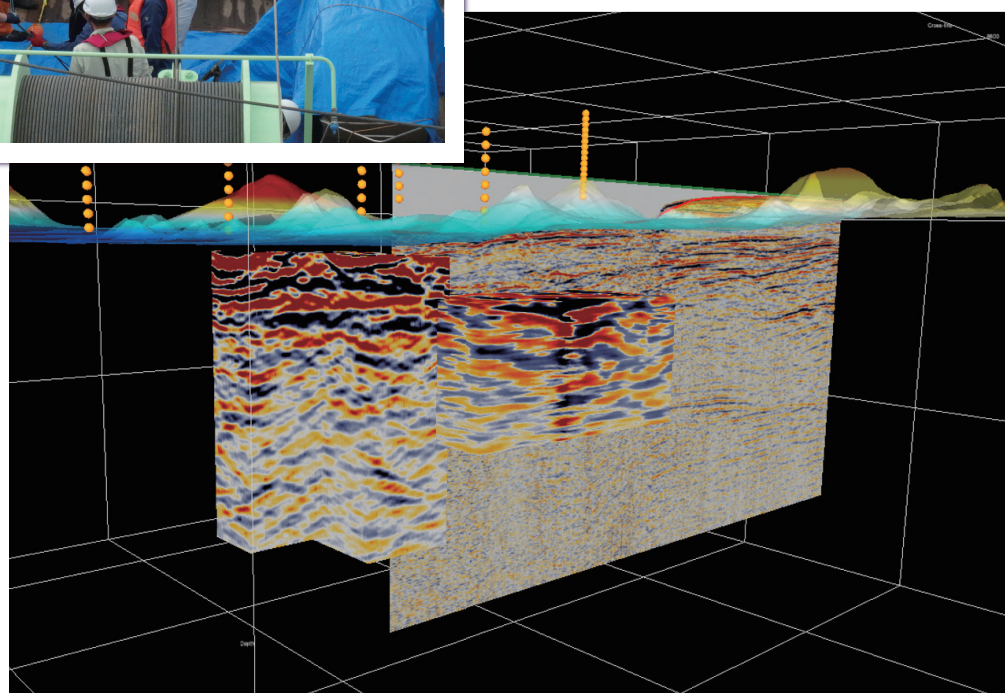
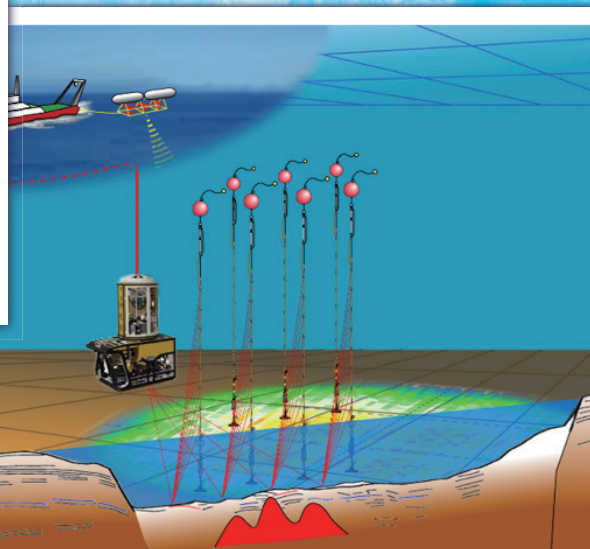
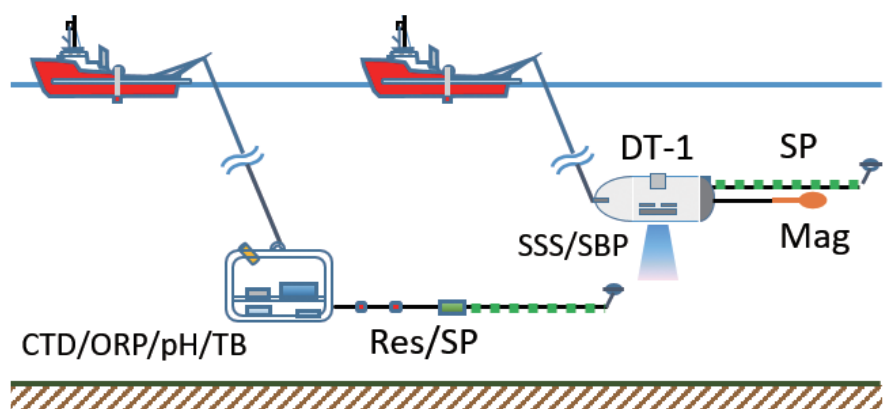
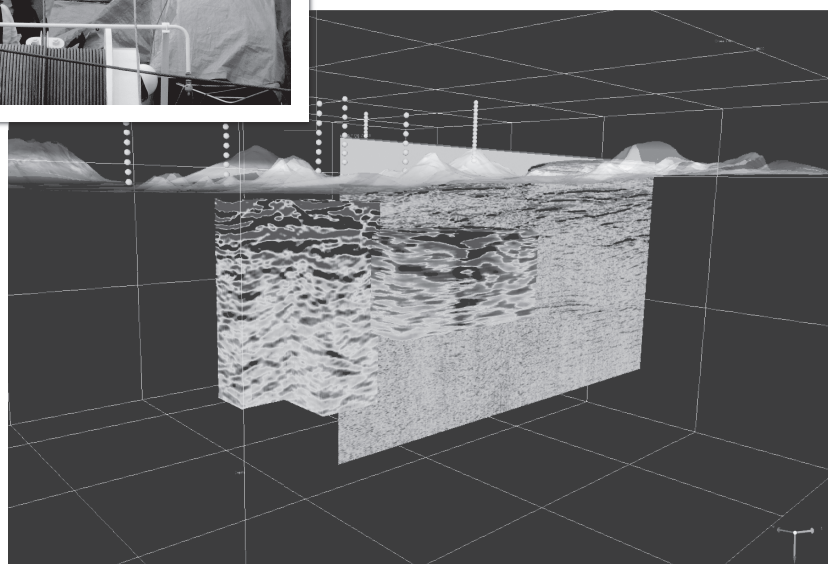
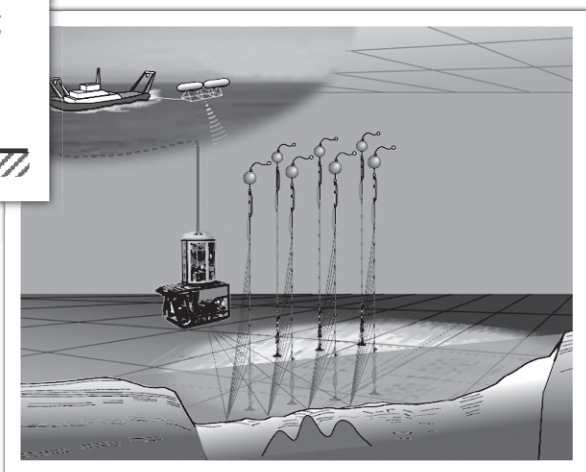
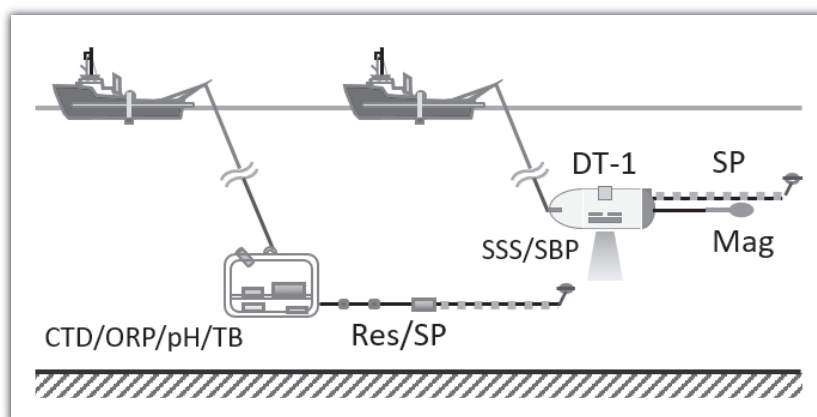


