

反射法地震波探査データを用いた北部沖縄トラフ沖男女海陵群の
構造地質記載[†]

青木 智*

Structural geological description of the Oki-Danjo Hills in the
northern Okinawa Trough using seismic reflection data[†]

Tomo AOKI*

Abstract

The Hydrographic and Oceanographic Department of the Japan Coast Guard, conducted a bathymetric and seismic reflection survey of the Oki-Danjo Hills and adjacent regions located on the western slope of northern Okinawa Trough. Based on the bathymetric data and seismic reflection profiles, we produced a structural geological description. The bathymetric data revealed characteristic moat-like structures associated with the hills, as well as high-resolution morphological information. Combined with the seismic reflection data, it revealed that there is a close correlation between the morphology and distribution of the faults. The seismic profiles included five unconformities and six distinct, distinguishable units. At the top of the hills in the study area, relatively old units are likely exposed on the seafloor or shallow depth, and there are north-south differences in the exposed units. Furthermore, it was suggested that the fault activities of the Oki-Danjo Hills might be active during specific periods and could be characterized by strike-slip displacement. These structural geological characteristics are likely to be related closely to the tectonics of the northern Okinawa Trough. In the future, it will be necessary to impose further constraints by estimating the depositional age and acquiring even higher density data.

1 イントロダクション

海上保安庁海洋情報部では、領海や排他的経済水域等の基礎的な海洋情報の整備のため、海洋調査を実施している。東シナ海においては測量船によるマルチビーム音響測深機を用いた海底地形調査やエアガンを用いた反射法地震波探査により、科学的調査データを収集・整備している。

沖縄トラフは東シナ海東部に位置する活動的な

背弧海盆であり、フィリピン海プレートのユーラシアプレートへの沈み込みに起因した南北 1,200 km に及ぶ海溝－島弧－背弧系を形成している（例えば Kimura, 1985）。沖縄トラフは海洋底拡大前の段階にあり、中期－後期中新世以降から複数の段階のリフティングを経験してきたと考えられている（Miki, 1995; Sibuet et al., 1995; Fournier et al., 2001; Almendros et al., 2020）。

[†] Received August 25, 2025; Accepted October 24, 2025

* 企画課 Administration and Planning Division

東シナ海における構造地質調査はこれまで様々な先行研究によって実施されてきた。例えば Berné et al. (2002) は東シナ海陸棚からその縁辺部にかけて水平距離数百 km にわたって反射法地震波探査データを用いた層序区分を行っている。Nishizawa et al. (2019) は東シナ海周辺における反射法地震波探査・屈折法地震波探査等に基づき、沖縄トラフ周辺海域における地殻の厚さを広域にわたって示すとともに、沖縄トラフの形成に伴って分布・発達したと考えられる多数の断層を海底数 km スケールで記載している。しかし、東シナ海におけるより局所的かつ高密度・高解像度のデータを用いた先行研究は例に乏しい（例えば Oiwane et al., 2011）。

沖男女海陵群（Okid-Danjo Hills）は北部沖縄トラフの西側斜面に存在する第1男女海丘、第2男女海丘から南方へ、沖縄トラフと平行に連なる複数の地形的高まりである（Fig. 1; 青木・他, 2023a）。沖男女海陵群では多数の断層が発達しているほか、自生炭酸塩岩の露岩域が報告されるなど（Sun et al., 2015; Peng et al., 2017; Li et al., 2018; Yang et al., 2022; 青木・他, 2023b; 青木・他, 2024）、地質的に特徴的な地域である。しかし、構造地質的観点から詳細で面的な調査研究は行われていない。本研究では高密度・高解像度の海底地形データ、反射法地震波探査データをもとに、沖男女海陵群における詳細な構造地質記載を行う。

2 手法

2.1 海底地形調査

海底地形データは2009年から2018年の期間に海上保安庁海洋情報部の測量船「昭洋」のマルチビーム測深器を用いて取得した。データ処理についてはロール、ピッチ、ヨーのバイアス補正、動揺補正、音速度補正等の一般的な処理を施した。音速度データはCARIS HIPS and SIPSソフトウェアを用いて処理を行い、グリッドサイズは30 mとした。

海底地形データによる断層の判別においては、

後述の反射断面の解釈の結果として断層であると判断した地形のほか、地理的相関性と形状の類似から総合的に断層と推定できるものや、先行研究で指摘されている断層（例えば Minami, 2025）を参考に、総合的に判断した。

2.2 反射法地震波探査

反射法地震波探査は海上保安庁海洋情報部の測量船「昭洋」により実施した。反射法地震波探査には発振源のエアガンとして Sercel 社製の Mini-GI ガン（ジェネレータ 15 cu.in 及びインジェクタ 30 cu.in）を用いた。受波は SIG 社製の 60 m のマルチチャンネルストリーマケーブルを用い、iXblue（現 exail）社製の探鉱機 DELPH-24 でデータ収録を行った。ケーブルの受振点間隔は 2.5 m で 24 チャンネルである。エアガンの発震間隔は 10 m の等距離発震とし、発振圧力は 110 気圧とし、船速は対地 5 knot 程度を維持して調査を実施した。データ収録は GPS データを加えて SEG-Y 形式で行った。取得したデータはジオメトリ補正、ノイズ抑制、ゴースト抑制、多重反射抑制、振幅補正、デコンボリューション、速度解析、NMO 補正、CMP 重合、バンドパスフィルタ、時間マイグレーション及び深度変換等の処理を行い、地震波形表示ソフト SeiSee を使用して断面化した。

得られた反射断面は不整合面及び断層等の追跡を行い、異なる測線間で同一と判断される不整合面については可能な限り対応付けを行った。不整合面の追跡に際しては連続する反射面を同時間面とみなし、不整合面及び連続する反射面を境界としてユニット区分を行った。調査海域ではリフティングに伴う多数の断層が発達しており（Nishizawa et al., 2019）、一般に単一の測線の反射断面では断層を跨いだ不整合面の連続的な追跡は困難である。そこで沖男女海陵群の大構造（北東—南西方向の配列）を横断する北西—南東方向の測線（Figs. 3-6）と、断層の影響が少ないと思われる場所を縦断する測線（Figs. 2, 7, 8）を複数調査し、測線の交点においてこれらの反射断面に

おける不整合面の照合を行うことで、断層によって変位を被っている不整合面にあっても複合的に追跡を行った。ただし、処理過程における鉛直方向の精度や曳航配置によるジオメトリの補正等による水平方向の位置精度の影響から、必ずしも交差する測線の交点において各不整合面の深度等が一致しないことは注意が必要であり、最終的には断層変位の傾向や各ユニットの音響的内部構造等の特徴も考慮して総合的に判断した。時間断面及び深度変換断面において深度の不一致に大きな差異がないことから、本研究では深度変換断面を使用した。なお、各ユニットにおける音響的内部構造の成層 (stratified)・透明 (transparent)・無反射 (no internal return) 等の表現やその他の記載方法については池原・他 (1990), Mitchum et al. (1977) 等を参考に記載した。

3 結果

3.1 海底地形

本研究における調査海域の海底地形図を Fig. 1 に示す。周辺海域の中での調査海域の位置は図中左上の広域図に示している (Fig. 1a)。調査海域は北部沖縄トラフの西側斜面に位置し、第1男女海丘、第2男女海丘から南方へ、沖縄トラフと平行な向きに連なる複数の地形的高まりで構成される沖男女海陵群と呼ばれる地域である (Fig. 1b; 青木・他, 2023a)。沖男女海陵群を構成する地形的高まりは比較的平頂で、平頂部の水深は 250 m から 350 m 程度である。陸棚と沖男女海陵群の間は谷状を呈しており、谷の西側 (陸棚側) はゆるやかな連続的な斜面となっている一方、東側 (沖男女海陵群側) の地形的高まりとの境界は広範にわたって崖状に隔てられている傾向にある。また、沖男女海陵群から東方の沖縄トラフにかけては再びゆるやかな斜面となっている。調査海域では広く北東-南西方向のリニアメントがみられ、隣接海域の類似の地形は断層として解釈されてきた (例えば大岩根・他, 2007; Minami, 2025)。

より局所的な部分では二つの地形的特徴が認め

られる。一つ目は地形的高まりの縁辺部の崖下にはリニアメントとは異なる明瞭な溝状の構造を伴う傾向にあることである。この溝状の構造は数十 m 程度の深さをもつこともあり、沖男女海陵群の地形的高まりに沿って分布する。二つ目の特徴は、沖男女海陵群の東縁に沿って背骨状に存在する凹凸地形 (rough morphology) である。この構造は第2男女海丘から沖男女海陵群の南端付近まで一部分岐をしながら断続的に連なっている (Figs. 1b, 10)。

3.2 反射断面

本研究で使用した反射断面は、受振波の強度や多重反射、ノイズ等の影響を考慮すると、最大で海底下 500 m 程度の深度までを明瞭に把握できた。一方、調査海域では堆積層及び不整合面の不連続が多数みられるため、一つの反射断面のみを用いて広域の不整合面やユニットの区分をすることは不可能である。そこで、まずは調査海域におけるユニット区分と各堆積層及び不整合面の記載を行い、これに基づき各堆積層及び不整合面の不連続の特徴と海底地形との関係性について記載を行い、測線間の対応付けを行う。調査海域における各測線の反射断面は Figs. 2-8 に示している。

3.2.1 各ユニットの特徴

本研究の調査海域においては、音響基盤及びそれを覆う堆積層について五つの不整合面と六つのユニットに区別された (Figs. 2-8)。これらのユニットを浅部から順に U1 ~ 6 と呼ぶ。近隣の海域では、Oiwane et al. (2011) が五島海底谷周辺海域で、Berné et al. (2002) が陸棚上で層序区分を行っている例が存在するが、本研究の調査海域はいずれの海域とも接続できていないため本研究のユニット名は先行研究に拠るものではない。

