

—Original Paper—

Survey method and sea trials for construction of cable-based observation system on seafloor with hydrothermal activity

Takeshi Ohki^{1*}, Takashi Yokobiki¹, Shuhei Nishida¹, Takafumi Kasaya²
Tohru Kodera³, Masayuki Toizumi³, Kenichiro Tani⁴, and Katsuyoshi Kawaguchi¹

Cable-based observation system is suitable tool for continuous ocean monitoring. Because cables can supply the power and realize high capacity data communication, such cable-based ocean observation systems have been widely used. However, general cable-based observation systems are deployed on flat and normal temperature seabed to prevent physical and heat damages to the cables. Therefore, there are no information on construction method of cable-based observation system for seafloor hydrothermal activities. How to design such types of the cable system, what types of parameters should be surveyed beforehand, are not established. In this paper, the authors propose the designing method for cable-based observation system constructing on seafloor of active hydrothermal vent field. The in situ application of techniques consisted of the method were examined on hydrothermal environment through the research cruises by using remotely operated vehicle (ROV). The practicality of GIS based data management system constructed for long-term survey of seafloor condition and secure of observation system, were investigate by using data collected in the cruises. The possibility of the cable-based observation system is discussed in this paper.

Keywords : Cable-based observation system, seafloor hydrothermal activity, mapping, Geographic Information System (GIS)

Received 28 April 2017 ; Revised 18 August 2017 ; Accepted 21 August 2017

- 1 Ocean Floor Observatory Technology Development Group, Research and Development Center for Earthquake and Tsunami (CEAT), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 2 Marine Geology and Geophysics Group, Research and Development Center for Earthquake and Tsunami (CEAT), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 3 Marine Science Department, Nippon Marine Enterprises, Ltd. (NME)
- 4 Division of Mineral Sciences, Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science

*Corresponding author:

Takeshi Ohki

Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

tohki@jamstec.go.jp, t.ohki.jp@ieee.org

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

— 原著論文 —

熱水活動域におけるケーブル式観測システム構築のための 事前調査手法と実海域での検証

大木 健^{1*}, 横引 貴史¹, 西田 周平¹, 笠谷 貴史²
小寺 透³, 樋泉 昌之³, 谷 健一郎⁴, 川口 勝義¹

海底の継続的なモニタリングを可能とする手法として、通信と電力を常時供給可能なケーブル式海底観測システムが広く活用されつつある。ケーブル式観測システムは、ケーブルに損傷を与えないよう海底熱水活動や急峻な地形を避けて常温の海底面上に構築されることが多い。しかし、高温の熱水が吹き出す海底熱水活動を継続的にモニタリングするためのケーブル式観測システムを構築する手法は確立されていない。そこで、本論文では、海底熱水活動域にケーブル式観測システムを構築するための事前調査航海において求められる調査内容を明らかにすると共に、地理情報システム（Geographic Information System: GIS）を用いて、航跡や観測結果の管理、情報の統合を地理空間上で行うことで、ケーブル式観測システムの敷設・配置に必要な情報収集や計画立案を効率的に実施可能とする手法を提案する。海中作業ロボット（Remotely Operated Vehicle: ROV）を用いた実際の海底熱水活動域での調査航海において提案手法を実践することでその妥当性を実証すると共に、海底熱水活動や海底面温度マッピングを行い、得られた熱水活動分布やそれに基づくケーブル式観測システムの配置計画についても議論することを目的とする。

キーワード: ケーブル式観測システム, 海底熱水活動, マッピング, 地理情報システム (GIS)

2017年4月28日受領；2017年8月18日改訂稿受理；2017年8月21日採択

- 1 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 海底観測技術開発グループ
- 2 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 海底地質・地球物理観測研究グループ
- 3 日本海洋事業株式会社 海洋科学部
- 4 国立科学博物館 地球研究部 鉱物科学研究グループ

*代表執筆者：

大木 健

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15

tohki@jamstec.go.jp, t.ohki.jp@ieee.org

著作権：国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. はじめに

1.1 海底熱水活動の相次ぐ発見と重要性

近年、我が国近海では海底熱水活動が多数発見されており、一部は噴火により我が国に大きな影響を与えるおそれがあることから、その活動を詳細に監視することで現象を理解し、将来的な予測に向けた知見を得ることが重要である。しかしながら、海底熱水活動がどのような要因と時間軸で変化するのか、未だ正確には分かっていない。また、海底熱水活動周辺には熱水生態系とよばれる特異な生態系が発達することが知られており、これらを調べることは、生物学的な見地からも重要である。

さらに、海底熱水活動域は将来海底資源として活用されることが期待されており、このような海洋鉱物資源を低コスト・高効率で調査する技術に関する研究開発を国主導で行い、民間への技術移転を行うことで、日本の海底資源調査を加速させることを目的として、2014年より、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program: SIP）次世代海洋資源調査技術、通称「海のジパング計画」が開始された。本計画の一環として、国立研究開発法人海洋研究開発機構（以後、JAMSTEC）では、海底熱水活動の継続的なモニタリングを可能とするケーブル式海底観測システムの開発が検討された（Kawaguchi et al., 2016）。

海底熱水活動を研究するにあたり、ターゲットして注目されているのが海底活火山「大室ダシ」である。大室ダシは、伊豆大島南方約20 kmに位置する。水深200 mの等高線に囲まれる山体直径は約20 kmに及び、山体の多くを占める平頂部の高度は水深約100 mである。Fig. 1に、著者らの研究グループがNT14-E02航海にて取得した大室ダシ海域の海底地形図を示す。谷ほか（2013）によれば、大室ダシの中心部に位置するくぼみである大室海穴（Fig. 2）において、2012年の調査航海において海底熱水活動が初めて観測され、関東に最も近い熱水活動の一つとして注目を集めている。ここで観測された熱水温度は最高194℃に達し、水深200 mにおける沸点に近い高温熱水活動であるとされた。谷らはまた、熱水噴出孔周辺においてチムニーやマウンドなどの熱水性沈殿物を確認し、岩石サンプルの採取を行った結果から、大室ダシが流紋岩質の海底活火山であるとの認識を示し、マグマ水蒸気爆発を起こすことにより周辺海域に大きな災害を引き起こすリスクがあることを報告している。以上のことから、大室海穴の熱水活動の中長期的なモニタリングが、海底資源環境影響評価という観点のみならず、防災上の観点からも重要であるといえる。さらに、大室ダシが伊豆大

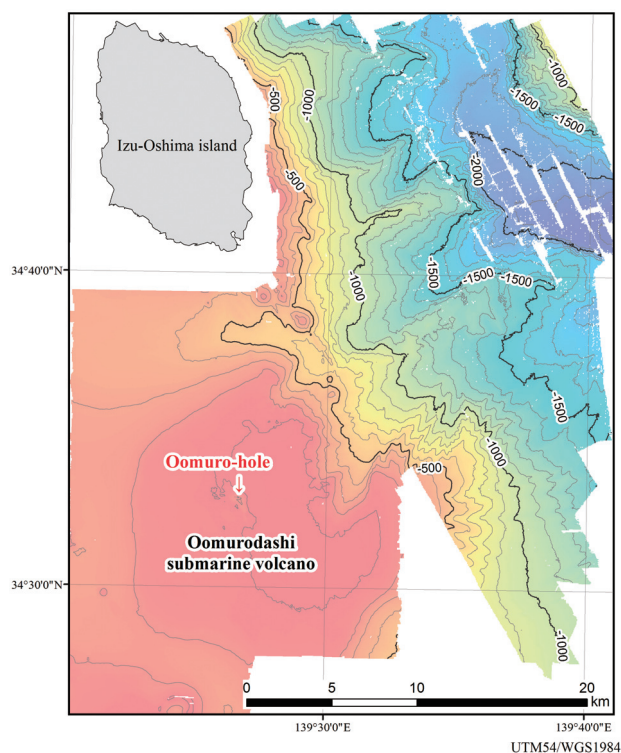


Fig. 1. Oomuro-dashi: seafloor volcano located to the south of Izu-Oshima island (illustrated by the measurement data of expedition NT14-E02).

