

第3回「理想の追求」研究報告

研究期間：2012年4月1日～2015年3月31日

沖縄の深海に超巨大海底熱水鉱床を探せ

プロジェクトリーダー

高井研 海洋研究開発機構 深海・地殻内生物圏研究分野

プロジェクトメンバー

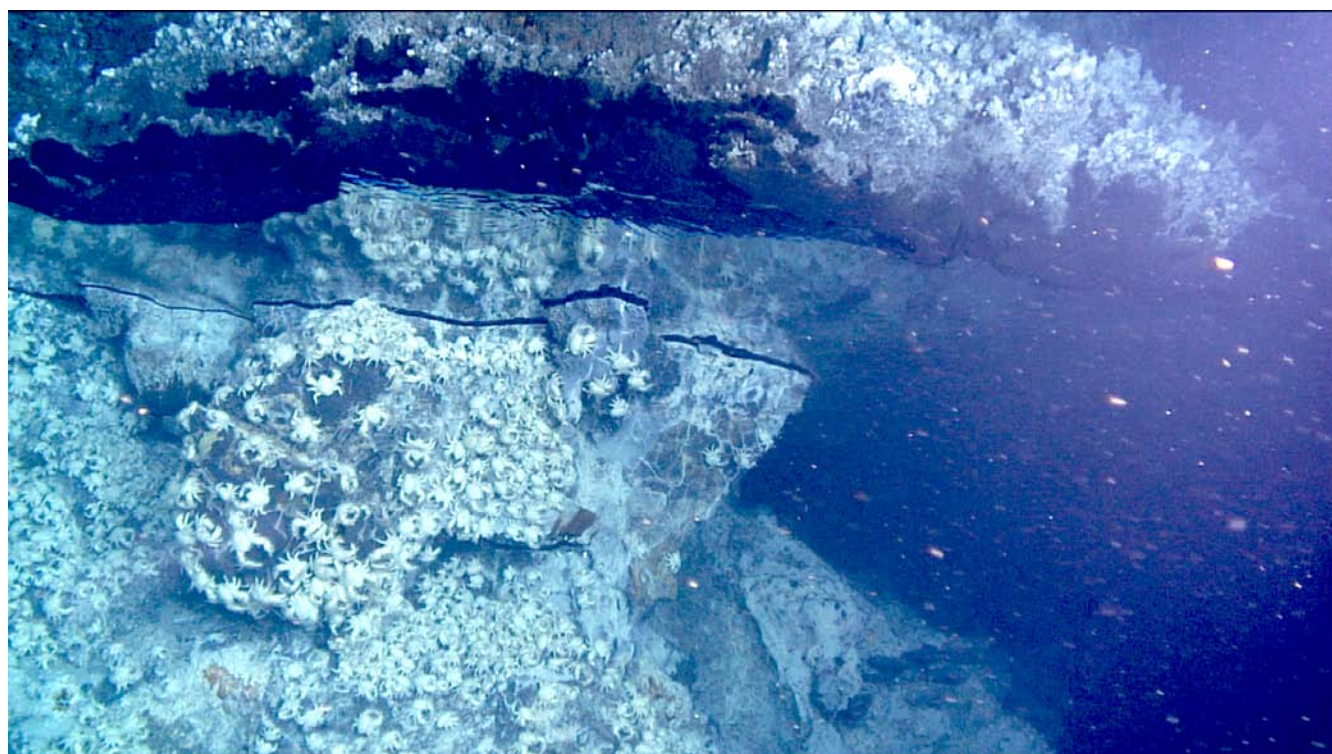
川口慎介 海洋研究開発機構 深海・地殻内生物圏研究分野

山本正浩 海洋研究開発機構 深海・地殻内生物圏研究分野

浅田美穂 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

中村謙太郎 東京大学大学院 工学系研究科

石橋純一郎 九州大学 理学研究院



プロジェクトの成果として中部沖縄トラフで発見されたサカイフィールド野甫サイト熱水域の「逆さゴエモンシオリエビチムニー」と名づけられたチムニーの写真。沖縄トラフの熱水マウンドでは、熱水から金属硫化物が析出する際、軒先のひさしのような構造を作る場合があり、フランジ構造と呼ばれる。中には、幅数メートルを超える巨大なフランジが成長することが知られており、新たに発見された野甫サイト熱水域では、これまでに見つかったフランジの中でも最大級の大きさを有していた。フランジの下の鏡のように見えているのは 320℃を超える熱水であり、海水と熱水の物性の違いが光の屈折率の違いを引き起こし、鏡のように光を反射する。フランジの下に群れるゴエモンシオリエビが熱水に反射して見える珍しい光景を作りだしている。

