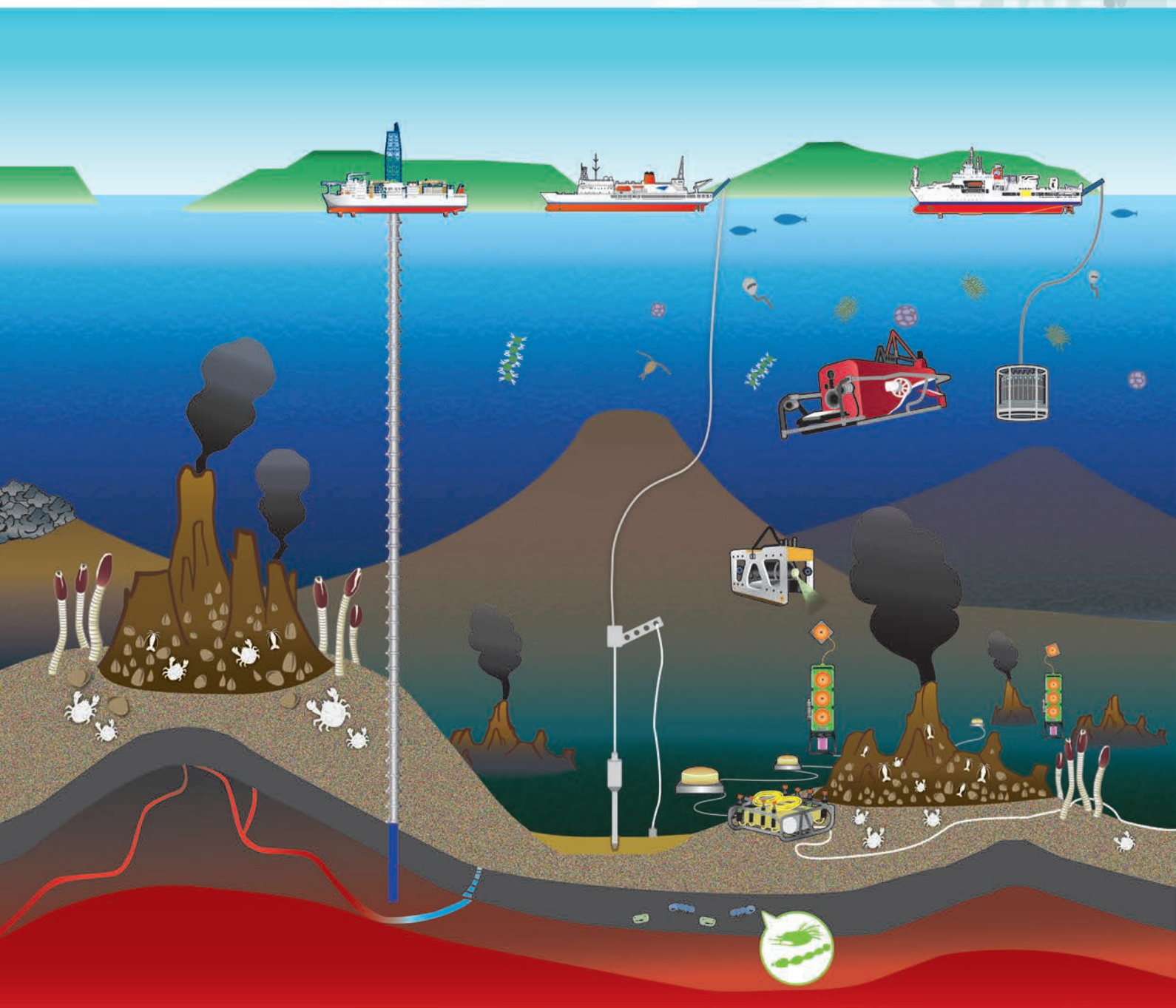


海底熱水鉱床の成り立ち

—調査手法の確立に向けて—



ご挨拶

本書は内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の採択課題である「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」の実施課題「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」の成果資料集です。

3章構成からなる本書は、第I章において、海のジパング計画および対象とする海底鉱物資源の概要について説明し、さらにメインターゲットである海底熱水鉱床について、その基礎、そして成因モデルから考察した有望海域の絞り込みについて概説しています。このことにより、第I章のみで本書のエッセンスが概観できるように工夫されております。

第II章、第III章においては、さらに調査手法、沖縄トラフ伊平屋北海丘、伊平屋小海嶺フィールドより得られた成因研究の成果について概説しています。一般の方にもわかりやすいように、なるべく平易な表現を心がけ、あまりに専門的な内容については、全体がわかるように詳細を省略するなどいたしました。扱っている内容は最先端の科学も含みますので、それでもわかりにくいところがあるかもしれません。そういった場合は、一度、二度と読み返していただければ幸いです。

海のジパング計画における研究開発は現在も継続しており、本書は、地球深部探査船「ちきゅう」がまさに沖縄トラフにおいて伊是名海穴を掘削している最中に書いています。従いまして今後も新たな知見が数多く得られることが確実に予想されるので、本書もその成果を取り入れながら改訂して参ります。

最新の成果に基づく海底熱水鉱床の実像について、その調査手法とともに本書を読まれる方々のご参考にならば幸甚に存じます。

国立研究開発法人海洋研究開発機構

本川 栄一

ご挨拶 2

第I章 『次世代海洋資源調査技術』と海底熱水鉱床の成因に関する 科学的研究の目的と概要 6

第I章 1節 『次世代海洋資源調査技術』とは何か 7

第I章 2節 海底鉱物資源とは何か 9

第I章 3節 海底熱水鉱床の成因に関する現状の理解 11

第I章 4節 有望海域の絞り込みに向けて-成因モデルの果たす役割 15

トピックス：成果の実用化にむけた民間企業等との連携 19

第II章 『次世代海洋資源調査技術』の目標像とこれまでの成果 20

第II章 1節 伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドの成因モデルの現状の理解と
今後の展開 21

第II章 2節 『次世代海洋資源調査技術』確立にむけた今後の取組みと
実用化にむけた課題 25

トピックス：地球深部探査船「ちきゅう」によるSIP掘削航海 29

第III章 調査手法・調査技術確立にむけた取組みとその狙い

-伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドにおけるこれまでの成因研究成果- 31

地形・地下構造調査にもとづく検討 32

第III章 1節 地質情報にもとづいて有望海域を絞込む

-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 33

第III章 2節 伊平屋北海丘の水理地質モデルを構築する

-地震探査と掘削データの統合に向けた解析手法の開発 35

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 37

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法の確立 39

第Ⅲ章 5節	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う 手法の開発 41	
	トピックス:北鹿黒鉱地域における成因研究課題合同現地討論会 43	
	岩石・堆積物試料の性質・成因解析にもとづく検討 44	
第Ⅲ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徴調査法の開発 45	
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 47	
第Ⅲ章 8節	火山体の形成過程から鉱液生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 49	
第Ⅲ章 9節	海底下地層構造を把握し鉱床形成メカニズムを解明する -掘削コア試料の記載・地球化学的分析/解析 51	
	トピックス:成果の国際的認知・情報収集の取り組み 53	
	熱水(流体)挙動の解明にもとづく検討 54	
第Ⅲ章 10節	海底下の熱水の動きを追跡する -熱水域堆積物中の間隙水化学組成の解析 55	
第Ⅲ章 11節	熱水同位体化学にもとづいて海底下水循環系の規模を推定する -海底下の水-堆積物相互作用に反映される多様な地質背景の検証と 熱水同位体化学データベースの構築 57	

第I章

『次世代海洋資源調査技術』と 海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究の目的と概要

SIP『次世代海洋資源調査技術』の研究開発項目のひとつである、「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞り込み手法の開発」では、試料採取・分析などを通じて、海底下の鉱物・鉱床の形成過程や濃集メカニズムを解明する海洋資源の成因モデルを構築し、有望海域の絞り込みに寄与する調査プロトコルを作成することを最終目標としています。この研究開発項目は、本SIPプログラムが発足した2014年度から第2事業年度の2015年度まで、「海洋資源の成因に関する科学的研究」という課題名で海底熱水鉱床・コバルトリッチクラスト・レアアース泥の科学的研究に基づいた成因モデルを構築することを目標に研究開発に取り組んできました。

本研究開発成果資料集は、海洋資源のうち、海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究の第3事業年度（2016年度）半ばまでの成果を取りまとめたものです。これらの成果は、本SIPプログラム発足当初の、成因モデルの構築に向けた取組みに基づくものです。そこで、本章の第1節では、まず本SIPプログラムの課題名である『次世代海洋資源調査技術』とは何かを概説した上で、その中で成因研究が果たす役割を説明します。第2節では本SIPプログラムで対象としている海洋資源である、金属鉱物資源とは何かを概説し、第3節では本研究開発のターゲットである海底熱水鉱床について概観した上で、最終節の第4節において、有望海域の絞り込みのためにまず成因の解明が必要な理由を概説します。



『次世代海洋資源調査技術』とは何か

はじめに

本節では、本SIPプログラムの目指す『次世代海洋資源調査技術』とは何なのか、「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」[内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）、2016]からの抜粋をもとに説明します。

プログラム全体の研究開発内容と目標・狙い

海洋鉱物資源を効率良く開発・利用するためには、科学的な成因論に基づいた絞り込みを実施し調査候補地を抽出したのち、段階的に調査を実施します。こうした調査の効率を従来よりも飛躍的に向上するためには、資源の分布・存在状態に関する科学的知見を踏まえ、船舶を用いた調査、自律型無人探査機（AUV）を用いた調査、ROVを用いた試料採取という流れで概査から精査へ有望海域を絞り込む効率的な調査システムを開発することが有効と考えられます。また、鉱物資源開発を実施するにあたっては、海洋環境保全の重要性に鑑み、開発時の生態系の変動を事前に予測するとともに、開発時を含めた周辺環境を長期間監視することが必要です。すなわち、海洋鉱物資源を開発・利用するための調査の効率を従来よりも飛躍的に向上させる技術、そして海洋環境保全の観点から開発時の生態系の変動を事前に予測するとともに、開発時を含めた周辺環境を長期間監視する技術、これらの総体が『次世代海洋資源調査技術』です。

この『次世代海洋資源調査技術』の実現にむけ、本SIPプログラムでは、(1) 海洋資源の成因の科学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) 生態調査・長期監視技術開発の三つの柱で研究開発を実施しています。そして、これまで関係省庁が推進してきた要素技術の研究開発を統合し、民間企業と協力して2018年度までに以下の目標を達成することを掲げています。

①技術的目標：1) 海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、レアアースを含む堆積物（レアアース泥）等の

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。特に熱水鉱床にエフォートを集中し、今まで発見するのが困難であった潜頭性鉱床の調査に有効な技術を開発すること。具体的には、有望海域を1万分の1に絞り込む手法と技術、水深2,000 mまでの高効率・低コストの調査が可能な調査機器の開発、海底下30 m以浅の潜頭性鉱床を発見する調査手法の構築を行います。この例として、海洋資源の成因モデルを確立して新たな有望海域の抽出に資する各種地球科学的指標を特定すること、AUVによる1日当たり調査可能な面積を約5倍以上に拡大することなどが挙げられます。2) 海岸付近の数十m程度の浅い海域でしか使用できなかった視界不良時の音響による可視化技術を海洋資源が存在する深海底でも使用可能にすること。3) 国際標準を満たす技術を導入して、民間企業でも容易に使用可能であり、どのような海域でも適用できる生態系変動予測手法を開発すること。

②産業面の目標：本課題により得られた新たな調査技術・手法を、探査サービス会社、探査機器製造会社、海洋エンジニアリング会社など、幅広く民間企業に移転することにより、2018年度までに、世界に打って出ることのできる海洋資源調査産業を創出すること。

③社会的な目標：グローバルスタンダードの確立により、日本の調査システムの輸出及び海外での調査案件の受注を目指すこと。

「海洋資源の成因の科学研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」の実施内容と最終目標

陸上調査に比べ備船費などのコストがかかる海洋資源の調査は、できる限りその軽減を図って効率良い（採算性の高い）調査システムの開発が必要です。我が国周辺の海洋鉱物資源の場合、広域地図で示されるような数十万km²規模から、鉱物資源が特に集中する有望海域の数十km²まで絞り込む必要があります。まず、広域海域から船舶や探査機が短期間で行動できる数万km²規模にまで海洋鉱物資源有望を絞り込むためには、地質学的・地球科学的根拠に基づいた手法を用

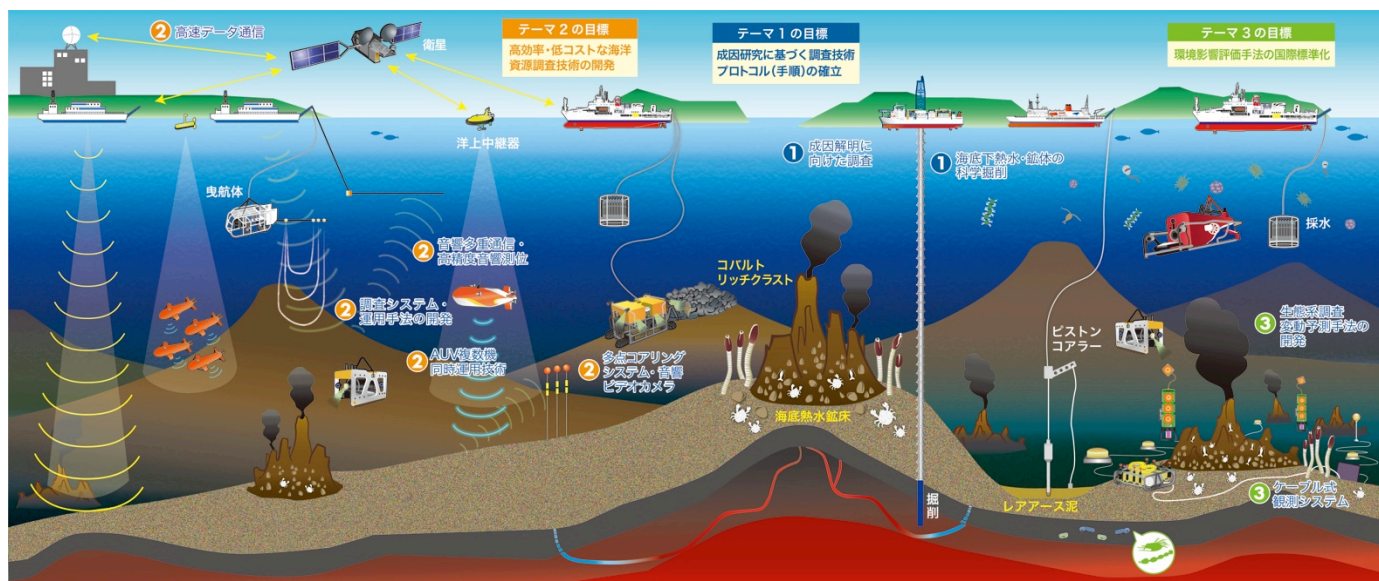


図 SIP『次世代海洋資源調査技術』実施項目全体像(SIP『次世代海洋資源調査技術』パンフレットより)。

いるほかに考えられません。それには、資源の形成過程や濃集メカニズムを把握し、それらの成因をモデル化することが必要となります。さらに、海洋鉱物資源有望海域付近の海底下構造等を効率よく予測するためには、掘削などの手段を用いて調査すべき特徴的な指標を検出し、海洋鉱物資源の特定を可能とするとともに、これらの手法による海域絞り込みの手法が民間企業でも使用されるべきです。そこで、現在商業化に向けた取り組みが実施されている海底熱水鉱床に最大の重点を置きつつ、開発を行っています。

海底熱水鉱床に係る開発では、沖縄海域・伊豆小笠原海域等において、採取試料の化学分析・同位体分析等による過去の熱水活動の変遷や有用元素濃集過程に関する科学研究を実施しています。特に、火成活動・熱水活動に伴う特異的な事象としての元素濃集・資源胚胎等の成因を検討するために、有用元素の非濃集域も含めて一連の火成活動全体及び造構場等を科学的根拠に基づき把握し、海底面調査と科学掘削の融合により3次元的な熱水化学組成の追跡、海洋底構成岩石の記載、同位体比分析、全岩化学組成分析等を実施します。加えて、これらの調査過程で鉱体の確認に有用性が見込まれる調査手法（電磁探査手法等）については、民間企業での活用に向けた技術移転を進めます。

これらの調査および試料分析により成因モデルを構築し、有望海域に特徴的かつ最適な調査の指標（取得すべきデータ項目等）を抽出します。さらに、それらの情報を統合して数十km²程度の範囲における資源分布予測図の作成手法を構築します。そのうえで、調査から図化までの一連の流れを民間企業でも使用しやすい潜頭性鉱床調査に有効な調査プロトコルとしてまとめます。

以上の取組みを踏まえた研究開発の最終目標は、調査海域を全海洋から約1/10,000の面積に限定し、潜頭性鉱床の調査に有効であり、低コスト・高効率な調査の実現に必要な民間企業でも活用可能な一連の手法を「調査プロトコル」としてまとめるとともに、探査機により取得されたデータにより海底下構造等の推定が可能となる成因モデルを構築することです。したがって、海底熱水鉱床の成因研究においては、研究開発の3本柱のうちの(2)海洋資源調査技術の開発の研究開発成果を含めた、「調査プロトコル」が、本SIPプログラムの『次世代海洋資源調査技術』の実体であり、この構築にむけて研究開発を進めています。



海底鉱物資源とは何か

国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
国立大学法人九州大学

鈴木 勝彦
池原 研
石橋 純一郎

金属鉱物資源と鉱床の種類

人類は太古の昔から、金属元素を含む鉱物を自然界から見つけ出し、これを利用してきました。鉱物とは、自然の物質のうち、均一で一定の性質をもつ無機質の固体物質で、大部分が結晶として産します。多くの金属元素は、現在の地球では金属の状態ではなく、酸素や硫黄と結合した形（ケイ酸塩・酸化物・硫化物など）で鉱物中に存在しており、それらが集合した、有用金属を多量に含む岩石のことを鉱石と呼びます。このため金属元素を利用するには、鉱石から取り出して化学形を変換し、精製するために、多大なエネルギーが必要となります。こうした必要コストを考慮した上で、地中から鉱物を採取しても経済的に見合うほど、有用な金属元素が多く集まった地質体を金属鉱床と呼びます（以下、単に鉱床と略します）。この定義によると、鉱床と呼ぶかどうかは地質学的要因だけで決まるのではなく、採取や製品化の様々な過程における技術の進歩、あるいは労働者賃金や金属製品価格といった経済的な情勢、などの要因も考えなくてはならないことになります。それらをふまえると、一般に、鉱床中の金属元素の平均濃度は、地球の表層を構成する地殻内に分散して存在しているときの金属元素の濃度に比べて、数百から数千倍高い濃度であることが必要です。

特定の金属元素が局所的に異常に濃集して存在する地質体、つまり鉱床ができるのは、地球表層で起こる様々な地球科学的な現象によって元素の分別が起こるためです。どのような作用によって鉱床ができたか

（鉱床の成因）に基づいて、以下の4つの主な鉱床タイプが知られています。1）マグマ性鉱床は、マグマが冷却する過程における結晶分化作用に伴う元素分別によってできる鉱床です。2）熱水性鉱床は、高温の水（熱水）の作用により元素の分別・移動・濃集が起こってできる鉱床です。3）堆積性鉱床は低温の水の作用によりできる鉱床で、化学的作用だけでなく物理的作用や生物的作用によって元素の濃集が起こる場合もあります。4）風化鉱床は、風化作用に伴って他の

元素が溶脱した結果、金属元素の濃集が進んでできる鉱床です。これらの鉱床タイプは、その成因との関連によって、形成される場所がある程度限定されることが重要です。このように、金属鉱床は地球科学的現象によって引き起こされた擾乱に伴う元素の濃度異常体であり、地球全体でみた場合にその分布は一様ではなく、偏在するという特徴をもちます。

海底金属鉱物資源の種類と重要性

陸上だけでなく海底に分布している金属資源を開発する可能性について、海洋底の科学的調査が飛躍的に進んだ1960年代からたびたび議論されるようになってきました。特定の金属元素が局所的に異常に濃集して存在する地質体である鉱床は、地球の営みにともなう数千年や数万年という長い時間スケールで形成されるため、経済性に見合う濃度（品位）や量（鉱量）という観点からは限りがあるからです。我が国は海に囲まれて広大な排他的経済水域を持つことから大きな関心が向けられ、関連する科学研究も継続して続けられてきました。現在、我が国周辺の海域で金属資源として考えられるものは、図に示した4つのものがあげられています。これらの海底金属鉱物資源は、これを実際に利用する際の経済性について詳細に検討されているわけではないので、厳密な意味では「鉱床」という定義に当てはまらないのですが、一般的には期待を込めてそのように呼ぶことが多いです。

マンガンノジュールは、水深4,000-6,000 mの平坦な海底面上に分布するマンガン酸化物で、ニッケルや銅などの金属資源として注目されています。海水からの沈殿作用により数百万年を越える長い時間スケールで少しずつ成長していると考えられています。コバルトリッチクラストは、海山の斜面などで原岩を被覆して板状に成長したマンガン酸化物で、コバルト、ニッケル、白金などの金属資源として注目されています。やはり海水からの沈殿作用により数百万年を越える長い時間スケールで少しずつ成長していると考えられています。レアアース泥は、特定の海域の堆積層に高い

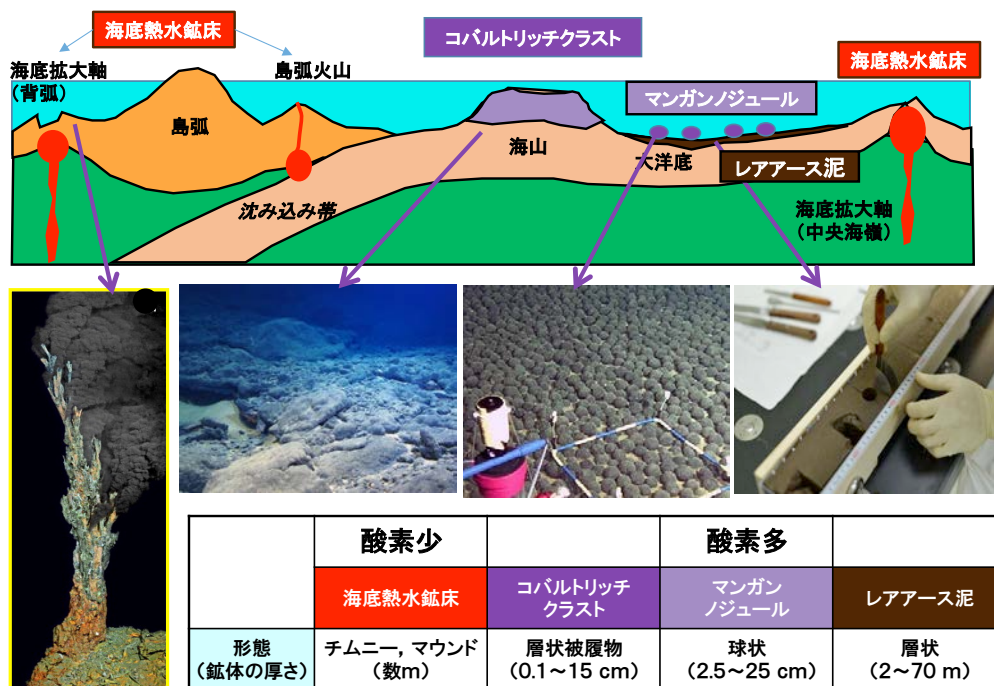


図 期待される海底金属鉱物資源。

希土類元素濃度を持つ堆積物が存在するもので、希土類元素の資源として近年注目を集めています。ごく最近になってから発見されたもので、成因などについて研究がまさに進んでいるところです。海底熱水鉱床は海底火山などに分布する硫化鉱物などから構成されており、亜鉛、鉛、銅などのベースメタルおよび金、銀といった貴金属の資源として注目されています。海底熱水活動に伴って形成される熱水性鉱床で、数千年～数万年の時間スケールで形成されていると考えられています。

資源について考えるときに、実際に利用する際の経済性は重要な問題です。我が国はかつて陸上の鉱山から採掘される金属鉱物資源を輸出していたこともありますが、現在はそのほとんどを輸入に頼っています。

陸上鉱山における資源の枯渇とともに、輸入に対する国内採掘（生産）の採算が取れなくなったためです。海底金属鉱物資源は厚い海水の下に存在するため、その利用には海水のない陸上よりもコストがかかるといえます。しかしながら、逆に考えると、経済性に見合うほどに高品位な鉱石が存在し、高効率・低コストな調査・開発手法が確立されれば、世界において利用可能な資源量が増大する可能性があります。地球上で資源は偏在しているため、世界における需要の増加や、生産国や輸送ルートの国際情勢等によって、資源の価格が高騰したり、安定供給にリスクが生じることもあり得ます。したがって、海底金属鉱物資源開発の実用化は、安定で持続可能な私たちの生活に重要な課題であると考えられます。



海底熱水鉱床の成因に関する現状の理解

国立大学法人九州大学

石橋 純一郎

海底熱水循環系とそこで起こる化学過程

海底熱水活動は、マグマによって加熱された流体が海底下を循環するシステム（海底熱水循環系）で起こります。海底下の堆積物や岩石の間隙は、もともと海水に起源を持つ流体によって埋められています。マグマが海底下に貫入してくると、その周囲の流体は加熱され密度が小さくなり上昇しようとしします。このとき断層などの割れ目が発達している場所があれば、そこが水の通路となり流体が勢いよく上昇することになります。こうした流体上昇が定常的に進めばそれを補うように、周囲から流体が集まります。間隙を埋めていた流体はそもそも海水を起源としたものですから、海水から侵入した流体が海底下表層の地殻内部を循環するように移動するシステムを考えることができます。

このシステムを熱水循環系と呼び、しばしば図1のようなモデルで示します。こうしたモデルで気をつけなくてはいけないのは、流体が上昇する領域（噴出域：Discharge zone）と流体が侵入してくる領域（涵養域：Recharge zone）の地理的スケールが、現実とは大きく異なってイメージされやすいことです。熱水流体が上昇する場所は熱源の直上に限定されています。実際に、熱水活動域は大体数百m四方の大きさがほぼ最大で、一つあるいは複数の熱水噴出孔がその中の十数m四方の範囲に集中している場合が多く見られます。熱水が噴出し続けるのは、水の流れが断層に規制されて集中していることを反映しているのです。これに対して、熱水噴出を補うための流体はその周囲の四方八方から流入します。海底下の流体の移動は間隙圧で規制されますが、どの程度の距離を移動できるのかについて、はっきりしたことはわかっていないのが現状です。しかし、少なくとも数km四方、もしかしたら数十km四方の範囲から流体が集まって来ると考えないと、定常的な熱水循環システムを考えるのが難しくなります。

