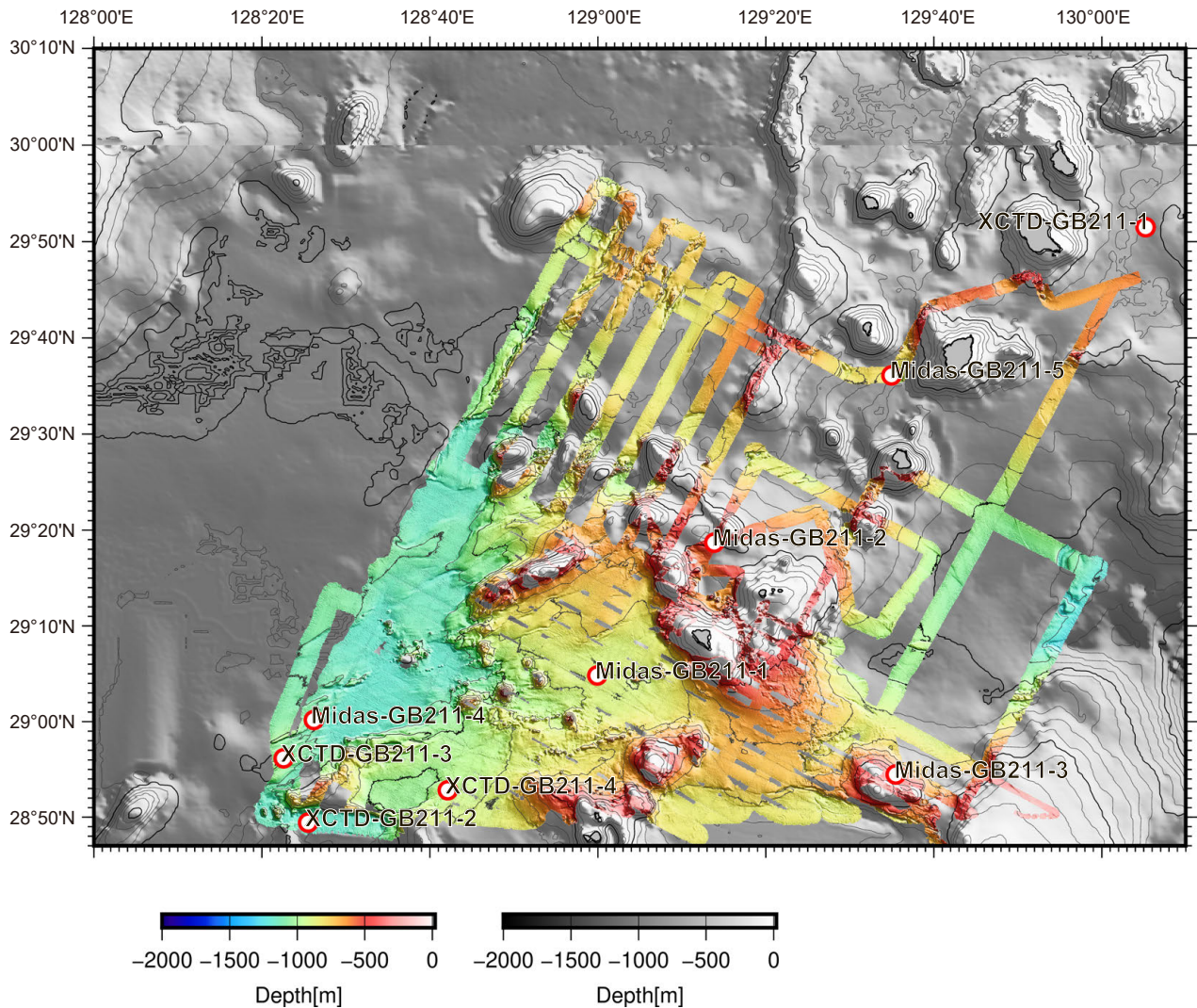
Fig.1 Survey area and Track lines of the GB21-1 and GK20 cruises. The solid yellow line represents the GB21-1 and the solid black line represents the GK20. The red circles indicate the locations of the sound velocity observations. Bathymetry data was used the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000).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

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

2. 1. 2. MBES

調査船の船底音速(表面音速)は音響ビームを望む方向に放射するために重要である。望星丸では船底から機関室に海水を汲み上げて循環しながらリアルタイムで観測できるタイムオブフライト方式のApplied Microsystems Ltd.社製Micro X, SV-Xchargeが導入され、船底における精密な音速(精度: ±0.025 ~ 0.50 m/s)の観測が可能となっている。音速センサーによって観測された値は