1. 研究の背景と達成目標

地球深部探査船「ちきゅう」を用いた研究の成果によって、沖縄トラフ伊平屋北熱水フィールドの海底下には世界最大の「海底熱水湖」が存在し、巨大な熱水鉱床が眠っている可能性が示された。本研究では、マルチプル調査プラットフォームと地球生物学的熱水センシングを組み合わせた次世代探査によって、沖縄の深海に超巨大海底熱水鉱床を探査し、学術的には海底下の熱水循環システムの駆動力と海底下生態系との関わりの理解、社会的には日本の海に眠る資源の開発基盤の創造、を目的とする。

その目的の達成のために、本研究では以下の二つの研究アプローチを展開する。

①地球生物学的熱水センシングの確立と応用

例えば自律型海中ロボットを用いた効率的な海底熱水の探査を行うと同時に、海底下熱水循環系の規模や鉱床の品位を推定することを可能とする化学因子（水素、メタン、硫化水素、アンモニア、水銀）の濃度や同位体比を測定することによって、海底下熱水循環系規模や鉱床の品位の推定に必要な時間や労力を、飛躍的に短縮・省略することができる可能性がある。そのような現場計測化学因子センサーを開発・構築・実装し、超巨大海底熱水鉱床の探査に応用する。

②マルチプル調査プラットフォームによる海底熱水探査法の確立と応用

自律型海中ロボットや曳航体を用いた音響・物理探査による高速・広範囲な海底熱水探査法を確立するだけでなく、より高速・広範囲な探査を可能にする海洋調査船の音響測深器を用いた超効率的な海底熱水探査法を確立・応用し、実際の超巨大海底熱水鉱床の発見に結び付ける。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

【主な研究成果】

- ・地球生物学的熱水センシングの確立と応用を目指して、水素、メタン、硫化水素および水銀の現場濃度センサーを開発・導入し、現場テストによって実装を完了し、今後の応用展開を可能とした。
- ・マルチプル調査プラットフォームによる海底熱水探査法の確立と応用を目指して、海洋調査船のマルチビーム音響測深による超効率的な海底熱水探査法を確立し、わずかな研究期間内に6箇所の新しい海底熱水を発見した。

【社会、学術へのインパクト】

我が国の近海に未活用の海底資源が眠っていることはよく知られた事実である。一方で、それらの海底資源の開発・利用については、多くの技術的・経済的・社会的な課題があることもまたよく知られている。しかしながら、将来的な海底資源の開発・利用の最も根幹を成す基盤は、「どこに、どれだけ、どのような海底資源が存在しているか？」という科学的知見である。この将来的な海底資源の開発・利用に向けた基盤的科学知見を構築する革新的な方法の有効性を示すことが本研究の学術・社会への貢献と言える。本研究ではこれまで行われてきた海底熱水探査のスキームを革新する新しい探査のスキームとして、(1)高速広域探査、(2)絞り込み熱水特性探査、(3)海底観察探査の3段階スキームを提示した。(2)マルチ化学センサーを用いた現場計測に基づいた絞り込み熱水特性探査においては研究進展の遅れのために完全な有効性の実証に至らない部分もあったが、(1)高速広域探査から(3)海底観察探査に至るスキームの中で、限られた研究期間内に中部沖縄トラフにおける6箇所の新たな海底熱水域を発見することによって、新しい海底熱水探査法の有効性を明確に示すことができた。本研究の成果によって、我が国の海底資源研究開発から始まる効率的な海底熱水探査法の世界的なスタンダードが創出され、将来の海底資源開発に大きな貢献を果たすことが期待できる。さらに本研究の成果は、将来的な海底資源の開発・利用に貢献するだけでなく、世界の深海熱水学術研究においても、未到深海熱水活動やそれに依存する極限環境生命圏の探査や機能解明の端緒を切り開く方法論であり、地球における生命活動や生命圏の限界を解明する研究や生命の誕生と初期進化といった学術における第一級命題を解明する科学の展開に寄与することが期待できる。