図1. 伊豆大島南方に位置する海底活火山「大室ダシ」(NT14-E02航海での海底測量データより作成)。

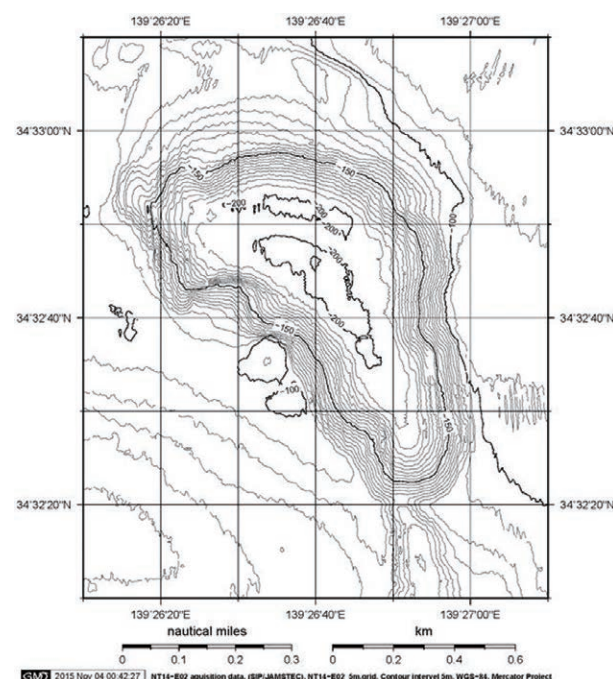


Fig. 2. Oomuro-hole located in the center of Oomuro-dashi (illustrated by the measurement data of expedition NT14-E02).

図2. 大室ダシ平頂部中央に位置する大室海穴 (NT14-E02航海での海底測量データより作成)。

島の近海に有り、ケーブル式観測システムを構築することが可能な距離に位置し、ケーブル式観測システムの技術開発を想定するサイトとして望ましい立地であることも、当該海域を調査対象海域とする理由の一つである。

1.2 ケーブル式観測システムによる常時海底観測網の広がり

海底を一定期間にわたって調査するためのセンシングシステムとしては、フリーフォールで設置され、一定期間後に浮上する Ocean-Bottom Seismometer (OBS) などスタンドアロン方式のセンサが多く使われているが、この方式ではリアルタイムのデータ獲得は困難であり、また、内蔵するバッテリーの制限から一定の期間で回収することが求められる。

一方で、近年では地震観測などを中心に、データのリアルタイム性が強く求められるようになってきた。そこで、陸上から海底ケーブルを敷設し、海底に設置した観測装置と接続することで常時給電・通信を可能とするケーブル式観測システムの普及が始まっている。ケーブル式観測システムは、沿岸部に設置された陸上局からケーブル敷設船や海中作業ロボット (Remotely operated vehicle: ROV) により敷設されるため、スタンドアロン方式に比べ多額の予算を必要とする。また、構造上、沿岸から遠く離れた海底に展開することは困難であるが、一方で、大容量商用光通信ケーブルや、海底油田掘削用の水中光・電気着脱コネクタなど様々なキーテクノロジーが近年開発されてきたことで大きく実用性が向上している。これまでに、国内外で海洋調査や地震・津波観測・監視を目的として構築がなされた例があり、アメリカ・カナダでは、両国の合同プロジェクトとして“NEPTUNE”と呼ばれる北米西海岸沖合に科学研究目的のケーブル式観測システムの構築が行われ、現在稼働中である (Chave et al., 2001)。また、2015年度まで10年にわたり、JAMSTECが構築を手がけた大規模・稠密な地震・津波観測監視システム (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis: DONET) Kawaguchi et al. (2015)や、日本海溝海底地震津波観測網 (Seafloor observation system for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench: S-net) (国立研究開発法人防災科学技術研究所) など、日本周辺では世界に類を見ない大規模なケーブル式観測システムの構築が進められつつある。しかしながら、日本国内において、ケーブル式観測システムによる高温熱水活動のリアルタイム長期観測はこれまでに行われたことがなく、活発な海底熱水活動が予想される海域に、長期間運用可能なケーブル式観測システムを展開するために、現場環境の詳細な調査に基づく新たなケーブル敷設ルート・観測装置配置の

設計手法の確立が求められている。

1.3 本論文の目的と構成

本論文では、海底熱水活動域にケーブル式観測システムを構築するための事前調査航海において求められる調査内容を明らかにすると共に、熱水域に展開されるケーブル式観測システムの敷設・配置計画手法を示し、NT15-21航海において実践することで、提案手法の妥当性を検証すると共に調査により得られた結果と知見を示すことを目的とする。なお、海底調査に際しては、効率的かつ確実な調査を実施するための地理情報システム (Geographic Information System: GIS) を中核とした海底調査ワークフローを利用する。

本論文は5章構成とする。まず、2章において、ケーブル式観測システムのシステム構成と構築フローの概要を説明をしたうえで、熱水活動域に展開されるケーブル式観測システムの障害発生リスク要因を整理する。その上で、3章において、熱水活動域に展開されるケーブル式観測システムの事前調査手法を提案し、そのために必要なGISを中核とした海底調査ワークフローについても述べる。4章では、実際の調査航海NT15-21において、提案手法を実践した結果と、それによって得られた知見を示す。最後に、5章においてまとめと今後の課題を述べる。

2. 熱水活動域に展開するケーブル式観測システム構築に先立ち調査すべき項目

2.1 ケーブル式観測システムの構造と分類

ケーブル式観測システムは、観測対象の近傍の沿岸部に設置し通信や給電を制御する陸上部、および、その先に設置する海底ケーブルや制御装置、観測装置からなる海中部の二つに分けられる。海中部については、ケーブル式観測システムのトポロジーや構造によって、「インライン型」と「非インライン型」の大きく二種類にわけられる。

インライン型ケーブル式観測システムは、前述のS-netなどで採用されている形式であり、ケーブルとそれに直列接続されたセンサー部からなり、ケーブル敷設船のみで迅速に構築可能である点がメリットである。一方で、なんらかの保守や機材の交換に際しては、その都度ケーブル敷設船をチャーターすることが必要となり、ケーブルの切断、再接続を行う必要がある点がデメリットである。

一方、「非インライン型」は、前述のDONET等で採用されている形式であり、ケーブル敷設船から敷設される高信頼性な基幹ケーブル部と、主にROVによって敷設・設

置・組み立てがなされるセンサ部に分けられる (Fig. 3). これは、長期にわたって海底の常時観測を行う際に高い信頼性を保ち、同一の機能を提供すべき通信・給電インフラ側と、研究の進捗により新型への交換により高性能化が期待できるセンサー側を分けるという設計思想によるものである。非インライン型のケーブル式観測システムは、構築作業が複雑となり、ROVによるケーブル接続など高度な海中オペレーションが必要でインライン型に比べて構築作業に手間や時間がかかるデメリットがあるが、様々な種類のセンサーを任意の地点に展開することが可能であることに加え、観測機器のトラブルや性能向上に伴う交換作業において専用のケーブル敷設船を必要とせず、ROVのみで行える点がメリットである。なお、ROVによるケーブル展張技術についてはChoi et al. (2013)に詳しい。

本研究で想定する熱水活動域に展開されるケーブル式観測システムは、未知の部分が多い海底熱水活動に対し、綿密な調査活動の上で展開されることが求められることから、DONETと同様に非インライン型のシステムとして設計され、ケーブル敷設船およびROVを用いてシステムが設置されるものとする。

ここで、非インライン型のシステム構築時に想定される具体的な構築フローの概要を説明する。まず、熱水活動域から近い陸上に陸上局舎を設置し、そこからケーブル敷設船により商用規格の光電気複合ケーブル (Backbone cable: 基幹ケーブル) を海底敷設していき、観測対象となる熱水活動域近傍の海底に光電気複合タイプの水中着脱コネクタを備えたケーブル終端装置 (Terminal Unit: TU) を設置する。続いて、ROVを用いて、TU付近に海底設置型の分岐装置 (ここではノードと呼称する) を設置し、TUとノードを接続する。また、同様にROVを用いて観測対象となる熱水活動域に熱水活動をモニタリングする観測装置を設置する。最後に、ROVに搭載される

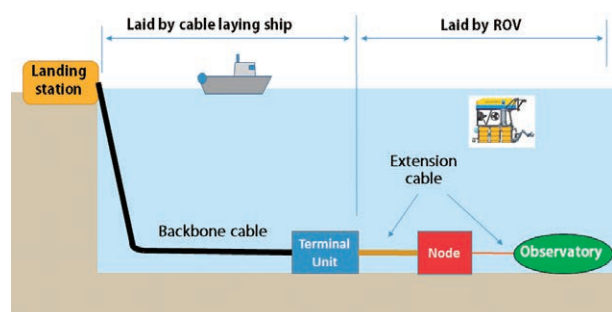


Fig. 3. Seafloor cable laying by ship and remotely operated vehicle (ROV) for constructing non-inline type seafloor observation system.