海底熱水鉱床 調査技術プロトコル



海底熱水鉱床 調査技術プロトコル



ごあいさつ



SIP「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」
プログラム・ディレクター 浦辺徹郎

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）¹』では、そのタイトルに示されているように、世界初の深海底鉱物資源調査（探査）技術体系を開発するだけでなく、そのシステムを産業化まで持って行くことを目指しています。そこで、計画が開始された初年度の2014年に、出口戦略を担う2つの民間グループ、次世代海洋資源調査技術組合（J-MARES）²および（一社）海洋調査協会³を選定し、共に計画を推進してきました。

さいわい、文部科学省の「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」などによる技術蓄積もあって、個々の要素技術の開発が計画より1年早く進んだことから、2016年に機器の実海域テストを共同かつ前倒しで行うとともに、それらを資源調査のプロトコル（手順書）に組み込んで『SIP 統合海洋資源調査システム』を構築しました。

資源探査システムを産業化するには、開発するだけではなく実際の海域に適用して実績を示す必要があります。そこで（独）石油天然ガス・鉱物資源開発機構（JOGMEC）のご協力の下、彼らが数多くのボーリングを実施していた沖縄本島北西海域の鉱床に対して試用し、“答え合わせ”航海を行いました⁴。これで海底面下の鉱体の存在が検知できたのに力を得て、2017年、JOGMECにより一部ボーリングが実施されていた沖縄久米島西方海域においてプロトコルに沿った調査を行い、成功裏に検証をすることができました。さらに計画の最終年度である2018年には、未検証の海域において民間グループが主体となってこのシステ

¹ http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/5_kaiyou.pdf,
<https://www.jamstec.go.jp/sip/>

² <http://j-mares.com/>

³ <http://www.jamsa.or.jp/>

⁴たとえば、浦辺徹郎(2017) SIP「次世代海洋調査技術－海のジパング計画－」について、沿岸域学会誌、29(4) 2017. 3, 10-18.

ムの最終実証と実績作りを行う予定です。

それらの航海と同時進行で、技術検証の結果を集約した調査技術プロトコル（手順書）が作られました。それに示された探査体系は陸上探査においてもまれなもので、もちろん海域においては世界初と言えます。本冊子はそれを一般向けに簡略にしたものです。ここには、探査対象の絞り込みの考え方、それぞれの手法から得られる情報と条件などの情報などの一端を示しました。

最後に、『SIP 統合海洋資源調査システム』を適用して資源探査を行う際に、初期段階から環境ベースライン調査も併行して実施することを強く推奨したいと思います。その理由は、この手法を用いて発見された海底鉱物資源がいざ開発される暁には、操業に先駆けて環境影響評価(EIA)を実施することが不可欠だからです。また、海洋開発事業への融資を受けるには、環境重視を謳った世界銀行の「赤道原則」を満たすことが必須だからです。環境ベースライン調査はコストの上乗せにつながる印象がありますが、開発に至る時間の大幅な節約につながるという結論も私どもは得ております。この点については、別に本 SIP 海のジパング計画で作成している環境影響評価プロトコルを参照して頂ければ幸いです。

本プロトコルの企画編集は木川栄一テーマリーダーのもとで行った。作成に当たっては、JOGMEC 他助言者の皆様、数多くの航海の安全な実施に寄与された船長以下船員の方々にお世話になった。記して感謝するとともに、このプロトコルがわが国周辺海域の海底資源開発の実現に寄与できることを強く願っている。

浦辺徹郎

目次

ごあいさつ 1

1. 調査技術プロトコルの概要とその目的 5
 - 1-1. 調査技術プロトコルの概要とその目的 7
 - 1-2. プロトコルの取り扱いについて 12
2. 成因研究成果による絞り込み 13
 - 2-1. 海底熱水鉱床の分布とテクトニクス・地質 13
 - 2-2. 成因モデルの概要 14
 - 2-3. 成因モデルをもとにした絞り込み技術 17
3. 調査技術パッケージ 19
 - 3-1. パッケージ構築の基本的コンセプト 19
4. 音波による探査技術 23
 - 4-1. 概査技術 24
 - 4-1-1. 船舶 MBES 等による地形調査 24
 - 4-1-2. 船舶 MBES 等による熱水プルーム調査 25
 - 4-1-3. 船舶による海底下構造調査 26
 - 4-2. 準精査技術 29
 - 4-2-1. AUV-MBES/SSS 等による地形調査 29
 - 4-2-2. AUV-MBES/SSS 等による熱水プルーム調査 30
 - 4-2-3. ACS による反射法地震探査 31
 - 4-3. 精査技術 32
 - 4-3-1. VCS による反射法地震探査 32
5. 電気・電磁探査技術 33
 - 5-1. 概査技術 34
 - 5-1-1. MT 法等による電磁探査 34
 - 5-2. 準精査技術 35
 - 5-2-1. AUV/曳航体による自然電位異常調査 35
 - 5-2-2. AUV/曳航体による電気・電磁探査 37
 - 5-3. 精査技術 38
 - 5-3-1. ROV による電磁探査 38

6. 重磁力探査技術	39
6-1. 概査技術	40
6-1-1. 船舶による調査	40
6-2. 準精査技術	42
6-2-1. AUV/曳航体による調査	42
6-3. 精査技術	44
6-3-1. ROV による調査	44
7. 物理探査的手法と並行して行いうる調査	46
7-1. 確立された調査技術	47
7-1-1. 船上からの地質調査	47
7-1-2. 海底地殻熱流量調査	48
7-1-3. 船上からの CTD-CMS パッケージによる調査	49
7-1-4. AUV/曳航体等に搭載した物理化学センサによる調査	50
7-2. 将来有望と考えられる調査技術	51
7-2-1. 海底下の物理化学多項目計測装置による調査	51
7-2-2. 底質試料の地球化学的指標に基づく調査	52
8. 統合地質解釈評価	53
8-1. 数理科学によるポテンシャル予測	54
8-1-1. 陸上黒鉱鉱床・海底熱水鉱床の数理科学的解析	54
8-2. 統合解釈	58
8-2-1. 異種物理探査結果の統合解析	58

1. 調査技術プロトコルの概要とその目的

海底鉱物資源をめぐる現状

《年間 1 兆円を超える金属資源探査費》

21 世紀に入って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、金属鉱業界は時価総額(2011 年) が 250 兆円を超え、世界経済の中で最大のセクターの一つになった¹。非鉄金属資源への探査費用の合計額は、ピークを迎えた 2012 年の約 1.7 兆円²から減少傾向が続いているものの、金属価格が底をついた 2015 年の時点でも約 1 兆円³もの投資がなされている。

このように、陸上で大規模に行われている非鉄金属資源の探査が、何時どれくらいの割合で海底資源の探査に向けられるようになるかは見解の分かれるところであろう。たとえば OECD(2015)⁴は、世界経済の発展にとって資源の安定供給が決定的に重要であることから、海底資源開発の経済規模は 2030 年までには 1.3 兆円⁵になると予測している。現時点で、海底資源探査・調査産業の市場規模は微々たるものであるが、OECD が予測しているように、いったん始まると急速に拡大する可能性があることから、わが国が海底資源調査産業で世界をリードできるように準備が必要である。

金属鉱床とは、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と定義される。鉱床と呼べるかどうかは、金属濃度などの地質体の性質のみではなく、製品化までの過程での採算性も考慮する必要がある。すなわち、厳密な定義では、海底金属鉱物資源は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、「鉱床」とは呼べないが、一般的には期待を込めて鉱床と呼ぶ。本プロトコルにおいても、海底熱水鉱床という用語を用いる。

《商業開発に最も近い海底資源とは》

EU や OECD などが、最も早く商業的开发に至ると予想している海底鉱物資源が海底熱水鉱床(Seafloor Massive Sulfide; SMS deposits)である⁶。これは、

