

海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞り込み手法の開発：  
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」における  
産総研地質調査総合センター (GSJ) の研究開発成果

山崎 徹<sup>1,\*</sup>・小森省吾<sup>2</sup>・井上卓彦<sup>1</sup>・石塚 治<sup>3</sup>・池原 研<sup>1</sup>

Toru Yamasaki, Shogo Komori, Takahiko Inoue, Osamu Ishizuka and Ken Ikehara (2018) Scientific research on formation processes of ocean resources: GSJ's research results of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Next-generation technology for ocean resources exploration". *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 69 (6), p.265–303, 21 figs, 1 table.

**Abstract:** The scientific research results of the Geological Survey of Japan (GSJ) from the five-year project of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Next-generation technology for ocean resources exploration" are summarized. GSJ has been involved in one of the four R&D themes, namely "Scientific research on formation processes of ocean resources" in collaboration with the Japan Agency for Marine-earth Science and Technology (JAMSTEC) and Kyushu University. GSJ's research focused mainly on (1) tectono-magmatic evolution of basement geology, petrogenesis of igneous rocks and the relationship between magmatism and ore-formation, and (2) determination of scientific indices for marine surveys, narrowing down the potential areas based on investigations of geochemical and physical properties of igneous rocks, sediments and sulfides, as part of the research on genesis of seafloor massive sulfide deposits in Okinawa Trough. For (1), it was observed that, based on petrological and geochemical investigations of igneous rocks, mantle-derived mafic magma ascended to shallower portions of the crust and extruded on the seafloor due to thinning by back-arc rifting. These magmatic products were hydrothermally altered while the periodical ascent of mafic magma induced hydrous partial melting of altered basaltic rocks and production of felsic magma. These processes reasonably explain composition of extrusive rocks and formation of ore-fluid. In (2), new geochemical survey method for detecting the ore-related features were proposed, based on studies of felsic igneous rocks (pumices) widely distributed in the hydrothermal field, and electrical properties of subsea rocks, including sulfides, which contribute to the upgrading of the electromagnetic survey method, were disclosed from recovered cores by D/V Chikyu cruises. These results would save the effort for the first stage of surveys by narrowing down the potential areas and contribute towards developing more efficient surveys by determining optimal spec and acquisition data for next-generation technology for ocean resources exploration.

**Keywords:** Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP); Next-generation technology for ocean resources exploration; marine mineral resources; Okinawa Trough; marine geology

要 旨

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」における、地質調査総合センター (GSJ) の5 ヶ年の研究成果をまとめた、「次世代海洋資源調査技術」においてGSJは、4つの研究テーマの一つであ

る、「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」に国立研究開発法人海洋研究開発機構や国立大学法人九州大学等とともに連携して取り組んできた。GSJでは特に、海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究と成因モデル構築の一環として、モデル海域と定めた中部沖繩トラフ海域において、主として(1) 海

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geo-resources and Environment)

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

\* Corresponding author: T.Yamasaki, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: t.yamasaki@aist.go.jp

底熱水鉱床を胚胎する基盤岩類の地質構造発達史、熱水循環の熱源として機能するマグマの発生メカニズムと資源濃集過程との関連、そして火成岩類・堆積岩類・硫化物の化学組成・物性の検討を通じた、(2) 有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発を実施してきた。(1) では、火成岩類の岩石学的・地球化学的検討を通じ、中部沖縄トラフのリフティングに伴う地殻の薄化によって海底面に達するマントル由来苦鉄質マグマの貫入・噴出が生じ、その結果形成された苦鉄質岩が海水や熱水による変質を受けた後、新たな苦鉄質マグマ・バッチにより含水部分溶融し珪長質マグマを発生することによって、噴出岩類の組成や鉱液の形成が合理的に説明可能であることを明らかにした。(2) では、熱水活動域周辺に広範に分布する珪長質火成岩類(パミス)の化学組成を用いて鉱微域を絞り込むための地球化学的調査法を開発するとともに、地球深部探査船「ちきゅう」の掘削コアの岩石物性の検討を通じ、電気・電磁探査手法の高度化に資する、海底面下構成岩類の電気特性を明らかにした。これらの成果は、「次世代海洋資源調査技術」における、有望海域の絞り込みによる調査航海日数及びコストの削減、最適な取得データ項目や調査機器のスペックの決定による高効率調査システム開発に貢献する。

## 1. はじめに

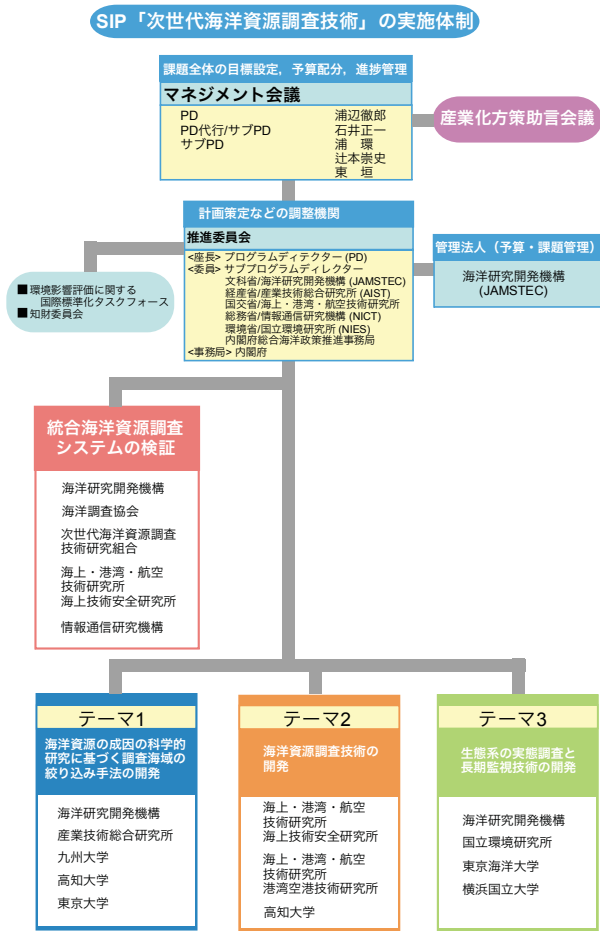
戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP)は、総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)が司令塔機能を発揮し、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために創設されたプログラムである。SIPは、社会的に不可欠かつ日本の経済・産業競争力にとって重要な課題と、その予算及びプログラムディレクター(PD)をCSTIがトップダウンで決定し、府省連携による分野横断的な取り組みを、産学官連携で基礎研究から実用化・事業化までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進するという特徴をもっている。産総研地質調査総合センター(GSJ)は、11課題あるSIPプログラムのうち、「次世代海洋資源調査技術」(PD:浦辺徹郎東京大学名誉教授、国際資源開発研修センター顧問)に発足当初の2014年度から参画し、研究開発を行ってきた。

我が国は、国土面積の12倍を超える領海・排他的経済水域を有しており、これらの海域には、産総研をはじめ、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)や大学等の海洋調査によって、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラストなど、数多くの有用元素濃集域の存在が報告されている。しかしながら、これらは厚い海水に覆われているため、資源の確認や将来的な開

発、利用のためには、有望海域を絞り込むための海洋資源の成因解明研究や、従来よりも飛躍的な効率で調査するための調査機器・手法の開発、さらに、開発に伴う海洋環境悪化を防止するための海洋環境を長期に監視する技術の開発が必要である。そこで、SIPプログラム「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)では、府省連携のもと、海洋鉱物資源を低コストかつ高効率(従来の数倍以上のスピード)で調査する技術を世界に先駆けて実現すること、資源が眠る深海域において使用可能な未踏海域調査技術を確立することを目標に研究開発に取り組んできた。そして、競争力のある技術を産官学一体で開発し、その技術ノウハウを民間企業に移転し海洋資源調査産業を創出すること、また、グローバルスタンダードを確立し、海外での調査案件受注など海外へ展開することを出口戦略と位置づけ、これらの実現のため、(1) 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発、(2) 海洋資源調査技術の開発、そして(3) 生態系の実態調査と長期監視技術の開発、の3つのテーマのもとで研究開発を推進し、5カ年のプロジェクトの後半からは、これらのテーマで開発された技術を実海域で実証するための実質的な4つ目のテーマとして、(4) 統合海洋資源調査システムの開発・検証を開始し、研究開発に取り組んできた(第1図)。

GSJは、上述の4つのテーマのうち、「(1) 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」(以下、「SIP成因研究」)においてJAMSTECや国立大学法人九州大学を代表とする研究課題と連携して研究開発に取り組んできた(第1図)。これらの研究開発にあたっては、「(4) 統合海洋資源調査システムの実証」の主体である民間の次世代海洋資源調査技術研究組合(J-MARES)及び一般社団法人海洋調査協会(JAMSA)とも連携し、実海域での実証航海を通じて「SIP成因研究」で得られた科学的知見や海洋調査技術の民間企業への橋渡しを実施してきた。その一方で、それぞれの参画機関においては、本SIPの特色である府省あるいは民間企業等との連携を前提として、個々の実施機関ごとに5カ年の研究開発目標を設定し、研究開発が進められてきた。本論では、SIP「次世代海洋資源調査技術」の5カ年にわたる研究開発におけるGSJの海底熱水鉱床の調査研究に関連する成果をまとめ、調査技術の実用化に向けた現状と今後の課題について解説する。なお、コバルトリッチクラストについては、GSJとして独自の課題を設定せず、JAMSTEC・大学等の研究課題をサポートする形で研究開発を実施してきたため、「SIP成因研究」の成果資料集の一部としてその成果を報告している(後藤ほか, 2017)。

本論の全体の執筆と取りまとめを山崎及び池原が行わない、4.1.5は石塚が、4.2.1は井上が、4.2.3については小森が主として執筆を分担した。また、4.2.3の記述はSIPの成果であるKomori *et al.* (2017a)に基づいており、



第1図 SIP「次世代海洋資源調査技術」研究開発体制の全体像。SIP「次世代海洋資源調査技術」ウェブサイトをもとに作成。PD：プログラムディレクター。

Fig. 1 Project structure of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) “Next-generation Technology for Ocean Resources Exploration”. English version is available at <https://www.jamstec.go.jp/sip/en/overview2.html> (accessed 2018-11-05)

同様に4.1.1-4.1.4と4.2.2の記述はYamasaki (2018a, b)に基づいている。これらの原著論文は、細分化あるいは限定された科学的な課題に対して英語で発表されたものであるため、ここでは、民間への橋渡しを目的として、これらの成果の実用化に向けた位置づけや意味について解説する。本論における研究開発成果はこの原稿の投稿時のものであり、科学研究の性質上、その知見は今後の研究の発展によって更新される可能性がある。なお、鉱物資源の開発に至る一連の調査では、広い対象範囲から有望地域を絞り込んで鉱床を発見し、鉱量や品位などの確認を行うことを一般に「探査(あるいは資源探査)」と呼ぶが、本論では、海底鉱物資源に関しては、広い対象範囲そのものを選定し、絞り込んで鉱徴を発見するまでの

過程を「調査(海底鉱物資源調査)」と呼ぶ。また、本論では鉱床という語に経済的な意味をもたせず、硫化鉱物の濃集した鉱石が一定規模で産する、金属元素の濃集域という意味で用いる。加えて、本論において陸域と海域の硫化物鉱床を区別して言及する場合は、火山性塊状硫化物鉱床 (Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, VMS) を陸上の鉱床に対して用い、海底熱水鉱床については、Seafloor Massive Sulfide Deposits (SMS)と呼ぶ(これらの和名・英名・略号については、後の説明部分の初出時にも改めて示す)。

## 2. 研究背景：海底鉱物資源調査の概要と課題

これまで、海底鉱物資源調査は、主として一般的な科学調査等で用いられる海洋調査技術・手法を用いて実施されてきた(例えば、藤岡, 2008; 荒井ほか, 2013; 上田・岡本, 2015)。このような海洋調査技術・手法の鉱物資源調査における位置づけや意味を明らかにするために、まず、調査手法が確立され実績の豊富な陸上における資源探査の概要から紹介し、続いて海底熱水域及び海底熱水鉱床の調査手法の概要とその課題について紹介する。なお、海底熱水域の調査手法や課題については、プロジェクト全体での一貫性を保つため、SIP「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」研究開発計画(内閣府政策統括官, 2018)及びSIP『次世代海洋資源調査技術』(海のジパング計画)海底熱水鉱床の調査技術プロトコル(木川, 2017)の記述を参考にしている。

### 2.1 陸域の資源探査の概要

陸上の資源開発においては、探査の結果に基づいて鉱床の形状・鉱量・品位分布などを明らかにするための開発ボーリングと、それに平行して行われる選鉱試験、そしてフィージビリティ・スタディ (FS：事業化調査)が行われ、最終的な開発判断がなされる。この段階の前までに行われる資源探査が、リモートセンシング、空中物理探査、地上物理探査、地化学探査、地表踏査、そして探鉱ボーリングである(例えば、志賀, 2003; 菱田ほか, 2005) (第1表)。これらのうち、リモートセンシングでは、人工衛星や航空機に搭載されたセンサーから得られるデータを解析し、広い範囲を対象に鉱床賦存可能性のある地域を絞り込むための調査が行われる。具体的な例としては、一般に変質鉱物が金属鉱床の成因に密接に関連していることに基づいて、変質鉱物が短波長赤外域においてその化学組成の違いに応じた特徴的なスペクトルパターンを示すことを利用し、人工衛星に搭載されたASTERセンサーを用いた変質帯の分類やマッピングが挙げられる(菱田ほか, 2005)。空中物理探査では航空機やヘリコプターなどを用い、重力探査、磁気探査、電磁探査、放射能探査等を行う。これらは鉱床胚胎と関係す

第1表 陸域と海域の鉱物資源調査の比較

Table 1 Comparison between on-land and offshore explorations of mineral resources

	調査カテゴリ	対象面積	手法	目的
陸域	概査～準精査	10万 km <sup>2</sup> 程度～ 1,000 km <sup>2</sup> 程度	衛星リモートセンシング	変質帯の識別・マッピング
			空中物理探査 (重力探査・磁気探査・電磁探査・放射能探査等)	鉱床胚胎と関係する地質構造把握等
	精査	1,000 km <sup>2</sup> ～ 10 km <sup>2</sup> 程度	地上物理探査 (重力探査・磁気探査・電磁探査・放射能探査・強制分極法電気探査)	鉱床胚胎と関係する地質構造把握と鉱体の分布把握
			地化学調査・地表踏査 探鉱ボーリング	鉱床賦存可能性の判断とマッピング 鉱床賦存推定域における鉱床の確認と3次元的分布の推定
海域	有望海域の絞り込み	全球規模～ 数1,000 km <sup>2</sup>	机上検討	地球科学的根拠 (成因論等) に基づいた概査着手海域の絞り込み
	概査	数100 km <sup>2</sup>	船舶搭載機器を用いた地球物理学的調査 (地形調査・重力異常・磁気異常調査)	広域的テクトニクス・地質学的背景の把握, 熱水ブルーム識別
			海上曳航体を用いた重・磁力調査	広域的テクトニクス・地質学的背景の把握
			反射法・屈折法地震探査	
	準精査	数10 km <sup>2</sup>	AUV, Deep Tow搭載機器を用いた地球物理学的調査 (地形調査・重力異常・磁気異常調査)	鉱床胚胎と関係する地球科学的異常の識別
			船上からのドレッジ等による試料採取	海底面構成岩相把握と鉱床賦存可能性の判断
精査	数km <sup>2</sup> ～ 1 km <sup>2</sup> 以下	ROV搭載機器を用いた地球物理学的調査 (地形調査・重力異常・磁気異常調査)	鉱床胚胎と関係する地球科学的異常の識別	
		ROVによる映像観察, 試料採取	海底面構成岩相把握と鉱床賦存可能性の判断	

AUV: 自律型無人潜水機, ROV: 有索式無人潜水艇

る地質構造把握を目的とし、広い範囲を対象とする。さらに、地上物理探査では、空中物理探査で用いられる手法のほか、比抵抗/誘導分極 (Induced Polarization, IP) 法電気探査 (あるいは陸域探査ではしばしば強制分極法電気探査とも呼ばれる) 等も行われる。これらは、潜頭性鉱床の発見や鉱体の深部への連続の確認を目的とし、狭い範囲を対象とする。以上の調査のうち、人工衛星や航空機を利用した広い範囲を対象とした探査を一般に概査と呼び、陸上での調査を精査と呼ぶ。また、人工衛星による探査は地球規模であるため、それよりも探査範囲の狭い航空機やヘリコプターによる探査を準精査と呼ぶ場合もある。精査には、物理探査のほかに、岩石・土壌・水・堆積物や植物等に含まれる化学成分や土壌からのガスの成分を分析して鉱床賦存の可能性を判断する探査法である地化学探査 (地球化学探査とも呼ばれる) や、地表踏査 (地質探査、地質調査) も含まれる。

## 2.2 海底鉱物資源調査の概要と課題

我が国周辺の海洋鉱物資源有望海域は数千km<sup>2</sup>規模であり、船舶や海中探査機が短期間で行動でき概査が可能な面積である数百km<sup>2</sup>規模にまで絞り込むためには、資

源の形成過程や濃集メカニズム等の成因解明による地球科学的根拠に基づいた手法を用いるほかに考えられない。また、その後の準精査によって有望海域をさらに絞り込むためにも、成因論に基づき最適な取得データ項目や調査機器のスペックを決定することが重要である。海底鉱物資源調査においては、海底面あるいは海底面下に賦存する鉱物資源は厚さ数千mに及ぶ海水に覆われているため、陸上探査で用いられる人工衛星によるリモートセンシングは実施不可能であり、航空機やヘリコプターによる探査に相当する、船舶を用いた概査が実際に調査データを得る最初のステップである。一方、目的海域周辺の広域的なデータをリモートセンシング等によって得ることはできないものの、全世界の海洋域における、これまでの海洋調査による海底地形データや各種地球物理調査結果、また限定的ではあるが掘削やドレッジによる海底表層構成岩石・堆積岩類の科学的データの蓄積は、各種文献やデータベースによって入手することが可能である。例えば、我が国周辺海域については、GSJの出版する様々なスケールの海洋地質図が整備されており、海底鉱物資源調査の基礎データとしても活用されることが期待される (池原・山崎, 2016)。したがって、船舶によ

る概査以前に、これらの既存の地質情報を用いた概査海域の絞り込みが机上作業によってある程度可能である。

海域における成因論を用いた調査海域の絞り込みに際しては、陸域における鉱床の成因論や特徴が重要な情報となることが期待される。陸上における火山性塊状硫化物鉱床(Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, VMS)がどのような造構場・環境で形成されたのかについてはこれまでに多くの研究の蓄積があり、それらを取りまとめたすぐれた論文や書物が多数ある(例えば, Barrie and Hannington, 1999; Galley and Koski, 1999, Galley *et al.*, 2007; Franklin *et al.*, 2005; Piercey, 2011; Shanks and Thurston, 2012)。これらのVMSの少なくとも一部は、過去に海底で形成されていたことが明らかとなっているものの、ほぼ完全な形の海洋性地殻-リソスフェア断片を保存していると考えられているオフィオライトに伴われる一部の鉱床(キプロス型のVMS)のような例を除いて、陸上の鉱床の多くは露出に至る様々な造構・構造運動の結果として後生的な改変等を受けている。また、ある種の熱水活動がその形成に関与した点については異論の余地がないものの、陸上に鉱床として露出している時点で形成に関与していた熱水は失われており、その通路や反応も痕跡としてしか追うことはできない。従って、現在形成されつつある海底熱水鉱床や、形成後間もない状態で海底下に存在する鉱床を検出するためには、現在の海洋底において、海底鉱物資源がどのような地球科学的な位置づけの場所に、どのような成因で形成されるのかを知る必要があるとともに、鉱石(あるいは鉱体)そのものだけでなく、形成に関与した熱水やその活動に関連した調査指標の検出可能性についても検討する必要がある。

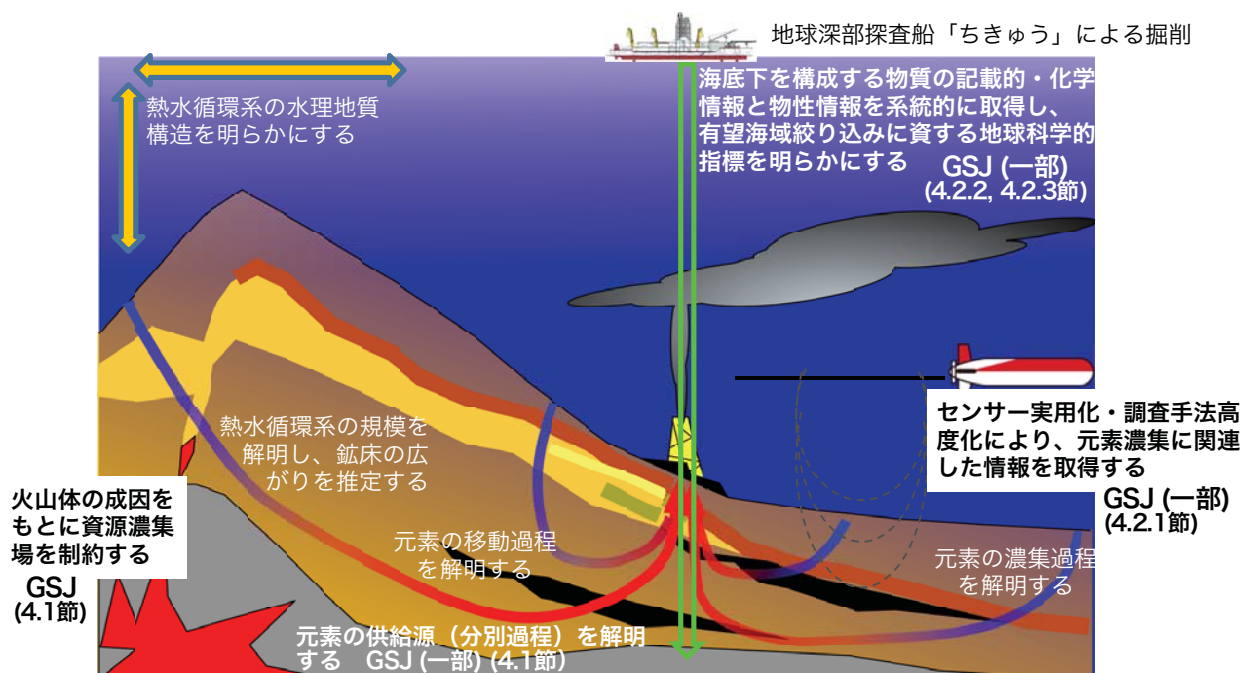
金属鉱床とは、地球の表層を構成する岩石に含まれる金属元素が数百から数千倍の濃度に濃集した異常を示す地質体であり、これを見いだすために船舶を用いた概査以降は、主として以下に述べるような海洋調査技術・手法が用いられる(第1表)。まず、船舶に搭載された地球物理学的調査機器を用いた概査では、マルチビーム音響測深機(MBES)等による地形調査や重力異常・磁気異常調査が主として広域的なテクトニクスや地質学的背景を把握する目的で行なわれる。このうち、MBESを用いた調査では、現在活発な熱水活動を行なっている海域において熱水ブルームを捉える調査が同時に可能である。また、重・磁力調査に関しては船体固定装置を用いる手法のほか、海上曳航体を用いた調査も一般的に行われる。さらに、科学的な調査では、エアガン等を用いた反射法・屈折法地震探査も行なわれる。準精査では、手法的には概査と同じく音響による地形調査や重・磁力調査が行われるが、プラットフォームが船舶搭載ないし海上曳航体から、自律型無人潜水機(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)や深海曳航体(Deep Tow)となり、船舶ほどの行動範囲はないものの、海底面により近づくことによって

高精度のデータを得ることができるようになる。精査においては、有索式無人潜水艇(Remotely Operated Vehicle, ROV)を用いた音響による地形調査や重・磁力調査のほか、リアルタイムの映像による観察が行なわれる。また、準精査-精査段階では、ROVや船上からのピストン・コアリングやドレッジ等による試料採取も平行して行われる。

陸上探査と比較すると、概査に相当する船舶を用いた調査は、内容やスケールは陸域の準精査に近いものの、航空機やヘリコプター(時速200 km以上)に比べると遥かに遅い速度(時速数km程度)でしか実施することができず、多額のコストを要するという問題がある。準精査や精査における海底鉱物資源調査はさらに困難を極め、陸上での車両による機器運搬や移動、徒歩による調査は、海域においてはAUVやROVを用いた調査・観察・試料採取や、船上からのピストン・コアリングやドレッジ等による試料採取等に相当し、極めて高コストとなる。探鉱ボーリングにいたっては、通常の調査船舶とは異なる専用の設備を備えた掘削船を必要とするため、現実的にはその前段階で明らかな鉱徴を捉えていない限り実施することは難しい。また、これまで述べてきた、従来から実施されてきた調査手法は、特に沖縄海域で有効性が認識されてきた熱水ブルーム調査以外は、基本的に海底地形や重・磁力異常の調査、試料の採取といった海洋科学研究として一般的な手法に基づいたものである。ただし、この点については、陸上の鉱物資源探査においても手法的に特別なものが使用されるということではなく、鉱床の存在に関連した検出すべき指標や、その指標検出の目的に応じた技術や手法の選択が、研究や経験の蓄積により一定程度確立されている点が海底鉱物資源調査と大きく異なる点であるといえる。従って、調査コストを抑えた高効率の調査のためには、短時間でより賦存可能性の高い海域を見いだすための鉱物資源調査に特化した手法や、指標を開発する必要がある。

### 3. SIP「次世代海洋資源調査技術」成因研究の目的とGSJの取組みの全体像

近年、金属資源の生産量はエネルギー資源のそれを上回る増加率を示し、資源の安定供給は世界経済の発展に決定的に重要であることから、例えば経済協力開発機構(OECD)は、海底資源開発の経済規模は2030年までに1.3兆円規模になると予測している(浦辺・鈴木, 2017)。OECDやEU等が、最も早く商業化に成功すると予想している海底鉱物資源が海底熱水鉱床である。これは、他の海底鉱物資源(コバルトリッチクラスト、マンガン団塊)に比較して鉱石1トンあたりの価値が高いこと、一般に陸地に近く沿岸国の排他的経済水域(EEZ)内に存在することが多く、水深が比較的浅く狭い海域に集中している



第2図 SIP「次世代海洋資源調査技術」, テーマ1「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」における, 海底熱水鉱床が形成される過程の模式的モデルと, 本SIPプログラムでの取組み. GSJの記述がある部分に関し, 産総研が研究開発を分担した(節の番号は本論の記述と対応). 鈴木ほか(2016)に一部加筆.