熱水循環系の中を移動する流体は、その過程で起こる様々な化学反応を経験して化学組成を変えて行くこ

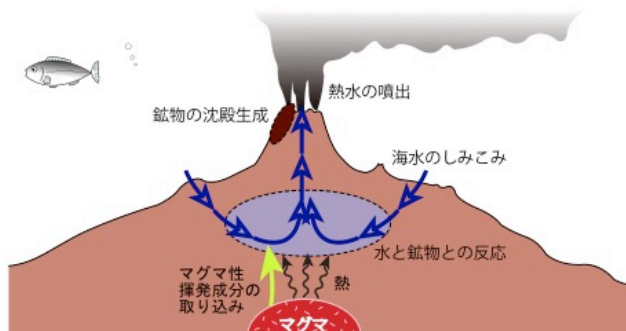


図1 熱水循環系の模式的モデル。

とが明らかになっています。海水に起源を持つ流体が侵入してくる涵養域では、海水が加熱される途中の比較的低温の段階（100-250℃程度）でも、流体と周囲の岩石中の鉱物との反応が進みます。海水中のマグネシウムを取り込む二次鉱物をつくる変質反応が最初に進み、それとイオン交換する形で一次鉱物に含まれていたカリウムやカルシウムなどの陽イオンが流体に溶解していきます。

熱源の近傍の反応域（Reaction zone）では、流体は海水の臨界点に近い300-400℃まで加熱され熱水となります。そのような条件下では、流体と鉱物との反応は化学平衡に達した状態になり、そのpHもほぼ中性に近くなると考えられています。また海水は酸素を含み酸化的な性質ですが鉱物との反応を経た熱水は還元的な性質を持ちます。これを反映して熱水中には還元形の硫化物イオンが多量に含まれます。こうした鉱物との反応以外にも、熱水循環の過程で流体の化学的性質を左右する物質もあります。熱源であるマグマが冷却して結晶化が進行する際には、ケイ酸塩鉱物に入りにくい揮発性成分が分別し脱ガスしてきます。これらの成分（二酸化炭素、二酸化硫黄、塩化水素、硫化水素などを含む）が流体に溶け込むとそのpHは低くなります。また逆に、堆積物中の有機物が分解されて供給される成分の一つであるアンモニアは、流体に溶け込むと熱水のpHを高くする働きがあります。

熱水流体の噴出域では、流体の移動速度が速いので周囲の鉱物とあまり反応が進むいとまもなく、海底から熱水が噴出すると考えられています。ただし、流体の上昇途中で二相分離が起こるとその化学組成が劇的に変動します。海底下は圧力が高いので陸上に比べれば沸騰が起こりにくいのですが、日本周辺の海域にある熱水系は水深が比較的浅く、流体の急激な上昇による圧力低下で沸騰が起こるケースが多いのです。このような二相分離では、二酸化炭素などの揮発性成分が気相により多く分配され、イオンとなっている元素は液相により多く分配されます。後で述べますが、流体の二相分離は熱水の組成を左右するだけでなく、鉱床の形成を議論する上でも重要な過程です。

海底熱水鉱床が形成される過程

海底熱水鉱床は、熱水が引き起こす作用によって形成される熱水性鉱床です。上に述べたように、海底熱水循環系では様々な化学反応が進んでいます。また、熱水は臨界点に近い300-400℃という高温に達することもあり、化学反応を起こすポテンシャルは非常に高いと言えます。鉱床がどのように形成されるのか（成因）を考える上で重要な三つの過程：元素の分別（どこから元素が集まってくるのか）、元素の移動（どのような形で元素が鉱床に移動するのか）、元素の濃集（どのような過程で元素が集中して鉱床形成に至るのか）、について、熱水が循環する過程で起こる様々な化学反応と関連づけながらみてみましょう（図2）。

元素の分別、すなわち熱水循環系のどの領域から金属元素が供給されているのかという問題については、二つの大きな考えが提唱されています。一つの考えは、熱水流体が循環する過程で出会う地殻物質（岩石）から金属元素を溶脱するという考えです。多くの金属元素は、それほど高温でなくても低いpHの条件下では水に溶解するので、涵養域における流体と岩石中の鉱物との反応によって金属元素が熱水中に溶け込むはずで、金属元素は地球の表層を構成する地殻の岩石にそれなりの濃度で分散して存在していますから、広い涵養域から金属元素が供給され続けると考えれば、鉱床の形成に至るまで元素を濃集することができるでしょう。もう一つの考えは、熱水循環の熱源となっているマグマから金属元素が供給されているという考えです。

熱水流体には、マグマに由来する二酸化炭素などの揮発性成分が取り込まれていますが、金属元素は高温条件下でこうした揮発性成分と共に挙動する可能性が知られています。マグマから脱ガスする成分が拡散してしまう前に熱水に取り込まれると考えると、鉱床の形成に至るまで元素を濃集することができるでしょう。この2つのアイデアは、熱水性鉱床成因論の最重要問題として長年議論されていますが決着を見ていません。先に述べたように、熱水循環系の特徴として、噴出域ははっきり特定できるが涵養域の実態は良くわからないことが、この議論を難しくしているのでしょう。

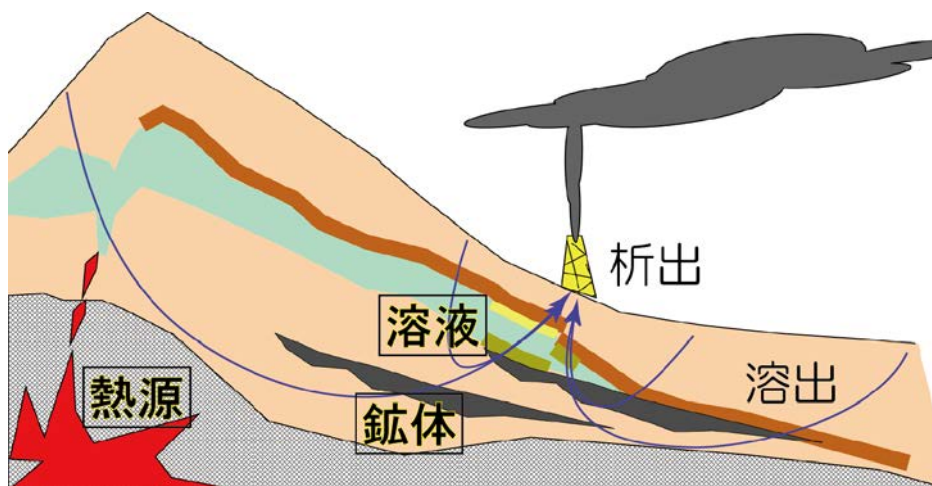


図2 熱水性鉱床が形成される過程の模式的モデル。



元素の移動については、近年の実験学的研究の進展により高温流体への金属元素の溶解度が精確にわかるようになり、熱水に溶解して輸送される過程を定量的に議論ができるようになってきました。亜鉛、鉛、銅といった金属元素はさまざまな化学種の形をとって流体に溶け込みますが、海水を起源とする300-400℃の熱水流体には1kgあたり数mgから数十mgのオーダーで溶解できることが確かめられています。また熱水への金属元素の溶解度は、温度に加えて流体のpHにも支配されており、酸性のpHがより低い流体に金属元素はより多く溶解できます。例えば、マグマから脱ガスした揮発性成分の熱水への取り込みが起こると、pHが低下して金属元素の溶解度が高くなります。熱水循環系は広い範囲から流体が集まって海底面から噴出するシステムですから、どの領域で元素の分別が起こっているのかにかかわらず、いったん金属元素が循環する流体に溶存すれば海底まで効率よく輸送されることは容易に理解できるでしょう。

元素の濃集については、熱水が海底面付近で海水と出会う際に起こる温度と化学条件の大きな変動により引き起こされる元素の沈殿と集積を考えることになります。元素の沈殿は、流体中の金属元素の溶解度が低下して飽和に達することで起こります。熱水が海水と混合したり海水によって冷却されたりすると、流体の温度は低下しpHは高くなります。また熱水の沸騰

(二相分離)が起こると、これに伴う化学種の分配によって流体のpHが大きくなることがわかっています。これらのプロセスはいずれも金属元素の溶解度を低くする方向に変えます。海底熱水鉱床で見られる金属元素は硫黄との親和性が高く、主に熱水中に溶存する硫化水素と結合して硫化鉱物として沈殿しますが、元素によっては海水に溶存する硫酸イオンと化合した硫酸塩鉱物も沈殿します。このように金属元素が流体から鉱物を沈殿する過程については化学過程で説明できますが、鉱物が鉱床形成に至るまで集積していく過程については、まだよくわかっていないことが多いのが現状です。例えば、硫化鉱物の沈殿が集積していくと熱水が流れにくくなるので、狭い範囲に元素を集積することは難しくなっていきます。実際、熱水活動域では熱水噴出を停止した噴出孔（チムニー）を数多く観察することができ、いずれも熱水の通路と思われる部分が硫化鉱物で塞がっているのが見てとれます。こうした

噴出孔の鉱石はいずれも表面が赤茶けており、酸素を含む海水に触れることで硫化鉱物の酸化分解が始まっていることがわかります。硫化鉱物の沈殿形成が進む一方で、海底面では酸化分解が進んでいるとすると、硫化鉱物の保存を考えることも金属元素が集積して鉱床形成に至る過程を議論する上で重要な問題の一つとなります。

陸上の熱水性鉱床との比較検討

開発の対象となるような数百万tクラスの海底熱水鉱床の形成に至るためには、数百m四方といった空間スケールで硫化鉱物が集積することが必要になります。熱水に溶けている金属元素の量は1kgの流体に対して数mgとわずかですから、こうした鉱床の形成のために必要な時間スケールも数千年～数万年と長いものになるはずです。従って、こうした長期間にわたって、単一の（あるいは一連の）熱水活動がほぼ同じ場所で、元素の分別・輸送・濃集の過程を継続していくことが必要となります。

熱水性鉱床の成因を考えることは、こうした長い時間スケールで進行する地球の活動を議論することに他なりません。そうした議論を行うためには、陸上に存在する似たタイプの熱水性鉱床との比較を行うことが有効であると考えられます。採掘の対象となった鉱床は、当然のことながら元素の集積が十分に進んだものであるはずです。また、鉱山の操業を始める前には、周囲の地質構造や硫化物鉱体の分布について情報が集められています。

海底熱水鉱床は、火山性硫化物鉱床（VMSD）と呼ばれるタイプの熱水性鉱床に類似していると考えられています。特に、我が国周辺の熱水活動域で見られる鉱床の形成は、黒鉱型鉱床と呼ばれる鉱床のそれと強い類似性があることが、多くの研究者に指摘されてきました。その類似性は、亜鉛、鉛、銅など多様な金属硫化鉱物を産すること、多量の硫酸塩鉱物の生成を伴うこと、などの鉱物学的特徴にとどまらず、鉱床が形成されたときの周囲の地質環境にも見られると考えられています。黒鉱型鉱床の重要な特徴として、特定の硫化鉱物が地層面に沿って水平方向に分布していることが挙げられますが、この点について、海底熱水鉱床と比較するためには、現在の海洋底の地下構造や地下

断面の岩石構成を知る必要があります。わが国の東北地方日本海側には黒鉱鉱床が密集して存在しており、それを対象とした長年の研究の蓄積があることから、海底熱水鉱床のこのような知見が蓄積されれば、こうした比較検討を行う機会が多く得られると期待できます。

黒鉱鉱床を始めとして世界中の熱水性鉱床を統一的に議論しようとしたIGCP-502プロジェクトの総括として書かれたレビュー論文では、鉱床形成に重要な4つのプロセスを検討しています(図3)。これは、熱水が冷却され、かつ還元的な環境が保たれる空間が、海底面の直上あるいは直下になんらかの形で確保されて、硫化鉱物の沈殿形成が進み集積していくことが大型の鉱床形成の鍵となるという考えに基づいたものです。4つのプロセスは、I) 海底面上に熱水マウンドが発達しその内部で硫化鉱物が蓄積し、マウンドの崩壊による拡散が繰り返される、II) 何らかの堆積作用により還元的環境が海底面直上に形成され、その場

において沈殿形成した硫化鉱物が蓄積する、III) 地形的な要因によって還元的な水塊が形成され、そこに熱水が放出されて沈殿形成された硫化鉱物が海底面に沈降して堆積する、IV) 海底下の堆積層内へ熱水が進入して、堆積物を交代しながら硫化鉱物が蓄積する。とまとめられています。ただし、こうしたアイデアは、過去にできた鉱床の地質学的観察に基づいて考えられたものですから、ここで提案されたプロセスが海底熱水鉱床で実際に起こっているのかについて、検証していく必要があります。

いずれにしても、ここで重要なことは、これまで述べてきた海底熱水鉱床の形成過程の個々の化学的作用や元素の供給源といった成因論は、いずれも科学的な第一線の研究テーマであるということです。したがって、海底熱水鉱床が「どうしてできる(できた)のか」、「どのようなものができる(できた)のか」、そして、「どこにできる(できた)のか」を知るためには、科学的な理解が必要であるといえます。

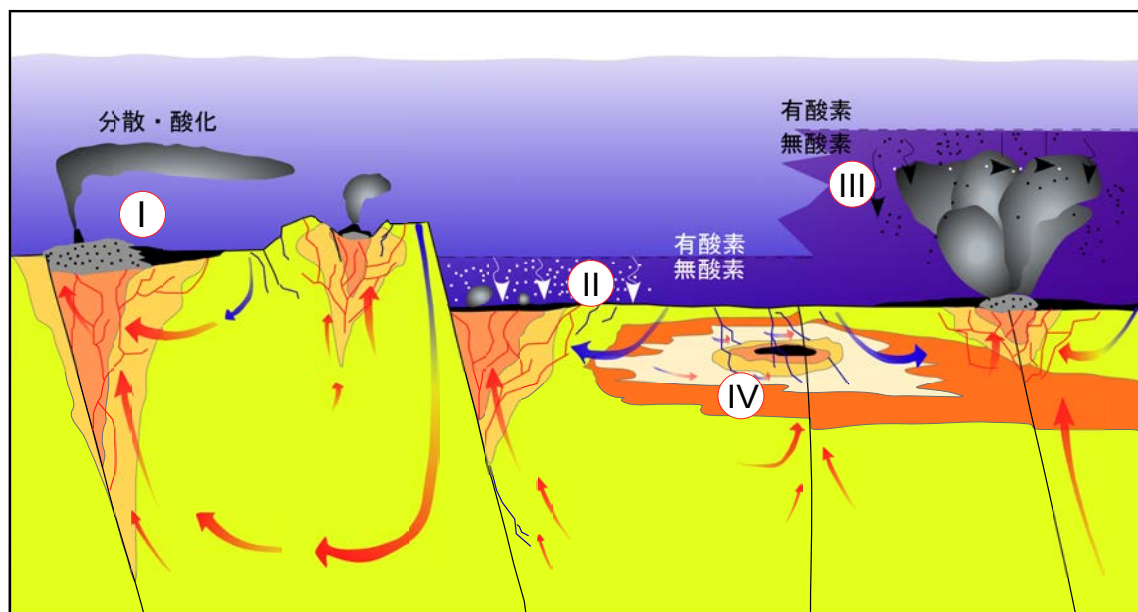


図3 熱水性鉱床形成場のモデル(Tornos et al., 2015をもとに作図)。



有望海域の絞り込みに向けて–成因モデルの果たす役割

国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
国立大学法人九州大学

鈴木 勝彦・熊谷 英憲
池原 研・山崎 徹
石橋 純一郎

有望海域–海底熱水鉱床が形成される地質学的な場

本章2節において、金属鉱床は地球科学的現象によって引き起こされた擾乱に伴う元素の濃度異常体であり、地球全体でみた場合にその分布は偏在しているという特徴をもつこと、そして、その存在場は、どのような作用によって鉱床ができたか、つまり鉱床の成因に基づいてある程度限定されることに触れました。さらに、3節において、熱水鉱床の形成には、熱水循環システムが成立すること、さらに元素の分別・輸送・濃集の過程が長期にわたって継続し続けることが必要な条件であること、これまでの熱水鉱床研究のレビューをもとにした鉱床形成に重要な4つのプロセスを紹介しました。現在の海洋底でこうした条件を満たす地質学的な場が、すなわち海底熱水鉱床の存在する可能性のある有望海域ということになります。そのような場について、以下に考えてみます。

まず熱水循環システムの成立には、熱源となるマグマ、熱水の通路となる断層系の両者が存在することが必要です。従って、海底硫化物鉱床を絞り込むための最初の条件として、マグマが頻繁に上昇し断層活動も頻繁におこる、いわゆる活動的な海域になります。活動的な海域としては、プレート拡大域である中央海嶺とプレート収束域である海溝・島弧縁海系があります

(図1)。実際、これまで海底熱水系が300ヶ所近く確認されているうち、50%が中央海嶺で、45%が島弧か

背弧で確認されています。

中央海嶺では、プレート拡大が上部マントルの部分溶融によるマグマの形成を促進します。さらにプレート拡大の活動により正断層系が非常に良く発達します。このため海底熱水循環系が発達しやすい地質学的な場と言えます。ただし、熱水循環系が頻繁に発達することが、鉱床形成に有利に働くとは必ずしも言えません。常に伸張テクトニクスが卓越している海嶺では、マグマ上昇が同じ場所で起こらない傾向があります。このために単独の熱源が冷却するまでの短い寿命でしか熱水循環系が存在できないことになります。また、中央海嶺の海底が基本的には新しい玄武岩だけで構成されていることも、流体の移動に対して不利な要因と言えます。このような地殻で間隙率を支配しているのは岩石の表面に生じる割れ目です。新鮮な岩石は透水性が高いのですが、熱水変質反応が進むと生成された粘土鉱物によって透水性が下がって行くと考えられるからです。中央海嶺は陸地から離れて存在して堆積物がないケースが多いことを考えると、硫化鉱物が集積する場を確保することも難しいかもしれません。

島弧や背弧のマグマ活動の形成は、プレート沈み込みによる上部マントルへの物質供給によって起こります。一方、テクトニックな場としては、島弧では圧縮テクトニクスが、背弧では伸張テクトニクスが卓越し

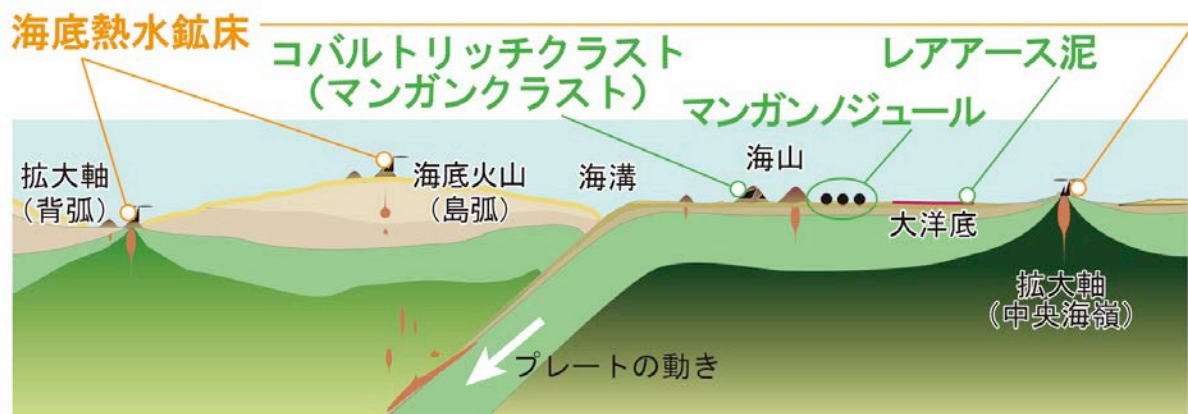


図1 海底熱水鉱床が形成されるテクトニクス場(SIP『次世代海洋資源調査技術』リーフレットより)。



ていえるでしょう。プレート収束域では、マグマの形成が同じ場所で繰り返し起こり明確な形での火山をつくるケースが多く、熱水循環系も基本的にはこうした火山に発達します。マグマの上昇が同じマグマだまりにおいて何度も繰り返されることは、一つの熱水循環系が長い寿命を持つことを可能にするので、鉱床形成には有利になると考えられます。ただし、鉱物を蓄積して鉱床を形成する空間を確保することを考えると、若い島弧火山では熱水循環系の出口が噴火口周辺に限定されてしまうので不利と言えます。マグマだまりが少し後退してカルデラが形成される段階になれば、熱水循環系のスケールが大きくなり、また鉱床を形成する空間も確保しやすくなります。こうした熱水循環系の時空間スケールを考えると、伸張テクトニクスに転じた背弧リフトの地質学的場のほうが、大型のカルデラや構造的な断層系が発達しやすくなるという点で、有利になると考えられます。一方、島弧や背弧のマグマ活動では玄武岩に限らず珪長質な岩石も噴出する特徴があり、これが熱水鉱床形成の作用の長期継続という点から有利に働くと考えられます。珪長質なマグマ活動は溶岩を流出するだけでなく、爆発的な噴火では火山砕屑物を大量に噴出し、成層火山を構成します。火山砕屑物は非常に間隙率が高く大きな透水性を示すので、溶岩層と互層になった成層火山では透水層と不透水層が交互にできることになります。これは大規模な熱水循環系が成立する地質学的場を提供します。また火山砕屑物は反応表面積が大きく、変質を受けても

なかなか透水性が下がらないと考えられます。背弧リフトでは伸張テクトニクスによってマグマの上昇が促進されることも合わせると、鉱床形成には有利な条件が揃った地質学的な場であると言えるでしょう。

このようにして考えると、成因的な観点から海底熱水鉱床の存在する可能性のある有望海域をある程度絞り込むことができそうです。しかしながら、このような地質学的な場は、依然10万km²のスケールで分布しているため、調査可能な1万km²程度の範囲に対象域を特定のテクトニクス場の中で絞り込むためには、更なる根拠が必要となります（図2）。

成因モデルの果たす役割

前節において、海底熱水鉱床の成因に関する現状の理解とともに、熱水性鉱床形成場のモデルを紹介しました。この資料集では、以降の第三章の各論においても、様々な“モデル”について言及されています。そこで、まず、“モデル”とは何かということを整理します。研究開発において、私たちは得られたデータをもとにその現象の原因を解析し、既存の理論を利用したり、新しい理論を考案したりして現象・データを説明する仮説を組み上げます。この仮説や理論的な枠組みを整理したものがモデルです。わかりやすく表現すると、自分（達）が考えているアイデアを、第三者にもわかるように整理して示したものであるといえるでしょう。したがって、研究開発は、仮説を検証しながらモデル

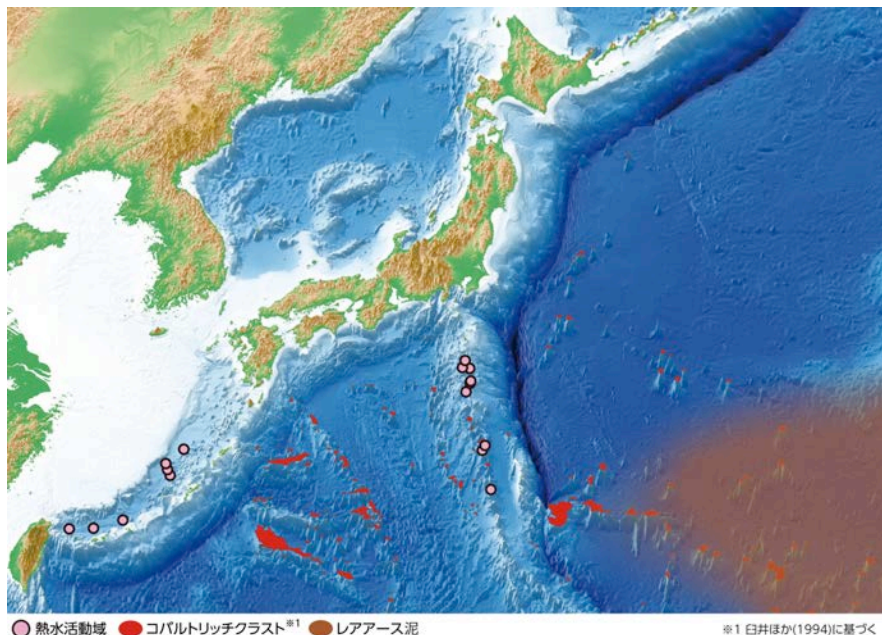


図2 日本近海の熱水活動域。伊豆-小笠原海域と沖縄海域に熱水活動域が配列していることが分かる。ここから1万km²程度の調査可能範囲に対象海域を絞り込むための、科学的根拠に基づいた手法開発を進める（SIP『次世代海洋資源調査技術』パンフレットより）。

● 熱水活動域 ● コバルトリッチクラスト^{※1} ● レアアース泥

※1 白井ほか(1994)に基づく



を修正・精緻化し、普遍化する作業であるといえます。このような観点から、第III章では、それぞれの研究開発テーマにおけるモデルがいくつも紹介されています。それでは、“成因モデルを構築する“というのは何を意味するのでしょうか。

巨大プロジェクトであるSIPの大きなアドバンテージを活かし、またSIPの狙いである短期間での集中的な成果創出を目指すとき、基礎研究開発における学際的な検討と、実用化の観点からの情報のインプットあるいはフィードバックが、本SIPの研究開発と学術研究との大きく異なる点です。これまで述べてきたように、熱水循環域において、様々な地球科学的現象が極めて複雑に相互に関係しつつ同時に進行し、しかも、特定の条件が長期間続くことが元素の濃度異常体である金属鉱床の形成に必要であると考えられます。そのような条件を満たす場所を見いだすためには、上にみた特定の地質場（テクトニクス場）の中から、調査可能な範囲に対象域を絞り込むための調査手法や、鉱床位置特定のための科学的指標が必要となります。その確立のためには、専門分化した様々な科学研究に基づい

た特定の観点からの検討だけではなく、それらを組み合わせ、相互に関係しつつ同時に進行する地球科学的現象を矛盾無く説明するための学際的な研究と、その結果としての理論的体系、つまり“成因モデル”の構築が必要です。成因モデルはあるテクトニクス場における資源濃集過程を一般化した理論的・概念的なエッセンスではありますが、鉱床生成の因果関係が明らかになることで、結果としての鉱床本体だけではなく、付随する様々な地球科学的特徴に着目した新たな調査手法が見いだされることが期待されます。つまり、本SIPプログラムで“成因モデルを構築する”ということは、様々な“モデル”を統合し、現時点で最も多くの情報に基づいた、精緻なモデルを構築することであり、既存のモデルの飛躍的な質の向上を目指すことです。

上に述べた観点から、“成因モデル”とは、無から生み出すものではなく、あくまでも個々の研究テーマのモデルを発展させたものであったり、既存のモデルを質的に向上させたものであるといえます。それでは、前節で紹介した既存の熱水性鉱床形成場のモデルや、現在までに得られている潜水艇等を用いた熱水地球化

