

### AUV「ごんどう」を用いた久米島沖の高分解能海底火山地形調査<sup>†</sup>

長澤亮佑<sup>\*1</sup>, 田中喜年<sup>\*1</sup>, 瀬尾徳常<sup>\*2</sup>, 松野美幸<sup>\*3</sup>, 齊藤康仁<sup>\*1</sup>,  
南 宏樹<sup>\*4</sup>

High resolution near-bottom bathymetric survey of the volcanic  
terrain off Kume Shima with AUV *Gondou*<sup>†</sup>

Ryosuke NAGASAWA<sup>\*1</sup>, Kitoshi TANAKA<sup>\*1</sup>, Noritsune SEO<sup>\*2</sup>,  
Miyuki MATSUNO<sup>\*3</sup>, Koji SAITO<sup>\*1</sup>, and Hiroki MINAMI<sup>\*4</sup>

#### Abstract

In May and June 2016, the Hydrographic and Oceanographic Department of the Japan Coast Guard conducted bathymetric surveys of an unexplored volcanic knoll off Kume Shima with the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) *Gondou*. AUV-collected high resolution bathymetry detected volcanic features such as lava domes or ropy lava flows. These volcanic features were further identified as the high-backscatter intensity area from the shipboard multibeam sonar. The temperature sensor deployed on the AUV recorded an approximately 0.1 °C steep rise at ~ 100 m above the southeastern slope of the knoll. At almost the same time, the side-scan sonar on the AUV detected acoustic water column anomalies rising from the seafloor. These results strongly imply the presence of high-temperature hydrothermal venting.

#### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は、管轄海域における海洋の基盤的情報の収集・整備を目的として、2013年4月から自律型潜水調査機器 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) を用いた調査を実施している (栗田・他, 2013)。AUVは海底に近づいて調査を行うため、調査海域の水深に依らず高分解能の地形データを取得することが可能である。その特性を活かし、南西諸島弧及び沖縄

トラフ周辺の複数の海域では、溶岩流の痕跡や活動的なチムニー (熱水の噴出を伴う尖塔状の地形) 群を発見するなど、活発な火成活動を裏付ける海底地形を数多く捉えてきた (Minami and Ohara, 2016, 2017; 南・他, 2017 など)。

沖縄県久米島西方沖では、産業技術総合研究所を中心とした地形・地質調査により海底火山群が存在することが分かっている (産業技術総合研究所, 2013; 針金・他, 2017 など)。この火山群は、

<sup>†</sup> Received September 15, 2017; Accepted November 20, 2017

\* 1 海洋調査課 大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

\* 2 測量船「明洋」 S/V *Meiyo*

\* 3 航海情報課 Chart and Navigational Information Division

\* 4 元 海洋調査課 大陸棚調査室 Formerly belonged to Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

岩石学的特徴から南西諸島弧南部の火山フロントの島弧火山活動に相当する可能性があると考えられているが、地形的特徴からは沖縄トラフの背弧リフティングによる構造運動の影響も受けていると考えられ、海底火山群とテクトニクスとの関係性について不明な点が多い（針金・他，2015）。また、久米島沖を含む沖縄トラフ中部及び南部に存在する一部の海丘では活発な熱水活動が確認されており（川口・他，2016）、比較的若い火山活動が示唆されるものの、その他の海丘ではAUV等を用いた詳細な調査が行われておらず、海底火山群を理解する上で基盤となるデータが不足している。

本稿では、2016年5月から6月にかけて、これまで他機関による調査が行われていない久米島沖の海丘で実施したAUV潜航調査の結果を報告する。本調査は管轄海域における海洋の基盤的情報の収集・整備に資するとともに、沖縄トラフにおける火山活動の理解に役立つことが期待される。

## 2 調査及びデータ処理の概要

当該海域では測量船「拓洋」のマルチビーム音響測深機を用いた概査を行った後、AUV「ごんどう」(Photo 1)による潜航調査を実施した。これら調査の概要とデータ収録及びデータ処理の流れについて以下に解説する。なお、AUV「ごんどう」により取得された測深データのクオリティチェックについては瀬尾・南(2016)で報告されている。



Photo 1. The exterior of the AUV *Gondou*.  
写真1. AUV「ごんどう」の外観。

### 2.1 調査概要

調査海域は沖縄県久米島の西方、沖縄トラフに位置し、水深は約1,500–2,100 mである。測量船「拓洋」による調査は2015年11月に、AUV「ごんどう」による潜航調査は2016年5月から6月にかけて実施された。