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



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

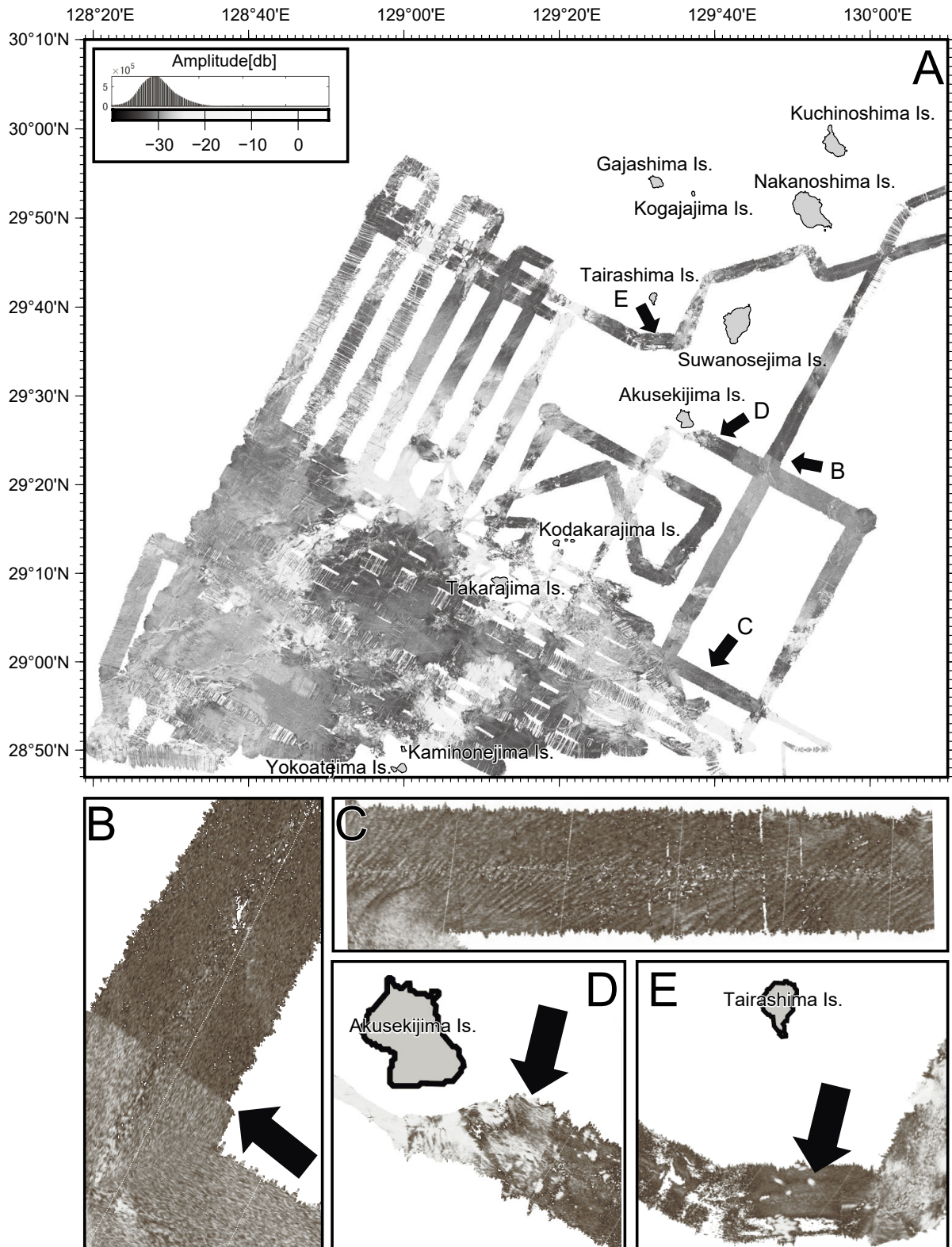
Fig.2 The cleaned bathymetry of GB21-1. Grid space is 50 m. The contour interval is 100 m. In the background, the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000) is drawn in gray scale.

アルゴリズムにより、グリッド間隔50 mの海底地形グリッドデータを作成した(第2図). 海底地形データと同時に取得された後方散乱強度データの処理には、CARIS社のHIPS & SIPS 11.3でデータを出力したのちにGMTのxyz2grdアルゴリズムにより20 mグリッドを作成した(第3図). 一般的に後方散乱強度は技術的に海底地形より細かい海底面の情報を観測しているため、より細かいグリッドで作成することができる.

2. 1. 3. 音速度観測

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

Valeport社製. 以下Midasと省略)により観測を実施した(第1表及び第4図). XCTD観測は鶴見精機のデジタルコンバータTS-MK150Nに専用のハンドランチャを接続して同社のXCTD-4プローブ (最大観測深度: 1850 m)を装着し、合計4回の観測を実施した. ただし2回目の投入時は強風のためプローブとランチャをつなぐ銅線と船体が接触し、通信が中止され観測に失敗した. そのため実際の観測結果は3回分のみとなる. 使用したXCTDプローブは電磁誘導型セルによって電気伝導度の観測を行っている. なお鶴見精機のXCTDプローブの詳細についてはMizuno and Watanabe (1998)を参照されたい. 観測生データのサンプリング周波数は25 Hzであり、収録ソ