¹ SNL Metals & Mining

(<http://pages.marketintelligence.spglobal.com/state-of-the-market-mining-q4-update-download-emc.html?aliId=18849384>)

² 2012 年平均為替レート 1 ドル=79.8 円として計算

³ 2015 年平均為替レート 1 ドル=110.2 円として計算

⁴ Coulomb, R. et al. (2015), “Critical Minerals Today and in 2030: An Analysis for OECD Countries”, OECD Environment Working Papers, No. 91, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/5jrtknwm5hr5-en> and OECD (2014) “Future of Ocean Economy”

⁵ 1 ユーロ=130 円で計算。

⁶ たとえば ; ECORYS(2013) Study to investigate the state of knowledge of deep-sea mining, Final Report under FWC MARE/2012/06 - SC E1/2013/04

海底熱水鉱床が他の資源に比して鉱石 1 トン当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)内にあることが多く、水深が比較的浅く狭い海域に集中していること、エコロジカル・フットプリントが小さいこと⁷、などの要因によっていると考えられる。

《世界初の海底資源調査技術》

ただし、海底熱水鉱床に対する系統的な探査法は世界的に存在しなかったことから、その確立が必要であった。本 SIP では、世界で初めてその開発に挑み、多くの成果を得た。このシステムが、陸上資源に投資されている金額の一部の受け皿になることを示して、ビジネス化を展開すべきであろう。また、ここで開発された技術やシステムの多くが、コバルトリッチクラストなどの他の資源の探査にも応用できることを指摘しておきたい。

海底熱水鉱床の調査・探査の目標

《陸上探査に比肩しうる海底探査を目指して》

陸上における金属資源探査は、ジュニア・カンパニーと呼ばれる小規模の探査専門会社が行うものから、Rio Tinto 社や BHP Billiton 社といった資源メジャーが行うものまで多岐にわたっている。日本にはいずれのカテゴリーの企業形態も無いため、JOGMEC が日本の鉱山会社のために海外探鉱を実施している。その場合においても 1 件ないし 1 プロジェクト当たりの予算はさまざまであるが、大きく平均すると年間約 5 億円程度であることが多い。

そこで、民間による海底探査が陸上との競争に負けないためには、同程度の予算額で実施できる必要がある。そこでコストの削減に努め、5 億円で可能な調査パッケージを構築した。ここで最大のチャレンジとなるのが、海域調査における用船費の高さである。調査・探査のために民間船舶を使用する場合、トン数や性能によるものの、用船費だけで 1 日当たり 200 万～500 万円程度のコストを負担しなければならない。よって、海底資源調査にとって最も重要な点は、調査効率を高め、できるだけ航海日数を削減することである。

《AUV 複数運用の大きなメリット》

その解決策として、本 SIP では自律型無人探査機(AUV)の複数運用をコア技術と位置づけ、商業的には世界で初めての試みをおこなった。これは探査センサーを搭載した最大 4 台の AUV を、海面を走行する自律型無人制御機(ASV)に制御させる技術である。ASV と連結して制御された複数 AUV がさまざまなセンサーを用いて調査している間、母船は人間でなければできない調査を行い、合わせて 5 倍の効率を実現した。

⁷ S. Petersen et al. (2016) News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources, Marine Policy, 70 (2016), 175–187

このような AUV の複数運用は、さらに別のメリットがある。海洋調査の場合、安全のため荒天時には調査を中止しなければならないが、このような手法があれば、好天時に一気にデータを取得することができるのである。

《実地調査に基づいたコスト算出》

陸上探査に比して遜色のない調査ビジネスを実現するためには、実地の航海に基づいたコストの推算が必要である。本 SIP では 2016 年～2018 年にかけて民間グループが主体となって実施した航海において、経験的・実質的なコスト算出のデータを得ている。現在正確なコスト算出のために、計算方法の検討を続けている。

1-1. 調査技術プロトコルの概要とその目的

調査技術プロトコルの概略

《成因論に基づいた絞り込みの重要性》

陸上の探査においては、人工衛星や航空機に搭載されたセンサーによるリモートセンシングを用いて絞り込みを行うのが一般的である。しかし、海水が光を初めとする電磁波を吸収してしまうことから、海域の探査においては広域をカバーする探査法が存在しない。

そこで広い海洋から資源ポテンシャルの高い海域を絞り込んでいくためには、まず科学的な鉱床成因論に基づいた絞り込みを実施し、調査候補地を抽出する必要がある。

そのため、本 SIP プログラムでは、3つのテーマを見直し、(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・長期監視技術開発による環境影響評価手法の確立という新たな目標を立てた上でそれらを統合し、先述したとおり、『SIP 統合海洋資源調査システム』を構築した。

《段階に分けた調査航海の実施》

本システムの特徴は、成因研究により抽出された調査候補地に対し、段階的に、概査→準精査→精査と調査航海を進めることにある。これは、段階的に、広域をカバーできる“足の速い”調査法から、より詳細なデータが得られるものの、単一時間内にカバーできる面積が狭いが、より精度の高い調査法に進むことを示している。具体的には、まず船舶を用いた調査から自律型無人探査機(AUV)を用いた調査へ、そして最後は有索無人探査機(ROV)を用いた調査という流れで、段階的に有望海域を絞り込む効率的な調査システムである。本プロトコルはその手順を記載したものである。

《海底ボーリングのメリットとデメリット》

精査が終了して、数 km² に絞り込まれた海域では、開発企業によるフィージビ

リティー・スタディー（FS）が開始される。FS において最も効果的な探査手法は稠密ボーリングで、たとえば 50 メートルグリッドでボーリングを行い、品位分布や確定鉱量が調べられることになる。陸上であっても、海底であっても、資源開発に先駆けてこの段階を飛ばすことはできない。

しかし、本 SIP の「戦略策定タスクフォース」で明らかにされた点によると、海底におけるボーリングのメートル当たり単価は 100～200 万円と、陸上のそれの約 100 倍に達する。つまり、精査段階までのボーリング数をなるべく節約して最小限に留め、物理探査手段によって鉱床の外縁を明らかにすることが、効率上およびコスト上不可欠なのである。本システムはそれを可能にするものといえるが、逆にやみくもにボーリングを打つ探査手法を想定していない。

調査技術プロトコルの目指すもの

《技術的目標》

具体的な目標として以下のものを挙げた：1) 有望海域を 1 万分の 1 に絞り込む手法と技術、2) 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、および、3) 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。

《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 年度末までに、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。