図3. ケーブル敷設船および海中作業ロボット (ROV) により構築される非インライン型ケーブル式観測システムの概要。

展張装置により展張ケーブル (Extension cable) で観測装置とノード間を接続することで、観測装置と陸上局が光的・電氣的に接続され、リアルタイム観測が可能となる。Fig. 4に、DONET構築時、展張ケーブルを搭載したROVを示す。分岐装置については、一例がHishiki et al. (2016)にて紹介されている。

Fig. 3に示すように、海底ケーブルはケーブル敷設船やROVによって敷設されるが、その際に海底の地形や底質に留意することが、ケーブル式観測システムを長期間稼働させるために重要である。敷設するケーブルは、ケーブル敷設船によって敷設される太径の商用規格光電気複合ケーブルと、ROVによって敷設される細径の展張ケーブルの2種類に大別されるが、本研究では特に最も細く外部からの熱や外力による物理的損傷を受けやすい細径の展張ケーブルを熱水域に敷設する際に必要となる情報を事前に収集するための方法について議論する。

2.2 海底ケーブルにとってのリスク要因

光海底ケーブル執筆委員会 (2010) や大木ほか (2015a) で述べられているように、ROVによる細径展張ケーブルにとって障害を発生させ得るリスクのある海底の底質として、転石や巨礫、露頭 (露岩)、地形として崖を含む角度30度以上の急傾斜がある。Fig. 5に、海底の露頭地形の一例を示す。

また、海底面には投棄された漁具やゴミなどの人工物が点在しており、曳航式調査システムによってこうしたイレギュラーを発見し、記録することも必要である。加えて、日本近海には多数の商用・科学用ケーブルが既に展開されており、中には運用を停止したにもかかわらず、未だ海底に残置されているケーブルも多数存在する。既存ケーブルとの接触を避けるべく、JAMSTECでは、既存

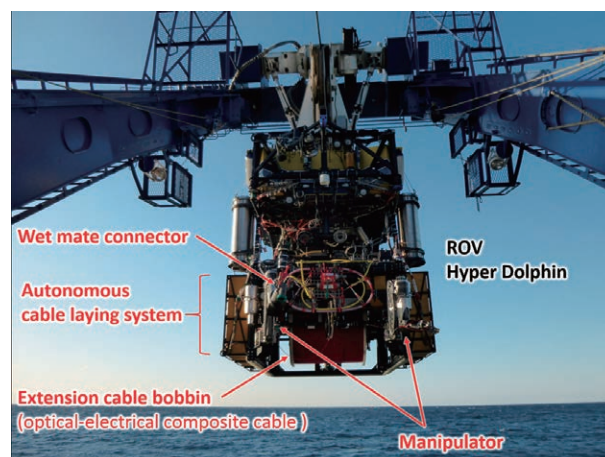


Fig. 4. ROV with extension cable bobbin for DONET construction.

図4. DONET構築時、展張ケーブルを搭載したROV。

ケーブルが設置されている水深の1倍以上、または、1 km、いずれか大きい方の距離の離隔を取ってROVのオペレーションを行うことが義務づけられており、敷設するケーブル式観測システム自体も既設ケーブルから適切な離隔を取ることが必要である。以上のように、ケーブル式観測システムを構築する海域においては、既存ケーブルが存在するかどうかを関係機関を通じて確認することも重要である。

このようなケーブル式観測システムにとってリスクとなり得る海底の地形・底質・人工物をまとめて、以後、海底障害物と呼ぶ。ケーブル式観測システムを構築するにあたっては、海底障害物が対象海域においてどのような分布を示しているかを事前に調査し、可能な限り海底障害物の存在密度の低い領域を経由するケーブルルートのデザインが必要となる。また、ルートデザインの際には、ケーブルの変針角にも制限があるため、使用するケーブルに応じたルート制約条件が存在する。

海底障害物と海底地形との間には、ある程度の相関があると考えられることから、可能な限り平坦な地形を通過するようなルート設計を行い、その上で、事前に曳航式の海底観察システム (Fig. 6) 等を用いてルート上に障害物がないことを最終的に確認する。

2.3 海底設置装置にとってのリスク要因

終端装置 (TU) のような海底設置装置の設置に際しては、海底ケーブルよりもさらに厳しい制約条件が存在する。ケーブル敷設船から設置されるTUは数百キログラムから数トンにおよぶ重量があり、設置場所としては、斜度が5度以下であること、また、設置場所の底質は、岩や礫層ではなく、泥・砂・砂礫であることが求められる。また、TUはケーブル敷設船で敷設されるため、設置位置

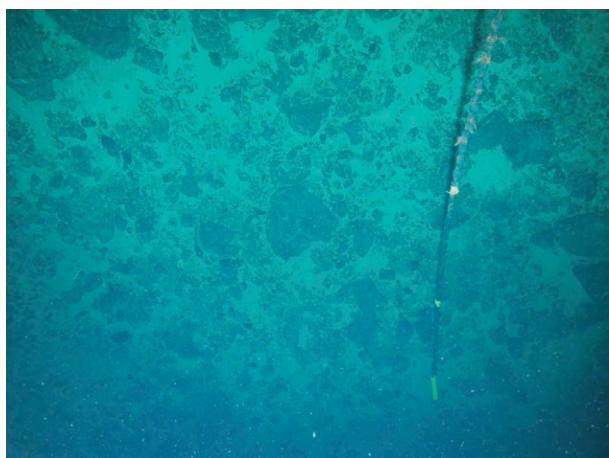


Fig. 5. Seafloor covered by rocks.

図5. 礫に覆われた海底面。

精度は水深の10%前後とされており、仮に10%とした場合、大室海穴外縁部に設置する場合は精度約10 m、大室海穴内部に設置する場合には精度約20 mとなる。

基幹ケーブルの終端に位置するTUは、敷設に際しアイドルケーブルと呼ばれる支持索により敷設される。そのため、ケーブル敷設船による敷設では、基幹ケーブル・TU・アイドルケーブルと、ほぼ直線で敷設される。このアイドルケーブルは、TUが故障した際に再度揚収するためにも利用される。

一方、ROVによって設置されるノードについても、TUと同様の底質環境への設置が求められるが、ROVの場合は、ケーブル敷設船と異なり、海底を観察しながら任意のポイントへノードを設置することが可能なため、その環境に事前にランドマークを設置することができれば、1 m程度の精度で設置が可能となる。

2.4 熱水活動のケーブル式観測システムへの影響

海底ケーブルや関連の海底設置装置は、通常最大30℃までの海水温下での使用を前提としており、場合によっては200℃に達する大室海穴の熱水活動域周辺にケーブル式観測システムを展開するためには、大室海穴内の海底熱水活動の広がり把握し、ケーブルが敷設される海底面表層での温度分布を把握することが必要となる。海底熱水活動の存在は、海底面に広がる白色に変色したように見えるバクテリアマットとして海底で可視化されることが多く、変色域の位置情報と、その温度情報をマッピングすることが必要となる。

また、熱水活動の結果として成長する堆積物であるチムニーについても、そのサイズの繰り返し観察により活

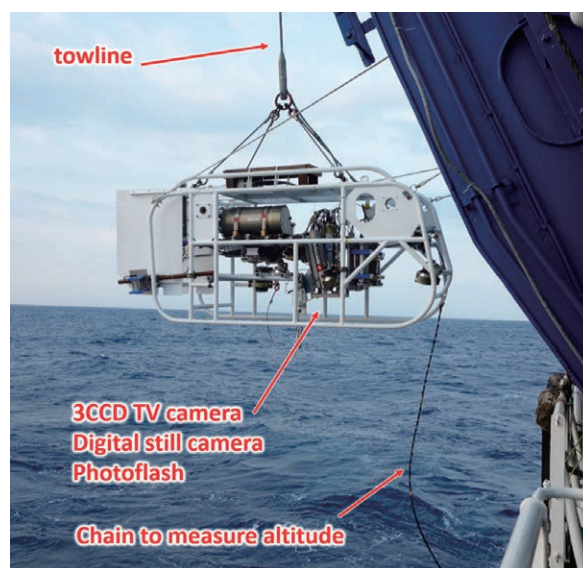


Fig. 6. Deep ocean floor survey system "Deep Tow".

図6. 深海曳航式調査システム "Deep Tow".