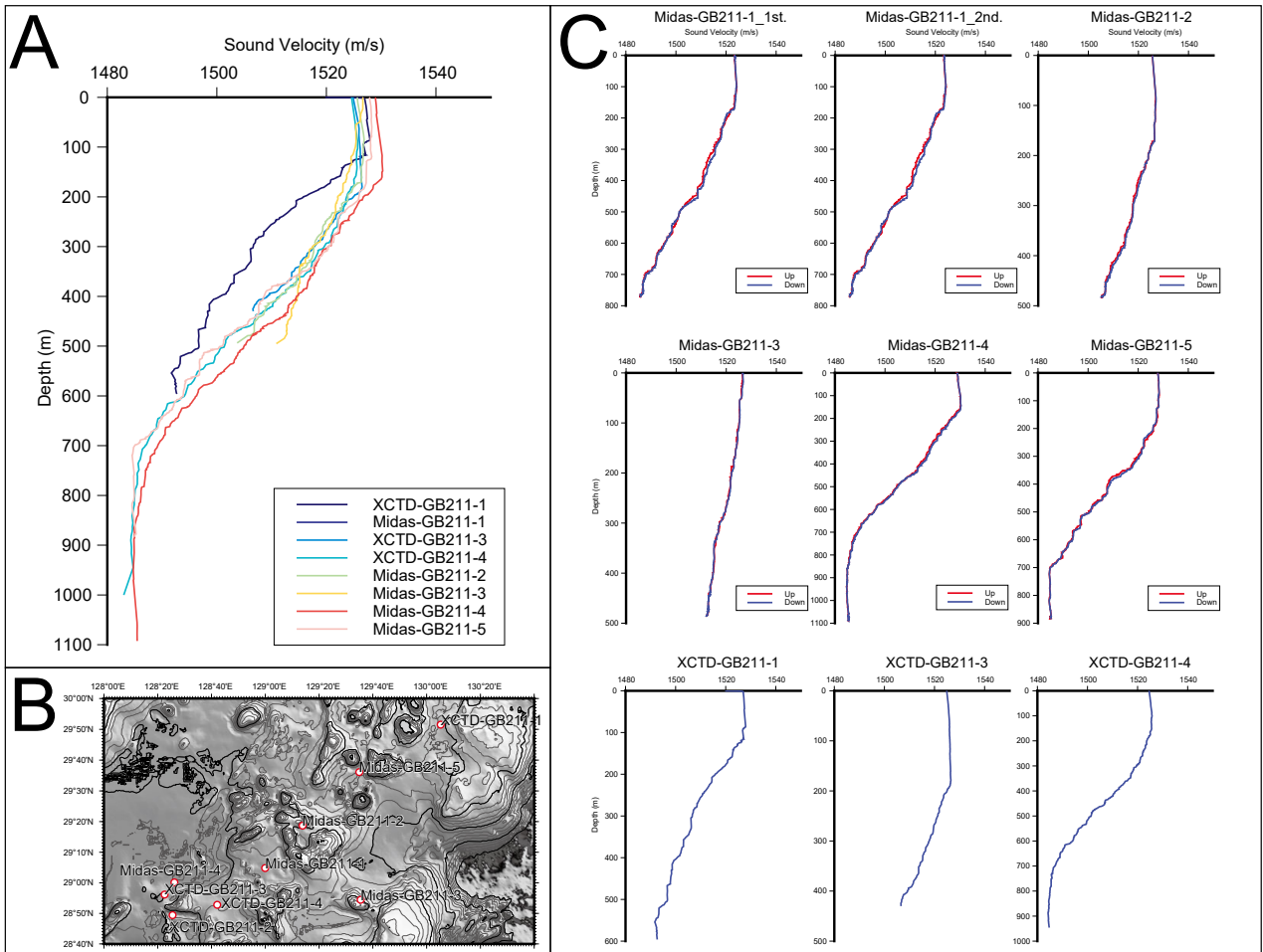
第3図 GB21-1航海で取得した後方散乱強度図。白い場所ほど反射強度が強い。

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

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

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

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



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

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

フトにより生データ(.RAWファイル), 全データ(.CTDファイル), 深度1 m間隔データ(.CTDファイル)に変換した3種類のデータを出力した。本報告書では深度1 m間隔のデータを使用して解析を行っている。なお, 電気伝導度から塩分への換算, 深度の計算, 音速度の計算などはそれぞれの観測機器に付属のソフトウェアで処理した。なおXCTD観測は曳航体(セシウム磁力計・エアガン・ストリーマケーブル)の投入前後の低速航行時に, 風向きに応じて調査船の研究室の右舷または左舷部から後方に向けてプローブを投下した。