Fig. 2 Schematic illustration for the scientific objectives for the scientific research on formation processes of ocean resources. Basic information is available at <https://www.jamstec.go.jp/sip/en/enforcement-1/index.html>. (accessed 2018-11-05)

こと, 環境への影響が他の海底鉱物資源開発に対して相対的に小さいことなどの要因によるものと考えられる(浦辺・鈴木, 2017及びその中の引用文献).

このように海底熱水鉱床の開発の機運が近年高まりをみせる中, 海底熱水鉱床に対する系統的な調査法は世界的に存在していなかった. これまでに述べてきた従来の海底鉱物資源調査は, 通常の科学的海洋調査のなかで, 観測値あるいは観測結果中にアノマリー(何らかの地球科学的異常値)を発見する取り組みであり, 調査経験に基づいて調査範囲や調査手法・項目の最適化の試みが個々の調査独自に行われるというものであった. 特に商業化に向けて民間企業が参入する場合は, 手法的に実施可能であることを大前提に, 調査に係るコストを陸上のそれと同程度に抑える必要がある. ここで最も大きな制約は, 海域調査における用船費である. よって, 各種調査効率を飛躍的に高めることと, 事前に調査海域を可能な限り絞り込むことが, 航海日数の削減, ひいては調査コストの削減に最も重要であるといえる. そこで, 「SIP成因研究」テーマでは, 高効率調査システム開発の中核として, 沖縄トラフ海域をモデル海域とし, 海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究とそのモデル化, それらの研究に基づく調査指標の特定と調査手法開発への知見の

橋渡しを主たる目的とし, 研究開発を実施してきた. これらの成果のうち, 本SIPプログラム実施事業年度前半までの成果は鈴木ほか(2016)としてまとめられている.

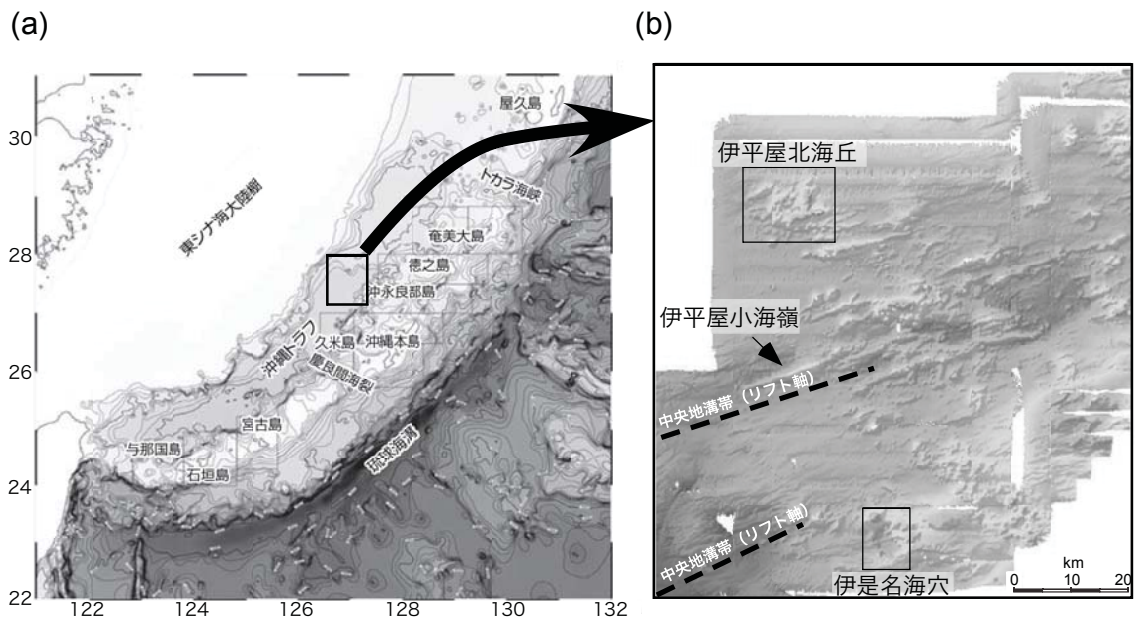
GSJでは, 海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究と成因モデル構築の一環として, 海底熱水鉱床を胚胎する基盤岩類の地質構造発達史, 熱水循環の熱源として機能するマグマの発生メカニズムと資源濃集過程との関連, そして火成岩類・堆積岩類・硫化物の化学組成・物性の検討を通じた, 有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発を実施してきた(第2図).

## 4. GSJの研究成果

### 4.1 基盤岩類の地質構造発達史と資源濃集過程との関連に関する研究開発

#### 4.1.1 研究開発の背景

海底熱水鉱床を胚胎する基盤岩類の地質構造発達史や, 熱水循環の熱源としてのマグマの発生メカニズムと資源濃集過程との関連については, 本SIPプログラムのモデル海域である沖縄トラフにおいて, 地球深部探査船「ちきゅう」を用いた掘削航海によって得られた試料を用いて研究開発を実施した. 地球深部探査船「ちきゅう」に



第3図 地球深部探査船「ちきゅう」によるSIP掘削航海実施海域。(a) 沖縄トラフ概要。荒井ほか(2013)を一部改変。(b) 中部沖縄トラフ, 伊平屋北海丘, 伊平屋小海嶺, 伊是名海穴海域の海底地形。Nakamura *et al.* (2015)を改変。

Fig. 3 Bathymetric maps showing (a) large-scale structure of the Okinawa Trough and Ryukyu arc-trench system and (b) locations of Iheya North Knoll, Iheya Minor Ridge, and Izena Hole areas with major geologic features. English version is shown in Yamasaki (2018b; Fig. 1).

よる掘削調査は、2014年度に伊平屋北海丘海域、2015年度に伊平屋北海丘及び伊平屋小海嶺海域、そして2016年度に伊是名海穴海域において実施された。それぞれの航海の期間・海域及び目的については、山崎・池原(2014, 2017)及び山崎ほか(2015, 2016)に概要が紹介されている。また、2014年度及び2015年度の航海については、それぞれTakai *et al.* (2015)とKumagai *et al.* (2017)のクルーズ・レポートに船上での研究成果がまとめられているほか、本論においては全てを詳細には論じないものの、得られた岩石種・データごとの船上研究成果や解釈の速報は、Kitada *et al.* (2016), 小森・正木(2016), 小森ほか(2016, 2017, 2018), Komori *et al.* (2017a, b, 2018), 熊谷ほか(2015, 2016a, b, 2017, 2018), Kumagai *et al.* (2018), 正木ほか(2016), Masaki *et al.* (2016, 2017), 野崎ほか(2015a, b, c, d, 2016, 2018), Nozaki *et al.* (2018), 斎藤ほか(2016), 真田ほか(2017), 高井ほか(2015), 土岐ほか(2016, 2017), 山崎(2015, 2016a, b), Yamasaki (2015, 2016a, b, 2017b, c, 2018c, d, f-h)及びYamasaki *et al.* (2016)で報告されている。

沖縄トラフは、琉球弧-海溝系の背弧側に1,200 km以上にわたって延びる舟状海盆で、リフティングの初期段階にあると考えられている(Lee *et al.*, 1980; Letouzey and Kimura, 1985, 1986; Sibuet *et al.*, 1995, 1987, 1998)。沖縄トラフは一般にトカラ海峡を境に北部と中部、慶良間海裂を境に中部と南部の3つのセグメントに分けられる

(第3図a)。このうち、本SIPプログラムでモデル海域として中心に検討を行なったのは、中部沖縄トラフである。掘削調査を実施した海域は、基盤岩類の地質構造発達史やマグマの発生メカニズム検討の観点からは、3つの異なる地形的特徴をもつ。すなわち、ドーム状の高まりである伊平屋北海丘、山脈あるいは海嶺状の地形を示す伊平屋小海嶺、そしてカルデラ状の凹地である伊是名海穴である(第3図b)。これら3つの海域のいずれにおいても活発な熱水活動の存在や、硫化物(鉱石)の存在が確認されている(Kumagai *et al.*, 2017及びその中の引用文献)。

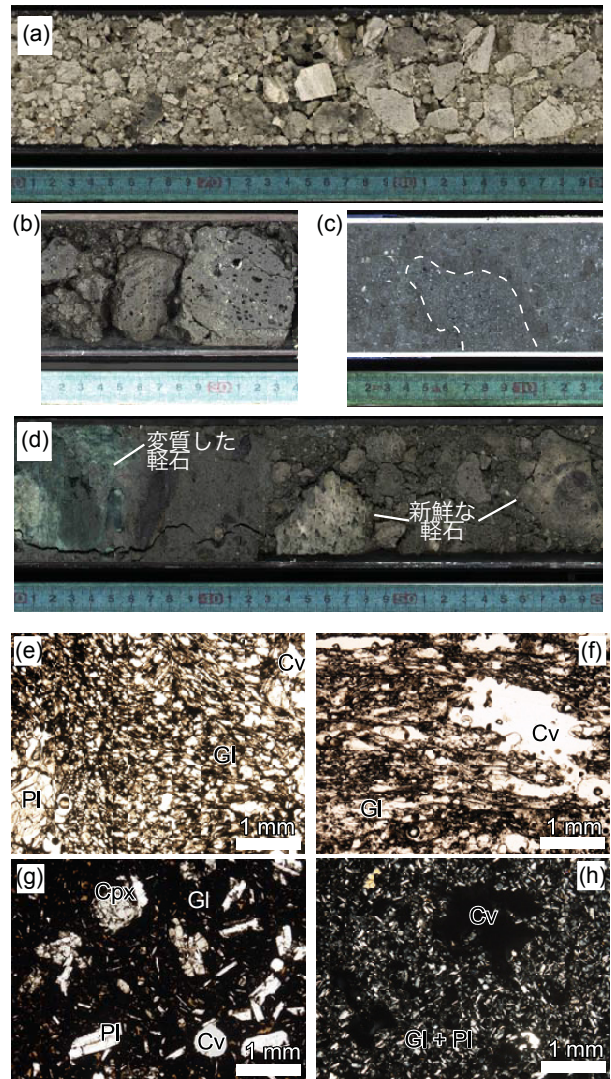
地質時代に形成された陸上のVMSは、その岩相層序組み合わせをもとに、5つのタイプに分けられることが提案されている(Barrie and Hannington, 1999; Franklin *et al.*, 2005)。例えば、Barrie and Hannington (1999)によると、(1) 苦鉄質、(2) バイモータル-苦鉄質、(3) 苦鉄質-珪質碎屑質、(4) バイモータル-珪長質、(5) バイモータル-珪質碎屑質の5区分が提案され、(1) がキプロス型、(2) が別子型、(3) がノランダ型、(4) が黒鉱型、そして(5) がイベリア黄鉄鉱床帯やカナダ東部のバサースト地域に代表される鉱床に相当する(Piercey, 2011)。ベースメタルに関しては、(1) と(2) が銅と亜鉛に、それ以外が銅・鉛・亜鉛に富む傾向がある。ここで、バイモータルとは、母岩の火山岩あるいは火山碎屑岩の化学組成が苦鉄質(概ね玄武岩-玄武岩質安山岩に相当)と珪長質(デイサイト-流紋岩に相当)の2つの組成領域から構成

され、中間質を欠くことを意味する。バイモーダルな火成活動は一般にリフト帯を特徴づけるものであり(例えば, Martin and Piwinski, 1972), 実際に沖縄トラフの火成活動も珪長質岩を主体とするバイモーダルであることが知られている(例えば, Shinjo and Kato, 2000; Zeng *et al.*, 2010). そして, (4)のバイモーダル-珪長質型に黒鉱型鉱床が相当するように, 沖縄トラフ海域からも黒鉱タイプの塊状硫化物が発見されている(Halbach *et al.*, 1989; Takai *et al.*, 2011, 2012). したがって, 沖縄トラフの研究は, 黒鉱型鉱床形成の現代のアナロジーとして重要な意味をもつといえる。

ところで, 一般に玄武岩質岩には数100 ppmの銅が含まれているが, デイサイトや流紋岩といった珪長質岩には数ppm-数10 ppm程度しか銅が含まれていない(例えば, Imai *et al.*, 1995による様々な火成岩組成を参照). したがって, 珪長質岩を母岩とする塊状硫化物鉱床における銅の起源は依然明確ではない. それらが鉱化作用の条件(例えば温度)に依存するのか, あるいは反応に関与する物質の化学組成に依存するのかといった主要な要因が判明すれば, その条件を満たす海域が有望海域絞り込みのための重要な地質学の手がかりとなることが期待される. もちろん, 鉱床学において金属元素の起源は焦点的な研究課題のひとつであり, その長い研究史において様々な検討がなされている. しかしながら, その一方で, それらの金属元素の挙動について, 通常火成岩岩石学においては十分に検討されることは少ない. 鉱化作用を生み出す海底熱水活動がマグマあるいは固結後の依然熱い火成岩に起因していることは明らかであり, この点において, 火成活動と鉱化作用(の少なくとも一部), そしてそれらを生み出すテクトニクスは, 調和的な一連のストーリーで説明されるはずである. そこで, GSJでは, 基盤岩類を形成した火成作用の検討を通じて, 鉱床成因モデルの構築に寄与することを目的とした。

#### 4.1.2 掘削により得られた岩石とその組成

伊平屋北海丘は, 典型的には層序的上位から順に, 層厚150-200 mの軽石質礫もしくは軽石凝灰岩, 変質粘土質火山碎屑物層, そして珪化火山碎屑物層から構成される(熊谷ほか, 2015, 2016a, b; Kumagai *et al.*, 2017; 野崎ほか, 2015a, b, c, d; 高井ほか, 2015; Takai *et al.*, 2015). 粘土質及び珪化層中には, ところによって鉱染状の硫化物(disseminated sulfide)が認められる(Takai *et al.*, 2015; Kumagai *et al.*, 2017). 火成岩類の検討にあたっては, 軽石質礫層から, 新鮮で全岩化学組成分析が実施可能な大きさの試料を採取した. 代表的な軽石質礫層のコア写真を第4図a-dに, 鏡下での産状を第4図e-hに示す. 軽石質礫は淡黄褐色から灰色を示し, 典型的には径2-3 cm程度である(第4図a; Yamasaki, 2017a, 2018d). 鏡下では無斑晶質で繊維状発泡組織が観察される(第4図e).



第4図 中部沖縄トラフ, SIP掘削海域の代表的な岩相のコア(a-d)及び顕微鏡(e-h)写真(Yamasaki, 2018bを一部改変). (a) 伊平屋北海丘の軽石質礫層. (b) 伊平屋小海嶺の新鮮な多孔質の玄武岩質岩. (c) 伊平屋小海嶺の変質した玄武岩質岩. 点線で囲まれた部分は, スコリア様の礫状の外形を示す. (d) 伊是名海穴の水中土石流堆積物. 様々な程度に変質した, あるいは新鮮な軽石を含む. (e) 伊平屋北海丘の軽石. (f) 伊是名海穴の伊平屋北海丘に類似するタイプの軽石. (g)伊平屋小海嶺の玄武岩質安山岩. (h) 伊是名海穴の結晶片に富む緻密な軽石. (e)-(g): オープンニコール, (h): クロスニコール. (e)-(h)における略号: Pl, 斜長石; Gl, ガラス; Cv, 空隙(気泡); Cpx, 単斜輝石.

Fig. 4 Photographs of split core sections from intervals representative of samples studied in this work, and photomicrographs of volcanic rocks from the study area. English version and detailed explanation are shown in Yamasaki (2018b; Figs. 2 and 3).

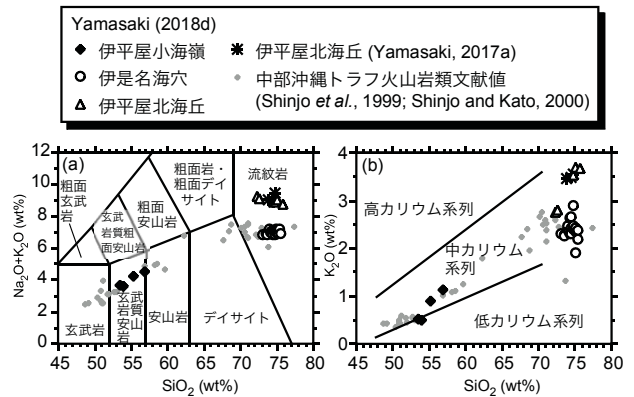


長径0.1–0.5 mm程度の自形のカリ長石(微)斑晶や、粒径0.1 mm未満の長石片が含まれることがある。

伊平屋小海嶺海域の最上部は、厚さ約25 m程度の新鮮な多孔質玄武岩質岩から構成される(熊谷ほか, 2016a, b; Yamasaki *et al.*, 2016; Kumagai *et al.*, 2017) (第4図b)。この層準より下位も砂状あるいは粘土状に変質した玄武岩質岩(第4図c)が少なくとも海底下約120 mまで連続する。これらの変質岩には、いくつかの層準で鉱染状の硫化物鉱化作用が認められる(Kumagai *et al.*, 2017)。伊平屋小海嶺海域においては、海底下約120 mまで掘削を行った掘削孔のほかにもいくつかのサイトで掘削を試みたが、海底面直下の極めて堅固な岩相の存在によって掘進することができなかった。これらの掘削では、数cm~数10 cm程度の大きさの新鮮・多孔質な玄武岩質岩が得られたことから(Kumagai *et al.*, 2017)、伊平屋小海嶺海域の海底面は広範に玄武岩質岩溶岩で覆われていると推察される。これらの新鮮な玄武岩質岩を伊平屋小海嶺海域からの試料として検討に用いた。鏡下においては、掘削孔最上部(海底面直下)の玄武岩質岩はハイアロオフィティック組織を示し、少量の斜長石及び単斜輝石斑晶を含む(第4図g)。加えて、斜方輝石斑晶ないし微斑晶もいくつかの試料で観察される。掘削孔のやや深部からの玄武岩質岩試料はインターサタル組織を示し、石基は伸長した斜長石ラス及び粒状の輝石・鉄-チタン酸化物から構成される。

伊是名海穴の岩相層序は、典型的には上位から、20 m程度の中土流堆積物、約10 mの半遠洋性堆積物とタービダイト堆積物、100 mを超える珪化火山碎屑岩層から構成される(Kumagai *et al.*, 2018; 熊谷ほか, 2018; 野崎ほか, 2018)。加えて、数10 mの厚さの塊状硫化物層も確認された(Nozaki *et al.*, 2018)。火成岩類の検討には、水中土流堆積物層(第4図d)から、新鮮で十分な大きさの軽石礫を試料として採取した。鏡下においては、いくつかの軽石は伊平屋北海丘のそれと類似し、無斑晶質で繊維状発泡組織を示す(第4図f)ものの、多くはより緻密で、結晶片を多量に含む組織を示す(第4図h)。ガラスは多量の微細な斜長石ラスと、粒状の鉄-チタン酸化物を含んでいる(第4図h)。

これらの試料について、GSJに持ち帰った後、超純水で脱塩処理を行ない、GSJ共同利用実験室設置の蛍光X線分析装置及びレーザーアブレーションICP-MSを用いて全岩主成分・微量成分分析を実施した。分析試料の調整法及び分析手法の詳細はYamasaki (2014, 2018b), Yamasaki *et al.* (2015)及びYamasaki and Yamashita (2016)に示されている。なお、検討においては、鉱化作用に関連して増減する可能性のある金属微量元素含有量を把握する必要がある。それらの一部の元素について、試料調整の際の粉碎過程での装置からのコンタミネーションを避け効率的に試料調整を行なうため、本SIPプログラム



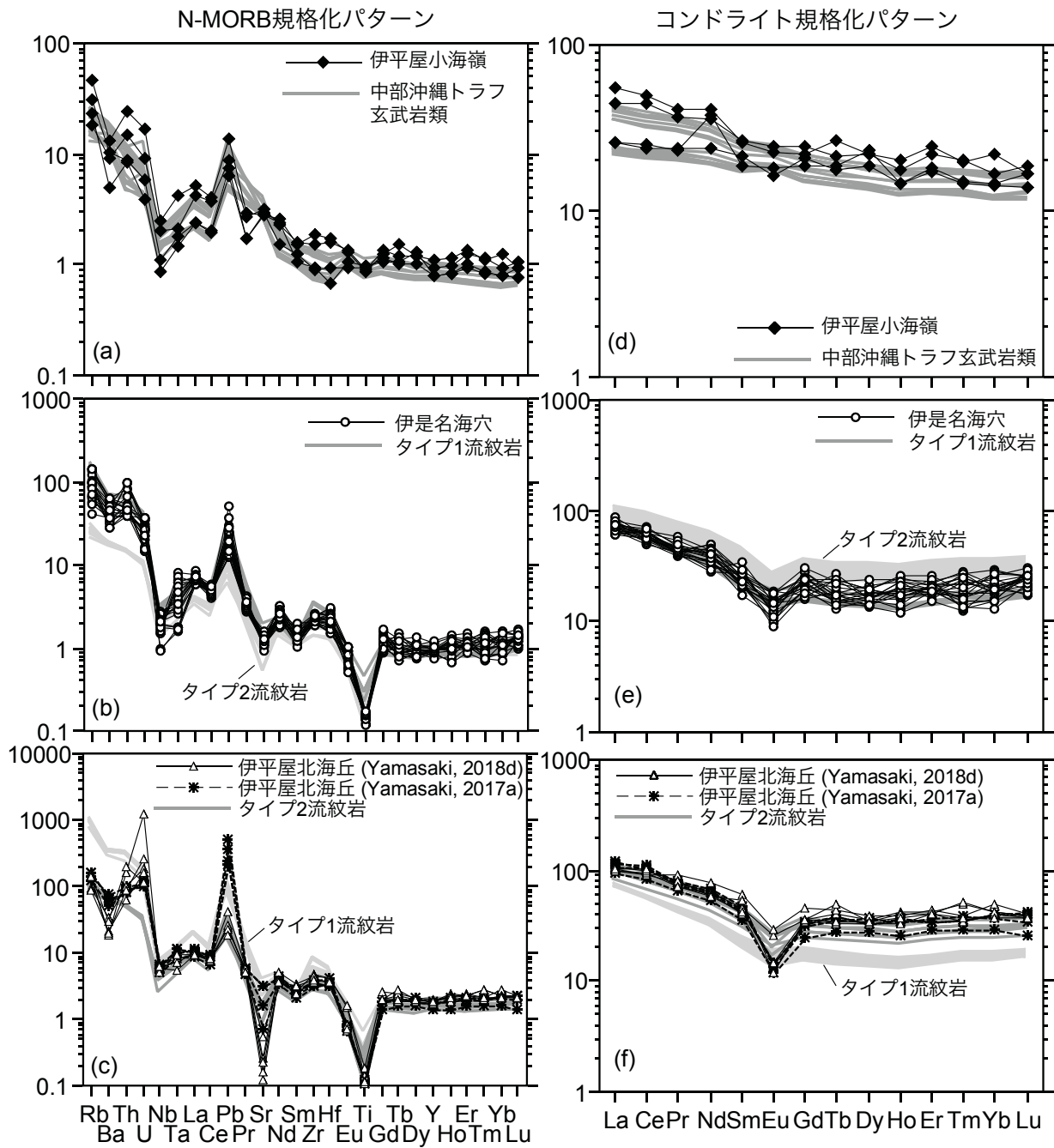
第5図 中部沖縄トラフ、SIP掘削海域の火成岩類のシリカ-アルカリ図(Yamasaki, 2018bを一部改変)。(a) 全アルカリ-シリカ図、(b) カリウム-シリカ図。境界線はLe Maitre (2002)に基づく。比較のために中部沖縄トラフの火山岩類の既存文献値(Shinjo *et al.*, 1999, Shinjo and Kato, 2000)も示している。

Fig. 5 Volcanic classification diagrams for studied samples and reference rocks showing (a) total alkali-SiO<sub>2</sub> and (b) K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>. English version and detailed explanation are shown in Yamasaki (2018b; Fig. 4).

で遊星型ボールミルを新たに導入した。Yamasaki (2017a)で示したデータはこの装置ではなく、タングステンカーバイド・ミルを用いて粉碎を行ったが、粉碎に伴う機器からの金属元素のコンタミネーションは、タングステンとコバルトを除いて測定誤差の範囲内であることを確認している(Yamasaki, 2018e)。

全岩化学組成の分析値及び詳細な結果の記述はYamasaki (2018b)に示されているので、ここでは煩雑な記述を避けるために議論の鍵となる結果のみを簡潔に紹介する。伊平屋小海嶺海域の試料の全岩主成分化学組成は、SiO<sub>2</sub>含有量53.42–56.81 wt%を示し、全アルカリ-シリカ(TAS)図において玄武岩質安山岩及び中カリウム系列の領域にプロットされる(第5図)。これらの組成的特徴はこれまでに中部沖縄トラフから報告されている苦鉄質岩類の特徴(Shinjo *et al.*, 1999; Shinjo and Kato, 2000)と調和的である。図には示していないが、他の主成分化学組成や微量元素についても、概ね中部沖縄トラフの苦鉄質岩類の組成トレンド上にプロットされる(Yamasaki, 2018b)。Nタイプ中央海嶺玄武岩(N-MORB)で規格化した微量元素のマルチエレメントパターン(スパイダグラム)やコンドライト規格化希土類元素(REE)パターン(コンドライト値: Sun and McDonough, 1989)についても、Shinjo *et al.* (1999)によって報告されている中部沖縄トラフの苦鉄質岩類と概ね調和的な緩やかな左上がりのパターンを示し、顕著なNbとTaの負異常と、Pbの正異常を示す(第6図)。

伊平屋北海丘及び伊是名海穴からの軽石の組成は、そ



第6図 中部沖繩トラフ、SIP掘削海域の火成岩類の全岩微量元素パターン (Yamasaki, 2018bを一部改変)。(a)–(c) Nタイプ中央海嶺玄武岩(N-MORB)規格化マルチエレメント・パターン、(d)–(f)コンドライト規格化希土類元素パターン。N-MORB及びコンドライトの規格値はSun and McDonough (1989)による。中部沖繩トラフ玄武岩類の組成はShinjo *et al.* (1999)に、タイプ1及び2流紋岩の組成はShinjo and Kato (2000)による。

Fig. 6 N-MORB- and chondrite-normalized trace element patterns for samples from study area, with literature values. English version and detailed explanation are shown in Yamasaki (2018b; Fig. 7).