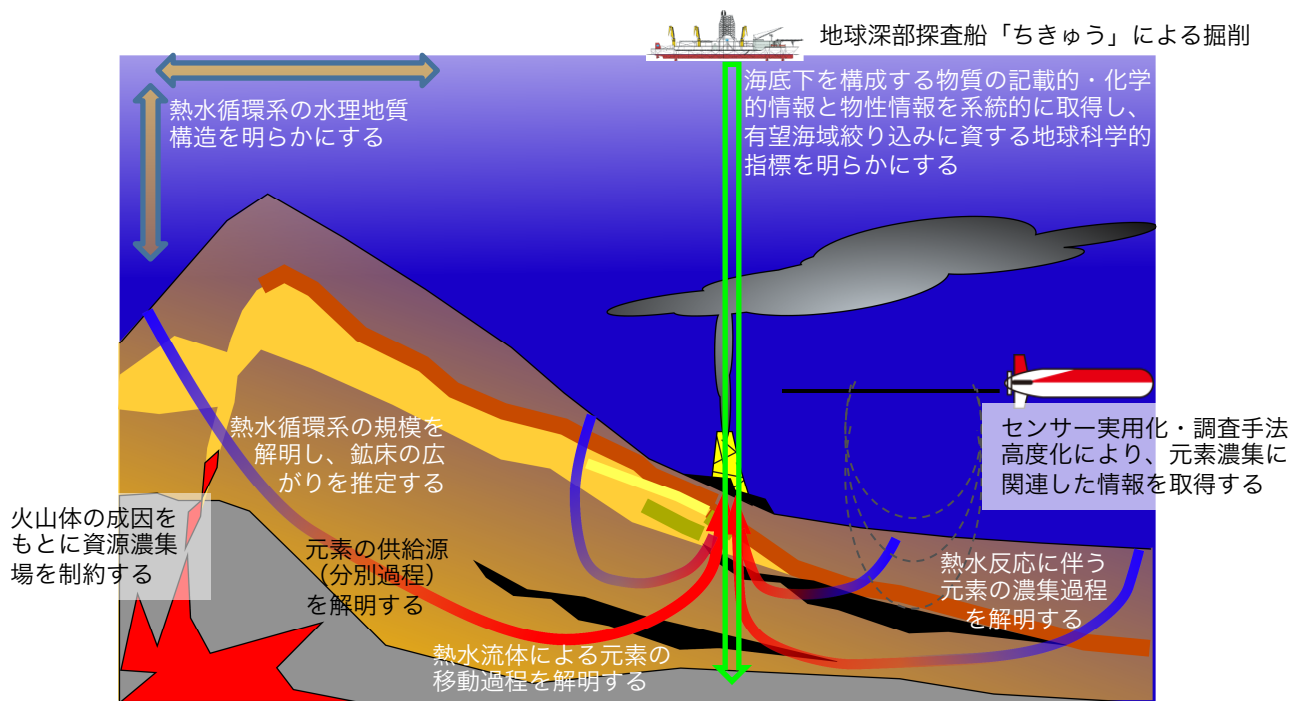


図3 熱水性鉱床が形成される過程の模式的モデルと本SIPでの取組み。

学的研究のモデルをなぜ向上させる必要があるのでしょうか。まず、既存の熱水性鉱床形成場のモデルは、数十～数千万年前あるいは数億年前といった、地質学的な年代に形成された、過去の熱水系の観察をもとにまとめられた成因モデルのプロトタイプです。熱水性成鉱床形成のために最も重要な役割を果たしていると考えられる熱水の挙動は、岩石に残された痕跡をもとに推定されますが、そこには限界や不確かさがあります。つまり、このモデルは、大昔に活動を終えた熱水系であるという点に決定的かつ克服困難な問題があるといえます。一方、我が国周辺海域に存在する沖縄トラフや伊豆・小笠原海域などの活動的な海底熱水系では、熱水は動いているし、マグマはまだ熱く、システムがまだ生きていた点が最も重要な点です。前節で詳しくみてきたように、海底熱水鉱床の成因に関する科学研究や成因モデルの提案はこれまでも行われてきましたが、鉱床の成因に関係する元素の分別・輸送・濃集の過程はいずれも現在の第一線の科学研究のテーマであり、現在活動的な熱水系では、陸上に比べて経験的な記載の蓄積に乏しく成因に関する情報も十分に整理されていません。私たちは、このSIPプログラムで地球深部探査船「ちきゅう」による掘削を始めとする様々な調査を行い、活動的な熱水系を調べる機会を得ることができました。このような知見は、陸上の活動を終えた海底熱水鉱床から得られた成因モデルの質を飛躍的に向上させ、より信頼性の高い成因モデルへの発展に貢献することが期待されます。つまり、両者の違いが重要な情報であり、その解明のために、特定のモデル海域における、現在の熱水循環系の成因モデルをまとめる必要があると考えています。

現在、検討を進めている成因モデルの概念図を図3に示します。調査にあたっては、陸上においては踏査（徒歩による岩石の観察や分布の把握）や採取した岩石の記載が基本となりますが、海域においてはいずれも短期間（低コスト）で十分な数・量（精度）を確保

することが困難です。したがって、経験的な記載を踏査や岩石記載以外の化学的・物理的性質をもとに補う、もしくは代替する手法の開発や精度向上が必要となります。このために岩石試料と、化学的・物理的性質との系統的な対比が必要となります。また、成因モデルの構築のために海底下に広がる熱水循環システム全体を理解する必要があり、このためには海底下の物質（岩石）試料の取得が不可欠です。さらに、成因モデルを陸上の熱水性鉱床と比較するためには、地質断面的な深さ方向の地質構造や岩石構成の理解が必要となります。これらのことから、海底面下の掘削とそのコアの解析、さらには各種地球物理学的調査結果との対比という手法・作業が重要な取組みとなります。

科学研究に基づいて絞り込みを行うということは、資源の賦存可能性の高い特定の地質学的な場を限定し、さらにその限定された場の中で、元素の濃度異常体である金属鉱床の位置を精確に予測するための科学的な根拠を見いだすことです。このときにより多くの情報に基づいた精緻な成因モデルが、高効率な調査に貢献すると期待されます。本研究開発は基礎研究の側面が強いため、国立研究開発法人海洋研究開発機構と国立研究開発法人産業技術総合研究所、ならびに国立大学法人九州大学を中心とした国内大学の研究共同体によって、府省連携のもとに進められています。また、SIPにおける研究開発の最大の特徴は、海洋調査産業の創出にむけ、現実の商業調査で民間企業等にも使用可能な実践的な調査手法の確立を念頭に取り組む点です。そのために、背弧リフトである沖縄トラフ海域において、伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺をモデルフィールドとして成因モデルの構築を進め、どのような科学的指標に着目することによって背弧リフト内で1万km²程度の調査可能範囲に対象海域を絞り込むことができるのか、さらにその調査範囲から資源濃集域を精確に見いだすことができるのかを明らかにしようとしています。



トピックス：成果の実用化にむけた民間企業等との連携

成因研究課題では、実施項目2-1「海洋資源調査システム・運用手法の開発」に従事する、次世代海洋資源調査技術研究組合（J-MARES）および一般社団法人海洋調査協会（JAMSA）の2つの民間企業団体との意見交換・協働作業を通じて、基礎研究から実用化まで一貫通貫の研究・技術開発を推進しています。2016年度には、成因研究課題の2航海（海洋研究開発機構、YK16-10およびYK16-12中部沖縄トラフ航海）において、成因研究課題で開発を進めている自然電位・電気電磁探査技術をJAMSAに対して技術移転しました。その後の、成因研究課題と、実施項目2-1との協働プロジェクトとして開始された、「統合的調査システム」航海では、成因研究課題の技術研究者の立ち会いのもと、JAMSAがそれらの事前電位・電気電磁探査を実施して、有用なデータを得ることに成功しました。



JAMSTEC研究者による自己浮上電位計（OBE）のセッティングをJAMSA技術者が見学している。YK16-12航海（2016年9月）。



曳航体の投入に先立ち、JAMSA技術者に技術指導するJAMSTECの技術研究者(2016年10月)。写真提供：海洋調査協会(SIPプロジェクト推進室)



電源曳航体投入作業の様子。海洋調査協会「かいゆう」航海(2016年10月)。写真提供：海洋調査協会(SIPプロジェクト推進室)



J-MARES加盟・三菱マテリアルテクノ株式会社における意見交換会の様子。写真提供：J-MARES（三菱マテリアルテクノ株式会社）。



YK16-12航海での電源ユニット曳航体投入作業の様子（2016年9月）。



「かいゆう」船内ミーティングの様子。海洋調査協会「かいゆう」航海(2016年10月)。写真提供：海洋調査協会(SIPプロジェクト推進室)

第Ⅱ章

『次世代海洋資源調査技術』の目標像とこれまでの成果

これまでに、第I章では、本プログラムについて紹介するとともに本報告の研究開発対象である、「海底熱水鉱床の成因に関する科学研究」の目的と概要について紹介してきました。

この第Ⅱ章では、第1節で、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削結果を含め、モデルフィールドである伊平屋北海丘を中心としたこれまでの研究開発の取組みやその結果としての成因モデルが、『次世代海洋資源調査技術』確立に果たす役割について、現状での理解を解説します。そして、第2節では、『次世代海洋資源調査技術』確立にむけた今後の取組みの方針および概要と、実用化に向けた課題について述べます。



伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドの成因モデルの現状の理解と今後の展開

国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
国立大学法人九州大学

鈴木
池原
石橋

勝彦・熊谷 英憲
研・山崎 徹
純一郎

伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドの成因モデルの現状の理解

第I章で述べたように、海底熱水鉱床の形成には、熱水循環システムが成立すること、さらに元素の分別・輸送・濃集の過程が長期にわたって継続し続けることが必要な条件になります。伊平屋北海丘は、これまでに海洋研究開発機構を始めとした様々な科学調査航海や統合国際深海掘削計画（IODP）第331次航海（Exp. 331）による科学掘削等の結果から、熱水循環システムが成立し、元素の分別・輸送・濃集の結果である初期的な鉱化作用が確認されています。さらに、伊平屋小海嶺においても、科学調査の結果、活発な熱水活動が確認されています。これらのフィールドでこれまでにどの程度の期間熱水循環システムが継続し、今後どの程度継続するのかは不明ですが、少なくとも現在において、海底熱水鉱床の形成に必要な条件を満たしていることを示しています。そこで、第III章の各論で述べる研究開発課題およびその現状での理解をもとに、伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールド（以下、両者を一括する場合は伊平屋北フィールドと表現します）における成因モデルを検討します。

地質学的な場と構造

伊平屋北フィールドの地質学的な場は、背弧リフトに相当し伸張テクトニクスが卓越している場所です。第I章でみてきたように、このような場は大型のカルデラや構造的な断層系が発達しやすくなるという点で、海底熱水鉱床の形成に有利です。また、背弧のマグマ活動では玄武岩に限らず珪長質な岩石も噴出する特徴があり、これが熱水鉱床形成の作用の長期継続という点、そして非常に間隙率が高く大きな透水性を示す火山砕屑物をもたらす点で、大規模な熱水循環系が成立する条件を満たしています。このような背弧リフトにおける海底熱水活動の存在は、第III章1節で触れる既存の地質情報からも示唆されるとともに、第III章2節で紹介するように、詳細な高密度反射地震探査データの解析により、断層系のみならず火山砕屑物の空間分

布までを含めた、高精度の水理地質モデルとして解析が進んでいます。一方で、伊平屋北フィールドのマグマ活動が海底熱水鉱床の形成作用の長期継続に果たす役割や、マグマ活動が鉱床形成条件に制約を与えるとともに海域を特徴づける要素を有しているのか等については、第III章8節でみるように基盤岩岩石学的な観点からも検討が進められています。これらの基盤岩岩石学的検討と水理地質モデルの解析の結果からは、リフト帯を特徴づけるバイモーダルな組成のマグマ活動によって形成されるマグマ溜まりの、熱水循環システムの熱源としての役割や位置に関して新たな仮説が提案されるとともに、珪長質のマグマ活動の噴出物である多孔質の軽石や熱水の循環経路となる層状構造の空間分布が明らかとなってきました。さらに、第III章3節で紹介するように、より詳細な海底地形や海底表層の地質条件の情報を得ることにより、大きなスケールのテクトニクス場（地質の場）から連続的なスケールで精密な地形や地質の特徴を把握する試みを進めています。

元素の分別・輸送・濃集

熱水循環系のどの部分から金属元素が供給されているのかについては、第I章でみたように熱水性鉱床成因論の最重要問題として長年議論されていますがいまだ決着を見ていません。熱水流体が循環する過程で出会う地殻物質（岩石）から金属元素を溶脱するという考えと、熱水循環の熱源となっているマグマから金属元素が供給されているという考えとがありますが、第III章8節の基盤岩類の検討からの仮説は、熱水流体の循環過程と珪長質マグマの発生過程が空間的・成因的に密接に関係していることから、両者の作用を同時に満たす可能性があります。

元素の輸送過程については、これまでに科学的な検討が進んでいることもあり、かなり詳細に分かってきました。熱水循環系は広い範囲から流体が集まって海底面から噴出するシステムですが、メタンの炭素同位

体比に着目して「水-堆積物相互作用」を検討した結果、その規模について明らかとなりました。具体的には、第Ⅲ章11節で紹介するように、伊平屋北海丘においては、海丘の内部ではなく、むしろ海丘の裾野に広がる堆積物が主要な「水-堆積物相互作用」の場であり、数km以上の遠隔地にまで及ぶ極めて広大な海底下水循環系の存在が推定されています。さらに、第Ⅲ章10節で紹介されているように、掘削試料の間隙水の化学組成から海底下の流体の動きや化学反応が追跡されています。その結果、熱水の海底噴出が見られない場合でも、海底下で流体が移動し、海水起源の水との混合及びそれに伴う様々な化学反応を引き起こしていることが明らかとなりました。

これらの化学反応の痕跡は、第Ⅲ章9節で紹介する、掘削コア試料の記載や地球化学的分析・解析によっても確認されており、海底下には熱水の流れを規制し、熱水溜まりを形成する場合のある帽岩（キャップロック）が広く存在すること、そしてその帽岩は複数枚存

在し、類似の構造が繰り返されていることなどが明らかとなっています。

間隙水組成や掘削コアの記載・地球化学的解析によって明らかとなった詳細な結果は、掘削同時検層（LWD）により、掘削試料の得られていない部分にも存在が推定されるとともに、より大きなスケールの構造として、反射法地震探査データからも裏付けられています。さらに、このような地質層序は掘削試料の物理特性（physical property）によっても検証されています。具体的には、第Ⅲ章5節で述べるように、掘削同時検層による各種パラメーターの組合せによって、特徴的な地質層序パターンが精度良く検出できるとともに、それと掘削コアとの対比によって、海底下の完全連続的な地質層序を把握することが可能になりました。掘削コアとの対比は、第Ⅲ章9節で述べる記載や化学組成のみならず、例えば第Ⅲ章7節で紹介する比抵抗・誘導分極（IP）といった電気特性からも検証が進められています。加えて、第Ⅲ章2節で紹介するよ

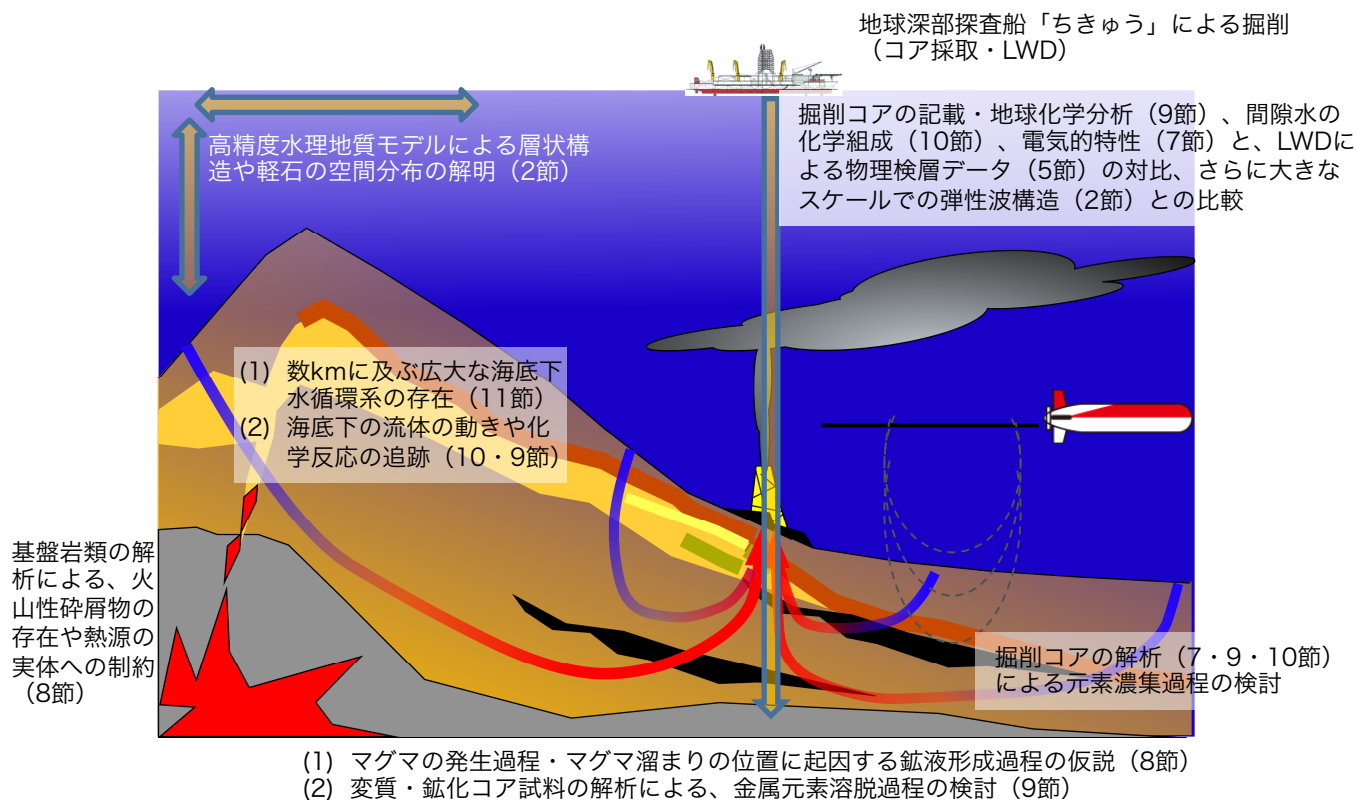


図 伊平屋北フィールドの熱水性鉱床が形成される過程の模式的モデルと、成因研究の取組みの位置づけ。
節の番号は第Ⅱ章の各節を示す。



うに、海水の循環経路となる層状構造や、熱水挙動に強い影響を与える軽石層の空間分布等が明らかとなつてきています。

元素の濃集も第I章でみたように、熱水流体が海底面付近で海水と出会う際に起こる温度と化学条件の大きな変動により引き起こされることから、上述の輸送過程とともに検討が進められています。この検討には、第III章9節で述べる掘削コア試料の記載・解析が重要な役割を担っており、すでに述べたように、これまでの伊平屋北海丘の掘削コアの解析から、複数枚存在する帽岩により構造が繰り返されていることが明らかとなっています。この帽岩によって熱水の流れが側方に規制されれば、鉱化作用も同様の構造規制を受けていることが推察されます。陸上の黒鉱鉱床においては、しばしば鉱体が複数枚になっている場合が認められ、今後、帽岩の生成機構解明が熱水鉱床の地下構造把握、すなわち元素濃集域特定の鍵となると見込まれます。一方で、第III章10節でも述べるように、熱水と海水が混合し、また広い空間で大規模に冷却が進む場所という観点から、帽岩により蓋がされてしまう構造規制、あるいは硫化鉱物の沈殿が蓄積していくと熱水の動きが阻害されてしまうことと、低温の海水の定常的な侵入との関係も検討して行く必要があるものと考えられます。これには、マグマ活動（火山砕屑物の噴出）の様式（第III章8節）や水理地質モデル（第III章2節）の理解もあわせて進める必要があるでしょう。

掘削にもとづく解析では、垂直方向の地質構造や岩相の理解が中心ですが、鉱体の規模や分布、あるいは位置を知る上では、水平方向の広がりに関する知見も必要です。この点において、掘削結果の垂直方向の詳細な検討をもとに、第III章2節の構造・地質の空間分布を理解することや、第III章3節の詳細な海底表層部調査による水中音響異常の検出、第III章4節の電磁気学的手法による熱水域・鉱床域の分布の把握が重要な情報をもたらすと期待されます。さらに、第II章6節で紹介する海底表層部堆積物における鉱徴検出の試みでは、硫化鉱物の沈殿により熱水の噴出を停止した噴出孔の分布や存在を知ることができ、海底熱水循環システムの経時変化に関する情報をもたらす可能性もあります。

開発を視野に入れた場合、商業的に有望な規模の熱水性鉱床の形成に至るために必要な時間スケールも考えなくてはなりません。マグマ活動、あるいは基盤岩の形成年代という観点からは、著しく変質した岩石や極めて若い年代の岩石の年代の直接決定は難しい場合が多いですが、広域的なテクトニクス場の形成・発達という観点もふまえて検討していく必要があるものと考えられ、第III章8節の取組みで今後明らかにしていきます。

成因モデルが果たす役割と今後の展開

第III章で個別に紹介し、全体における位置づけを上にもたように、成因モデルの要素研究の成果は出口を意識した上で着実に生み出されてきています。特に、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削（コア試料の取得とLWDによる物理検層データの取得）は、海底下熱水循環システムの理解を飛躍的に高めています。現時点（2016年度上半期終了時点）で、個別に追求されている細分化された専門分野の研究を、統合した成因モデルとして構築することが第3事業年度である2016年度の最大の課題です。これは、本SIPの趣旨である、府省連携によって実現されるものです。

具体的には、元素の分別・輸送・濃集に関係する諸現象は、最終的に水理地質モデルで示される成因モデルとして統一的に理論付けられる必要があります。第I章でも述べたように、海底熱水鉱床の形成には、様々な地球科学的現象が極めて複雑に相互に関係しつつ同時に進行し、しかも、特定の条件が長期間続くことが必要です。第III章で述べる各種の取組みは、同時進行する地球科学的諸現象をいわば個別に取り出して検討しているもので、それらが成因モデルとしてどのように関連しているのか、現状での理解を上にも説明しました。例えば、元素の輸送・濃集に関係する諸現象は、コアの記載・化学組成・物理特性や間隙水の組成から読み取ることができ、LWDで検出可能な各種のパラメーターにおいても基本的に同じものが見えているはずです。そしてさらにそのパラメーターの一部は、第III章4節で示す電磁気学的手法で検出されるとともに、第III章2節の弾性波速度モデルで可視的に表現されるはずです。したがって、様々な地球科学的現象が、具体的にどのように“極めて複雑に相互に関係しつつ



同時に進行”しているのかを、総合的な観点から紐解き、統合していくことが今後の最も重要な課題です。それと同時に、第Ⅲ章の各種取組みはそれぞれが研究的な側面の強い課題ですので、信頼性の高い科学的根拠となるよう、さらなる個別の追求・解析も必要とされます。

一方で、伊平屋北フィールドスケールの水理地質モデルが成立する地質の場そのものに対して科学的根拠を与えることも必要です。第Ⅰ章では、熱水鉱床の形成条件を満たす様々なテクトニクス場について触れましたが、『次世代海洋資源調査技術』で目指す、全海洋から約1万分の1の面積に調査海域を限定する最終目標のためには、第Ⅰ章4節で紹介した様々なテクトニクス場から有望海域を限定するための科学的根拠や、第Ⅲ章1節で述べるような既存のデータをもとに、特定のテクトニクス場・海域から調査範囲を特定するための

手がかりが今後示される必要があります。

これまでに述べてきたように、成因モデルの果たす役割は、資源の賦存可能性の高い特定の地質学的な場を限定し、さらにその限定された場の中で、元素の濃度異常体である金属鉱床の位置を精確に予測するための科学的な根拠を見いだすことです。その結果は、本SIPプログラムにおける研究開発の最大の特徴である、海洋調査産業の創出にむけ、現実の商業調査で民間企業等にも使用可能な実践的な調査手法の確立に貢献しなくてはなりません。したがって、様々な観点からの研究開発結果を、成因モデルという形で一旦統一的に整理した後、もう一度、海底熱水鉱床の調査手法として、民間企業等が利用可能で、かつ、決定的に重要な地球科学的指標が何なのかを、調査の段階に応じて特定することが最終的かつ最も重要な役割であると考えています。



『次世代海洋資源調査技術』確立にむけた今後の取組みと 実用化にむけた課題

国立研究開発法人海洋研究開発機構 鈴木 勝彦・熊谷 英憲

海底熱水鉱床の成因モデルと鉱床モデルとの関係、成因モデルの構築に向けて

『次世代海洋資源調査技術』における成因モデルの位置づけを、わかりやすいように天気予報を例として説明すると、現在構築中の「成因モデル」は「大気－海洋統合モデル」や「熱と雲との相互作用モデル」などの、天気予報の数値計算に用いられるモデルや理論的基礎にあたり、「鉱床モデル」は、予想天気図や気温、天気などの実際の天気予報に相当します。現在の天気予報では、膨大なデータを取得し、上に挙げたようなモデルを利用して解析して、非常に精度の高い予測を行います。ここでは、数値予報モデルの精緻化、解析手法の高度化、観測データの増加・品質改善、そして数値予報の実行基盤となるコンピュータの性能向上などが重要な貢献をしました。本プログラムにおいて成因研究課題が行うことはまさにこれと同様といえます。成因研究課題が中心となり、本SIPプログラムでは、「成因モデル」を精緻化し、「より信頼度の高い解析手法」を作り上げることを目指しています。

天気予報では、より精緻なモデルが導入されるたびに温度、天気、台風の進路や規模の予測などの精度は大きく向上してきました。長い歴史と大きな投資がなされて進化してきた天気予報は完成度の高いものとして一般に利用されていますが、海底資源の調査における成因モデルはまだ端緒についたばかりです。この成果資料集では、成因モデルにつながるこれまでの研究について紹介しましたが、モデル構築はこれで完了ではありません。天気予報と同様に、今後、海底資源の科学的な研究によって新しい知見を得るたびに成因モデルは精緻化され、それを利用した鉱床モデルの品質も上がっていくことが期待できます。

地球深部探査船「ちきゅう」による伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺掘削が海底熱水鉱床の成因モデル構築において、細分化された専門分野の研究を統合する一つの軸となりうる情報を提供しつつあることは前節で述べたとおりですが、島弧・背弧環境での形成とされて