Midasは採泥時の木下式グラブ採泥器(K-グラブ)のフレーム内部に固定し, 表層採泥に伴い合計5回の観測を実施した。2回の投入を実施したMidas-GB211-1では, 1回目の投入時にK-グラブに装備した誤作動防止装置(板木, 2018)が解除されずグラブ採泥器が作動しなかった。この誤作動防止装置の不作動の原因として高度計とMidas発振周波数の干渉が懸念されたため, 2回目の投入では誤作動防止装置をあらかじめ解除した状態でK-グラブ投入を行った。その後実施した4地点では問題なく作動したため, Midas-GB211-1での不作動はMidasとは別の原因で発生したと現時点では考えている。また, 一般的なCTDではセンサーを下向きに固定して観測を行うが, K-グラブ着底時の破損を回避するため本観測ではMidasのセンサーをすべて上向きで固定して観測を実施した。Midasの音速度センサーはタイムオフライン方式であり, 計測範囲は1,400 ~ 1,600 m/s, 分解能は0.001 m/s, 精度は ± 0.02 m/sである。音速度センサー部はトランスデューサーから音響パルスを放射して反射板からトランスデューサーにまで戻るまでの時間を精密計測して音速度を求める。電気伝導度計は電磁誘導式センサーを用いており, 計測範囲は0 ~ 80 mS/cm, 分解能は0.003 mS/cm, 精度は ± 0.01 mS/cmである。温度計のタイプは白金測温抵抗高速センサーであり, 計測範囲は-5 ~ 35 °C, 分解能は0.001 °C, 精度は ± 0.01 °Cである。圧力計のタイプはピエゾ抵抗センサーであり, 計測限界は600 Bar(約6,000 m), 分解能は0.001 %FSR, 精度は ± 0.05 %FSRである。観測に用いるセンサーは2019年4月にメーカーによる校正が行われている。Midasはオフラインで観測し内蔵メモリーにデータを蓄積, 揚収後にデータを回収する。観測はスイッチコネクタを挿入することで開始され, コネクタを抜去することで終了する。機器の設定は制御用のソフトウェアDataLog Expressを用いて行った。GB21-1調査航海では, 全ての観測において連続測定モード(Continuous Mode)を用いて8 Hzで観測を行った。圧力センサーの出力は圧力と深度から選択可能であるが, 本航海では深度を選択した。本報告書では深度1 m毎の平均値を計算して解析を行った。

第4図にMidasの直接計測音速度プロファイルとXCTDによる音速度プロファイルをまとめた。Midasによる音

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

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

2.2 GK20 調査航海

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

2.3 データ統合

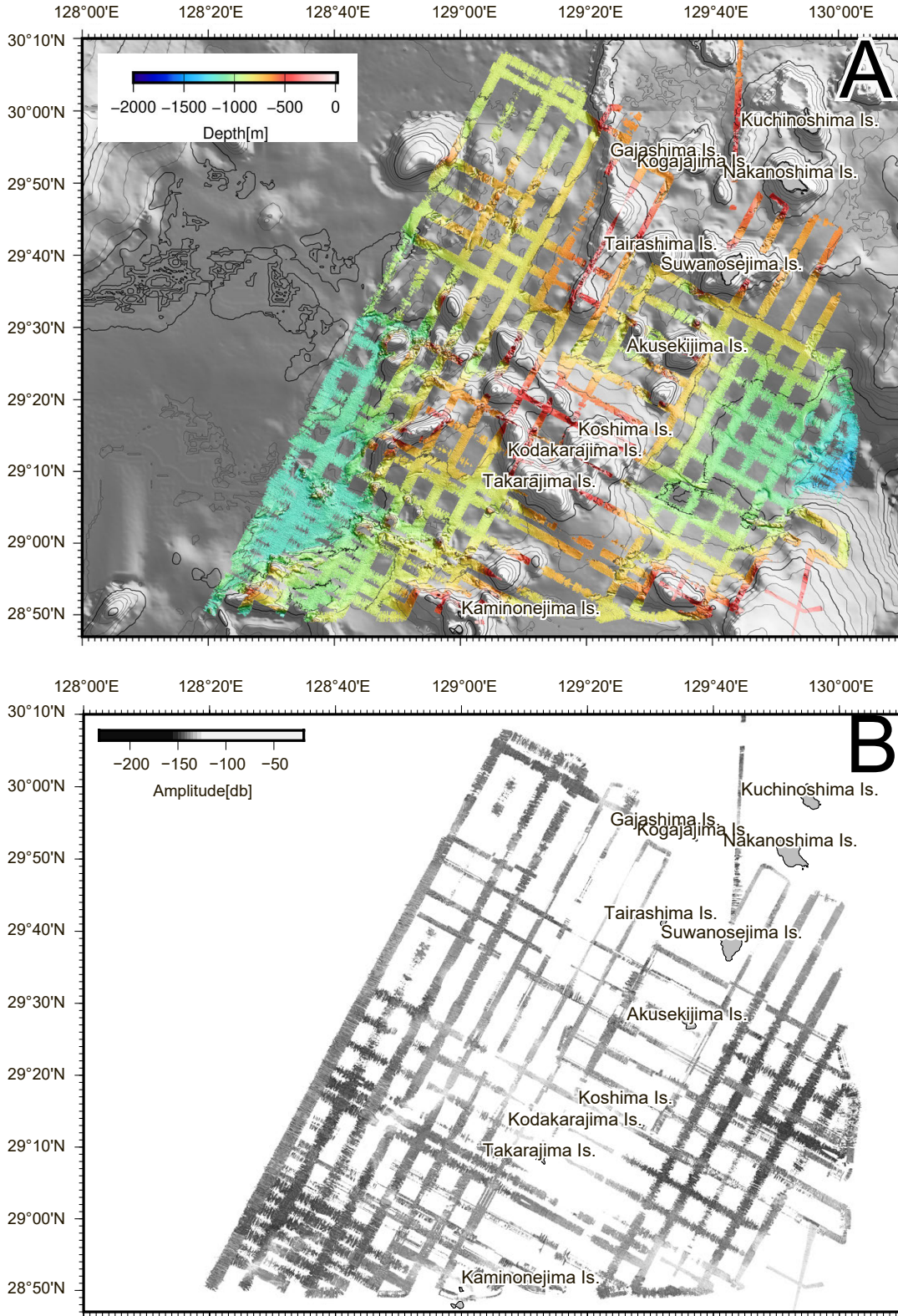
最終的に海底地形データは既存のGH11航海のデータ(佐藤・小田, 2012)にGK20, GB21-1航海のデータを合わせ本海域の海底地形図を作成した(第6図)。加えてQGIS 3.20の地形解析プロセッシングツールGeomorphon(Jasiewicz and Stepinski, 2013)を用いて海底地形から構造の抽出を行い, 海底地形解析図を作成した(第7図)。後方散乱データに関しては観測で使用した船上装置の違いのみならず海況にも大きく影響を受けて同一箇所で違う値を示すことも一般的である。そのため, 海底地形のような統合が難しい。以上から今回は後方散乱に関しては統合を実施していない。