### 2.2 調査機器

#### 2.2.1 AUV「ごんどう」

AUV「ごんどう」に搭載されている観測機器のうち、マルチビーム音響測深機（R2Sonic社製 Sonic2022 200–400 kHz）、サイドスキャンソナー（EdgeTech社製 2200-M 120/410 kHz）、CTD（Conductivity Temperature Depth profiler）センサ（SeaBird社製 SBE 49 FastCAT）を主に使用してデータを取得した。マルチビーム音響測深機のパラメータ設定値をTable 1に示す。サイドスキャンソナーは120 kHzの低周波側ソナーのみを用い、計測レンジを240 mに設定した。ソナーの発振間隔は、マルチビーム音響測深機・サイドスキャンソナーともに1.5秒間に3回の割合とした。

本調査においては測線上を航行中の速力を1.5 m/s（約3ノット）とし、調査高度は海底上100 mを維持するように設定した。なお、海底近傍を航行中のAUVの位置及び速度の推定は、慣性

Table 1. Parameters used for data acquisition with Sonic 2022.

表1. データ収録時におけるSonic 2022のパラメータ設定値。

parameter	value
frequency	350 kHz
sector coverage	120 deg.
transmit power	221 dB
gain	10–24 dB
pulse width	200 $\mu$ s
depth gate: minimum maximum	20 m 200 m
range	260 m

航法装置 (INS ; Inertial Navigation System, iXBlue 社製 PHINS) とドップラ式の対地航行速度測定器 (DVL ; Doppler Velocity Log, Teledyne RDI 社製 Workhorse Navigator 300 kHz) を組み合わせて行われる。また、航行中の水深は水圧式の深度計 (Paroscientific 社製 8CB depth sensor) を用いて測定される。

### 2.2.2 測量船「拓洋」

測量船「拓洋」に装備されたマルチビーム音響測深機 (Kongsberg 社製 EM122) と Kongsberg 社製収録ソフトウェア SIS (Seafloor Information System) を用いてデータを取得した。

## 2.3 データ処理

AUV を用いた潜航調査の計画立案から投入、潜航、浮上、回収にかかる具体的な作業工程については栗田・他 (2013) に詳しく説明されている。本稿では、各観測機器が取得したデータの処理過程に限り解説する。

### 2.3.1 AUV「ごんどう」測深データ

マルチビーム音響測深機 Sonic 2022 が取得したソナーデータ (\*.raw 形式) と、AUV が感知し推定した自機の位置及び動揺の時系列データ (\*.csv 形式) は別ファイルとして記録される。これらをソフトウェア MB-System version 5.4.2176 (Caress and Chayes, 2014) を使用して統合し、ナビゲーションデータ付きのソナーデータファイル (\*.gsf 形式) に変換した。

データ処理にはソフトウェア CARIS HIPS and SIPS 8.1.8 を使用した。\*.gsf 形式のソナーデータファイルを読み込み、手動でのノイズ除去を実施した。測深点のグリiddingには swath angle surface アルゴリズムと称されるスワス角度に基づく重み付け方法を採用し、グリッド間隔は 2 m に設定した。

また、各測線に生じる位置オフセットの補正には、藤沢・瀬尾 (2016) により独自に作成されたツール “shiftnav2d” を使用した。これは二つの測

線で調査領域が重複した部分について、測深値の残差の自乗平均が極小となるように、水平方向の位置オフセット量を自動でサーチするプログラムである。潜航中の AUV に対しては USBL (Ultra Short Base Line) 方式の音響測位によるトラッキングを行っているが、当庁の運用では母船が潜航中の AUV を追従できないことから、精度良くトラッキングを行うことができない。そのため、AUV は海中を航行している間、基本的には INS と DVL の組み合わせで推定する以外には自位置を認識する方法がなく、予定された測線から離れた位置を航走する可能性がある。本調査においても潜航毎に数十 m オーダの系統的な水平位置誤差がみられたが、shiftnav2d の適用によりこれを補正した。また AUV と測量船が取得した測深データとの間で残差をとり、当ツールを適用することで、AUV による調査範囲の絶対的な位置の誤差についても低減させた。

### 2.3.2 AUV「ごんどう」サイドスキャンデータ

サイドスキャンソナーについては、取得画像のウォーターカラム部分に写る水中音響異常の有無を確認する目的で使用した。EdgeTech 2200-M で収録された \*.jsf 形式のデータファイルをソフトウェア CleanSweep v3.7.0 で読み込み、描画した。