動性を継続的に確認することは、海底熱水活動の継続期間を示すため、アクティブなチムニーのマッピングを行うことは、熱水活動のリスクを見積もるうえで重要な指標となる。

3. 熱水域におけるケーブル式観測システム構築のための事前調査手法

2章において、ケーブル式観測システムを熱水域に展開する上で、事前に調査・確認しておくべき項目を議論した。その議論を踏まえ、本章では、熱水域に展開されるケーブル式観測システムの敷設・配置計画手法を示す。本手法では、まず、ケーブルや海底システムにダメージを及ぼすリスク要因となる地形、底質、熱水活動、ならびに、ケーブル敷設上の制約条件を定義する。これらの要素や条件から、ケーブル展開リスクを見積もるための複数の地図を作成する。そのためには、上記のリスク要因の空間分布をターゲット海域で獲得することが必要である。そこで、地理情報システム（Geographic Information System: GIS）を活用した海洋調査を行う。GISを活用した海洋調査手法の先行事例としては、金子ほか（2015）や笠谷ほか（2016）がある。

3.1 熱水域に展開するケーブル式観測システム構築のためのケーブル展開リスクマップ作成手法

前章での議論に基づき、以下の順番でケーブル展開リスクマップを作成する。第一に、ベースマップとして利用できる海底地形図を用意する。熱水活動におけるケーブル式観測システム敷設に当たっては、可能な限り高解像度な地形図が求められるため、最低でも5m解像度の地形図が望ましい。

第二に、地形図をベースに傾斜を算出する。地形傾斜については、隣接する深度情報の差により、最大斜度 θ_{max} を算出し、ケーブル敷設船の能力に従い決定するしきい値 θ_{cable} 、ならびに、TUやJBといった海底システム設置可能斜度上限 θ_{sys} 以下である領域を、ケーブルが敷設可能な領域とする。

第三に、熱水活動分布を観測する。ここでは、緯度、経度、深度により定義される、ある地点 p (longitude, latitude, depth) において、底質 $mat(p)$ 、最高計測表層温度 $temp_{max}(p)(^{\circ}C)$ 、熱水活動観察に基づく熱水活動種別 $type(p)$ 、熱水活動観察結果 $obs(p)$ 、画像 $photo(p)$ のデータをもつものとする。

推定底質 $mat(p)$ は、乗船研究者がROVの映像を見ながら推定する底質であり、種類として、泥、砂、礫、巨礫の

4種類とする。それぞれについて、4つの異なる形状のシンボルを定義し、地理空間上で表現する。泥や砂はケーブル敷設時にケーブルが損傷するリスクが低く、礫や巨礫はリスクが高いと考えられる。

最高計測表層温度 $temp_{max}(p)$ は、高温熱水のオンライン温度計測が可能な有線式熱水温度計を用いて行い、重量物であるTUやJBを海底に設置した際に、これらの機器への温度によるダメージが及ばないことを確認するために必要なパラメータであり、海底下1–2cm程度に熱水温度計を差し込んで計測する。表面温度は熱水流路や海水の影響を受けるため厳密に計測することは難しいが、その地点における最大温度を計測することで熱水活動の傾向を判断する一つの指標となる。

熱水活動観察に基づく熱水活動種別 $type(p)$ は、海底熱水活動が観察される地点 p において、チムニーが形成されているか、表面の熱水噴出が認められたり、熱水活動に伴うバクテリアマット（白色変色域）が見られる場合に値をもつこととする。チムニーは、継続的な熱水活動によって形成されるため、一定期間以上の継続的な熱水活動として解釈し、その他に現在観察されたバクテリアマットや熱水噴出活動などは、調査時点における熱水活動の兆候として解釈する。よって、 $type(p)$ として、チムニー、または、その他の熱水活動、の二種類の値をもつこととする。チムニーは熱水活動の一部であるため、チムニーの周囲にバクテリアマットが存在するような場合は、「チムニー」と記載する。なお、この値は、あくまで乗船研究者らの観察結果であるため、個人差や誤認による記録も含まれる可能性があることに留意されたい。

熱水活動観察結果 $obs(p)$ は、調査活動を行った乗船研究者の観察メモであり、乗船研究者が船内ネットワークに接続したデジタルイベント記録シートを使って記載する。これにより、時刻情報、ROV位置情報とともに、観察記録を登録する。その際、合わせて、ROVによる写真撮影を行い、画像 $photo(p)$ を保存する。デジタル画像にはメタデータとしてEXIF (Exchangeable image file format) 情報が埋め込まれており、時刻情報を保存することで、調査活動後に時刻をトリガーとして観察イベントと画像のマッチング、関連付けを行う。ただし、画像と観察ログの生成には数秒から数十秒の時間差があることから、 t_{buf} (s) のマッチング許容誤差時間を合わせて設定する。

以上の情報を収集することで、熱水域に展開するケーブル式観測システムの構築位置ならびにケーブル敷設ルートを検討するための熱水活動表示地図、そして、調査結果に写真をリンクしたデータベースを作成する。

3.2 地理情報システム (GIS) を活用した海洋調査

GISとは、地理空間上に各種情報をレイヤーとして重ね合わせ、データ解析を行うためのソフトウェアシステムである (Fig. 7)。前節において定義したパラメータである最高計測表層温度や推定底質について、過去の調査データが入手できる場合は、事前にGIS上に登録し、調査前のGISデータベースを作成しておく。この調査前データベース上において、ROVの潜航ルート計画を行い、ROVオペレータ及び調査船操船担当者に共有しておく。

調査活動開始後は、こうして作成したGISデータベースを搭載したPCを、海洋調査船の船内ネットワークに接続し、ROVのテレメトリと同期させ、過去の調査データと現在の調査データを対比させながら、ROV調査潜航を行う。調査中、乗船研究者は、船内ネットワークに接続したデジタルイベント記録シートを利用して観察イベントを記録するとともに、熱水温度計のオンライン計測情報を記録する。また、別の乗船研究者は写真撮影を行い、要すれば、GISデータベースを参照しつつ臨機応変に調査計画を更新することも可能である。

調査終了後は、取得した観察ログ、温度情報、ROVテレメトリ、画像などをまとめて、GISデータベースに登録し、次回潜航計画の作成を行う。本調査手法の詳細については、大木ほか (2015b)ならびにOhki et al. (2016)も参照されたい。

4. NT15-21航海における手法の検証

4章においては、前章で提案した調査フローを、調査航海NT15-21において実践し、有効性を確認する。本章では、まず調査航海NT15-21の概要を述べた上で、事前に構築した大室ダシGISデータベースの概要を説明し、航海乗船中のデータ処理の実際や、調査後に得られたデー

タのまとめを示す。

4.1 調査航海NT15-21の概要とミッション

NT15-21は、大室ダシ (Fig. 1)、ならびに、大室海穴 (Fig. 2) の海底熱水活動分布と海底面温度を計測することで、ケーブル式観測システムの観測ターゲット候補を選定することを第一の目標とした。また、観測対象近傍に設置することが求められるノードやTU等の海中設備の敷設場所、それらを結ぶケーブルルートを決定するために必要な調査活動を目的とした。本航海では、調査船舶として、JAMSTECが所有する海洋調査船「なつしま」を利用し、ROV「ハイパードルフィン」を搭載して海洋調査を行った。調査期間は、2015年12月8日から12月16日の9日間であった。

4.2 調査航海前に構築した大室ダシGISデータベース

NT15-21調査航海に先立ち、過去に大室ダシ・大室海穴で行われた航海調査データを収集し、GISによりそれらを統合した大室ダシGISデータベースを構築した。まず、SIPプロジェクトの一環でNT14-E02航海 (首席研究者：横引貴史) にて取得された大室ダシ全域の25 m解像度広域地形データ、および、測深機 (Sonic2024) を小型船舶に機装して2015年に取得した5 mメッシュの高解像度大室海穴海底地形図 (笠谷貴史私信) を、それぞれ提供を受けてGISデータベースに予め登録した。続いて、大室ダシ海域での過去の調査航海での取得データを、JAMSTEC 航海・潜航データ・サンプル探索システム (Data and Sample Research System for Whole Cruise Information in JAMSTEC: DARWIN) (国立研究開発法人海洋研究開発機構) を用いて検索した。検索の結果、大室海穴の海底熱水活動について調査を行ったNT12-19航海 (首席研究者：谷健一郎、調査期間2012年7月20日～8月3日) におけるROV「ハイパードルフィン」第1404次潜航と第1408次潜航の航跡を登録した。また、同航海の第1409次潜航については、航跡に加え熱水計測温度を登録した。

さらに、大室海穴周辺における既設海底ケーブルの設置情報についても問い合わせを行い、GISデータベースにその情報を登録することで、既設ケーブルによる影響がない範囲で調査活動を行うこととした。

こうして作成した調査航海前GISデータベースのデータ出力結果をFig. 8に示す。Fig. 8より、NT12-19航海において、大室海穴北西部および中央部において、それぞれ2箇所の海底熱水活動が観察されたこと、そして、計測された熱水温度は、北西部の方が南東部よりも高いことを示しており、大室海穴北西部で海底熱水活動が活発であることが示唆された。しかしながら、海底熱水活動

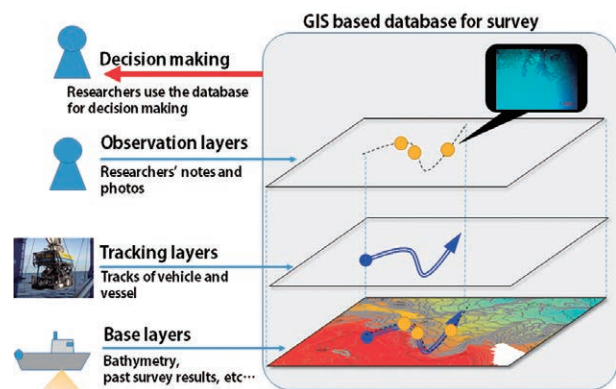


Fig. 7. Survey based on Geographic information system (GIS).