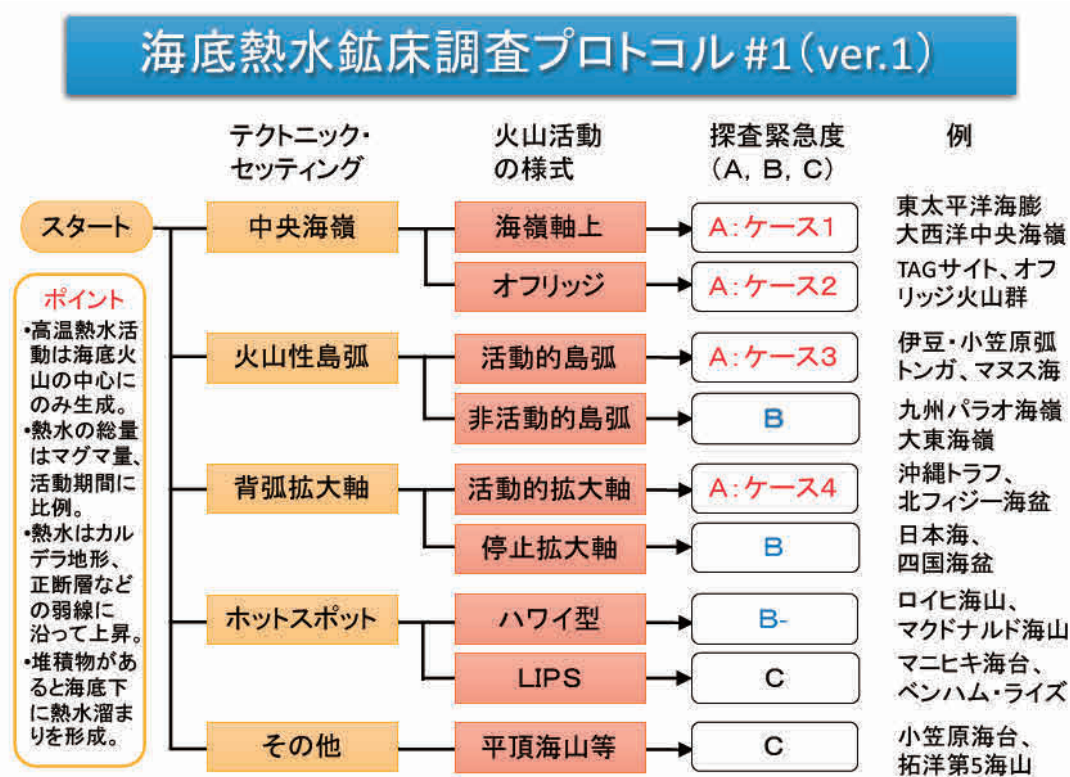
さらに、ここで開発された調査システムを国内のみならず海外で展開し、調査案件の受注を目指すこと。具体的には、同様の海底熱水鉱床の胚胎が期待される太平洋島嶼諸国におけるビジネス展開を考える必要があるだろう。もちろん、それらの発展途上小島嶼国(SIDS)にはそれを実施する資金や企業がないので、当面わが国の政府開発援助 ODA 資金などの導入資金が必要となるだろう。

《他の海底資源に関する取り組み》

本 SIP では、緊急性の観点から海底熱水鉱床に対する調査システムの開発にエフォートを集中してきた。しかし、それ以外に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で調査する技術を世界に先駆けて実現することの検討も進めている。これらについても、主として成因論に基づいて、本プロトコルに準じたプロトコルを現在作成している。

調査技術プロトコルの内容

《成因論に基づいた絞り込み手法》



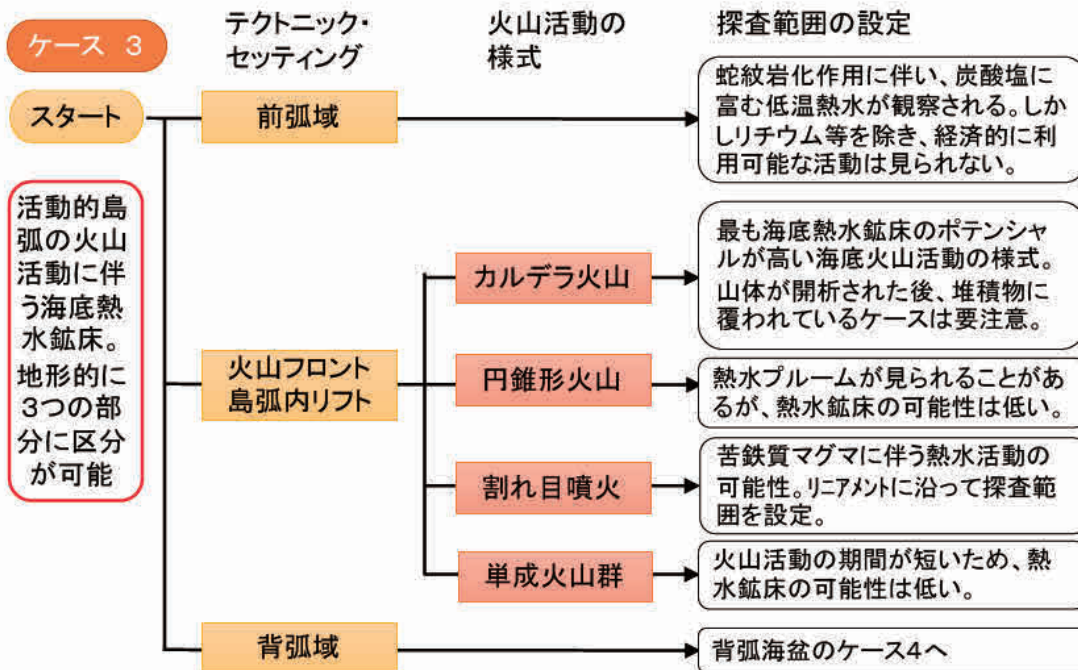
海洋全体の面積は約 3 億 6106 万 km² であり、その中からテクトニックな場ごとに分け、広域地図で示されるような数十万 km² 規模に机上検討として絞り込む必要がある（上記例を参照）。これまで、さまざまな文献⁸において、中央海嶺に関する資源ポテンシャルは考察されているが、それらにわずかに含まれているものを除いて島弧系に関する情報は存在しない。いずれにせよ、本 SIP では「戦略策定タスクフォース」において、限られた情報をまとめ、探査緊急度としては上記 A のケースがあると結論した。今回、B ないし C とランクされた海域についても、将来検討すべき余地があるものの、まず A ランクから手を付けるべきということである。

さらに、本 SIP では、成因論的検討から絞り込まれた A ランクのサイト群で、実際に調査航海を実施する必要性から、上記のケース 3 およびケース 4 を優先的に取りあげた（下記例を参照）。（本プロトコルはこれら 2 つのケースに基づいて作成されており、ケース 1 および 2 においては、若干の修正が必要である。）この段階で、概査着手海域を数万 km² まで絞り込むことが可能である。

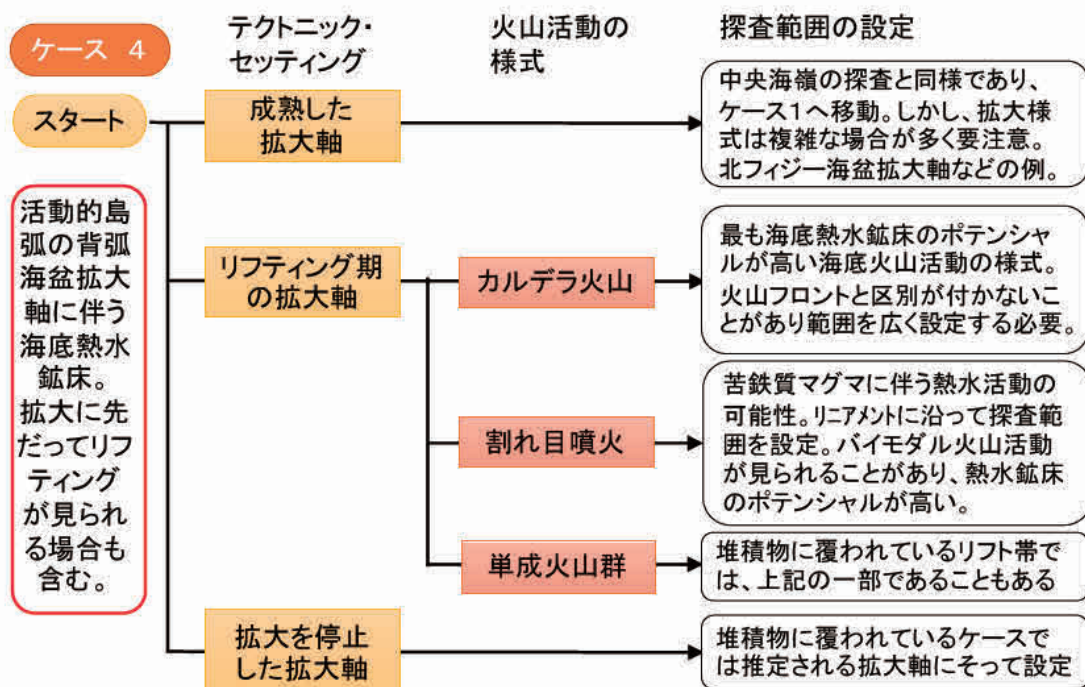
⁸ Hannington, M. et al. (2011) The abundance of seafloor massive sulfide deposits, *Geology*, v. 39; no. 12; p. 1155–1158; doi:10.1130/G32468.1