### 2.3.3 測量船「拓洋」測深データ

\*.all 形式で収録された測深データを CARIS HIPS and SIPS 8.1.8 に取り込んだ後、手動でのノイズ処理を実施した。グリiddingには CUBE アルゴリズムを用い、グリッド間隔は 30 m に設定した。

## 3 調査結果

### 3.1 測深データ

本調査で取得された海底地形図を Fig. 1 に示す。図中赤色の破線で示した領域が AUV による調査範囲であり、背景には測量船「拓洋」のマルチビーム測深機 EM122 が取得したデータを描画

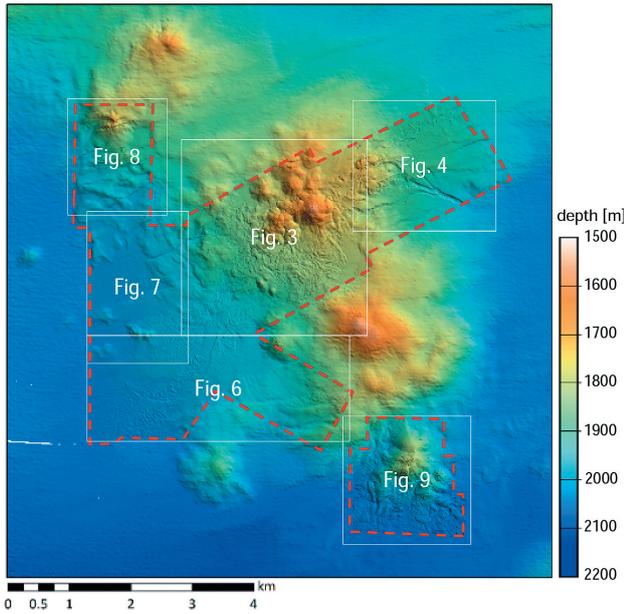


Fig. 1. Bathymetric map acquired by the AUV *Gondou* and S/V *Takuyo*. Red-dashed polygons represent areas surveyed by the AUV *Gondou* (2 m grid). The background image is the multi-beam bathymetric data acquired by the S/V *Takuyo* (30 m grid).

図1. 調査海域の海底地形図。赤破線内がAUV「ごんどう」の調査範囲（2 m グリッド）。背景図は測量船「拓洋」のマルチビーム測深データ（30 m グリッド）。

している。

EM122 測深機が取得した、本調査海域における反射強度の分布図を Fig. 2 に示す。反射強度は海底面の起伏や底質の種類に対応して変化し、一般に、火成岩や熱水活動により形成された硫化物マウンド等の固い物質は、堆積物と比較して高い反射強度を示す傾向にある。AUV 潜航計画の立案に際してはこの反射強度図を参考とし、高い反射強度を示す区域での調査を優先的に実施した。

以下、AUV による調査範囲を Fig. 3, 4, 6, 7, 8, 9 に示す小域に分け、それぞれについて概観する。

### 3.1.1 中央の海丘群とその周辺 (Fig. 3, Fig. 4)

AUV による調査範囲内では最浅の水深約 1,560 m の高まりが存在し、高まりの頂上部には直径約 800 m、比高約 220 m のドーム状の地形が形成

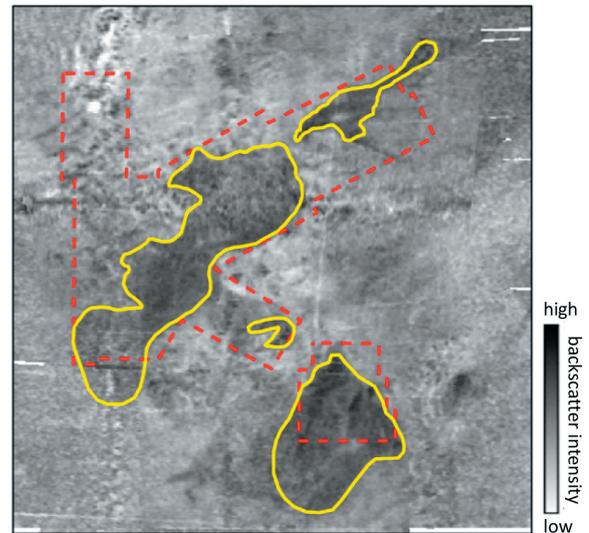


Fig. 2. Backscatter intensity map by S/V *Takuyo* EM122 multi-beam sonar. Darker colors indicate higher backscatter. Solid yellow polygons show extremely high backscatter intensity area. Red-dashed polygons represent areas surveyed by the AUV *Gondou*.