れぞれ、SiO<sub>2</sub>含有量72.28–75.76 wt%と73.09–75.48 wt%の流紋岩組成を示す(第5図)。これら両海域の流紋岩は中カリウム系列の領域にプロットされるが、伊平屋北海丘の試料の全アルカリ含有量とK<sub>2</sub>O含有量のほとんどは、伊是名海穴のそれよりも明らかに高い傾向を示す(第5図)。同様の組成的傾向は、CaO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Y, Zr及びNb含有量にも認められる(Yamasaki, 2018b)。これらのうち、伊是名海穴からの試料の組成は中部沖繩トラフの珪長質岩類の組成トレンド(Shinjo and Kato, 2000)と調和的であるが、伊平屋北海丘の組成は全アルカリのほか、K<sub>2</sub>O, CaO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量において、中部沖繩トラフの珪長質岩類の組成トレンドから外れる(Yamasaki, 2018b)。

Shinjo and Kato (2000)は、中部沖繩トラフの珪長質岩類について、3つの区分(タイプ1, 2及び3)を提案している。それによると、タイプ1流紋岩は、中部沖繩トラフの玄武岩質岩と同一のSr及びNd同位体比をもち、非常に分化したREEパターンを示すとされている(Shinjo and Kato, 2000)。一方、タイプ2流紋岩はNd同位体比が玄武岩類とほぼ同じであるものの、Sr同位体比がわずかに高い特徴を示し、タイプ3については軽石のみとして産するため、その由来は不詳であるとされている(Shinjo and Kato, 2000)。Shinjo and Kato (2000)によると、タイプ1と2とでは、主成分元素組成は区別ができないものの、微量元素組成は明瞭に異なることとされ、それらのデータとの比較の結果、本検討の伊是名海穴の試料はタイプ1流紋岩と、伊平屋北海丘の試料はタイプ2流紋岩と対比される組成をもつことが明らかとなった(第6図)。

#### 4.1.3 珪長質岩類の成因

##### バイモーダル火成活動の原因に関する従来の解釈

すでに述べたように、沖繩トラフはリフト帯であり、一般にリフト帯を特徴づけるバイモーダルな火成活動の産物がこれまでに報告されている。また本研究における「ちきゅう」掘削試料においてもそれが確認された。一方で、沖繩トラフの一部は琉球弧の火山フロントと重複しており、苦鉄質火山岩類が島弧的な地球化学的特徴をもつことが報告されている(Honma *et al.*, 1991; Shinjo *et al.*, 1999; Guo *et al.*, 2017)。バイモーダル火成活動における中間組成の欠如は、“Daly gap”と呼ばれる火成岩岩石学上の古典的な問題のひとつとして知られており、一般に珪長質岩類の成因は、玄武岩質マグマの結晶分化作用あるいは地殻物質の部分溶融によって説明されている。中部沖繩トラフの珪長質岩類の成因に関しても、Shinjo and Kato (2000)により(1)噴出した玄武岩類と類似する含水玄武岩(角閃岩)の部分溶融と、(2)玄武岩マグマの結晶分化作用の2つの可能性が議論されている。中部沖繩トラフの珪長質岩類の成因を考えるにあたっての最も重要な制約は、玄武岩類と流紋岩類のSr及びNd同位体比

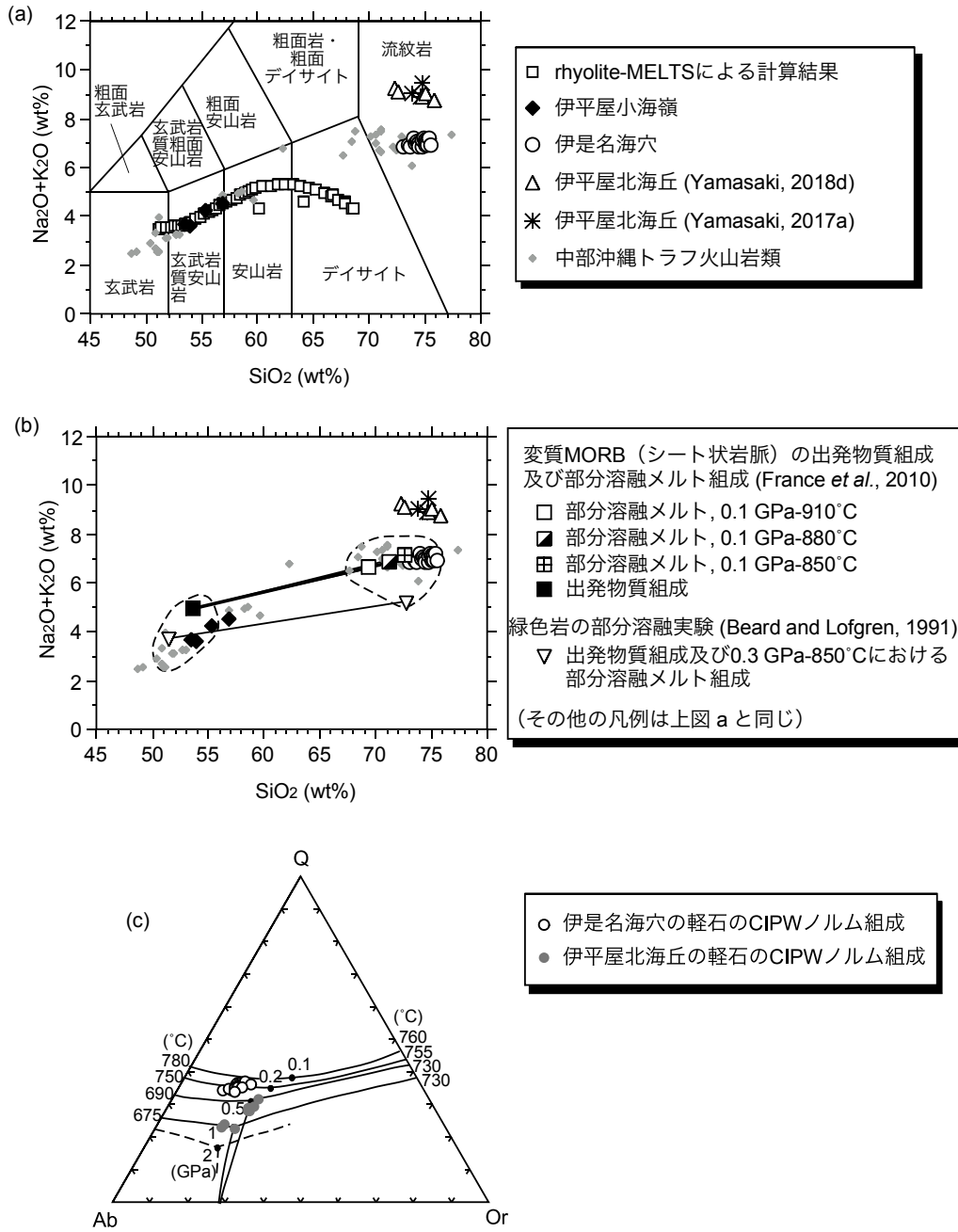
の類似性(Shinjo and Kato, 2000; Huang *et al.*, 2006)である。Shinjo and Kato (2000)は、玄武岩マグマの90%の分化によってタイプ1流紋岩組成が導かれるとし、流紋岩類は海底面下約7 km程度の深度(約0.3 GPaの圧力条件下)で形成されたと述べている。さらに、分化における多量の角閃石の晶出がシリカに濃集した残液を形成し、緩やかなリキダス面がわずかな温度の低下でバイモーダルな組成を形成し得る上に、生成された低密度の流紋岩質マグマがマグマ溜まりにおいて蓋の役割を果たすために、相対的に下位の苦鉄質-中間質マグマがほとんど噴出しなないと考えた。

##### 岩石成因論の再評価の必要性

以上の先行研究の議論に基づいて、本検討ではまず、伊平屋小海嶺で得られた玄武岩質安山岩組成の結晶分化作用によって、伊平屋北海丘や伊是名海穴の流紋岩組成を導き得るのかどうかについて、rhyolite-MELTS(Gualda *et al.*, 2012; Ghiorso and Gualda, 2016)を用いた分化シミュレーションによって検証した。計算条件の詳細はYamasaki (2018b)に示されている。計算の結果、玄武岩質安山岩マグマの分化では珪長質岩類の組成を再現できず、先行研究を追認することはできなかった(第7図a)。ところで、中部沖繩トラフの海底面における玄武岩質岩の存在や伊平屋小海嶺における玄武岩質岩を母岩とする海底熱水活動の存在は、玄武岩質マグマが地殻浅所に存在する明確な証拠である。近年の検討によると、通常の造構場であっても一般に安山岩マグマはむしろ玄武岩や流紋岩マグマよりも噴出しやすいとされている(例えば、Kent *et al.*, 2010)ことから、引張応力場であるにも関わらず中間組成の溶岩を欠く原因についての従来の解釈は、再評価が必要であると考えられる。さらに、例えば、沖繩トラフと同様に引張応力場で周囲を海水に囲まれ、極めて活発な火成活動が認められているアイスランドにおいては、珪長質マグマの成因として熱水変質した地殻の再溶融が提案されている(Bindeman *et al.*, 2012)ことから、同様のメカニズムについても再検討する価値があるものと考えられる。

##### 部分溶融仮説の検討

上述の(1)の可能性について、Shinjo and Kato (2000)は、中部沖繩トラフの流紋岩類の地球化学的特徴を説明するためには、含水玄武岩が角閃石を残存固相として部分溶融する必要があるが、脱水溶融実験の結果からは輝石と斜長石から構成される無水の融け残り物質の存在が示唆されるため非調和であること、そして、そのような玄武岩の変質や部分溶融の過程でSr同位体比が改変されないということは現実的ではないと指摘している。さらに、仮に部分溶融で流紋岩が生成された場合、タイプ1流紋岩の組成から推定される10%程度の部分溶融度は、



第7図 中部沖繩トラフ，SIP掘削海域の火成岩類の組成のrhyolite-MELTSによる分化シミュレーション結果と，変質苦鉄質火山岩類の部分溶融実験結果，及びノルムQ-Ab-Or系の相関係との比較(Yamasaki, 2018bを一部改変)。(a) 伊平屋小海嶺の玄武岩質安山岩の組成を用いた，rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012; Giorso and Gualda, 2016)による分化シミュレーション結果。計算条件の詳細はYamasaki (2018b)に示されている。分化シミュレーションの結果は，伊平屋小海嶺及び中部沖繩トラフの玄武岩-安山岩組成の分化トレンドと調和的であるものの，デイサイト-流紋岩組成を再現できない。(b) 変質MORB及び緑色岩の低圧での含水部分溶融 (water-fluxed melting) 実験結果。本研究地域を含む中部沖繩トラフの苦鉄質岩類と組成的に類似する出発物質の含水部分溶融により，伊是名海穴のタイプ1流紋岩と類似する組成の部分溶融メルトが形成されるとともに，必然的に中間組成の火山岩類を欠く。(c) 伊是名海穴及び伊平屋北海丘の軽石のCIPWノルム組成のノルムQ-Ab-Or系への投影。実験岩石学的に決定された相関係はJohannes and Holtz (1996)による。伊是名海穴の軽石組成は0.2 GPaの共有線上に，伊平屋北海丘の軽石組成は多くが0.5 GPaの不変点付近にプロットされる。

Fig. 7 (a) Evolution of melt compositions from rhyolite-MELTS simulations using the composition of basaltic andesite sample, (b) comparison between results of hydrous partial melting experiments and composition of samples from study area, and (c) projection of normative quartz-plagioclase-orthoclase (Q-Ab-Or) calculated from pumice compositions from Itoya North Knoll and Izena Hole on the experimental haplogranite Q-Ab-Or system after Johannes and Holtz (1996). English version and detailed explanation are shown in Yamasaki (2018b; Figs. 8 and 9).

部分溶融メルト（流紋岩メルト）の分離・上昇のためには十分でないとしている。

高温型の変成作用に伴う地殻の部分溶融は、中部-下部地殻の脱水溶融が主要な役割を果たしていると考えられてきた（例えば、Vielzeuf and Holloway, 1988；Johannes and Holtz, 1991；Patinõ Douce and Johnston, 1991）が、近年では、含水状態での部分溶融、すなわちwater-fluxed meltingが重要な役割を果たしていると考えられるようになってきた（Weinberg and Hasalová, 2015）。水に富む流体の存在下での部分溶融は、ソリダス温度を低下させ角閃岩相での部分溶融や多量のメルト形成を生じ得る（例えば、Yardley and Barber, 1991）。このwater-fluxed meltingは、典型的にはペリテクティック（peritectic）相の存在によって脱水溶融と区別される。例えば、水に飽和した0.1–0.3 GPa下での天然の火成岩類の部分溶融実験の結果からは、ペリテクティック相として角閃石が存在することが報告されている（Piwinskii, 1968；Gibbon and Wyllie, 1969；Conrad *et al.*, 1988）。一方、近年の中央海嶺及びオフィオライトの研究に基づいて、中央海嶺においては、正断層系を通じて海底下6–7 kmまで海水が浸入していることが明らかとなってきた（例えば、Nicolas *et al.*, 2003；Bosch *et al.*, 2004；Coogan *et al.*, 2006）。中部沖縄トラフにおける反射法地震波探査断面は、海底面下5 km程度まで正断層系が発達していることを明瞭に示している（Tsuji *et al.*, 2012）。これらのことは、正断層系を通じた海水の導入により、ペリテクティック角閃石の存在下でのwater-fluxed meltingが想定可能であることを示唆している。

#### Sr同位体比の類似性の原因

地殻物質の部分溶融を想定した場合の海水の存在と残存固相の不一致については上述の考えで説明できるものの、そのようなプロセスにおいてSr同位体比が改変されないメカニズムについても検討が必要である。オフィオライト研究や水-岩石反応実験等の結果から、高温条件下でのSr同位体比改変の基本メカニズムは、同位体交換であることが分かっている（例えば、Spooner *et al.*, 1977；Berndt *et al.*, 1988；Slejko *et al.*, 2004）。中央海嶺系での研究によると、低速拡大海嶺においては地殻物質（MORB）との同位体交換の程度が高く、熱水の同位体比がMORBの値に近いことが知られている（Bach and Humphris, 1999）。沖縄トラフが依然リフティング期であることは、熱水循環系が超低速拡大海嶺や低速拡大海嶺と類似するか、さらに岩石支配的（rock-dominant）な性質をもつことを期待させ、同位体交換により部分溶融域の熱水は周囲の母岩とほぼ同じ同位体比となり、結果的に変質してもSr同位体比が改変されなかったものと想定される。さらに、多量の海水（熱水）の導入は必然的に部分溶融に至る過程で周辺の岩石からの様々な元素の

リーチングを伴うはずであり、硫化物鉱床の存在は基本的にその結果であると理解される。一方で、珪酸塩メルトの移動性は含水量に極めて敏感であり、例えば、わずか0.15 wt%の含水流紋岩メルトの<0.5 GPaでの粘性は地殻において十分に流動可能な程度に低い（Richet *et al.*, 1996；Ardia *et al.*, 2008；Mysen, 2014；Cooper and Kent, 2014）上に、流体に豊富に含まれていると想定される $\text{Na}^+$ や $\text{Ca}^{2+}$ はnetwork-modifier cationsと呼ばれ、珪酸塩メルトの重合度すなわち粘性を下げる働きがある（例えば、Mysen, 2014及びその中の引用文献）。したがって、リフト帯の引張応力場において、仮に10%程度の部分溶融度であっても、珪長質部分溶融メルトは分離可能であると考えられる。

#### 実験岩石学的データと地球化学モデリングに基づく解釈

以上の観点から、水に飽和した条件下での0.1–0.7 GPaでの玄武岩-玄武岩質安山岩組成の部分溶融実験（Beard and Lofgren, 1991）や、0.1 GPaにおけるMORB組成の部分溶融実験（France *et al.*, 2010）の結果と、中部沖縄トラフの火山岩類の組成とを比較すると、実験の出発物質の組成及び部分溶融メルトの組成は、それぞれ沖縄トラフの苦鉄質火山岩と珪長質火山岩、特に伊是名海穴の流紋岩の組成とよく一致する（第7図b）。これらの溶融実験においては、残存固相にペリテクティック角閃石が存在していることから、Shinjo and Kato（2000）の指摘する地球化学的特徴を説明可能であると考えられる。部分溶融実験の結果において特に重要な点は、必然的に中間組成を欠く点（第7図b）で、部分溶融を想定することにより“Daly gap”の起源、すなわちパイモーダルな火成活動の成因が合理的に説明可能である。一方、中部沖縄トラフの珪長質岩類の組成からの検討として、その組成をノルムQ-Ab-Or系へ投影し実験岩石学的に決定された相関係と比較すると、伊是名海穴の流紋岩類が0.2 GPaの共有線に、伊平屋北海丘の流紋岩類の多くが0.5 GPaの不変点付近にプロットされる（第7図c）。また、伊平屋小海嶺海域の玄武岩質安山岩組成をもとに、バッチメルティングの微量元素モデリング計算を行なうと、数%の部分溶融度で伊是名海穴の流紋岩組成（タイプ1流紋岩）の組成が導かれる（Yamasaki, 2018e, f）。モデリングによって得られる部分溶融度がわずか数%であるのは、計算の出発組成に用いた玄武岩質安山岩が分化しているためで、恐らく部分溶融した原岩はより地殻深部の未分化な玄武岩であり、部分溶融度も10%前後であったものと想定される。一方、中部沖縄トラフにおける反射断面にみられる正断層系の到達深度からすると伊平屋北海丘の（タイプ2流紋岩の）0.5 GPaの最終平衡圧力は高すぎるように思われるが、南部沖縄トラフのリフト軸直下における最も地殻の薄い部分の厚さは約12 km程度であるとされているため（Arai *et al.*, 2017）、この圧力は中部沖縄トラフ

の地殻最下部付近での溶融を示唆しているのかもしれない。前述のように伊平屋北海丘の流紋岩に対比されるタイプ2流紋岩は、噴出玄武岩類とSr同位体比がわずかに異なることから、タイプ1流紋岩とは異なるプロセスで、リフティングにより薄化した大陸地殻の最下部において生じたのかもしれないし、Shinjo and Kato (2000)が指摘するように地殻物質の同化が生じ、メルト組成が改変された結果、偶然0.5 GPaの不変点付近にプロットされる組成になった可能性もある。伊是名海穴のタイプ1流紋岩組成をもとに、上部地殻圧力条件でレイリー分別の微量元素モデリングを行うと、10–15%程度の分別によって伊平屋北海丘のタイプ2流紋岩の微量元素組成が説明可能であることから(Yamasaki, 2018 e, f)、地殻内のマグマ溜まりでタイプ1流紋岩マグマが分化し、その過程でSr同位体比がわずかに改変されたのかもしれない。このタイプ2流紋岩の成因については今後の更なる検討が必要であるものの、現時点では中部沖縄トラフの珪長質岩類の成因として、玄武岩質岩のwater-fluxed meltingを考へることによってより多くのことが整合的・合理的に説明可能であると考えられる。

#### 4.1.4 海底熱水鉱床形成における火成活動の役割(造構モデル)

##### 母岩の岩石構成と鉱床タイプとの関係

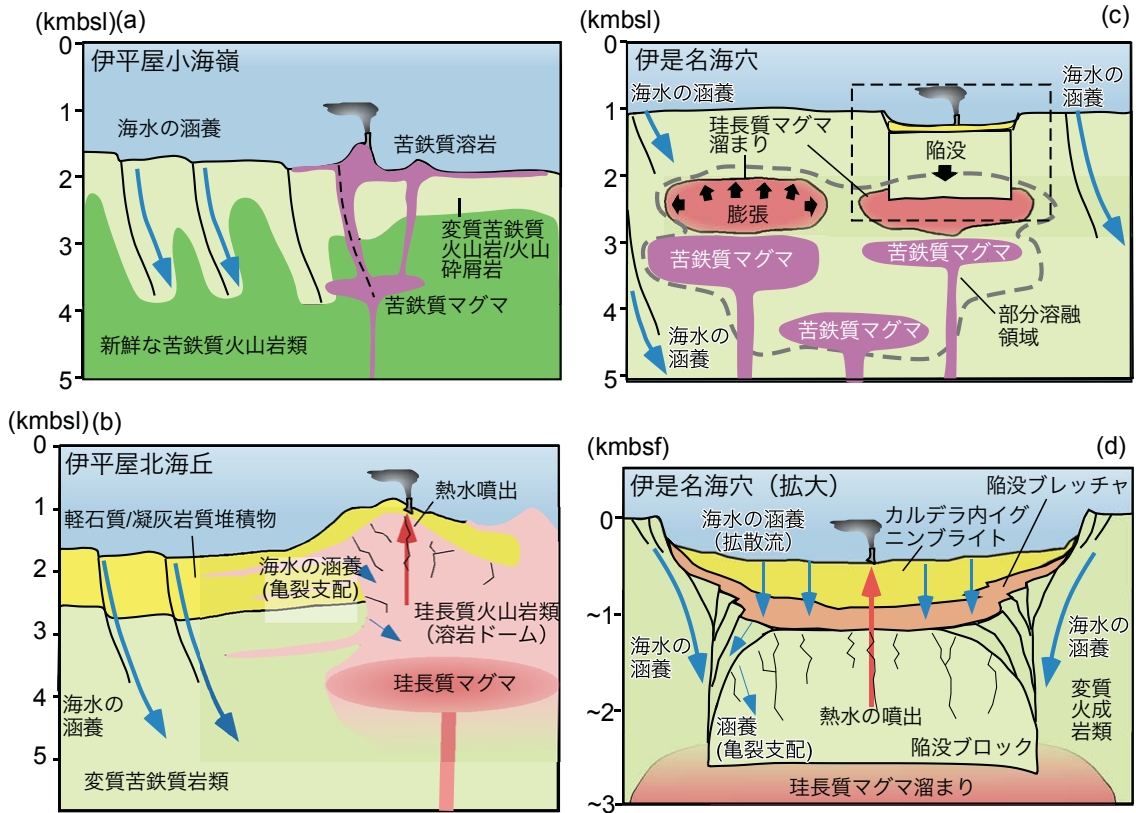
塊状硫化物鉱床の形成における火成作用の役割については、これまでVMSにおいて多くの検討がなされてきた(例えば、Franklin *et al.*, 2005; Huston *et al.*, 2011; Piercey, 2011; Tornos *et al.*, 2015)。Tornos *et al.* (2015)は様々なVMSをレビューし、4つのタイプのVMS鉱化作用をまとめた。これらのモデルにおいては、鉱体が海底に形成されるのか、海底面下に形成されるのかといった違いはあるものの、鉱液はいずれも熱水循環に伴う水-岩石反応の結果形成されると考えられている(Tornos *et al.*, 2015)。現在の海洋底での水-岩石反応は、系の組成が比較的単純な中央海嶺域においては十分な検討がなされている(Alt, 1995; Lowell *et al.*, 2008 及びその中の引用文献)ものの、より複雑な系である島弧関連海域では包括的な火山熱水系の理解は十分に進んでいない。

一方、VMSの母岩の岩石構成は金属元素との明瞭な相関を示唆している。例えば、4.1.1で述べたようにFranklin *et al.* (1981, 2005)、Barrie and Hannington (1999)、及びPiercey (2011)は、母岩の岩石層序組合せの違いにより、5つの岩石層序タイプ区分を提案している。これらの区分は呼称が若干異なるものの、大局的には同じで、一例としてBarrie and Hannington (1999)による区分に従うと、(1) 苦鉄質、(2) バイモーダル苦鉄質、(3) 苦鉄質-珪質碎屑質、(4) バイモーダル珪長質、そして(5) バイモーダル珪質碎屑質、となる。Barrie and Hannington (1999)の全世界の既知鉱床を対象とした推計によると、5つの

岩石層序タイプ区分のうち、バイモーダル珪長質とバイモーダル珪質碎屑質タイプは高い鉛埋蔵量(それぞれ、1,320及び2400万トン)で特徴づけられる一方、バイモーダル苦鉄質タイプはわずか200万トンの鉛埋蔵量とされている。対照的に、バイモーダル苦鉄質と苦鉄質-珪質碎屑質タイプは銅に富む(それぞれ2,430及び1,620万トン)一方、バイモーダル珪長質タイプでは乏しい(710万トン)(Barrie and Hannington, 1999)。亜鉛は基本的に鉛と同様の傾向を示す(Barrie and Hannington, 1999)。これらの違いは明らかに火成岩類の組成の違いに反映されている。すなわち、伊平屋小海嶺の苦鉄質火山岩は平均51 ppmの銅と2.7 ppmの鉛を含むのに対し、伊是名海穴の珪長質岩類は<5.5 ppmの銅と6.7 ppmの鉛を含む(Yamasaki, 2018b)。これらの結果は、これまでに沖縄トラフで報告されている銅に富むタイプの海底熱水鉱床(Seafloor Massive Sulfide Deposits, SMS)と、乏しいタイプのSMS(例えば、Zeng *et al.*, 2009; Ishibashi *et al.*, 2015)が、鉱液形成の反応に関与する母岩の岩石構成の違いに反映されている可能性を強く示唆しており、特に銅に富むタイプのSMS形成には苦鉄質岩類の存在がより重要であることを意味する。VMSにおける5つのタイプの岩石層序区分は、本来、地質帯(あるいは地質体)規模での鉱床のタイプを示すものであるが、これらの区分は、異なるタイプの火成作用が伴われる単一の地質帯において、より小さいスケールの鉱化作用の性質の記述にも適用可能である。

##### 3つの検討海域の造構モデル

第8図は、前述の珪長質岩類の成因論を踏まえ、火成作用と熱水活動との関係のコンセプトをまとめた図である。伊平屋小海嶺海域は沖縄トラフの中央地溝帯中のトラフ軸に位置する(木村ほか, 1999)ため、トラフを横断する方向で最も地殻の薄い海域であり、マントル由来の苦鉄質マグマが最も容易に地殻浅所に到達可能な場所である。リフティングに伴い形成された正断層系を通じて、そのような苦鉄質マグマが海底にまで噴出していると考えられ、断層に沿って噴出した低粘性のマグマが海嶺状あるいは山脈状の地形を作っていると理解される。伊平屋小海嶺海域の掘削の結果、少なくとも海底面下120 mまでは玄武岩質岩が連続的に分布していることが確認された(Kumagai *et al.*, 2017)。海底下数 kmまで玄武岩質岩のみで構成されているのかは不明ではあるが、現時点でそれ以外の岩相の存在を想定する具体的な根拠がないため、ここでは上部地殻の大半が苦鉄質岩で構成されているものと想定する。正断層系はまた、海水の導入の主要な通路としても機能し、周辺の岩石は変質が進んでいることが想定される(第8図a)。熱水活動と、少なくとも初期的な鉱化作用の存在は確認されている(Kumagai *et al.*, 2017)ことから、銅に富むバイモーダル苦鉄質タイプの鉱化作用が期待される。しかしながら、熱水活動の熱源



第8図 中部沖縄トラフにおける造構-火成-熱水活動の概念図(Yamasaki, 2018bを改変). (a) 伊平屋小海嶺. リフティングに伴う正断層系を通じて粘性の低い苦鉄質(玄武岩質)マグマが噴出し、断層に沿って小海嶺あるいは山脈状の地形を作る。正断層系は海水の涵養の主要な通路としても機能し、断層に沿う部分から変質が進行する。(b) 伊平屋北海丘. 珩長質マグマやその火砕物が海丘状の溶岩ドームを形成する。海底下の火砕物は溶結もしくは固結しており、節理や割れ目を通じて海水が浸透する。(c) 伊是名海穴周辺. 海水により変質した苦鉄質火成岩類は、間欠的な新たな苦鉄質マグマ貫入により加熱され、含水部分熔融(water-fluxed melting)を引き起こす。部分熔融メルトは珩長質マグマ溜まりを形成し、その大きな熱容量によって長期間の熱水循環の熱源として機能する。珩長質マグマの噴出により、陥没カルデラが形成される。(d) 伊是名海穴拡大図. 陥没カルデラの形成を伴う噴火は、カルデラ内にイグニンプライト等の火砕物の堆積を伴う。これらの堆積物は空隙率が大きく、容易に海水が浸透する。更に下位の陥没ブロックにおいては、節理や亀裂を通じて海水が浸透する。(c)及び(d)の概念図作図に際しては、下司(2016)の図を参考にした。kmbslは海面下深度(km below sea level)を、kmbsfは海底面下深度(km below seafloor)を示す。

Fig. 8 Conceptual models showing tectono-magmatic-hydrothermal regime in (a) Iheya Minor Ridge, (b) Iheya North Knoll, and (c), (d) Izena Hole. English version is shown in Yamasaki (2018b; Fig. 10).