図7. 地理情報システム (GIS) を活用した海洋調査。

がどのように変化するかは未だ詳細には解明されておらず、NT15-21調査航海以前には、その時点における大室海穴内の熱水活動がどのような活発さで分布しているかは未知であった。

4.3 観測体制

調査活動中のROVオペレーションコンテナの様子をFig. 9に示す。調査時に用いたROV「ハイパードルフィン」のオペレーションコンテナは、前方にメインパイロット、コパイロット、運航長が着席し、後方5席に乗船研究

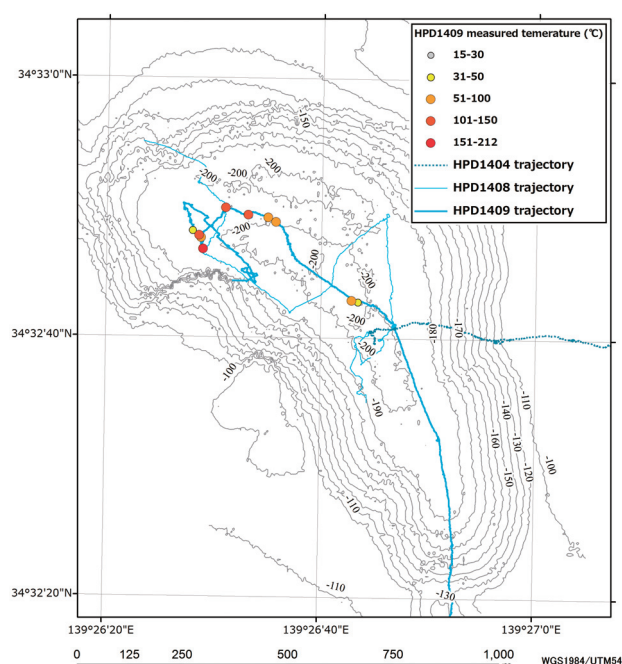


Fig. 8. GIS database summary generated by past survey data.

図8. 調査航海前GISデータベースのデータ出力結果。

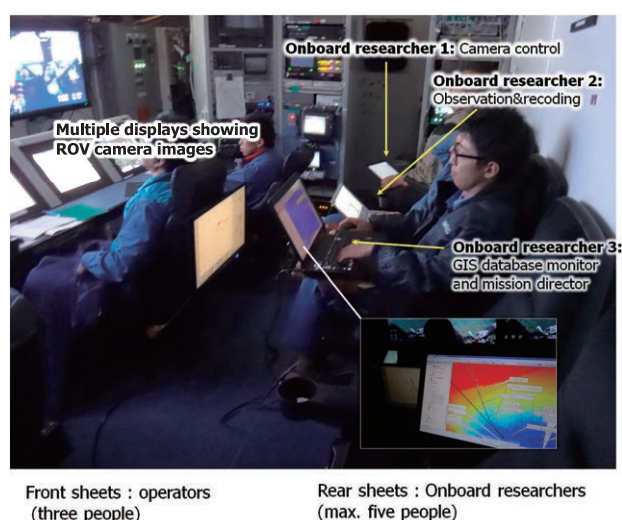


Fig. 9. ROV operation scene in operation container.

図9. 調査活動中のROVオペレーションコンテナの様子。

者が着席可能であった。そのうち、乗船研究者は3人が分担して下記の作業を行った。

1. GIS担当：GISデータベースを搭載したPC、および、母船からのSSBL測位により逐次更新されるROV位置情報を参照しながら、調査指揮を行う。
2. 観察ログ記録および熱水温度計確認担当：熱水温度計の計測結果の表示を確認し、観察すべき事象が確認された際に確認ログを作成する。記録作業の際には船内ネットワークに接続したPCとexcelマクロシートを用いて、位置情報とともに観察結果を記録する。
3. カメラ担当：ROVのカメラを操作し、撮影作業を行う。

以上の観測体制により、ケーブル式観測システムを熱水域に展開するために事前に収集すべき情報を、調査時に位置情報とともに逐次記録する。

本航海では、最高計測表層温度 $temp_{max}(p)$ を測定するため、オンライン計測可能な熱水温度計を用意した。熱水温度計は、日油技研製NWT-HD4であり、測定レンジは0℃から400℃、絶対精度は1℃、分解能0.1℃であり、水中ケーブルを介してROVに接続することで、洋上のオペレーションコンテナにてオンラインで熱水温度計測情報表示が可能である。熱水温度計には、ROVで把持可能な持ち手と、計測部を保護するカバーを取り付けて運用した。Fig. 10に、実際にROVで運用中の熱水温度計を示す。

また、推定底質 $mat(p)$ 、および、熱水活動種別 $type(p)$ は、ROV「ハイパードルフィン」に搭載した2つのFull HDカメラ映像により確認することとした。

さらに、調査中に発見した特異点を記録するため、マニピュレータで設置、移動、回収が可能なSonardyne社製音響トランスポンダ“ROV-Homer”をFRPグレーチングに

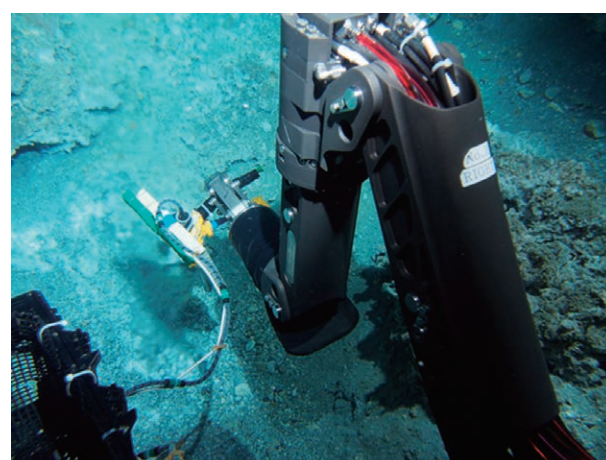


Fig. 10. Hydrothermal temperature measurement in operation.

図10. ROVにより運用される熱水温度計。

取り付けたROV ホーマーパッケージを10個用意し、それぞれ固有のID番号をプリセットして利用した。Fig. 11にdive 1919におけるペイロードを示す。

4.4 潜航調査結果の概要

Table 1 に、NT15-21 航海の調査日程と実績を示す。冬季の悪天候の影響で海況がROVによる調査に適さない日が続き、調査計画日数7日中、潜航調査が実施できたのは3日であった。この3日について、それぞれ、ROVハイ

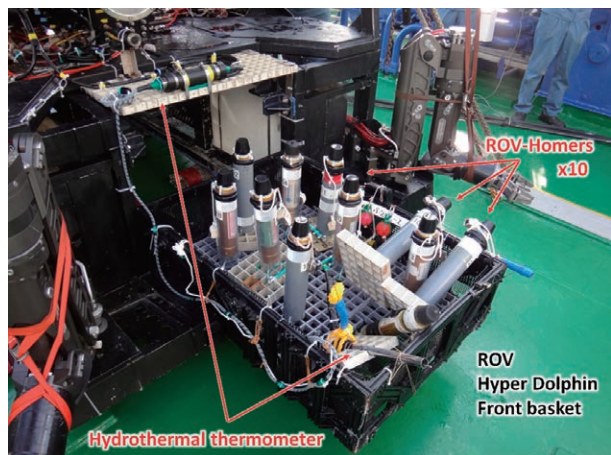


Fig. 11. ROV-Homer and hydrothermal thermometer on the front basket of Hyper Dolphin.

図11. ROV「ハイパードルフィン」前方バスケットに搭載したROV-Homerならびに熱水温度計。

Table 1. Survey schedule and results during expedition NT15-21.