3. 結果と考察

3.1 音速度観測

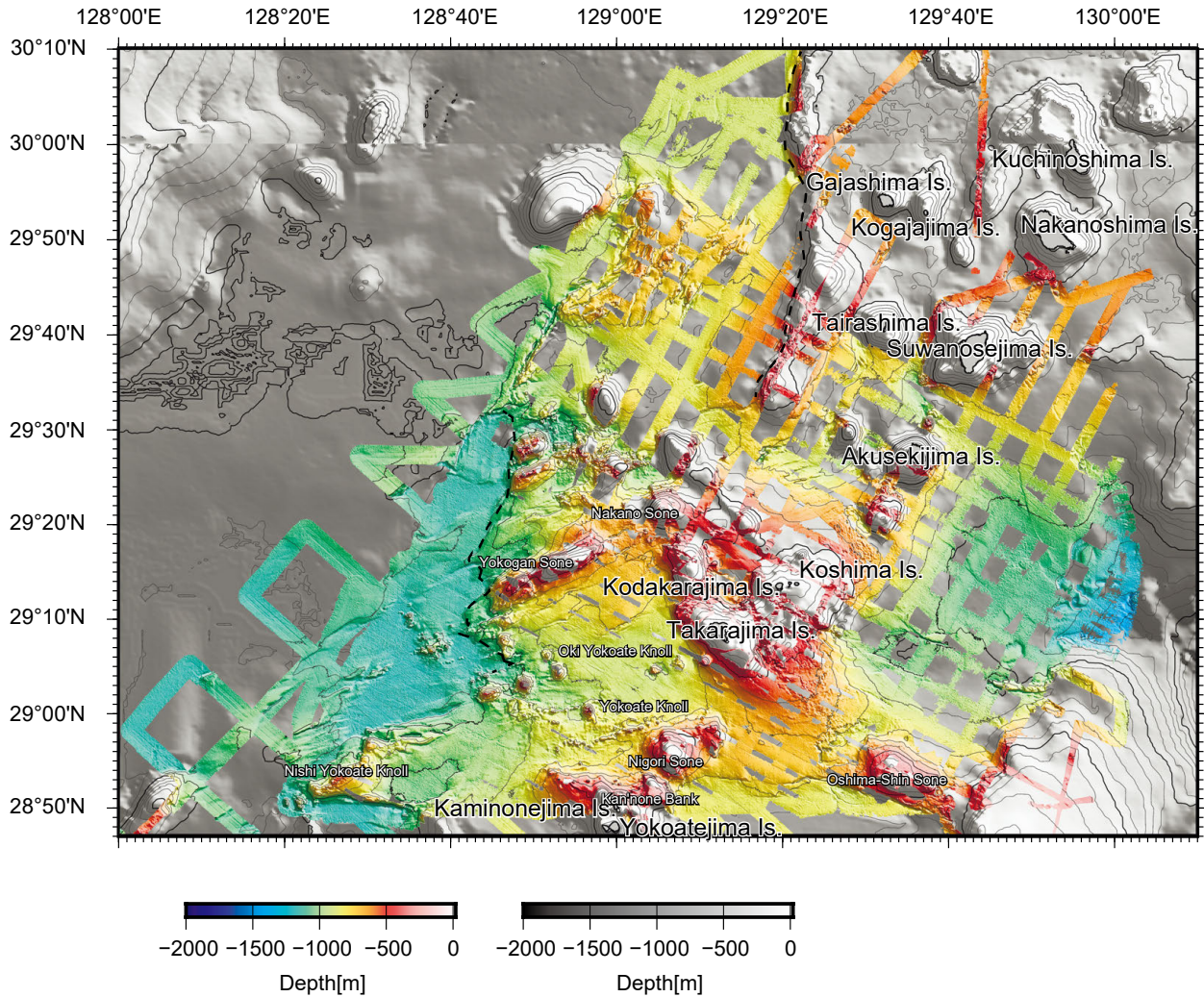
地形補正に用いるために取得した音速度プロファイルについてその特徴と傾向について簡潔に記す。本海域で取得された音速度プロファイルは, 全体的に表層と同様の音速度を水深200 m程度まで保持し, より水深が大きくなると音速度が低下していくという形状を示している。

