

SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の成果

山崎 徹¹⁾・小森省吾²⁾・池原 研¹⁾

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て、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す。SIPは、社会的に不可欠で、日本の経済・産業競争力にとって重要な課題とそのプログラムディレクター(PD)、そして予算を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組を産学官連携で、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するという特徴もっています。

産総研地質調査総合センター(GSJ)地質情報研究部門は、11課題のSIP第1期(2014年度～2018年度)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年度から参画しています。本論では、このSIPプログラムにおける海洋資源の成因研究に関するGSJの5カ年の成果を紹介します。

なお、本論の記述は、地質調査研究報告に掲載予定の山崎ほか(印刷中)を一般向けに要約したものです。本論における研究成果の解説にあたっては、GSJ地質ニュースの目的を鑑み、英文誌等に発表された学術論文の多くの引用を省略していますが、より詳しい議論や学術誌に掲載された論文の引用元は、山崎ほか(印刷中)に示されています。SIP施策全体及び「次世代海洋資源調査技術」全体に関する記述は、内閣府のウェブサイト^(注1)やパンフレットに公開されている資料に基づいています。本SIPプログラムに関しては、研究開発計画(内閣府政策統括官, 2018)に、より詳しい記述があります。また、本SIPプログラムに関するGSJの取り組み及びこれまでの進捗については、山崎・池原(2014, 2017)及び山崎ほか(2015, 2016)で紹介されています。

2. 「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)の概要

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、海底熱水噴出口を伴う塊状硫化物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ます。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す。

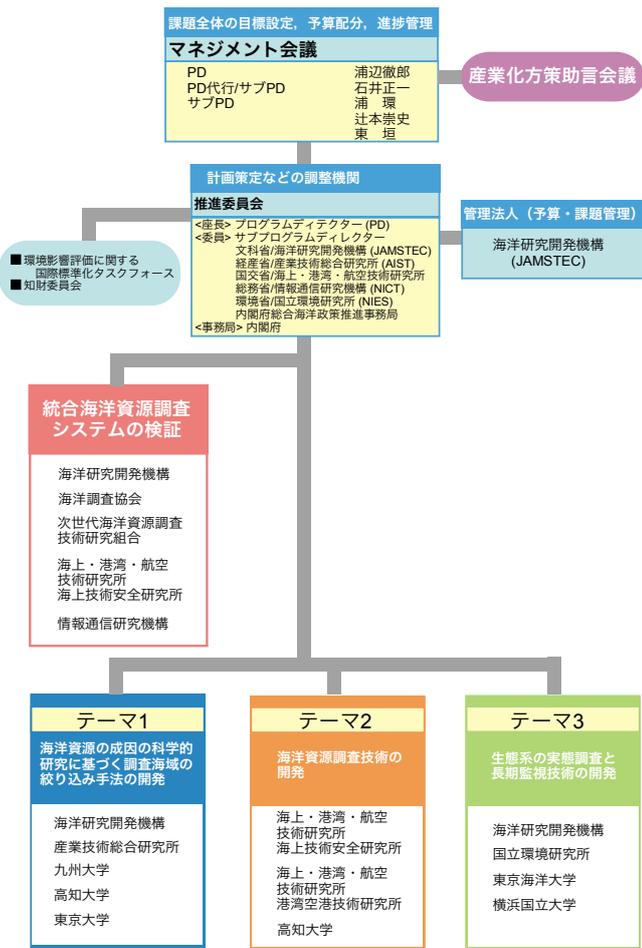
SIPプログラム「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)では、府省連携のもと、海洋鉱物資源を低コストかつ高効率で調査可能で、資源が眠る深海域において使用可能な技術を世界に先駆けて実現することを目標に研究開発に取り組んできました。そして、競争力のある技術を産官学一体で開発し、その技術ノウハウを民間企業に移転して海洋資源調査産業を創出すること、また、グローバルスタンダードを確立し、海外での調査案件受注など海外へ展開することを出口戦略と位置づけてきました。これらを実現するため、本SIPプログラムでは(1)海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発、(2)海洋資源調査技術の開発、そして(3)生態系の実態調査と長期監視技術の開発の3つの柱で研究開発をスタートし、2015年度からは、大学等を取り込んで海洋資源調査技術を産学官一体で開発することによって海洋調査産業の創出の加速化を図り、2016年度には本SIPプログラムのマネジメント体制を一新して、それらの大学等の公募事業を既存の研究課題と統合し、3つのテーマとしました。さらに、2017年度からは、海底熱水鉱床を対象として、技術移転を受ける民間企業が主体となって調査を行う、(4)統合海洋資源調査システムの実海域での開発・検証を事実上の4つ目のテーマとして、次世代海洋資源調査技術の確立を目指してきました(第1図)。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

2) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：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、海底鉱物資源、海洋地質

SIP「次世代海洋資源調査技術」の実施体制



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」web site (<https://www.jamstec.go.jp/sip/> 2018年8月23日確認)をもとに作成(山崎ほか, 印刷中より転載)。

GSJは、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ました。加えて、「(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)と連携し、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進めてきました。

3. 海底鉱物資源調査の概要・課題と産総研の取組みの全体像

海底鉱物資源調査の概要と課題を解説するために、まずは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

の概要を紹介します。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ます。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す。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なわれます。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、放射能探査等を行います。これらは鉱床胚胎と関係する地質構造把握を目的とし、広い範囲を対象とします。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/誘導分極法(Induced Polarization; IP法)電気探査(陸域探査ではしばしば強制分極法電気探査とも呼ばれます)等も行われます。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、狭い範囲を対象とします。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びます。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ります。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)も含まれます。

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、航空機やヘリコプターによる探査に相当する、船舶を用いた調査が実際にデータを得る概査としての最初のステップとなります。これらの調査では、船舶に搭載された地球物理学的調査機器を用いて、マルチビーム音響測深機等による地形調査や重力異常・磁気異常調査、エアガン等を用いた反射法・屈折法地震探査等が行なわれます。続く準精査では、手法的には概査と同じく音響による地形調査や重・磁力調査が行われますが、プラットフォームが自律型無人潜水機(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ります。さらに、精査においては、有

索式無人潜水艇 (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われ、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、掘削等による試料採取も平行して行われます。

我が国周辺の海底鉱物資源有望海域は数千 km² 規模であり、船舶や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 km² 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ません。例えば、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ませんが、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、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す^(註 2-3)。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す。このためには、現在の海洋底において、海底鉱物資源がどのような成因で、どのような地球科学的な位置づけの場所に形成されるのかを知る必要があります。また、その後のより詳細な調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仕様を決定することが重要です。海底鉱物資源調査の概査であ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、船舶の利用に多額のコストを要するという問題があります。続く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ります。したがって、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ります。

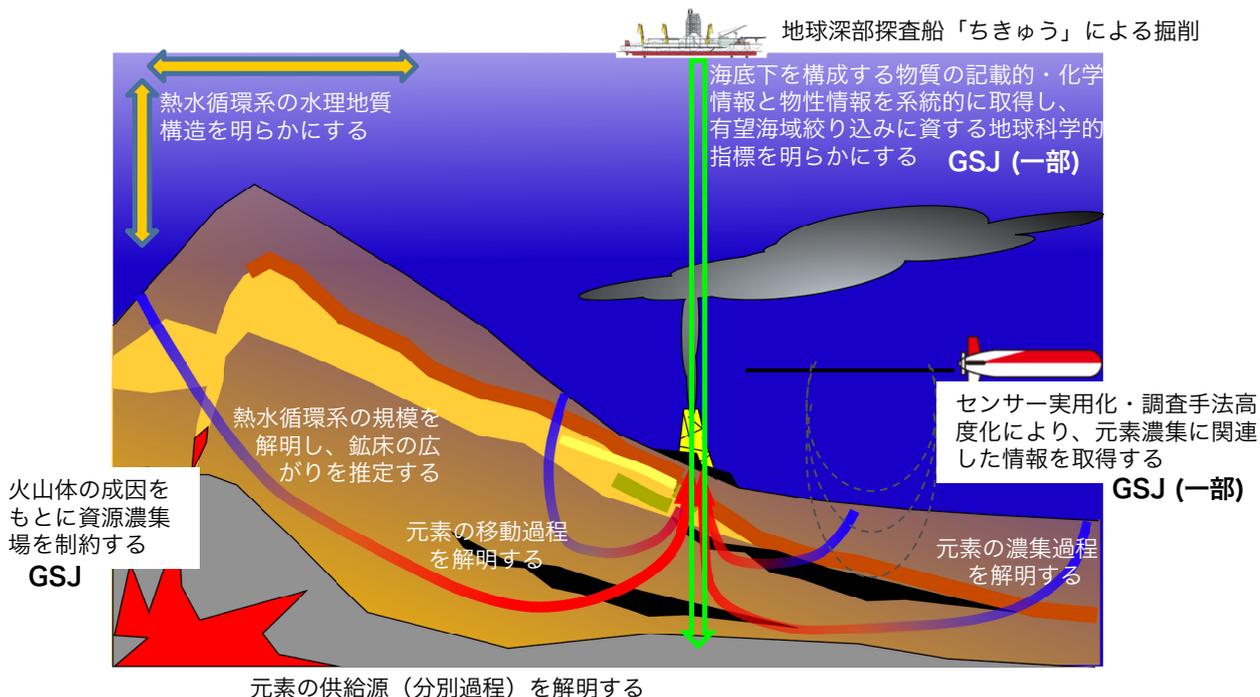
そこで、SIP 成因研究では、海底鉱物資源の成因に関する科学研究を通じて、海底鉱物資源が、いつ・どこで・どのように形成した (形成される) のかを明らかにすることで成因モデルを構築し、それに基づいて有望海域絞り込みのための地球科学的指標を明らかにすることを目的に研究開発に取り組んできました。GSJ は我が国の「地質の調査」に関するナショナル・センターとしての役割を