は、個々のパッチの苦鉄質マグマの貫入に依存しているため、全体としての熱容量は小さく、このタイプの鉱化作用は地質学的な時間スケールではさほど長くは続かないものと想定される。

伊平屋北海丘の掘削によって得られたコア試料は、全体として軽石や珩長質火山砕屑岩起源の変質岩から構成されている(Takai *et al.*, 2015; Kumagai *et al.*, 2017; Yamasaki, 2017a)。したがって、海丘地形は基本的に珩長質岩の溶岩ドームであると解釈される(第8図b)。このことは、反射法地震波探査において、厚い軽石層の下に固結した岩石が分布すると解釈されている(Tsuji *et al.*, 2012)ことから支持される。珩長質マグマは、正断層

系を通じて導入された海水によって変質した中部地殻が、間欠的に底付けされる苦鉄質マグマの熱で部分熔融することによって形成された。伊平屋北海丘の珩長質岩からは低圧での最終平衡の痕跡が認められないため、地殻浅所にマグマ溜まりを作らずに深部から急速に上昇し、貫入・噴出したものと考えられる。これにより、すでに噴出した珩長質溶岩や火砕物が蓋の役割を果たし溶岩ドームを形成し、巨大なカルデラが形成されないのかもしれない。これらのことは、熱水循環が固結した珩長質溶岩の節理・割れ目や珩長質火砕物の層間によって支配されていることを示唆し、そこではバイモダル珩長質やバイモダル珩質砕屑質な、鉛や垂鉛に富む鉱化作用

が期待される。なお、間欠的に上昇・底付けする珪長質マグマによって、地殻内の等温面は上下することが想定されるため、比較的多量の珪長質マグマが地殻浅所に到達することによってマグマ水蒸気爆発が生じ、その爆裂火口として伊平屋北海丘に散在する小規模なクレーター (Takai *et al.*, 2015 ; Kumagai *et al.*, 2017) が生じた可能性がある。

伊是名海穴は、大局的には中央地溝帯内のトラフ軸付近に位置する(第3図b)。従ってリフティングによって苦鉄質マグマが浅所まで到達するとともに、伊平屋小海嶺と同様のメカニズムによって上部地殻が変質し、低圧でのwater-fluxed meltingが引き起こされた(第8図c)。このケースでは、珪長質マグマ(溜まり)がその大きな熱容量のため長期にわたる熱水循環の熱源として機能した。伊平屋小海嶺の多孔質な玄武岩は、苦鉄質マグマが揮発性成分に富んでいたことを示唆しており、そのような揮発性成分は部分溶融の際に珪長質部分溶融メルト中に移動し、最終的には珪長質マグマによって加熱されるループの反応帯に供給され、金属元素のリーチングに関与したものと考えられる。苦鉄質マグマの分化に伴う珪長質マグマの生成と、そのマグマからの直接的な鉍液の形成(例えば、Yang and Scott, 1996, 2002 ; Kamenetsky *et al.*, 2001)を想定する場合、金属元素の総量は個々のマグマ・バッチの大きさに依存するが、周囲の岩石からのリーチングを想定すれば、量的な問題は無視できる。

前節で述べたように、water-fluxed meltingによって生じた珪長質マグマの粘性は低く、リフト帯の引張応力場とあわせて、地殻浅所のマグマ溜まりからのマグマの噴出は陥没カルデラを形成する(第8図c, d)。一般的に陥没カルデラは数百 km<sup>3</sup>の火砕噴火を伴う破局的噴火(supereruptions)の結果形成されると考えられている(例えば、Rampino and Self, 1992)、アイスランドのAskja火山ではわずか1.83 km<sup>3</sup>のマグマ噴出でカルデラが形成された例もある(Carey *et al.*, 2009及びその中の引用文献)。したがって、海水の影響下で引張応力場であるとともに、マグマの粘性が低いことによって、沖縄トラフでは小規模な噴火でも陥没カルデラが形成されるものと推察される。カルデラ内には火砕流堆積物が堆積していると想定され(第8図d)、実際、伊是名海穴の掘削ではその存在が確認された(Yamasaki, 2018c)。火砕流堆積物は著しく透水性が高いため、海水は容易に浸透する。火砕流堆積物のより深部は溶結しカルデラ内イグニブライトから構成されると想定され、これらに発達する節理や割れ目がさらに深部への海水の浸入や熱水の噴出の通路としての役割を果たしているものと思われる(第8図d)。熱水変質の反応帯の位置は熱源の深度や温度状態によるが、単純には、カルデラ形成直後はカルデラ内の火砕流堆積物内で、マグマ及び周囲の岩石が冷えるに従い、陥没ブロック内に徐々に移動しているものと推定される。

このことは、鉛・亜鉛に富むバイモダル珪長質タイプから、銅に富むバイモダル苦鉄質タイプへ鉍化作用の性質も変化する可能性を示唆する。

以上の造構モデルに基づくと、玄武岩質岩が海底面下深部に存在し、かつ珪長質マグマが発生し得る場所が長期間にわたる熱水循環系の存在に有利であると考えられ、地殻浅部の部分溶融に十分な熱量の苦鉄質マグマの断続的な上昇が期待されるのは、トラフ軸付近の近くの薄化した部分で、しかも火山フロントと重複する場所であると考えられる。

#### 4.1.5 地質構造発達史(造構作用)に関する年代的制約

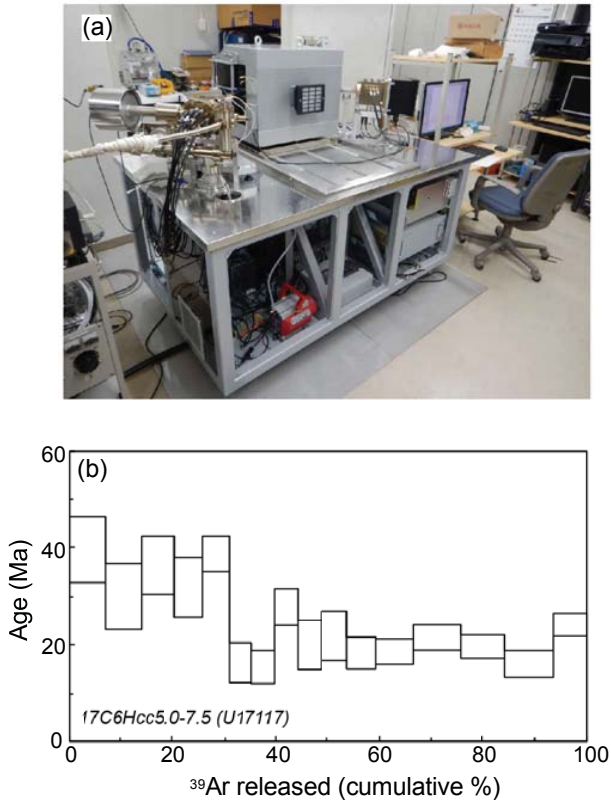
前節までに述べてきた、中部沖縄トラフにおける火成作用と地形、鉍化作用との関係が、リフト軸からの位置関係や火成岩体としての発達段階、すなわち火山熱水系の進化とどのように関係しているのか、地質構造発達史や造構作用(テクトニクス)を理解するために、地質学的な時間軸を与えることが重要である。そこで、本SIPプログラムではAr-Ar年代測定システムを新たに導入し、高精度年代測定法の確立と「ちきゅう」掘削試料の年代測定を試みた。

測定用試料は、2015年度の掘削航海(CK16-01, Exp. 908)で得られた玄武岩質安山岩(第4図b, g)で、もっとも新鮮にみえる石基部分を主に使用した。試料から約1 mm角の小片を作成した後、変質により生じている可能性のある二次鉍物の除去を目的として、6 M HCl中で約30分、6 M HNO<sub>3</sub>中で約30分超音波洗浄後、脱イオン水で洗浄した。さらに洗浄後温水中で約2日間脱塩処理を行い、乾燥後、顕微鏡下で変質部や斑晶の混入のない試料をハンドピックし、測定用試料とした。

試料は年代標準試料(フラックスモニタ)とともに中性子照射用アルミ容器中に収納した。フラックスモニタは、米国コロラド州産のFish Canyon Tuff (FC3)中のsanidineを使用した。年代計算にはこの標準試料の年代として27.5 Maを用いた(Lanphere and Baadsgaard, 2001)。測定の妨害となるアルゴン同位体の補正は、KとCaをそれぞれ含む合成ガラスを試料とともに中性子照射し、分析することにより行った。試料の中性子照射はオレゴン州立大学の原子炉のCLICIT照射施設で行った。

アルゴンの同位体比分析は、本SIPプログラムで導入したレーザ加熱<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定システムにより行い、分析法等についてはIshizuka *et al.* (2018)に準じた。測定に先立ち、試料を真空中にて約72時間100°Cで焼きだしを行った。試料の加熱には、CO<sub>2</sub>レーザを用い、レーザビームの径は試料全体が均質に加熱されるように約3.2 mmとした。試料の測定は段階加熱法により行い、ステップごとにレーザの出力を上昇させて試料が融解を開始するまで出力を上昇させた。各ステップでレーザの出力を一定として100秒間加熱し測定を行った。試料から





第9図 Ar-Ar年代測定システムと、伊平屋小海嶺の苦鉄質岩の年代測定結果。(a) 本SIPプログラムで2015年度に導入したマルチコレクター型希ガス質量分析計(山崎ほか, 2016より引用)。(b) 伊平屋小海嶺の玄武岩質安山岩試料についての $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法による段階加熱測定結果。

Fig. 9 (a)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating facility at the Geological Survey of Japan/AIST, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra for basaltic andesite from Iheya Minor Ridge. Detailed analytical procedures are given in Ishizuka *et al.* (2018).

抽出精製されたガスは、4個のZr-Alゲッター (SAES AP-10) と1個のZr-Fe-Vゲッター (SAES ST707) により10分間精製され、精製後Isotopx社製希ガス質量分析計NGX (第9図a) によりアルゴン同位体比測定を行った。質量分析計の質量分別は標準空気を測定することにより決定した。抽出系、質量分析計を合わせたブランクは、 $^{36}\text{Ar}$ が $2.9 \times 10^{-14}$  mlSTP、 $^{37}\text{Ar}$ が $1.4 \times 10^{-13}$  mlSTP、 $^{38}\text{Ar}$ が $1.0 \times 10^{-14}$  mlSTP、 $^{39}\text{Ar}$ が $1.2 \times 10^{-14}$  mlSTP、 $^{40}\text{Ar}$ が $1.9 \times 10^{-12}$  mlSTPであった。ブランクの測定は概ね3測定に1回の割合で行った。測定誤差は1 s.d. (one standard deviation) で示し、年代値の誤差は、同位体比測定の誤差、妨害同位体の補正に関する誤差、及びJ値の誤差(0.5%)を含む。プラトーの定義についてはFleck *et al.* (1977) によるものを採用した。

得られた年代スペクトルを第9図bに示す。9 mgの石

基試料について、16ステップの段階加熱測定を行った結果、各ステップで得られた年代のばらつきが大きく、プラトー年代を得ることができなかった。また、この地域の地質及び活発な熱水活動が起きている火山地域であることを考慮すると、15–40 Maにわたる各ステップの年代が有意なものとは考えにくい。このため現時点では、対象とした玄武岩の有意な噴出年代を得ることができなかったと判断される。原因としては、結晶度の低い石基部分からの反跳現象によるカリウム起源の $^{39}\text{Ar}$ のロス、変質作用によるカリウムのロス、可能性は低いと考えられるが過剰アルゴンの存在等の可能性等が考えられる。これらの影響により、各ステップにおいて実際よりかなり古い年代値が得られた可能性がある。目的の一つであった高精度年代測定法の確立は完了し、精度良いデータが得られることは確認されている(例えば, Ishizuka *et al.*, 2018) ことから、引き続き検討を進めていく予定である。

#### 4.2 有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発

これまで述べてきた、基盤岩類の地質構造発達史あるいは火成作用の検討に基づいた有望海域の絞り込み手法が、概査実施前の海域選定に寄与するスケールでの手法であるのに対し、概査や準精査で得られた資試料をもとに、それらに引き続く精度の調査の海域を限定するための絞り込み手法についても産総研の有するフォアグラウンド知財や、前節までに述べた「ちきゅう」掘削試料の詳細な解析等を通じて研究開発を実施してきた。そこで、以下にそれらの成果の概要を説明する。

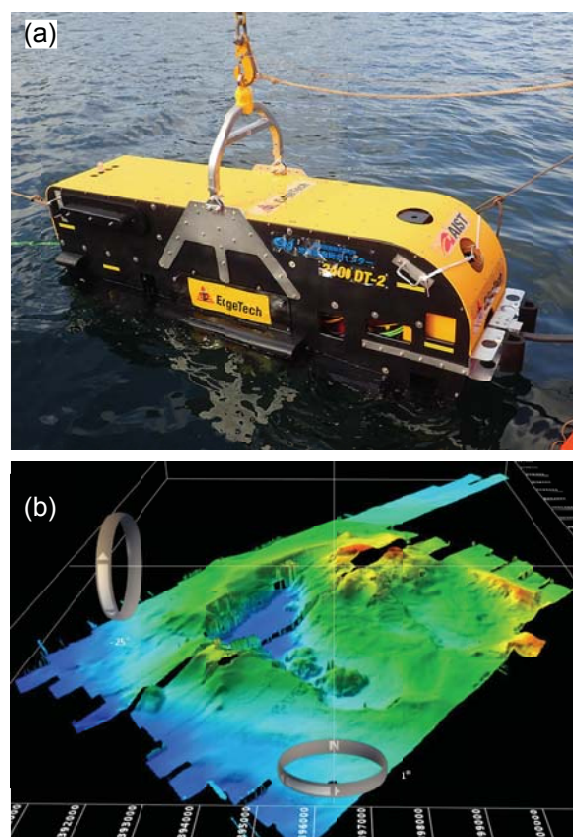
##### 4.2.1 海底表層の地質条件からの有望海域絞り込み手法開発

海底の地質情報を明らかにするためには、基礎情報として一般に海底地形や反射法による音波探査断面などが必要であり、特に、海底熱水域において調査を実施する際には、より詳細な海底地形データや海底表層の地質断面に加え、海底の状況が確認できる海底音響画像や、プルームなどが把握できる水中音響データなどが有用なデータとなると期待される。第2.2節で述べたように、現在の海底鉱物資源賦存ポテンシャル調査の手法としては、調査船により海面近傍から実施する概査とAUVやROVを利用して海底面に接近して実施する精査とが主となっている。AUVやROV等を用いた精査では、分解能の高いデータ(数mm～数10 cm)が得られるものの、1回に可能な調査範囲が狭く、機器の投入や揚収が天候に大きく左右されるといった問題がある。調査船による概査及びAUV等の精査の間には調査効率や分解能の点で大きな隔りがあり、確度の高い地質情報取得の阻害要因となっている。これらの要因を排除するためには、比較的

高速で調査可能であること、深海でも海底近傍でのデータ取得が可能なこと、また調査効率の点から、データを即時的に確認できることが必要となる。そこで、GSJでは、海底表層の地質条件から有望海域を絞り込む手法の一つとして、データがオンラインで確認でき、電力の制約などが少ない調査手法として、深海曳航装置を導入し、運用手法の開発を行ってきた。なお、本研究開発の結果の詳細は、各種条件やパラメータ等が多岐にわたるため、稿を改めて報告する予定である。本論においては、井上(2016)をもとにその後の成果を踏まえて取組みの概要を報告する。

今回の機器導入の目的は、成因研究の観点からの音響データを用いた効率的な調査手法の高度化である。深海曳航装置を用いた準精査ならびに概査自体は、“統合海洋資源調査システムの検証”テーマによって実海域で検証が行われていることから、GSJでは、成因研究の一環として海底微地形を含む海底表層部の音響調査手法の高度化に向けた運用手法の研究開発を進めてきた。この目的を実現するためには、より高分解能な海底面及び海底表層部の地質情報を効率的に取得し、機器を運用するための技術・手法に関する知見を蓄積する必要がある。今回、GSJで導入した機器は深海曳航装置、EdgeTech社製2400DT-2(第10図a)である。深海曳航装置はスラストなどの駆動部を装備していないため、水中でのノイズが非常に少なく良好な記録を得る事が可能である。

曳航体である2400DT-2は音響ソナーとしてサイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラー、インターフェロメトリ・スワッパシメトリソナーを装備している。さらにスワッパシメトリ補正用として動揺センサ及びCTD・音速度センサを備える。また2400DT-2には、深海曳航セシウム磁力計を接続することが可能で、海底面近傍からの全磁力データを同時に取得できる。2400DT-2を導入するにあたり、GSJでは海底鉱物資源広域調査の効率や民間企業への技術移転、導入のしやすさなどを考慮し、いくつかの特別な機器の仕様変更を実施した。今回導入した2400DT-2には中央制御耐圧容器(コントロールボトル)の他にGSJの特別仕様としてデータ処理・収録用耐圧容器(プロセッシングボトル)の2つの耐圧容器を装備している。各センサで得られた全データはコントロールボトルに集約して、プロセッシングボトルに送られ、生データとして収録されるとともに、スワッパシメトリデータについて、簡易処理され、データを圧縮した後、他のデータとともに、船上に伝送される。2400DT-2が装備しているスワッパシメトリソナーのデータは膨大であるため、通常調査には光ファイバケーブルが必須となる。しかし今回、GSJでは曳航体内部のプロセッシングボトルで膨大なデータを処理し、船上に結果のみを上げることによりデータ容量を圧縮し、調査ケーブルの制限を排除することに成功し



第10図 本SIPプログラムでGSJが導入した深海曳航調査装置とそのデータ例。(a) 深海曳航調査装置、EdgeTech 2400DT-2。大きさは幅約90 cm、長さ約330 cm、高さ120 cmで空中重量が約1,200 kgである。(b) 2400DT-2に装備されたインターフェロメトリ方式のスワッパシメトリソナーによって得られたカルデラ地形。

Fig. 10 Photograph of the deep towing system and an example of obtained data. (a) The EdgeTech 2400DT-2 deep towing system. Size of the instrument is H 120 cm × W 90 cm × L 330 cm, and weight is 1,200 kg. (b) Bathymetric data obtained by deep towing system in submarine caldera.

た。この機構を有しているため、GSJの2400DT-2は、光ファイバでも同軸ケーブルでも調査可能な世界で唯一の2400DT-2となっている。サイドスキャンソナーシステムは、120 kHzと410 kHzの2周波数が搭載されており、両周波を同時に発振させて海底のイメージを取得することができる。またサブボトムプロファイラーは、周波数帯域は1～10 kHzを有したフルスペクトラムチャープ方式のEdgeTech社サブボトムプロファイラーDW-106を採用した。またスワッパシメトリソナーは、広域での効率的な地質条件の把握のために、分解能は若干劣るものの、幅が広く(約800 m)取得できる120 kHz帯の発信音を用いたインターフェロメトリ方式のスワッパシメトリ

ソナーを採用した。この120 kHz帯のインターフェロメトリソナーはEdgeTech社の深海曳航装置としてはGSJが世界で唯一所有している。今回採用したインターフェロメトリソナーは、NADIR GAP(直下の未測域)と呼ばれる水深データの欠測を起こさずに、水深データも取得でき、従来のシステムでは必要であった穴埋め測線を必要としないため、より効率的な調査が可能である。実際に2400DT-2によって得られたデータの例を第10図bに示す。

これまでの実海域での試験から、安全に深海曳航装置を運用するためには、曳航時の深海曳航体の位置や海底地形が重要であることが明らかになった。そのため、産総研では曳航用のソフトウェアとしてEIVA社製Navi Suiteを採用し、曳航方法の高度化を図った。このソフトウェアの採用により、自船と曳航装置、海底地形の関係の把握がより簡便になり、安定した調査が可能となる。今後、本調査法の適用方法、範囲と得られたデータの関係性について検討するとともに、実海域における試験や検証は、実用化に向けた貴重な知見であるため、これらについても、運用を担う民間調査企業への技術・知見の移転を図っていく予定である。

#### 4.2.2 地質試料を用いた地化学調査法の研究開発

##### 研究開発の背景

地化学探査(あるいは地球化学探査)は、第2.1節でも述べたように陸上の鉱床の探査において最も有効な調査技術のひとつである。例えば、1981-2000年の間に中国において発見された陸域の鉱床の71%は地化学探査に基づいており、19%が地球物理探査に、残りが他の手法に基づいているとの報告がある(Wang *et al.*, 2007)。したがって、海域においても鉱徴域絞り込みのために有効な調査手法であると期待される。なお、ここでは陸上の探査と区別するために、以後、海域における地球化学的手法を用いた調査を地化学調査と呼ぶ。

島弧に関連したSMSはこれまでカルデラもしくはコールドロンにおいて発見されることが多かった(Halbach *et al.*, 1993; Ishibashi and Urabe, 1995; Iizasa *et al.*, 1999)ため、カルデラ様の地形や地溝状の地形がSMS調査において注意を引きつけてきた(例えば、浦辺ほか, 2009)。さらに、音響探査における熱水ブルームの検出は活動的な海底熱水系の識別に重要な役割を果たしている(Kumagai *et al.*, 2010; Nakamura *et al.*, 2015; Kasaya *et al.*, 2015)。しかしながら、潜頭性鉱床の調査の場合、熱水活動が活発ではなく、また海底面も堆積物等で被覆されている可能性が考えられるため、従来の方法での調査には困難が想定される。さらに、陸域の鉱床探査の場合、踏査等による変質帯の識別が極めて重要な意味をもつが、同様の調査は海域の調査においてはドレッジやROVによる観察、海底着座型掘削装置(BMS)による掘削といった時間・コストのかかる手段でしか実施することはできず、また、調査

可能範囲も極めて狭いという問題がある。海域における地化学調査法に類似する手段としては、現在のところ海底堆積物からの重鉱物の分離(Iizasa, 1993)が提案されているのみである。そのため、海底熱水鉱床における鉱化帯と変質帯との関係についての情報は依然乏しく、例えばどのような元素がどの程度の含有量含まれていれば鉱床調査のための地球化学的指標と成り得るのかといった閾値も全く分かっておらず、海域での地化学調査法確立の妨げとなっている。