U6 は調査海域全体で認められる。本ユニットの上面は全体的に起伏に富んだ形状を示すが、部分的に削剥面が存在する箇所も認められる不整合面である (例えば Fig. 4)。本ユニットの内部構造はユニット上面の不整合面に対して斜交する成

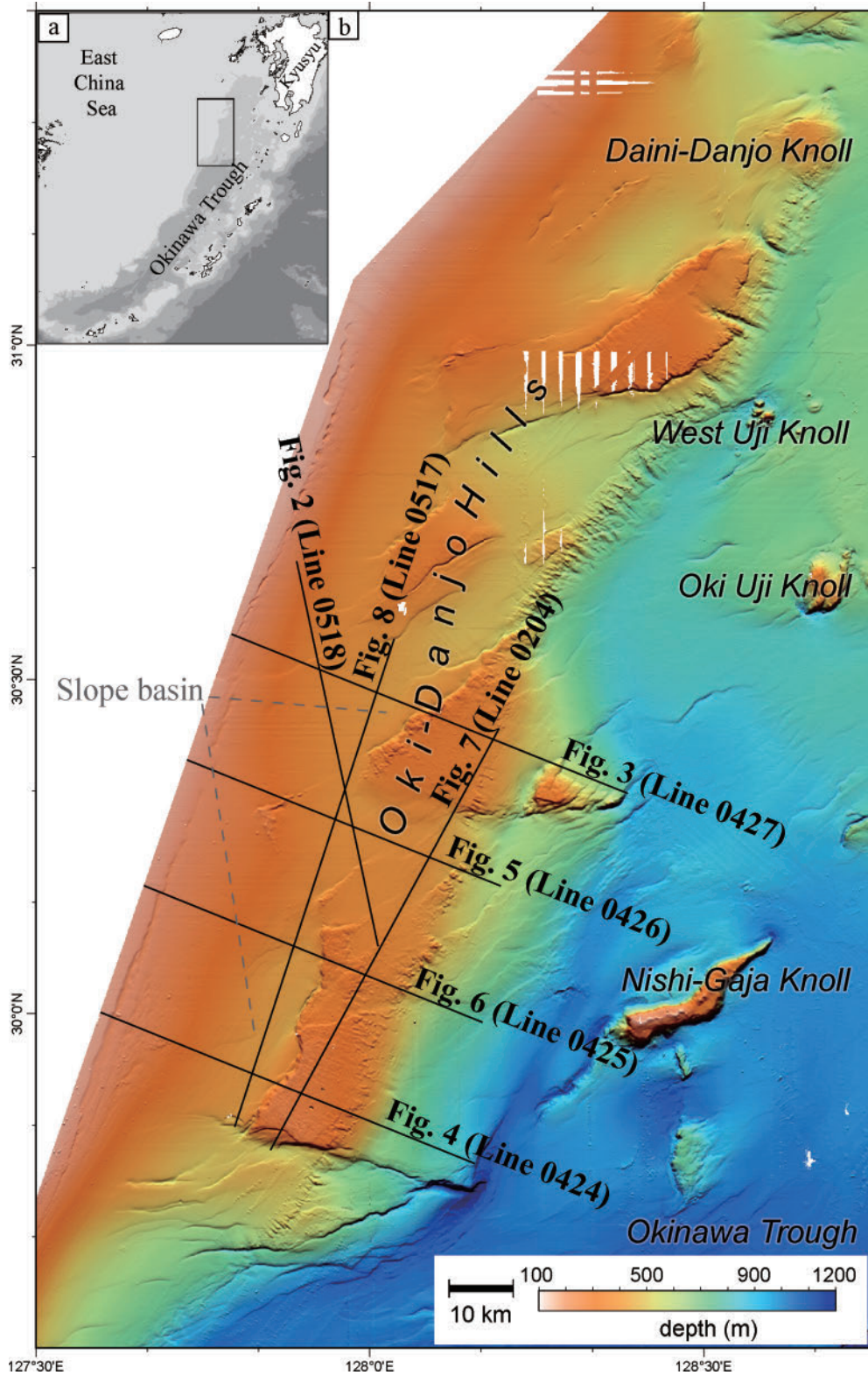


Fig. 1. General information of the study area and adjacent regions. (a) Location map of the study area. The black box outlines the area shown in Fig. 1b. Bathymetric data are based on the GEBCO_2021 grid (GEBCO Compilation Group, 2021). (b) Bathymetric map of the western slope area of the Okinawa Trough with survey line information.

図1. 調査海域の概略図. (a) 調査海域周辺の広域図. 黒枠は Fig. 1b の範囲を示す. 背景図の海底地形データは GEBCO_2021 grid (GEBCO Compilation Group, 2021) を用いている. (b) 沖縄トラフ西側斜面の詳細海底地形及び測線図.

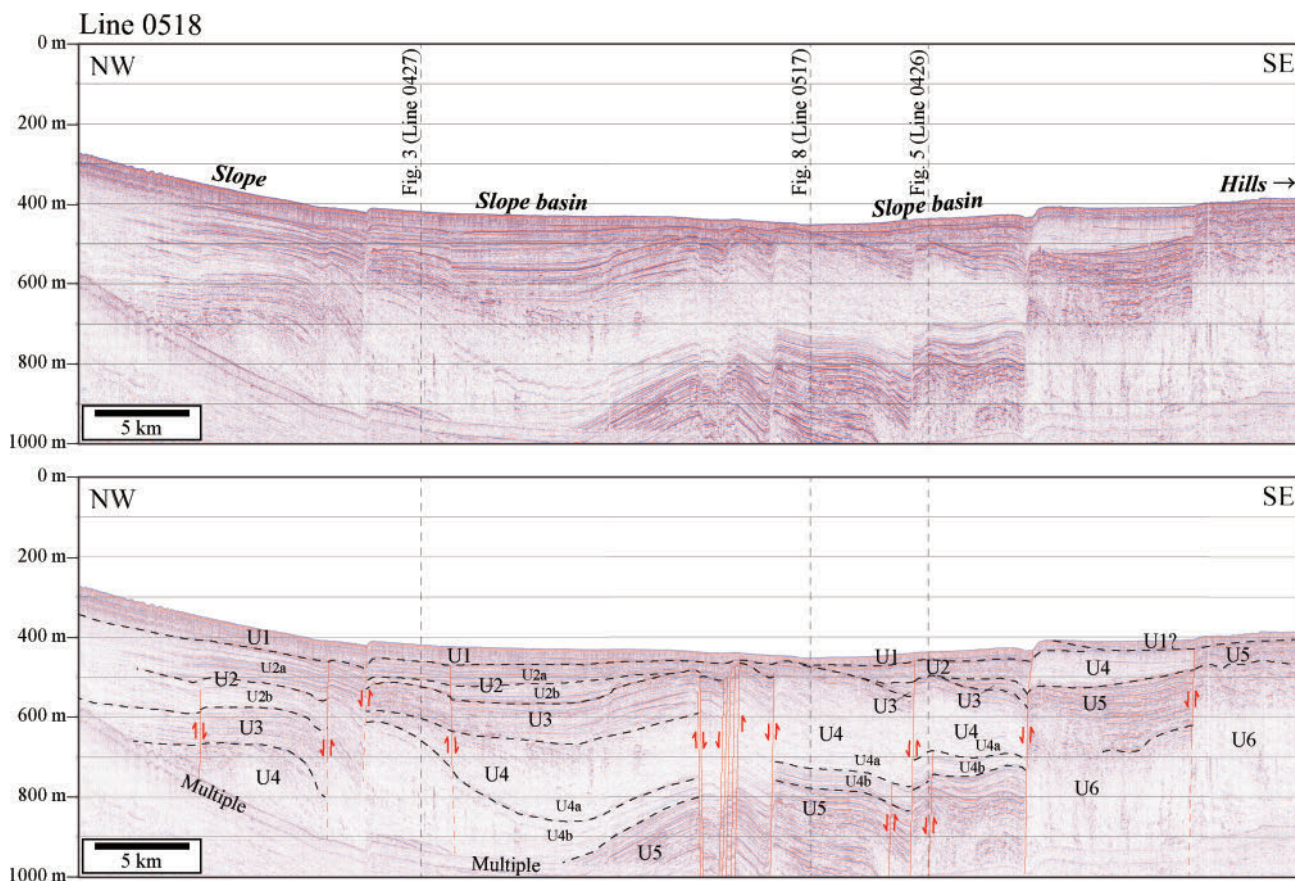


Fig. 2. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of Line 0518. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines. The regions of slope, slope basin, hills and Okinawa Trough are shown in the figure.

図 2. 測線 0518 の反射断面の原記録 (図上部) 及び解釈図 (図下部). 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. 黒破線は不整合面を示す. 垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す. 図中には斜面, 斜面堆積盆, 地形的高まり及び沖縄トラフの相当部分を示す.

層した内部反射面が部分的に認められるが (Figs. 3-7), 本ユニットの上面以深で連続的に追跡可能な内部反射面が存在せず, かつ内部構造の大部分が不明瞭であるため, 本ユニットが音響基盤である. なお, 本ユニットは沖男女海陵群を構成する地形的高まりの基盤となっている.

U5 も調査海域全体で認められる. 本ユニットの上面は強い反射をもつ不整合面である. また, 沖男女海陵群東部で局所的に起伏に富んだ形状をしている場合がある (Figs. 3, 7). 本ユニットは下位の U6 に対してオンラップする. 本ユニットの層厚は最大で 150 m 程度で, 南部方向及びトラフ方向に向かって層厚が薄化する傾向がある. 本ユニットの内部構造は全域を通して極めて強い

内部反射面で特徴づけられる. 特に, ユニット上部では連続性の良い成層した内部反射面がみられるが, 下部では局所的にカオティックである.