担っており、過去 40 年以上にわたり日本周辺海域の海洋地質学的研究及びその成果としての海洋地質図の出版を行ってきました。海底鉱物資源に関しては、特にこの数年、沖縄周辺海域において活発な熱水活動域を複数域で発見し、多種類の金属を含む塊状硫化物等の採取に成功しています^(註 4-6)。そこで、GSJ では、海洋資源の成因に関する科学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、JAMSTEC や大学等と連携し、SIP 成因研究全体で一体となって研究開発を推進すると同時に、GSJ の強みとする部分については主たる分析・解析等を主導的に分担して実施してきました (第 2 図)。以下にその主要な研究開発成果を紹介します。なお、GSJ は海底鉱物資源に関する成因研究のうち、海底熱水鉱床とコバルトリッチクラストに関する研究開発に参画してきましたが、本 SIP プログラム全体として海底熱水鉱床に関する研究開発を重点化して進めてきたため、ここでは海底熱水鉱床に関してのみ紹介します。

4. GSJ の主要な研究開発成果

GSJ では、海底熱水鉱床の成因モデルの構築と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に対し、本 SIP プログラムのモデル海域として、地球深部探査船「ちきゅう」を用いて実施された沖縄トラフにおける 3 度の科学掘削航海の全てに乗船研究者として参画し、掘削コアの船上での記載・計測・分析・解析に従事するとともに、(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、及び (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進めてきました。このうち、「ちきゅう」による掘削航海については、山崎・池原 (2014, 2017) 及び山崎ほか (2016) にその概要と船上成果の速報が紹介されています。また、第 3 事業年度までの成果については、鈴木ほか (2016) として取りまとめています。

(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では、中部沖縄トラフで得られた掘削試料を用いて、主として火成岩岩石学的な観点からマグマの成因を検討することにより、マグマの発生機構と地殻の進化が資源の濃集とどのように関係しているのか、そしてそのような現象が生じる場にどのような特徴があるのかにつ



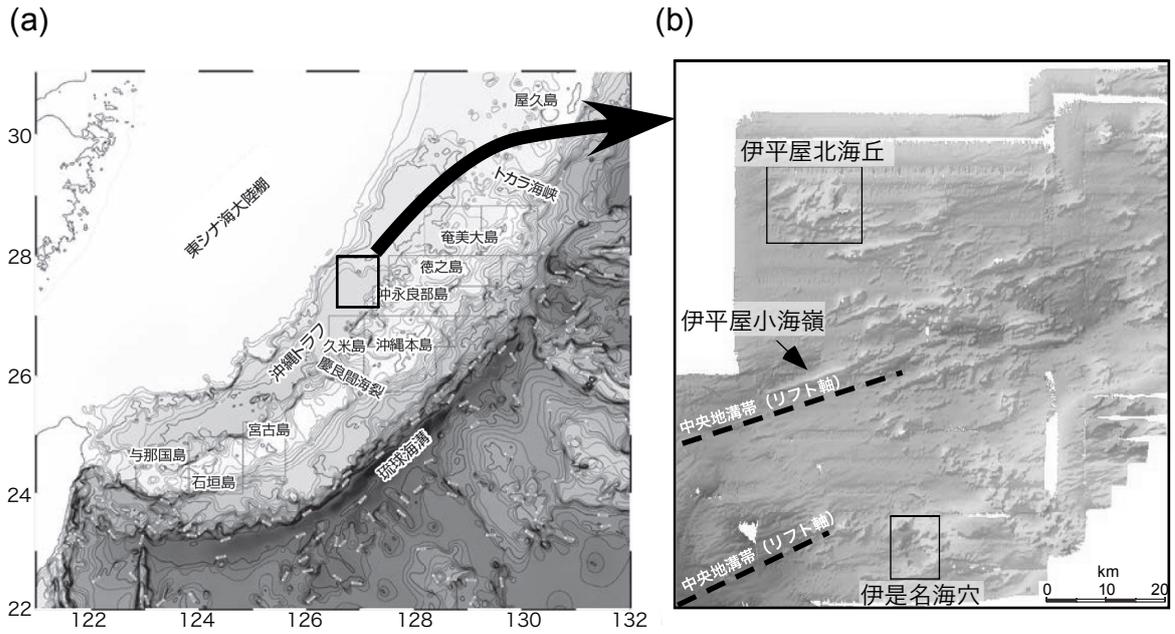
第2図 SIP「次世代海洋資源調査技術」, テーマ1「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」における, 海底熱水鉱床が形成される過程の模式的モデルと, 本SIPプログラムでの取組み. GSJの記述がある部分に関し, 産総研が研究開発を分担した. 鈴木ほか(2016)に一部加筆(山崎ほか, 印刷中より転載).