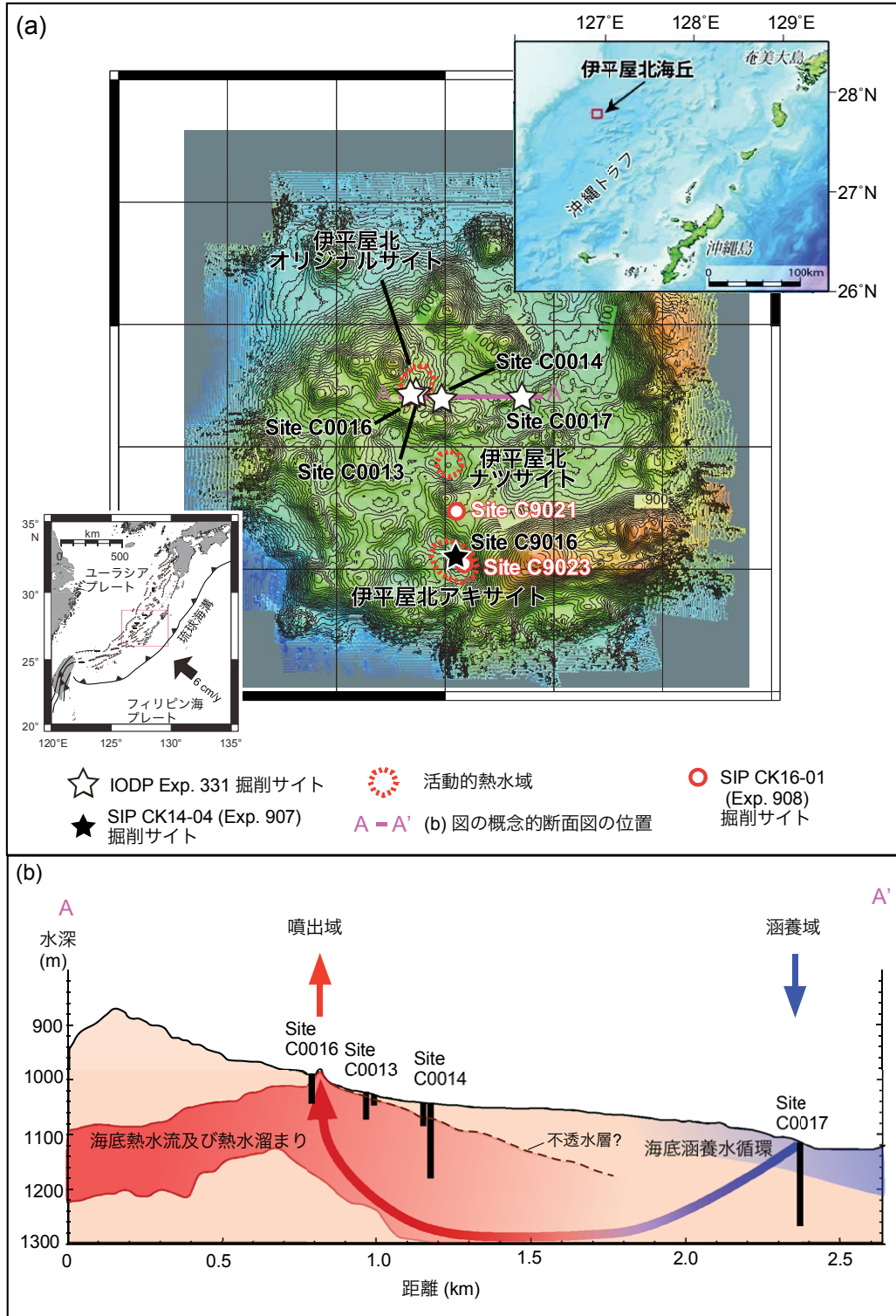
沖縄トラフ伊平屋北海丘は、SIP以前に統合国際深海掘削計画(IODP)による掘削調査が実施され、海水のrecharge(涵養)とdischarge(噴出)との関係が科学的に裏付けられている(第11図; Takai *et al.*, 2011, 2012)。島弧に関連した海底熱水鉱床域には、伊平屋北海丘と同様に珪長質噴出物(軽石等)が広範に分布するため、伊平屋北海丘の海水の涵養域と噴出域の構成物の元素濃度の違いが識別できれば、海底面に鉱化帯が存在する可能性のある噴出域を見いだす地球化学的指標を確立できることが期待される。そこで、海底熱水活動の影響のある部分(噴出域)と、影響のない部分(涵養域)との火山噴出物の組成の違いを検討した。

##### 検討試料及び結果

検討にはIODP第331次航海(Exp. 331)で得られた掘削試料と2014年度のSIP掘削航海(CK14-04, Exp. 907)で得られた掘削試料を用い、海底熱水活動の影響のない涵養域の試料として、IODP サイトC0017最上部の軽石を、海底熱水活動にさらされた噴出域の試料として、SIP サイトC9016の軽石と変質火山岩(あるいは火山砕屑岩)、IODP サイトC0016の変質火山岩(あるいは火山砕屑岩)を用いた(第11図)。さらに、両地点間の違いの傾向を確認するため、噴出域と涵養域の間に位置するIODP サイトC0014の軽石(第11図)についても検討を行った。検討試料及び結果の詳細、分析手法はYamasaki (2018a)に示されている。

##### SMS形成に関連した地球化学的指標と地化学調査法

伊平屋北海丘における海底熱水系のモデルは、噴出域において構成岩類が強い変質あるいは金属元素の沈着を被っており、一方の涵養域においては基本的に非変質の軽石が分布することを期待させる(第11図)。軽石は少なくとも伊平屋北海丘の一定範囲に一樣に堆積したと考えられるため、初生的には組成が同じであった軽石の変質あるいは鉱化作用の違いに応じた組成差を、噴出域と涵養域の試料の比較によって検出できることが期待される。しかしながら、地質学的に同一起源の軽石が分布していると想定されるとしても、それらの軽石が完全に同一の組成を有していたと保証されているわけではない。現実的には、試料の化学組成は、マグマの分化に伴う組成変



第11図 伊平屋北海丘及び掘削サイト位置と、伊平屋北海丘における海底海水(熱水)循環系の概念図(Yamasaki, 2018a)を一部改変。(a) 伊平屋北海丘, IODP及びSIPの掘削サイト及び活動的熱水域の位置図。(b) 伊平屋北海丘における海水-熱水循環系の概念図。海水の涵養と熱水の噴出の関係及び熱水溜まりの存在は、IODP第331次航海の掘削結果と、それ以前の地震波探査結果の解釈をもとに推定されている(Takai *et al.*, 2011をもとに作成)。

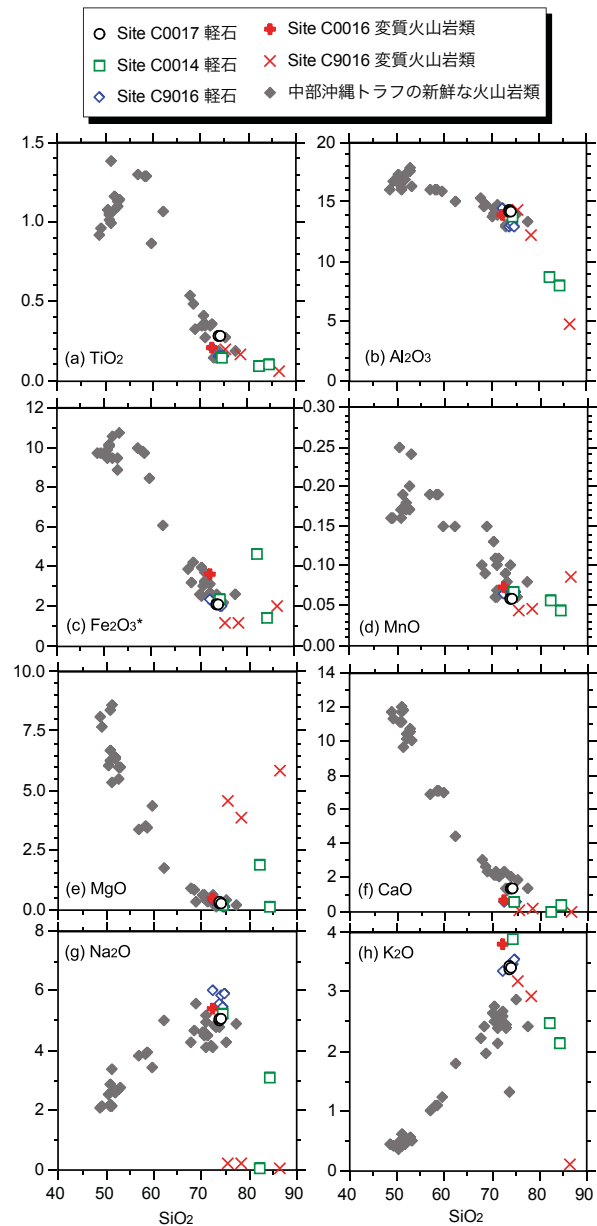
Fig. 11 Location map and schematic illustration of the sub-seafloor recharge-discharge relationship in the Iheya North Knoll. (a) Location map of the Iheya North Knoll within the Ryukyu arc-trench system showing drilling sites and hydrothermal fields. (b) Schematic illustration of the sub-seafloor hydrothermal fluid flow and reservoirs, showing recharged seawater advection. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 1).

化、変質、鉍化作用といった様々な地球化学プロセスの積分結果であると考えられる。そのため、まず検討に用いた軽石の全岩化学組成を、これまでに報告されている沖縄トラフの新鮮な珩長質岩類の組成（例えば、Shinjo *et al.*, 1999；Shinjo and Kato, 2000）と比較した（第12図）。その結果、両者は概ね調和的な組成であり、本検討試料は、大局的には中部沖縄トラフを代表する、同じ起源の火成作用に由来するものと考えて差し支えないと判断される。

地質学的に、噴出域においては一定程度の鉍化作用が進行しつつあることが確認されているため、最も単純には、ここでは目的元素 (indicator elements) としてのベースメタルの付加/増加が期待される。しかしながら、例えば、銅の含有量に関しては、涵養域のサイトC0017と噴出域のサイトC9016のいずれも、その中間部のサイトC0014よりも高い値を示し、傾向がはっきりしないほか、鉄の含有量は同一のサイトにおいても変化している（第13図）。したがって、これらの元素の単純な濃度の比較のみでは、鉍化作用の影響の評価には十分でないことが明らかである。すなわち、目的元素を用いるためには、まずはマグマの分化に伴う含有量の増減と変質に伴う増減とを識別するか、あるいは相殺する必要がある。

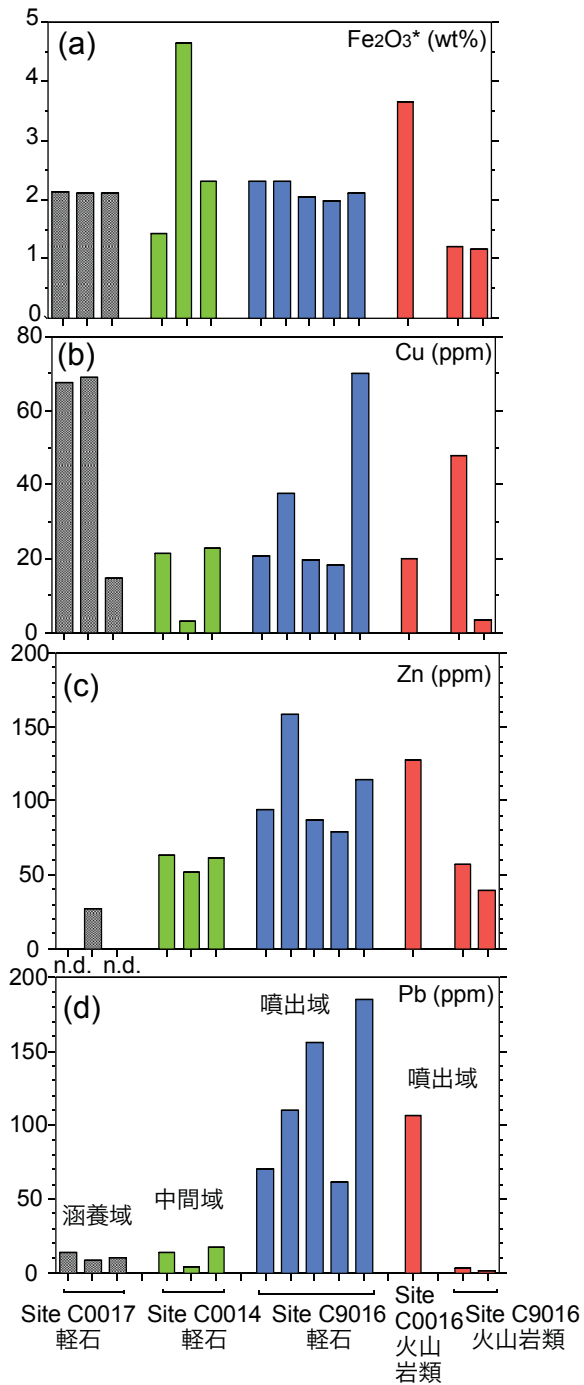
特定の元素の変質や鉍化作用に関連した増加/減少を検出するための最も単純な方法は、新鮮な火山岩の組成の代表値あるいは平均値によって規格化することである。マグマの分化に伴う元素の増減は共存する晶出相とメルトとの規則的な分配関係によって決定されるため、晶出相が一定の範囲内であれば微量元素パターンの平行移動や、特定の相に分配される特定の元素の単調な増減が期待される。例えば、一般に変質によって動きにくいとされている、高い電荷をもつ不適合元素 (HFSE元素；ここではREEも含める) を両軸にとった図では、マグマの分化に伴う含有量の変化と、珩化作用によるSiO<sub>2</sub>含有量の著しい増加に伴う“希釈効果”の良い相関が識別される（第14図）。その一方で、例えば噴出域においては、熱水に由来する元素や、熱水からの析出物そのものが初生的な火山岩類に付加/付着する可能性が期待される。そこで、噴出域と中間域からの試料の組成を、涵養域の試料の組成で規格化した（第15図）。

噴出域と中間域の微量元素のマルチ・エレメントパターンは、LaからTaにかけてほぼ平行で、涵養域の規格化値の0.8から1.1倍の濃度を示す（第15図）。このことは、初生的な火成岩組成の分化の程度の違いを示していると解釈される。しかしながら、中間域の軽石の一部においてV, As, Mo, Cd, Sb, Tl, Bi及びUの顕著な増加が、噴出域の軽石の一部においてZn, As, Sr, Cd, Sb, Pb及びBiの増加が、そして噴出域の深部の変質火山岩類の一部においてZn, As, Mo, CdとTlの増加が認められる（第15図）。逆に、中間域の軽石の一部におけるCu, Ge, Sr及



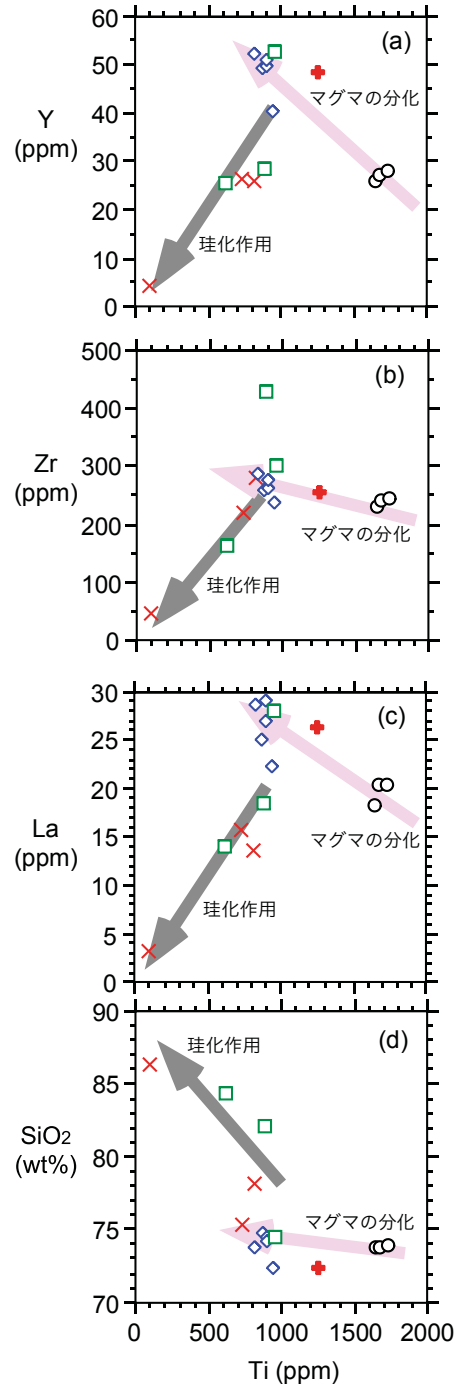
第12図 伊平屋北海丘の検討試料及び中部沖縄トラフの新鮮な火山岩類の主成分元素のSiO<sub>2</sub>含有量に対する変化図 (Yamasaki, 2018aを一部改変)。中部沖縄トラフの火山岩類の組成はShinjo *et al.* (1999) 及びShinjo and Kato (2000) による。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*は全鉄をFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>として示した値。

Fig. 12 Major element oxide-SiO<sub>2</sub> diagrams for samples studied in this work together with literature data. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 4).



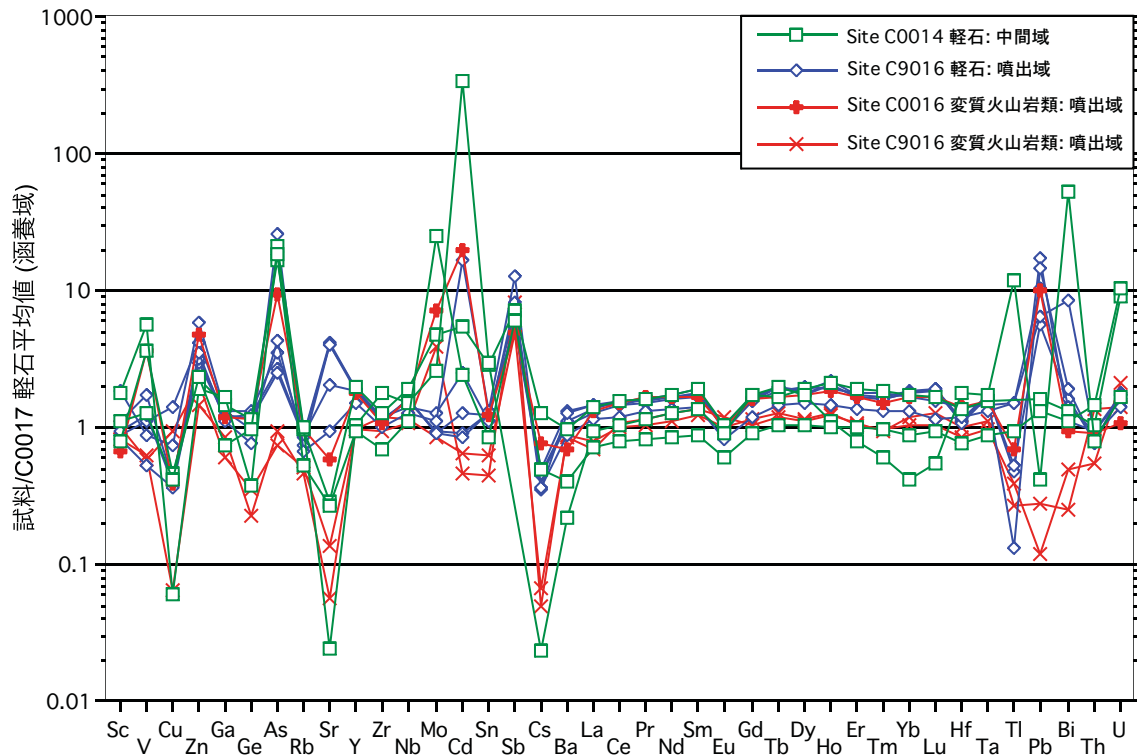
第13図 伊平屋北海丘の海水涵養域、熱水噴出域及びそれらの中間域構成岩類の目的元素(ベースメタル)の含有量の比較(Yamasaki, 2018aを一部改変). 軽石の組成を比較した場合、亜鉛や鉛が噴出域で見かけ高い傾向を示すが、銅の含有量は涵養域においても高いほか、鉄の含有量には違いが認められず、噴出域での単純な濃集の傾向は認められない。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*は全鉄をFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>として示した値、n.d.は非検出を意味する。

Fig. 13 Concentrations of metallic elements within the studied samples. English version and detailed explanation are shown in Yamasaki (2018a; Fig. 9).



第14図 流体で移動しにくいとされるHFSE元素とSiO<sub>2</sub>の検討試料における組成関係(Yamasaki, 2018aを一部改変; 記号は第12図と同じ). 珪化作用による著しいSiO<sub>2</sub>含有量の増加によって引き起こされる、いわゆる“希釈効果”を除外した組成関係は、マグマの分化に伴う増減を反映していると解釈される。

Fig. 14 Relationships between immobile trace element concentrations and SiO<sub>2</sub> for the samples studied in this work. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 8).



第15図 涵養域の軽石の平均組成で規格化した、噴出域及び中間域の試料の微量元素パターン (Yamasaki, 2018aを一部改変)。希土類元素を含むHFSEでは概ね平行なパターンを示す。一方、それ以外の元素では様々な程度に正負の異常を示し、かつ、それらの傾向は互いに類似することから、共通の原因あるいは起源によるものと推察される。

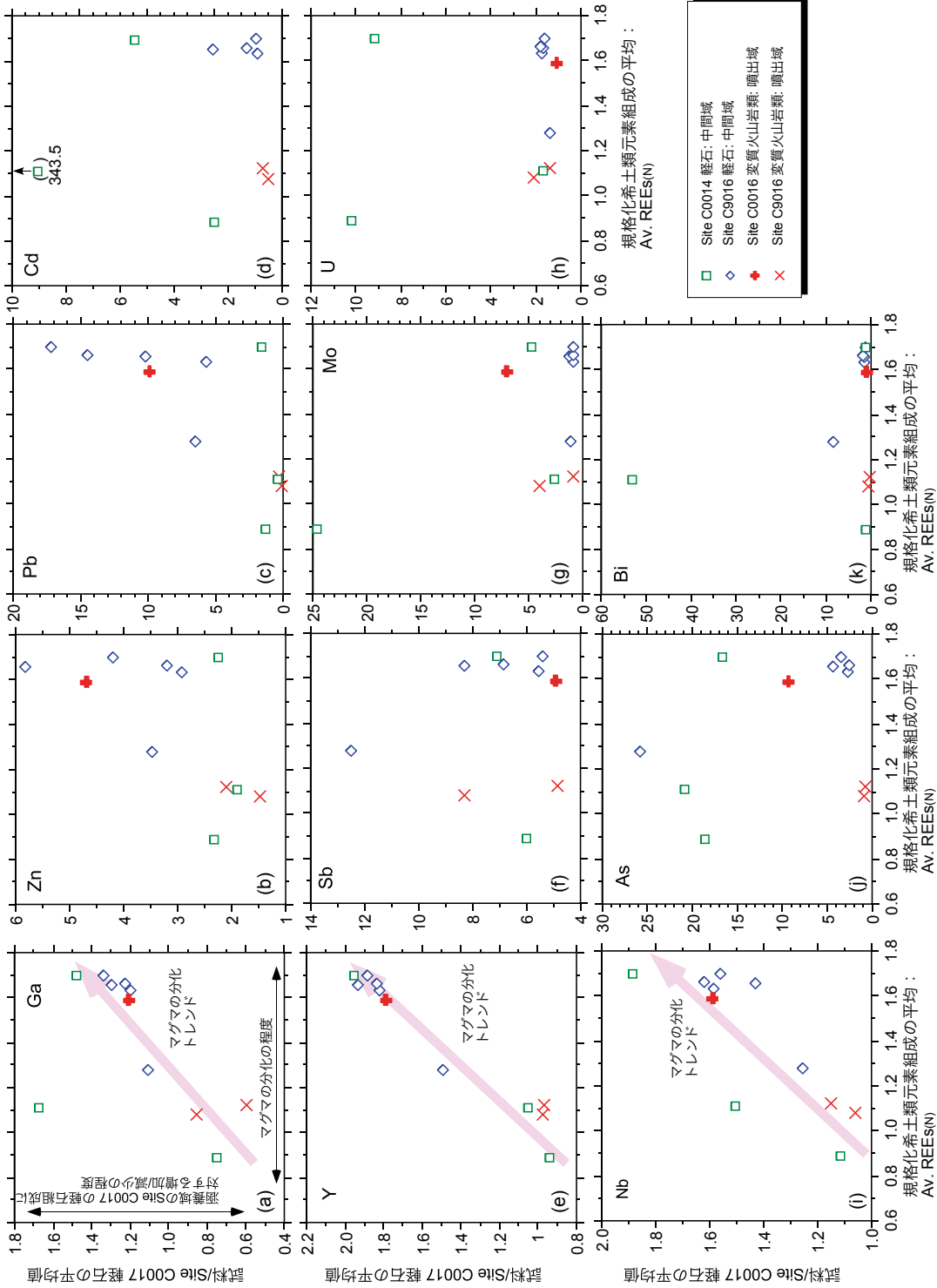
Fig. 15 Trace element patterns of samples from the migration and discharge zones, normalized to the average composition of the recharge zone (C0017) pumice samples. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 10).