U4 も調査海域全域で広く認められるユニットである. 本ユニットの上面は調査範囲のほぼ全域で明瞭な削剥面として特徴づけられる不整合面である (Fig. 3). 本ユニットは下位の U5 に対してオンラップする. 本ユニットの層厚は他のユニットに比べて厚く, 調査海域中部から北部で 200 m 近い層厚をもつ箇所も存在する. 本ユニットの内部構造は音響的に透明に見える場合が多いが, ユニット上部に向かって反射面が明瞭になり, 反射面の密度が密になる. また, ユニット最上部では不整合面に斜交した成層構造がわずかにみられる

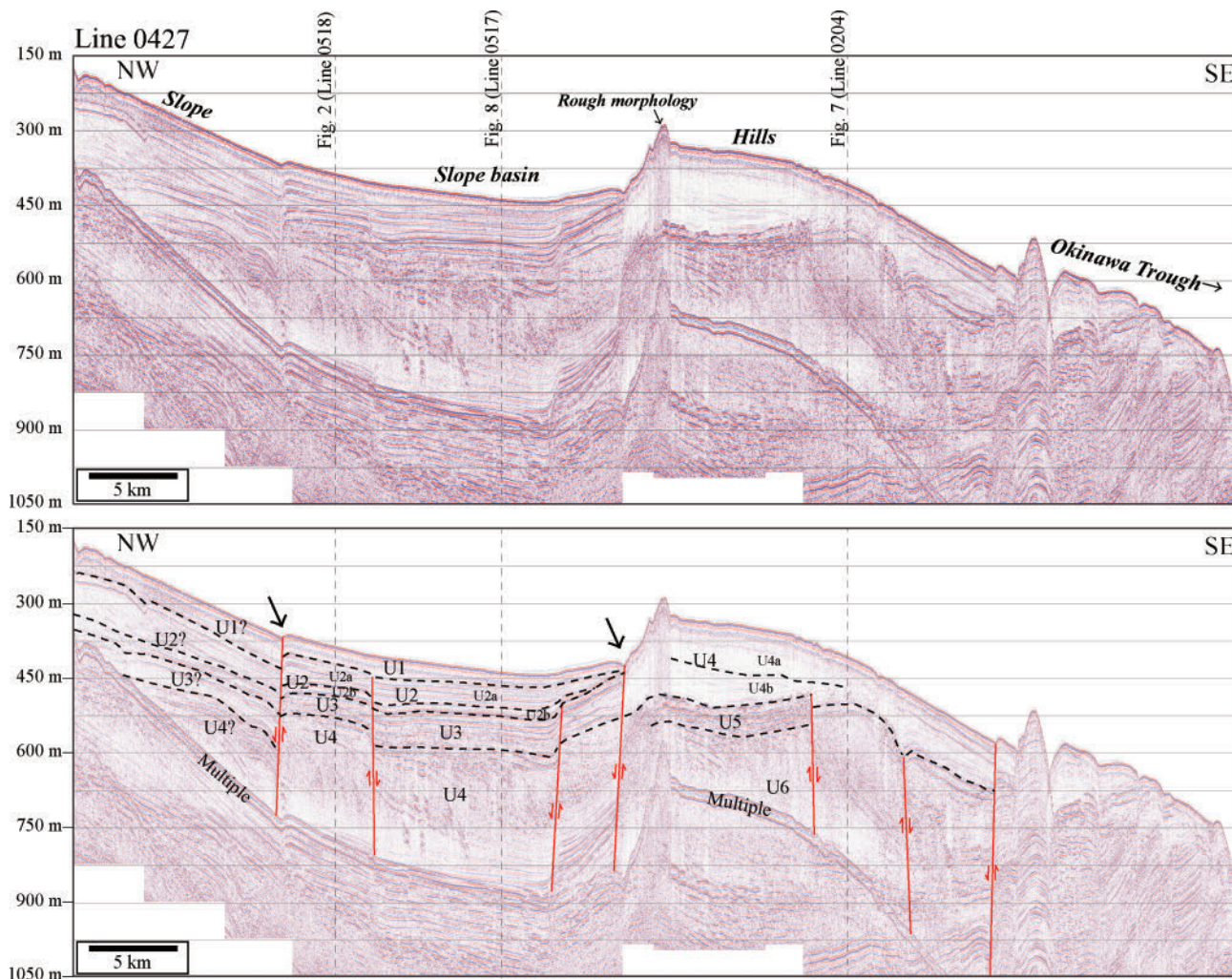


Fig. 3. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of line 0427 across the Oki-Danjo Hills. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Two representative faults are shown in lower panel with black arrows. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines. The regions of slope, slope basin, hills and Okinawa Trough are shown in the figure. Rough morphology is also shown in upper panel with an arrow.

図 3. 沖男女海陵群を横切る測線 0427 の反射断面の原記録 (図上部) 及び解釈図 (図下部)。赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す。二つの代表的な断層を図下部に黒矢印で示す。黒破線は不整合面を示す。垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す。図中には斜面、斜面堆積盆、地形的高まり及び沖縄トラフの相当部分を示す。凹凸地形の相当部分は図上部に矢印で示す。

箇所がある。また、本ユニットは調査海域北部で二つのサブユニット U4a 及び U4b に区分できる箇所がある (Fig. 2)。U4a は U4 の上部を構成し、層厚変化が激しく、最大で 150 m 程度の層厚をもち、内部構造が相対的に透明であることで特徴づけられる。一方、U4b は層厚が 50 m 程度でおおむね一定で、連続性の良い成層した内部反射面がみられることで特徴づけられる (Fig. 2)。

U3 は調査海域の西側で広く認められ、局所的

に地表面または極めて浅部に露出している (Fig. 4)。しかし、地形的高まりの頂部ではみられない。調査海域の谷状の地域を中心に、陸棚斜面と地形的高まりによって形成される U4 の凹地を埋めるように堆積している。なお、本ユニットから上位は斜面堆積盆 (slope basin) を充填するユニットである (Figs. 3-5)。本ユニットの上面は削剥面として特徴づけられる不整合面である。本ユニットは陸棚側で下位の U4 に対してオンラッ

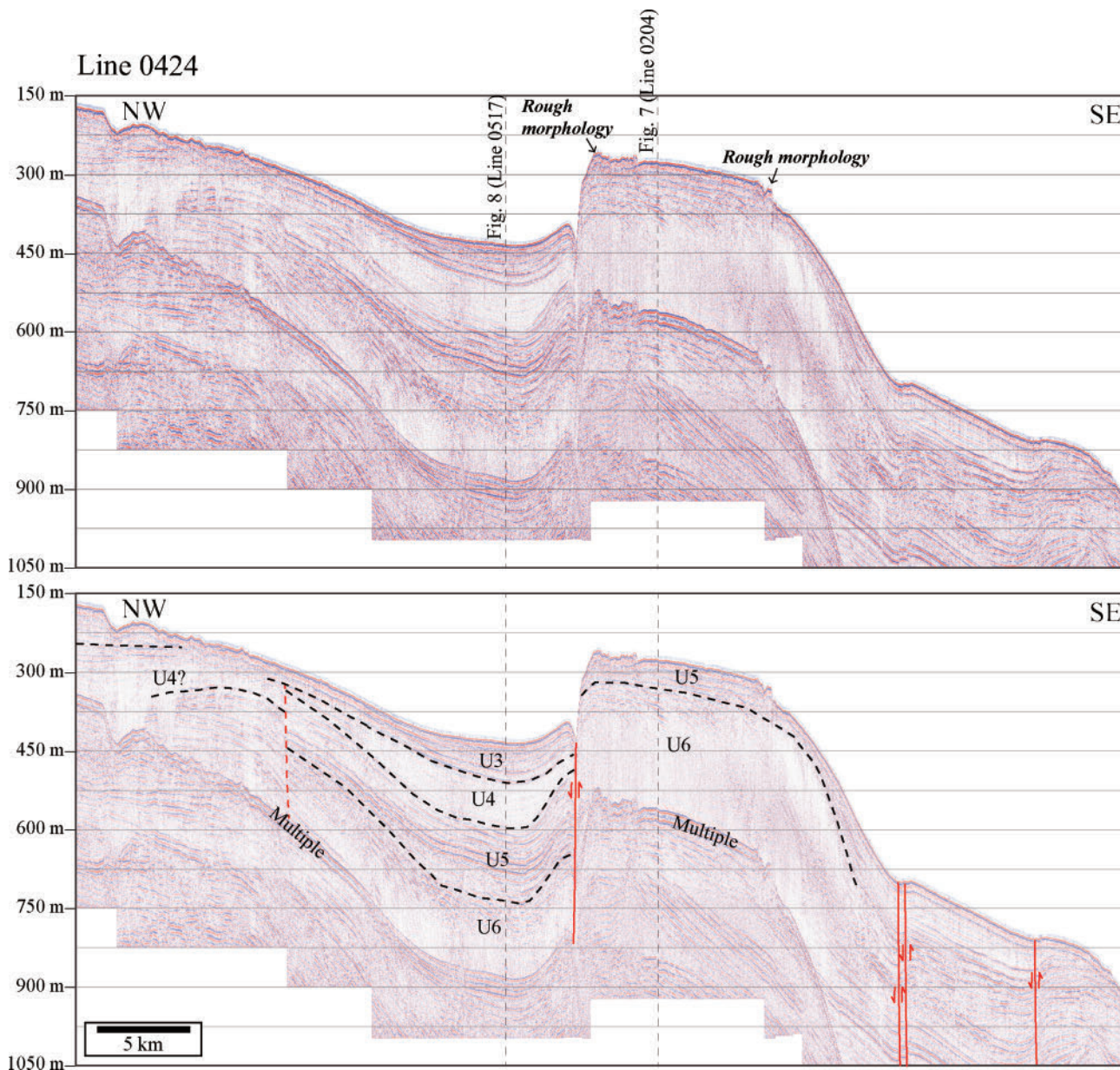


Fig. 4. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of line 0424 across the Oki-Danjo Hills. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines. Rough morphology is shown in upper panel with an arrow.