いて明らかにしました. 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ます. 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(第3図a), 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, 中部沖縄トラフの3つの異なる地形的特徴をもつ海域です. 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す(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ます.

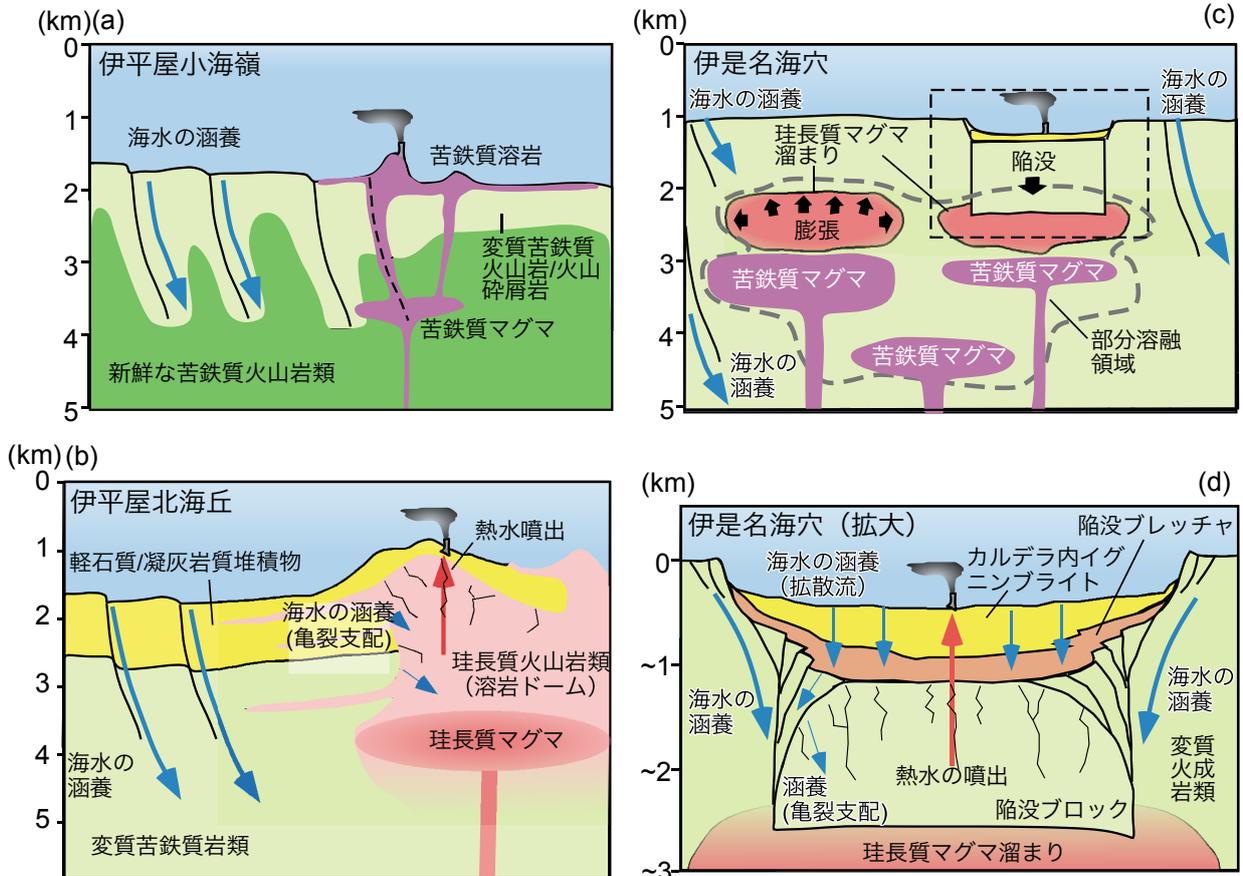
ここでは, 従来の研究や調査によって明らかとなっている, 以下のいくつかの謎を明らかにすることを手がかりに, その成因を検討しました. 1つ目は, 沖縄トラフの火山岩類が, 玄武岩質と流紋岩質の組成をもち, 中間の安山岩質組成を欠く点です(以下, 玄武岩質のことを苦鉄質, 流紋岩質のことを珪長質と記述します). このような火成活動をバイモダル火成活動と呼び, 一般に海陸のリフト帯に特徴的に産することが知られています. 2つ目に, 日本周辺海域の海底熱水鉱床はカルデラ状の海底地形に伴われることが多いのですが, これにどのような意味があるのか,

