

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630417

研究課題名(和文) 海底熱水鉱床探査に革命を起こす新しい探査手法の確立

研究課題名(英文) Developing a revolutionary method for exploration of seafloor hydrothermal deposits

研究代表者

中村 謙太郎 (Nakamura, Kentaro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40512083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、海底熱水鉱床の実開発に向けて大きな障害の1つとなっている「探査の効率」を劇的に向上させることを目的として、船上からの音響による探査手法の確立を行った。その結果、(1) 調査船搭載のマルチビーム音響測深装置による熱水検知の原理を明らかにし、(2) 最適な観測条件を決定した。さらに、(3) 中部～南部沖縄トラフにおける実際の広域探査を実施し、その有効性を確認するとともに、初めて広域熱水サイトマッピングに成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to make a dramatic improvement in exploration efficiency of seafloor hydrothermal deposits, I tried to develop a new exploration method based on water column observation using multibeam echo sounder (MBES) systems. The three years of research produced the following results; (1) elucidation of the cause of the detection of hydrothermal plumes by MBES, (2) determination of optimal conditions for the MBES survey, and (3) performance of a wide-area acoustic water column survey in mid- and southern Okinawa Trough, which provided evidence of effectiveness of this exploration method as well as the first wide-area map for seafloor hydrothermal vent sites in mid-Okinawa Trough.

研究分野：資源工学

キーワード：海底熱水鉱床 船上音響探査 周波数 観測条件 中部沖縄トラフ

1. 研究開始当初の背景

海底熱水鉱床の開発に向けた、最も根本的かつ重大な障害の一つは、その探査の難しさである。一般的に海底熱水鉱床は、広大な海洋底にわずか数 10~数 100 m 四方のスポットとして存在するために、その発見には大きな困難が伴う。現在、唯一確実な発見手段は、潜水船からの肉眼もしくはカメラによる目視である。しかし、海底での視程はわずか 10m 程度であり、この方法で例えば沖縄トラフ (1000 km x 100 km) を網羅的に探査するには 100 万日という途方も無い時間が必要である。一方、近年 AUV に搭載した化学センサーや音響機器で熱水鉱床を探知できることが示されつつあり (German et al., 2008; Kumagai et al., 2010), より効率的な探査の実現につながると期待されている。ただし、現状では AUV で観測できる範囲も、一日あたり 10 km² 程度である。これは、潜水船の 100 倍近い範囲ではあるが、それでも沖縄トラフを網羅的に探査するには非現実的な日数がかかる。

このような現状を打破する可能性があるのが、船上音響探査機器による熱水の探査である (Hughes Clark, 2009; Tanahashi et al., 2011)。申請者らは、沖縄トラフにおける予察的な研究において、船上のマルチビーム測深機で海底熱水を直接捉えることができることを見出した。この船上音響探査の手法を用いれば、幅数 km の範囲を 10 ノット程度の速度で観測することができる。これが実現すれば、沖縄トラフの熱水域を網羅的に探査するのに僅か 75 日で良い。さらに、船上観測は AUV や潜水船を使った観測に比べてオペレーションがはるかに単純であり、時間だけでなく、コスト的なメリットも大きい。すなわち、この船上から熱水を直接探査する手法こそは、海底熱水鉱床の実開発に向けた切り札と成り得るものといえる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、船上音響探査により熱水噴出孔の位置をピンポイントで効率的に特定する探査手法を確立することを目的とした。これを達成するために、(1) 船上音響探査の観測条件と、それによってどのスケールまで熱水噴出孔を絞り込めるかを明らかにすること、(2) 音響が熱水を捉える原理を、「熱水に含まれるガスバブルの有無」と「探査に用いる音響測深機の周波数」という二つの切り口から解明すること、そして (3) その原理を用いて実際の熱水孔を特定するための探査手法を確立し、実際の広域探査に適用すること、を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ウォーターカラムのデータを表示・録画できる 50kHz の SEABAT8160 を搭載する調査船「なつしま」と、同じく 12kHz の EM122 を搭載する調査船「よこすか」を用