いる塊状硫化物鉱床である黒鉱鉱床との相違点も明らかにしつつあることは見逃せません。これにより、黒鉱の鉱床モデルは塊状硫化物鉱床の1つの確かなモデルと再認識でき、海底熱水鉱床の個々の鉱床モデルは、黒鉱の鉱床モデルを出発点として構築しうるとの見通しが立ったといえます。もちろん、地質時代の熱水活動の産物である陸上の黒鉱鉱床と、現在活動中の熱水に伴う海底熱水鉱床とでは現場における流体の有無に決定的な違いがありますから、見かけ上大きな違いが出てくることは避けられないかもしれません。しかしながら、このことこそが、今まさに形成されつつある海底熱水鉱床の熱水の動きを追跡し、従来のモデルを精緻化するための大きなアドバンテージであり、「ちきゅう」での掘削によって得ることのできる重要な知見です。

『次世代海洋資源調査技術』確立にむけた今後の取組

本章第1節で述べたように、『次世代海洋資源調査技術』の「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」および「海洋資源調査技術の開発」に関する研究開発の目標は、調査海域を地球表面の7割を占める全海洋から約1/10,000の面積に絞り込み、潜頭性鉱床の調査に有効であり、低コスト・効率的な調査の実現に必要な民間企業でも活用可能な調査の一連の手法を提示することです。このステップとして海底熱水鉱床の成因モデルが構築され、また、SIPの課題の中で提示しうる手法の1つの表現が「調査技術プロトコル」であって、「海洋資源調査技術の開発」課題において開発された探査機、調査機器を活用して得られる、あるいは、既存の探査機等により取得されたデータにより、海底下構造等の推定が可能となる成因モデルが構築され、それは、個々のフィールドを表現する「○○鉱床の鉱床モデル」とは違って、海底熱水鉱床一般を包含する理論的基礎のようなものです。この成因モデル構築の調査過程で得られた鉱体の確認に有用性が見込まれる調査手法（電磁探査手法等）については、民間企業での活用に向けた技術移転を進めていきます。そのうえで、調査の一連

の流れを民間企業でも使用しやすい潜頭性鉱床調査に有効な「調査技術プロトコル」としてまとめます。そのためには、成因研究を進め、成因モデルを精緻化し続けることが重要であることは先述の通りです。

以上のことをふまえて、以下に「調査技術プロトコル」の目指す像と、今後、民間企業での活用に向けた技術移転を含め「海洋資源調査技術の開発」とともに取り組んで行く事項について紹介します。

『調査技術プロトコル』のイメージについて

海底熱水鉱床の調査技術プロトコルに関しては、「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」課題と「海洋資源調査技術の開発」課題参加の民間課題の担当者を交えた骨子策定のための議論がすでに始まっています。ここでは、現時点での目指す「調査技術プロトコル」の概要イメージを紹介します。もちろん、このプロトコルは、SIPの研究開発期間を通じて、あるいは、それ以降も調査の進展による新たな知見を取り入れて精緻化されていくものであり、あくまでも、第1歩のたたき台と称すべきものです。

調査技術プロトコルは、後述するように、最終的には成因モデルを利用して科学的根拠を基にした、広大な海洋底から有望な海域を絞り込む手法から、概査、準精査、精査まで、一気通貫で調査を進めるための技術・手法を記した手順書となるべきです。プロトコルを利用して、各民間企業・団体が海底資源調査を行い、海底資源の有望海域を調査、絞り込むことが可能になるでしょう。ただし、このプロトコルは、実際に鉱床を発見、鉱量を評価、あるいは、開発を行うことを目的としたものではありません。すでにこの報告集で記してきたように、本成因課題では、概査に入る前の有望海域の絞り込みに始まり、成因モデルを構築して技術開発の課題と共同で、概査から準精査へ、準精査から精査への絞り込みにどのような指標が有効かを示します。また、その指標を導き出すためのデータ取得手法、その解析方法を利用者に使いやすい形で整理したものとなります。言い換えると、データの解釈を地質状況に基づいて提供する解法の手引きあるいはヒント集のようなものとも言えるでしょう。

私たちが現時点で考えているプロトコルに関し、成因モデルによる海域の選定から精査に至るまでの各ステージにおいて、調査によって得られる調査項目やデータ等を示した原案を図に示します。これらは、現時点ではたたき台に近いものであり、今後の研究開発によって新たな取得すべきデータが加わることもあり得ると同時に、逆に不要になる調査項目もあり得ます。図では、絞り込むエリアの面積に対応して調査の段階を概査、準精査、精査とに分けています。

海底資源調査の第一段階は、前節でも触れましたが、成因研究で得られる科学的知見を最大限利用して広大な海洋底から有望海域を絞り込み、概査を行う海域を設定することです。概査では船舶と、「海洋資源調査技術の開発」課題で進めているAUV複数機運用による広域調査によって得られるデータを解析し、成因モデルによって解釈し、準精査に進む海域を絞り込みます。準精査では、水平方向の異常値（アノマリー）を検出するために、民間企業「次世代海洋資源調査技術研究組合（J-MARES）」で開発を進めている地震波調査

（ACS）、第三章第4節で解説した自然電位計測による海底下の熱水域ないし鉱化帯の検出が有効であることがこれまでに明らかになってきています。さらに、地球統計学を利用し、それまでの段階で得られたデータの、特に相関関係を解析することで、絞り込みのために有効な指標を見出すことを目指しています。これらの調査において異常値が見出された海域について、次の精査において深さ方向の構造が把握できれば面からボリュームへと情報が拡張されることになります。ここでは、精密な地震波構造調査が有望な調査手法のひとつです。例えば民間企業連合のJ-MARESによる鉛直係留式観測による地震波構造調査（VCS）は海底下構造を比較的小規模な観測によって3次元でイメージ化できます。これに掘削による検層データを統合すると、鉱化帯を示すことが可能です。また、第三章2節で触れるように、掘削コアを対象とする分析・解析は、成因モデルの構築のために重要な作業であると同時に、岩相層序・各種地球物理学的パラメーターの具体例として、精査の段階で海底下の構造を把握するには非常に有効であることは言うまでもありません。こうして精査が完了した段階では、開発候補となる海域の地下構造が把握されて、開発を目的としたボーリングが行われていくことを想定しています。

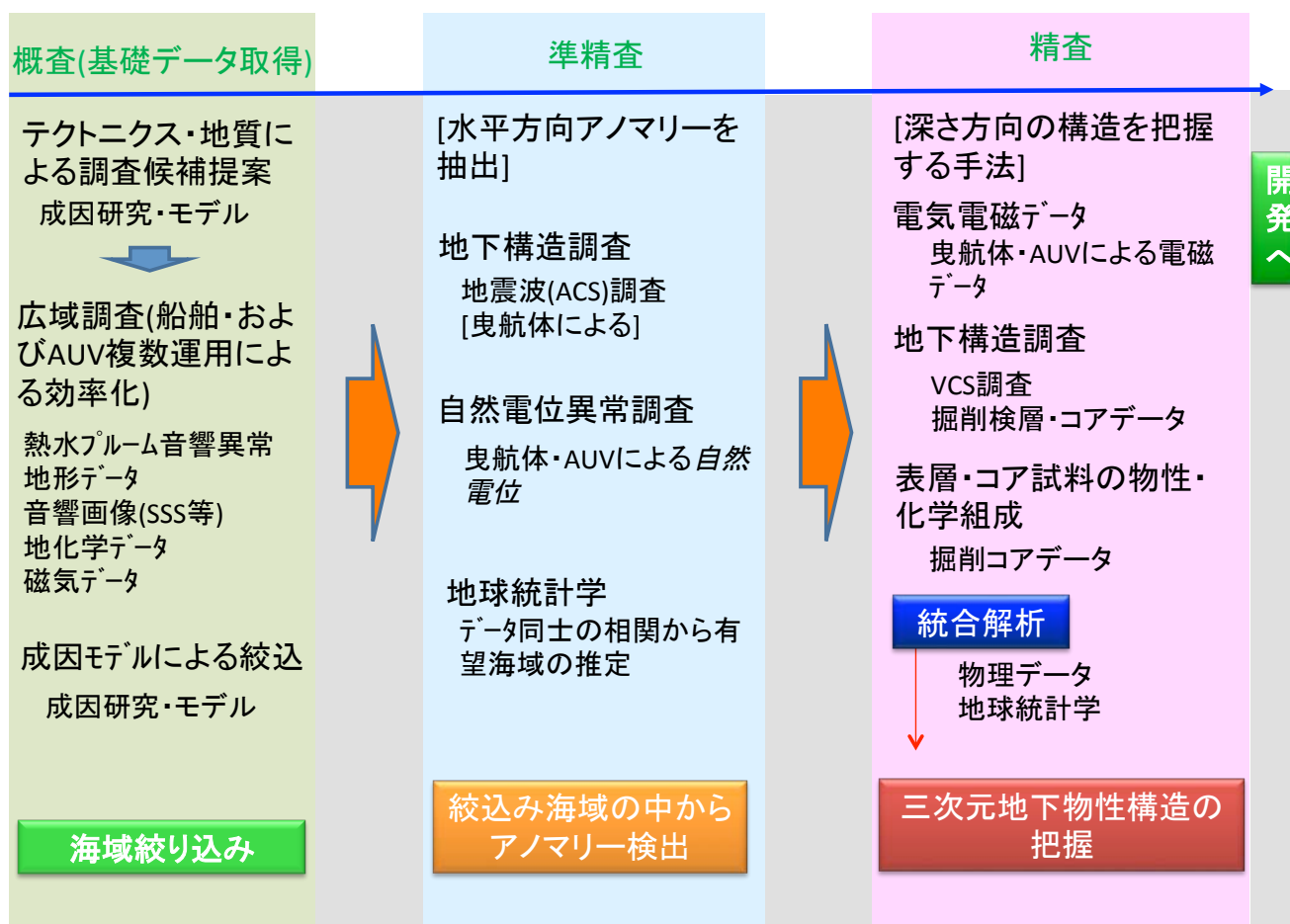


図 『調査技術プロトコル』における概査・準精査・精査の一連の調査案。

調査技術プロトコルに基づく「統合的調査システム」

本章第1節では、様々なテクトニクス場から有望海域を限定するための科学的根拠や、既存の公的機関のデータをもとに、特定のテクトニクス場・海域から調査範囲を特定するための手がかりを明らかにする必要がありますが、これは成因モデルに限定される課題というよりも、むしろ「調査技術プロトコル」の最初の段階である、調査候補海域・概査海域の絞り込みに必要な調査技術そのものであると言えます。ここで重要なことは、既存の科学的知見を整理して示すだけではなく、伊平屋北フィールドの成因モデルの知見を踏まえて、より精度・確率、そして信頼性の高い、「次世代の手法」を開発することです。このことはつまり、第I章でも解説した通り、第一線の基礎研究の成果としての科学的知見なしに次世代の調査技術開発は

あり得ないことを意味します。加えて、本SIPプログラム全体の狙いを達成するためにも、民間企業等の調査技術に速やかに一貫通貫で反映させることが、世界に打って出ることのできる海洋資源調査産業を創出するために肝要であることを示しています。したがって、この点において、科学的研究を学術的成果に終らせないために、「海洋資源調査技術の開発」に従事する民間企業等と共同で調査・実海域試験を行い、技術移転を加速していくことが今後の重要な課題の一つであるといえます。「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」課題では、すでにこの民間企業との共同調査を始めており、一部の技術に関しては実海域での調査を利用して、技術移転を始めています。本資料集のトピックスにその様子が紹介されています。



調査技術プロトコルを基にして、本SIPプログラムでは、概査から精査まで連携して一貫通貫に調査を行う「統合的調査システム」を計画しています。これは、本SIPプログラムで研究開発した技術・手法を利用して、民間企業が中心となって行う一連の調査航海です。この実施内容には、本SIPプログラムで開発したデータ取得技術、その解析手法を含み、図で示した「(現段階での)調査技術プロトコル案」を試みたものと言えます。今2016年度にこの統合的調査システムを前倒して実施する計画をSIPガバニングボードに提出し、追加予算が認められ、統合的調査システムの一部調査を、民間が主体となって伊是名海穴海域において実施します。この調査は、SIP「次世代海洋資源調査技術研究開発」で実現する調査のシミュレーションであり、現場で見出された問題点は本SIPプログラムの各課題にフィードバックされ、さらなる技術開発を進め、その過程で成因モデルもさらに精緻化され、「調査技術プロトコル」の策定に活かされることが期待されます。

『次世代海洋資源調査技術』実用化にむけた今後の課題

本プログラムでは、今後、「調査技術プロトコル」を策定すること、その実海域での検証のための航海によるデータ取得、解析を計画しています。その実用化に向けては、いくつかの課題があります。成因研究

(成因モデル)に関しては、SIP期間を通じて、さらに信頼度の高いものを目指して改良を続けます。それが鉱床モデル、および、調査技術プロトコルをさらに利用しやすいものに向上させることは先述したとおりです。すなわち、この成因モデルを利用した絞り込み手

法、データ解析手法の高度化、精緻化をさらに進め、本プログラムで目指す調査技術をより信頼性の高い強固なものに構築していくことが重要です。本成果集は2016年6月までに得られた成果を解説したもので、すでに「調査技術プロトコル」に貢献する多くの成果が得られていることを紹介しています。引き続き研究開発を進め、その成果をさらに成因モデルに取り込み、低コスト・高効率での調査を可能にする調査技術・手法をまとめあげていきます。そして、もうひとつの課題は、開発した技術・手法をいかにして民間に技術移転するかという点です。現時点では手探りの状態ではありますが、すでに今年度2016年度の2航海

(JAMSTECのYK16-10「よこすか」「YKDT」「うらしま」中部沖縄トラフ、および、YK16-12「よこすか」「しんかい6500」「YKDT」中部沖縄トラフ)において、概査、準精査、精査それぞれの段階に有効に応用でき、かつ、安価で簡便な手法として自然電位観測技術について、民間調査会社が組織する「海洋調査協会 (JAMSA)」の技術者に技術移転を行い、JAMSAの技術者がこれらの調査データを得ることが可能になりました。実際に、2016年10月～11月に沖縄トラフ伊是名海穴で実施された、上述の統合的調査システム前倒し航海において、成因研究の技術研究者の立ち会いの下、JAMSAがこれら自然電位、電気電磁探査を実施して有用なデータを得ています。本SIPプログラムでは、今後の研究開発の進展の過程で、成因研究で新たに開発された、航海における調査技術のみならず、データ解析技術も含めて、技術と手法の民間移転を加速させていきます。



トピックス：地球深部探査船「ちきゅう」によるSIP掘削航海

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)のもとで、これまでに2次の航海が行われました。2014年7月のCK14-04航海には、伊平屋北海丘での大規模熱水溜まりの検証を目的に、3機関から20名の研究者が参加しました。引き続き2016年2月～3月のCK16-01航海では、5機関から42名の研究者が参加し、近年発見された活発な熱水活動域である伊平屋小海嶺南麓の熱水サイトと伊平屋北海丘に長期間のモニタリング装置を設置し、前航海同様の掘削同時検層とコア採取を行いました。



地球深部探査船「ちきゅう」。清水港にて（CK16-01航海）。



SIP掘削調査航海では、掘削同時検層（LWD）の際に高温の熱水から検層機器を守るため、ドリルパイプの継ぎ足しの際にも船上からの海水の注入を止めない、ノンストップ・ドリラーシステムを採用した。



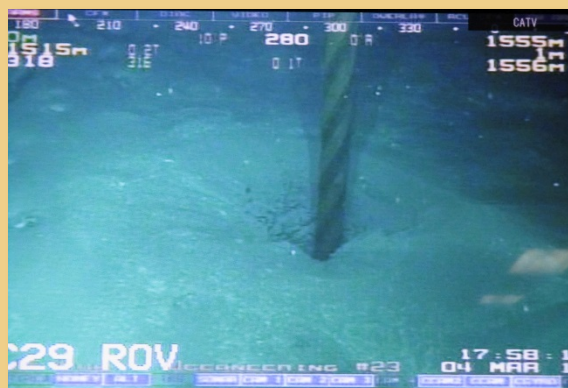
LWDのリアルタイム結果に注目する乗船研究者（CK14-04航海）。



掘削同時検層(LWD)では、ドリルパイプ先端付近にセンサーを装着して掘削する(CK16-01航海)。



CK16-01航海では、ドリルパイプに変質岩が詰まり掘削が難航した。



掘削中のドリルパイプの様子はROVで随時監視した（CK16-01航海）。



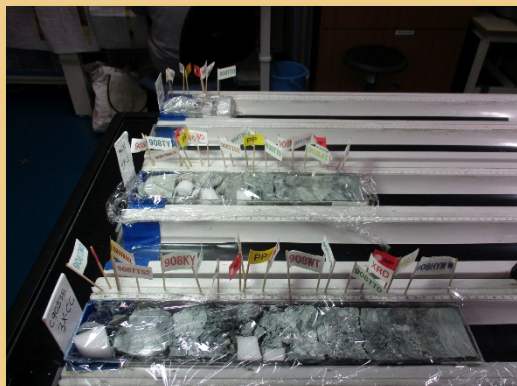
ドリル・パイプからリグフロアに溢れる熱水。海底下の帽岩（キャップロック）を貫いた（CK16-01航海）。



ドリルビット（CK14-04航海）。



船上での肉眼観察作業（CK16-01航海）。



掘削コア試料は、船上での記載・分析の後、各研究機関によって詳細な研究が行われる。旗は、そのための試料採取の希望位置を示している（CK16-01航海）。



船上での間隙水の絞り出しのための作業（CK14-04航海）。



シールドルームにおいて行われた、誘導分極特性の計測の様子（CK16-01航海）。



掘削ではコアから発生する硫化水素ガスに対する万全の体制で臨んだ。



地球化学ラボにおける間隙水組成の分析作業の様子（CK16-01航海）。

第Ⅲ章

調査手法・調査技術確立にむけた取り組みとその狙い -伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドにおけるこれまでの成因研究成果-

第Ⅰ章では、本SIPプログラムについて紹介し、海底熱水鉱床の成因に関する科学的研究の目的と概要について概説しました。第Ⅱ章では、成因モデルの現状での理解と『次世代海洋資源調査技術』確立に向けた今後の取り組みと課題について述べました。この第Ⅲ章では、本SIPプログラム発足以降、第3事業年度までに、地球深部探査船「ちきゅう」を用いた科学掘削をはじめ重点的に検討を進めてきた伊平屋北海丘・伊平屋小海嶺フィールドを中心とした海域における、調査手法・調査技術開発にむけたこれまでの成因研究の取り組みと狙い、現状での理解・進捗を紹介します。

本章で紹介する取り組みの大部分は府省連携の枠組みのもと、共同研究として実施されています。本章の各論の執筆者は、それらの共同研究者を代表して取り組みを紹介しています。本章の内容は本SIPプログラムの第3事業年度時点での中間的な進捗を示すもので、今後の研究開発の進展にともない内容が修正される可能性があります。

本章の各論の取り組みは多岐にわたるため、便宜的に「地形・地下構造調査にもとづく検討」、「岩石・堆積物試料の性質・成因解析にもとづく検討」そして「熱水（流体）挙動の解明にもとづく検討」の3つのブロックに分けて紹介します。

地形・地下構造調査にもとづく検討



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

国立研究開発法人産業技術総合研究所

池原 研・山崎 徹

海底鉱物資源調査の基礎データとしての海域地質情報

鉱物資源は地球の様々な活動により、地下あるいは海底を含む地表の岩石中に有用元素が濃集されて形成されます。このうち採掘して商業的に採算のあうものが厳密な意味で鉱床と呼ばれます。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、ここには海底熱水活動に伴う塊状硫化物やコバルトリッチクラストなどの数多くの有用元素濃集域の存在が知られていますが、この広大な海域から鉱物資源の賦存有望域を絞り込み、鉱床の鉱量や品位の確認を行って鉱床を特定することは容易ではありません。まず、我が国の海底鉱物資源有望海域は数千km²規模ですが、ここから調査船や探査機が短期間に調査可能な数百km²規模に絞り込む必要があります。この絞り込みは、それぞれの資源の形成機構や有用元素の濃集メカニズムなどの成因を考慮した地質学的・地球科学的根拠に基づいた手法によるしかありません。

海底熱水鉱床の有望海域絞り込みに関していえば、我が国周辺海域の海底地質・地質構造の解明とそれに基づく海底火山活動集中域の選定が第一段階となります。産業技術総合研究所（産総研）の作成する海洋地質図（図1）や海上保安庁海洋情報部の作成する海底地形図はこの第一段階の選定の基礎となるデータになります。海洋地質図の情報はまず第一に広大な海域から集中した海底火山活動のない対象外の海域を除くことを可能にします。さらに、海底火山活動のある場では、その場における基盤岩の特徴から存在しうる鉱床タイプを推定することができます。例えばマグマの性質や水深の違いを反映した火山活動の様式の違いは海底熱水鉱床の存在ポテンシャルや規模、存在しうる有用元素に影響を与えると考えられます。火山活動の時期や堆積物供給量の違いは鉱床形成後の埋没過程の違いを生じさせます。また、詳細な海底地形や地質構造の情報は、断層系の分布や配列様式の概要把握を可能にし、基盤地形の様相の推定も可能にすると期待されます。

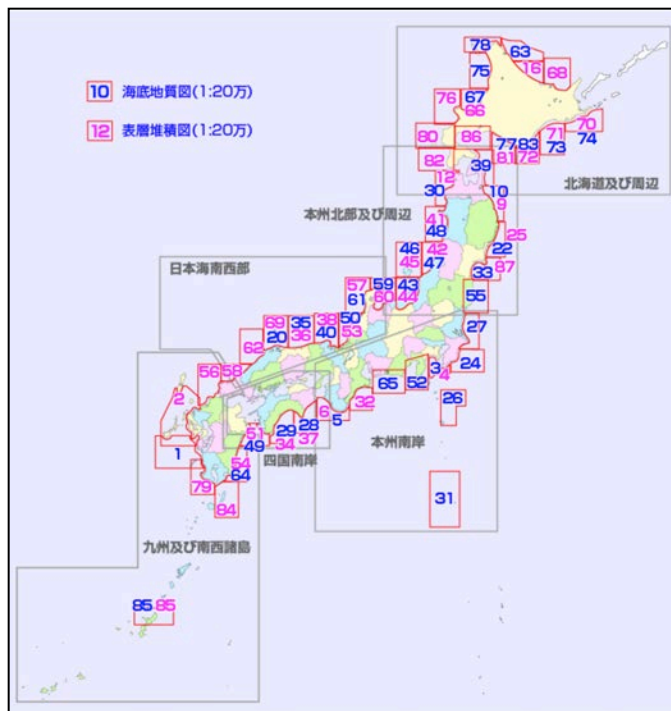


図1 産業技術総合研究所で出版している1/20万海洋地質図の範囲。

沖縄トラフを例に、より具体的に見てみましょう。活動的な背弧海盆である沖縄トラフではトラフのリフティングの軸とそれを横切る断層の接合点付近、古い火山活動による高まりにある断層によるクレター、及び島弧-海溝系に支配される海底火山列の海底カルデラ等で熱水活動の存在の可能性が指摘されています（原口・児玉、2007）。このことから、海底下の地質構造や断層系と、海底火山やカルデラの分布を把握することが沖縄トラフに存在する未知の熱水鉱床の発見につながると期待できます。

以上のことを逆に考えると、海域地質情報をもとに有望海域を絞り込むためには、鉱床形成とその周囲の地質構造発達史との関係を理解する必要があります。そして、それを明らかにする作業が成因研究にほかなりません。

海底熱水鉱床の存在海域の絞り込みのための海域地質情報の整備とデータベース化

産総研で作成している海洋地質図は2016年8月末時点で、87枚の地質図が出版されています。日本周辺海域の海洋地質図は8枚の1/100万海底地質図として出版済みであり、より詳しい1/20万海洋地質図のシリーズが50区画75枚出版されていて、沖縄周辺海域の調査が継続中です（図2）。これらの地質図は国土の知的基盤情報整備の一環として作成され、海底鉱物資源の評価のみを目的としたものではありませんが、系統的・網羅的に取得された地質情報を地図として表現したもので、上記の絞り込みのための基礎データになります。ただしこれらはある決められた区画毎に作成されているため、より広域的な情報の把握・解析はしに

くいかもかもしれません。海底鉱物資源の総合的な評価のためには区画に縛られないシームレスな情報として整備していく必要があります。また、海洋地質図作成のために取得された海底地形、地質構造、岩石、堆積物、重磁力など膨大な量の地質情報がありますので、これらを有効に利用することが重要です。このためにはより使いやすいデータベース化の作業が必須です。さらに、他機関の調査データと融合させることも重要です。このような、産総研をはじめとした公的研究機関の持つ既存の地質情報は、本SIPプログラムで推進している成因研究にもとづく次世代の有望海域の絞り込み手法開発の基礎データ（バックグラウンド知的財産）として、また将来的に、開発された手法を用いて民間企業等が地質情報に基づいた有望海域の絞り込みを実施していく際にも広く活用されると期待されます。

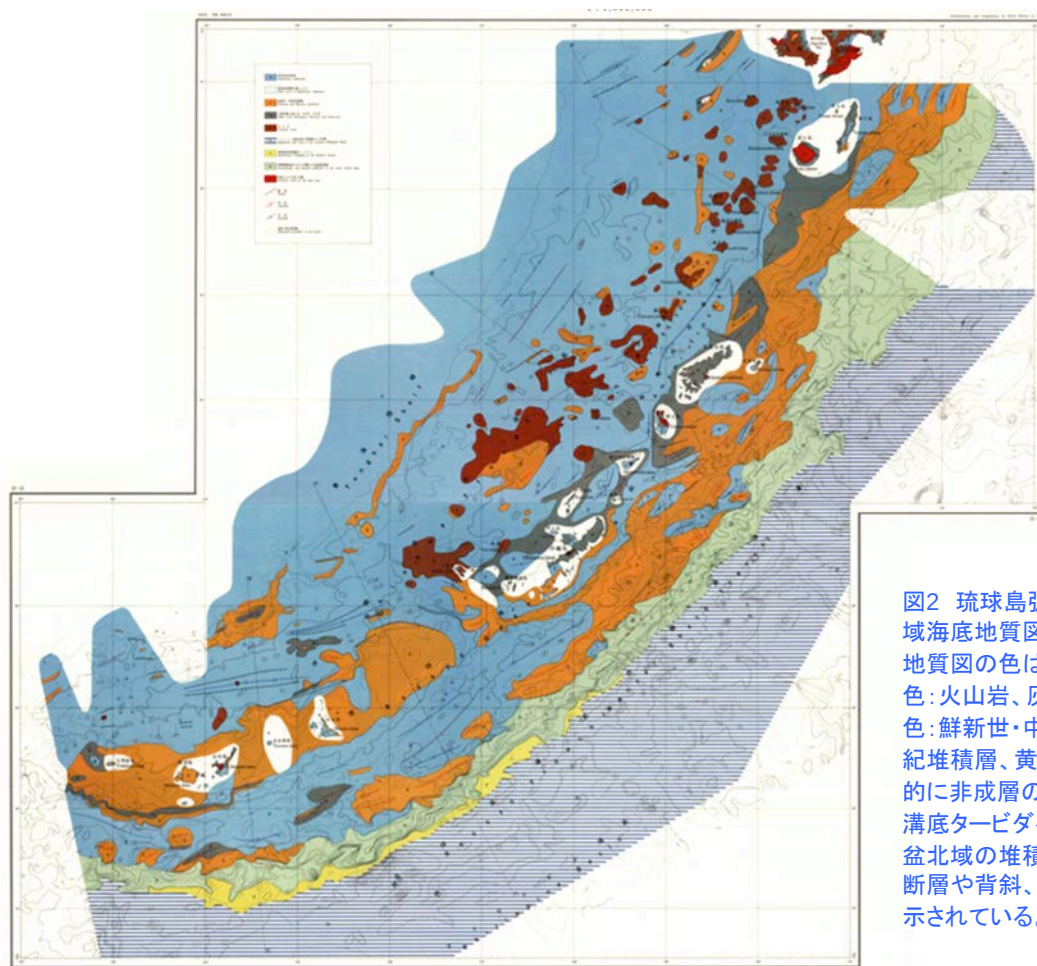


図2 琉球島弧周辺海域の1/100万広域海底地質図(本座、1977)。
地質図の色は以下の岩層を示す。茶色: 火山岩、灰色: 古期岩類、オレンジ色: 鮮新世・中新世堆積層、水色: 第四紀堆積層、黄緑: 陸側海溝斜面の音響的に非成層の堆積層、黄色: 第四紀海溝底タービダイト、青横線: フィリピン海盆北域の堆積物及び岩類。このほか、断層や背斜、向斜構造の位置と方向が示されている。

参考文献: 原口 悟・児玉敬義, 沖縄トラフの海底熱水鉱床, 地質ニュース, no. 634, 10-14, 2007.
本座栄一, 琉球島弧周辺広域海底地質図, 海洋地質図, no. 7, 地質調査所, 1977.