Singer, D.A. (2014) Base and precious metal resources in seafloor massive sulfide deposits, *Ore Geology Reviews* 59, 66–72 など

調査プロトコル：火山性島弧のケース



調査プロトコル：背弧海盆拡大軸のケース



注意すべき事は、科学的成因論に基づく絞り込みは、この段階に限られるわけではなく、この後も資源調査のさまざまな段階における、“次の段階に進むか、ここであきらめて別の海域に移動するか”という意思決定に重要な働きをするということである。詳しくは第2章を参照されたい。

《探査技術に基づいた絞り込み手法》

数万 km² 規模の「概査着手海域」が決定されると、探査技術に基づいた絞り込み手法が適用され有望海域の数十 km² まで段階的に絞り込むことになる。概査段階ではまず、船舶やそれに曳航された機器、および AUV 探査機が用いられる。そのような資源探査の上限を決めるのは投資額であり、国による探査計画などでは概査調査を広域に実施することになるだろう。ここで使われる手法については第4章以下に詳しく記載した。

《各章の内容》

第2章では、成因論に基づいた有望海域の絞り込みを解説する。ここでは、成因研究で得られる科学的知見を最大限利用して本 SIP プロジェクトで構築した海底熱水鉱床の成因モデルに基づき、船舶による調査が可能な数万 km² 程度の概査を行うことができる程度の海域を設定する。成因モデルは科学的な成果による新たな知見が加われば、改定されるものであり、それによってさらに効率的に絞り込む方法が可能となるので、モデルの改定は継続的に行っていくべきである。

第3章では、実際に行う調査パッケージのコンセプトを示す。第4章以降は、各要素調査技術について示している。第4章では音波による探査技術、第5章では電気・電磁探査技術、第6章では重磁力探査技術、第7章では物理探査の手法と並行して行われうる調査について紹介した。第4章から第6章については、おもに技術的にも確立し、活用され、現在さらにローコスト化や高解像度化が進んでいる技術である。第7章では補足的に行う探査技術および将来的に活用が可能であろう化学的手法について紹介をした。

概査では船舶や AUV を運用した音響による地形調査など、第4章から第7章で紹介した調査を行う。準精査では、水平方向の異常値の検出に有効な地震波調査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を行う。準精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の把握に進む。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となる。

概査、準精査、精査で得られる多種多様なデータはデータベースとして利用できるようにまとめる。さらに、各データが個別で利用され、例えば GIS にプロットされるのみでは、本来見出したい鉱床の位置、広がり、それらの手がかりになる物理的、化学的指標を見逃すおそれがある。得られたデータを有効に

利用するには、異種データを統合し、ビジュアルに見られることで非専門家にもクリアな情報が与えられるようにすることが理想的である。この手法は未だ確立していないが、確実に将来必要になる手法として第8章に紹介した。ここでは、現在進展がめざましい数理科学を利用し、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る。たとえば、地震波反射構造に掘削による検層データを統合することによって、地震波速度構造を示し、鉱化帯を示すことが可能となる⁹。

1-2. プロトコルの取り扱いについて

調査技術プロトコルの構成と使用法

《使用上の留意点》

この調査技術プロトコルは、本プロジェクトで開発され、あるいは利用されている資源調査技術をまとめた手順書であり、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ない。

《環境ベースライン調査の同時実施の重要性》

国連海洋法では、国家の管轄の下で海底資源開発などの活動を行う際に、海洋環境の汚染を防止し、これを軽減及び規制するための法令を、国際的な規則及び基準に沿った形で制定することを求めている。詳しくは、別に本 SIP で作成する、“社会科学レファレンス「海洋環境の保全に配慮した海洋資源開発に向けて」”を参照されたい。

本 SIP では、海底鉱物資源開発が実施される前に、探査段階から生態系のベースライン調査を併行して実施することにより、コストおよびFS期間の短縮が可能になり、ひいては開発の迅速化につながると考えている。そこで、上記の『SIP 統合海洋資源調査システム』航海を実施する際にも、海洋環境影響評価のための調査を実施してきた。今後とも、このような実施体制が維持されることが望ましい。

国連その他の国際的枠組みの中で、海洋環境保全の意識がかつて無い高まりを見せており、たとえわが国の排他的経済水域（EEZ）内であっても、環境評価（EIA）を抜きにした開発を行うことはあり得ない。本 SIP では、EIA を安価かつ効率的に行うための技術開発を併せて行っており、別に環境影響評価プロトコルを作成した。これを本プロトコルと併用して、探査開発を行うことが不可欠である。

⁹ 辻健（2016）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― 第Ⅲ章 2 節

2. 成因研究成果による絞り込み

2-1. 海底熱水鉱床の分布とテクトニクス・地質

海底熱水鉱床は海底熱水活動に伴伴する鉱床であって、短期(数年)から長期(～10 万年)にわたる海底熱水活動により、地殻等から抽出されたり関連マグマからもたらされたりした金属元素が輸送され、沈澱濃集して形成されるものである。そのような海底熱水活動は、中央海嶺域・島弧火山・背弧海盆地に普遍的に存在しており、全世界の海底に約 1000 ヶ所ほど存在すると推定されている。プレートテクトニクスの教えるところでは、これらに加えていわゆる大洋島を形成するホットスポット域という火成活動が存在する。しかしながら、そのような大洋島周辺では、高温の海底熱水活動は比較的希であって、資源ポテンシャルは低い。

上述の海底熱水活動域のうち、中央海嶺や背弧海盆拡大軸では苦鉄質火山活動による溶岩や深成岩、および海洋マントル由来の超苦鉄質岩が基盤岩を構成する。一方、島弧火山では苦鉄質～珪長質にわたる幅広い組成の活動がみられることから、火砕岩、溶岩、貫入岩、深成岩、および、より古い時代の大陸地殻など多様な基盤岩が見られる。これら基盤岩は海底面に露出していることもあるし、大陸縁辺部では、基盤を厚く陸源堆積物が覆うことも多い。後者のようなケースを sedimented ないし sediment-covered と呼び、中央海嶺、背弧海盆、島弧のいずれでも例が知られている。このうち、背弧海盆は西太平洋に数多く分布し、ベーリング海から、日本海、沖縄トラフを経て、フィジー海盆、ラウ海盆へと連なっている(図 2-1)。