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



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

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



第6図 GH11・GK20・GB21-1航海にて取得されたMBESデータを統合したトカラ列島周辺海域の海底地形。グリッド間隔は50 mである。背景にグレースケールで岸本(2000)による250 m統合グリッドを表示した。破線は沖縄トラフとの境界と想定される崖の解釈線。

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

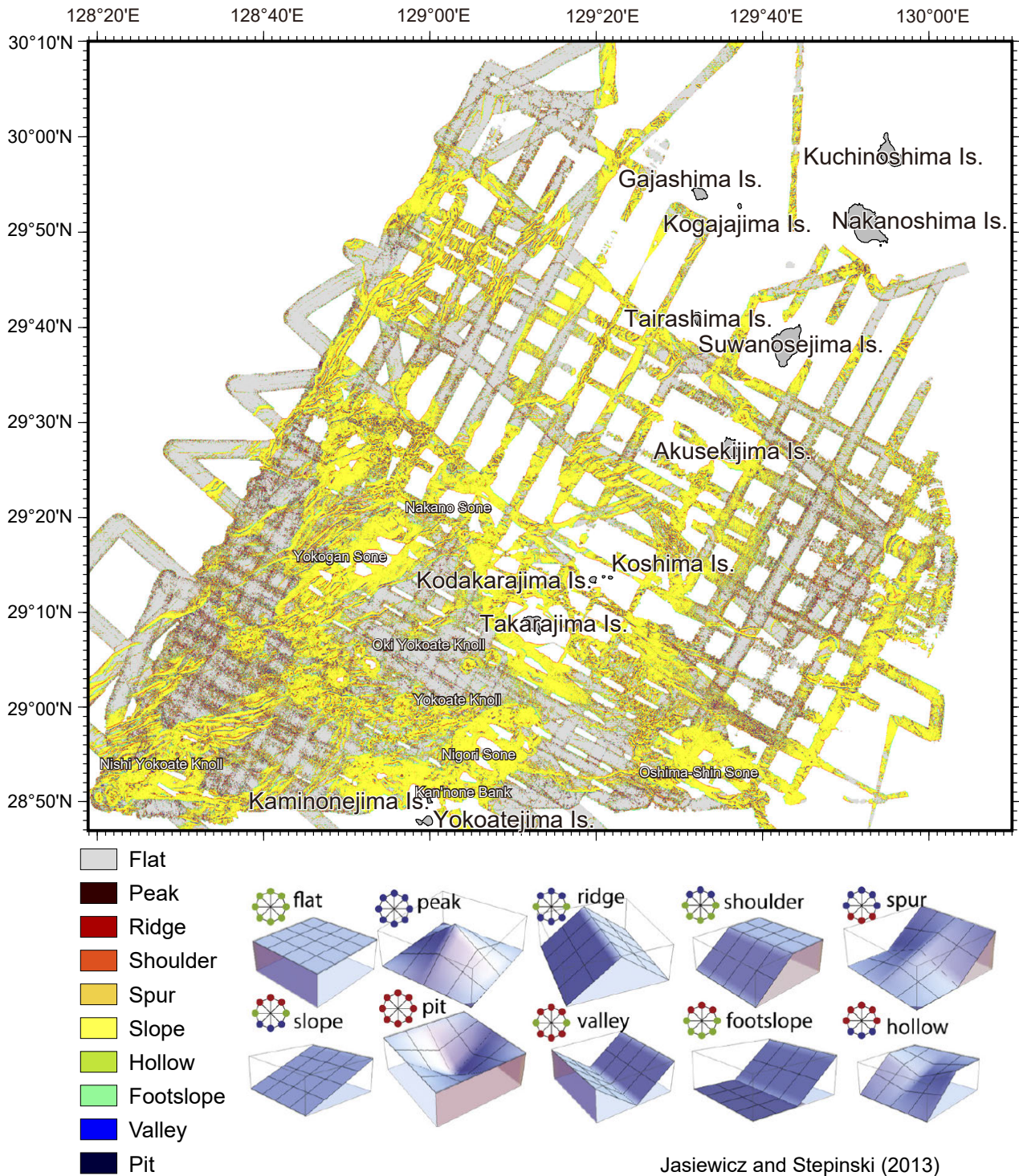
海域(佐藤, 2018)。次に②表層50 mまで速度一定層を持つ海域: GH13徳之島周辺海域(佐藤, 2014), GH15奄美大島周辺海域(佐藤ほか, 2016), GH18(古山ほか, 2019), GH19(佐藤ほか, 2020)。最後に③表層50mを超える速度一定層を持つ海域: GH14奄美大島・徳之島・沖永良部島周辺(小田・佐藤, 2015)。水深50 m程度までは風と波浪の影響による混合層を反映している可能性が高いが、本海域の調査の場合はそれよりも深部まで速度一定層が形成されている。