びCsの、噴出域の軽石の一部におけるCu, CsとTlの、そして噴出域深部の変質火山岩類の一部におけるCu, Ge, Cs, Tl, Pb及びBiの減少も認められる。これらの元素の増減は、単一のサイトで全ての試料に共通ではないものの、サイトに関わらず大局的に類似した異常の傾向を示し、熱水や鉱液といった共通の起源に由来した可能性を示唆する。これらの異常を示す元素は必ずしも目的元素ではないものの、鉱化作用に関連した何らかの副成分としての指示元素 (pathfinder elements) であると考えられ、今回の結果は、海底熱水鉱床の地化学調査において指示元素が有用であることを示唆している。

マルチエレメント・パターンの平行移動は、マグマの分化に伴う元素の増減が、REEの規格化値の平均を指標として表現できることを示している。もちろん、より単純には、個々のREE含有量もこの指標として利用可能であるが、軽希土類元素と重希土類元素との間のわずかな鉱物-メルト間の分配係数の違いや変質の影響、分析精度等、個々の元素に敏感に現れる可能性のある不確かさを相殺し大局的なマグマの分化程度を知るために、ここでは規格化して数値を揃えたREEを平均する手法をとっ

た。

涵養域の試料の組成で規格化したREEの平均値 [average REEs(N) values] と、同様に涵養域の試料の組成で規格化した目的元素及び指示元素の関係を第16図に示す。これらの元素は、マグマの分化に伴って必ずしも全く同一の挙動をするわけではないため、仮にマグマの分化による元素の増減のみがあったとしても、規格化後の数値が1対1で対応している必要はない。しかしながら、もしも目的元素及び指示元素の濃度の増減がマグマの分化のみに依存しているとすれば、REEの平均規格値に対して系統的あるいは比例的な変化を示すことが期待される。例えば、Ga, YやNbは基本的にそのような系統的な単調増加の傾向を示している (第16図)。一方、その他の元素については、そのような系統的な変化傾向を示さない。例えば、中間域の軽石において系統的に高い値を示すAsや非常に大きな組成幅を示すCd, Mo, UとBi, そして同じく、比較的狭い範囲のREEの平均規格化値に対して非常に大きな組成幅を示す噴出域の軽石のZn, Pb, SbとAs (第16図) は、マグマの分化に伴う増減では説明できず、鉱化作用を伴う熱水の影響により付加され



第16図 涵養域の軽石の平均組成で規格化した希土類元素組成の平均値と、涵養域の軽石の平均組成で規格化した微量元素濃度との関係(Yamasaki, 2018aを一部改変)。横軸の希土類元素の規格化平均値は、マグマの分化に伴い増減する。図示した微量元素がマグマの分化に伴い増減する場合は、横軸の希土類元素の規格化平均値と系統的な相関をもつて変化することが期待され、Ga, Y及びNbに示したピンクの矢印はそのような変化傾向を示す。一方、それ以外の元素については、横軸のマグマの分化程度に対して系統的な増減を示さず、外来的な要因で付加/除去されているとみなされる。

Fig. 16 Average REE values normalized to the composition of pumice samples from the recharge zone vs. selected trace elements normalized to the recharge zone samples. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 11).

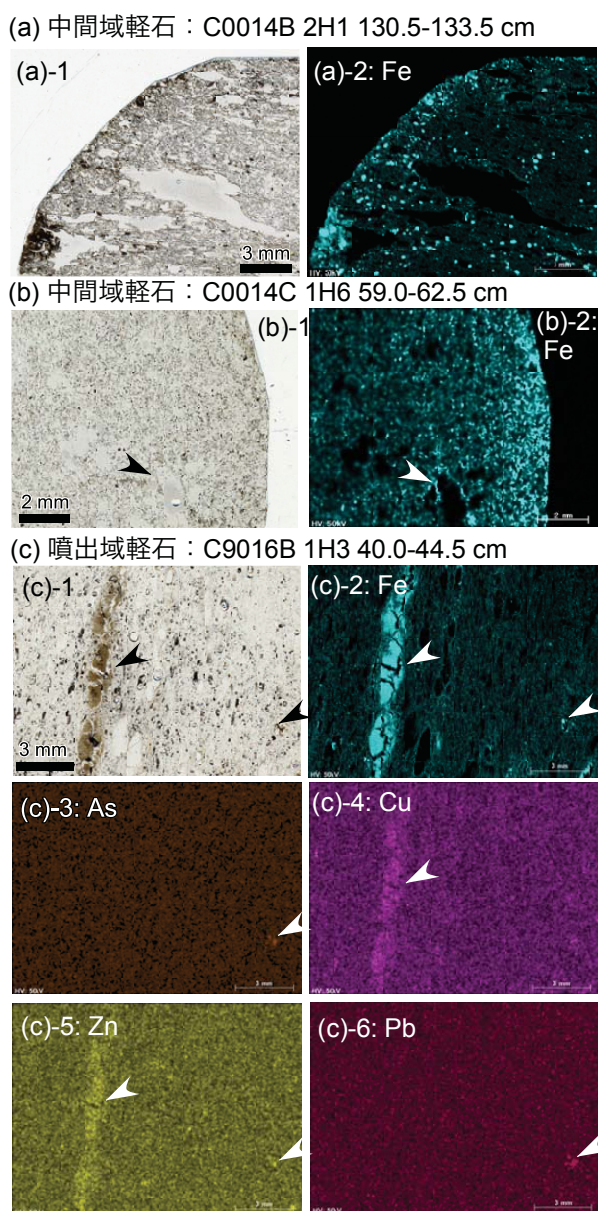


たものであると推察される。したがって、新鮮な試料の元素濃度に対するこのような元素の異常は、噴出域が近傍に存在する(した)ことの指標となると期待される。

鉱化作用に伴う熱水によって付加されたにも関わらず、サイト毎に一定の傾向を示さない原因は、熱水もしくは鉱液成分が、軽石の空隙に不均質に付着していることを示唆する。そこで、これらの軽石試料をX線マイクロマッピング装置( $\mu$ -XRF mapping)で解析した結果、中間域から得られた軽石礫の表面や空隙の縁に沿った明らかな鉄の濃集が認められた(第17図)。分析精度の都合上、これ以外の元素の分布状態を確認することはできなかったが、軽石礫や空隙の表面に限定される鉄の濃集は、異常

を示した元素が表面に付着していることを示すものと思われる。それに対し、噴出域の軽石においては、軽石の構造に沿った鉄・銅・亜鉛の濃集や、空隙中の金属元素の沈殿が観察された(第17図)。これらは、単純に軽石の表面に付着したというよりも、軽石層を通過する噴出流体によるごく初期的な鉱化作用によって生じたものと考えられる。

すでに述べたように、沖縄海域や伊豆-小笠原海域の熱水噴出域あるいは熱水鉱床分布域の周辺には、一般に珪長質の火山噴出物が分布しているため、上述の方法は複数地点の試料の解析の結果、どの地点がより熱水噴出域に近いかを推定する指標として利用可能であると期待される。具体的には、多数の地点からの試料が得られた場合は、その中で最も新鮮で初生的なマグマ組成を保持していると推定される試料を規格化に用いればよいが、科学調査によって事前に火成岩岩石学的・地球化学的検討がなされている化学組成値が公表されていれば、それを規格化に用いてもよい。一般に大規模な鉱床はその鉱体の構造的上位に熱水噴出域(チムニー)が存在すると期待されるため、熱水噴出口の位置を効率的に探すことができれば、伏在している鉱体を発見する確率も向上すると期待される。この新しく提案した地化学調査法は、概査もしくは準精査段階において、系統的なグリッド状のピストン・コアリング(あるいはドレッジ)を行うことによって最も有益な成果が得られるものと期待される。これらのサンプリングには依然時間や労力・コストがかかるものの、BMSを用いた掘削やROVによる試料採取に



第17図 噴出域及び噴出域と涵養域との中間域の軽石試料のX線マッピングによる組成像及び薄片写真(Yamasaki, 2018aから抜粋の上、一部改変)。 (a) 及び (b) 中間域の軽石。 (a-1) 及び(b-1)：薄片スキャン(オープンニコル)。軽石の表面や空隙に沿う部分に鉄の濃集(付着)が認められるほか、微小な空隙中に鉄を含む粒子が散在する。(c) 噴出域の軽石。(c-1)：薄片スキャン(オープンニコル)。軽石のガラス質流理に沿って粘土化した褐色の帯状部に鉄、銅、亜鉛の濃集が認められるほか、鉄・ヒ素・亜鉛・鉛の粒状濃集部が認められ、金属元素に富む熱水が通過して形成された鉱染状硫化物の初期的な組織であると解釈されるが、その分布は不均質である。C0014B 2H1 130.5-133.5 cmは、サイトC0014、B孔のコア2(Hはコア試料を回収するためのドリルビット部分のコアパレルの種類)、セクション1のトップから130.5～133.5 cmの試料であることを意味し、他の試料名も同じ。矢印は組成像と薄片写真の同位置での元素濃集部を意味する。

Fig. 17 X-ray mapping and optical images of thin sections of pumice samples. Images show uncalibrated (semi-quantitative) elemental distributions based on total counts of  $K\alpha$  lines. English version is shown in Yamasaki (2018a; Fig. 7).

比べれば遥かに簡便、迅速で安価であるし、間隔を広げることにより広域的なサンプリングも可能である。また、この手法は熱水活動が終息し堆積物を被った海域であっても、ピストン・コアリングが軽石層に到達し、試料を得ることができさえすれば実施可能であるという利点をもつ。

#### 4.2.3 物理探査手法の高度化に資する地質試料の電気特性の研究

##### 研究背景と検討試料及び手法

金属鉱床は電磁気学に基づいた物理探査法では低比抵抗として検出されることから、本SIPプログラムの研究開発では、海底熱水域における電気・電磁探査、とりわけ電気探査による比抵抗データを用いた地下構造の可視化や、自然電位探査が準精査-精査段階での鉱微地の発見に有効であることが分かってきた(例えば、笠谷, 2016; Kawada and Kasaya, 2017)。第2.1節で述べたように、電気探査は陸上の鉱床探査においても一般的に用いられる手法であるが、活発な熱水活動を伴う、あるいは海水に浸された状態にある海底熱水鉱床においては、構成岩石の物理的性質や置かれている環境が陸域とは異なる。したがって、最適な物理探査手法の開発やそれによって得られるデータの正しい解釈のためには、原位置に近い状態で海底下構成岩類の電気特性に関する知見を直接的かつ詳細に得る必要がある。

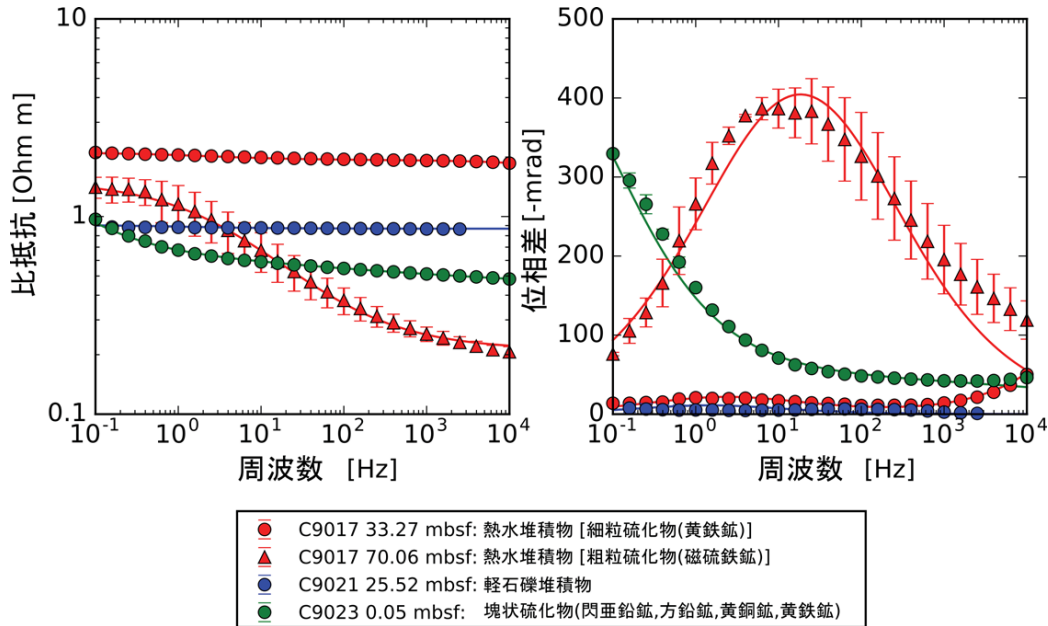
SMSを構成する硫化物のうち、閃亜鉛鉱を除く鉱物には特有のIP効果が認められることが知られている(例えば、Pelton *et al.*, 1978)。IP効果とは、堆積物・岩石中において流体で満たされた空隙中に硫化物が存在すると、硫化物が電気回路中のコンデンサに似た容量的性質を持つために電荷を蓄積・放電させ、結果として堆積物・岩石全体に流れる電流・電圧に位相差が生じる現象である。Revil *et al.* (2015a, b)は、鉱染状の硫化物(disseminated sulfides)について、交流電流の広帯域における複素電気特性(スペクトルIP)について検討し、硫化物粒子内の半導体的メカニズムに基づいた理論を提案している。この結果に基づくと、硫化物はIP効果により、高周波においては非常に導電性である一方で、低周波では完全に絶縁性であることから、硫化物を含む堆積物の調査の場合は、IP効果は電流の周波数によって導電的でも絶縁的でもあり得ることになる。したがって、地球物理探査の解釈における不確かさを減ずるためには、実際の海底熱水域あるいは海底熱水鉱化域からの試料のIP効果に関する知見が不可欠である。そこで、本研究では、2016年度に実施されたCK16-01(Exp. 908)航海における伊平屋北海丘及び伊平屋小海嶺海域の掘削試料について、比抵抗及びIP効果データをその他の物性・岩相・組成データ等と比較し、支配要因を検討した。検討に用いた試料の掘削サイトの位置の詳細はKomori *et al.* (2017a)及びKumagai

*et al.* (2017)に示されている。今回検討したサイトのうちサイトC9017が伊平屋小海嶺海域、他のサイトが伊平屋北海丘に位置し、伊平屋北海丘のサイトC9021とサイトC9023の位置は第11図aに示している。掘削コア試料の比抵抗・IP特性は、試料の酸化や間隙水の損失を最小限に抑えるため、掘削後速やかに実施した。測定には、AMETEK製のVersaSTAT4電気化学測定器を用い、0.1 Hz-10 kHzの複素比抵抗を計測した。機器や測定条件の詳細についてはKomori *et al.* (2017a)に示されている。

##### 結果と考察

船上比抵抗・IP特性計測では、硫化物により特徴的な高位相差のピークが生じ、ピーク周波数を境に高周波領域で導電的性質、低周波領域で絶縁的性質を持つというIP効果の典型的な特徴(Revil *et al.*, 2015a, b)が捉えられている。第18図は、各サイトにおいて採取された代表的な堆積物・岩石の比抵抗・位相差の周波数依存性について示したものである。硫化物を含む、熱水変質を受けた堆積物あるいは熱水変質に伴って形成された堆積物(以後、熱水堆積物と呼ぶ)や塊状硫化物(サイトC9017, C9023)は高い位相差を有し、位相差のピーク周波数より高周波数領域で低比抵抗、低周波数領域で高比抵抗となっている。それゆえ、位相差のピーク周波数は硫化物を含んだ堆積物・岩石のIP効果の特徴づける重要な指標となる。

伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺において、海底下堆積物・岩石の比抵抗は大局的に間隙率と負の相関を示す他、位相差は硫化物の多寡を明瞭に反映している。第19図は、各サイトにおける比抵抗と位相差の鉛直プロファイル、水蒸発法により得られた間隙率と、粉末X線回折により得られた粘土鉱物及び硫化物量(閃亜鉛鉱を除いた合計)とともに示したものである。例えば伊平屋小海嶺のサイトC9017の熱水堆積物においては、約50%の中程度の間隙率で比抵抗が1-2 Ωmの値を示すのに対し、サイトC9021の高透水性の軽石礫(約80%の間隙率)では、より低い0.3-1 Ωmの比抵抗値を示す。同様の傾向は伊平屋北海丘のサイトC9023でも明瞭に認められる。また、位相差については、第19図に示すように、硫化物に乏しい伊平屋北海丘のサイトC9021の軽石質堆積物は低い位相差を示し、全体域を通じて20 mrad未満である。それに対し、サイトC9017(伊平屋小海嶺)やC9023(伊平屋北海丘)の細粒硫化物を含む熱水堆積物は、相対的に高い位相差を示す。なお、比抵抗については、煩雑な表示を避け、間隙率・粘土鉱物・硫化物量との対応関係を把握するため、陸域・海域で実施される電気・電磁探査で一般的に使用される周波数帯域に近い1 Hzのデータを示している。また、位相差については、ピーク周波数の把握を容易にするために全周波数帯域のデータを丸印の大きさで示している。



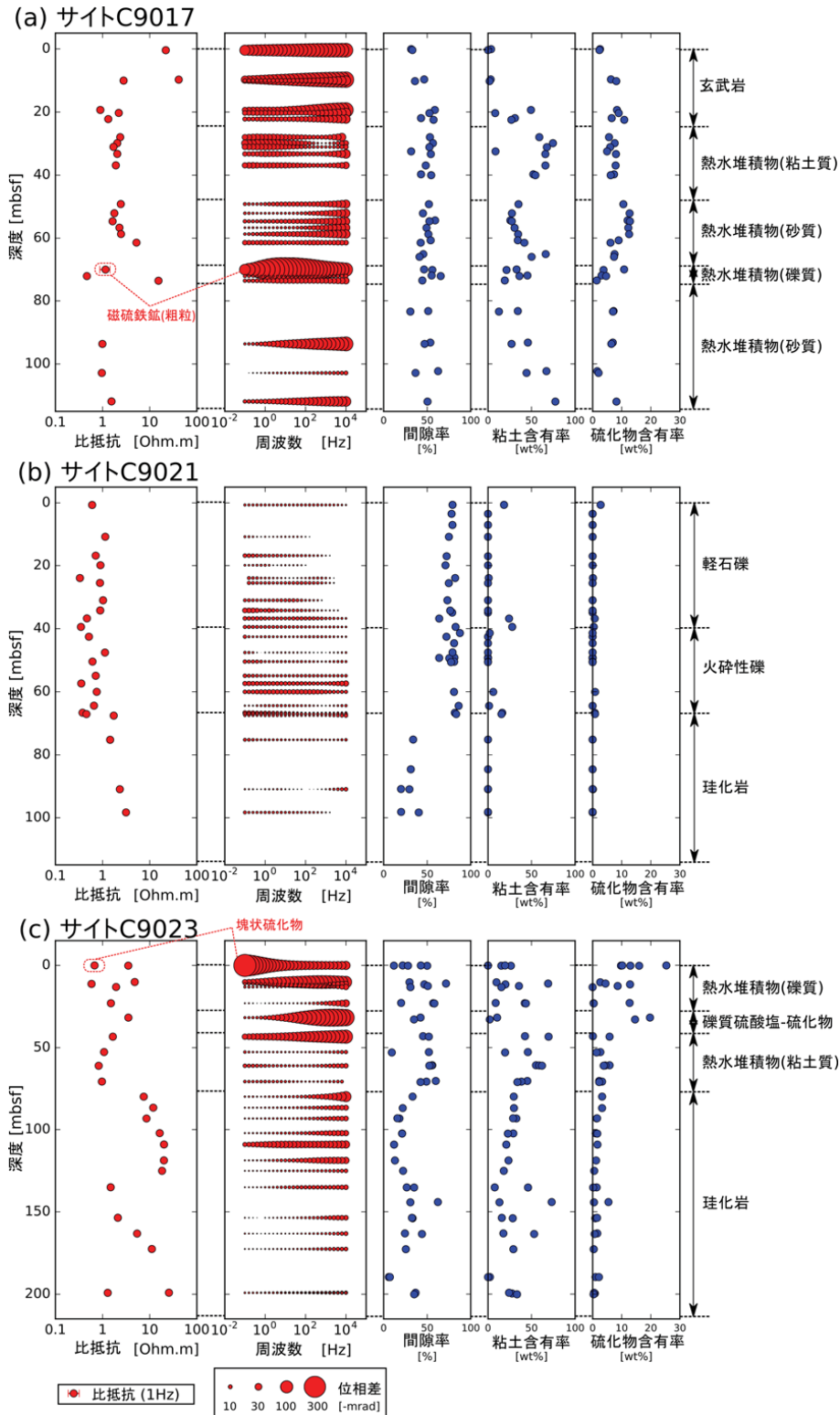
第18図 伊平屋北海丘及び伊平屋小海嶺における掘削試料のスペクトルIP特性の代表例 (Komori *et al.*, 2017aから抜粋の上、一部改変). 赤丸：サイトC9017 (伊平屋小海嶺)において典型的に見られた細粒硫化物を含有する熱水堆積物. 赤三角：サイトC9017, 深度70 m付近で採取された粗粒の磁硫鉄鉱を含有する熱水堆積物. 青丸：サイトC9021 (伊平屋北海丘)において典型的に見られた軽石礫堆積物. 緑丸：サイトC9023 (伊平屋北海丘)の海底面付近で採取された塊状硫化物硫化物を含有する堆積物・岩石は、位相差のピークを持つ周波数を境に、高周波領域・低周波領域でそれぞれ、相対的に低比抵抗・高比抵抗となっている。

Fig. 18 Representative spectral IP signature of samples from the study area. English version of the figure, detailed explanation and discussion are shown in Komori *et al.* (2017a; Fig. 4).

一般に、位相差の周波数依存性、特にピーク周波数は硫化物の粒径に依存し、大きな粒子は位相差のピークを低周波側へシフトさせることが知られている (Dias, 2000; Revil *et al.*, 2015a, b). 本研究においても、硫化物の粒径の違いを反映していると考えられるピーク周波数の違いが認められた. 第19図に示すように、サイトC9017やC9023の細粒硫化物を含む熱水堆積物は、周波数の増加に伴い、位相差が約10 mradから最大数100 mradに増加し、10 kHz程度かそれ以上の周波数帯域にピーク周波数を持つ. 上記とは対照的に、サイトC9017の海底面下深度約70 mの層準では、粗粒の磁硫鉄鉱が観察され、10 Hzにおいて380 mradの位相差ピークが認められた (第18図の赤三角を参照). このピーク周波数は、細粒硫化物に典型的なピーク周波数に比べて著しく小さい. また、C9023の海底面直下の塊状硫化物は、周波数の減少に伴い位相が増加するという、細粒硫化物と正反対の特徴的なスペクトルIP特性を示した (第18図の緑丸を参照). これは、塊状硫化物のピーク周波数が、0.1 Hzより低周波側に存在することを意味する.

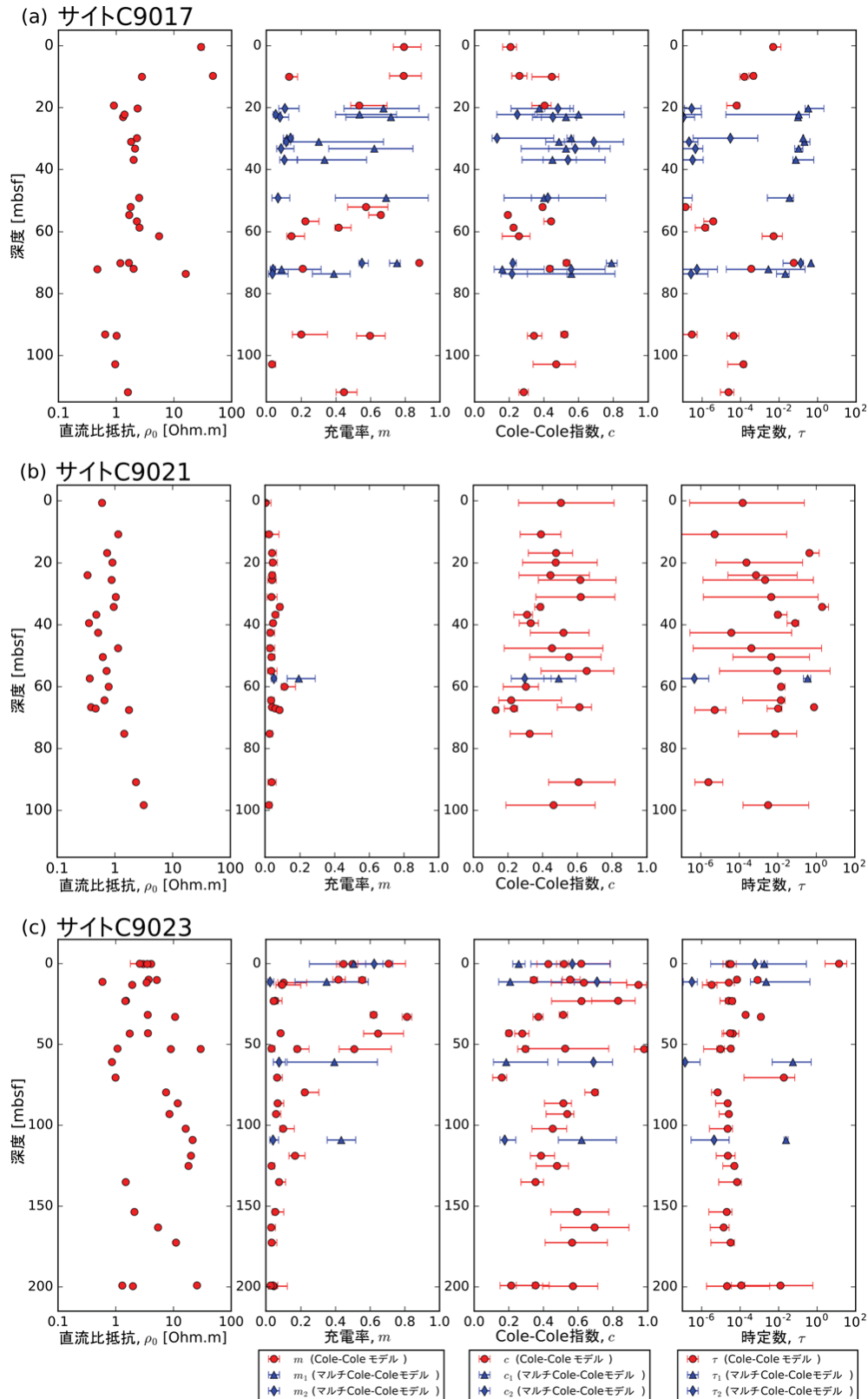
近年のIP研究の進展により、Cole-Coleモデルと呼ばれる電気回路モデル (Pelton *et al.*, 1978)における変数 (IPパ

ラメータ：直流比抵抗、充電率、Cole-Cole指数、時定数)のうち、充電率、時定数が本質的に硫化物の粒径や量と関係づけられることが明らかになってきた (例えば、Wong, 1979; Dias, 2000; Revil *et al.* 2015a). 硫化物の量や鉱化作用は、本SIPプログラムの成因研究における主要な関心の一つであるため、ここでは特に充電率に着目する. 第20図は、各種IPパラメータの推定結果とスペクトルIPデータのCole-Coleモデルへのフィッティング結果で、推定された充電率と硫化物量とに明らかな相関が認められる. 例えば、最大400 mradに達する高位相差を示し、磁硫鉄鉱を含有する堆積物 (伊平屋小海嶺, サイトC9017, 海底下深度70 m)は、約0.8の高い充電率を示す一方、低位相差の軽石礫堆積物においては低い充電率が推定されている. また、第21図は、1 Hzにおける比抵抗と全充電率 (total chargeability) の粘土鉱物量、硫化物量及び間隙率との相関を示している (全充電率の取り扱いに関する詳細はKomori *et al.*, 2017aを参照). 比抵抗と硫化物量との間には相関は認められないが、全充電率は硫化物量と正の相関を示す (第21図b, d). これらの関係は鉱染状硫化物を模した実験試料に一般に見られ (例えば、Revil *et al.*, 2015b), 本研究における肉眼観察で掘削コア