いて、以下の調査・研究項目を実施した。

- (1) 既知の熱水活動域である沖縄トラフの「伊平屋北熱水フィールド」において、速度や測線間隔等のパラメーターを変えた観測を実施し、最適な観測条件を確定するとともに、本手法によりどの程度のスケールまで熱水噴出エリアを絞り込めるかを明らかにする。
- (2) 船上マルチビーム測深機の周波数の違いが熱水の見え方にどのような影響を及ぼすかを解明するために、既知の熱水サイトである「伊平屋北熱水フィールド」において、50kHz の SEABAT8160 (調査船「なつしま」搭載) と、12kHz の EM122 (調査船「よこすか」搭載) による比較検討を行う。さらに、周波数の違いを含む、「なつしま」と「よこすか」によって得られた既知熱水サイトから得られたデータを総合的に解析・検証し、音響が熱水を捉える原理を解明する。
- (3) 本研究によって確立された観測の手法を実際の沖縄トラフ広域調査に応用し、熱水の探査における有用性を実証する。

4. 研究成果

(1) 観測条件の確定と絞り込みのスケール

中部沖縄トラフの伊平屋北海域において、海洋調査船「なつしま」および「よこすか」によるマルチビーム測深機を用いた熱水調査を行った。調査は、600m グリッドで東西方向と南北方向の測線を設定し、これを 3 ノット、5 ノット、7 ノット、10 ノットで航走し、データを採取した。その結果、以下の成果を得ることができた。

- (a) 既知の熱水サイトである「伊平屋北熱水フィールド」において、明瞭な熱水プルームを捉えることに成功した。
- (b) プルームの検知は、南北・東西測線のいずれにおいても可能であり、かつ船の進行方向にもよらないことがわかった。
- (c) プルーム検知の船速依存を確認するために、船速 10 ノット、7 ノット、5 ノット、3 ノットでの調査結果を比較・検討した。その結果、10 ノットおよび 7 ノットの場合には、測線から遠く、かつ強度の小さいプルームの一部を見逃す場合があることがわかった。このことから、より低速で観測した方が、より弱いプルームまで捉えられると考えられる。
- (d) ウォーターカラムの観測においては、海底面からの反射がノイズとなるために、有効なプルーム検知幅は両舷合わせて水深と同程度までであることがわかった。すなわち、熱水調査のための測線間隔は調査海域の水深に依存し、深い場所で比較的広くとれるが (それでも一般的な地形調査と比べると 1/3~1/5)、浅い場所では狭くする必要がある。

なお、この調査によって既知の熱水サイトである「オリジナルサイト」の南方1.2kmと2.6kmの地点に、これまで全く知られていなかった新規の熱水サイトを2か所（「ナツサイト」と「アキサイト」）発見し、はからずも本手法の有効性を示すこととなった（図1）。

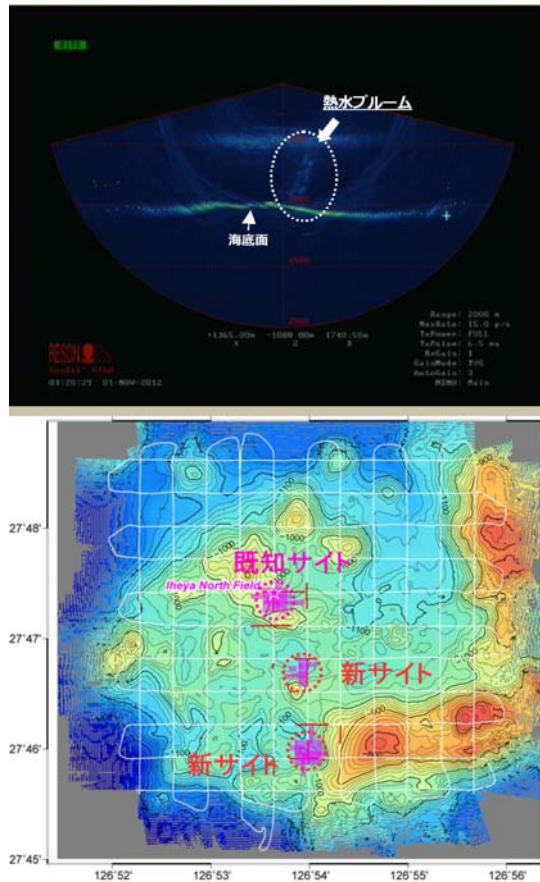


図1 伊平屋北フィールドにおける調査結果。(上) マルチビーム音響測深装置で捕らえられた熱水兆候。(下) 調査測線と検知された既知および未知の熱水サイト。

(2) 音響が熱水を捉える原理の解明

既知の熱水サイトである「伊平屋北熱水フィールド」において、周波数による見え方の違いを検証するために、同一測線において「よこすか」搭載のEM122および「なつしま」搭載のSEABAT 8160による観測を行い、結果を比較・検討した。その結果、12kHzのEM122と50kHzのSEABAT8160のいずれで観測した場合も、全く同じ場所で全く同様の熱水ブルームを捉えられることが明らかとなった。このことから、船舶に搭載されている一般的な音響測深装置を用いることで、その種類（特に周波数）によらず熱水ブルームの探査を行えることがわかった。