表1. NT15-21 航海調査日程と調査実績。

Date	Summary	ROV survey
Dec.8	Departure (Yokosuka JAMSTEC)	N/A
Dec.9	Severe weather	N/A
Dec.10	Survey at Oomuro-hole	dive1919
Dec.11	Harborage	N/A
Dec.12	Harborage	N/A
Dec.13	Harborage	N/A
Dec.14	Survey at Oomuro-hole	dive1920
Dec.15	Survey at Oomuro-hole	dive1921
Dec.16	Arrival (Shimizu port)	N/A

Table 2. Singular position list of expedition NT15-21.

表2. NT15-21における設定特異点座標リスト。

Site	Latitude	Longitude	Depth (m)	Description
A	34° 32'43"N	139° 26'44"E	200	Low temperature hydrothermal activity (south)
B	34° 32'49"N	139° 26'37"E	198	Bacteria-mat with many hydrothremal vents
C	34° 32'50"N	139° 26'31"E	197	Bacteria-mat
D	34° 32'48"N	139° 26'28"E	197	Hydrothremal vents and tube worms
G	34° 32'49"N	139° 26'33"E	198	Many small chimneys
H	34° 32'50"N	139° 26'29"E	196	Hydrothermal activity was not observed. Node deployment position candidate
I	34° 32'47"N	139° 26'25"E	193	Hydrothremal vents and tube worms
J	34° 32'47"N	139° 26'35"E	201	Hydrothremal vents and tube worms
K	34° 32'52"N	139° 26'31"E	199	Hydrothermal activity was not observed. Node deployment position candidate
L	34° 32'52"N	139° 26'35"E	195	Hydrothermal activity was not observed. Node deployment position candidate

パードルフィンの第1919次潜航、第1920次潜航、第1921次潜航を行った。本稿において、これらの潜航をそれぞれ「dive1919」、「dive1920」、「dive1921」と記載する。

調査中に設定した特異点リストをTable 2に示す。Site EとSite Fは行動基準点として設定したが、本稿では議論に影響しないため記載しない。

dive1919では、ROVカメラ及び熱水温度計を用いて、大室海穴内の熱水活動域を探索することを目的とした。調査航海前GISデータベースのデータ出力結果に基づき、熱水活動が期待される場所である海穴北西部および海穴中央部を調査するよう測線を決定した。潜航前計画時は、大室海穴南方から北西部へ抜けるような調査測線を検討したが、ROV運航担当者との協議の結果、海流の影響が少なく安定した潜航が可能な海穴中央部をROV投入地点とした。ROVは、大室海穴中央部に潜航した後、南方に向かって調査を行い、低温の海底熱水活動（設定特異点 Site A）を観測した。その後、北部へ転進し、事前サーベイにて熱水活動の存在が予想されていた北西部で熱水活動域を複数箇所で見出した（設定特異点 Site B, C, D, G）。同時に、ノードが設置可能な熱水活動が認められないサイトも複数選定した（設定特異点 Site E, F）。最後に、北西部斜面を観察し、ROVは離底した。その際、北西部にもバクテリアマットと推測される海底面が観察されたが、表面温度は海水温と同等であった。なお、これらの調査中、設定特異点にはROV-Homerを設置した。

これらの調査結果を元に、GISデータベースにデータを登録し、次回潜航計画を立案に利用した。

dive1920では、dive1919と同じ海穴中央 Site Bに着底した後、ノードが設置可能な熱水活動が認められないサイトを追加で選定した（設定特異点 Site H）。また、dive1919で観測した、Site B, C, D, Gは、将来の長期観測候補地点として選定し、それぞれのサイトの熱水活動状況観察を行った。また、dive1919の調査測線より海穴外縁側の調査を行い、新たに1つの熱水活動域（Site I）を確認するとともに、その他の箇所でも定期的にROV着底、海底面

温度計測を行い、海底面温度が海水温と変わらないことを確認した。

dive1921では、dive1919, dive1920で観察できなかった領域を面的にカバーするように調査測線を決定し、Site Bの南方で新たな熱水活動域を観察した (Site J)。また、将来のオンライン観測候補とした Site B, C, D, G の北方に、二箇所のノード設置可能サイトを選定した (Site K, L)。

4.5 熱水活動種別ならびに最高計測表層温度の分布調査結果

NT15-21にて調査対象とした大室海穴底部は、水深およそ200 mのほぼ平らな地形、かつ、底質も砂や泥が多くを占めており、これらは一般的なケーブル敷設にとって大きなリスク要素とはならないと考えられる。一方、大室海穴内の様々な場所で、ケーブル設計仕様を上回る温度の熱水噴出活動が観測されたことから、本稿では、最高計測表面温度 $temp_{max}(p)$ ならびに熱水活動種別 $type(p)$ について議論する。

Fig. 12に、大室海穴でのdive1919から1921までの調査航跡、および、調査中に乗船研究者が観測・推定した熱水活動種別 $type(p)$ をプロットした地図を示す。図中には、調査中に設定した特異点にROV ホーマーパッケージの設置位置を記載した。ここに表示されている航跡に対し、SSBL 音響測位誤差が含まれていること、また、プロットされた熱水活動は、観測を行った際のROVの位置であり、観測された熱水活動の位置には誤差が含まれる。ROVのカメラや船体方位、距離から、対象物までの距離を計算するツールがあれば、将来的に補正が可能となるが、これは今後の課題の一つである。SSBL音響測位では、母船からROVまでの直線距離の数%オーダーの測位誤差が発生する。また、地形により音響反射が発生して値が真値から大きく外れることがあり、ROVの移動速度を超える不連続な測位結果が得られた際には、それらの値を除去してある。

Fig. 13は、大室海穴でのdive1919から1921までの調査における最高計測表層温度 $temp_{max}(p)$ をプロットしたものである。こちらについても、Fig. 12と同様に、SSBL音響測位誤差が含まれていること、また、プロットされた計測温度は、観測を行った際のROVの位置であり、熱水温度計測位置には誤差が含まれる。

これら前述の調査結果を統合するにあたり、GISデータベース上では調査データの確認と品質チェックを実施した。Fig. 14に、GISデータベースに登録したdive1919の航跡ならびに、航跡上の観察ログ、それぞれの観察ログの地点に関連づけられた画像情報の重ね合わせ表示の一例を示す。SSBL音響測位による複数のROV航跡上に、乗

船研究者が観察ログを記述した地点を白い丸シンボルで示し、その横に観察ログの内容を表示している。各観察ログ記録地点の白い円のシンボルをクリックすると、その地点でのROVの位置、深度、記録時刻、記録内容、その観察ログを記録した時刻前後でのROVカメラ画像等が表示される。これにより、海底のどこでどのような観察結果が得られたか、観察結果が正しいかを調査後に直感的に確認することができる。以上のように、GISを活用した調査手法により、熱水活動や海底面温度など、様々な観察結果を地理空間上で統合的に獲得することが可能であることを示した。

4.6 調査結果から想定されるケーブル式観測システム設置計画

本節では、これまでの結果を踏まえ、ケーブル式観測システムをどのように敷設するか検討を行う。Fig. 12およびFig. 13より、大室海穴における熱水活動分布が、大室海穴底部の北西部分で多く見られることが確認できる。また、北西部の中でも西南西から東北東に向かって、Site Iから、Site D, Site G, Site Bへと連なる帯状の高温熱水活動地帯の存在が示唆された。ケーブル敷設船で設置するケーブル式観測システムは、ケーブル敷設精度が水深に応じて低下するため、帯状の高温熱水活動地帯から水深とケーブル敷設精度に基づく離隔距離を確保して敷設することが望ましい。また、大室海穴を観測対象とする場合、ケーブル式観測システムは伊豆大島が位置する北部から海穴に敷設していくことが予想される。その際には、前節の結果に基づき、オンライン観測候補であるSite B, C, D, Gのいずれかを観測対象とし、それよりも北方、海穴外縁側のSite H, K, LのいずれかにノードおよびTUを設置、それにつながる基幹ケーブルルートを設計する敷設ルートが考えられる。この際、TU敷設・回収時に利用されるアイドルケーブルも考慮する必要がある。観測対象の近傍に敷設されたり、高温の熱水によりアイドルケーブルが劣化することを防ぐため、アイドルケーブルも、帯状の高温熱水活動地帯を避けるよう設置することが望ましい。

以上のように、提案手法によって、熱水域海域において提案手法による事前調査航海を行うことで海底熱水活動や海底面温度のマッピングを行い、ケーブル式観測システムの将来設置に向けたシステム配置検討が行えることを示した。