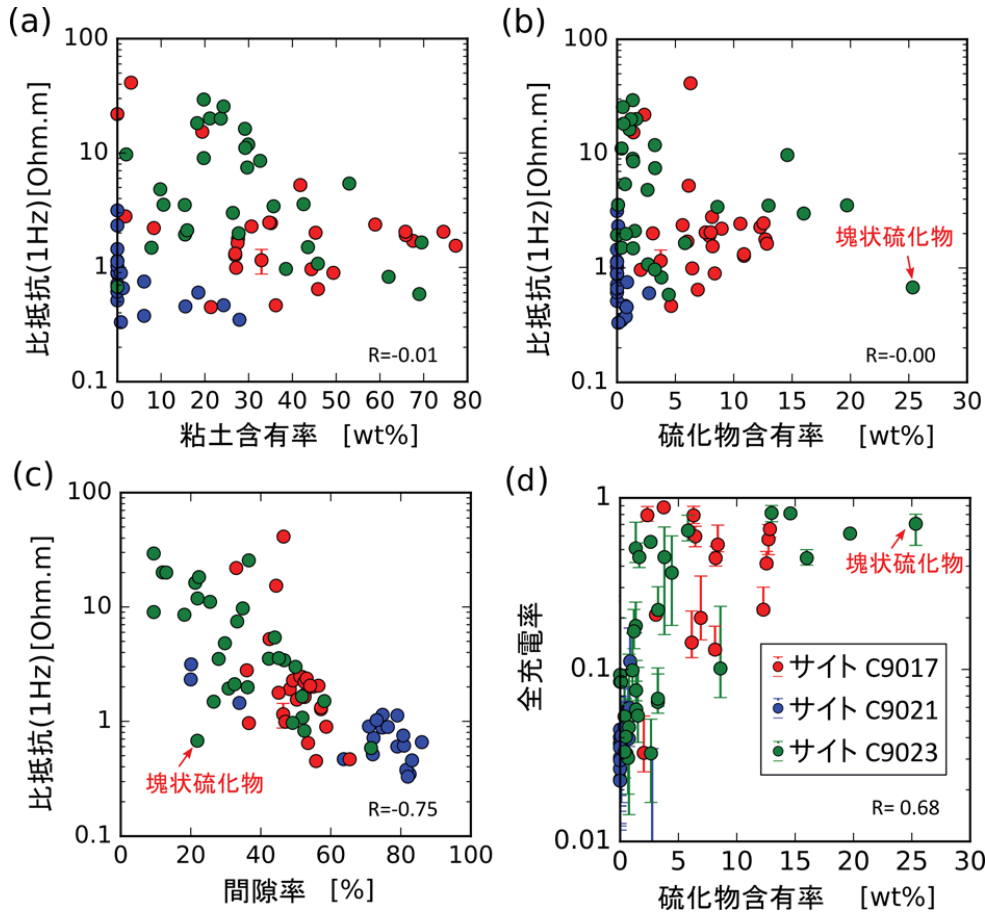
第19図 掘削試料の比抵抗・スペクトルIP特性の鉛直プロファイル (Komori *et al.*, 2017aから抜粋の上、一部改変)。間隙率、粘土含有率、硫化物含有率の鉛直プロファイルとともに示している。(a)サイトC9017。(b)サイトC9021。(c)サイトC9023。比抵抗(1 Hz)は間隙率と負の相関が見られる他、硫化物の多寡が位相差の大きさに明瞭に現れている。サイトC9017, C9023では、細粒硫化物を含有した熱水堆積物が典型的であり、高周波領域に位相差のピークを持つ。一部に見られた粗粒硫化物・塊状硫化物では、低周波領域に位相差のピークを持つことが特徴的である。

Fig. 19 Results of resistivity and IP measurements, compared with porosity, clay content, and sulfide content. English version of the figure, detailed explanation and discussion are shown in Komori *et al.* (2017a; Fig. 3).



第20図 Cole-Coleモデルに基づいたパラメータ解析によるIPパラメータ(直流比抵抗, 充電率, Cole-Cole指数, 時定数)の鉛直プロファイル(Komori *et al.*, 2017aから抜粋の上, 一部改変). 硫化物含有率と充電率には明瞭な正の相関が見られる.

Fig. 20 Results of IP parameter estimation for (a) Site C9017, (b) Site C9021, and (c) site C9023. English version of the figure, detailed explanation and discussion are shown in Komori *et al.* (2017a; Fig. 4).



第21図 比抵抗(1 Hz)及び全充電率と粘土含有率、硫化物含有率、間隙率とのクロスプロット (Komori *et al.*, 2017aから抜粋の上、一部改変)。Rは相関係数を表す。(a) – (c)より、比抵抗は粘土鉱物・硫化物含有率よりも間隙率と強い相関を有することが分かる。(e)より、全充電率は硫化物含有率に敏感に反応することが明瞭である。塊状硫化物は、低い空隙率・高い硫化物含有率・高い全充電率を持つのが特徴である。

Fig. 21 Comparison between resistivity, (a) clay content, (b) sulfide content, and (c) porosity, and comparison between total chargeability and sulfide content. English version of the figure, detailed explanation and discussion are shown in Komori *et al.* (2017a; Fig. 5).

中の硫化物の多くが鉱染状であったことも調和的である。

第21図に示される比抵抗・IP特性計測結果と間隙率・粘土鉱物量・硫化物量との相関関係は、間隙流体の連続性と塊状硫化物鉱床の両方が比抵抗の低下に重要な役割を果たしていることを示唆する。一般に比抵抗は、流体の連続性(connectivity: 間隙率の関数)、流体の性質(塩濃度、温度)、粘土鉱物の表面伝導度及び粘土鉱物と硫化物粒子の存在による容量的性質の複合的な要素に支配される(Wong, 1979; Revil *et al.*, 1998, 2015a; Zisser *et al.*, 2010)。船上研究の結果によると、間隙水はほぼ中性で海水程度の塩濃度であるため(Kumagai *et al.*, 2017)、間隙流体は低比抵抗を呈する。粘土鉱物はカオリナイトを除いて高い陽イオン交換容量をもつため(Revil *et al.*,

1998)、その表面電導率は高塩濃度下であってもバルク比抵抗の低下に寄与する可能性がある。掘削コアの変質粘土は主としてイライト、緑泥石及びカオリナイトから構成される(注: サイトC9017の一部でスメクタイトが確認されている)ものの、第21図a, cに示されるように、比抵抗は粘土鉱物量の変化よりも間隙率の変化により敏感である。このことから、流体の連続性がバルク比抵抗を支配する主要因であり、粘土鉱物による比抵抗変化は二次的な要因であることが考えられる。一方、高い硫化物含有量を有する塊状硫化物は低い空隙率であるにも関わらず、比較的低い比抵抗を示す(第21図b, c中の塊状硫化物)。このことは、大きな硫化物粒はピーク周波数が低く、1 Hzにおいてもまだ導電的性質が優勢なためと考えられる(第18図緑丸)。

特に、活発な熱水活動を伴う海域での資源調査における比抵抗値の解釈の際には、熱水の影響に対する注意が必要であり、電磁気及び直流比抵抗調査は硫化物鉱床のみならず、高温の熱水溜まりをも低比抵抗異常として検出する可能性がある。本研究地域のような海底熱水系においては、350°Cを超える温度の熱水によって塩水(流体)の比抵抗は室温に比べて2桁程度、容易に減少し得る(例えば、Ussher *et al.*, 2000)。掘削地点のひとつである伊平屋北海丘においては311°Cの熱水が観察されているし(Kawagucci *et al.*, 2013)、掘削同時検層(概要は斎藤, 2016参照)においても、船上の測定値よりも1桁程度低い比抵抗値が得られている(小森・正木, 2016; Kumagai *et al.*, 2017)。これらのサイトでは掘削後に掘削孔からの熱水の噴出が認められていることから、掘削同時検層時に測定された低い比抵抗値は、熱水の温度の影響によるものであることが示唆される。

本研究で得られた比抵抗・IP特性の鉛直プロファイルのデータは、海底熱水鉱床における海底物理探査データの妥当性検討や定量的解釈等への利活用が今後期待される。特に本研究においては、全充電率が硫化物含有量に極めて敏感であることが示されている(第21図d)。同様の結果は本SIPプログラムにおける伊是名海穴の掘削結果でも得られつつあり(小森ほか, 2018)、IP調査が陸域と同様に硫化物鉱体を効果的に検出可能であることを示唆する。特に、塊状硫化物のIP特性は、低周波数領域側に顕著な位相差異常を生ずるため、低周波数の交流電流送信及び電位計測(周波数領域での計測)、あるいは直流電流の長時間印加・遮断による電位差の過渡応答計測(時間領域での計測)が塊状硫化物鉱体の識別に有効である可能性がある。海底IP探査技術は現時点で開発途上の段階にあるが、本研究により得られた知見は、本技術の開発において装置スペックの選定に貢献する他、調査手法に重要なガイドラインをもたらし、結果として調査コストの低減につながることを期待される。一方、高温条件はスペクトルIP特性を変化させ得るため、高温の熱水系においてIP効果による信頼性の高い調査手法の開発のためには、その温度依存性に関する更なる検討が必要である。

## 5. おわりに：実用化にむけた現状と今後の課題

本論は、SIP「次世代海洋資源調査技術」を通じて得られたGSJの5カ年の研究開発結果を総括したものである。GSJが参画したテーマである、「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」は、その名の通り科学研究を主体とした研究開発であり、その成果の意義は第1に専門学術雑誌への掲載によって評価される。この点において、GSJでは2014年7月に最初の「ちきゅう」掘削が実施され、2016年12月に最後の掘削航海が行われて以降、2018年までにこれらの航海の資試料を

用いた3編の筆頭論文を国際誌に公表したほか、査読付き国内誌への関連する報告等についても5編を公表しており、当初の目標を十分に達成したといえる。しかしながら、これらの専門に特化した学術論文では本プログラムあるいは本研究開発テーマ全体との関連や意義が見えにくいことから、本論ではこれらの点について、実用化に向けた“魔の川”を渡る橋渡しに貢献すべく、解説を試みた。一方で、本論で紹介した目的基礎研究としての成果はシーズ段階であり、依然その実用化までには距離があるのが現実である。

いずれの手法についても、今後、実海域での検証とその結果からのフィードバックによる精度や内容の高度化が不可欠である。第4.1節で示した、地質情報に基づいた絞り込み手法自体は既存のデータを用いて机上で実施可能ではあるものの、その検証は実海域での調査によって行なうほかなく、その際には予想が外れるという大きなリスクも孕んでいる。他の手法については、すでに鉱徴の得られている海域においてデータや知見を拡充するとともに、有効性を検証することが考えられるが、いずれにしても実海域における調査が不可欠である。これらの検証作業は本SIPプログラムのテーマの一つである、「統合海洋資源調査システムの実証」において、民間企業を主体とする調査の一環としても実施されたが、これは様々な個別手法を組み合わせた調査システムの全体の実証を主要な目的とするものであった。今後、我が国がこの分野でイノベーションをリードしていくためには、本SIPプログラム終了後も継続的な高効率調査技術の研究開発の努力が必要であると思われ、そのためにも個々の調査手法・科学的知見の地道な検証や高度化が求められる。今後、研究開発における“死の谷”を越え実用化に至るためには、依然、科学研究による下支えのもと、産官学が連携して研究開発に取り組んでいくことが必要であると考えられる。

**謝辞：**本研究は、SIP「次世代海洋資源調査技術」(管理法人：国立研究開発法人海洋研究開発機構)によって実施された。研究開発の実施にあたっては、浦辺徹郎プログラムディレクター、石井正一プログラムディレクター代行、木川栄一成因研究テーマリーダーをはじめとする、内閣府、管理法人及びSIP関係者の方々、経済産業省 資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課ならびに関係府省庁に、ご指導・ご支援頂いた。また、府省連携プロジェクトの実施にあたり、産総研地質調査総合センター 研究戦略部 研究企画室の伊藤順一・荒井晃作・藤原 治・森田澄人、歴代企画室長ならびに高橋美紀・実松健造・井川怜欧・片山泰樹・森本和也、歴代担当企画主幹ほか、産総研イノベーション推進本部 知的財産・標準化推進部及び産官学・国際連携推進部の担当諸氏、産総研つくば第七事業所研究業務推進室の大内美和主査、地質情報

研究部門事務室の宮本浩江さんほかの研究業務支援担当の方々には、多大なるご支援を頂いた。紙面の都合上全ての方々を挙げることはできないが、本プログラムの成因研究テーマにおける共同研究の実施に際しては、地球深部探査船「ちきゅう」の船長をはじめとする乗組員及び研究支援員の方々ならびに共同首席研究者及び乗船研究者の方々、海洋研究開発機構の鈴木勝彦・熊谷英憲博士、国立大学法人九州大学の石橋純一郎博士をはじめとする共同研究者の方々にお世話になった。地質調査総合センター地圏資源環境研究部門の高木哲一上級主任研究員及び匿名の査読者、川辺能成担当編集委員による迅速な査読及び的確なコメントにより本稿は改善された。また、地質調査研究報告編集委員会には本論の早期の公表にむけ、尽力頂いた。以上の方々を含む本プログラムに関わった全ての方々に対し、著者らが代表しお礼申し上げます。

## 文 献

- Alt, J. C. (1995) Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems. In Humphris, S., Zierenberg, R.A., Mullineaux, L.S. and Thomson, R.E. eds., *Seafloor Hydrothermal Systems*, Geophys. Monogr. **91**, AGU, Washington, D.C., 85–114.
- 荒井晃作・下田 玄・池原 研(2013) 沖縄海域の海洋地質調査-海底鉱物資源開発に利用できる国土の基盤情報の整備-. *Synthesiology*, **6**, 162–169.
- Arai, R., Kodaira, S., Yuka, K., Takahashi, T., Miura, S. and Kaneda, Y. (2017) Crustal structure of the southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano, and potential mantle accretion in the continental back-arc basin. *Jour. Geophys. Res.*, Solid Earth **122**, 622–641.
- Ardia, P., Giordano, D. and Schmidt, M. W. (2008) A model for the viscosity of rhyolite as a function of H<sub>2</sub>O-content and pressure: A calibration based on centrifuge piston cylinder experiments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 6103–6123.
- Bach, W. and Humphris, S. E. (1999) Relationship between the Sr and O isotope compositions of hydrothermal fluids and the spreading and magma-supply rates at oceanic spreading centers. *Geol.*, **27**, 1067–1070.
- Barrie, C. T. and Hannington, M. D. (1999) Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host rock composition. *Rev. Econ. Geol.*, **8**, 2–12.
- Beard, J. S. and Lofgren, G. E. (1991) Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6. 9 kb. *Jour. Petrol.*, **32**, 365–401.
- Berndt, M. E., Seyfried, W. E. J. and Beck, J. W. (1988) Hydrothermal alteration processes at midocean ridges: Experimental and theoretical constraints from Ca and Sr exchange reactions and Sr isotopic ratios. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 4573–4583.
- Bindeman, I., Gurenko, A., Carley, T., Miller, T., Martin, E. and Sigmarsson, O. (2012) Silicic magma petrogenesis in Iceland by remelting of hydrothermally altered crust based on oxygen isotope diversity and disequilibria between zircon and magma with implications for MORB. *Terra Nova*, **24**, 227–232.
- Bosch, D., Jamais, M., Boudier, F., Nicolas, A., Dautria, J.-M. and Agrinier, P. (2004) Deep and High-temperature Hydrothermal Circulation in the Oman Ophiolite-Petrological and Isotopic Evidence. *Jour. Petrol.*, **45**, 1181–1208.
- Carey, S., Houghton, B. F. and Thordarson, T. (2009) Abrupt shifts between wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano : microscopic evidence for macroscopic dynamics. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **20**, 256–270.
- Conrad, W. K., Nicholls, I. A. and Wall, V. J. (1988) Water-saturated and -undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kbar: Evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo volcanic zone, New Zealand, and other occurrences. *Jour. Petrol.*, **29**, 765–803.
- Coogan, L. A., Howard, K. A., Gillis, K. M., Bickle, M. J., Chapman, H., Boyce, A. J., Jenkin, G. R. T. and Wilson, R. N. (2006) Chemical and thermal constraints on focussed fluid flow in the lower oceanic crust. *Am. Jour. Sci.*, **306**, 389–427.
- Cooper, K. M. and Kent, A. J. R. (2014) Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. *Nature*, **506**, 480–483.
- Dias, C. A. (2000) Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks. *Geophys.*, **65**, 437–451.
- France, L., Koepke, J., Ildefonse, B., Cichy, S. B. and Deschamps, F. (2010) Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: experimental and natural observations. *Contrib. Min. Petrol.*, **160**, 683–704.
- Franklin, J. M., Sangster, D. M. and Lydon, J. W. (1981) Volcanic-associated massive sulfide deposits. *Econ. Geol.*, 75th Anniv. Vol., 485–627.
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R. and Galley, A. G. (2005) Volcanogenic massive sulfide deposits. *Econ. Geol.*, 100th Anniv. Vol., 523–560.
- Fleck, R. J., Sutter, J. F. and Elliot, D. H. (1977) Interpretation of discordant <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age-spectra of Mesozoic tholeiites



- from Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 15–32.
- 藤岡換太郎 (2008) 海底鉱物資源調査-研究の動向と今後の課題-. 地質ニュース, no. 644, 64–64.
- Galley, A. G. and Koski, R. A. (1999) Setting and characteristics of ophiolite-hosted volcanogenic massive sulfide deposits. In Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings*. Reviews in Economic Geology, **8**, 215–236.
- Galley, A. G., Hannington, M. D. and Jonasson, I. R. (2007) Volcanogenic massive sulfide deposits. In Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 141–161.
- 下司信夫 (2016) 大規模火砕噴火と陥没カルデラ：その噴火準備と噴火過程. 火山, **61**, 101–118.
- Ghiorso, M. S. and Gualda, G. A. R. (2016) An H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS. *Contrib. Min. Petrol.*, **169**: 53, doi:10.1007/s00410-015-1141-8.
- Gibbon, D. L. and Wyllie, P. J. (1969) Experimental studies of igneous rock series: the Farrington Complex, North Carolina, and the Star Mountain Rhyolite, Texas. *Jour. Geol.*, **77**, 221–239.
- 後藤孝介・野崎達生・鈴木勝彦 (2017) 第Ⅲ章 11 節, コバルトリッチクラストの年代決定-オスミウム同位体層序に基づく形成年代の決定. 鈴木勝彦・白井朗 (編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 コバルトリッチクラストの成り立ち-調査手法の確立に向けて-, 46–47.
- Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V. and Carley, T. L. (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Jour. Petrol.*, **53**, 875–890.
- Guo, K., Zeng, Z.-G., Chen, S., Zhang, Y.-X., Qi, H.-Y. and Ma, Y. (2017) The influence of a subduction component on magmatism in the Okinawa Trough: Evidence from thorium and related trace element ratios. *Jour. Asian Earth Sci.*, **145**, 205–216.
- Halbach, P., Nakamura, K.-I., Wahsner, M., Lange, J., Sakai, H., Käselitz, L., Hansen, R.-D., Yamano, M., Post, J., Prause, B., Seifert, R., Michaelis, W., Teichmann, F., Kinoshita, M., Märten, A., Ishibashi, J., Czerwinski, S. and Blum, N. (1989) Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, **338**, 496–499.
- Halbach, P., Pracejus, B. and Marten, A. (1993) Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa Trough, Japan. *Econ. Geol.*, **88**, 2210–2225.
- 菱田 元・大岡 隆・縫部保徳 (2005) 金属鉱物資源探査技術の開発と適用. 資源と素材, **121**, 310–317.
- Honma, H., Kusakabe, M., Kagami, H., Iizumi, S., Sakai, H., Kodama, Y., Kimura, M. (1991) Major and trace elements chemistry and D/H, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd ratios of rocks from the spreading center of the Okinawa Trough, a marginal back-arc basin. *Geochem. Jour.*, **25**, 121–136.
- Huang, P., Li, A., Hu, N., Fu, Y. and Ma, Z. (2006) Isotopic feature and uranium dating of the volcanic rocks in the Okinawa Trough. *Sci. China, Ser. D, Earth Sci.*, **49**, 375–383.
- Huston, D. L., Relvas, J. M. R. S., Gemmill, J. B. and Driberg, S. (2011) The role of granites in volcanic-hosted massive sulphide ore-forming systems: an assessment of magmatic–hydrothermal contributions. *Min. Deposita*, **46**, 473–507.
- Iizasa, K. (1993) Petrographic investigations of seafloor sediments from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, **112**, 271–290.
- Iizasa, K., Fiske, R. S., Ishizuka, O., Yuasa, M., Hashimoto, J., Ishibashi, J., Naka, J., Horii, Y., Fujiwara, Y., Imai, A. and Koyama, S. (1999) A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science*, **283**, 975–977.
- 池原 研・山崎 徹 (2016) 第Ⅲ章 1 節 地質情報にもとづいて有望海域を絞り込む-海洋資源調査の基礎データとしての海底地形・海洋地質情報とその利活用. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹 (編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち-調査手法の確立に向けて-, 33–34.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1995) 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "igneous rock series". *Geostand. Newsl.*, **19**, 135–213.
- 井上卓彦 (2016) 第Ⅲ章 3 節 海底表層の地質条件から海底熱水循環系を把握する-曳航式探査装置を用いた海底微地形による熱水活動域の特定. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹 (編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち-調

- 査手法の確立に向けて-, 37–38.
- Ishibashi, J. and Urabe, T. (1995) Hydrothermal activity related to arc-back-arc magmatism in the western Pacific. In Taylor, B. F., ed., *Back arc basins: Tectonics and Magmatism*. Plenum Press, New York, 451–495.
- Ishibashi, J.-i, Ikegami, F., Tsuji, T. and Urabe T. (2015) Hydrothermal Activity in the Okinawa Trough Back-Arc Basin: Geological Background and Hydrothermal Mineralization. In Ishibashi, J.-i., Okino, K. and Sunamura, M. eds., *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*, Springer, Berlin, 337–359.
- Ishizuka, O., Hickey-Vargas, R., Arculus, R. J., Yogodzinski, G. M., Savov, I. P., Kusano, Y., McCarthy, A., Brandl, P. A. and Sudo, M. (2018) Age of Izu–Bonin–Mariana arc basement. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **481**, 80–90.
- Johannes, W. and Holtz, F. (1991) Formation and ascent of granitic magmas. *Geologische Rundschau*, **80**, 225–231.
- Johannes, W. and Holtz, F. (1996) *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Springer, Berlin, 335p.
- Kamenetsky, V. S., Binns, R. A., Gemmell, J. B., Crawford, A. J., Mernagh, T. P., Maas, R. and Steele, D. (2001) Parental basaltic melts and fluids in eastern Manus backarc basin; implications for hydrothermal mineralisation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 685–702
- 笠谷貴史 (2016) 第Ⅲ章4節 物理探査で海底下鉱床を探す—自然電位, 電気・電磁探査法を組み合わせた調査手法の確立. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて-, 39–40.
- Kasaya, T., Machiyama, H., Kitada, K. and Nakamura, K. (2015) Trial exploration for hydrothermal activity using acoustic measurements at the North Iheya Knoll. *Geochem. Jour.*, **49**, 597–602.
- Kawada, Y. and Kasaya, T. (2017) Marine self-potential survey for exploring seafloor hydrothermal ore deposits. *Scientific Rep.*, **7**: 13552, doi:10.1038/s41598-017-13920-0.
- Kawagucci, S., Miyazaki, J., Nakajima, R., Nozaki, T., Takaya, Y., Kato, Y., Shibuya, T., Konno, U., Nakaguchi, Y., Hatada, K., Hirayama, H., Fujikura, K., Furushima, Y., Yamamoto, H., Watsuji, T., Ishibashi, J. and Takai, K. (2013) Post-drilling changes in fluid discharge, mineral deposition patterns and fluid chemistry for the seafloor hydrothermal activity in the Iheya-North hydrothermal field, Okinawa Trough. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**:4774–4990. doi:10.1002/ggge.20283.
- Kent, A. J. R., Darr, C., Koleszar, A. M., Salisbury, M. J. and Cooper, K. M. (2010) Preferential eruption of andesitic magmas through recharge filtering. *Nature Geosci.*, **3**, 631–636.
- 木川栄一(編) (2017) SIP『次世代海洋資源調査技術』(海のジバング計画)海底熱水鉱床の調査技術プロトコル. 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 横須賀, 64p.
- 木村政昭・Wang, Y.・八木秀憲 (1999) 琉球弧海域の海底地質構造および発達史. 地質ニュース, no. 543, 24–38.
- Kitada, K., Wu, H.-Y., Miyazaki, J., Akiyama, K., Nozaki, T., Ishibashi, J., Kumagai, H., Maeda, L. and the CK16-01 shipboard scientific party (2016) First results from the in-situ temperature measurements by the newly developed downhole tool during the drilling cruise in the hydrothermal fields of the mid-Okinawa Trough. 2016 AGU Fall Meeting, OS41C-1977.
- 小森省吾・正木裕香 (2016) 第Ⅲ章7節 掘削試料の電気特性が捉える海底熱水鉱床—比抵抗・IP特性の船上計測システムの開発・適用とその成果. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて-, 47–48.
- 小森省吾・大田優介・正木裕香・谷川 亘・鳥本淳司・楨尾雅人・前田玲奈・石橋純一郎・野崎達生・熊谷英憲・CK16-01乗船者一同(2016) 沖縄県沖海底熱水域における掘削試料の比抵抗・IP特性(ちきゅうCK16-01航海). 公益社団法人物理探査学会学術講演会講演論文集, 135, 197–199.
- 小森省吾・正木裕香・谷川 亘・鳥本淳司・大田優介・楨尾雅人・前田玲奈・石橋純一郎・野崎達生・熊谷英憲・多田井 修・CK16-01乗船者一同(2017) 掘削試料の比抵抗・IP特性から見る沖縄県伊平屋北海丘および野甫サイト熱水域(ちきゅうCK16-01航海). JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SCG71-17.
- Komori, S., Masaki, Y., Tanikawa, W., Torimoto, J., Ohta, Y., Makio, M., Meda, L., Ishibashi, J., Nozaki, T., Tadai, O. and Kumagai, H. (2017a) Depth profiles of resistivity and spectral IP for active modern submarine hydrothermal deposits: a case study from the Iheya North Knoll and the Iheya Minor Ridge in Okinawa Trough, Japan. *Earth Planet. Space*, **69**:114, doi: 10.1186/s40623-017-0691-6.
- Komori, S., Masaki, Y., Tanikawa, W., Torimoto, J., Ohta, Y., Makio, M., Maeda, L., Ishibashi, J., Nozaki, T., Tadai,