さらに、採取された音響データの解析から、船上のマルチビーム音響測深装置で捉えられている音響異常は、場所によって1000m以上も立ち上っていること、そしてその音響異常は場所によらず水深約500mで消滅することが明らかとなった。一般的に、熱水のプ

ームは200m程度上昇したところで温度低下によって浮力を失い、その後は水平方向にたなびくことが知られている（German and Von Damm, 2004）。そのため、一直線に1000m以上も立ち上る音響異常は、熱水そのものを捉えたものではないことがわかる。そして、音響異常の消滅する水深約500mは、二酸化炭素がハイドレートもしくは液体から気体に相変化する温度・圧力条件（Bigalke et al., 2008）にあることがわかった。このことから、音響異常で捉えているものは、熱水そのものではなく、熱水サイトから噴出して上昇する二酸化炭素の液滴であることが明らかとなった。

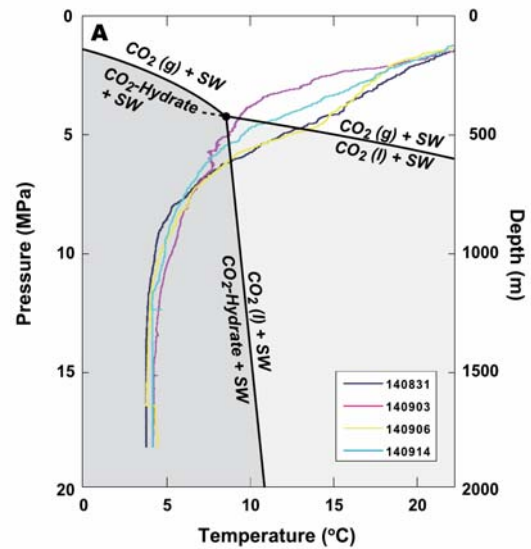


図2 中部沖縄トラフにおける水温プロファイルとCO₂-H₂O系相図（Nakamura et al., 2015）。

(3) 熱水探査の手法確立と探査への適用

本研究の手法を用いて、(1) 沖縄本島北部の中部沖縄トラフ、(2) 沖縄本島北西方の中部沖縄トラフ、(3) 中部沖縄トラフから南部沖縄トラフにかけての海域において広域の探査を実施した。その結果、以下の成果を得た。

- 中部沖縄トラフにおいて広域探査を実施した結果、すべての既知サイトを含む11の熱水サイトを検出することに成功し、手法の有効性を示すことができた。
- 沖縄本島北西方の海域で広域調査を実施した。その結果、従来知られていなかったものを含む3つの熱水サイトをマルチビーム音響測深装置により発見した。これにより、従来の科学調査が少なかった本海域においても、熱水の分布を明らかにできた。
- 中部沖縄トラフから南部沖縄トラフにかけての縦断調査も行った。その結果、南部沖縄トラフにおいても既知の高熱水サイトを捉えられること、およびこれまでに知られていない複数の未知サ

イトが存在することを確認した。また、中部沖縄トラフと南部沖縄トラフの間には、熱水活動が少ない空白域が存在する可能性が示された。

これらの成果によって、沖縄トラフにおける海底熱水鉱床探査に、調査船搭載のマルチビーム音響測深装置が周波数によらず極めて有効であることと、実際の広域調査を行う際の観測条件について最適化することができ、実際の広域探査によってその有効性の実証にも成功した。