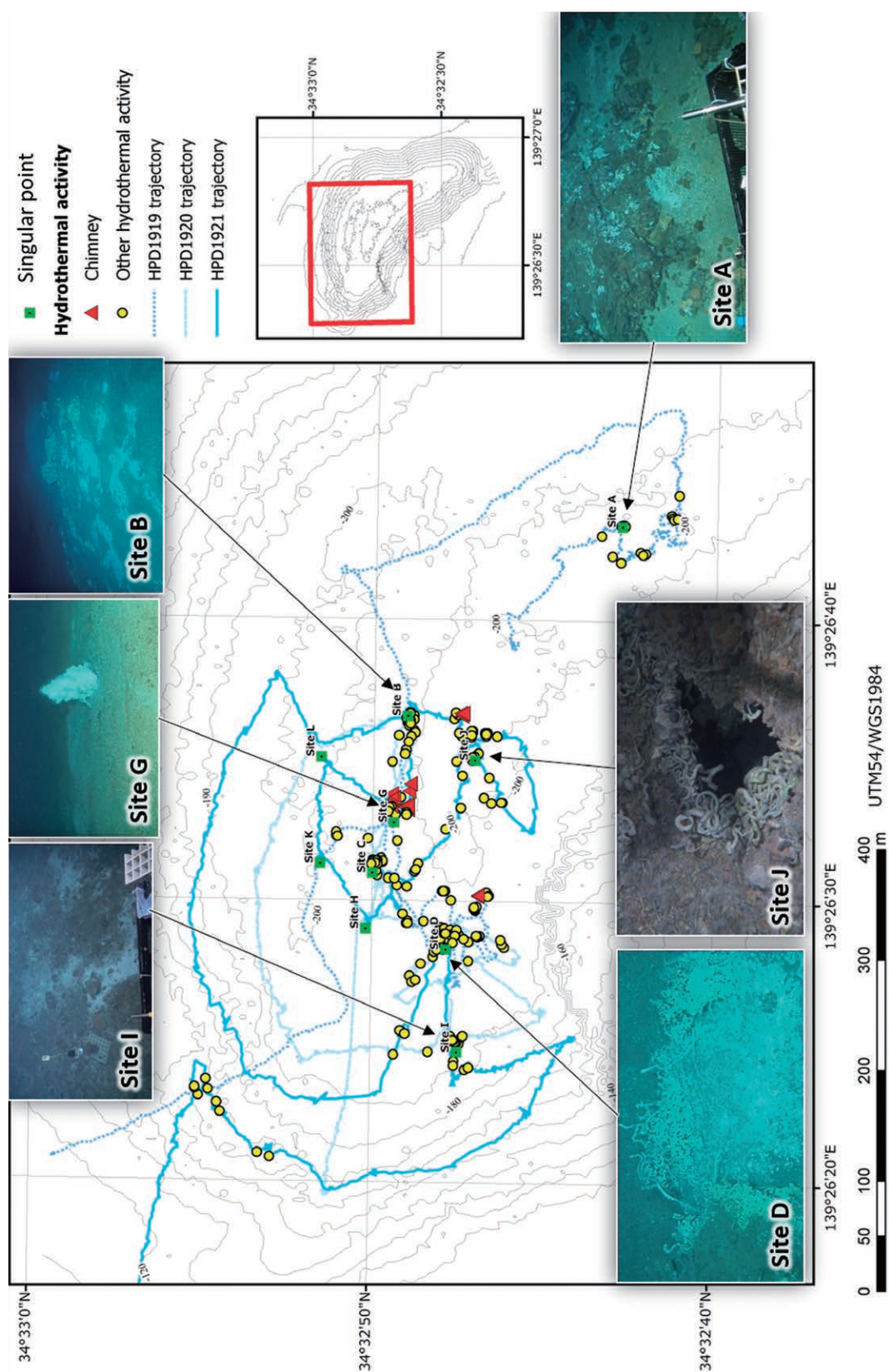


Fig. 12. Estimated hydrothermal activities distribution and scenarios in north-west part of Oomuro-hole.

図12. 大室海穴北西部における推定される熱水活動種別分布と各サイトの様子.

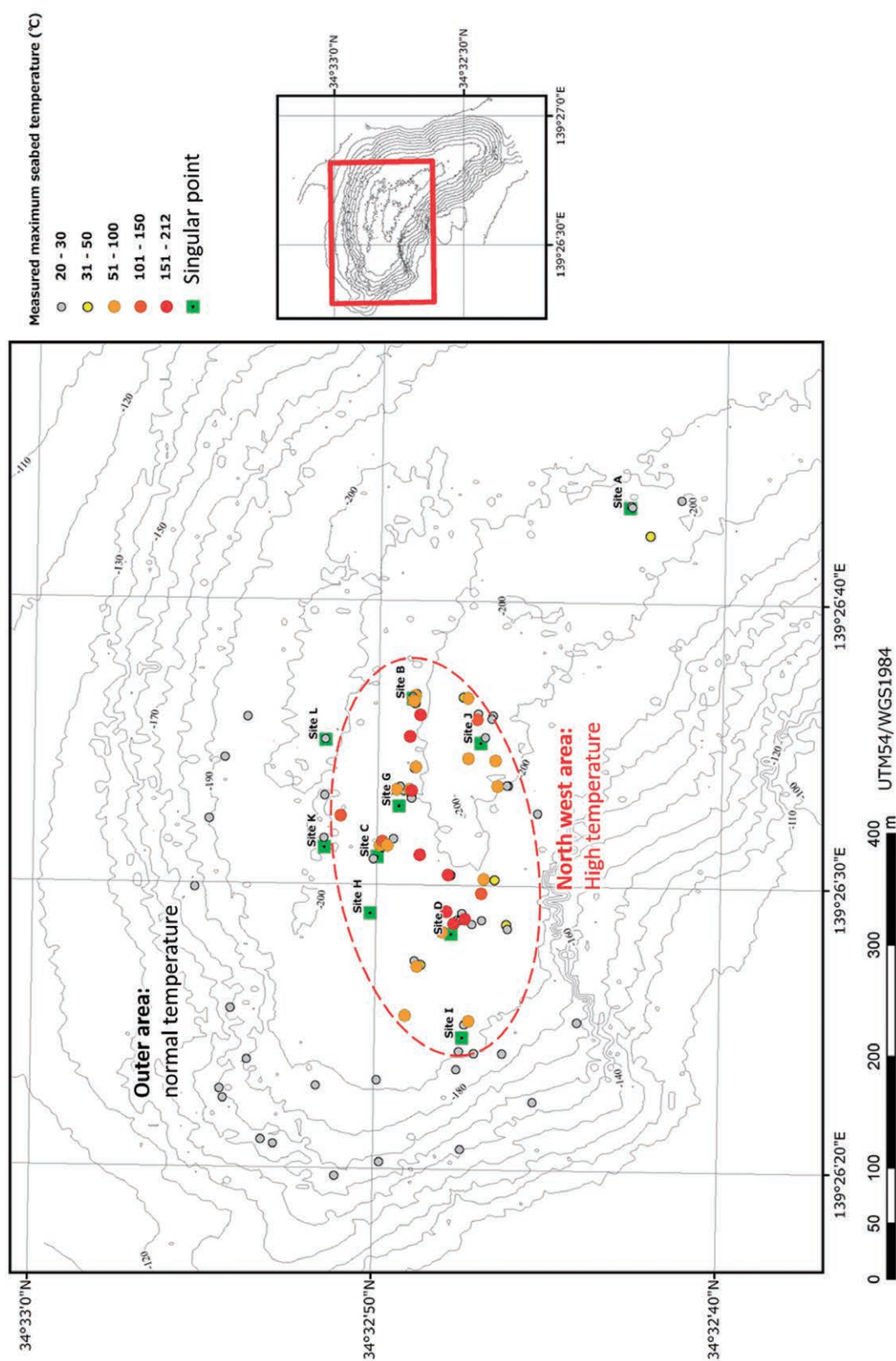


Fig. 13. Measured maximum seabed temperature distribution in Oomuro-hole.

図13. 大室海穴北西部における最高計測表層温度の分布.