3. 研究成果

これまでの海底熱水探査の方法論の徹底的な総括と我が国の海底資源研究開発の重点化に伴う最近の研究動向の精査に基づいて、本研究ではまず、マルチプル調査プラットフォームと地球生物学的熱水センシングを組み合わせた次世代探査法のスキームを構築した。

2012年度(助成初年度)に、自律型巡航探査機(AUV)「うらしま」を用いて、比較的広範囲の海底に対する水中音響精査を行うだけでなく、海洋調査船の詳細なマルチナロービーム音響探査でも、AUV同様の熱水探査が可能であるかどうかを検証した。その結果、既に存在が知られていた伊平屋北オリジナル熱水フィールドの存在と活動規模を海洋調査船「なつしま」のマルチナロービーム音響調査によって検出・特定できることが明らかになった。つまり海洋調査船による迅速・簡便なマルチナロービーム音響調査が、海底熱水の高速度広域網羅的探査に十分適用可能であることが示された。この初年度の研究成果によって、次世代探査として(1)高速広域網羅的探査、(2)絞り込み熱水特性探査、(3)海底観察探査の3段階スキームを構築することができた。

一方、2012年度には、当初地球生物学的熱水センシングの目玉として考えていた海水中の熱水由来のメタンの濃度と同位体比のリアルタイムセンシングを目指し、メタンの濃度と同位体比のセンサー開発に着手した。ところが、深海用センサーとして唯一実績のあったアメリカのロスガトス社との共同開発において、深海用メタン同位体比計測が技術的に未成熟で、研究に必要な定量性と感度と高時間分解能を達成することが困難であることがわかった。この技術的な問題が研究計画に与える影響を最小限に抑えるため、急遽地球生物学的熱水センシングをメタン、水素、硫化水素、アンモニアのマルチ濃度センシングに焦点を絞り、デンマークのユニセンス社との共同開発を行うこととした。同位体比の測定は陸上実験室のシステムをハイスループット化する方向性に切り替え、2012年度にその体制を整えた。

2013年度には、(1)高速広域探査法の完成と検証および(2)絞り込み熱水特性探査のためのマルチセンサーの確立と現場計測実験を行った。2013年11月に海洋調査船「なつしま」で実施した高周波のマルチビーム音響測深を用いた高速広域探査を計画し、海況不良のため極めて調査が困難であったが半日の探査を中部沖縄トラフの伊平屋北海丘で行い、2か所で明瞭な熱水プルームの兆候を発見した(図1)。続いて2013年12月にAUV「うらしま」の調査を計画し、先の調査と同様に海況不良のため計1日しか調査できなかったが、詳細な海底地形と高速広域探査で見つかった熱水プルームの兆候を確認した(もしマルチセンサーの導入がこの段階で間に合っていたら、ここで絞り込み熱水特性探査のテストができ、ほぼ研究テーマの目的である次世代探査が完成できていた可能性があったが、残念ながら間に合わなかった)(図2)。そして実質1.5日で絞り込んだ海域において、2014