伊平屋北海丘の水理地質モデルを構築する 地震探査と掘削データの統合に向けた解析手法の開発

国立大学法人九州大学
辻 健

水理地質モデルを構築する重要性

熱水鉱床の成因を解明するには、熱水循環をコントロールしている地質構造を明らかにすること、さらにその水理地質モデルを構築することが重要と考えられます。私たちは、地震探査データと掘削データを統合する新しい解析手法を導入することで、熱水循環域の地質構造や、その水理特性を明らかにすることを試みています。特に、沖縄トラフの伊平屋北海丘周辺で精力的に取得されてきたデータを利用して、熱水貯留層周辺の岩層分布や浸透率、亀裂の空間分布などを明らかにし、熱水循環経路の空間分布を調べています。

水理地質モデルの構築手法の開発

伊平屋北海丘周辺では、これまでに反射法地震探査データが高い密度で取得され、熱水循環をコントロールしている地質構造（図1 a）や、その三次元的な分布が調べられてきました（図2）。例えば、熱水の循環経路となる層状構造（図1 c）や、熱水挙動に強い影響を与える軽石（パミス：多孔質岩石）の空間分布（図1 d）などが、反射断面図にみられる反射面の特徴から明らかとなりました。さらに地震探査で明

らかとなってきた地質構造（図1）に対して掘削を行い、物理検層データを取得しました。掘削で得られた結果（検層データ）は、反射断面図で解釈されていた地質構造と良い一致を示し、海域の熱水循環域でも、反射法地震探査が有効であることが示されました。

私たちは、掘削データを反射法地震探査データと統合する手法として、波形インバージョンを用いています。この手法を使えば、熱水循環域の弾性波速度構造を高解像度に推定することができます（図3）。一方、この波形インバージョンを実施するには、掘削サイトにおいて弾性波速度が測定されている必要があります。しかし伊平屋北海丘で実施された検層オペレーションでは、弾性波速度のデータが取得されていません。また岩石コア試料の回収率も悪く、試料を用いて深度方向に連続的な弾性波速度を得ることはできません。そこで熱水循環域での別の検層データ（電気比抵抗データ）から、弾性波速度のデータを擬似的に構築する手法を新たに開発しました。一般に熱水域では孔井が不安定であるため、検層による弾性波速度の測定は難しく、今回のように限られた検層データから弾性波速度を推定する手法が重要になると考えられます。波形イ

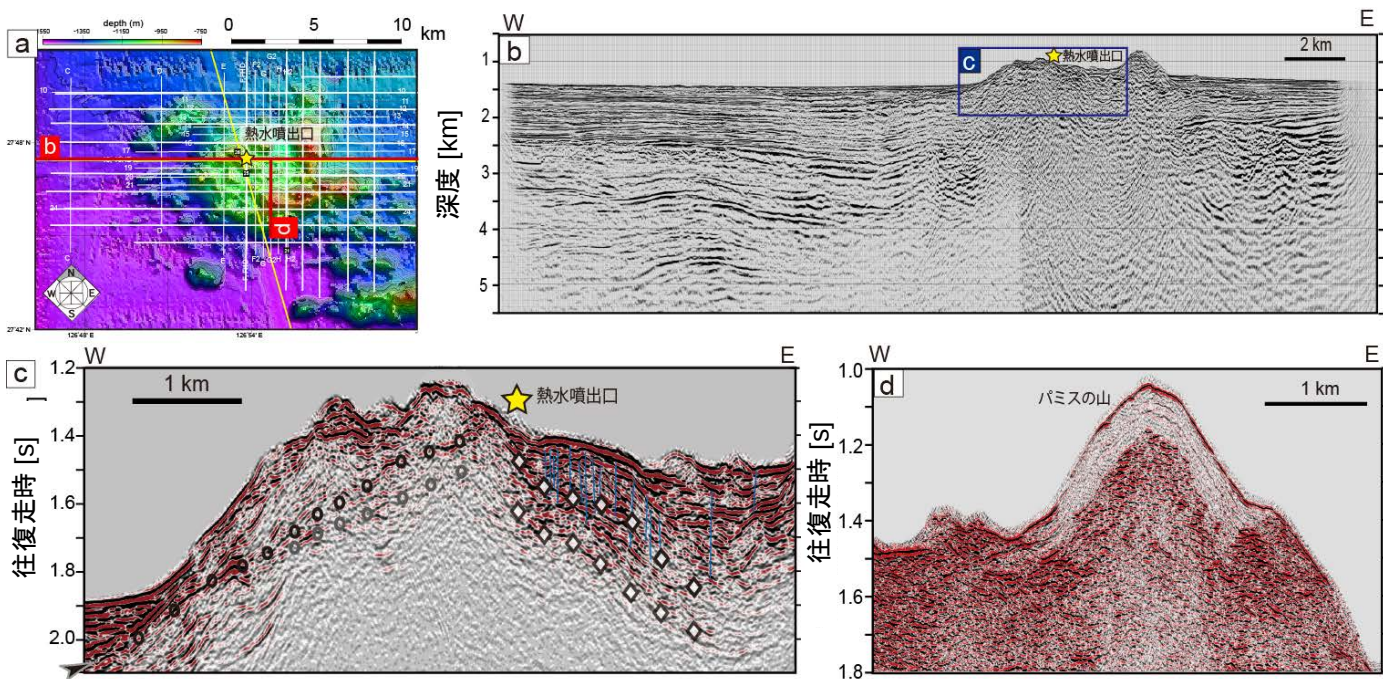


図1 伊平屋北海丘の熱水フィールド周辺の反射断面図。海底地形図 (a) の白線は反射法地震探査の測線の位置で、赤線は反射断面図 (b) と (d) の位置を示す。断面図 (c) に、熱水噴出域周辺に特徴的な層構造を確認できる。断面図 (d) には、伊平屋北海丘に普遍的に見られる軽石の山（低い振幅）を確認できる。(Tsuji et al., 2012を改変)

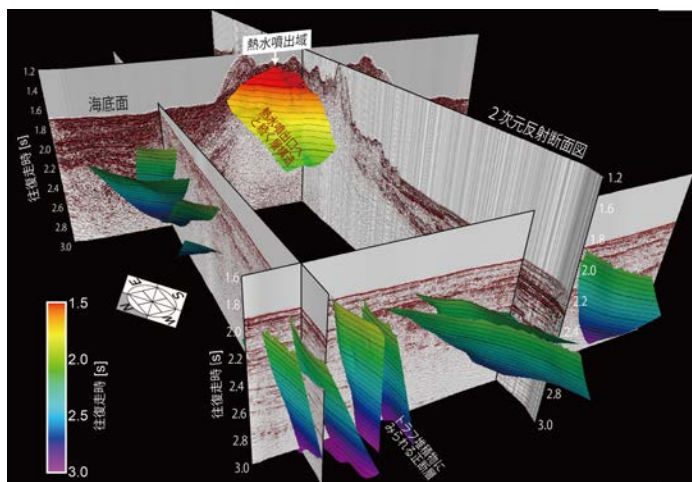


図2 伊平屋北海丘の熱水循環をコントロールする地質構造の三次元形状。グリッド状に取得された反射法地震探査データ(図1)を使って抽出した。(Tsuji et al., 2012を改変)

ンバージョンの解析は現在も進行中ですが、一般的な解析では検出できないような高解像度の弾性波速度構造を推定することに成功しています(図3)。

今後の展開

伊平屋北海丘周辺では、反射法地震探査データが、東西・南北方向に(グリッド的に)取得されています

(図1a)。それら全ての地震探査データに対して、波形インバージョンを適用し、高精度の弾性波速度構造を抽出します。さらに、そのグリッド的に得られた2次元の弾性波速度構造を内挿することで、3次元的な弾性波速度モデルの構築を目指しています。

貯留層での熱水流動を計算するには、図3に示するような弾性波速度モデルではなく、間隙率や浸透率の空間分布(水理地質モデル)を構築する必要があります。そこで岩石物理モデルを用いて、弾性波速度から水理地質モデル(間隙率・浸透率モデル)の構築を行います。弾性波速度(弾性特性)から浸透率(水理特性)を推定することは一般的に困難と考えられていますが、本研究ではデジタル岩石物理といった新しいアプローチを使って、それを克服しようと考えています。

最終的に、本研究で構築した水理地質モデルに対して、鉱物化を考慮した熱水挙動シミュレーションを適用します。鉱物沈殿過程による水理特性(間隙率や浸透率)の時間変化を考慮するためのスキームを導入することで、鉱床が成長する条件を明らかにします。特に鉱物化を考慮した熱水挙動シミュレーションでは、実験で得られる地球化学的指標の空間変動の再現を目指すことで、時間変動を含めた熱水化学反応の解明を進めます。

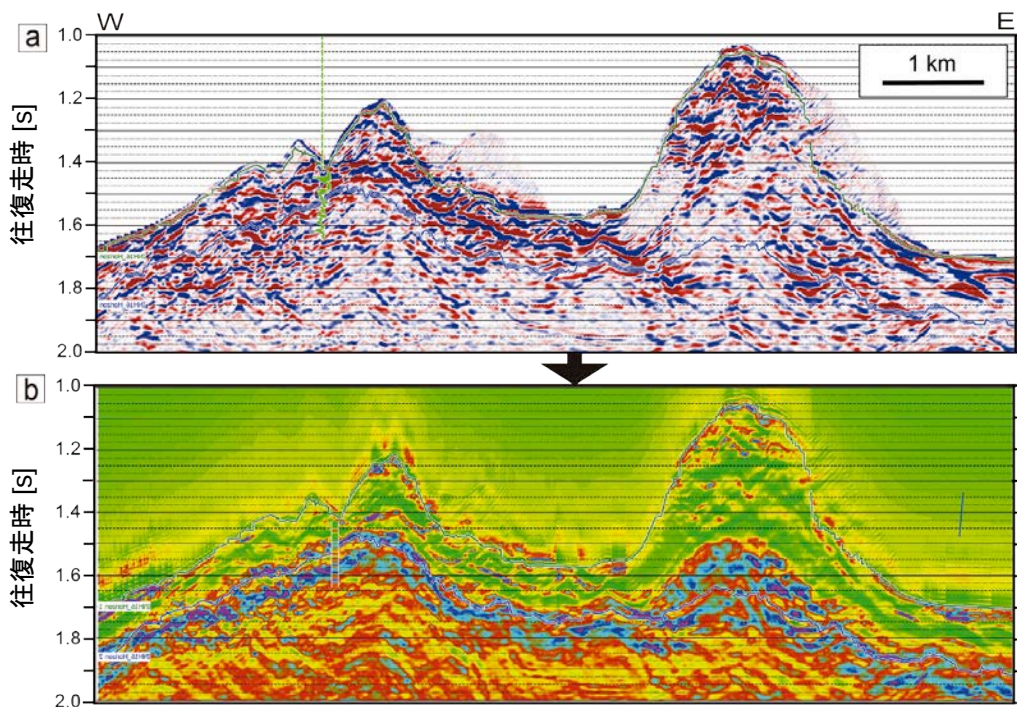


図3 掘削データを統合して得られた高解像度の音響インピーダンス構造の結果。(a) オリジナルの反射断面図。(b) 波形インバージョンで得られた弾性波速度(P波速度)構造。寒色で示されている部分が、弾性波速度の速い地層を示し、それが水平方向に連続していることが認められる。

弾性波速度
速い
遅い

参考文献: T. Tsuji, K. Takai, H. Oiwane, Y. Nakamura, Y. Masaki, H. Kumagai, M. Kinoshita, F. Yamamoto, T. Okano, and S. Kuramoto, Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa Trough based on seismic reflection data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **213-214**, 41-50, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.11.007, 2012.



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

国立研究開発法人産業技術総合研究所
井上 卓彦

海底鉱物資源賦存域広域調査の現状

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となります。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、ブ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考えられます。

現在、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ます。調査船による概査では、天候等の変化に強く、広範囲の調査が可能であるものの、得られるデータの分解能は5~20mと比較的粗くなります。一方、AUVやROV等を用いた精査では、分解能の高いデータ（数mm~数10cm）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ります。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たりがあり、広域海底鉱物資源ポテンシャル域の把握や確度の高い地質情報取得の阻害要因となっていました。これらの要因を排除するには、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ること、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になります。そこで、産業技術総合研究所（以下、産総研）では、この概査と精査を繋ぐ「準精査」レベルの調査を実現する機器として深海曳航型海底表層音波探査システムを導入しました。

調査機器及び研究開発の概要

今回の機器導入の目的は、海底微地形を含む海底表層部の音響データを用いた効率的な調査手法の成因研究の観点からの高度化です。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ノウハウを構築する必要があります。

今回、産総研で導入した機器は深海曳航装置 EdgeTech社製2400DT-2（図1）です。深海曳航装置

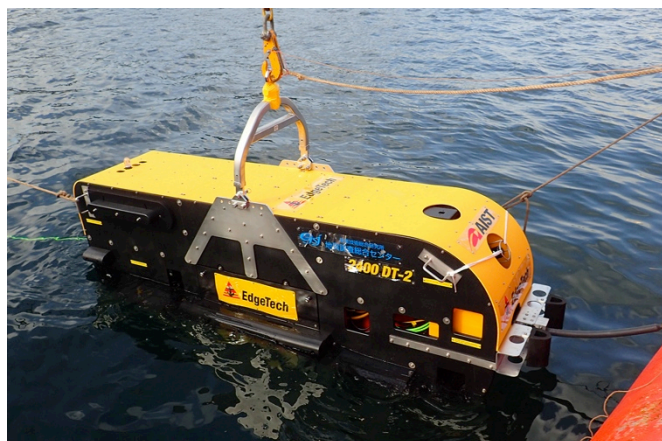


図1 産総研が導入した深海曳航探査機2400DT-2の概観。
大きさは幅約90cm×長さ330cm×高さ120cmで空中重量が約1200kgである。

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す。

2400DT-2はサイドスキャンソナー、インターフェロメトリ方式測深装置（スワスバシメトリ）、サブボトムプロファイラー、CTD、動揺センサー等が搭載されており、全てのデータを一元的に取得可能となっています。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、実際の調査ではGEOMETRICS社製G-882を後部に接続することで、海底面近傍からの全磁力データを同時に取得しました。

2400DT-2を導入するにあたり、産総研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、導入のしやすきなどを考慮し、いくつかの特別な機器の仕様変更を実施しました。そのうちのひとつは120kHz帯を用いたインターフェロメトリ測深機の開発・搭載です。これにより分解能は若干落ちるものの、一度に取得できるデータ幅が広くなり、より広範囲の熱水噴出やその周辺の下底表面の状況を把握することが出来ます。

もうひとつは船上送信データ容量の圧縮です。深海曳航装置が海底近傍で取得したデータは有線で船上に上がってきます。その際、スワスバシメトリ地形データは測点数が多く、データ容量が大きいいため、データ

送信のボトルネックになっており、深海曳航探査装置でスワスバシメトリ調査を実施する際には高価な光ファイバケーブルを導入する必要がありました。そこで、産総研では初期投資が比較的安価で、導入しやすいアーマード同軸ケーブルで運用できるよう、地形データを曳航体内の耐圧容器で簡易処理し、データを圧縮して船上に送信できるようにしました。これらの2点を実現できる深海曳航装置は現状で産総研のものが世界唯一です。

これまでの成果

深海曳航機の実地試験調査を、産総研によって熱水活動が発見された硫黄鳥島堆周辺海域^{注1}で実施しました(図2)。調査には5,000 m長のアーマード同軸ケーブルが設置された民間調査船を使用しました。

天候や機器トラブルにより調査できた測線は限られましたが、詳細な海底地形や海底面の状況が把握できる海底音響画像を得ることが出来ました。また、これまで船上からのマルチビーム測深では捉えられなかった水中音響異常を、新たに捉えることが出来ました

(図3)。このことは、深海曳航機器調査により、伊豆小笠原弧周辺海域などのこれまで船上からの音響観測で熱水噴出域を把握できなかった海域でも、水中音響異常を指標として、より多種多様な熱水噴出域を把握することが出来ることを示唆しています。

今後、さらにさまざまな海域で調査を実施し、水中音響異常とそれぞれの海底の状況の比較、また各種のセンサー類との併用により、より詳細な熱水噴出点の分布や海底表層部の地質条件などを明らかにしていく予定です。

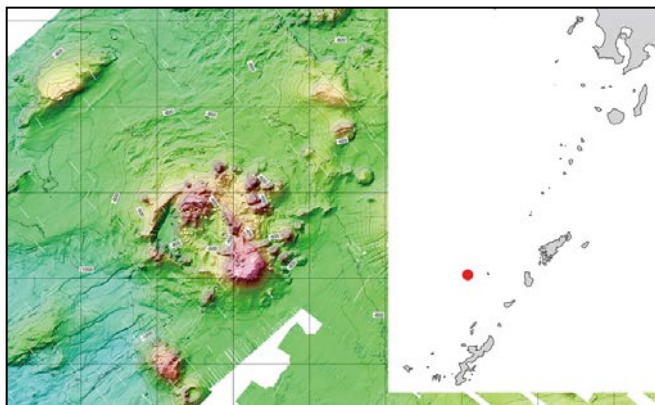


図2 調査を実施した硫黄鳥島堆の位置と海底地形図。図は2014年3月産総研プレスリリースの図を一部拡大。右図の赤丸が硫黄鳥島堆の位置を示す。

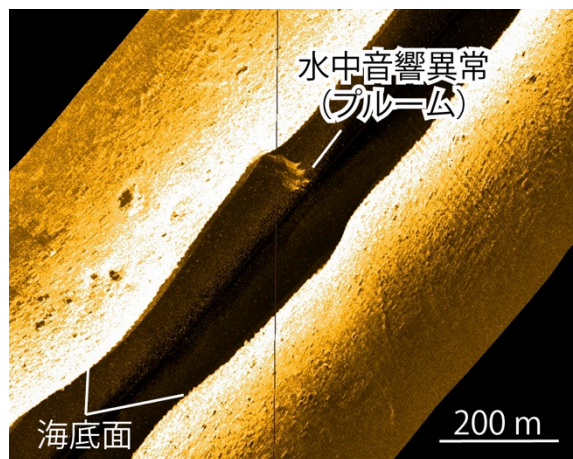


図3 硫黄鳥島堆で得られたサイドスキャンソナーによる音響画像。得られたデータの幅は約800mである。黄色から白で示された部分が海底、その間の黒い帯が水中からの反射データを示す。ここでは水中へ噴出するブルームが捉えられている。

将来の可能性・今後の課題

これまでの実施試験において今後解決すべき課題がいくつかありました。第1に調査機器の取り扱い技術についてです。2400DT-2は単独での深度調整機能がないため、曳航ケーブルを上げ下げすることにより深度調整を行います。海底熱水鉱床賦存ポテンシャル海域のような海底火山地帯での調査では、海底面からの高度を維持するために、頻繁にウインチ操作をする必要があります。しかし、現状調査時のウインチ操作は作業員の「感覚」が頼りになることもあり、今後、調査を実施する際のマニュアル作成を進めるとともに、海洋調査機器を運用するための人材育成が急務となっています。またそれと同時に機器側にも機器の位置精度の向上や深度調整機能として調整翼の装備など、安全運用に関する検討を今後進める予定です。

第2に、深海曳航機の姿勢の安定についてです。深海曳航装置はその水中での姿勢により、データの精度及び確度にバラつきが生じます。昨年度は水中でのバランスが悪く、サブボトムプロファイラーの記録が芳しくありませんでした。この機器の姿勢については、現在機器のバランスを確認しながら改善しています。

今後もこれらの精度・運用技術向上をさらに進めるとともに、調査産業創出にむけた民間へのノウハウの技術移転を目指します。

注1: 2014年3月産総研プレスリリース；http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140306/pr20140306.html



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法の確立

国立研究開発法人海洋研究開発機構
笠谷 貴史

電磁気学的手法による物理探査技術の役割

電磁気学に基づいた物理探査法では金属鉱床が低比抵抗（あるいは逆数の高電気伝導度）としてイメージングされるため、陸上の金属鉱床探査において、電気探査法や各種の電磁探査法による調査が行われ、鉱量推定に大きな役割を果たしています。近年ではヘリなどを用いた電磁探査も多く用いられています。一方で、海域では、東太平洋海膨や大西洋中央海嶺において、送受信アレイを潜水艇で設置、あるいは海上の船舶からウィンチで海底を曳航するなどの方式で先駆的な電気探査や電磁探査が行われました。国内でも海洋研究開発機構（当時は海洋科学技術センター、以下機構）で開発した曳航式電気探査装置を用い、水深約1000mの海域においてメタンハイドレート探査に適用しました。近年、石油や天然ガスの探査では曳航式の電源によるコントロールソースEM法（CSEM法）が用いられるようになってきましたが、海底での金属鉱床に関する調査を実施するのに適切な手法が確立されているとは言えない状況でした。その後、京都大学と機構では水中に電流を流す電気・電磁探査手法を、早稲田大学では過渡応答を利用するTEM法をベースとした手法をそれぞれ開発し、実海域での観測試験を行われ、それらの技術をベースにした探査法の適用を試みています。一方で、実際の資源探査では、最終的に掘削試料を用いた評価が重要であり、効率的な掘削計画に必要な情報を迅速に物理探査が与えることは重要と思われます。そのため、これまでに開発した手法、試験観測で得られたあらゆる知見を元にした、効率的な探査法の確立が求められています。

開発した観測機器の概要

開発した観測機器は、電流を送信する人工電流源と、その送信信号を受信する受信機（電位計：OBE）を中心に構成され、これまでに開発された機器をベースに多くの改良や必要な技術開発を重ねてきました。図1は送受信の組み合わせの形態の一例です。人工電流源は様々な水中航走体（曳航体、ROV、AUVなど：以下、ビークル）に搭載・運用で、受信機はビークルに搭載するのみならず、自己浮上型、ビークル設置型（図中

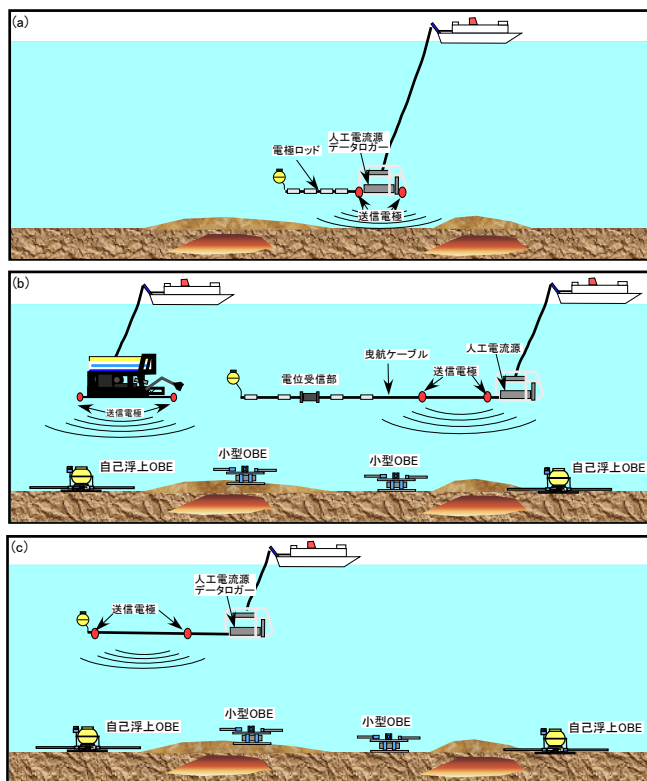


図1 電流送受信の組み合わせの例。

の小型OBE）としての運用も可能です。図2は調査時の各機器の写真で、OBEの運用形態やROV搭載時の様子がわかります。このうち、図2の(c)は、より大容量の電流送信が可能になるように開発した人工電流源専用の曳航体で、200m超の曳航ケーブルを用いた運用が可能です。図1の(b)では1本のケーブルに送受信電極を取り付けた電気探査法が、(c)ではより大きい送信モーメントでの信号送信を行い、海底に設置したOBEを用いて送受信間隔の長い電気探査法もしくはCSEM法の探査を実施できます。

最新の観測・解析結果

これまでの観測で得られた最新のトピックスは、観測される電場データに自然電位の異常が観測されたことで、その分布が鉱床とされる位置や熱水域と極めて良い一致を示します。自然電位の異常が大きく観測されることは伊平屋北海丘での試験観測時に初めて確認されました。その後の伊是名海穴におけるMR13-E02