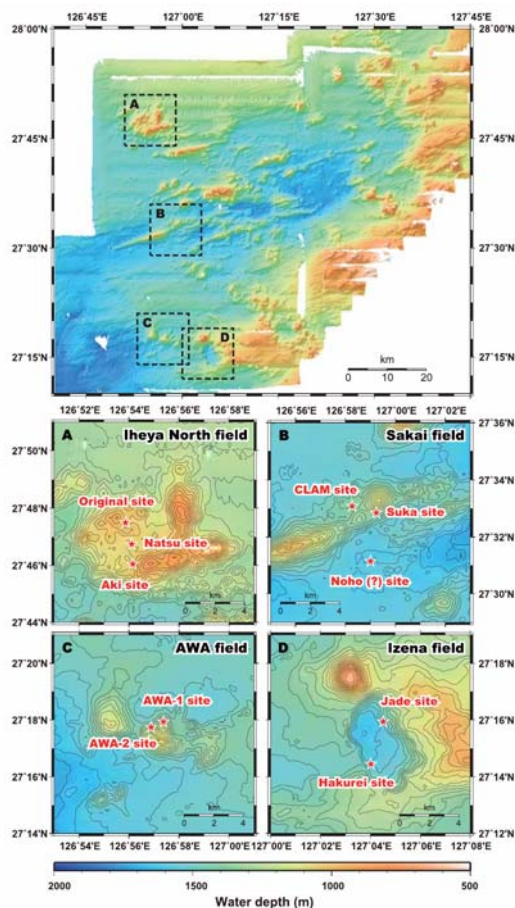


図3 中部沖縄トラフにおける広域調査エリア (上) と確認された熱水サイト (下) (Nakamura et al., 2015)。

<引用文献>

Bigalke, N. K., Rehder, G. and Gust, G. (2008) Experimental investigation of the rising behavior of CO₂ droplets in seawater under hydrate-forming conditions. *Environ. Sci. Technol.* **42**, 5241–5246.

German, C. R. and Von Damm, K. L. (2004) Hydrothermal processes. The Oceans and Marine Geochemistry, *Treatise on Geochemistry*, Vol. 6 (Turekian, K. K. and Holland, H. D., eds.), 181–222, Elsevier, New York.

German, C. R., Yoerger, D. R., Jakuba, M., Shank, T. M., Langmuir, C. H. and Nakamura, K. (2008) Hydrothermal exploration with the Autonomous Benthic Explorer. *Deep-Sea Res.* **155**, 203–219.

Hughes Clark, J. E., Martinolich, R. and Broadus, M. (2009) Repetitive surface-mounted multi-beam water column imaging of hydrothermal vent plumes over NW Rota 1: Eos, Trans., AGU, fall meeting, abs. V51D-1716.

Kumagai, H., Tsukioka, S., Yamamoto, H., Tsuji, T., Shitashima, K., Asada, M., Yamamoto, F. and Kinoshita, M. (2010) Hydrothermal plumes imaged by high-resolution side-scan sonar on a cruising AUV, Urashima. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **11**, Q12013, doi:10.1029/2010GC003337.

Tanahashi, M., Yamamoto, K., Kaji, T. and Maruyama, N. (2011) Acoustic water column anomalies detected by conventional multibeam at the JADE hydrothermal site in the Izena Hole in the Okinawa Trough, SW of Japan. The 22nd Ocean Engineering Symposium, March 17–18, 2011, OES22-071

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Kasaya, T., Machiyama, H., Kitada, K., and Nakamura, K. (2015) Trial exploration for hydrothermal activity using acoustic measurements at the North Iheya Knoll. *Geochemical Journal* **49**, 597–602 (査読有)。

2. Nakamura, K., Kawagucci, S., Kitada, K., Kumagai, H., Takai, K., and Okino, K. (2015) Water column imaging with multibeam echo-sounding in the mid-Okinawa Trough: Implications for distribution of deep-sea hydrothermal vent sites and the cause of acoustic water column anomaly. *Geochemical Journal* **49**, 579–596 (査読有)。

[学会発表] (計 2 件)

1. 中村謙太郎・川口慎介・北田数也・熊谷英憲・高井研・沖野郷子, マルチビーム音響測深機を用いた海底熱水噴出孔の探査:中部沖縄トラフを例として。地球化学会, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市, 2015.9.16.

2. 中村謙太郎・川口慎介・北田数也・熊

谷英憲・高井研・沖野郷子，中部沖繩
トラフにおける海底熱水噴出孔の網羅
的探査. 日本地質学会，信州大学，長
野県松本市，2015.9.13.

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 謙太郎 (NAKAMURA, Kentaro)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：40512083

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：