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

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

3.2 海底地形

統合地形データを第6図に示す。調査海域の地理的呼



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

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

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

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

つぎにトラフ側の地形を見てみると, トカラ列島の平島・臥蛇島の西, 北西方向 (N24° E) に比高100 m程度の西落ちの崖が連続して存在する (東経129度20分, 北緯29度30分から北緯30度10分, 第6図破線). これより西側の海底は1180 m前後の平坦面が広がっていることから, この連続的な崖はトカラ列島海域での沖縄トラフのトラフ底の縁辺をなすと考えられる. 横ガン曾根の西にも同様の地形が広がっており (東経128度40分, 北緯29度00分から北緯29度30分, 第6図破線), こちらも同様に縁辺部の一部であることが推測される.

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

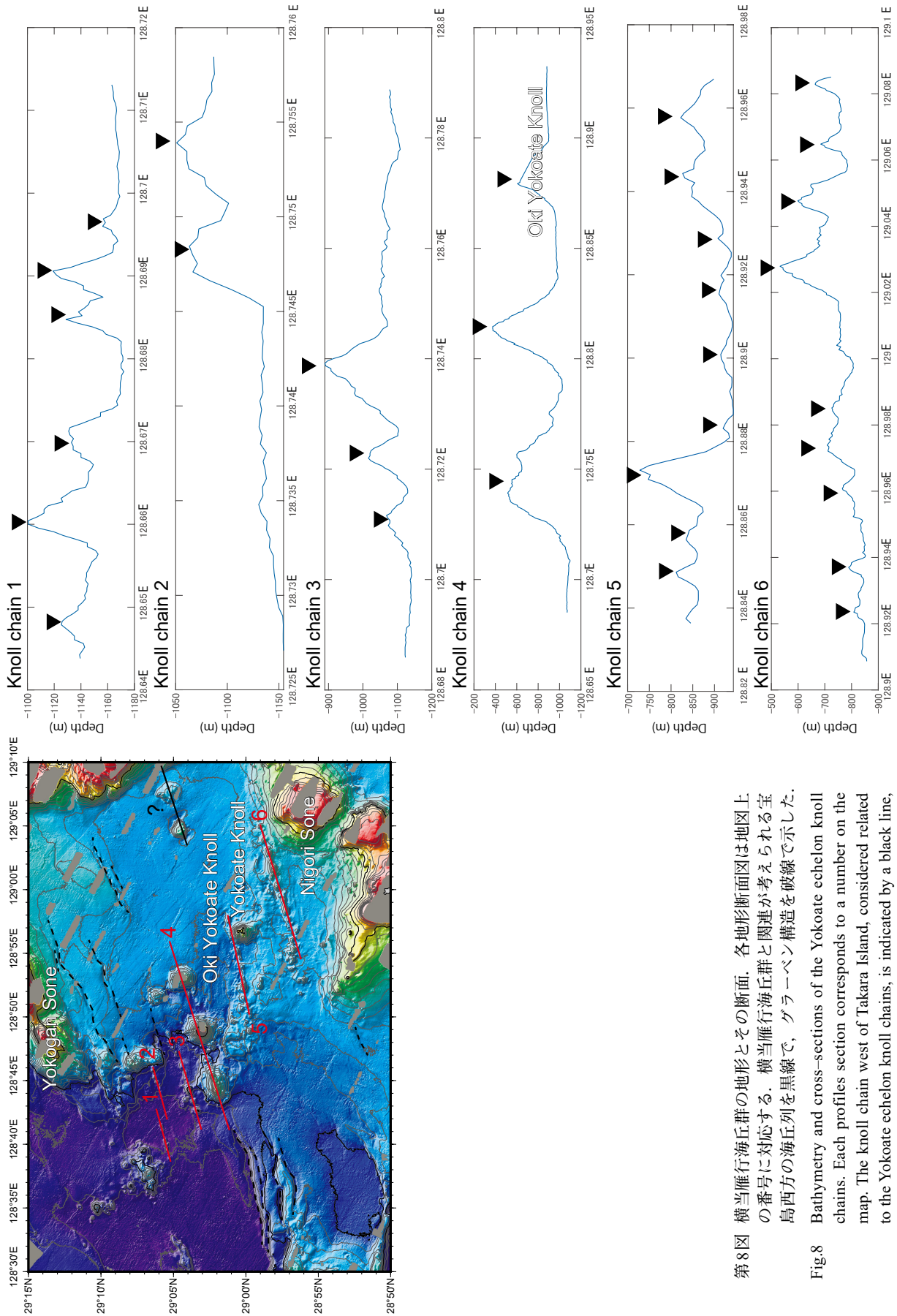
先述の横ガン曾根の西側, N24° E方向に伸びる西落ち

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

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

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

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



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

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

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

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

3.3. 後方散乱強度図

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

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

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

4. まとめ

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

謝辞：今回の調査では、望星丸・第二開洋丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、RAやアルバイトで乗船された方々、および調査団の研究員の皆様には調査機器の運用やデータ記録に関してご尽力頂きました。望星丸における観測については、特に玉井隆章技術員の尽力に大変お世話になりました。また、査読者である石塚 治氏の有益なコメントにより、本稿は大幅に改善されました。皆様に篤く謝意を表します。

文 献

- 天野敦子・杉崎彩子・鈴木 淳・味岡 拓・板木拓也・片山 肇(2018) CTD観測による奄美大島周辺海域の海洋環境。板木拓也(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 97–105.
- Buck, WR., Lavier, LL. and Poliakov, ANB. (2005) Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, **434**, 719–723.
- 古山精史朗・佐藤雅彦・三澤文慶(2019) GH18調査航海(石垣島・西表島周辺海域)における海底地形観測の概要。井上卓彦(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学

- 的研究]平成30年度研究概要報告書—宮古島・石垣島・西表島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 77, 6–14.
- 石野沙季・三澤文慶・有元 純・井上卓彦 (2022) トカラ列島南西沖におけるGB21-1航海の反射法音波探査概要. 地質調査研究報告, **73**, 219–234.
- 板木拓也 (2018) 超音波高度計によるK-クラブ採泥器の誤作動防止システム. 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 143–146.
- Jasiewicz, J. and Stepinski, T.F. (2013) Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, **182**, 147–156.
- 川辺正樹 (2003) 黒潮の流路と流量の変動に関する研究, 海の研究, no. 12(3), 247–267.
- 海上保安庁ウェブサイト (2019) 海洋速報 & 海流推測図. <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2021cal/cu0/qboc2021165cu0.html> (閲覧日: 2021年10月1日)