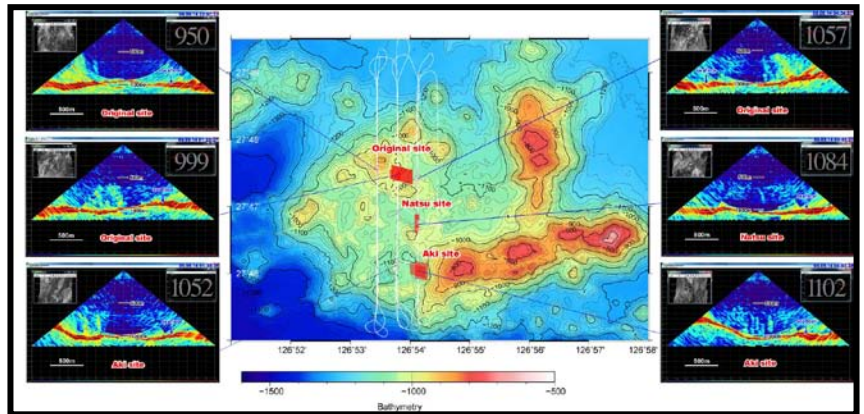


図1 伊平屋北海丘における音響測深によって捉えられた熱水活動の兆候

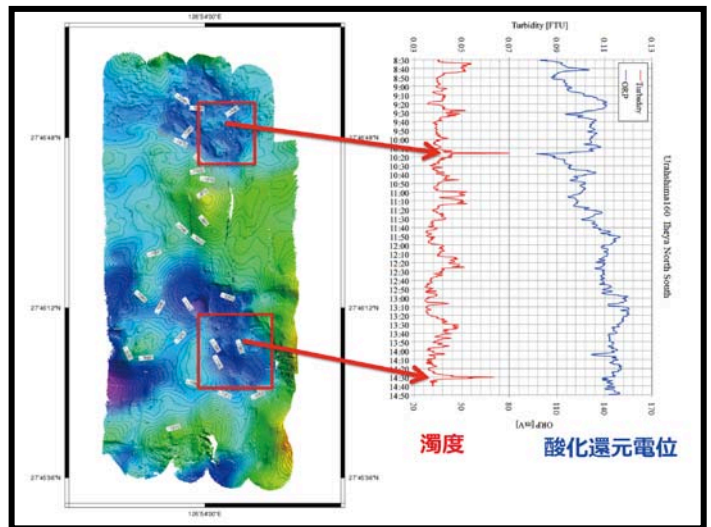


図2 AUV「うらしま」によって精査された熱水活動の兆候

年1月に海洋調査船「かいよう」と無人探査機「ハイパードルフィン」を用いた海底観察探査を3日間実施し、これまでに知られていた伊平屋北オリジナルフィールドに加えて、伊平屋北ナツフィールド、伊平屋北アキフィールドという新たな熱水噴出域を発見することに成功した(図3)。しかも、予察的な熱水化学組成の特性の解析に基づいて、既に知られていた伊平屋北オリジナルフィールドと新たに発見された2つの熱水域は同一の海底下熱水溜まり(つまり同じ熱水源)を有する複合的な熱水活動域であることが示唆され、直径3km以上に渡る広範囲な領域に広がる海底下熱水循環系を有する世界最大規模の海底熱水域である可能性が示された。