図2. 測量船「拓洋」のEM122測深機で取得した反射強度の分布図。音圧強度が高いほど濃い黒色で表される。反射強度のきわめて高い区域を黄実線で囲んだ。赤破線はAUVの調査範囲。

されている。高まりの周囲には特徴的な縄状の地形が認められる。縄状の地形は高まりの南方及び南西方の広範囲に渡って形成されているほか、高まりやドームの表面にも小規模ではあるが存在している。ドームの南側斜面では、斜面の傾斜方向に沿って周期的に起伏が繰り返される様子が鮮明に捉えられた。反射強度分布 (Fig. 2) と比較すると、ドーム及び縄状の地形に相当する領域はいずれも高い反射強度を示す領域に対応していることから、海底面には堆積物でなく、火成岩等の固い物質が露出している可能性が高い。以上のことから、縄状の地形はその構造及び反射強度の高さを考慮して、溶岩流の痕跡であることが推察される。また、高まりの周囲に溶岩流が存在することが事実であれば、頂上部のドームは溶岩円頂丘である可能性が高い。海丘群周辺の海底地形を三次元で描画した図を Fig. 5 に示す。

海丘群の北東側 (Fig. 4) では起伏に富んだ地形が見られる。中央の海丘群の東側斜面では直径

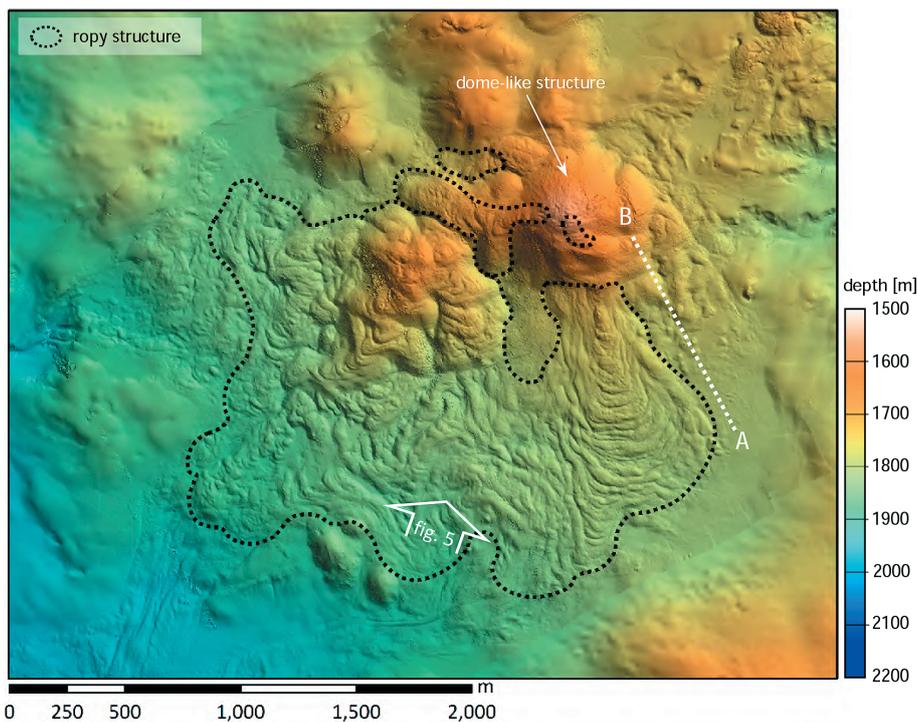


Fig. 3. Bathymetry of the central area, showing the presence of knolls and ropy structures.  
 図 3. 調査海域の中央部に位置する海丘群と縄状の地形.