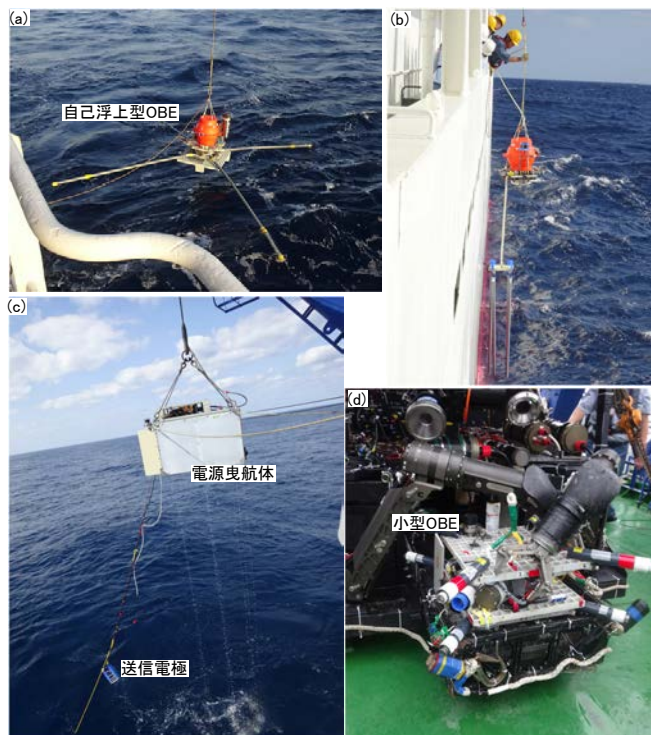


図2 調査時の各機器の写真。(a) 投入時の自己浮上型OBE。(b) 自己浮上型OBEの回収時の様子。長い電極アームは折りたたまれて回収されるため回収作業が容易(特許第4345605号)。(c) 大容量人工電流源曳航体。(d) ROVに搭載した電流源とビークル設置型の小型OBE。

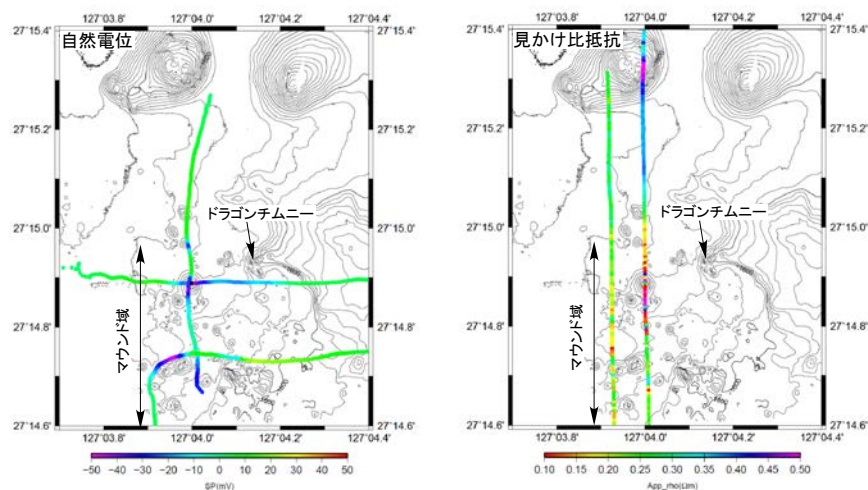
航海では図1 (a)の観測形態で30m程度の電極アレイを広域に曳航しました。図3の左図はその結果の一部を示したのですが、北部マウンドと中部マウンドの辺りで負の異常を示していることが分かります。図3の右図は、MR16-E01航海において図2 (b)の形態で200mの曳航長にて取得された電気探査結果の一例です。おおむね50mまでの深さの平均的な比抵抗値（見かけ比抵抗）を示しており、北部・中部マウンド近傍において顕著な見かけ低比抵抗異常が検出されています。電

気探査データの解析では、時系列処理によるデータ抽出、見かけ比抵抗のデータセットの作成を順次すすめており、陸上探査で一般的に用いられている解析ソフトでも、2次元解析ができることが確かめられています。3次元解析はデータ密度も含めてまだ課題が多い状況ですがノウハウの蓄積を重ねつつあります。

電磁気学的手法による物理探査の可能性と今後の展開

電気探査による比抵抗構造を用いた地下構造の可視化に加え、自然電位を用いた地下の電位分布でも可視化が可能になりつつあり、これらの探査手法に関する特許申請を行いました。充電率を用いた解析も同時に進めています。自然電位を用いた地下構造解析は、まだ評価が十分とは言えませんが、検出される自然電位異常域の空間分布だけでも熱水域・鉱床域の把握には非常に有効と言えます。また、比抵抗、充電率、電位分布という違ったパラメーターで地下を可視化することで、鉱床域が存在する可能性の高いエリアをよりの確に精度良く決めることができると期待しています。

さらに、小型のAUVでも搭載可能な人工電流源と受信機を開発しており、YK16-06航海では、AUV「うらしま」からの送信と海底のOBEでの受信、および自然電位観測に成功しています。今年度中には、小型のAUV「じんべい」を用いた電気探査と自然電位探査を実施し、小型AUVでの探査の可能性の検証を行います。現在の電気探査システムの曳航調査は、機構船舶の光・電気ウィンチによる送電と通信が前提となっていますが、同軸ケーブルウィンチでも同様の曳航調査ができるようにDSLの技術を使った技術開発を進めており、今年度中には実際の海域試験を実施予定です。さ



らには、発展型としてROVや曳航体から電極アレイをつり下げて電気探査ができるシステムも検討しており、図1の探査形態に加え探査ターゲットやエリアに柔軟に対応できるシステム構築を推進する予定です。

図3 MR13-E02航海で取得された電位データ(図1-aの観測形態でデータを取得)から求めた自然電位分布とYK15-06航海で求められた見かけ比抵抗分布(図1-bの観測形態でデータを取得)。見かけ比抵抗は最も送受信間隔が長い組み合わせを用い、おおむね探査深度50m程度までの平均的な比抵抗値を示す。



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う手法の開発

国立研究開発法人海洋研究開発機構
斎藤 実篤

海域における資源調査の困難性

海底下に伏在する資源を調査する際には、反射法地震探査や電磁気探査などによって資源濃集層の存在を推定した上で、実際に鉱体試料を直接採取・分析してその存在量や品質を評価します。陸上の場合は広域的な地表調査と多数のボーリング孔によって地下地質を詳細に把握できますが、海域では種々の制約により陸上のような密な調査は困難です。このため物理探査により推定された海底下構造と潜水船調査等による限られた地質情報を頼りに、海底掘削で鉱体を探し当てるという高コストで非効率な調査になってしまう恐れがあります。また、熱水域で鉱体の胚胎が想定される地層は変質火成岩などの硬くて脆い岩石から構成されるため、資源濃集層を掘り当てたとしても試料を回収できないというリスクもあります。このような問題を解決し、より少ない投資で効率的に資源濃集層の回収を行う手法を確立する必要があります。

検層による資源濃集層の特定

効率的な試料採取を行うためには物理検層とコア採取を組み合わせることが必須です。物理検層にはコア採取を行った掘削後の孔内に機器を降ろして孔壁を計測するワイヤーライン検層と、コア採取を行わずに掘削をしながら計測する掘削同時検層（logging while drilling: 以後LWD）の2通りの手法があり、後者は迅速に多点で地質層序を把握し、資源濃集層の深度や厚さを推定することが可能です。つまり、コア採取を行う前にLWDを導入することにより、コア採取が真に必要な地点を絞り込むことができる上、その地点での掘削の際に重要区間で確実にコアを回収する技術的な対策が可能となります。さらに、回収試料の記載・分析結果をLWD検層結果にフィードバックすることにより、時間・労力を要するコア採取のための掘削を減らし、LWD孔のみで資源濃集層の分布を広域的に把握することも可能となります。実際に、このような検層によって資源濃集層を特定する手法は石油探査やメタンハイドレート探査においては実用化されていますが、熱水鉱床域においては検証された例がありませんでした。

調査航海の目的と実施内容

地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査が2014年7月(CK14-04航海)と2016年2～3月(CK16-01航海)に沖縄トラフにおいて実施されました。この2航海では伊平屋北海丘を主要なターゲットとし、これまでの潜航調査で存在が明らかとなっている3つの活動的熱水噴出群を含む海域において、熱水溜まりや随伴する鉱化帯の空間的広がりを把握することを目的とし、計9地点(C9011-16, C9021-23)でLWDを実施しました(図1)。CK14-04航海で導入したLWDは全長約30mの掘削編成で、比抵抗、自然ガンマ線、温度・圧力センサーを装備し、それらの計測値はリアルタイムに船上へ伝送されます。比抵抗検層は地層に一定の電流を流すことによって地層の比抵抗を測定する検層で、今回用いた検層では周波数2MHz/400kHzの電磁波を発振し、受信した電磁波の減衰量と位相差から地層の比抵抗を算出します。自然ガンマ検層は地層に含まれるカリウム、トリウム、ウラン等の放射性物質から放出されるガンマ線を連続的に測定する検層で、放

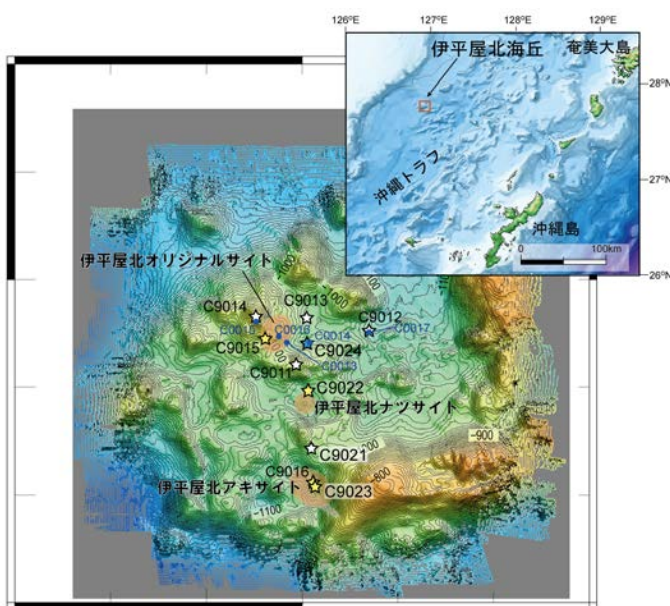


図1 伊平屋北海丘における掘削地点。CK14-04航海: C9011-C9016。CK16-01航海: C9021-C9023。統合国際深海掘削計画(IODP)第331次研究航海: C0013-C0017。

射線によって蛍光を放つシンチレーション結晶を利用して、地層由来の自然ガンマ線を測定します。

CK16-01航海ではこれらの計測に加え、比抵抗による孔壁画像の取得を行いました。また、この本調査ではLWDツールの耐熱温度である175°Cを超える高温の熱水溜まりの存在が予想されていたため、ドリルパイプの延伸のための接続時にも掘削水循環による冷却を絶やさない特別なシステム(Non Stop Driller)を導入しました。このようにして9地点で得られたLWDデータの解析結果から地質層序と熱水変質帯・鉍化帯の鉛直分布を推定し、それをもとにC0015, C0016, C9021, C9023の4点でコア採取を実施しました。

伊平屋北海丘から得られた結果と今後の展開

熱水性変質帯を構成する地層において、比抵抗と自然ガンマ線は特徴的な反応を示します。海水よりも低い比抵抗値 (<0.3 Ωm)、高い比抵抗値 (>10 Ωm)、そして非常に高いガンマ線値 (>200 gAPI) を示す地層が頻繁に現れ、それらは硫化鉍物、珪化岩、熱水性変質粘土層に相当する可能性が考えられます。今回掘削した9地点の中で、特に掘削点C9016において、このような比抵抗と自然ガンマ線の特徴的な反応から熱水変質帯・鉍化帯の鉛直分布傾向を示す層序プロファイルが得られました。自然ガンマ線の値と比抵抗値の組み合わせにより、深さ方向に「低ガンマ帯」→「高ガンマ帯」→「低比抵抗帯」→「高比抵抗帯」の順に変化する傾向が認められ、これらのパッケージは繰り返して出現します(図2)。このような物性の深度変化を、回収されたコア試料の鉍物組成や全岩化学組成の深度変化(第II章9節)と比較すると以下の解釈が可能となります。海底直下の未変質堆積物～弱変質堆積物を経てカオリナイトに富む酸性変質粘土が出現する層準が「低ガンマ帯」に相当し、その下位の硬石膏に富む中性変質粘土層が「高ガンマ帯」に相当します。さらに下位の閃亜鉛鉍、方鉛鉍、黄銅鉍、黄鉄鉍などが認められる鉍化帯が「低比抵抗帯」に、さらに下位の硬質層(珪化岩)が「高比抵抗帯」に対比されます。

採取されたコア試料の回収率は低く、得られた分析データは不連続ですが、検層の連続データを組み合わせることによって完全な地質層序を復元することができ、海底で形成されつつある未成熟な黒鉍型鉍化帯における熱水変質帯・鉍化帯の分帯が可能となること

が分かってきました。また、LWDによって地質層序を推定した後であれば、コア回収率が著しく低い場合であっても、コリング手法の調整により目的深度の地層の取りこぼしを最小限に留めることも可能となります。今後は、検層データとコア分析データの詳細な対比により鉍化帯の認定法を確立し、広域物理探査データとの対比を含めた総合探査プロトコルの開発を目指します。

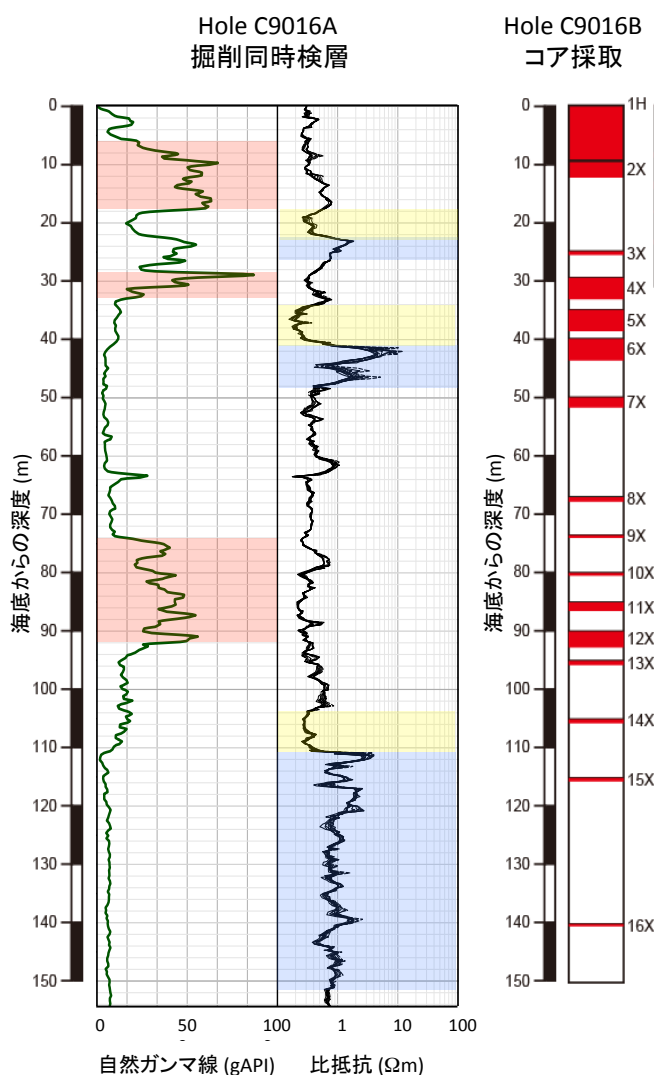


図2 左図:掘削孔C9016Aで取得された掘削同時検層による自然ガンマ線と比抵抗の計測値。ピンク:高ガンマ帯, 黄:低比抵抗帯, 青:高比抵抗帯。右図:掘削孔C9016Bで採取されたコア試料の回収状況。コアは最上部の1Hから16Xまで16回採取。赤色の区間は回収されたコア長を示す。



トピックス：北鹿黒鉱地域における成因研究課題合同 現地討論会



上2枚：観音堂鉱床にて地質調査。



相内鉱床にて地質調査。



鉱石標本室での討論。

東北地方の日本海側、特に西の秋田県大館市から東の十和田湖一岩手県県境にわたる北鹿地域と呼ばれる地域には、亜鉛、鉛、銅、銀などを産する黒鉱鉱床が密集して分布し、かつては日本を代表する鉱物資源となっていました。これまでの長年の研究から、これらの黒鉱鉱床は約1500-1200万年前の海底熱水活動に伴って形成されたことが明らかにされており、我が国周辺の海底熱水鉱床の成因を考える上で重要な手がかりを与えることが期待されます。SIPプログラムでは2016年5月に、Dowaホールディングス株式会社、白川建設株式会社などの協力をいただいて、現地討論会を実施しました。成因研究課題参画機関を中心としたメンバーが集って、現世の海底熱水鉱床との類似性、鉱床形成時の地質環境などの問題について議論を行いました。



上2枚：梨坂採石場にて海底火山活動の痕跡を観察。



合同現地討論会参加者。鉱石標本室前にて。

岩石・堆積物試料の性質・成因解析にもとづく検討



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徴調査法の開発

国立研究開発法人産業技術総合研究所
山崎 徹

地化学調査の重要性

地球化学調査は鉱物資源調査法のひとつで、地化学調査あるいは地化学探査などとも呼ばれます（以後、地化学調査と呼びます）。これは鉱床近傍において母岩中の特定成分が濃集あるいは溶脱する現象や、鉱床の生成や風化などに関連して分散した微量元素の分布状況を手がかりに鉱床の存在を推定しようとするものです。陸上における地化学調査は、これまで数多くの実績があり、鉱床探査の基本的かつ重要な手段となっています。例えば、中国において1980年から2000年に発見された鉱床の71%において地化学調査がその発見に最も重要な役割を果たした手法であったとする報告があります。陸上において地化学調査は、岩石・土壌・水・植物・ガスなどあらゆる物質を対象に行われます。これらの物質はもともと一定量の様々な元素を含んでいますが、鉱床の形成あるいは元素の濃集に関連して、何らかの元素の異常な増加や減少を伴う異常帯を形成することがあり、その発見により、潜頭性鉱床を発見する手がかりを得る事も可能です。したがって、海底鉱物資源調査においても地化学調査が実用化されれば、準精査～精査段階において資源濃集域を特定する重要な手法となる事が期待されます。

海洋域における地化学調査の困難性

地化学調査は陸上の鉱床探査では基本的な手法のひとつですが、海洋鉱物資源調査においては、有効な手

法が確立されていません。その理由のひとつは、車や徒歩で移動して試料の採取ができる陸上とは異なる、試料採取や観察そのものの困難性という、海域調査特有の事情によるものです。もうひとつの理由は、資源として有望な鉱体と海底面表層の物質の組成との関連性が系統的に理解されておらず、どの程度の濃度であれば“異常”であるのかがはっきりしない、という、現状の理解や知見の不足が挙げられます。特に、一般に火山性塊状硫化物鉱床の周辺には火山性の噴出物が分布するため、その化学組成はもともとなったマグマの種類によっても異なります。それゆえ、ひとつめの試料数自体の制限とあわせて、基準を設定するのが難しいという事情があります。

伊平屋北海丘における地化学調査法の検討

伊平屋北海丘では、2010年に実施された統合国際深海掘削計画第331次航海（IODP Exp. 331）によって、海底下に巨大な熱水溜まりが存在している可能性が指摘されるとともに（図1）、熱水噴出口直下で黒鉱タイプの鉱石が世界で初めて採取されました。その後のSIP「ちきゅう」掘削航海によっても、様々な程度に鉱化した変質岩類が回収されています。Exp. 331ではさらに、熱水の噴出や海底下の存在が確認されず、掘削コアにおいても顕著な熱水変質の認められない海域が確認されています。

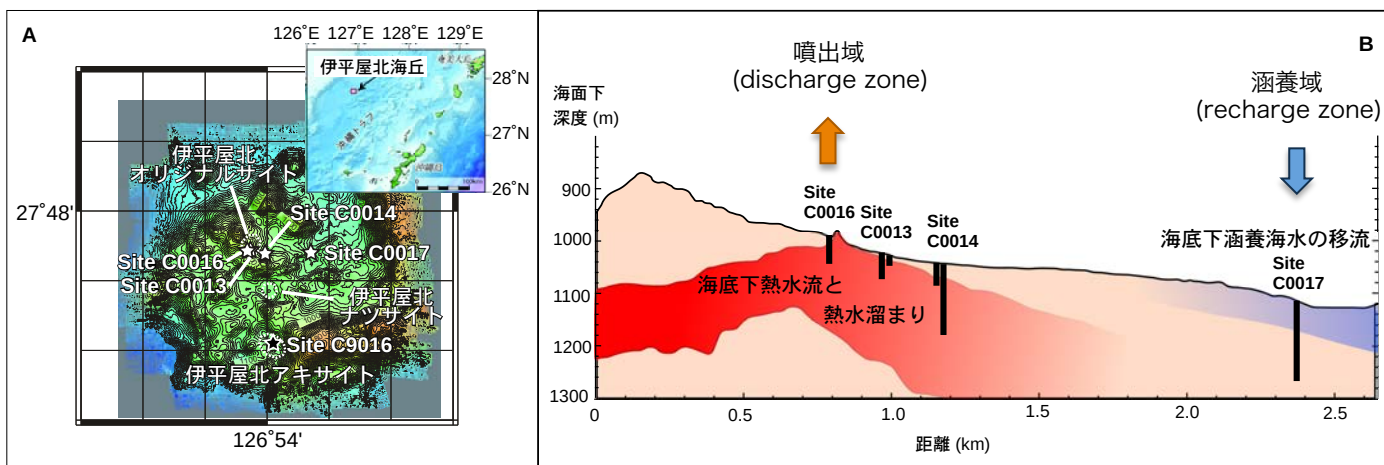


図1 伊平屋北海丘における掘削孔の位置 (A) と海底下熱水域のモデル断面 (B). C00で始まるサイトはIODP Exp. 331で、C90で始まるサイトはSIP航海で掘削されたサイト。右図はExp. 331 Scientist (2011) をもとに作成。

このような場所は、活発な熱水噴出域（discharge zone）に供給される海水が海底面に浸透する涵養域（recharge zone）であると解釈されています。噴出域では、ブラック・スモーカーに見られるように、重金属元素が熱水とともに海中に放出されており、これまでのSIPの掘削から、その下に一定程度の金属元素の濃集が確認されています。一方、涵養域ではそのような鉱化作用は生じないため、両海域に分布する表層堆積物を比較すれば、鉱化作用に関連した組成的特徴が見えるはずです。

得られた結果と今後の展開

伊平屋北海丘の表層には軽石が厚く堆積しています。この軽石の組成を噴出域直下の変質火山岩とともに検討すると、鉱化作用によって増加が期待される元素であっても、必ずしも涵養域よりも噴出域の方が高い濃度を示しているわけではなく、単純に濃度だけで異常値を見いだすことは難しいことがわかります（図2）。そこでまず、マグマの分化によって系統的な変化が期待される希土類元素（REE）について、涵養域に分布する軽石の組成で噴出域の軽石の組成を規格化し、マグマの分化程度指標としました。その上で、マグマの分化程度の指標（平均規格化REE含有量）と各種の微

量元素の挙動を検討しました。その結果、例えばGaやYの濃度は直線的な変化傾向を示し、主としてマグマの分化に支配されていることが分かりました（図3）。一方、噴出域付近では、Cd, Uの比較的高い濃度、Zn, As, Mo, SbやPbの高い濃度が認められ、これらの元素濃度が、涵養域の非変質軽石に対して相対的に高いことが明らかとなりました（図3）。これらの元素の一部は、必ずしも目的とする有用元素ではありませんが、鉱床形成に何らかの関連のある、指示元素であると考えられます。

この手法は比較的安価で容易な海底面の試料採取法であるドレッジやピストン・コアリングによって実施可能であり、かつ、海底面を熱水活動終了後に堆積物が覆っていても、その下の層準を検討可能であるため、系統的なグリッド・サンプリングによって、準精査～精査段階で過去に活動した熱水噴出域とその下の潜頭性鉱床の位置を特定できる可能性があります。今後、実用化にむけて本SIPの民間主導の実施課題等において系統的なサンプリングと検討を行い、その有効性を検証するとともに、成因モデルの構築によって、より信頼性の高い元素の絞込みや海底下での元素濃集の程度、すなわち鉱体の規模との系統的な関係について解明していく予定です。

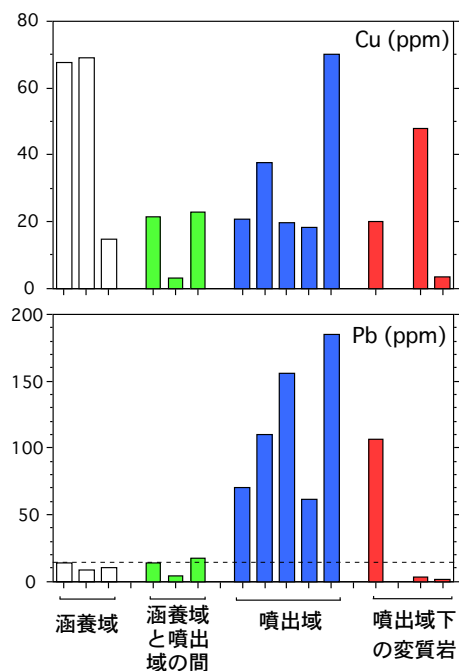


図2 軽石及び噴出域直下の変質火山岩の組成の比較。Cuは涵養域でも高い濃度を示し、Pbは噴出域では高いがその下の変質岩では低いというように、単純に濃度だけでは鉱徴域の指標としては使えない。

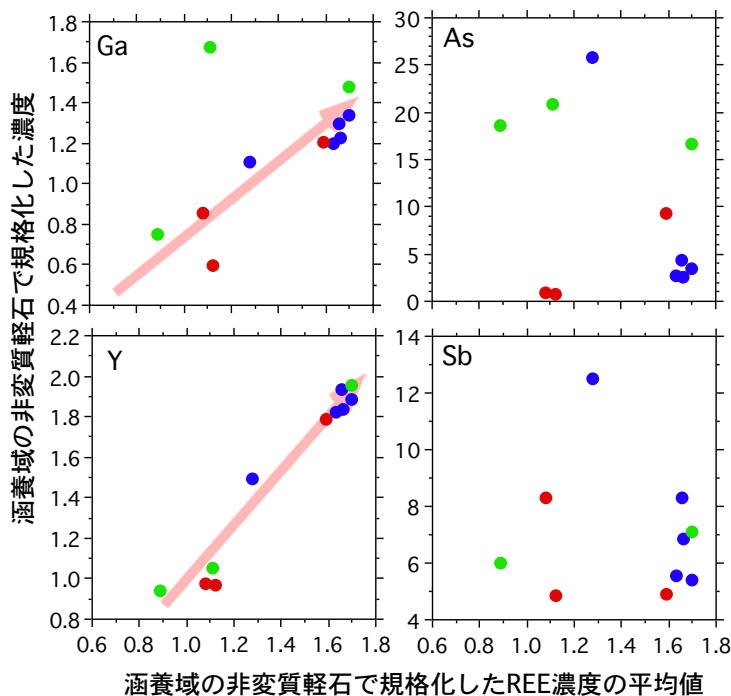


図3 涵養域の軽石の組成で規格化したREE濃度の平均値に対する各種元素の挙動。GaとYは、主としてマグマの分化に支配される直線的な組成変化傾向（矢印）を示すのに対し、AsやSbでは非系統的な分散とともに高い濃度が認められる。記号の色は図2に対応。