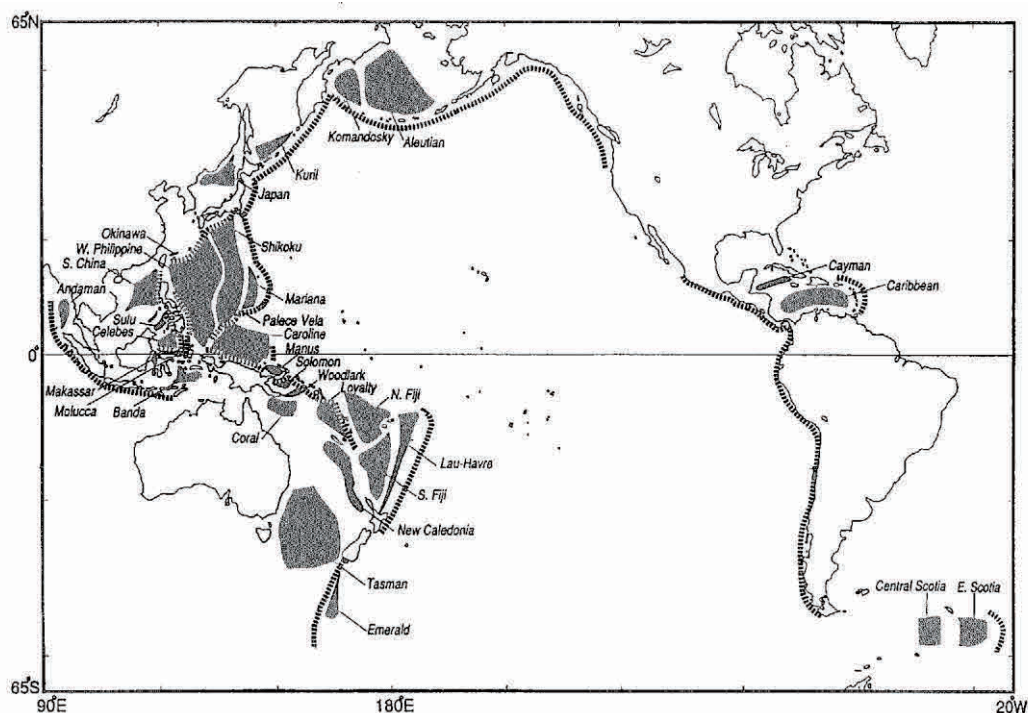


図 2-1 背弧海盆の分布(棚橋, 1994)。網掛け部分が海盆。

2-2. 成因モデルの概要

前節で述べたような熱水活動に伴う熱水性堆積物は、規模の大小や化学組成を問わなければ熱水活動域にはおおむね存在している。たとえば低温の熱水からは、熱水性鉄・マンガン酸化物、シリカ層、バライトなどの硫酸塩、イオウなどの産出が知られている。しかし経済的な価値を持つ鉱床となるためには銅・亜鉛・鉛などの硫化物が沈殿していることが必要で、そのためには少なくとも熱水の温度が 250℃以上あることが必要である。図 2-2 に示すように熱水中のベースメタルや貴金属元素の溶解度が強く温度依存性を持つためである。例えば、銅は図 2-2 の仮定の下で、350℃の熱水に数十 ppm 溶解しており、それが海底に達して冷却されると、1 トンの熱水から数十 g の銅が生成される。250℃の熱水からは 1g 程度しか生成されないと計算されることから温度の重要性が理解できる。一方、熱水活動の温度は、その水深の海水の沸騰曲線に強く規制されることから、水深は 1000 メートル以上有ることが望ましい。それより浅い地点での熱水活動は、低温でも溶解度を持つヒ素(As)、アンチモン(Sb)などの硫化鉱物に富み、経済性が限定される。一方で、1500 メートルを超える熱水活動は、銅の溶解度が急激に高くなる 350℃を越えることができるので、経済性を持つことが期待される。

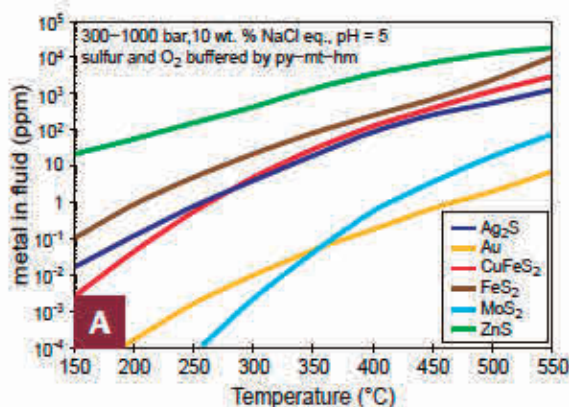


図 2-2 典型的な熱水鉱床の生成条件下でのベースメタル・貴金属の溶解度曲線 (Figure 3 of Fontboté et al., 2017)。Mineralogical Society of America の許諾を得て転載。

このように経済性を持つ第一の条件は水深＝熱水温度である。しかし、そのような鉱体が、大規模な鉱床を構成するには第 2、第 3 の条件が必要である。高温の熱水から効率的に金属が沈殿するためには温度の低下が必要であるが、海底熱水鉱床の鉱物サイズがきわめて小さいことは、それが急激に起こったことを示しており、海底面上ないしは海底面直下で低温の海水との混合が起こったことが伺える。混合が海底面上で起こると、硫化鉱物の核生成が急激に起こりブラックスモーカーとして、金属のほとんどが海水中に放出される。混合が海底下で起こると、反応箇所で硬石膏(anhydrite)の沈殿が生じて海水と熱水との混合が妨げられるので(self-sealing という)、金属の逸散はないものの沈殿の効率は

低くなる。

さらに生成後の保存についても考慮が必要である。特に、硫化物は酸化的な海水中では比較的速やかに酸化され分解すると考えられることから、還元的な水塊ないし海底下を発達の間として要請することが多い(例えば、Tornos, et al., 2015)。これによると、鉱石は1)海底面上のチムニー、その崩落物としてのマウンドとして形成されるもの、2)そのような「マウンド」が堆積物に埋積されるもの、3)海底下の地層内で析出・交代したもの、のタイプがあり得る。しかし、現在提案されているいくつかのモデルいずれも観察事実のすべてを統一的に説明する訳ではない。

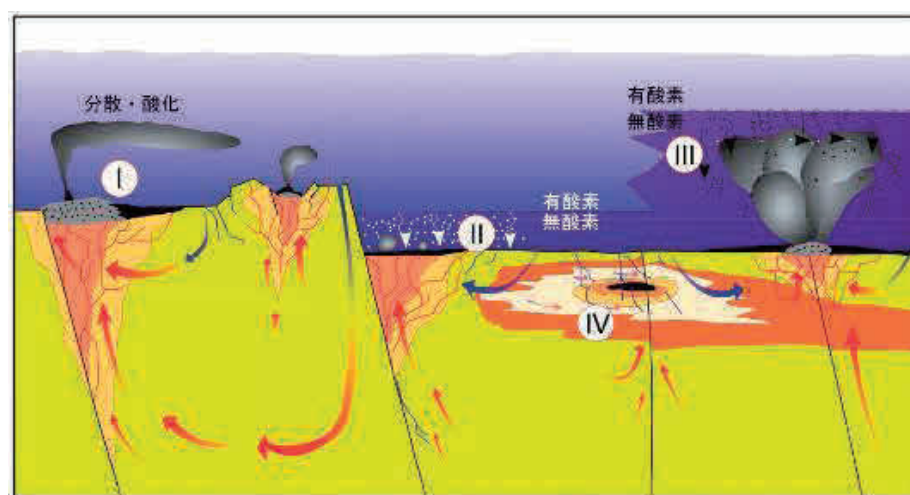


図2-3 海底熱水鉱床形成メカニズム数例の模式図(Tornos et al., 2015)に基づいて作図。

そこで、本”海のジパング”計画成因研究のチームでは、特に、「大規模鉱床」の形成されやすい場の特定に的を絞り、研究を進めてきた。その成果は2016年度に公表した海底熱水鉱床の成因研究成果資料集にまとめている。その要点は、

- ・凹地であること（沖縄トラフでいくつかの例外は知られている）
- ・凹地にある程度（～100m？）の堆積物が保持されること、特に、浸透性の高い軽石層があること（軽石を置換して、海底下に鉱床が生成されたとする考えもある）
- ・そのような鉱床の「器」に長期間熱水循環が作用すること

で、大規模鉱床の形成場が確保されていると見なせる。

熱水循環は、上述の堆積層を含む海底面下に海水が浸透し、浮力を得て上昇するまでに主として熱源付近のマグマだまり直上で金属成分を溶出、輸送するものである。オマーンオフイオライト等での観察から、マグマ溜まりの直上に形成されていると考えられる反応帯（緑泥石や緑れん石を生成するような350-400℃の部位；reaction zone）が大きく寄与していると考えられる。一方、流体力学的な計算から、反応帯から海底面への上昇は数分以内で断熱的に起こり、上昇途中での化学反応はきわめて限定的と考えられている。また、熱水循環の規模は熱源の規模と海底下構造に依存し、その寿命はおおよそ熱源の寿命で決まる。熱