- O. and Kumagai, H. (2017b) A case study on resistivity and spectral IP properties of active modern seafloor hydrothermal deposits in Japan. 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, doi: 10.3997/2214-4609.201702096.
- 小森省吾・正木裕香・鳥本淳司・齋藤誠史, Kakda Kret・南出 奏・大野正夫・山本浩文・Iona McIntosh・谷川 亘・野崎達生・熊谷英憲・石橋純一郎・前田玲奈・CK16-05乗船者一同(2018)伊是名海穴, 海底熱水鉍床試料の電気物性: ちきゅう掘削CK16-05. 資源地質学会第68回年会学術講演会講演要旨集, 28.
- Komori, S., Masaki, Y., Tanikawa, W., Torimoto, J., Ohta, Y., Makio, M., Maeda, L., Ishibashi, J.-I., Nozaki, T., Tada, O., Kumagai, H. and CK16-01 onboard members (2018) Resistivity and Induced Polarization characteristics of sediments from modern submarine hydrothermal system in Okinawa Trough, Japan (CHIKYU CK16-01 cruise). 13<sup>th</sup> SEGJ International Symposium, Abstracts.
- 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, Urushima. *Geochem. Geophys. Geosys.* **11**, doi:10.1029/2010GC003337.
- 熊谷英憲・高井 研・久保雄介・齋藤実篤・野崎達生・山本啓之・山崎 徹・鈴木勝彦・CK14-04航海乗船者一同(2015) SIP「次世代海洋資源調査技術」成因研究としての伊平屋北海丘掘削. 日本地球惑星連合連合大会2015年大会, SCG64-01.
- 熊谷英憲・野崎達生・石橋純一郎・前田玲奈・CK16-01航海乗船者一同(2016a) CK16-01航海速報: 伊平屋北海丘および伊平屋小海嶺における科学掘削—掘削同時検層とモニタリング装置の設置. 日本地球惑星連合連合大会2016年大会, SCG59-18.
- 熊谷英憲・野崎達生・石橋純一郎・齋藤実篤・山崎 徹・前田玲奈・CK16-01乗船者一同(2016b) CK16-01航海における掘削同時検層と採取コア概報. 資源地質学会第66回年会学術講演会講演要旨集, 40.
- 熊谷英憲・石橋純一郎・野崎達生・前田玲奈・山田泰広・猿橋具和・許 正憲・CK16-05乗船者一同(2017) CK16-05航海速報: 伊是名海穴および伊平屋小海嶺における科学掘削—コア採取、地熱ツール検層とモニタリング装置の設置. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SCG71-13.
- Kumagai, H., Nozaki, T., Ishibashi, J.-i., Maeda, L. and CK16-01 on-board member (2017) Cruise Report SIP-HOT II "Explorer" (SIP-Hydrothermal deposit in Okinawa Trough) CK16-01 (Exp.908), JAMSTEC, Yokosuka, 443p.
- Kumagai, H., Nozaki, T., Ishibashi, J.-I., Ikehara, K., Yamada, Y., Kitada, K., Sanada, Y., Masaki, Y., Komori, S., Takaya, Y., Yamasaki, T., Nagase, T., Maeda, L. and On-board member of CK16-05 cruise (2018) A correlation between logging and drilled cores at Izena Hole: CK16-05 D/V *Chikyu* drilling. JpGU Meeting 2018, SCG61-10.
- 熊谷英憲・野崎達生・石橋純一郎・池原 研・山田泰広・北田数也・真田佳典・正木裕香・小森省吾・高谷雄太郎・山崎 徹・長瀬敏郎・前田玲奈・CK16-05航海乗船者一同(2018)伊是名海穴「次世代海洋資源調査技術」掘削コアの再検討にもとづいた対比. 資源地質学会第68回年会学術講演会講演要旨集, 27.
- Lanphere, M. A. and Baadsgaard, H. (2001) Precise K-Ar, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, Rb-Sr, and U-Pb mineral ages from the 27.5 Ma Fish Canyon Tuff reference standard. *Chem. Geol.*, **175**, 653–671.
- Le Maitre, R. W., ed. (2002) *Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms, 2nd ed.* Cambridge Univ. Press., Cambridge, 236p.
- Lee, C. S., Shor, G. G. Jr., Bibee, L. D., Lu, R. S. and Hilde, T. W. C. (1980) Okinawa Trough: origin of a back-arc basin. *Mar. Geol.*, **35**, 219–241.
- Letouzey, J. and Kimura M. (1985) Okinawa Trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent. *Mar. Petrol. Geol.*, **2**, 111–130.
- Letouzey, J. and Kimura, M. (1986) The Okinawa Trough: genesis of a backarc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics.*, **125**, 209–230.
- Lowell, R.P., Seewald, J.S., Metaxas, A. and Perfit, M.R. (2008) Modelling seafloor hydrothermal processes: magma to microbe—An overview. In Lowell, R. P., Seewald, J. S., Metaxas, A. and Perfit, M. R. eds., *Magma to Microbe*. Geophys. Monogr. Ser. **178**, AGU, Washington, D.C., 1–13.
- Martin, R. F. and Piwinski, A. J. (1972) Magmatism and tectonic settings. *Jour. Geophys. Res.*, **77**, 4966–4975.
- 正木裕香・谷川 亘・小森省吾・鳥本淳司・榎尾雅人・大田雄介・濱田洋平・野崎達生・石橋純一郎・熊谷英憲・CK16-01 Leg2 乗船者一同(2016)ちきゅう(CK16-01)航海における沖縄海底熱水域掘削試料の船上物性測定. 日本地質学会第123年学術大会講演要旨, 296.
- Masaki, Y., Tanikawa, W., Komori, S., Torimoto, J., Makio, M., Ohta, Y., Nozaki, T., Ishibashi, J., Kumagai, H., Maeda, L. and Hamada, Y. (2016) Results of Physical Property Measurements Obtained during the CHIKYU Cruise CK16-01 to Hydrothermal Fields of the Central Okinawa Trough. 2016 AGU Fall Meeting, OS41C-1972.
- Masaki, Y., Komori, S., Saitoh, M., Kret, K., Minamide, K., Ohno, M., Yamamoto, H., McIntosh, I., Tanikawa, W.,

- Nozaki, T., Kumagai, H., Ishibashi, J., Maeda, L. and CK16-05 on board member (2017) Results of physical property measurements obtained during the CHIKYU cruise CK16-05 of hydrothermal fields at the middle Okinawa Trough. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SCG71-P01.
- Mysen, B. (2014) Water-melt interaction in hydrous magmatic systems at high temperature and pressure. *Progress Earth Planet. Sci.*, 2014, 1:4
- 内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当) (2018) 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) 研究開発計画. 内閣府, 43p.
- Nakamura, K., Kawaguchi, 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. *Geochem. Jour.*, 49, 579–596.
- Nicolas, A., Mainprice, D. and Boudier, F. (2003) High temperature seawater circulation through the lower crust of ocean-ridges—a model derived from the Oman ophiolites. *Jour. Geophys. Res.*, 108(B8):2371, doi:10.1029/2002JB002094.
- 野崎達生・高谷雄太郎・山崎 徹・戸塚修平・堤 彩紀・石橋純一郎・高井 研・熊谷英憲・川口慎介・宮崎淳一・正木裕香・久保雄介・鈴木勝彦・CK14-04 航海乗船者一同(2015a) 沖縄トラフ掘削コア試料の岩相・構成鉱物及び全岩化学組成. ブルーアース 2015, BE15-26.
- 野崎達生・高谷雄太郎・山崎 徹・戸塚修平・堤 彩紀・石橋純一郎・高井 研・熊谷英憲・川口慎介・宮崎淳一・正木裕香・久保雄介・鈴木勝彦・CK14-04 航海乗船者一同(2015b) CK14-04 航海において採取された沖縄トラフ掘削コア試料の岩相・構成鉱物及び全岩化学組成. 日本地球惑星連合 連合大会2015年大会, SCG64-03.
- 野崎達生・高谷雄太郎・山崎 徹・戸塚修平・堤 彩紀・石橋純一郎・高井 研・熊谷英憲・斎藤実篤・川口慎介・宮崎淳一・正木裕香・久保雄介・鈴木勝彦・CK14-04 航海乗船者一同(2015c) CK14-04 航海から採取された沖縄トラフ掘削コア試料の岩相・構成鉱物及び全岩化学組成. 資源地質学会第65回年会学術講演会講演要旨集, 37.
- 野崎達生・高谷雄太郎・山崎 徹・戸塚修平・堤 彩紀・石橋純一郎・高井 研・熊谷英憲・斎藤実篤・川口慎介・宮崎淳一・正木裕香・久保雄介・鈴木勝彦・CK14-04 航海乗船者一同(2015d) CK14-04 航海において採取された沖縄トラフ掘削コア試料の岩相・構成鉱物・全岩化学組成およびLWDとの比較. 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会, 海底拡大/収束と海底資源の形成過程 -InterRidge-Japan 研究集会-講演要旨集.
- 野崎達生・石橋純一郎・熊谷英憲・前田玲奈・CK16-01 航海乗船者一同(2016) CK16-01 航海速報: コアリング, 現場温度計および地熱検層ツールを用いた伊平屋北海丘および野甫サイトにおける科学掘削. 日本地球惑星連合 連合大会2016年大会, SCG59-18.
- Nozaki, T., Takaya, Y., Nagase, T., Yamasaki, T., Ishibashi, J.-I., Kumagai, H., Maeda, L. and CK16-05 Cruise Members (2018) Subseafloor mineralization at the Izena Hole, Okinawa Trough from the aspect of drill cores obtained by the CK16-05 Cruise (Exp. 909). Goldschmidt2018 Abstracts.
- 野崎達生・熊谷英憲・石橋純一郎・池原 研・山田泰広・北田数也・真田佳典・正木裕香・小森省吾・高谷雄太郎・山崎 徹・長瀬敏郎・前田玲奈・CK16-05 航海乗船者一同(2018) CK16-05 航海 (Exp. 909) 伊是名海穴掘削コア試料の岩相ユニット区分および地震波探査との照合. 日本地質学会第125年学術大会(札幌)講演要旨集, 182.
- Patinō Douce, A. E. and Johnston, A. D. (1991) Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contrib. Min. Petrol.*, 107, 202–218.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R. and Nelson, P. H. (1978) Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophys.*, 43, 588–609.
- Piercey, S. J. (2011) The setting, style, and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits. *Min. Deposita*, 46, 449–471.
- Piwinskii, A. J. (1968) Experimental studies of igneous rock series Central Sierra Nevada Batholith, California. *Jour. Geol.*, 76, 548–570.
- Rampino, M. R. and Self, S. (1992) Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature*, 359, 50–52.
- Revil, A., Cathles, L. M. III, Losh, S. and Nunn, J. A. (1998) Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications. *Jour. Geophys. Res.*, 103, 23925–23936.
- Revil, A., Florsch, N. and Mao, D. (2015a) Induced polarization response of porous media with metallic particles—part 1: a theory for disseminated semiconductors. *Geophys.*, 80, D525–D538.
- Revil, A., Aal, G. Z. A., Atekwana, E. A., Mao, D. and Florsch, N. (2015b) Induced polarization response of porous

- media with metallic particles—part 2: comparison with a broad database of experimental data. *Geophys.*, **80**, D539–D552.
- Richet, P., Lejeune, A.-M., Holtz, F., and Roux, J. (1996) Water and the viscosity of andesite melts. *Chem. Geol.*, **128**, 185–197.
- 斎藤実篤(2016) 掘削同時検層(LWD)により資源濃集層を特定する—物理検層で地質層序を迅速に多点で把握し高効率コア採取を行なう手法の開発. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて—, 41–42.
- 斎藤実篤・濱田洋平・辻 健・白石和也・Hsiung Kan-Hsi・Eng Chandoeun・吉本佳太・木戸ゆかり・真田佳典・熊谷英憲・野崎達生・石橋純一郎・前田玲奈・CK16-01乗船者一同(2016) 沖縄トラフ熱水活動域における科学掘削: CK16-01掘削同時検層速報. 日本地球惑星連合 連合大会2016年大会, MIS16-03.
- 真田佳典・山田泰広・北田数也・野崎達生・熊谷英憲・石橋純一郎・前田玲奈・CK16-05乗船者一同(2017) . 沖縄伊是名海穴の海底熱水鉱床における自然ガンマ線と温度と圧力検層データの考察. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, MIS22-P02.
- Shanks, W. C. P. III and Thurston, R. eds. (2012) *Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model*. USGS Sci Invest Rep 2010–5070–C, 345p.
- 志賀美英(2003) 鉱物資源論. 九州大学出版会, 福岡, 289p.
- Shinjo, R. and Kato, Y. (2000) Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin. *Lithos*, **54**, 117–137.
- Shinjo, R., Chung, S.-L., Kato, Y. and Kumura, M. (1999) Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 10591–10608.
- Sibuet, J.-C., Hsu, S.-K., Shyu, C.-T. and Liu, C.-S. (1995) Structural and kinematic evolution of the Okinawa Trough backarc basin. In Taylor, B. ed., *Backarc Basins Tectonics and Magmatism*. Plenum, New York, 343–378.
- Sibuet, J.-C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J.-P., Hilde, T. W. C., Kimura, M., Ling-Yun, C., Marsset, B., Muller, C. and Stephan, J.-F. (1987) Back-arc extension in the Okinawa Trough. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 14041–14063.
- Sibuet, J.-C., Deffontaines, B., Hsu, S.-K., Thureau, N., Le Formal, J.-P., Liu, C.-S. and ACT party (1998) Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 30245–30267.
- Slejko, F. F., Petrini, R., Orsi, G., Piochi, M. and Forte, C. (2004) Water speciation and Sr isotopic exchange during water-melt interaction: a combined NMR-TIMS study on the Cretaceous Tephra (Ischia Island, south Italy). *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **133**, 311–320.
- Spooner, E. T. C., Chapman, H. J. and Smewing, J. D. (1977) Strontium isotopic contamination and oxidation during ocean floor hydrothermal metamorphism of the ophiolitic rocks of the Troodos Massif, Cyprus. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 873–890.
- Sun, S.-S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.* **42**, 313–345.
- 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著) (2016) 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて—, 60p.
- Takai, K., Mottl, M. J., Nielsen, S. H. and the Expedition 331 Scientists (2011) Proceedings of IODP, 331: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.331.2011.
- Takai, K., Mottl, M. J., Nielson, S. H. and the IODP Expedition 331 Scientists (2012) IODP Expedition 331 finds enormous hydrothermally altered lithostratigraphy comparable to typical Kuroko deposits and chemically stratified hydrothermal fluid reservoir, and points to possible existence of functionally active microbial communities beneath the Iheya North hydrothermal system, the Okinawa Trough. *Scientific Drilling*, **13**, 19–27.
- 高井 研・熊谷英憲・久保雄介・斎藤実篤・野崎達生・山本啓之・山崎 徹・鈴木勝彦・CK14-04乗船者一同(2015) 潜頭性熱水鉱床成因論にむけた海底下熱水系の「ちきゅう」掘削の試み～CK14-04 SIP HOT I “Pathfinder”の概要～, ブルーアース2015, BE15-25.
- Takai, K., Kumagai, H., Kubo, Y. and CK1404 on-board member (2015) Cruise Report SIP-HOT I “Pathfinder” (SIP-Hydrothermal deposit in Okinawa Trough) CK14-04 (Exp. 907), JAMSTEC, Yokosuka, 116p.
- 土岐知弘・布浦拓郎・眞壁明子・松井洋平・川口慎介・齋藤誠史・加藤真悟・中川 聡・田角栄二・平井美穂・石橋純一郎・CK16-01乗船者一同(2016) CK16-01航海において伊平屋北海丘及び伊平屋小海嶺から

- 採取した間隙水の化学組成. 日本地球化学会年會要旨集, doi:10.14862/geochemproc.63.0\_13.
- 土岐知弘・大竹 翼・石橋純一郎・松井洋平・加藤大和・淵田茂司・宮原玲奈・堤 映日・中村峻介・川喜田竜平・宇座大貴・上原 力・新城竜一・野崎達生・熊谷英憲・前田玲奈・CK16-05 乗船研究者一同(2017)伊是名海穴海底熱水系から採取した間隙水の化学組成. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SCG71-P02.
- Tornos, F., Peter, J. M., Allen, R. and Conde, C. (2015) Controls on the siting and style of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geol. Rev.*, **68**, 142–163.
- Tsuji, T., Takai, K., Oiwane, H., Nakamura, Y., Masaki, Y., Kumagai, H., Kinoshita, M., Yamamoto, F., Okano, T. and Kuramoto, S. (2012) Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa trough based on seismic reflection data. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **213–214**, 41–50.
- 上田哲士・岡本信行(2015)日本周辺海域に分布する海底熱水鉱床の開発プロジェクトの概要. *Journal of MMIJ*, **131**, 610–613.
- 浦辺徹郎・鈴木勝彦(2017) 1. 調査技術プロトコルの概要とその目的. 木川栄一(編) SIP『次世代海洋資源調査技術』(海のジバング計画)海底熱水鉱床の調査技術プロトコル. 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 横須賀, 5–12.
- 浦辺徹郎・飯笹幸吉・石橋純一郎(2009)最先端の地球科学の方向と鉱物資源探査への応用(その1) –Modern Analogyとしての海底熱水鉱床–. *資源地質*, **59**, 443–72.
- Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R. and Anderson, E. (2000) Understanding resistivities observed in geothermal systems. *In Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*.
- Vielzeuf, D. and Holloway, J. R. (1988) Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. *Contrib. Min. Petrol.*, **98**, 257–276.
- Wang, X., Zhang, Q. and Zhou, G. (2007) National-scale geochemical mapping projects in China. *Geostand. Geoanal. Res.*, **31**, 311–320.
- Weinberg, R. F. and Hasalová, P. (2015) Water-fluxed melting of the continental crust: A review. *Lithos*, **212–215**, 158–188.
- Wong, J. (1979) An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophys.*, **44**, 1245–1265.
- Yamasaki, T. (2014) XRF major element analyses of silicate rocks using 1:10 dilution ratio glass bead and a synthetically extended calibration curve method. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **65**, 97–103.
- 山崎 徹(2015) CK14-04掘削コアの火成岩岩石学的特徴. 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会, 海底拡大/収束と海底資源の形成過程 -InterRidge-Japan 研究集会-講演要旨集.
- Yamasaki, T. (2015) Petrology and Geochemistry of Hydrothermally Altered Volcanic Rocks in the Iheya North Hydrothermal Field, Middle Okinawa Trough. 2015 AGU Fall Meeting, OS43A-2027.
- Yamasaki, T. (2016a) Hydrothermal alteration and sulfide mineralization of silicic volcanogenic rocks from Iheya North Knoll, middle Okinawa Trough. Joint International Conference MINERALS OF THE OCEAN-8 & DEEP-SEA MINERALS AND MINING-5 Abstracts, 211.
- Yamasaki, T. (2016b) Identifying geochemical signatures associated with seafloor massive sulfide mineralization at Iheya North Knoll, middle Okinawa Trough. UMC2016 (Underwater Mining Conference 2016) Abstracts.
- 山崎 徹(2016a) 第三章8節 火山体の形成過程から鉱液形成プロセスを考える–火成岩基盤岩類の成因的検討に基づいた水–岩石反応への示唆. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち–調査手法の確立に向けて–, 49–50.
- 山崎 徹(2016b) 第三章6節 海底表層の堆積物から海底下の鉱体を探す–表層堆積物の微量元素組成に基づいた鉱微調査法の開発. 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著), 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち–調査手法の確立に向けて–, 45–46.
- Yamasaki, T. (2017a) Petrography and whole-rock major and trace element analyses of igneous rocks from Iheya North Knoll, middle Okinawa Trough, SIP Expedition CK14-04 (Exp 907). *Jour., Geol., Soc., Japan*, **123**, 23–29.
- Yamasaki, T. (2017b) The role of bimodal magmatism and its products in volcanogenic massive sulfide ore-forming systems: a case study from the middle Okinawa Trough, Japan. 46th Underwater Mining Conference (UMC2017) Abstracts.
- Yamasaki, T. (2017c) Morphological features and lithostratigraphic assemblages of igneous rocks associated with modern seafloor massive sulfide ore deposits: a case study from the Okinawa Trough, Japan. 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans, U.S.A.
- Yamasaki, T. (2018a). Identification of geochemical signatures

- associated with seafloor massive sulfide mineralization at the Iheya North Knoll, middle Okinawa Trough. *Jour. Geochem. Expl.*, **188**, 55–72.
- Yamasaki, T. (2018b) The role of bimodal magmatism in seafloor massive sulfide (SMS) ore-forming systems at the middle Okinawa Trough, Japan. *Ocean Sci. Jour.*, **53**, 413–436.
- Yamasaki, T. (2018c) Petrologic and tectonic mechanisms for the formation of submarine calderas in the Okinawa Trough: implications for large on-land silicic magma systems. AGU Chapman Conference Abstracts.
- Yamasaki, T. (2018d) Geological background of the SMS formation: a case study from the Okinawa Trough back-arc basin. Pew Seabed Mining Workshop “Deep Sea Mining Best Practices: Current Developments and Future Possibilities” .
- Yamasaki, T. (2018e) Contamination from mortars and mills during laboratory crushing and pulverizing. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **69**, 201–210.
- Yamasaki, T. (2018f) Significance of bimodal magmatism in seafloor massive sulfide (SMS) ore-forming systems in the middle Okinawa Trough, Japan. Goldschmidt2018 Abstracts.
- Yamasaki, T. (2018g) Tectono-magmatic controls for seafloor massive sulfide deposit (SMS) formation in a back-arc setting; a clue to exploration. Underwater Mining Conference (UMC) 2018 Abstracts.
- Yamasaki, T. (2018h) Tectono-magmatic controls for seafloor massive sulfide deposit formation: a case study from the Okinawa Trough back-arc basin. Marine Minerals: A New Resource for the 21st Century, Abstracts.
- 山崎 徹・池原 研(2014)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」に対する産総研の成因研究への取り組み. *GSJ地質ニュース*, **3**, 346–349.
- 山崎 徹・池原 研(2017) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2016年度成果と今後の取り組み. *GSJ地質ニュース*, **6**, 190–194.
- Yamasaki, T. and Yamashita, K. (2016) Whole rock multiple trace element analyses using fused glass bead by laser ablation-ICP-MS. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **67**, 27–40.
- 山崎 徹・池原 研・後藤孝介・井上卓彦(2015) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015年度の取り組み. *GSJ地質ニュース*, **4**, 191–195.
- Yamasaki, T., Yamashita, K., Ogasawara, M. and Saito, G. (2015) Multiple trace element analyses for silicate minerals and glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Bull. Geol. Surv. Japan*, **66**, 179–197.
- 山崎 徹・池原 研・石塚 治・井上卓彦(2016) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015年度の成果と今後の取り組み. *GSJ地質ニュース*, **5**, 251–255.
- Yamasaki, T., Takaya, Y., Mukae, N., Nagase, T., Tindell, T., Totsuka, S., Uno, Y., Yonezu, K., Nozaki, T., Ishibashi, J., Kumagai, H., Maeda, L. and CK16-01 (Exp. 908) Shipboard Scientist (2016) Drilling constraints on bimodal volcanism and subsequent formation of contrasted uppermost crustal compositions at the middle Okinawa Trough. 2016 AGU Fall Meeting, OS41C-1973.
- Yang, K. and Scott, S. D. (1996) Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, **383**, 420–423.
- Yang, K. and Scott, S. D. (2002) Magmatic degassing of volatiles and ore metals into a hydrothermal system on the modern sea floor of the eastern Manus back-arc basin, western Pacific. *Econ. Geol.*, **97**, 1079–1100.
- Yardley, B. W. D. and Barber, J. P. (1991) Melting reactions in the Connemara Schists: the role of water infiltration in the formation of amphibolite facies migmatites. *Am. Min.*, **76**, 848–856.
- Zeng, Z., Yu, S., Yin, X., Wang, X., Zhang, G., Wang, X. and Chen, D. (2009) Element enrichment and U-series isotopic characteristics of the hydrothermal sulfides at Jade site in the Okinawa Trough. *Sci. China, Ser. D-Earth Sci.*, **52**, 913–924.
- Zeng, Z., Yu, S., Wang, X., Fu, Y., Yin, X., Zhang, G., Wang, X. and Chen, S. (2010) Geochemical and isotopic characteristics of volcanic rocks from the northern East China Sea shelf margin and the Okinawa Trough. *Acta Oceanol. Sin.*, **29**, 48–61.
- Zisser, N., Kemna, A. and Nover, G. (2010) Dependence of spectral-induced polarization response of sandstone on temperature and its relevance to permeability estimation. *Jour. Geophys. Res.*, **115**:B09214. doi:10.1029/2010JB007526.

( 受付：2018年9月27日； 受理：2018年10月29日 )  
 ( 早期公開：2018年11月19日 )