という点です. 3つ目は, 金属元素の起源についてです. 既存の研究成果等の情報によると, 沖縄トラフ海域には場所によって, 銅に富む鉱石と, 銅に乏しく鉛や亜鉛に富む鉱石とが産するケースがあり, この原因についてはよく分かっていません. そして4つ目は, 資源の濃集を引き起こしたと考えられる熱水循環を維持する熱源の問題です. 開発に必要な程度の大きさの鉱床が形成されるために必要な時間は正確には分かりませんが, 恐らく地質学的な時間スケールでの期間であると想定されます. 熱水循環は, 深海の極低温の海水によって, マグマ溜まりあるいは固結した火成岩を冷却するラジエーターのような役割を果たしており, 長期間の熱水循環が維持される場合には, 何らかの地質学的な条件が必要はらずです. これらはいずれもマグマ活動と密接に関連した問題であるため, マグマの成因の検討が鍵を握ると考えました.

本SIPプログラムの5カ年の間の様々な検討の結果, 全てを合理的に説明する以下のような仮説のモデルを得ることができました(第4図). まず, 1つ目のバイモダル火成活動の成因については, 地殻物質の含水部分溶解によって説明されます. これまで, SrやNd同位体比から苦鉄質岩と珪長質岩の起源が共通であると考えざるを得なかったことから, 珪長質マグマの成因は苦鉄質マグマの結



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。(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。山崎ほか（印刷中）より転載。原図の出典等は転載元を参照。



第4図 中部沖縄トラフにおける構造-火成-熱水活動の概念図(山崎ほか, 印刷中より転載。原図の出典と詳しい説明は転載元を参照)。

晶分化作用によって説明されてきました。しかし、Sr や Nd 同位体比の等しいバイモーダルな火成岩類の成因は、長期間の火成活動と熱水循環の過程で、早期に固結した苦鉄質岩自身が含水部分溶融することによっても説明可能です。このプロセスの初期段階は、第4図aの伊平屋小海嶺海域のモデルで説明されます。リフト軸付近の、最も地殻が薄くなっている部分では、苦鉄質のマグマが地下浅所まで到達し、リフティングに伴って形成された正断層系を通じて海底まで噴出します。苦鉄質マグマは粘性が低く、正断層に沿って海嶺あるいは山脈状の地形を形成します。この正断層系は、同時に熱水循環の海水が地下深部に導入される通路としての役割も果たし、断層に沿った部分から変質が進みます。海水による変質が進むと、間欠的に次々とやって来る苦鉄質マグマの熱で部分溶融が発生します。部分溶融で形成されるマグマは珪長質ですので、これにより、中間質(安山岩質)のマグマを欠く原因が合理的に説明可能です。そのような次々とやって来る苦鉄質マグマによって、珪長質マグマが発生している様子を第4図cに模式的に示しています。伊平屋北海丘は、基本的にそのような珪長質マグマを主体とする溶岩ドームで(第4図b)、伊是名海穴は珪長質マグマの噴火によって形成された陥没カルデラである(第4図c)と解釈されます。

珪長質マグマは玄武岩質マグマに比べて低温までマグマ(結晶とメルトの混合体)として存在可能です。したがって、部分溶融によって珪長質マグマが発生すると、間欠的な苦鉄質マグマの上昇によって次第にマグマ溜まりが大きくなり、また、再加熱されて長期間にわたってマグマ溜まりとして存在できるようになると想定されます。この珪長質マグマ溜まりが大きな熱容量をもつことが、4つ目の謎の答えであると考えられます。陥没カルデラの存在は、そのような大きな珪長質マグマ溜まりが存在したことの痕跡であり、長期間にわたり熱水循環系が存在したために海底熱水鉱床を伴うことも多いのだと思われまます。これが2つ目の謎の解答の一部です。