図 4. 沖男女海陵群を横切る測線 0424 の反射断面の原記録 (図上部) 及び解釈図 (図下部). 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. 黒破線は不整合面を示す. 垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す. 凹凸地形の相当部分は図上部に矢印で示す.

プする. 本ユニットの層厚は最大で 100 m 程度で, おおむね調査海域南部に向かって薄化するが, 局所的に消失する地域もある (Fig. 2). 本ユニットの内部構造は下位の U4 に比べると内部反射が強く, おおむね連続性の良い成層した内部反射面がみられるが局所的にカオティックな部分が

ある.

U2 は本研究で内部構造を判断できる最浅のユニットで, 調査海域の陸棚斜面から斜面堆積盆で広く判別できるユニットであり, 斜面堆積盆を充填するユニットの一つである. しかし, 地形的高まりの頂部ではみられない. 本ユニットの上面は

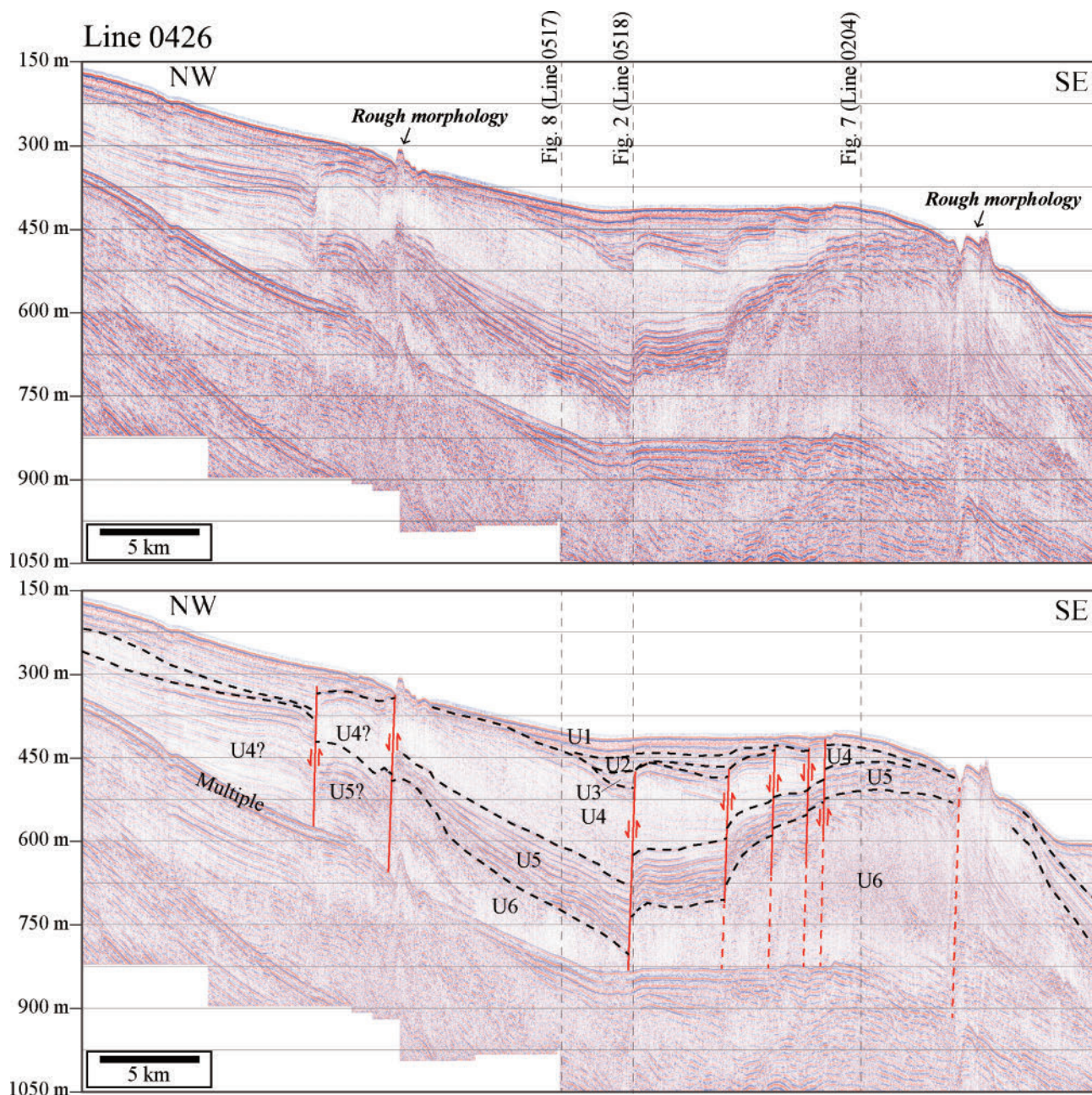


Fig. 5. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of line 0426 across the Oki-Danjo Hills. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines. Rough morphology is shown in upper panel with an arrow.

図5. 沖男女海陵群を横切る測線0426の反射断面の原記録(図上部)及び解釈図(図下部)。赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す。黒破線は不整合面を示す。垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す。凹凸地形の相当部分は図上部に矢印で示す。

陸棚側で明瞭な削剥面として認識できる不整合面である (Fig. 3)。本ユニットの下面は下位のU3に対してダウンラップないしはオンラップする。本ユニットの層厚は最大で100 m程度で、下位のU3と同様に調査海域南部に向かって薄化する

傾向にある (Fig. 2)。一部断層による変形は受けているが、内部構造はおおむね連続性の良い明瞭な成層した内部反射面がみられる (Fig. 2)。測線によっては内部を2つのサブユニットに分けられる箇所があり、上位のサブユニットをU2a、下位

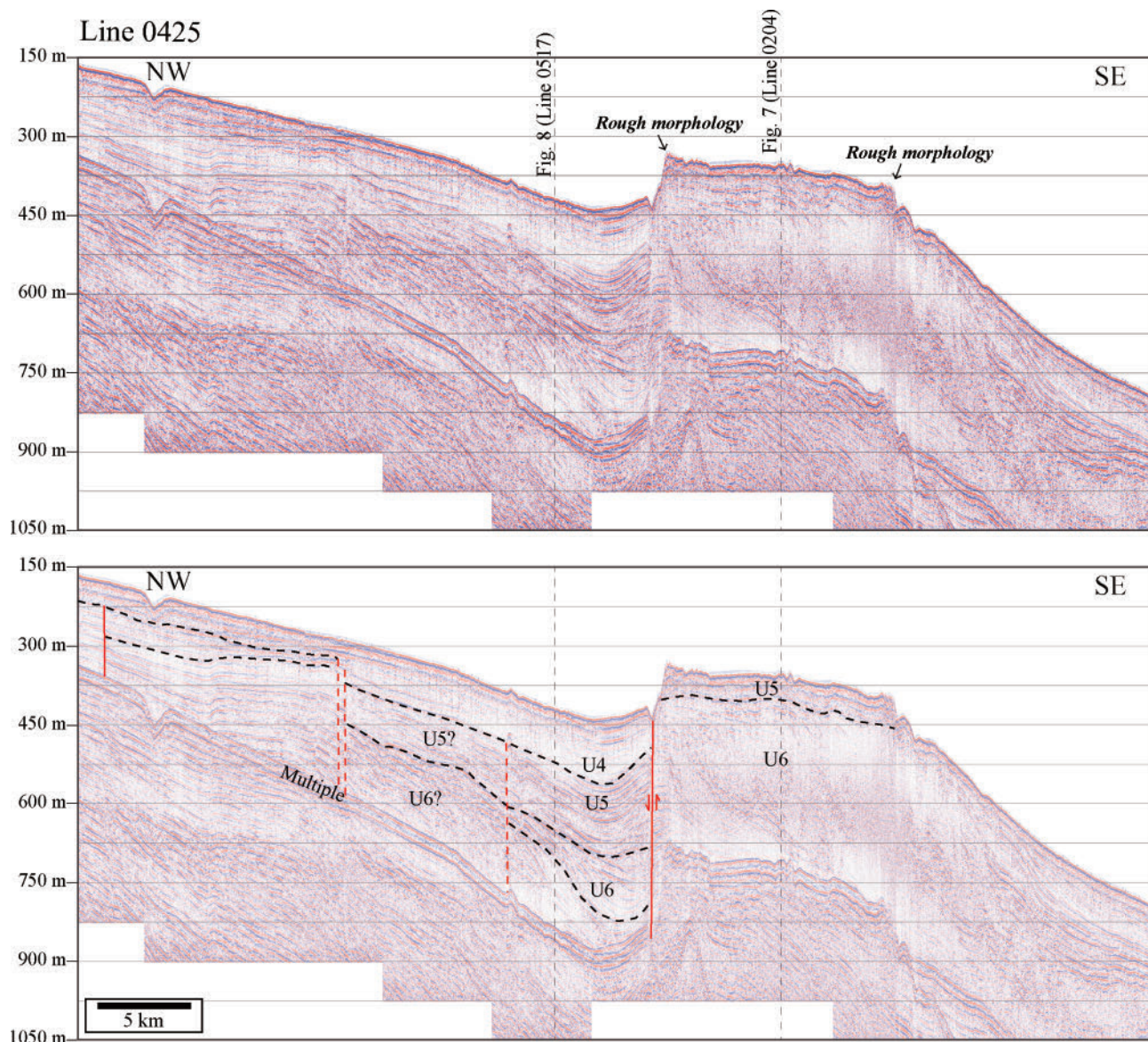


Fig. 6. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of line 0425. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines. Rough morphology is shown in upper panel with an arrow.