源の規模を制約することは現時点では難しいが、地球上で起こっている火成活動の規模としては、中央海嶺域が圧倒的であって、全地球のマグマ生産量の8割以上を占めている。にもかかわらず、特にマグマ生産・供給率の最も高いはずの高速拡大海嶺で個々の熱水活動域が小規模(すなわち比較的短寿命)であることは、熱水研究者達を悩ませてきた。これは、高速拡大海嶺では、拡大軸直下の比較的浅所(海底下 1~1.5km)に細長いマグマだまりを形成するものの、その厚さは 50m、幅 1km 以下と小規模であることが関係しているのであろう。そのため、熱量としてはブラックスモーカー数本を 1 年維持する程度にすぎないこと、伸張場であるが故にマグマだまりからのマグマ供給が頻繁かつ小規模になり、同様に多数発生する開口割れ目からの海水の浸透も活発になるために、速やかに冷却される、ということ等によると考えられている(例えば、海野、2009)。一方、海嶺軸の伸張率(拡大速度)が遅い大西洋中央海嶺(Mid-Atlantic Ridge)に海嶺域としては最大の熱水マウンドである TAG マウンドが発達しているので、ここでは、海嶺軸のマグマだまりが深い場所にあることから、より安定的な熱源になっていると推定されている。同様の制約は、伸張場として十分に発達した成熟した背弧海盆にも成立しうる。

一方、島弧火山の個々のマグマだまりは、伸張場にあるときは、カルデラ形成をもたらす 10km³ オーダーのものも存在する一方、現在の日本列島のような圧縮応力場にある島弧火山ではおおむね小さいことが予想される。典型的な圧縮応力場での島弧火山の大噴火が 0.1~0.01km³ 程度にとどまることからこれは理解される。黒鉱の形成場である 15Ma の東北弧は伸張場であったと考えられている。実際、当時の火山砕屑岩の体積は非常に大きく、北米西海岸のイエローストーンバソリスの巨大な凝灰岩層(ash-flow tuff)に相当するほどである。現在の沖縄トラフも伸張場であり、そこでのマグマだまりの規模は判っていないが、ある程度大規模なマグマだまりの可能性がある。また、同規模のマグマだまりで比較すると寿命は島弧火山の珪長質マグマの場合が圧倒的にオーダーで長い(例えば、小屋口・金子、1996)。これは、マグマだまり内でのマグマの物性の温度依存性が異なるために、さかんな対流による速い冷却で急激に冷えてしまう苦鉄質マグマと、高い粘性によってもっぱら熱伝導によって冷却する珪長質のマグマとで冷却の時間スケールが異なるためである。このトレードオフの関係を解くことは必ずしも容易でないが、島弧に特有のマグマ供給系である、浅所の珪長質マグマだまりに間欠的に苦鉄質マグマが供給されるような場合はこのトレードオフを解消する可能性が高い。

一方堆積物の存在は、1) 鉱石析出場となり得る高浸透率の帯水層を保持すること、2) 鉱石を被覆し酸化を抑制すること、3) 堆積層中を水が通過する際に金属元素の溶脱が起こること、などから大規模鉱床の成立には有利な点が多い。実際に、伊是名海穴では海底面上に露出している以上の規模の鉱体が海底下の堆積物中に見いだされている。このような堆積物に埋積された鉱体を効果的に搜索する手法はこれまで開発されていなかったが、本”海のジパング”計画で極めて有効な手法が開発されたことにより実用化に至ったものである。

2-3. 成因モデルをもとにした絞り込み技術

以上から、海底熱水鉱床探査にもとめられる調査海域の絞り込み技術は、堆積層中の鉱体(潜頭鉱体)に対しても有効である必要がある。

一方、硫化鉱物主体の海底熱水鉱床に特有の性質として、

- ・硫化物鉱体は海底下で「電池」になるので、パッシブ電気探査において、負の自然電位箇所として検出可能である(Kawada and Kasaya, 2017)
- ・鉱体は低比抵抗(導電性)であるので、アクティブ電気探査でマッピング可能である
- ・堆積物下に広がっている鉱体の水平スケールは不明だが、～300m程度はひろがる例が知られている
- ・海底下深度は20-40m程度あるいはより深部に鉱染状の変質部を伴うことがある

ことが判ってきている。よって、これらに感度・分解能のある技術が組み合わせられる必要があり、現在の技術での採掘が現実的な海底下深度20-40m以浅をターゲットとすべきである。なお、海底下深度20-40m程度の鉱体を検出するには、音波による探査技術(第4章)、電気・電磁探査技術(第5章)いずれを用いる場合でも、所要の感度と分解能を実現するにはAUV/ROVや深海曳航体等のプラットフォームにセンサーを搭載して海底面へ接近した構造調査が不可欠である。そのような調査の際にも、自然の場(natural fields)を受動的に観測する方法(passive method)と人工的な信号源(artificial source)を用い、対する応答を観測する方法(active method)のいずれも原理的には適用可能である。しかし、アクティブな方法の場合は信号源の出力で探査深度が大きく左右されるため、大深度の情報を得ようとする際に困難が生じるが、解像度は海底面への接近程度(と送受信の幾何学的関係の工夫)で比較的向上が容易である。パッシブな方法の場合も、受信装置配列の工夫ほかで解像度の向上を得ることも可能ではあるが、それよりは、アクティブな方法よりも簡素な観測装置構成となることを利用してのやや広範囲なサーベイやより大深度からの情報を得る様な工夫がしやすい。

従って、本章で論じたようなテクニクス場をある程度選択した上での一連の段階的絞り込み調査技術パッケージは、例えば、

音波による探査技術を用いた地形・構造等特異点の抽出(概査) > パッシブ電気探査(自然電位調査)で負電位を検出、調査箇所の順位付け(準精査) > アクティブ電気探査で低比抵抗ゾーンとして平面的広がりを把握しつつ高解像度の地震波探査によって鉛直方向の情報を獲得する

といった流れが一例として想定されるであろう。

<引用・参考文献>

Fontboté et al. (2017) Elements, 13, 97-103.

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」pp.58.

- 金子・小屋口 (1996) 地質学論集, 46, 29-41.
- Kawada, Y., Kasaya, T. (2017) Sci. Rep., 7, 13352.
- 棚橋 (1994) 北フィジー海盆の海底拡大系のテクトニクス. 地質調査所月報, 45, 173-234.
- Tornos et al.. (2015) Ore Geol. Rev., 68, 142-163.
- 海野 (2009) 「中～高速拡大海嶺における上部海洋地殻構造の変化とその要因について」
InterRidge-Japan 研究集会「海底熱水系がつなぐ地圏・水圏・生命圏」東京都, 2009
年 10 月。 http://ofgs.aori.u-tokyo.ac.jp/intridgej/abstract_0910.pdf

3. 調査技術パッケージ

3-1. パッケージ構築の基本コンセプト

1) 概査・準精査・精査の概要

第2章で述べられた成因モデル（テクトニクスや地質学的背景を含む）をベースとして選定された海域において、広域調査から海域を順次絞り込んで詳細調査を実施していく流れが基本となる。各調査は、調査スケール（面積）や取得データの分解能の観点から、概査・準精査・精査に区分され、それぞれの探査技術に応じた調査項目が挙げられる（表 3-1）。

主として船体固定装置を使用した広域調査を実施して、海域の絞り込みを行うのが概査である。このような概査としては、主にマルチビーム音響測深機（以下、MBES）を用いた海底地形調査やそれと同時に実施できる熱水ブルーム調査が挙げられる。なお、広域のテクトニクスや地質学的背景を把握する目的で、船舶調査によって簡便に広域の地下構造を推定できる重力異常・磁気異常を用いる方法や、エアガン等を用いた反射法・屈折法地震探査や海洋 MT 法・CSEM 法による地下構造探査が、概査として行われることもある。

上記の概査によって得られたデータを吟味し、地形解析等で抽出されたカルデラ地形や断層等の地形・構造的的特異点周辺において実施されるのが準精査となる。準精査は水平方向のアノマリー抽出（面的な広がり）を主目的としたものであり、高分解能データを取得するため、深海曳航体や AUV を用いて海底面に接近する調査が必要となる。このような準精査として、詳細地形調査（熱水ブルーム調査含む）、自然電位異