さらに2013年度には、2012年度に開発・導入され

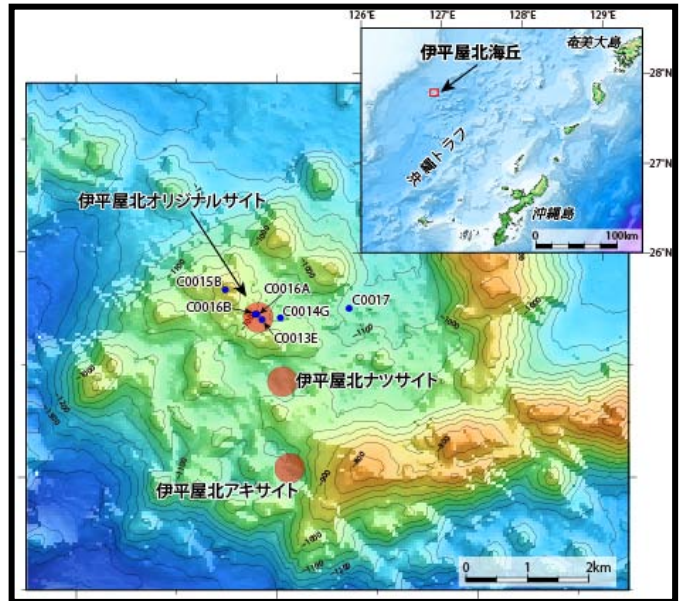


図3 伊平屋北海丘で見つかった2つの新しい熱水域

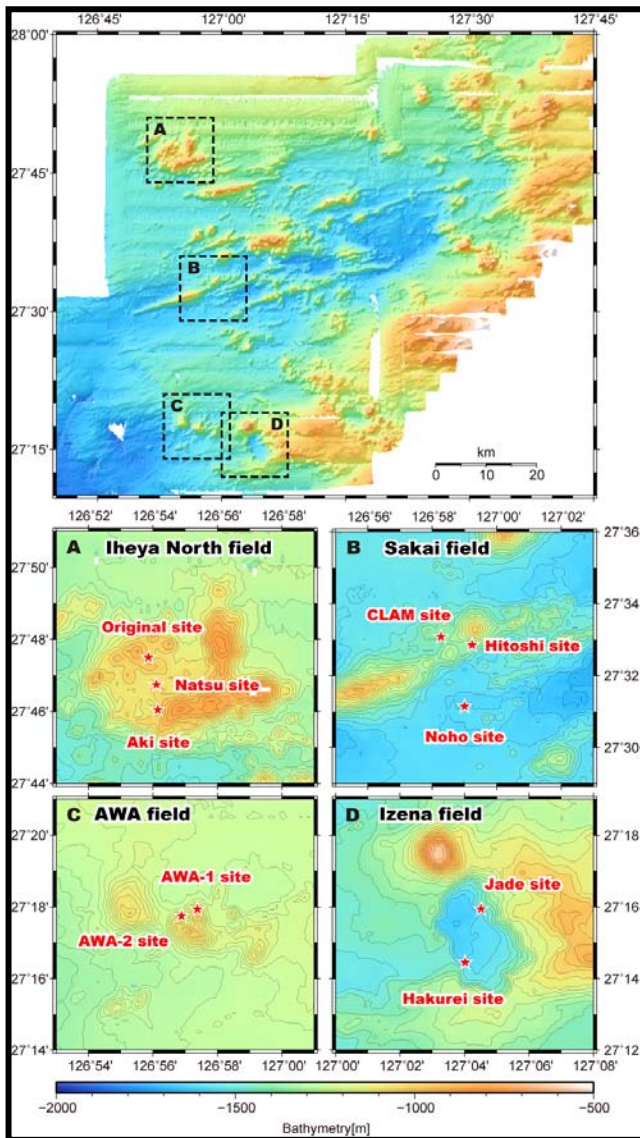


図4 中部沖繩トラフに存在する4つの巨大な複合熱水域

た水素、硫化水素、一酸化二窒素等のマルチ化学センサーの現場測定テストも行い、現場計測に十分な感度と耐久性を有していることが確認できただけでなく、これまで船上に試料を回収した後分析していた熱水-海水混合領域の海水中的水素や硫化水素濃度が、回収中に現場微生物群集に消費された、あるいは化学酸化を受けた変質後の値であることが明確に示された。また、ユニセンス社のマルチ化学センサーには含まれないメタンセンサーについては膜透過型半導体センサーであるMETSを導入し、マルチ化学センサーとの同時計測システムを設計した。

2014年度においては、2013年度に完成させた(1)高速広域探査法を用いて、海洋調査船「なつしま」および「よこすか」による中部沖繩トラフ全域にわたる網羅的熱水探査を行った。本研究以前の20年以上の研究歴史において、これまで中部沖繩トラフには、6カ所の深海熱水域が発見・報告されてきたが、高速広域網羅的探査の結果、2013年度に発見された伊平屋北ナツフィールドと伊平屋北アキフィールドに加えて新たに4カ所の深海熱水域が存在することが明らかになった(図4)。つまり、12カ所の熱水域が探査した海域に存在するすべての海底熱水活動であることが初めて確認された。12カ所の熱水活動のうち10カ所は直径3kmの範囲に複数存在する4カ所の複合熱水域を形成する巨大な熱水域であることも明らかになった。さらに、その巨大熱水域の一つであるサカイフィールドと名づけられた熱水域において、海洋調査船「なつしま」と無人探査機「ハイパードルフィン」を

用いた海底観察探査を実施し、ヒトシサイトおよび野甫サイトと呼ばれる熱水域の海底観察および試料採取を行った。その結果、サカイフィールドの熱水が、他の中部沖縄トラフの深海熱水と少し異なる化学的性質を有していること、これまでに知られる深海熱水域の中でも最大級の海底活動面積を誇る将来の海底資源開発の有望な候補地であること、が示唆された。