珪長質マグマは、伊平屋北海丘のような溶岩ドームを形成する場合と、伊是名海穴のような陥没カルデラを形成する場合とがあるものと考えられます(第4図b, c)。伊是名海穴において、珪長質マグマ溜まりのルーフ、あるいはカルデラの陥没ブロックは、単純化するならば伊平屋小海嶺のモデルで考えられたような変質苦鉄質岩で構成されていると想定されますので、この部分で熱水循環による水-岩石反応(熱水-岩石反応)が起きると、苦鉄質岩中の銅が熱水に溶け込み、銅に富み鉛や亜鉛に乏しい鉱床が形成されることが期待されます(第4図d)。一方、珪長質岩

は銅に乏しい一方で、鉛や亜鉛に富んでいますので、伊平屋北海丘のような、珪長質岩を母岩とする熱水循環系では、銅に乏しく鉛や亜鉛に富む鉱床が期待されます。これらが2~4つ目の謎を合理的に説明するメカニズムであると考えられます。

伊平屋小海嶺も伊是名海穴も、沖縄トラフのリフト軸付近に位置しており、広域的には琉球弧-海溝系の火山フロントとリフト軸とが収斂している海域(例えば、下司・石塚, 2007)ですので、巨大な珪長質マグマ溜まりの形成に必要な苦鉄質マグマの間欠的かつ浅所までの上昇が起きやすいことが長期にわたる熱水循環とそれによる大規模な鉱床の発達に重要である可能性が示唆されます。

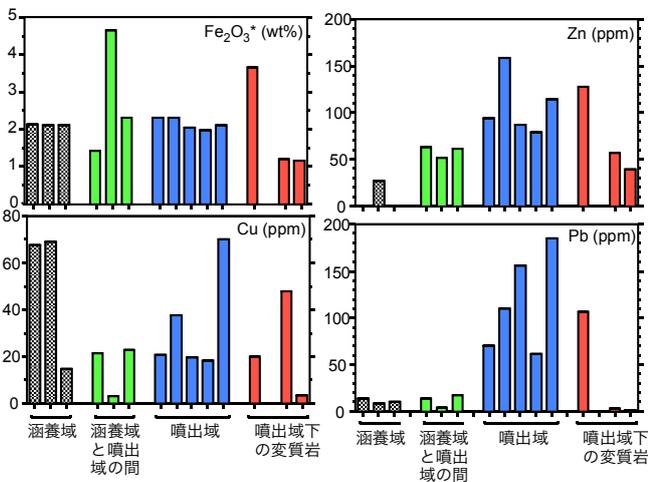
次に、(2)有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発については、掘削コアの化学的・物理的(電気的)特性の検討を通じて、地化学調査法の提案と、物理探査手法の高度化に資する地質試料の電気特性の解明を行いました。地化学調査は陸上の鉱床の探査において最も有効な調査技術のひとつ(例えば、小笠原, 2005)ですが、海域では主として系統的な化学分析のための試料を入手することが難しいことなどの理由から、有効な地化学調査法が提案されていませんでした。陸域の鉱床探査の場合、踏査等による変質帯の識別が極めて重要な意味をもちますが、同様の調査は海域においてはドレッジやROVによる観察、海底着座型掘削装置(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ります。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海域です。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)が広範囲に分布するため、伊平屋北海丘の海水の涵養域と噴出域の構成物との元素濃度の違いが識別できれば、海底面下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見いだすことができると期待されます。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ました。

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されることが期待されます。したがって、単純には、鉱液(熱水)にさらされた噴出域の軽石においては目的元素であるベースメタル