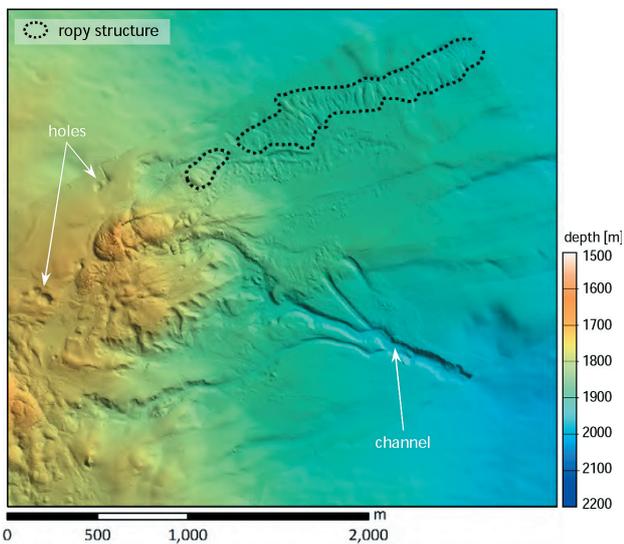


Fig. 4. Bathymetry of the northeastern area, showing the presence of ropy structures and submarine channel.  
 図 4. 調査海域の北東方の縄状の地形と海底チャネル.

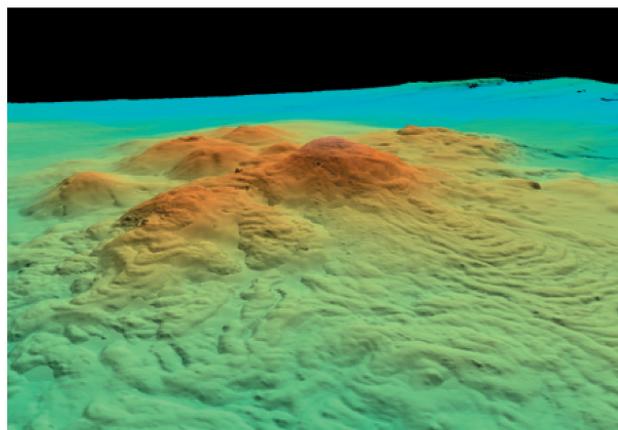


Fig. 5. 3D image of the central knolls, viewed from southwest. Scaling ratio of vertical/horizontal is 1. Relative elevation of the largest knoll is approximately 600 m.  
 図 5. 南西側から望んだ中央海丘群の 3 次元地形表示. 等倍スケールで描画. 最大の高まりの比高は約 600 m.

数十 m オーダの円形の窪地や、半円形にえぐられた崖が各所に存在するほか、海底チャネルが発達している。本調査の範囲内に限れば、チャネルは最大幅が約 100 m、最深部の深さは約 30 m である。高まりの北東方では縄状の地形が連続して

おり、反射強度の高い領域との対応が確認できることから、高まりの南方及び南西方と同様に溶岩流の痕跡であることが示唆される。

### 3.1.2 海丘群の西方域 (Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8)

海丘群の南西方及び西方 (Fig. 6, Fig. 7) では比較的起伏の少ない地形がみられる。中央の高まりから続いているとみられる縄状の地形が不明瞭ではあるが各所に認められ、反射強度の高い領域もこの地形に対応して分布している。調査区域の西端に向かうにつれて海底面は滑らかになり、反射強度も低くなっていることから、表層は堆積物に覆われていることが推測される。Fig. 7では中央の高まり西側の裾野から続くチャンネルが確認で

きる。

海丘群の北西方 (Fig. 8) では、水深約 1,700 m の高まりの斜面に複数のリニアメントが刻まれていることが明瞭に認められる。リニアメントは主に東北東-西南西に走向をもち、南北に約 15-30 m の高低差を形成している。