2014年度におけるサカイ熱水フィールドの発見とその海底観察に至るプロセスは、(1)高速広域網羅的探査、(2)絞り込み熱水特性探査、(3)海底観察探査、の3段階スキームによるものであった。(2)絞り込み熱水特性探査には、2013年度に確立されたマルチ化学センサーを搭載したAUV「うらしま」による探査を実施し、巨大な海底下熱水循環の存在を示唆する水素濃度異常を検出することにも成功した(図5)。さらに、海洋調査船「なつしま」と無人探査機「ハイパードルフィン」によるサカイ熱水フィールドの海底観察においては、2013年度に導入したメタン濃度センサーの実装テストを行い、現場メタン濃度センシングが可能であることも確認された。

研究期間において、(1)高速広域網羅的探査、(2)絞り込み熱水特性探査、(3)海底観察探査、の3段階スキームの中に、現場メタン濃度センシングを組み込むことができなかったが、当初の目標として掲げた「マルチ

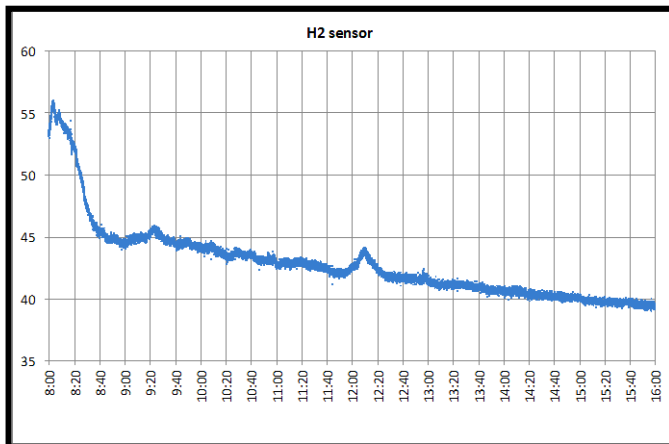


図5 マルチ化学センサー（水素センサー）が捉えたサカイ熱水フィールドヒトシサイト上に存在する微弱な水素濃度異常

プル調査プラットフォームと地球生物学的熱水センシングを組み合わせた次世代探査法の確立」と「それを用いた超巨大海底熱水鉱床の候補地の探査」を十分に達成することができたと考える。また、実際に伊平屋北複合熱水フィールドやサカイ熱水フィールドといった世界最大級の海底および海底下熱水活動を有するポテンシャルを持った新しい熱水域を発見したことは、当初の予想を上回る大きな研究成果であったと自負する。以上の成果を鑑みて、キヤノン財団「理想の研究」助成に相応しい研究成果を挙げる事ができたと総括する。

4. 今後の展開

本研究では、マルチプル調査プラットフォームと地球生物学的熱水センシングを組み合わせた次世代探査法を確立し、全長 2000kmにも及ぶ沖縄トラフのおよそ 1/6 にあたる中部沖縄トラフ海域の網羅的な熱水活動探査を完遂した。探査法の確立・検証・完成に要した期間が多く、実際の探査はほぼ 1 年程度の調査期間であったことを考慮すると、あと 5 年、我々の探査を続けることによって、沖縄トラフ全域の網羅的な熱水活動探査を完遂できると予想される。そして 100 カ所近い沖縄トラフ全海底熱水域リストが明らかになるだろう。ある地質学的場における熱水活動の存在と分布および活動規模を完全に網羅した研究例は皆無であり、この研究が進めば歴史上初めての快挙となる事が期待できる。学術的には、沈み込み帯におけるマグマ活動やテクトニクスと海底熱水活動の関わりや背弧拡大プロセスの進化と熱水活動の履歴や頻度の関わり、あるいは熱水(微)生物群集の生物地理学的分布や動態、あるいは存在様式や機能と地質・熱水化学・海洋物理的因子との関わり、といった第一級の科学命題を解くための、史上最高の背景や基盤情報を有した研究対象となり、学術上の難問を解明する極めて大きな原動力となる事が容易に想像できる。

さらに沖縄トラフ全海底熱水域リストが完成したあかつきには、沖縄トラフにおける多様な海底熱水鉱床リストを手に入れることであり、つまりそれは我が国の将来の海底資源開発の方向性を決定する最高情報である。本研究において日本発の効率的な海底熱水探査法の世界標準が創出され、我が国の海底資源開発の未来を照らすだけでなく、世界における海底資源開発の指針となることも大いに期待できる。