5. おわりに

本論文では、海底熱水活動域にケーブル式観測システムを構築するための事前調査航海において求められる調

査内容を明らかにすると共に、熱水域に展開されるケーブル式観測システムの敷設・配置計画手法を示した。また、提案手法を、実際の熱水域調査航海NT15-21において実践し、実際の観測データを用いてケーブル式観測シ

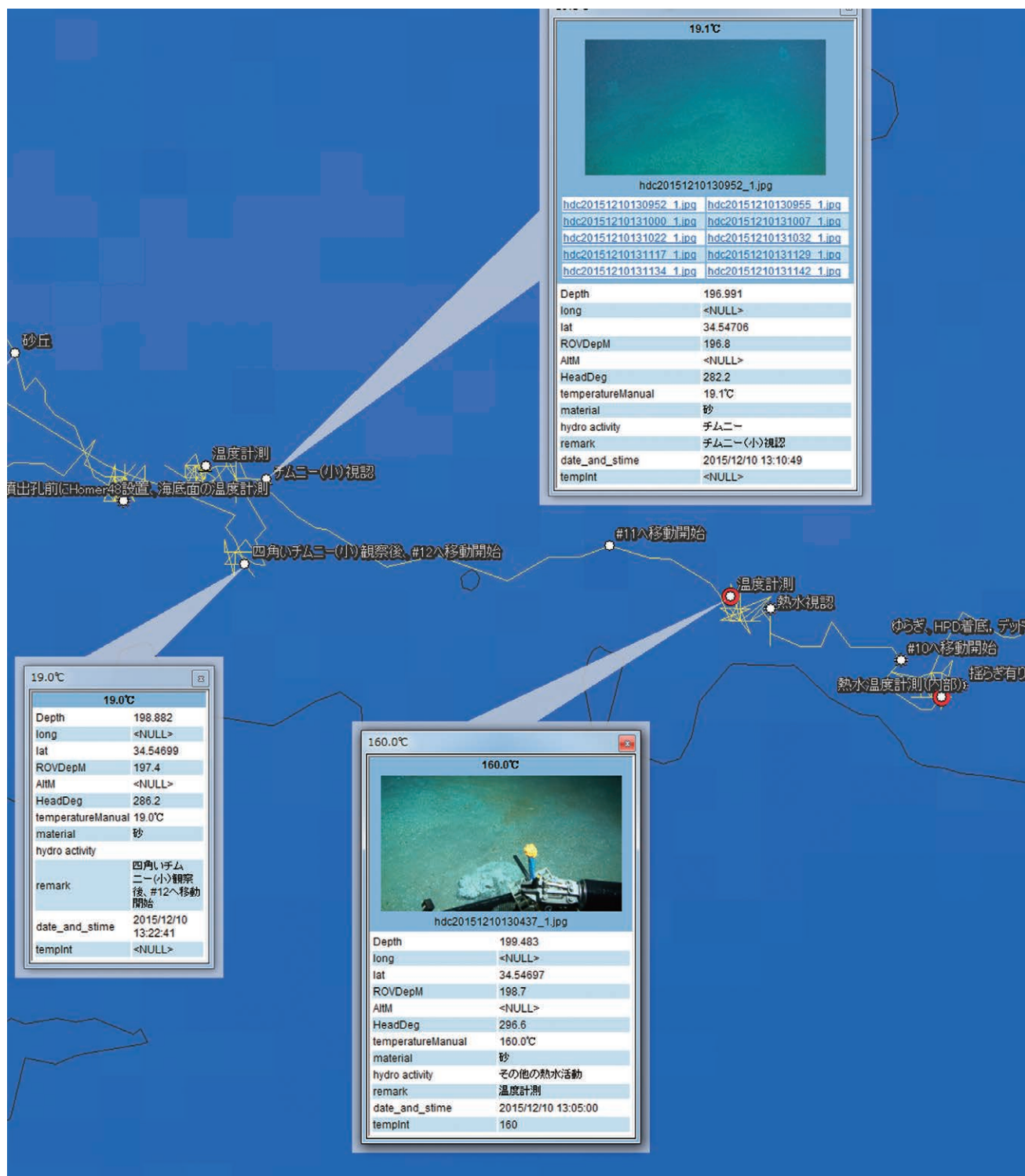


Fig. 14. Example of onboard researchers' comments and taken photos with ROV trajectories during dive1919 at north-west part of Oomuro-hole in GIS database display.

図14. ハイパードルフィン第1919次潜航における大室海穴北西部でのROV航跡および乗船研究者の観察ログ、撮影写真の連携表示の一例（GISデータベースの画面）。

システムの敷設検討を行った。本手法では、これまでケーブル式観測システムで敷設時に考慮されていた地形や底質に加えて、熱水活動を考慮するため海底面の最高計測温度、ならびに、観察された熱水活動をシンボルで呈示し、航跡や写真、乗船研究者の知見などの情報と時刻を用いて関連付けることにより未知の複雑な海底熱水活動の様子を明らかにした。調査により大室海穴北西部に高温熱水活動が集中する帯状領域が存在することが明らかになり、この領域を観測対象とした場合に、具体的にケーブル式観測システムを配置可能な条件を示した。今回の調査によって、大室海穴北西部における海底熱水活動の分布が一定程度確認された一方で、その他の大室海穴南東部は未調査の領域も多く、実際にケーブル式観測システムを敷設するためには、さらなる調査領域の拡大が必要であり、今後の課題となっている。

謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）次世代海洋資源調査技術プロジェクトの一環として実施しました。また、査読者の山本啓之氏と匿名査読者より、本論文について様々な有益なご意見・ご指摘をいただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- Chave, A.D., et al. (2001), The NEPTUNE Scientific Submarine Cable System, *Proc. of SubOptic*.
- Choi, J.K., S. Nishida, T. Yokobiki, and K. Kawaguchi (2013), Development of an Automated Cable-laying System for DONET Construction, 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT).
- 光海底ケーブル執筆委員会 (2010), 光海底ケーブル, Parade Books, 214–216, 317.
- Hishiki, K., N. Fujiwara, T. Katayama, T. Mizukawa, K. Kawaguchi, and T. Yokobiki (2016), Power Distribution System for Multidisciplinary Seafloor Observatory Junction Box, Techno Ocean 2016 in Kobe.
- 金子誠, 高橋亨, 北田数也, 笠谷貴史, 町山栄章 (2015), 海洋鉱物資源データ統合解析の実用化に向けた潜航調査による地理情報の収集と整理—中部沖縄トラフ伊平屋北海丘域を対象として—, 2015年物理探査学会秋季大会.
- 笠谷貴史, 北田数也, 町山栄章, 後藤忠徳, 岩本久則 (2016), JAMSTECにおける資源探査の現状と無人機の利用, 海洋調査技術, 28(1), 17–19.
- Kawaguchi, K., S. Kaneko, T. Nishida, and T. Komine (2015), Construction of the DONET real-time seafloor observatory for earthquakes and tsunami monitoring, In: P. Favali, L. Beranzoli, and A. De Santis (Eds.), SEAFLOOR OBSERVATORIES: A New Vision of the Earth from the Abyss, Springer, 211–228.
- Kawaguchi, K., E. Araki, T. Yokobiki, J.-K. Choi, S. Nishida, T. Ohki, T. Mizukawa, K. Hishiki, and Y. Aoki (2016), Real-GEMS: Development of Submarine Cabled Test Site to Evaluate an Environmental Monitoring Method in Hydrothermal Area, Techno Ocean 2016 in Kobe.
- 国立研究開発法人防災科学技術研究所 (NIED), 日本海溝海底地震津波観測網整備事業<<http://www.bosai.go.jp/inline/>>, (参照 2017-04-28).
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構, Data and Sample Research System for Whole Cruise Information in JAMSTEC: DARWIN <<http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/j/>>, (参照 2017-04-28).
- 内閣府総合科学技術・イノベーション会議, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), 次世代海洋資源調査技術 (海のジパング計画) <<https://www.jamstec.go.jp/sip/>>, (参照 2017-04-28).
- 大木健, 小寺透, 川口勝義 (2015a), ケーブル式観測システムのための海底ケーブル展張ルート計画手法. ポテックス・メカトロニクス講演会 2015 in Kyoto (ROBOMECH2015).
- 大木健, 樋泉昌之, 小寺透, 川口勝義 (2015b), ケーブル式観測システム開発・構築を目的とした地理情報システムの活用手法, 海洋理工学会 2015 秋季大会.
- Ohki, T., T. Yokobiki, H. Matsumoto, S. Nishida, T. Koderu, M. Toizumi, and K. Kawaguchi (2016), Survey and data management method based on geographic information system for cable based observatory development, Techno Ocean 2016 in Kobe.
- 谷健一郎, 宿野浩司, 平原由香, 正木裕香, Alexander Nichols, 石塚治, Richard Fiske, Katherine Cashman, Philip Leat, Rebecca Carey, Iona McIntosh, 尾上彩佳, 豊田新, 浅越光矢 (2013), 大室ダシ火山の活動史解明, BlueEarth2013, BE13-09.