図 6. 測線 0425 の反射断面の原記録 (図上部) 及び解釈図 (図下部). 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. 黒破線は不整合面を示す. 垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す. 凹凸地形の相当部分は図上部に矢印で示す.

のサブユニットを U2b と名付ける (Figs. 2, 3). U2a は反射が強く内部反射面の密度が密な一方, U2b は相対的に音響的に透明で内部反射面の密度が疎であり, U2a は U2b に対してわずかに斜交する内部反射面をもち, 下位のサブユニット U2b 上面に対してダウンラップないしはオンラップする (Figs. 2, 3). しかし, これらのサブユニットは部分的に境界が不明瞭な箇所がある.

U1 は陸棚側最浅部を構成するユニットで上面が海底面である. 本ユニットは下位の U2 に対してオンラップないしはダウンラップが認められる. 陸棚から斜面堆積盆にかけておおむね層厚が一定である. 地形的高まりの頂部ではみられない. 内部構造に関しては本研究で用いたエアガンに起因したゴースト等の影響で内部構造は殆ど判別できない. そのため, 実際には複数のサブユ

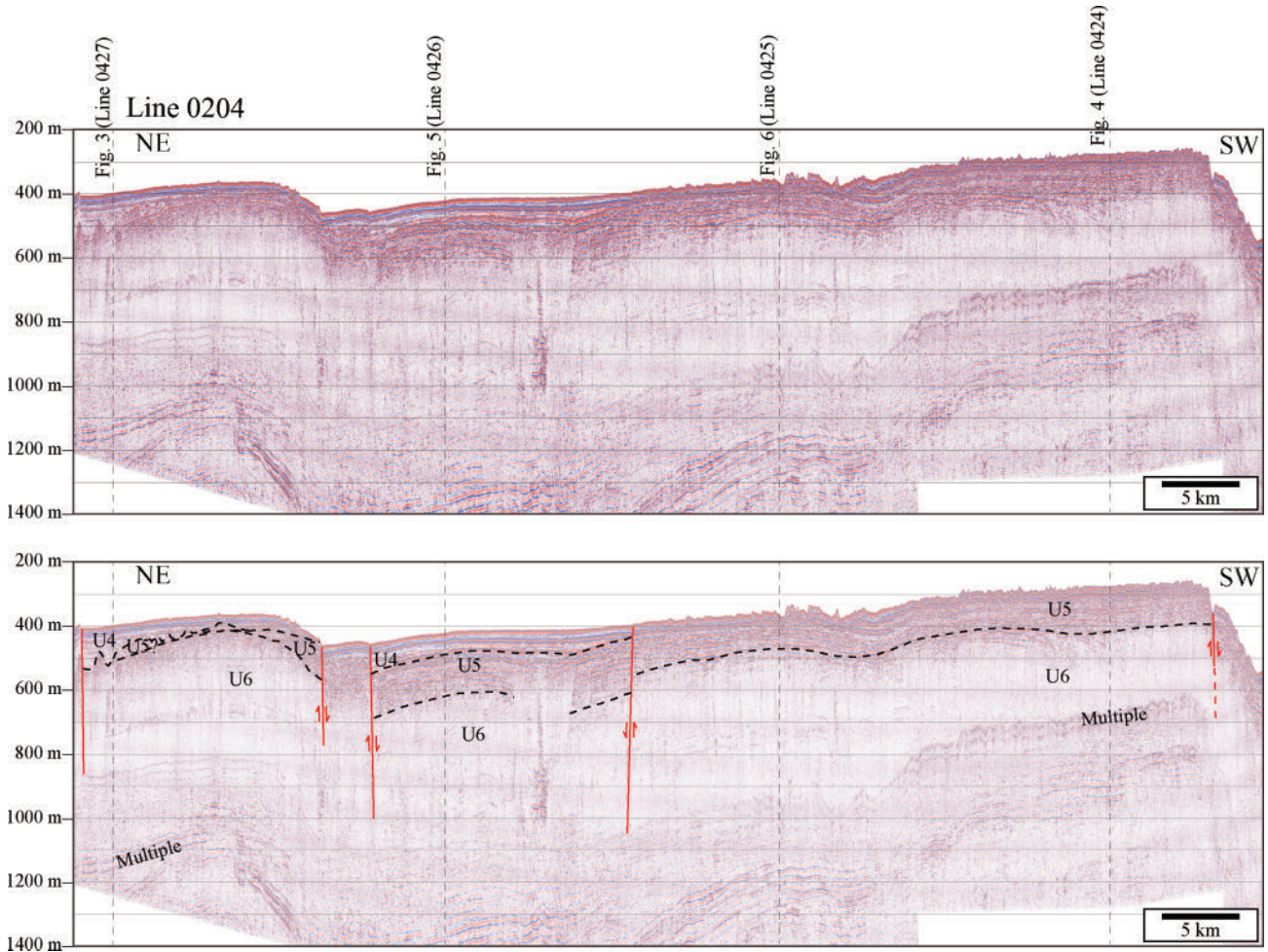


Fig. 7. Original (upper) and interpreted (lower) seismic profile of line 0204. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines.

図 7. 測線 0204 の反射断面の原記録 (図上部) 及び解釈図 (図下部). 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. 黒破線は不整合面を示す. 垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す.

ニットを含む可能性があるが、便宜的に一つのユニットとして扱う。なお、ユニット下部では部分的に内部反射面が認められる箇所がある。

これらの区分の結果、U1 と U2 の境界、U3 と U4 の境界、U5 と U6 の境界では明瞭な削剥面がみられ、これらがシーケンス境界と判断できる。すなわち、U2 上面、U4 上面及び U6 上面がラビーンメント面である。

3.2.2 二種類の断層

調査海域では先行研究でも報告されている通り多数の断層が発達している (Nishizawa et al., 2019)。本研究で使用する反射断面における不整

合面の不連続が認められるため、それらを整理する必要がある。調査海域における不整合面の不連続のうち、代表的なものを Fig. 9 に示す。各反射断面の解釈により同一の不整合面と判断できるものを追跡した結果、こうした不整合面の不連続の殆どは縦ずれ変位を伴うものであり、これらが断層と判断できる。

調査海域に発達するこの断層 (群) は、ほぼすべてが二次元的には正断層変位を持ち、大きく二種類の断層 (群) に区別される (Fig. 9)。一方は、Fig. 9a のような、単独で大きな断層変位を持ち、同時に大きな地形的変位を生むような断層である。もう一方は Fig. 9b のような、個々の断

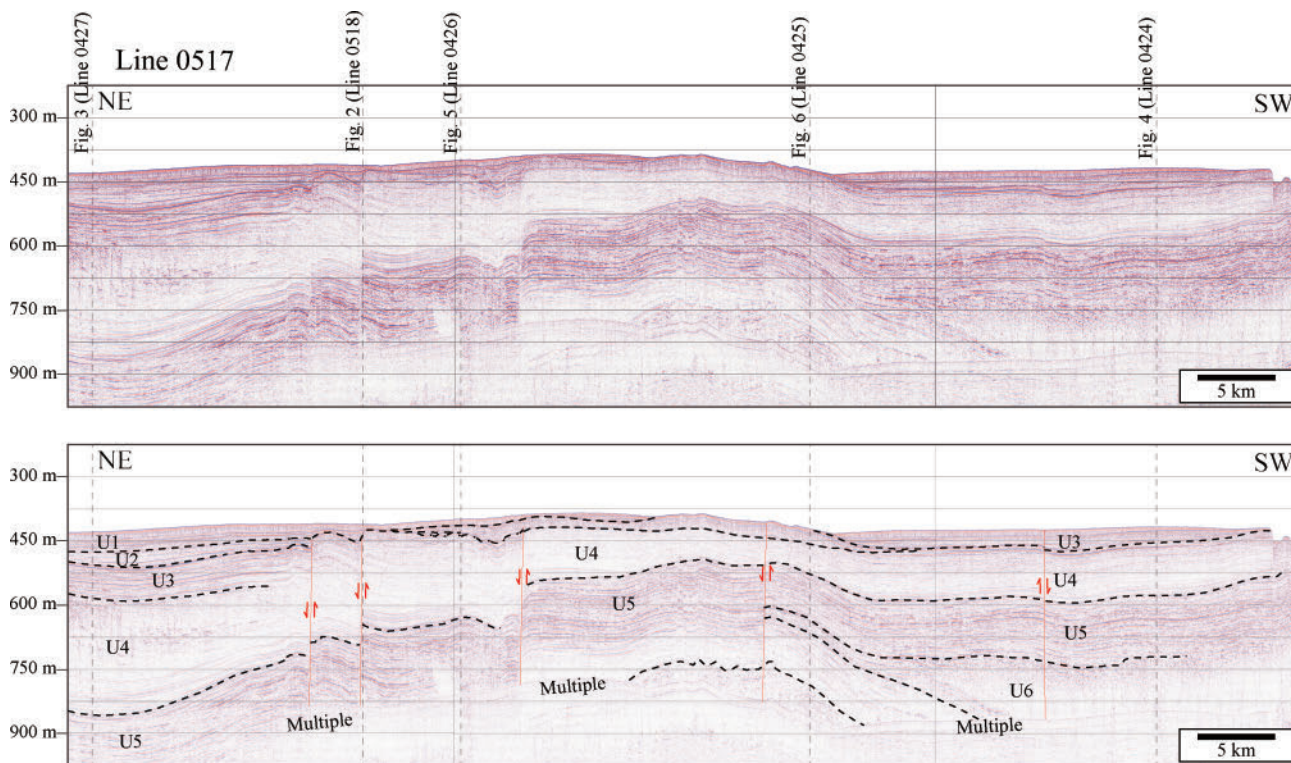


Fig. 8. Original (upper) and interpreted (lower) seismic reflection profile of line 0517. Red lines and red arrows represent major faults and its direction of displacement. Dashed black lines indicate discontinuities. Vertical gray dashed lines mark cross points between the survey lines.