5. 発表実績

[研究論文]K Nakamura, S Kawagucci, K Kitada, H Kumagai, K Takai, K Okino (2015) Mapping deep-sea hydrothermal vent sites with multibeam echo-sounding (MBES) in the mid-Okinawa Trough. *Geochemical J.* submitted (別刷り無)

[研究論文]T. Kasaya, H Machiyama, K Kitada, K. Nakamura (2015) A trial of exploration for a sign of hydrothermal activity using acoustic measurements. *Geochemical Journal*, submitted. (2015) Mapping deep-sea hydrothermal vent sites with multibeam echo-sounding (MBES) in the mid-Okinawa Trough. *Geochemical J.* submitted (別刷り無)

[研究論文]R Nakajima, H Yamamoto, S Kawagucci, Y Takaya, T Nozaki, C Chen, K Fujikura, T Miwa, K Takai (2015) Post-drilling changes in seabed landscape and megabenthos in a deep-sea hydrothermal system, the Iheya North field, Okinawa Trough. *PLoS One*, 10: e0123095 (別刷り 1)

[研究論文]F Ikegami, T Tsuji, H Kumagai, J Ishibashi, K Takai (2015) Active Rifting Structures in Iheya Graben and Adjacent Area of the Mid-Okinawa Trough Observed Through Seismic Reflection Surveys. In: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, Springer, pp. 361-368. (別刷り 2)

[研究論文]K Takai, S Nakagawa, T Nunoura (2015) Comparative Investigation of Microbial Communities Associated with Hydrothermal Activities in the Okinawa Trough, In: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, Springer, pp. 421-435. (別刷り 3)

[研究論文]J Ishibashi, F Ikegami, T Tsuji, T Urabe (2015) Hydrothermal Activity in the Okinawa Trough Back-Arc Basin: Geological Background and Hydrothermal Mineralization, In: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, Springer, pp. 337-359. (別刷り 4)

[研究論文]K Nakamura, K Takai (2014) Theoretical constraints of physical and chemical properties of hydrothermal fluids on variations in chemolithotrophic microbial communities in seafloor hydrothermal systems. *Progress in Earth and Planetary Science* 1 (1), 1-24. (別刷り 5)

[研究論文]J Ishibashi, T Noguchi, T Toki, S Miyabe, S Yamagami, Y Onishi, T Yamanaka, Y Yokoyama, E Omori, Y Takahashi, K Hatada, Y Nakaguchi, M Yoshizaki, U Konno, T Shibuya, K Takai, F Inagaki, S Kawagucci (2013) Diversity of fluid geochemistry affected by processes during fluid upwelling in active hydrothermal fields in the Izena Hole, the middle Okinawa Trough back-arc basin. *Geochem J* 48 (3), 357-369. (別刷り 6)

[研究論文]M. Yamamoto, R Nakamura, K Oguri, S Kawagucci, K Suzuki, K Hashimoto, K Takai (2013) Generation of electricity and illumination by an environmental fuel cell in deep-sea hydrothermal vents *Angewandte Chemie International Edition* 52, 41:10758-10761. (別刷り 7)

[研究論文]S Kawagucci, J Miyazaki, R Nakajima, T Nozaki, Y Takaya, Y Kato, T Shibuya, U Konno, Y Nakaguchi, K Hatada, H Hirayama, K Fujikura, Y Furushima, H Yamamoto, T Watsuji, J Ishibashi, K Takai (2013) Post-drilling changes in fluid discharge pattern, mineral deposition, and fluid chemistry in the Iheya North hydrothermal field, Okinawa Trough. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14: GC004895. (別刷り 8)

[研究論文]K Nakamura, T Toki, M Mochizuki, M Asada, J Ishibashi, Y Nogi, S Yoshikawa, J Miyazaki, K Okino (2013) Discovery of a new hydrothermal vent based on an underwater, high-resolution geophysical survey. *Deep-Sea Res. I*, 74:1-10.. (別刷り 9)

[招待講演]高井研(2015)そろそろ「沖縄トラフ最大の熱水活動域」の暫定王者ではなく統一王者を決めようか? 平成 26 年度海上保安庁海洋情報部研究成果発表会 2014 年 2 月 13 日

[プレスリリース]高井研(2014)中部沖縄トラフで新たに2つの熱水域を発見～熱水噴出域における効率的な調査手法の有効性を確認～. 2014 年 3 月 4 日