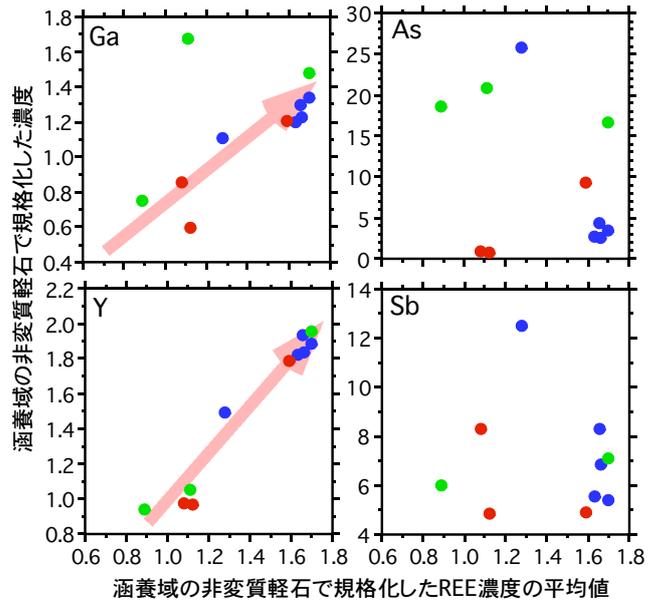
に富み、噴出域のチムニーから離れるに従って濃度が下がるという傾向が期待されます。しかしながら、実際の分析結果は、そのような単純な傾向は示さず(第5図)、鉍微域を絞り込むための指標としては使えません。これらの元素はマグマの分化においても鉍物とメルトとの分配によって濃度変化しますので、マグマの分化に伴う含有量の増減を識別しなければ、後生的な変質/鉍化に伴う増減が識別できないと考えられます。

様々な検討の結果、涵養域の試料の組成で規格化した希土類元素の平均値と、同様に涵養域の試料の組成で規格化した微量元素の関係によって両者が識別可能であることが明らかとなりました(第6図)。希土類元素は、高い電荷を持つ液相濃集元素で、変質によって動きにくい元素です。マグマの分化に伴って元素が増減した場合、希土類元素と規則的な相関をもつことが期待されます。第6図に示したGaやYは基本的にそのような傾向を示していると理解されます。一方、AsやSbはそのような規則的な挙動を示さず、GaやYよりも涵養域の試料の組成で規格化した微量元素が1桁高い値を示しています(第6図)。これらは、鉍液(熱水)によって、不均質に噴出域や中間域の軽石に付加されていることがX線マッピングで確認されました。これらの元素は鉍床(鉍石)を構成する主要な金属元素である目的元素ではないものの、鉍化作用に関連した何らかの副成分としての指示元素であると考えられ、今回の結果は、海底熱水鉍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ます。

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鉍床分布域の周辺には、一般に珪長



第5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。鉄や銅については、噴出域で富む傾向が認められない。山崎ほか(2018)を一部改変。



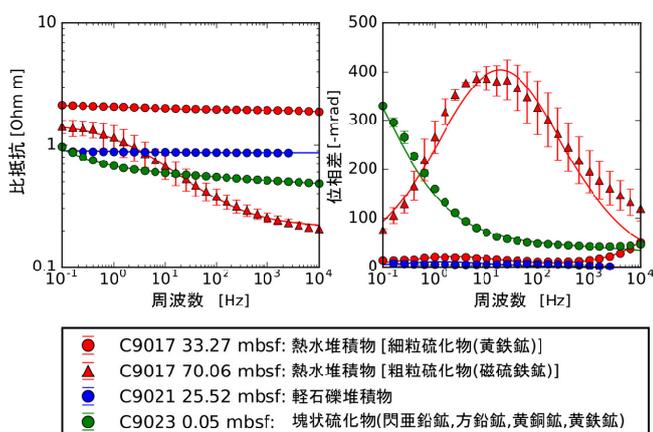
第6図 涵養域の軽石の組成で規格化した希土類元素濃度の平均値に対する各種元素の挙動。記号の色は第5図に対応。山崎ほか(印刷中)より抜粋の上、一部改変。

質の火山噴出物が分布しているため、この方法を用いた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ます。一般に大規模な鉍床はその鉍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、それらのうちの幾つかにおいて、伏在している鉍体を発見する確率も向上すると期待されます。この手法は、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、BMSを用いた掘削やROVによる試料採取に比べれば遥かに簡便、迅速で安価な、高効率の手法であるといえます。

最後に、物理探査手法の高度化に資する地質試料の電気特性の解明に関しては、準精査～精査段階での電気探査の精度向上に対して重要な知見を得ることができました。金属鉍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ため、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～精査段階での鉍微地の発見に有効であることが分かってきました。電気探査は陸上の鉍床探査においても一般的に用いられる手法ですが、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鉍床においては、構成岩石の物理的性質や置かれている環境が陸域とは

異なります。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ります。特に、海底熱水鉱床を構成する硫化物の多くは特有のIP効果が認められることが知られています。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す。既存の研究成果に基づくと、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ります。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といえます。そこで、本研究では、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、その支配要因を検討しました。

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が捉えられました。第7図は、各掘削サイトから得られた代表的な堆積物・岩石の比抵抗・位