図8. 測線0517の反射断面の原記録(図上部)及び解釈図(図下部). 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. 黒破線は不整合面を示す. 垂直の灰色破線は測線同士の交点を表す.

層変位は小さいが複数の断層が集中して存在し、堆積物に覆われているために地表変位が認められないまたは小さいものである。前者の断層は主に沖男女海陵群の地形的高まりを横断するような測線 (Figs. 3, 4, 6) でみられ、最大で 200 m 程度に及ぶ変位をもつ。断層の地表変位がある場合は最大で 150 m 程度の断層崖を形成する。特定の断層について、異なる深度の不整合面等に注目すると、深部に存在する不整合面ほど断層変位が大きいことが特徴である。後者の断層群は地形的高まりの周辺の鞍部を通る測線 (Fig. 5) で顕著であり、個々の断層の変位は相対的に小さく、断層変位の到達している不整合面も様々である。

3.2.3 測線ごとの特徴

調査海域では前述のような多数の断層の存在により、同一測線内での不整合面の連続的な追跡は困難であるものの、複数の交差する測線の組み合

わせにより (Fig. 1)、調査海域の反射断面の中では上記の各ユニットへの対応付けを行うことができた (Figs. 2-8)。

本研究では、まず調査海域の海底下地質構造の代表的な特徴を捉えている測線として、測線 0518 を記載し (Fig. 2)、沖男女海陵群の内部の海底下地質構造の南北差を示す例として測線 0424, 0426 及び 0427 について記載する (Figs. 3-5)。沖男女海陵群には地形的高まりに沿って北東-南西走向の大断層が存在するため、陸棚側から及びトラフ側からの層序の連続的な追跡が困難である。そのため、本研究では沖男女海陵群と斜面堆積盆部分についてのみユニットの区分を記載することとし、陸棚側とトラフ底側への側方連続性については検討を行わなかった。

Fig. 2 は測線 0518 の反射断面である。北西部から順に陸棚斜面、斜面堆積盆、地形的高まりに相当する地域を横切っており、それぞれの構造的

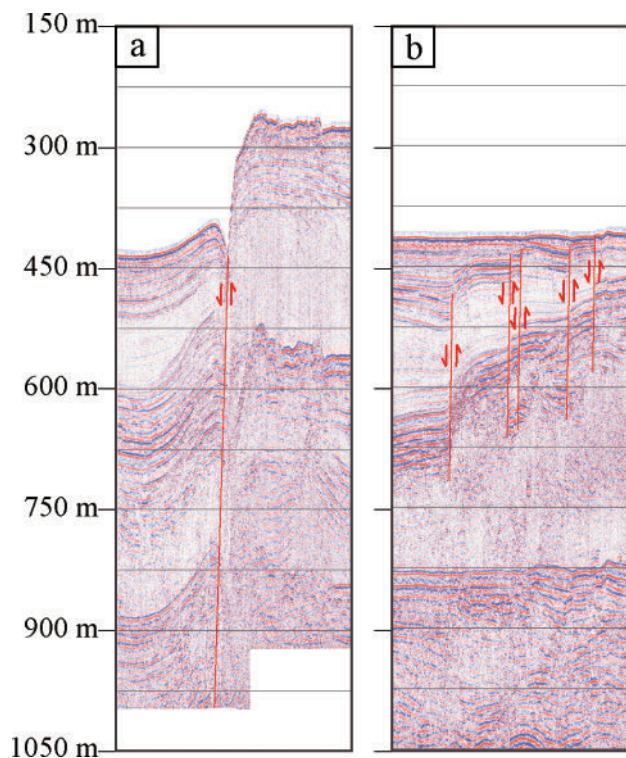


Fig. 9. Two types of typical faults in the study area. Red lines and red arrows represent faults and its direction of displacement. (a) Single fault with huge displacement in Line 0424 (Fig. 4). (b) Multiple faults with relatively slight displacements in Line 0426 (Fig. 5).

図9. 調査海域に見られる代表的な二種類の断層. 赤線及び赤矢印は主要な断層及び断層変位の向きを示す. (a) 測線0424に見られる大変位をもつ単一断層 (Fig. 4). (b) 測線0426に見られる小変位の断層群 (Fig. 5).

特徴を網羅的に捉えている測線である. 北西部や南東部で Fig. 9a に相当する大変位の断層が, 図の中央部で Fig. 9b に相当する小変位の断層群がみられる. 多くは北西落ちの正断層である. 測線を通して各ユニットの変形が大きく, U3より下位のユニットで特に顕著である. 測線北西ではU1からU4までが認められるのに対し, 南東部に向かってこれらのユニットは断層変位を伴いながら薄化または消滅する. 一方, 南東部ではU5及びU6が浅部に現れるようになる.

Fig. 3に沖男女海陵群中部に相当する高まりを横切る測線0427の反射断面を示す. 様々な不整合面に到達する断層が存在するが, 一部は海底面

に到達している. 図中の主要な断層は赤線で示しているが, 地質構造に特に大きな変位を与える断層は矢印で示す二本の断層である. 多くの不整合面は陸棚側及びトラフ側から連続的に追跡できないため, 一部のユニット区分はユニット内部の構造的特徴からの推察に留まる. 斜面堆積盆では, 陸棚側でU1からU4まで判別できるのに対し, 地形的高まり部分では最上位にU4が認められ, それ以下にU5及びU6が判別できる. しかし, 本測線内では斜面堆積盆と地形的高まりでU4の見かけは異なり, 斜面堆積盆では傾斜して成層した内部反射面が明瞭であるのに対し, 地形的高まりでは全体として内部反射面が不明瞭である. 斜面堆積盆においてはU4上部で不整合面に斜交した成層構造が明瞭である. U1及びU2は南東のトラフ側に向かって薄化する一方, U3より下位のユニットは断層による変位, 変形の影響を強く受けているが反射断面内での見かけ上の層厚は大きく変化しない. また, 地形的高まりの縁辺部で音響的に無反射な凸地形があり, 調査海域を縦断する凹凸地形 (Fig. 10) に対応している.

Fig. 4に沖男女海陵群で最南部の高まりを横切る測線0424の反射断面を示す. この測線では, 測線中央部の地形的高まりの北西側に100 m程度の断層崖を形成する, 調査海域で最大規模の変位をもつ断層を含んでいる. この断層はU6上面については300 m程度, U5上面では150 m程度の大きな変位量をもつ正断層である. 陸棚斜面側でも複数の断層が認められるが, 内部反射面がいずれも不明瞭であるため断層変位は明確ではない. その他も全体を通して内部構造が透明または内部反射面が不明瞭な箇所があるが, 複数の測線の反射断面を用いた不整合面の追跡の結果, 地形的高まりを構成する最浅部のユニットは, Fig. 3において地形的高まり表層を構成するU4よりも一つ下位のユニットU5であることがわかった (例えば Fig. 7). Fig. 8の南部ではU1及びU2が欠如していることから, 斜面堆積盆内で最浅層に分布するのはU3と推定されるが, 他測線からの連続性は担保されていない. 地形的高まりの東西

縁辺では凹凸地形があり、音響的に無反射の箇所がみられ、調査海域を縦断する凹凸地形 (Fig. 10) に対応している。

Fig. 5 に Fig. 3 と Fig. 4 の測線の間位置し、沖男女海陵群の地形的高まりの間の鞍部を横切る測線 0426 の反射断面を示す。内部構造は他の測線と同様に U1 から U6 が判別でき、Fig. 9b に相当する明瞭な多数の断層群で切られている。これらの断層はいずれも正断層である。Fig. 3 及び Fig. 4 にみられる斜面堆積盆と地形的高まりを隔てるような Fig. 9a に相当する変位の大きな断層は存在しない。多くの断層は深部は U6 内部で不明瞭になり、浅部では U4 ないしは U3 の上面まで到達しているものが多く、U1 及び U2 にはほとんど変位を及ぼしていない。U4 及び U5 は断層による変形が特に大きく、東部にむかって薄化している。Fig. 3 に比べ U4 が地表付近に存在し、U2 及び U3 は斜面堆積盆中のさらに小規模な U4 の凹地を埋めるようにわずかに分布するのみである。測線に沿った海底面はゆるやかな斜面であるが、他の測線と同様に東側で U5 及び U6 が凸構造を呈しており地表近くに存在している。

本研究で解釈のために用いたその他の測線の反射断面は Figs. 6-8 に同様の記載方法にて示している。

4 考察

4.1 海底地形と断層分布

調査海域の海底地形と反射断面を総合的に解釈することで、調査海域の断層分布について示唆を与えることができる。海底地形から観察される、地形的高まりの縁辺に沿って存在する溝状の構造は断層、特に変位の大きな断層 (Fig. 9a) によって形成されることが確認できた。また、地形的高まりの縁辺部以外にもみられるリニアメントについても断層であることが確認でき、こうしたリニアメントは、海域を俯瞰するとおおむね北東-南西方向に分布している (Fig. 10)。本研究で反射法地震波探査の測線の通っていない場所についても、類似の地形的特徴についてはおおむね断層に