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

国立研究開発法人産業技術総合研究所 小森 省吾
国立研究開発法人海洋研究開発機構 正木 裕香

電気特性把握の重要性

一般に海底熱水鉱床では、銅・亜鉛・鉛・鉄といった金属元素はそれぞれ、黄銅鉱・閃亜鉛鉱・方鉛鉱・黄鉄鉱などの硫化物として存在します。これらの硫化鉱物は、新鮮な火成岩に比べて比抵抗が低い（電流が流れやすい）性質を持っています。それゆえ、陸域の鉱床で一般的に用いられる電磁気学的手法に基づく調査が、海底下の鉱床においても有効であると期待されています。しかしながら、陸域で見られるような、大昔に鉱化を終え固結している鉱床と、本プロジェクトにおいてこれまでに調査を行ってきた海域の発達中の熱水鉱床では、岩石の物理的性質（空隙率・浸透率・硫化金属鉱物の分布形態など）や置かれている環境（温度・間隙水の塩分濃度・含水率など）が大きく異なります。それゆえ、発達中の海底熱水鉱床で得られた電気・電磁探査データに対して、陸域における従前のデータ解釈法と同様の論理を用いると、誤った構造解釈を与える可能性があります。最適な物理探査手法の提案・開発やそれによって得られたデータの正しい解釈には、原位置に近い状態で、海底下の地層の電気特性に関する知見を直接的に、かつ詳細に得ることが必要不可欠です。

鉱床を特徴付ける電気特性

こうした背景を踏まえ、本研究開発では、海底掘削試料を用いた電気特性の船上計測システムの開発及び適用を行っています。特に今回は、岩石の比抵抗特性のみならず、IP効果という電気特性にも注目しています。IPとはInduced Polarization（誘導分極）の略称で、外部から電圧を加えることで金属硫化物が分極を起こす性質のことをいいます。この性質を等価な電気回路に置き換えた場合、金属硫化物はコンデンサとして機能し、岩石は抵抗とこのコンデンサの並列回路として近似されます（図1）。そのため、外部からの周期的な電圧変動（交流）によって岩石中に充電及び放電が起こり、これが回路中の電圧・電流変動に位相差を発生させます（図2）。このIP効果は、回路を流れる交流電流の周波数によって変化する他、金属硫化物の量・分布形態・粒径を反映することが、人工試料に

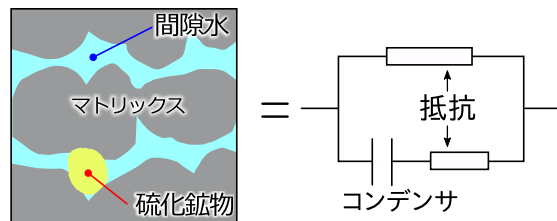


図1 硫化鉱物を含む岩石の等価回路。硫化鉱物はコンデンサ、空隙を間隙水で満たされたマトリックスは抵抗に対応し、岩石はこれらの並列回路として表現される。図はPelton et al. (1978)をもとに、IP効果の発生機構を一部簡略化して作成。

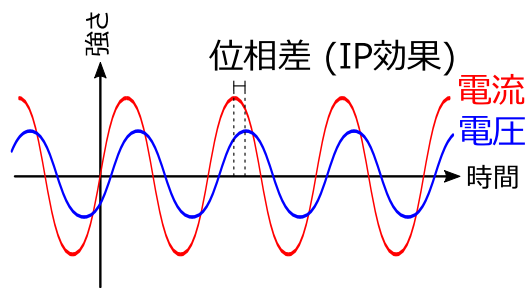


図2 硫化鉱物を含む岩石の電流・電圧変動の概念図。

よる計測実験によって明らかになっています。そこで本研究開発では、計測技術の開発研究に加え、比抵抗・IP特性が海底熱水鉱床をどのように捉えるのかについての解明も行っています。

船上比抵抗・IP計測技術の開発・適用と得られた結果・知見

これまでに、様々な掘削試料の形状に対応したプローブを開発すると共に、電気化学の分野で利用される高性能インピーダンス測定器を導入し、0.01 Hzから100 kHzまでの複素比抵抗及び位相差を高精度に測定することを可能としました。今回、本測定装置をちきゅう船内のシールドルーム内に展開し、伊平屋北海丘及び野甫サイトにおける海底掘削調査航海で使用しました。上記のような非常に広い帯域の交流電流を利用した海底掘削試料の船上計測は、世界で初めてです。その結果、次のような電気特性が明らかになってきました。低温海水の涵養域と考えられているC9021サイトでは、硫化鉱物をほとんど含まない未変質あるいは

弱変質の軽石層が多く見られましたが、IP効果（位相差）はほとんど現れませんでした。それに対し、掘削後に高温熱水の活発な噴出のあったC9023サイトでは、黄銅鉱・閃亜鉛鉱・方鉛鉱・黄鉄鉱を含んだ礫質～粘土質層に対応して大きなIP効果を示すことが明らかになりました（図3）。このことは、海底環境下におい

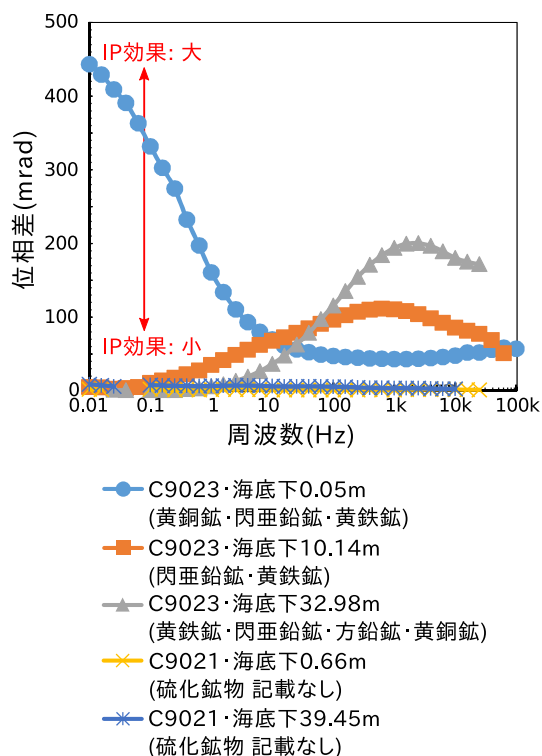


図3 IP特性計測結果の一部。C9021サイトの試料は硫化鉱物を含まない軽石、C9023サイトの試料は各種硫化鉱物を含む礫質～粘土質堆積物にそれぞれ対応する。岩相及び硫化鉱物分布は各測定点近傍の船上肉眼観察・粉末X線回折(XRD)の結果を利用した。

ても硫化金属鉱物のIP効果が有効であることを示唆しています。また、掘削試料の比抵抗値について、C9021サイトでは掘削試料と掘削同時検層（LWD）の比抵抗は同程度の値を示したのに対し、C9023サイトでは掘削試料の比抵抗は掘削同時検層の結果よりも大きな値を示しました（図4）。一般に、岩石中の間隙水や粘土鉱物の比抵抗は温度の増加とともに低下します。この結果は、海底熱水鉱床において、硫化金属鉱物だけではなく熱水による高温環境もまた、比抵抗低下に重要な役割を果たすことを示唆しています。

参考文献: W.H., Pelton, S.H., Ward, P.G., Hallof, W.R., Sill and P.H. Nelson, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics* **43**, 588–609. doi: 10.1190/1.1440839, 1978.

今後の展開・海底電磁探査との連携

このように、掘削試料の比抵抗・IP特性を通じ、電磁気学的視点から見た海底熱水鉱床の実態が徐々に明らかになってきています。鉱化作用が進行している海底熱水鉱床では、硫化鉱物の析出のみならず、その他の変質鉱物・脈石鉱物の生成による空隙の閉塞など、電気特性を変化させる様々な現象が起こっていることが考えられます。今後、空隙率・密度などの物理特性や硫化鉱物・変質鉱物・脈石鉱物分布との比較を通じ、鉱床発達過程が地層の物理特性、比抵抗・IP特性の空間変化としてどのように反映されるのかについて、詳細な検討を行う予定です。また、船上比抵抗・IP特性のデータは、上記海域で展開中の電磁探査で得られる比抵抗構造の解釈に強い制約条件を与えることができるものと期待されます。海域で行われる物理探査は、比抵抗・磁化率・弾性波速度構造の解明を主としたものが一般的です。将来的に、IP効果を利用した新しい海洋底物理探査技術の開発が進むことで、より高精度に硫化鉱物濃集部を検出することが可能になることが期待されます。長期的な視点では、本研究開発成果が、海底熱水鉱床開発に係るリスクの低減やコストの削減に寄与していくものと考えられます。

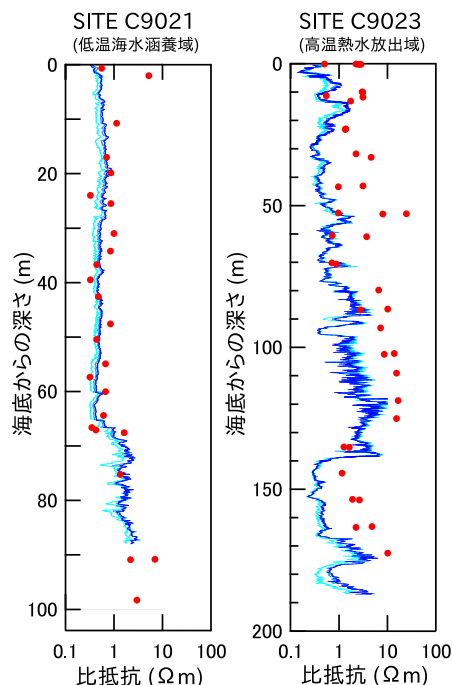


図4 比抵抗計測結果の一部。実線はLWD(掘削同時検層)による結果、赤丸印は掘削試料を用いた船上計測結果をそれぞれ表す。船上計測結果は、室温下(25℃)・1 kHzの交流電流による測定結果をプロットしている。



火山体の形成過程から鉱液生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

国立研究開発法人産業技術総合研究所
山崎 徹

基盤岩の性質および成因を理解する必要性

踏査による地表地質調査は、陸上における鉱床探査の基本作業のひとつです。この地表踏査において、特に変質帯を抽出することが重要な作業となります。陸上においては、世界のほとんどの場所において地質図がすでに存在しており、地表踏査によって、その地域で鉱床を胚胎する母岩あるいは基盤岩の代表的な岩相を容易に把握できます。一方、海底面あるいは海底下の地質調査においては、ドレッジ・ROV（有索式無人探査機）・BMS（海底着座型掘削装置）・船上掘削等の手法により試料を観察・採取しますが、陸上を踏査するのに比べ遥かに労力や費用がかかる上に、何よりも極めて限られた情報しか得ることができません。そのため、海底鉱物資源の調査においては、直接観察という観点から、陸上踏査で容易に確認可能な母岩の地質、変質帯の位置や母岩との関係の大部分が推定に依存します（図1）。したがって、母岩あるいは基盤岩を構成する火成岩類の成因モデルが、精確な地質分布・資源濃集部の推定に重要な役割を果たし、そのモデル構築のためには、基盤岩の性質の理解が不可欠です。加えて、変質帯における鉱化作用の詳細なメカニズムを考える上で、そもそもどのような原因で発生・活動した、どのような性質のマグマ活動が熱水変質や資源の濃集に関与しているのかは、鉱床形成プロセスの全体像を理解する上で最も基本的な情報です。

伊平屋北海丘および伊平屋小海嶺野甫サイトの基盤岩構成

SIP「次世代海洋資源調査技術」の海底熱水鉱床成因研究のモデルフィールドとして検討を進めている伊平屋北海丘および伊平屋小海嶺野甫サイトにおいて、2014年度と2015年度の2回にわたり、地球深部探査船「ちきゅう」を用いたSIP掘削調査が行われました。両海域は直線距離にして約30 km程度しか離れていませんが（図2）、掘削の結果、その岩石構成は全く異なるものであることが明らかとなりました。伊平屋北海丘は、海底面下浅所に半遠洋性堆積物（泥）や軽石（珪長質マグマ由来のガラス）質の堆積物が存在し、その下部では変質粘土や変質珪長質岩が認められまし

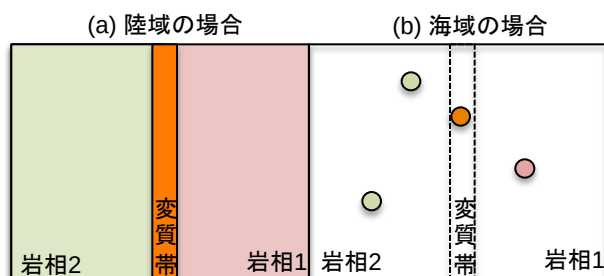


図1 陸上と海域の調査による情報量の違いを示す模式図。陸上の場合 (a) は、密な調査によって岩相1と岩相2との間に変質帯を識別・把握することが容易であるが、海域の調査で観察・試料採取密度が小さい場合 (b)、仮に (a) と同じ地質分布であっても、“点”的な情報から変質帯の延びの方向や分布域を推定するのは困難である。

た。一方、伊平屋小海嶺野甫サイトでは、海底表層に苦鉄質溶岩が産し、その下部は新鮮な苦鉄質岩を挟みつつ、様々な程度に変質した苦鉄質岩あるいは苦鉄質岩起源の変質粘土が分布していました。掘削は基盤岩には到達していないと思われますが、これまでに得られた結果にもとづけば、伊平屋北海丘は珪長質岩、伊平屋小海嶺野甫サイトは苦鉄質岩が主要な基盤岩であることが推察されます。よって、火山体の形成過程を理解するには、それぞれの海域の基盤岩の成因の解明とともに、近接した海域でそれら異なる火山岩が存在する理由も同時に理解しなくてはなりません。

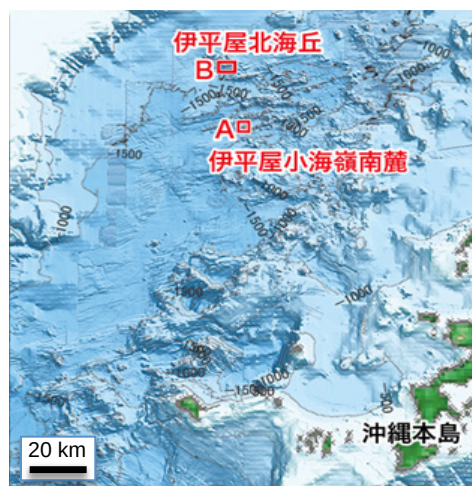


図2 伊平屋北海丘と伊平屋小海嶺の位置。2016年3月18日 海洋研究開発機構プレスリリース資料^{注1}を改変。左下のスケールバーはおよその目安。

伊平屋北海丘および伊平屋小海嶺の成因モデルと今後の展開

既存の研究によると、沖縄トラフは珪長質火山岩と苦鉄質火山岩のバイモーダルな化学組成の火成活動で特徴づけられます。苦鉄質のマグマはマントルで発生したもので、珪長質のマグマは、苦鉄質マグマからの結晶分化作用で生じたと考えられています。そして、そのような結晶分化作用、つまり珪長質岩の形成は、海底面下10 km程度の深度に形成されたマグマ溜まりで生じたことが提案されています（図3a）。このモデルにもとづくと、伊平屋北海丘の珪長質岩および伊平屋小海嶺野甫サイトの苦鉄質岩はともに深部から海底に噴出したものであり、固化して依然熱い火山岩類が熱水循環の熱源として機能しているか、あるいは、海底面下10 km程度の深度に形成されたマグマ溜まりの規模が十分に大きければ、これ自体が熱水循環の熱源として機能していると解釈されます。このモデルにおいては、深部で苦鉄質と珪長質の間の組成のマグマが形成されるものの、海底にはほとんど噴出しなためバイモーダルな組成の火成作用が生じることになります。

一方、熱水循環の熱源や反応帯（reaction zone）を説明するために別の仮説を考えることも可能で、現在、筆者は以下のモデルにもとづいて仮説を検証しています（図3b）。地震探査によると、伊平屋北海丘の海底下約5 km程度までは正断層が連続していることが確認

されるため、恐らくもう少し深部まで海水が浸透していることが推察されます。マントルで発生した苦鉄質マグマの温度は約1,200°Cで、含水状態の苦鉄質岩石の融点はおおよそ800-700°Cですので、海底下約5-6 km程度まで苦鉄質マグマが上昇してくれば、変質し含水状態となった苦鉄質基盤岩が部分溶融してマグマが発生し得ます。実験岩石学にもとづくと、このとき形成されるマグマの組成は、沖縄トラフの珪長質岩の組成に極めて似ています。したがって、このモデルでは、苦鉄質岩と珪長質岩の間の組成のマグマはそもそもほとんど存在しない、ということになり、同時共存するバイモーダルな火成作用を合理的に説明できるとともに、溶融を引き起こした苦鉄質マグマや部分溶融によって形成された珪長質マグマ（とその固結した岩石）が、海水の到達深度で直接的に熱源および水-岩石反応の場になっている可能性が示唆されます。

陸上の鉱床の研究結果からは、バイモーダルな火成活動で苦鉄質岩が多い場合は鉛に対して銅の量が多く、珪長質岩ではその逆であることが報告されています。沖縄トラフにおいても、海域により鉱石の銅の含有量に違いが認められますので、水-岩石反応の場が苦鉄質岩なのか、あるいは珪長質岩なのかによって、この違いが生み出されている可能性があります。詳細はこれからですが、現在、鉱液生成プロセスとの関連も視野に検討を進めています。

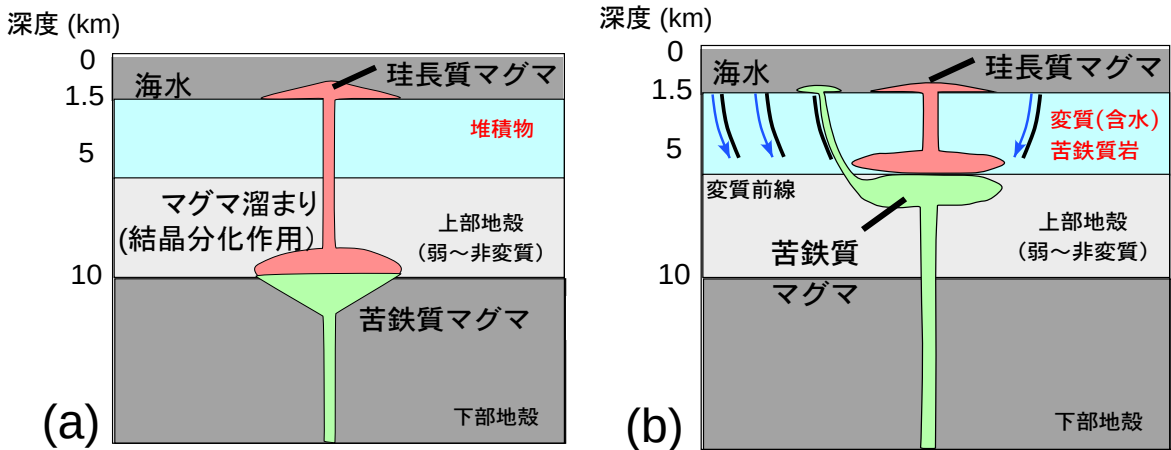


図3 沖縄トラフの火成岩類の形成モデル。(a) これまでに提案されているモデル(Shinjo and Kato, 2000を一部改変)。(b) 現在検討を進めている代替モデル。



海底下地層構造を把握し鉱床形成メカニズムを解明する 掘削コア試料の記載・地球化学的分析/解析

国立研究開発法人海洋研究開発機構
野崎 達生

資源探査は試料観察・記載に発す

鉱床の探査に際しては、地球物理学的探査と同時に鉱体の胚胎が予想される地層やその上・下盤を構成する岩相の把握、鉱化作用の兆候（鉱徴）を示す変質鉱物の観察、鉱石の構成鉱物の観察を行い、まずはこれらを記載します。海底熱水鉱床は、その下盤と上盤に変質火成岩と変質堆積物・粘土層を伴う層序規制型鉱床であるため、観察試料の地層における位置の把握が肝要です。また、鉱床を形成した鉱液（熱水）の温度、pH、硫黄フガシティなどに応じて、晶出する粘土鉱物や硫化鉱物が変化します。したがって、堆積物・岩石試料を詳細に観察し、構成鉱物や組織を記載することは資源探査のベースとなる作業です。

海底下における地層把握の困難性

陸上の鉱床探査では、ヤマを実際に歩く地質調査に加えて、例えば100 mグリッドで総延長10 kmを超えるようなボーリングに基づき、詳細な地質図・地質断面図を作成します。しかしながら、海洋ではマルチビーム

測深機によって地形図は作成できるものの、海底下の詳細な地層情報の取得は容易ではありません。海底下の地層構造把握には様々な地球物理的探査に加えて、掘削調査船によるコア試料入手のためのボーリング（コアリング）を実施します。海洋における掘削作業は高コストであるため、陸上のボーリングに比べて実施間隔が疎な場合が多く、岩相把握と海底下地層構造のモデル化、化学分析に基づく品位分布の把握を行うための情報が限られていることから、正確な鉱量・品位の推定が困難な場合があります。

一般的な科学的記載・分析作業の流れ

地球球深部探査船「ちきゅう」の場合、通常は長さ9.5 mで1本となるコア試料（図1）が掘削されます。これらのコア試料は、1 mあるいは1.5 m間隔でセクションに切断されます。そして、半割した断面において組織、構造、色、粒度、構成鉱物などを肉眼観察します。さらに、顕微鏡による薄片や研磨片の観察（図2）、走査型電子顕微鏡による組織観察、流体包有物の

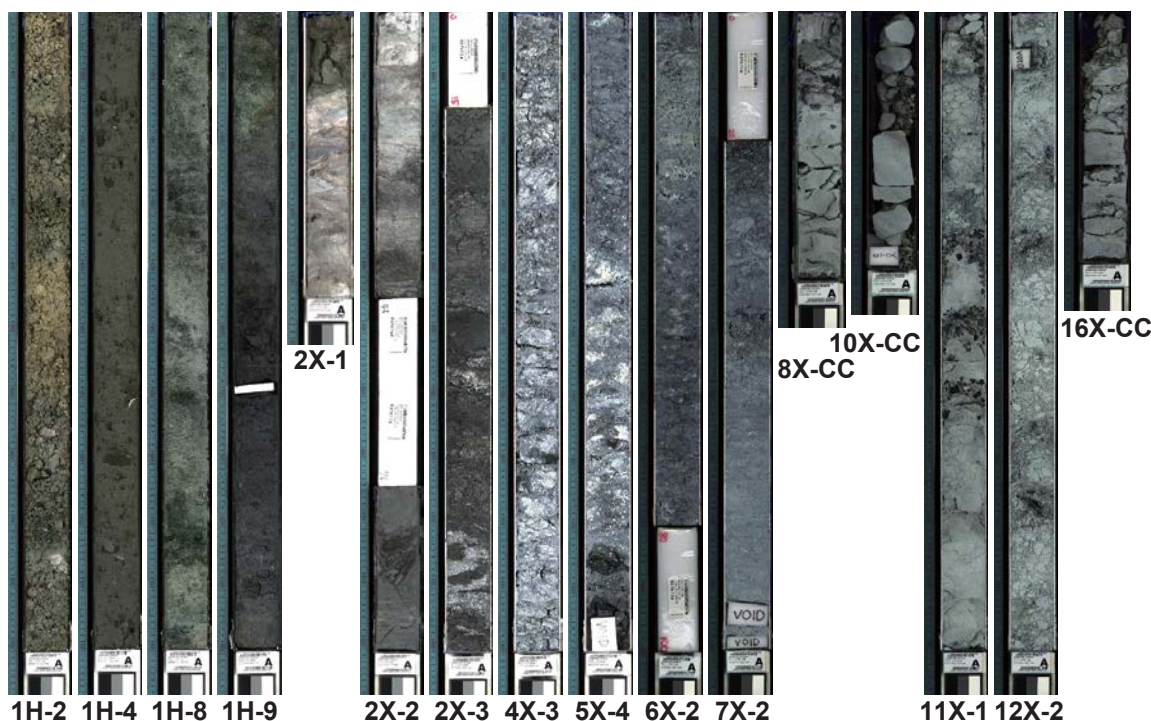


図1 CK14-04航海C9016B孔から採取されたコア試料。上位から下位にかけて、未変質軽石⇒未変質堆積物⇒弱変質堆積物⇒酸性変質粘土層⇒中性変質粘土層/変質火成岩に岩相が変化している。記号はコアとセクションの名称の略記。

均質化温度・塩濃度測定、電子プローブマイクロアナライザによる鉱物化学組成測定などの記載作業を行います。これらの作業は、主に鉱物の晶出順序と各岩相の生成機構解明を目的としています。記載作業と並行して、コア試料の粉末試料を調製し、X線粉末回折装置による構成鉱物の同定、蛍光X線分析装置や誘導結合プラズマ発光/質量分析装置などによって、有用金属である銅・鉛・亜鉛・金・銀を含む多元素濃度測定を行います。これらの記載・化学分析をコア試料に対してなるべく密に行い、構成鉱物や化学組成の深度プロファイル（図3）を作成することにより、変質・鉱化作用による元素の移動、鉱体部の品位などを把握できます。さらに、上記の基本的な記載・化学分析に加えて、金属元素の起源物質解明や鉱液の温度推定などを目的として様々な同位体分析も行われます。

伊平屋北海丘から得られた結果と今後の展望

中部沖縄トラフの伊平屋北海丘を対象として、これまでに統合国際深海掘削計画第331次航海（IODP Exp. 331）、SIP CK14-04航海およびCK16-01航海の3回の掘削調査航海が実施されました。図1、3には、CK14-04航海C9016B孔の代表的なコア試料画像および化学組成深度プロファイルを示してあります。C9016B孔の岩相は、上位から下位にかけて、未変質軽石⇒未変質堆積物⇒弱変質堆積物⇒酸性変質粘土層⇒中性変質粘土層/変質火成岩で構成されています。弱変質堆積物層では緑色を呈するセラドナイトが認められ、酸性変質粘土層では白色を示すカオリナイトが多

く存在します。酸性変質粘土層の直下からは硬石膏の晶出が認められ、緑泥石やイライトを多く含んだ中性変質粘土層により構成されています。また、海底下約40 mにおいて、（1）石英に富む極めて硬い岩石が存在し、（2）極めて硬い岩石の近傍で比較的硫化鉱物に富む鉱微が認められます。これらの鉱物記載、化学分析によって得られた情報を統合することで、コア試料から可能な限り海底下地層構造を描像し、鉱微を示す層の生成機構を解明することが掘削コア試料を用いた鉱床学です。