第7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。赤丸：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む熱水堆積物。赤三角：伊平屋小海嶺で採取された粗粒の磁硫鉄鉱を含む熱水堆積物。青丸：伊平屋北海丘において代表的に見られた軽石礫堆積物。緑丸：伊平屋北海丘の海底面付近で採取された塊状硫化物。山崎ほか（印刷中）より引用。

相の周波数依存性について示したものです。硫化物を含む熱水堆積物・塊状硫化物は、硫化物に乏しい軽石質堆積物に対して相対的に高い位相差を有し、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ます。したがって、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ことが分かりました。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数側へシフトさせることが知られています。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ました。また、塊状硫化物においては、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特性が認められ、塊状硫化物のピーク周波数が、他の硫化物と比較して極めて低周波数側に存在することが分かりました。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における変数のうち、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ました。このうち、硫化物の量や鉱化作用は、SIP成因研究における主要な関心の一つであるため、特に充電率に着目して検討しました。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は、推定された充電率と硫化物量とに明らかな正の相関が認められることが分かりました。

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ます。船上比抵抗・IP特性計測と併せて測定された間隙率・粘土含有率・硫化物含有率との比較の結果、比抵抗(1Hz)は間隙率と負の相関を示したのに対し、粘土含有率・硫化物含有率との明瞭な相関性は認められませんでした。これより、流体の連続性がバルク比抵抗を支配する主要因であることが分かりました。また、バルク比抵抗と硫化物含有率が明瞭な相関性を示さなかったのは、本調査において採取された熱水堆積物に含まれている硫化物の殆どが細粒であり、位相差のピーク周波数が高いために、1Hz程度の低周波数領域で硫化物は絶縁体として振る舞うことが関係していると考えられます。一方、高い硫化物含有率を有する塊状硫化物は低い間隙率であるにも関わらず、比較的低い比抵抗を示しました。このことは、大きな硫化物粒は位相差のピーク周波数が低く、1Hzにおいてもまだ導電的性質が優勢なためと考えられます。

これらのことから、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ことが考えられます。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、容易に減少し得ます。掘削地点のひとつである伊平屋北海丘においては300°Cを超える温度の熱水が観察されているほか、掘削同時検層(概要は山崎・池原, 2014; 山崎ほか, 2016を参照)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ます。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ます。

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ます。特に本研究においては、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ました。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、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しています。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ります。海底IP探査技術は現時点で開発途上の段階ですが、本研究により得られた知見は、本技術において開発すべき装置の仕様決定に貢献する他、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事が期待されます。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と考えられます。

5. おわりに

本SIPプログラムは、GSJの有する海洋地質学的な知見・地質情報に関するこれまでの蓄積を活かし、科学的知見や目的基礎研究成果を、出口を見据えた調査機器開発や民間での調査技術開発に活かす「橋渡し研究」の一環といえます。本論で紹介した研究開発成果は、依然、シーズ段階で

あり、その実用化までには距離があるのが現実であり、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す。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、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ます。

脚注

- 注1: 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: エスアイビー) web site <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/> (2018/10/9確認)
- 注2: 例えば, InterRidge Vents Database Ver. 3.4 <https://vents-data.interridge.org> (2018/10/9確認)
- 注3: 例えば, IODP (International Ocean Discovery Program) のweb siteから過去の航海で得られたデータやサンプル, 航海の科学成果等へのアクセスが可能 <https://www.iodp.org> (2018/10/9確認)
- 注4: 沖縄県久米島西方海域に新たな海底熱水活動域を発見(2012年12月12日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20121212_3/pr20121212_3.html (2018/8/28確認)
- 注5: 鹿児島県徳之島西方海域に新たな火山活動域を発見(2013年9月9日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130909/pr20130909.html (2018/8/28確認)
- 注6: 沖縄県硫黄島周辺海域のごく浅海に海底火山を発見(2014年3月6日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140306/pr20140306.html (2018/8/28確認)

文 献

- 下司信夫・石塚 治(2007) 琉球弧の火山活動. 地質ニュース, no. 634, 6-9.
- 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. (<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>) (2018/8/28 確認)
- 小笠原正継(2005) 中国における地化学探査と地球化学図. 地質ニュース, no. 616, 12-19.
- 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著)(2016) SIP『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—. 国立研究開発法人海洋研究開発機構 次世代海洋資源調査技術プロジェクトチーム, 60p.
- 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.

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.

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.

山崎 徹・小森省吾・井上卓彦・石塚 治・池原 研 (印刷中) 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞込み手法の開発: 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. 地質調査研究報告.

YAMASAKI Toru, KOMORI Shogo and IKEHARA Ken (2018) GSJ's results of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Next-generation technology for ocean resources exploration".

(受付: 2018年8月28日)