- 木村政昭・松本 剛・中村俊夫・西田 史・小野朋典・青木美澄 (1993) トカラ海峡の潜水調査: 沖繩トラフ北部東縁のテクトニクス, しんかいシンポジウム報告書, no. 9, 287–307.
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).
- 小林哲夫 (2008) 九州南方の離島の火山, *Nature of Kagoshima*, 鹿児島県自然愛護協会, **34**, 11–16.
- 高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) GB21-1 及び GK20 航海 (トカラ列島周辺海域) における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **73**, 211–217.
- Minami, H., Ohara, Y. and Tendo, H. (2021) Volcanic and tectonic features of Shira-hama Bank in the northern Ryukyu Arc: Implications for cross-arc volcanism controlled by arc-parallel extension. *Marine Geology*, **106623**.
- Mizuno, K. and Watanabe, T. (1998) Preliminary results of in-situ XCTD/CTD com-parison test. *Journal of Oceanography*, **54**, 373–380.
- 小田啓邦・板木拓也・片山 肇・鈴木 淳・兼子尚知 (2010) 沖繩島西方海域の採泥地点の音速プロファイルと水深. 荒井晃作 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成21年度研究概要報告書—沖繩島北西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 51, 23–33.
- 小田啓邦・佐藤太一 (2013) GH12 調査航海海域の音速度構造. 荒井晃作 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成24年度研究概要報告書—沖永良部島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 61, 10–17.
- 小田啓邦・佐藤太一 (2015) GH14 調査航海海域でのCTD観測及び海中音速度観測. 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成26年度研究概要報告書—奄美大島, 徳之島, 沖永良部島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 67, 28–46.
- 佐藤雅彦・佐藤太一・小田啓邦 (2016) GH15 調査航海におけるCTD及び海中音速度観測の概要. 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成27年度研究概要報告書—奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 70, 5–14.
- 佐藤雅彦 (2018) GH17 調査航海におけるCTD及び海中音速度観測の概要. 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年度研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 6–16.
- 佐藤太一・小田啓邦 (2012) GH11 航海 (沖繩トラフ-東シナ海) 海域の海底地形. 荒井晃作 (編) 「東シナ海沖繩トラフ海域の海洋地質学的研究」平成23年度研究概要報告書—北部沖繩トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 19–28.
- 佐藤太一 (2014) GH13 調査航海海域でのCTD観測及び海中音速度観測. 荒井晃作 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成25年度研究概要報告書—徳之島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 64, 66–75.
- 佐藤太一・高下裕章・佐藤雅彦 (2020) GH19 航海 (与那国島周辺海域) 及び GK19 航海における海底地形観測の概要. 井上卓彦 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」令和2年度研究概要報告書—石垣島・西表島・与那国島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 80, 6–17.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564.
- 横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, EM.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康弘・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. 地学雑誌, **119**, 46–68.

(受付: 2021年1月14日; 受理: 2022年7月7日)