これまでに実施された3度の掘削調査航海を通じて、（1）海底下には熱水の流れを規制し、時には熱水溜まりを生成する帽岩（キャップロック）が広く存在すること、（2）この帽岩は複数枚存在し、海底下の地層構造は単純な一連の変化では説明できず、類似の構造が繰り返されていることが明らかになりつつあります。これらの帽岩によって熱水の流れが側方に規制されれば、変質作用や鉱化作用も同様の構造規制を受けていることが予想されます。帽岩は、硬石膏、粘土層あるいは石英+長石で構成されており、今後これらの帽岩の生成機構解明が熱水鉱床の海底下地層構造把握の鍵になると考えられます。背弧・島弧域の海底熱水鉱床を起源とする黒鉱鉱床においては、しばしば鉱体が複数枚になっている場合が認められます。これらの陸上黒鉱鉱床の鉱体と、帽岩による鉱液移動の規制と地層の繰り返し構造の関係を解明し、効率的な探査手法の開発に繋げていく予定です。

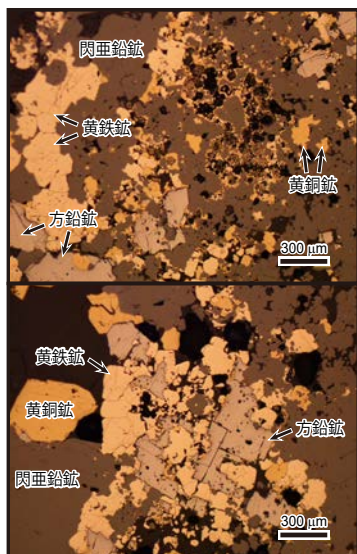


図2 コア試料研磨片の反射顕微鏡写真の例。本試料は、IODP Exp. 331 C0016B 1L-1 17 - 19 cm部分。

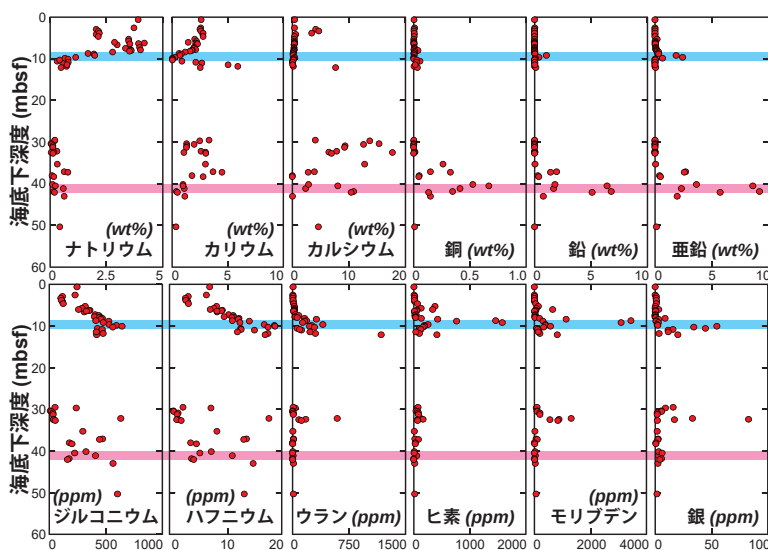


図3 CK14-04航海C9016B孔コア試料の化学組成深度プロファイルの例。青色線は酸性変質粘土層に、桃色線は硫化鉱物が多く認められる層（鉱微）にそれぞれ相当。



トピックス：成果の国際的認知・情報収集の取り組み



Undewater Mining Conference 2016 (UMC2016) における成果発表の様子。



UMC2016において、韓国の船舶・海洋工学研究所 (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering; KRISO) の深海採鉱ロボット (MineRo) を見学する参加者たち。



ロシア・サンクトペテルブルクで開催された、MINERALS OF THE OCEAN-8 & DEEP-SEA MINERALS AND MINING-5の会場となった VNII Okeangeologia (写真上：内部、写真下：建物)



「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、文字通り成因に関する科学的研究にもとづく研究開発です。プログラム全体として目指す、低コストかつ高効率で調査する技術を世界に先駆けて実現すること、グローバルスタンダードの確立により、日本の調査システムの輸出および海外での調査案件の受注を目指すこと、を実現するには、研究開発成果の国際的な認知を高め、世界最先端の研究動向をいち早く取り入れることが重要です。海底資源に関する国際会議は民間企業等の参加も多く、国際的な企業の動向に関する情報収集の重要な場であるとともに、本SIPの研究開発成果を売り込む機会でもあります。一方で、SIPプログラムは5年間という短期間で基礎から実用化までを一気通貫で実施するため、国際的な研究成果を活用しつつ、最短距離で実用化に至る必要もあります。



Odyssey Marine Exploration本社 (米国・フロリダ) の見学と交流会の様子。Odyssey社は主として深海に沈む難破船の引きあげや、沈没船からの財宝等の引きあげを行っている会社であるが、近年、海底鉱物資源調査・開発分野にも参画してきている。



MINERALS OF THE OCEAN-8 & DEEP-SEA MINERALS AND MINING-5のセッションの様子。特にロシア国内からの参加者が多く、大西洋中央海嶺におけるロシアの調査・研究の動向に関する多くの情報を得ることができた。



MINERALS OF THE OCEAN-8 & DEEP-SEA MINERALS AND MINING-5のBanquetの様子。海底資源系の学会には企業からの参加者が多く、ポスター会場やこのような場は、主として企業との情報交換の場となる。各国とも、我が国の研究開発の動向に大変強い関心を示していた。

熱水（流体）挙動の解明にもとづく検討



海底下の熱水の動きを追跡する 熱水域堆積物中の間隙水化学組成の解析

国立大学法人九州大学
石橋 純一郎

熱水と海水の混合による鉱化作用

海底熱水鉱床は、熱水から沈殿生成した硫化鉱物が蓄積してできる鉱床です。熱水の温度低下によって硫化鉱物が生成する鉱化作用が効率よく進み、大型の鉱床が生成するには、それに適した地質学的な場所があると考えられます。

例えば熱水噴出孔から噴出した熱水は、周囲の海水と混合して急激に温度低下します。ここでできる硫化鉱物は細粒で噴出する熱水中で舞っているのが見えます。しかし、海水中的での鉱化作用は鉱床成長に不利です。酸素を含む海水は硫化鉱物を溶解させる働きがあり、細粒の硫化鉱物は溶ける時間も短いからです。熱水噴出孔の根元には、しばしばマウンドと呼ばれる盛り上がった丘ができます。噴出孔から勢いよく熱水が噴き出ると、周囲の海水がマウンドの下部から引き込まれ、マウンド内部でも熱水と海水の混合が進んでいると考えられます。ここでは、ゆるやかな熱水の冷却により大きな鉱物結晶が成長するので、鉱床形成に有利な鉱化作用が進むと考えられます。ただマウンドの大きさには限界があるかもしれません。このように高温の熱水が海底面近くのどのような場所でどのように冷却されるのかを考えることは、大型の鉱床ができる要因を考える手がかりとなります。

海底掘削による間隙水の採取と分析

海底掘削は、海底下の様子を直接さぐるための非常に有力なツールです。海底下から得られる堆積物試料を用いて、地質学的・鉱物学的解析が行われるほか、堆積物の隙間に存在する流体である間隙水を搾り出す作業が行われます（図1）。間隙水は、もともと海水に起源を持っていますが、周囲の堆積物中にある様々な物質（例えば有機物や堆積物を構成する鉱物）との間に化学反応が起これば、その組成が変わっていきます。また、もっと深い場所から移動してきた間隙水が流れ込んでくる場合、大幅な組成の変動を示すこともあります。このように、間隙水の化学組成を分析し、その鉛直分布から深度ごとの変化を調べれば、海底下の流体の動きや化学反応を追跡することができます。

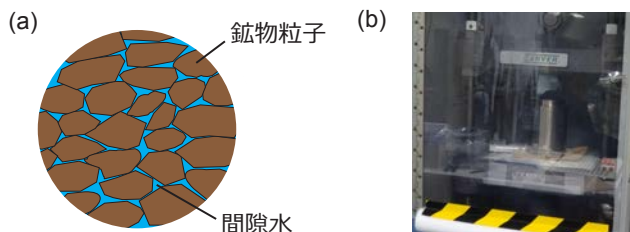


図1 左:間隙水概念、右:IODP航海中の間隙水抽出作業。

また、同じ深度の堆積物の解析結果と比較して、その化学反応でどのような元素が出入りしているのかを考えることもできます。

間隙水の化学組成からわかること

伊平屋北海丘では、2010年に実施された統合国際深海掘削計画第331次航海（IODP Exp.331）によって、熱水域の海底下から堆積物試料の採取が行われました。熱水マウンドから450 m離れたSite C0014と、そこからさらに1 km以上離れたSite C0017の間隙水組成を比較して図2に示します。

Site C0017では、すべての化学成分についてほぼ海水の組成と同じ組成を示す直線的な鉛直分布が得られました（図2b）。ただし、よくみると、10 mbsf（海底下10 m）のごく浅い層の周辺では、 SO_4 （硫酸イオン）のわずかな減少と NH_4 （アンモニウムイオン）のわずかな増加が見えています。この鉛直分布の違いは、堆積物を構成する物質の違い—半遠洋性の堆積物から成る層と軽石から成る層—に対応しています。浅い層で見られる SO_4 と NH_4 の濃度変化は、半遠洋性堆積層に良く見られる微生物が硫酸を消費しながら有機物を分解する反応（硫酸還元）を反映しています。これに対して、10 mbsfより深い層で化学反応の痕跡を見ることができないのは、間隙が多く透水性が高い軽石層では海水起源の流体が比較的早いタイムスケールで入れ替わっていることを示しています。

Site C0014の間隙水の鉛直分布はずっと複雑な構造を示しています（図2a）。深度10 mbsfより浅い層は、海水とほぼ同じ間隙水組成が見られ、Site C0017でも見られた海水の浸入を示しています。この深度の堆積

物は、変質していない軽石であることを反映しています。これより深い層の堆積物は熱水変質を受けており、透水性が非常に低くなっている層があることも分かっています。間隙水の組成も深度ごとに大幅な変動を示していますが、ここでは45 mbsf以深の堆積層に着目します。図2aの一番下に矢印で示したのは、伊平屋北海丘のNBCマウンドで噴出している熱水の化学組成です。45 mbsf以深の間隙水の化学組成は、マウンドから噴出している熱水の組成と非常に近いことがわかります。つまり熱水活動域の深部から上昇してきた熱水流体は、海底から噴出するだけでなく、その少なくとも一部は周辺の堆積層内に水平的に広がっているのです。

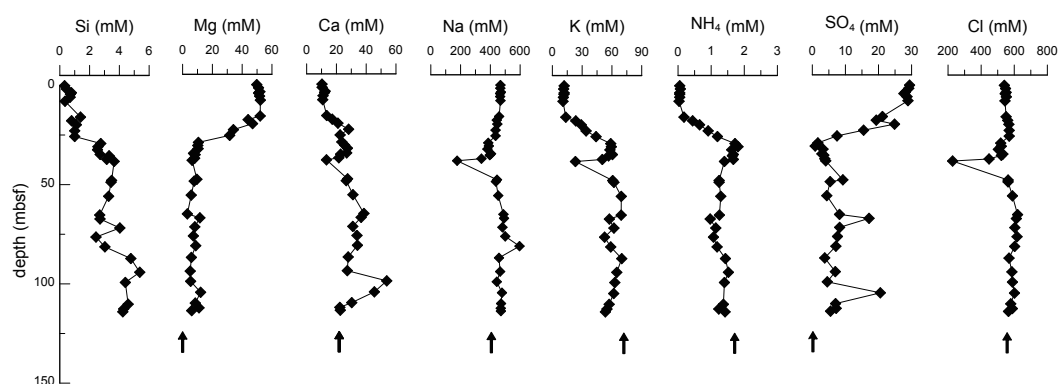
海底下の熱水流体の移動と混合

SIP計画のもとで引き続き実施されている熱水域掘削の際にも、同じような特徴を持つ間隙水化学組成がいくつかの熱水域で見出されています。このように、

熱水域とその周辺では、熱水噴出が見られない場合でも、海底下に熱水流体が移動して、海水起源の水との混合よびそれに伴う様々な化学反応を引き起こしていることが明らかになってきました。

さらに、こうした熱水と海水の混合場で鉱化作用が進行している可能性が、議論されています。海底下の広い空間で大規模に熱水の冷却が進む場所があれば、ずっと大きなスケールの鉱床ができる可能性があります。こうした仕組みで鉱化作用が実際に進行しているのであれば、堆積層の透水性（間隙が多くて水が移動しやすいこと）が鉱床のでき方を左右する重要な要因となるでしょう。伊平屋北海丘では、軽石が火山体の斜面に厚く堆積し1 km 以上にわたって分布していることが、海水や熱水の広がりをもたらししていたと考えられます。こうした地質学的な特徴を鉱床の形成と理論的に関連づけることができれば、鉱床探査の絞込みに対して有力な手がかりとなると考えられます。

(a) C0014



(b) C0017

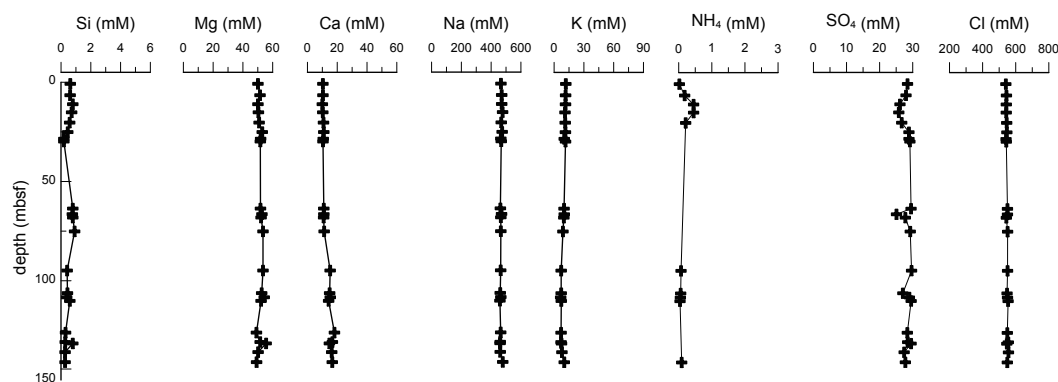


図2 Site C0014 (a) およびSite C0017 (b) の間隙水組成鉛直分布。



熱水同位体化学にもとづいて海底下水循環系の規模を推定する 海底下の水-堆積物相互作用に反映される多様な地質背景の検証と熱水同位体 化学データベースの構築

国立研究開発法人海洋研究開発機構 川口 慎介・眞壁 明子・松井 洋平

有用元素を運搬する海底下熱水循環系と水-堆積物相互作用

熱水鉱床は、海底下を流れる熱水に溶存して移動する元素が海底面（熱水噴出口）周辺で沈殿することによって生じる鉱床です。熱水鉱床の規模や品位は、「熱水の化学組成」「熱水からの元素沈殿率」「熱水の流量」「熱水活動の継続年数」といった「熱水の特徴」によって決定されます。このため熱水鉱床の成因を理解する上では、いわゆる鉱床学において研究対象となってきた固相（鉱体）の情報（分布・品位・年代）のみならず、液相（熱水）の情報（流体系の分布・温度・流量・化学組成）を理解することが重要です。そして今まさに熱水鉱床が形成されている現世の海底熱水活動域の調査では、噴出する熱水を直接観測・採取することが可能であり、さらに踏み込んだ熱水鉱床の成因理解が期待されます。

1977年に海底熱水活動が発見されて以来、40年にわたる科学調査および実験・理論研究により、熱水の化学組成やその支配要因については、その大枠が理解出来たと言える状況に至っています。現在の熱水化学の理解にもとづくと、沖縄トラフの熱水化学組成は、縁辺海ゆえに豊富な海底堆積物が関与する「水-堆積物相

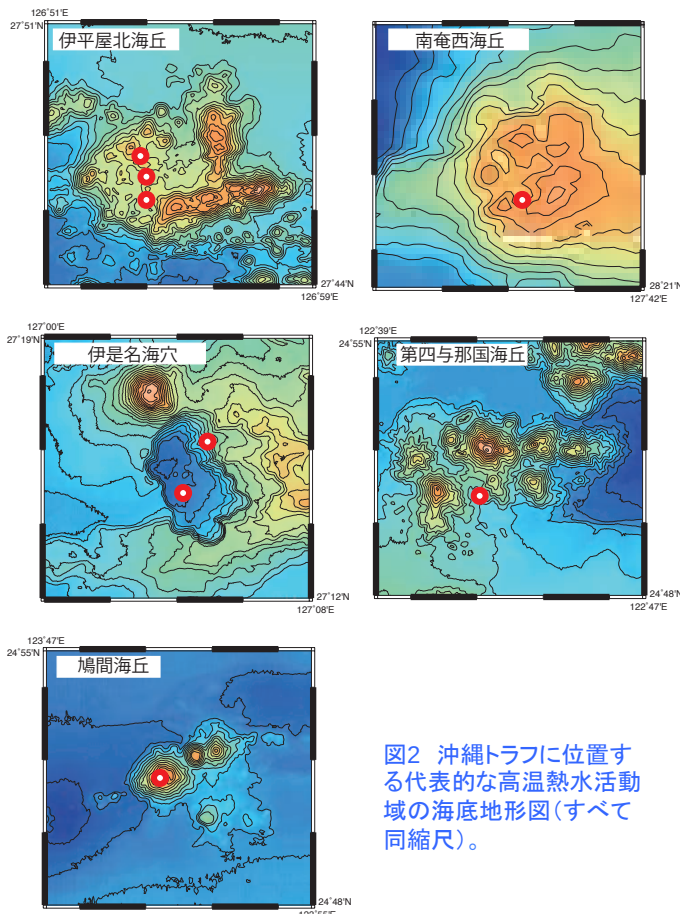
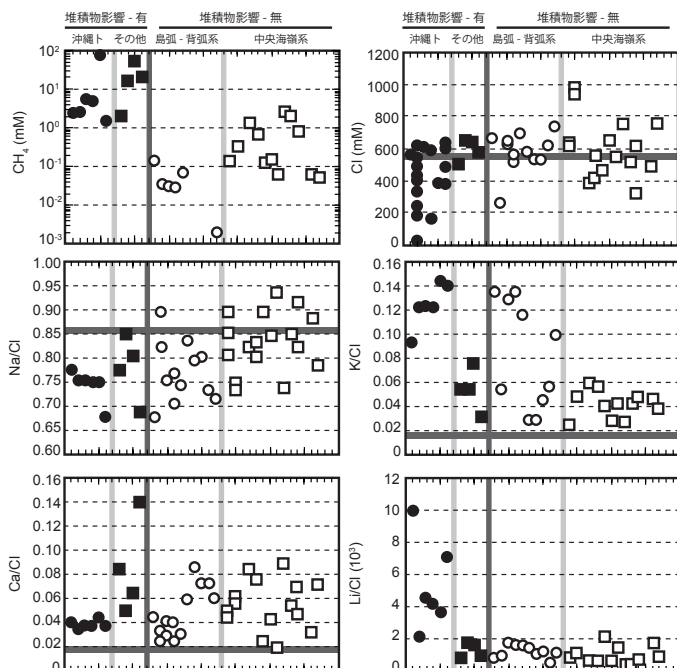


図2 沖縄トラフに位置する代表的な高温熱水活動域の海底地形図(すべて同縮尺)。



互作用」の影響で特徴づけられます(図1)。ここで一口に「堆積物」と呼んでいるものは、陸上生態系に由来する有機物や、大陸を構成する鉱物など、多様な物質で構成されています。また反応温度についても、深海の海水温(約0℃)から熱水温度(約400℃)までの幅があります。このため単に「水-堆積物相互作用」と称していますが、その実態は極めて多様です。たとえば「水-堆積物相互作用」の中で「有機物」の関わる過程のみに注目しても、冷たい領域での生命活動による有機物分解代謝あるいは熱い領域で起こる有機物熱分解化学反応というように、明瞭に区別される過程が起こります。

各熱水活動域の地質背景を見ると、小丘群の麓の堆積物が厚い領域に噴出口が位置するものもあれば、堆

図1 沖縄トラフおよび世界各地の熱水化学組成。沖縄トラフの熱水域ではメタン濃度やリチウム存在度比が明瞭に高い。

積物の被覆していない斜面に噴出口が位置するものもあります(図2)。それぞれの海底下ではこうした多様な地質背景を反映した多様な「水-堆積物相互作用」が想定されます。そしてそれぞれの地質背景によって決まる「水-堆積物相互作用」の有り様に依存して、それぞれに特有の熱水化学組成が決まっていると考えられます(図3)。これを逆にたどると、熱水の化学組成に見られる「水-堆積物相互作用」の影響をより詳細に把握することにより、海底下の水循環がどのような堆積環境で生じているかの推定が可能となり、熱水鉱床の規模を規定する最大要因である海底下水循環系の規模を推定することができると期待されます。

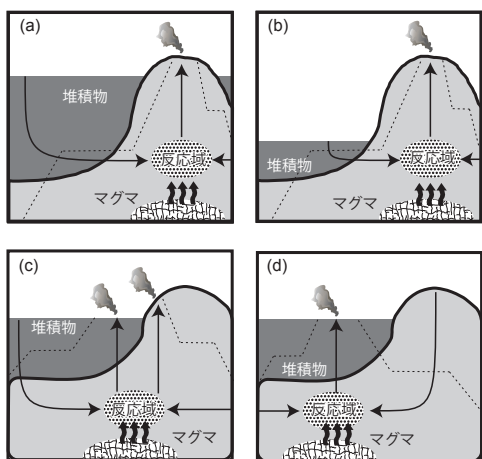


図3 沖縄トラフの各熱水域における地質背景・噴出口位置・水循環系の模式図。点線は微生物活性の有無をわかつ仮想的な等温度線で、点線より下位では高温のため微生物活性が認められない。

海底下の水-堆積物相互作用を流体の同位体組成によって見分ける

沖縄トラフなど縁辺海の熱水活動域に共通して見られる熱水化学組成の特徴として、メタン・アンモニウム・ホウ素・リチウムなどが高い濃度であることがあげられます。我々のグループでは、このうちメタン(CH_4)について炭素同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比)の分析を進め、伊平屋北熱水域では、 ^{12}C に富むメタンが卓越していることを明らかにしました(図4)。 ^{12}C に富むメタンは微生物活動に由来することを示唆しており、伊平屋北熱水域では微生物活動が可能な「低温」での「水-堆積物相互作用」の影響が強くなる水循環系であると考えられます。これを伊平屋北熱水域の地質背景と照らすと、伊平屋北海丘の内部ではなく、むしろ海丘の裾野部に広がる堆積物が主要な「水-堆積物相互作用」の場であると考えられ、数キロ以上の遠隔地までおよぶ極めて広大な海底下水循環系の存在が推定

されます。

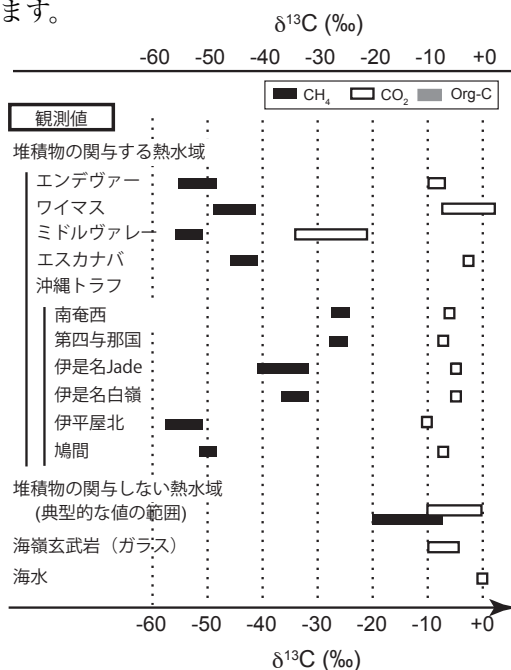


図4 高温熱水の炭素同位体比。沖縄トラフ内でメタンに大きなバリエーションが見られる。

多様な地質背景における熱水活動の発見と化学組成観測の蓄積

現在は、2010年以降に沖縄トラフを中心に、新たに発見された多様な地質背景をもつ熱水域において潜航調査を実施し、噴出口にアプローチして熱水を採取・分析することで、熱水同位体化学データベースを構築することに取り組んでいます。この熱水同位体化学データベースには、「堆積物」に含まれる有機炭素に由来する情報であるメタンとその炭素同位体比に加え、「堆積物」に含まれる有機窒素に由来する情報であるアンモニウムとその窒素同位体比についても情報を集積しています。少し異なる情報を併せて取得することで、それぞれの指標で差異を生み出しうる過程についても追究が可能になると考えられます。またこの目的のため、熱水試料採取装置の改良やアンモニウム分析手法の高精度化・簡便化も並行して進めています。琉球大学の土岐知弘准教授を中心とした研究グループは、ストロンチウム・ホウ素・リチウムなど、「堆積物」の中でも特に鉱物の関与する「水-堆積物相互作用」の影響を反映する元素の同位体組成についての研究を推進されています。こうした調査研究の成果を統合し、多様な地質背景を網羅する熱水同位体化学データベースを充実させることにより、熱水同位体化学を調べることで海底下水循環系の規模について示唆がえられるというモデルの一般化・精緻化を進めていきます。

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－

2016年 12月 19日 発行

編 者	国立研究開発法人海洋研究開発機構	鈴木 勝彦
	国立研究開発法人産業技術総合研究所	池原 研
	国立大学法人九州大学	石橋 純一郎
	国立研究開発法人海洋研究開発機構	熊谷 英憲
	国立研究開発法人産業技術総合研究所	山崎 徹

発行者 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
神奈川県横須賀市夏島町2番地15
e-mail: sip-pc@jamstec.go.jp
電話: 046-866-3811 (代表)

ISBN978-4-901833-25-7

本書の内容に関するお知らせとお願い

本資料集の内容は、SIP『次世代海洋資源調査技術』、「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞込み手法の開発」課題の平成28年度途中段階の成果をまとめたものです。本SIPプログラムならびに研究課題は現在も研究開発の途上であり、本資料集に収められた結果・内容は、今後の研究開発の進展にともなって変更される可能性があります。

本資料集で取り上げた研究開発課題の内容、およびSIP『次世代海洋資源調査技術』、「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞込み手法の開発」課題に対するご意見、ご感想、ご要望等がございましたら、下記の連絡先までお知らせください。実用化に向け、また、より充実した成果となるよう、研究開発の参考にさせて頂くとともに、今後の成果発表に反映させるべく努めて参ります。

ご意見、ご感想、ご要望等に関するSIP課題実施期間中の連絡先：
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
神奈川県横須賀市夏島町2番地15
e-mail: sip-pc@jamstec.go.jp