### 3.1.3 南東部の高まり (Fig. 9)

水深約 1,780 m の高まりが存在し、その山腹及び周囲の海底面には調査海域中央の海丘と同様、

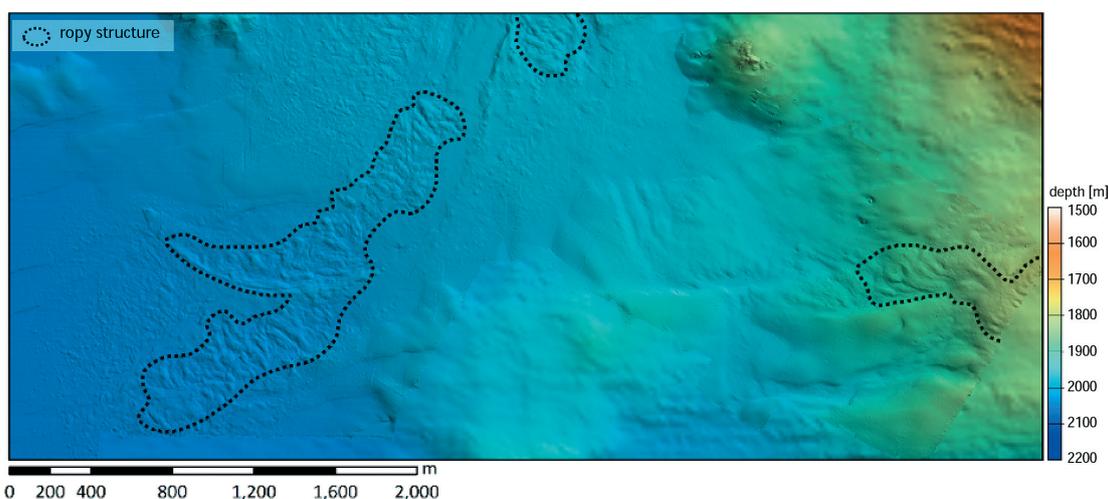


Fig. 6. Bathymetry of the southwestern area, showing irregular structures.

図 6. 調査海域の南西方のイレギュラーな地形。

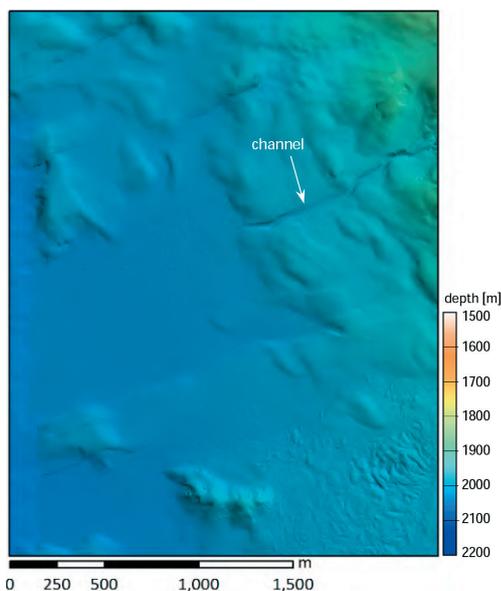


Fig. 7. Bathymetry of the western area, showing irregular structures.

図 7. 調査海域の西方のイレギュラーな地形。

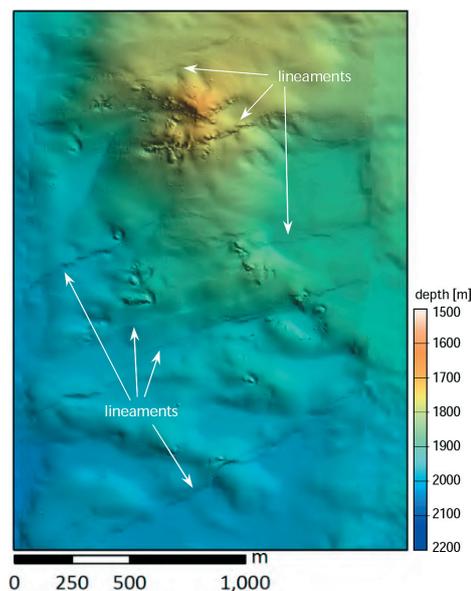


Fig. 8. Bathymetry of the northwestern area, showing the presence of a bathymetric rise.

図 8. 調査海域の北西方の地形的高まり。

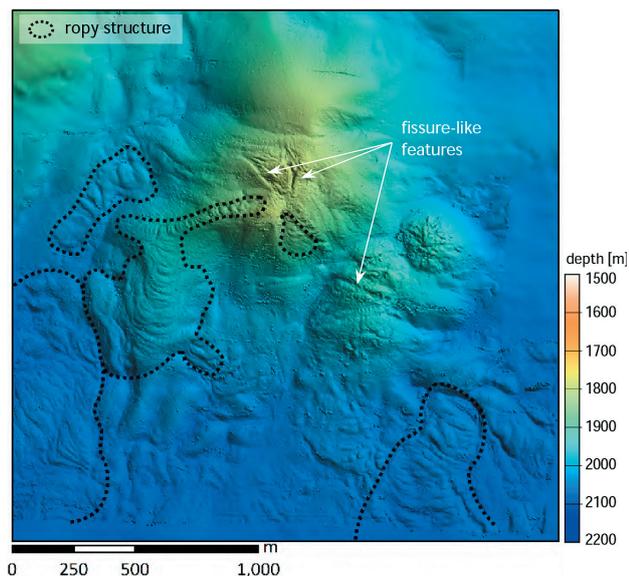


Fig. 9. Bathymetry of the southeastern area, showing the presence of a bathymetric rise.