よって形成されたものであると考えられる (Fig. 10)。北部沖縄トラフにおける断層分布については大岩根・他 (2007)、Minami (2025) 等の先行研究により、詳細な検討がなされ、二種類の走向をもつ断層群があることが指摘されている。これらは 7 Ma 頃に沖縄トラフ形成が開始したことによる横ずれ成分を伴う北北東-南南西走向の断層群と、現在の九州中央部から男女海盆にかけての応力場を反映した東北東-西南西走向の断層群だと考えられており、沖男女海陵群にみられる断層群もこれらの断層群の南方延長である可能性があるが、いずれの断層帯に属するかについては本研究のデータだけからは断定できない。

調査海域でみられる断層は反射断面上で正断層の特徴を示した。これは沖縄トラフの形成に伴う正断層群の発達 (例えば Gungor et al., 2012; Nishizawa et al., 2019) を考慮すれば整合的である。特に大変位をもつ断層については、深部のユニットほど大きな鉛直方向の変位をもつ傾向がみられる。例えば、Fig. 2 の南東の断層では、U4 上面で 100 m 程度の変位であるのに対し、U5 上面では 200 m 程度の変位をもつ。同様に、Fig. 3 でも U4 上面で 100 m 程度、U5 上面で 200 m 程度の変位をもつ。こうした傾向は断層運動が一時的なイベントではなく、複数回のイベントが存在したことを示唆している。また、大変位を生む断層の多くは U3 または U4 の上面まで至るものであり、それより上位のユニットに対しては大きな変位をもたらしていない。このことは、これらの断層を生む活動が主に U3 の形成時期までに起こったことを示唆する。一方、一部の断層は海底面まで到達しているうえ、現在も継続して活動的な断層である可能性がある。

断層の両側の対応するユニットを比較すると、単一反射断面内で同一ユニットの層厚が一致しない場合がある。この原因としては次の二つの可能性のいずれかまたは両方によるものと考えられる。一つは、測線に対して直交する向きで層厚に大きな変化がある場合、断層が正断層成分だけではなく横ずれ成分を大きく含んでいることで、見

かけ上の不一致を引き起こす可能性である。調査海域の南縁はトカラギャップの北西方延長上に位置するだけでなく（例えば木村, 1996）、大岩根・他（2007）等では沖縄トラフ北端部において甞島等の陸上調査の結果から、断層が横ずれ成分を伴うことを示している。また、先行研究による応力パターンの推定の結果からも、調査海域周辺は横ずれ成分に卓越しているとされる地域に位置する（例えば Terakawa and Matsu'Ura, 2010; Kubo and Fukuyama, 2003）。これらは調査海域でみられる断層に横ずれ成分が卓越している可能性があることと整合的である一方、二次元反射法探査では横ずれ成分を伴うことを明示的に示すのは困難である。もう一つの理由は断層変位の大きいと推定されるユニット（U3 及び U4）の形成時に、堆積と断層運動が同時に起こっていた可能性である。本研究の反射断面の多くでは断層による変位と同時に断層に向かって変形を被った成層構造が観察されることはこれに整合的である。

こうしたことを総合すると、海域全体として沖縄トラフ形成に伴う正断層運動と、周辺海域でも指摘されている横ずれ運動が複合的に関わった結果、複数のブロックに隔たれ現在の地形の基盤となる起伏をもった構造が形成されたことが示唆される（Fig. 10）。調査海域にみられる二種類の断層（群）は、こうしたブロックの制約により、単一の断層で複数回の断層運動を経験したか、断層運動ごとに変位を形成する位置を移動することで断層群を形成したかの差異を反映している可能性がある（Fig. 9）。

4.2 沖男女海陵群におけるユニット区分

本研究における調査海域の反射断面のユニットについて、個別に年代値を当てはめることはできないものの、三つのラビーンメント面が認められることから、本研究で得られたデータの範囲内で少なくとも三回の海進海退サイクルを繰り返した可能性がある。沖男女海陵群の地形的高まりの一部では、海底面の反射が極めて強く、起伏に富み、音響的に無反射で海底下の構造が極めて不明

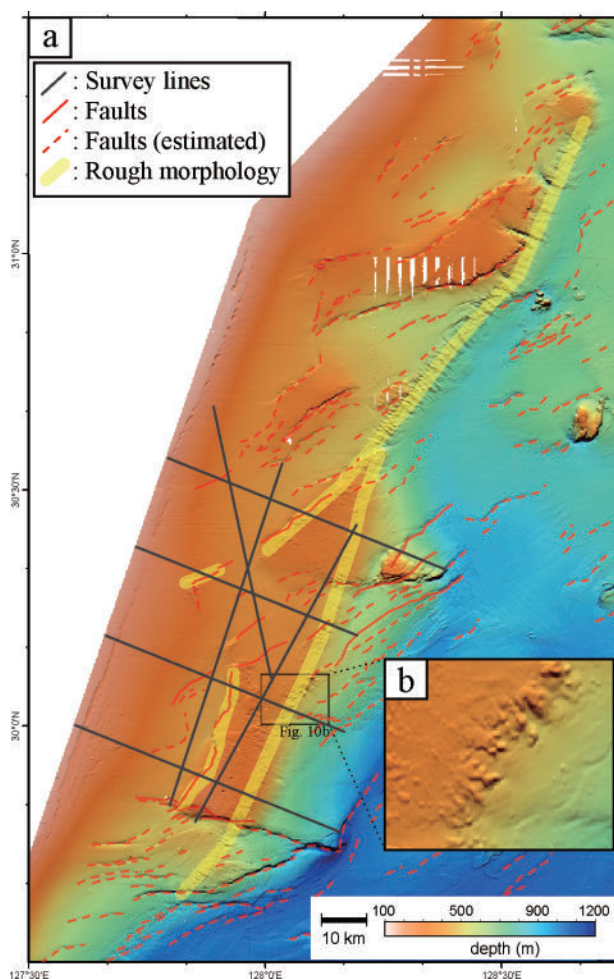


Fig. 10. Structural map of the study area. Solid gray lines are survey lines. This area is characterized by NNE-SSW or ENE-WSW trending faults and rough morphology appearing along the western slope of the trough. Solid red lines indicate faults based on the bathymetric data and seismic reflection data. Dashed red lines indicate estimated faults based on only bathymetric data. Yellow lines are rough morphology. Inserted box is enlarged bathymetric map around the rough morphology.

図 10. 調査海域の地質構造図。灰色の実線は測線を示す。調査海域は NNE-SSW または ENE-WSW 走向を持つ断層群とトラフの西側縁に沿って存在する凹凸地形で特徴づけられる。赤色の実線は海底地形及び反射法探査データの両者に基づいた断層、赤色の破線は海底地形データのみに基づく推定断層を示す。黄色の線は凹凸地形の相当部分を示しており、挿入した海底地形図は凹凸地形の相当部分を拡大したものである。

瞭な場所がある (Fig. 7). こうした場所は沖男女海陵群に沿って存在する凹凸地形に相当する (Fig. 10). 先行研究から, 北部沖縄トラフ西側斜面では冷湧水などによって形成されたと考えられる自生炭酸塩岩が露出していることが報告されており (Sun et al., 2015; Peng et al., 2017; Li et al., 2018; Yang et al., 2022; 青木・他, 2023b; 青木・他, 2024), 海底面での強い反射はこうした露岩の影響によるものと考えられる. 一方, 本研究で明らかになった断層の分布と先行研究で報告されている炭酸塩岩の分布の間に明瞭な相関は認められない. 凹凸地形の北方延長では海底面に凹凸地形がみられない箇所でも海底下に類似の局所的に起伏に富んだ不整合面がみられ, こうした露岩域が埋伏しながら点在している可能性を示唆している (Fig. 7).

調査海域の海底下地質構造の特徴として, 地形的高まりと周囲の斜面堆積盆部分で表層付近に存在する大きくユニットが異なることが挙げられる (Figs. 3-6). 斜面堆積盆部分では, 陸棚側からほぼ連続的に堆積していると思われる表層のユニット (U1 又は U3) が広く確認できる. 一方, 地形的高まりの海底下では, 斜面堆積盆では深部に位置するユニットが断層運動により表層付近に露出している (Figs. 2-7). さらに, 地形的高まりで表層に露出するユニットには南北差があることも明らかになった. 例えば, Fig. 3 の測線中央部に位置する高まりでは表層付近に露出するユニットは U4 であるのに対し, Fig. 4 の測線中央部に位置する高まりでは U5 が表層付近に露出している. U4 や U5 は東西方向だけでなく南北方向にも層厚や傾斜の変化に富み (Figs. 7, 8), 地形的高まりの表層付近のユニットの南北の差異は断層変位を生んだタイミングだけでなく, 北部沖縄トラフにおけるテクトニックな運動そのものの南北差を反映したものであると考えられる. こうした南北差を生む要因の検討のためには堆積年代の特定や陸棚側やトラフ側を含めたさらに広域なデータを踏まえた考察を必要とする.

しかし, 本研究の調査海域における堆積層の堆

積年代については, 近隣海域において対比可能なボーリングコア等の参照できる年代情報が存在しないことから特定が困難であった. 今後, 新たなボーリングサンプル等の取得により堆積年代が得られることで, 断層運動のタイミングも含めたテクトニクスへの制約が与えられることが期待される.