図9. 調査海域の南東方の地形の高まり.

縄状の地形が顕著に認められる。この高まり周辺では反射強度分布 (Fig. 2) においてきわめて高い音圧強度を示していることから、この縄状の地形についても溶岩流の痕跡であることが示唆される。高まりの山頂部には長さ 100–150 m、比高 20 m ほどの裂け目状の地形が複数存在する。同様の裂け目は、周囲のより比高の低い高まりにも見られる。

### 3.2 サイドスキャンソナー及び CTD データ

水深約 1,560 m の海丘の南東側斜面において AUV 搭載のサイドスキャンソナーが取得した画像からは、ブルーム状の水中音響異常が数本認められた (Fig. 10 (a)). また、AUV 搭載の CTD センサの取得データはこのブルーム付近において約 0.10–0.15°C の局所的な水温上昇を捉えた (Fig. 10 (b)). サイドスキャンソナーの取得画像では、ブルームはいずれも比高 5–10 m 程度の小丘から立ち昇っているものとみられる。同地点における測深データでは直径 30 m ほどの円錐形の地形が複数確認でき (Fig. 11), これらの結果から、熱水を噴出するチムニーやマウンド (円錐状の高まり) の存在が推測される。なお、当該地点以外では、同様の音響異常は見られなかった。

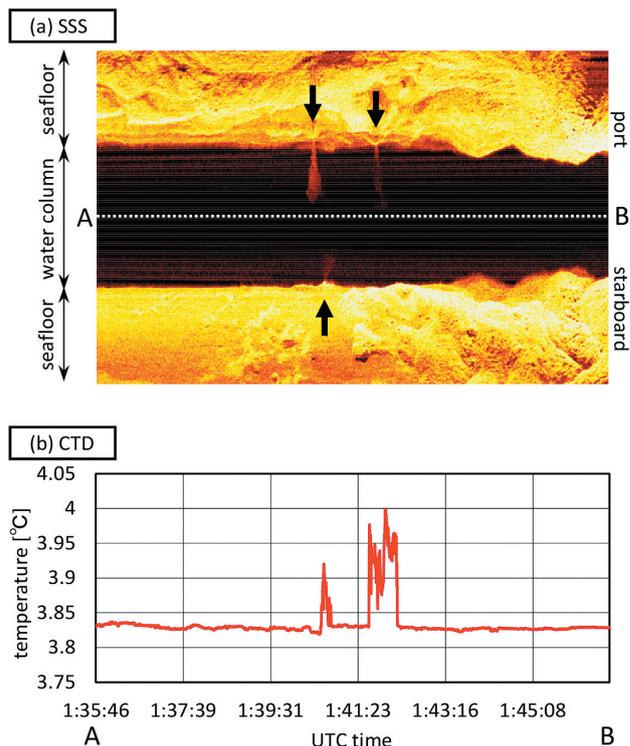


Fig. 10. (a) Side-scan image acquired by the AUV *Gondou*, showing the presence of acoustic anomalies. The line A-B corresponds to the dashed white line A-B in the fig. 3. Black arrows indicate the locations of plume-like acoustic anomalies. (b) Seawater temperature values acquired by the CTD sensor of the AUV at 100 m above the seafloor along the line A-B. The temperature spikes were detected almost coincidentally with the detection of the acoustic anomalies.

図10. (a) 図3の白破線A-Bに沿ってAUVのサイドスキャンソナーが取得した画像。黒矢印で示した箇所にブルーム状の音響異常が認められる。(b) 図3の白破線A-Bに沿ってAUVのCTDセンサが取得した水温変化。海底上100mの高度で計測。横軸は時刻(UTC)。音響異常の観測とほぼ同時刻に水温の顕著な上昇を捉えた。

## 4 まとめ

2016年5月及び6月に沖縄県久米島沖で実施したAUV潜航調査により、火山地形であると推察される特徴的な海底地形の様子が明らかになった。AUVにより取得された高分解能の測深データからは、水深約1,500–2,100mの海底に存在する複数の高まりの周囲に縄状の地形が認められ

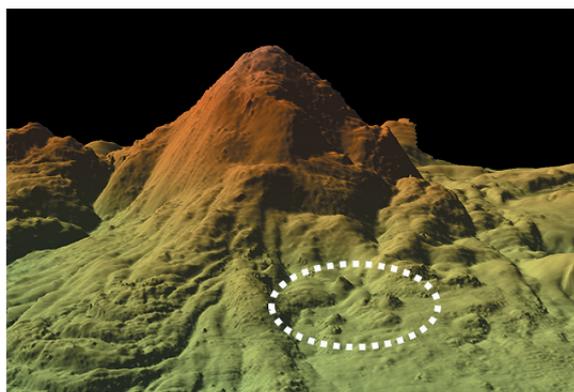


Fig. 11. Detailed 3D image of the central knolls area, showing the southeastern slope. The area circled with the dotted white line corresponds to the area where acoustic anomalies were detected in the side-scan image. Vertical scale is twice as large as horizontal scale.

図 11. 水中音響異常が観測された中央海丘群の南東斜面の 3 次元地形図。図中の白破線内の領域がサイドスキャン画像で音響異常が検出された箇所に相当する。鉛直方向のスケールを 2 倍に誇張している。

た。それらは溶岩流の痕跡であると推察され、また一部の高まりで観測されたドーム状の地形は溶岩円頂丘である可能性がある。熱水の兆候については、測量船「拓洋」による事前の調査で水中音響異常が検出されなかったことから確認されていなかったが、AUV によって初めてそれを示唆するデータが取得された。局所的に海水温の顕著な上昇を認め、同時に AUV 搭載のサイドスキャンソナーではブルーム状の水中音響異常を検出した。

### 謝 辞

本調査の実施にあたり格別のご配慮とご協力を賜り、AUV の運用を遂行してくださいました測量船「拓洋」船長ならびに乗組員の皆様方に心より感謝申し上げます。

### 文 献

Caress, D. W. and D. N. Chayes (2014) MBSYSTEM Ver.5.4.2176.  
藤沢美幸・瀬尾徳常 (2016) AUV「ごんどう」

で取得した海底地形データの位置補正プログラムの作成、平成 27 年度海洋情報部研究成果発表会要旨集。

針金由美子・石塚 治・下田 玄・佐藤太一 (2015) 久米島西方沖海域で発見された海底火山群の岩石学的特徴, 日本火山学会講演予稿集。

針金由美子・石塚 治・下田 玄・佐藤太一・佐藤智之・正木裕香・熊谷英憲 (2017) NT14-22 航海報告: 沖縄県久米島西方沖海域で発見された海底火山群の構造発達史解明にむけて, ブルーアース 2017 要旨集。

川口慎介・熊谷英憲・中村謙太郎・北田数也 (2016) 沖縄トラフ中部および南部の熱水活動兆候域での「かいこう Mk-IV」潜航調査, ブルーアース 2016 要旨集。

栗田洋和・瀬田英憲・梅田安則・南 宏樹・井城秀一・大泊理八・橋詰未来 (2013) 自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用, 海洋情報部研究報告, 51, 98-105。

Minami, H. and Y. Ohara, (2016) Detailed morphology and bubble plumes of Daiichi-Amami Knoll in the central Ryukyu Arc, *Marine Geology*, 373, 55-63, doi:10.1016/j.margeo.2016.01.008.

Minami, H. and Y. Ohara, (2017) The Gondou hydrothermal field in the Ryukyu Arc: A huge hydrothermal system on the flank of a caldera volcano, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 18, 3489-3516, doi:10.1002/2017GC006868.

南 宏樹・瀬尾徳常・長澤亮佑・田中喜年・齊藤康仁・松野美幸・井城秀一 (2017) AUV 調査によって明らかになった南西諸島南部の海底地形の溶岩流地形, 平成 28 年度海洋情報部研究成果発表会要旨集。

産業技術総合研究所 (2013) 地質情報研究部門 平成 24 年度年報。

瀬尾徳常・南 宏樹 (2015) AUV「ごんどう」を用いた高分解能海底地形調査～データ処理方法の概要及びその実例～, 海洋情報部研究

報告, 52, 40-48.

### 要 旨

海上保安庁海洋情報部は、2016年に久米島沖海域においてAUVを用いた精密な海底地形調査を実施した。調査の結果、火山地形であると考えられる特徴的な海底地形群の存在が明らかになったほか、海底からの熱水噴出を示唆するとみられる水中音響異常及び局所的な水温上昇が観測された。