5 結論

本研究では北部沖縄トラフ西側斜面に位置する沖男女海陵群及び周辺海域において海底地形調査と反射法地震波探査を行い, 地質ユニット区分及び断層分布の解釈を行った. 反射断面の解釈の結果, 調査海域において少なくとも六つのユニットの区分を行うことができた. また, 調査海域に存在する断層は大きく二種類に区分できた: a) 単一の断層変位が大きく表層変位を生じるもの, b) 変位が小さい断層群として存在し表層変位の小さいもの. 調査海域の地形にみられるリニアメントはおおむねこれらの断層によるものであった. こうした解釈に基づき, 複数の測線を複合的に解釈することにより, いくつかの断層を跨いで不整合面の追跡を行い, 上記の六つのユニットの対応付けを行うことができた. その結果, 沖男女海陵群を構成する地形的高まりにおいては, 周囲よりも下位に位置する U4 や U5 のユニットが地表付近まで露出していることが明らかになった. さらに, 表層付近に露出するユニットについては南北方向でも差異があることが示唆された.

断層による各ユニットの変位に着目すると, 主に U3 よりも下位のユニットの変位量が特に大きく, 断層活動の活発だった期間は U3 の堆積年代以前であったことが示唆される一方, 一部の表層変位をもつような断層は現在も活動的であると考えられる. また, 断層を挟んだユニットの層厚の差異や先行研究を踏まえると, 調査海域の断層は横ずれ成分に卓越していることが示唆された. さらに, 解釈した各不整合, ユニットの特徴から, 解釈した範囲内で少なくとも三回の海進海退サイクルを経験した可能性があるが, 具体的な年代値を

当てはめることは困難である。しかし、沖男女海
陵群を構成する地形的高まりで周辺より古いユ
ニットが露出しており、それに南北差があること
は、断層運動と各堆積層の堆積年代の關係に部分
的な制約を与えられる可能性があるほか、北部沖
縄トラフにおけるテクトニックな運動の地域差に
ついて示唆を与えられる可能性がある。

一方、ボーリング等の手法による直接的な年代
データの欠如から、本研究で区分したユニットに
対して明示的に年代をあてはめることは行わな
かった。今後の調査により、研究対象とする海域
の拡大、調査手法の多面化により、これらが進展
することを期待したい。

謝 辞

本研究で用いた反射断面の解釈にあたっては
故・徳山英一博士、産業技術総合研究所の荒井晃
作博士及び板木拓也博士並びに池原 研博士から
助言をいただき、おおいにお世話になった。海底
地形データの解析にあたっては南 宏樹博士にお
おいにご協力いただいた。データ取得にあたって
は海上保安庁測量船「昭洋」乗組員及び乗船した
海上保安庁海洋情報部職員に昼夜を問わずご尽力
いただいた。この場を借りて御礼申し上げる。ま
た多くの有益なご助言をいただいた査読者及び編
集者の方に、ここに記して感謝の意を表する。

文 献

青木 智・齋藤京太・堀之内龍一・荒井晃作・池
原 研・板木拓也 (2023a) 東シナ海北部陸
棚斜面の地質構造とテクトニクス, 日本地球
惑星科学連合 2023 年大会, 日本地球惑星科
学連合, 千葉, 2023 年 5 月 23 日。

青木 智・南 宏樹・川村紀子・齋藤京太・川上
友希 (2023b) 沖縄トラフ北部陸棚斜面にお
ける広域炭酸塩岩の分布の可能性, 日本地質
学会第 130 年学術大会, 日本地質学会, 京
都, 2023 年 9 月 17 日。doi:10.14863/geoso
cabst.2023.0_238。

青木 智・南 宏樹・川村紀子・齋藤京太・川上

友希 (2024) 沖縄トラフ北部陸棚斜面におけ
る自生炭酸塩岩の形成過程と広域分布, 日本
地球惑星科学連合 2024 年大会, 日本地球惑
星科学連合, 千葉, 2024 年 5 月 29 日。

池原 研・佐藤幹夫・山本博文 (1990) 高分解能
音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作
用, 地質学雑誌, 96, [1], 37-49. doi:10.55
75/geosoc.96.37。

大岩根 尚・藤内智士・清川昌一 (2007) 北部沖
縄トラフと甌島列島北部の構造発達史, 堆積
学研究, 64, 137-141. doi:10.4096/jssj.64.137。

木村政昭 (1996) 琉球弧の第四紀古地理, 地学雜
誌, 105, [3], 259-285. doi:10.5026/jgeo
graphy.105.3_259。

Almendros, J., W. Wilcock, D. Soule, T. Teixidó, L.
Vizcaino, O. Ardanaz, J.L. Granja-Bruña, D.
Martín-Jiménez, X. Yuan, B. Heit, M.C.
Schmidt-Aursch, W. Geissler, R. Dziak, F.
Carrión, A. Ontiveros, R. Abella, E. Carmona,
J.F. Agüi-Fernández, N. Sánchez, I. Serrano, R.
Davoli, Z. Krauss, M. Kidiwela and L. Schmahl
(2020) Geophysical investigation of rifting
and volcanism in the Bransfield strait,
Antarctica, Journal of South American Earth
Science, 104, 102834. doi:10.1016/j.jsames.
2020.102834。

Berné, S., P. Vagner, F. Guichard, G. Lericolais, Z.
Liu, A. Trentesaux, P. Yin and H.I. Yi (2002)
Pleistocene forced regressions and tidal sand
ridges in the East China Sea, Marine Geology,
188, [3-4], 293-315. doi:10.1016/S0025-3227
(02) 00446-2。

Fournier, M., O. Fabbri, J. Angelier, and J.P. Cadet
(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, [B7], 13751-13768. doi:10.
1029/2001JB900010。

GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021

- Grid. doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f.
- Gungor, A., G.H. Lee, H.J. Kim, H.C. Han, M.H. Kang, J. Kim and D. Sunwoo (2012) Structural characteristics of the northern Okinawa Trough and adjacent areas from regional seismic reflection data: Geologic and tectonic implications, *Tectonophysics*, 522–523, 198–207. doi:10.1016/j.tecto.2011.11.027.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough, *Marine and Petroleum Geology*, 2, [3], 222–240. doi:10.1016/0264-8172 (85) 90012-1.
- Kubo, A. and E. Fukuyama (2003), Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes, *Earth and Planetary Science Letters*, 210, [1–2], 305–316. doi:10.1016/S0012-821X (03) 00132-8.
- Li J., X. Peng, S. Bai, Z. Chen, and J.D. Van Nostrand (2018) Biogeochemical processes controlling authigenic carbonate formation within the sediment column from the Okinawa Trough, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 222, 363–382. doi:10.1016/j.gca.2017.10.029.
- 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, [B5], 8169–8184. doi:10.1029/95JB00034.
- Minami, H. (2025) Seafloor morphological studies of rifting in the Okinawa Trough and Ryukyu Arc, Doctoral Dissertation, Graduate School of Science, Kobe University, Kobe, Japan.
- Mitchum, R.M., P.R. Vail, and J.B. Sangree (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, M. Oikawa, D. Horiuchi, Y. Fujioka and C. Okada (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], 21. doi:10.1186/s40623-019-0998-6.
- Oiwane, H., S. Tonai, S. Kiyokawa, Y. Nakamura, Y. Suganuma, and H. Tokuyama (2011) Geomorphological development of the Goto Submarine Canyon, northeastern East China Sea, *Mar. Geol.*, 288, 49–60. doi:10.1016/j.margeo.2011.06.013.
- Peng, X., Z. Guo, S. Chen, Z. Sun, H. Xu, K. Ta, J. Zhang, L. Zhang, J. Li and M. Du (2017) Formation of carbonate pipes in the northern Okinawa Trough linked to strong sulfate exhaustion and iron supply, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 205, 1–13. doi:10.1016/j.gca.2017.02.010.
- Sibuet, J.C., S.K. Hsu, C.T. Shyu, C.S. Liu and B. Taylor (1995) Structural and Kinematic Evolutions of the Okinawa Trough Backarc Basin, *Backarc Basins: Tectonics and Magmatism*, 379, 379. doi:10.1007/978-1-4615-1843-3_9.
- Sun, Z., H. Wei, X. Zhang, L. Shang, X. Yin, Y. Sun, L. Xu, W. Huang and X. Zhang (2015) A unique Fe-rich carbonate chimney associated with cold seeps in the Northern Okinawa Trough, East China Sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 95, 37–53. doi:10.1016/j.dsr.2014.10.005.
- Terakawa, T., and M. Matsu'Ura (2010) The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, 29 [6]. doi:10.1029/2009TC002626.
- Yang, K., Z. Zhu, Y. Dong, W. Zhang and F. Chu (2022) Petrology and geochemistry of cold seep carbonates from the northern Okinawa

Trough, East China Sea: implications to early diagenesis, *Journal of Oceanology and Limnology*, 40, [4], 1338-1403. doi:10.1007/s00343-021-1148-0.

要 旨

海上保安庁海洋情報部の調査によって得られた海底地形データ及び反射法地震波探査データを用いて、北部沖縄トラフ西側斜面に位置する沖男女海陵群及び周辺海域の構造地質記載を行った。海底地形データからは沖男女海陵群の高解像度の地形とともに、地形的高まりに伴って存在する特徴的な溝状の地形が認められた。反射法地震波探査データとあわせることで、断層と地形の密接な対応関係が明らかになった。反射断面からは、調査海域において少なくとも六つの異なるユニットを判別することができた。反射断面の解釈の結果、地形的高まりでは、沖縄トラフ形成に伴う断層運動により、表層近くでは周辺に比べ古いユニットが露出している可能性が明らかになり、海底面付近に露出するユニットについても南北差があることが明らかになった。また、断層運動の主たる活動時期や、横ずれ成分にも卓越した断層運動であったことなどにも示唆が与えられた。こうした沖男女海陵群の構造地質的特徴は、北部沖縄トラフの構造発達史と密接に関係している可能性が高く、今後堆積年代の推定やさらに高密度のデータ取得により制約を与えていく必要がある。