表 3-1 概査・準精査・精査における調査項目

	探査技術	調査項目	プラットフォーム
概査	音波	船舶 MBES 等による地形調査 船舶 MBES 等による熱水ブルーム調査 船舶による海底下構造調査	船舶 (船体固定装置、海上曳航、自己浮上式を含む)
	電気・電磁	MT 法等による電磁探査	
	重磁力	船舶による調査	
準精査	音波	AUV (MBES/SSS 等) による地形調査 AUV (MBES/SSS 等) による熱水ブルーム調査 ACS による反射法地震探査	深海曳航体 AUV
	電気・電磁	AUV/曳航体による自然電位異常調査 AUV/曳航体による電気・電磁探査	
	重磁力	AUV/曳航体による調査	
精査	音波	VCS による反射法地震探査	ROV
	電気・電磁	ROV による電磁探査	
	重磁力	ROV による調査	

常調査や電気・電磁探査、ならびに曳航型音波探査の一つである ACS による反射法地震探査が挙げられる。また、前述の調査データの補完の一つとして、AUV や曳航体を用いた重磁力探査による海底下の構造推定も有効である。

準精査で面的に抽出されたアノマリー地点において実施される調査が精査となる。精査は、主に深度方向の構造を把握する、より高分解能な調査となるため、ROV を用いたものとなる。海底設置型音波探査として、VCS による 3 次元反射法地震探査が、また ROV を用いた電磁探査が主な調査手法として挙げられる。なお、ROV を用いた海底重力探査により、小規模な海底下の密度構造推定に有効であることも示されている。

上記の物理探査的手法の詳細は、第 4 章～第 6 章に探査技術ごとに概査・準精査・精査における調査項目としてそれぞれ述べられている。概査から準精査を経て精査に至る海域の絞り込みと、より高分解能データの取得による海底熱水鉱床分布の推定という流れではあるが、準精査・精査の各調査項目は、調査の流れやコストの観点などから臨機応変に組合わせて実施することが肝要である。また、第 7 章には物理探査と同時並行で実施することが可能な地化学的調査手法が述べられており、調査オプションとして採り入れることができる。特に、小型の物理化学センサーは曳航体や AUV に容易に設置する事が可能であり、主として活動的な熱水域調査に有効である。

2) パッケージ概要

調査技術パッケージとして、主たる各調査項目のフローチャートを図 3-1 に示した。未知海域においては、基礎となる地形データの取得を行う概査から実施するが、既知鉱床近傍では、既に地形データ等が取得されていることが想定されるため、基本的には準精査から開始されるものと考えられる。

「2-3. 成因モデルをもとにした絞り込み技術」において述べられているとおり、調査の基本となるデータは海底地形である。したがって、既存のデータがなければ新たに取得する必要がある。これにより、地形解析等を行い、カルデラ地形や断層等の地形・構造的的特異点を抽出することが可能となる。

なお、既存の地形データが存在する場合でも、分解能が粗ければ再取得することも選択肢の一つである。この場合に、ある程度の地形・構造的的特異点が把握できているのであれば、その付近周辺の準精査的調査、すなわち船舶の MBES のビームを絞り、かつ 5 ノット程度の低速航走でデータを取得することにより、高分解能の地形データを、熱水プルーム調査も兼ねて得ることも可能である。

次の段階は準精査となり、抽出された地形・構造的的特異点周辺域において自然電位異常調査を行う。これは曳航体や AUV を用いた物理探査であり、配置した 2 電極間の電位差を連続的に計測すれば良い。この簡便な調査により鉱床徴候域の検出・絞り込みが可能である。なお、この調査は電気探査（比抵抗探査）と同時に実施できるメ

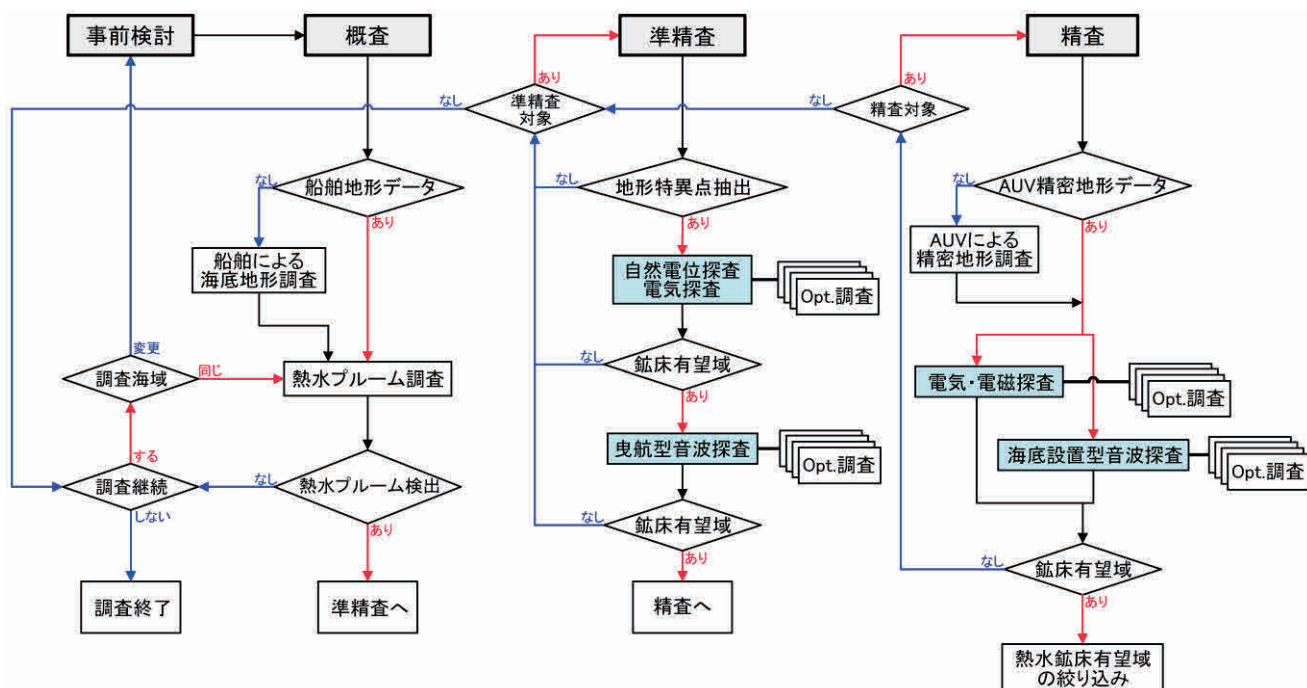


図 3-1 調査技術パッケージにおけるフローチャート

リットもある。ただし、電気探査の探査深度の観点からは、数 100 メートルの長いケーブルを曳航できる曳航体を用いた調査の方が有利である。

なお、AUV を用いた自然電位異常調査においては、AUV に搭載できる他の観測機器（例えば MBES やサイドスキャンソナーなど）や、磁力計・濁度計・ORP センサー・pH センサー等の小型の物理化学センサーとの同時観測が可能である。精査で必要となる精密地形データをこの段階で取得できる点や環境パラメーターを同時取得できるメリットがある。もちろん、このような同時観測は、曳航体を用いた自然電位異常調査においても実施可能である。

自然電位異常調査によってアノマリーの検出とその分布が確認された場合、曳航型音波探査である ACS による反射法地震探査を実施し、その周辺での鉱体を含めた火山岩類と堆積層の把握を行う。これにより、地質学的な面的広がり の把握が可能となる。なお、既知鉱床近傍域では、前述の自然電位異常調査／電気探査と ACS による反射法地震探査は同時並行的に行うことは可能であるが、未知海域での調査においては、自然電位異常調査／電気探査による鉱床徴候域の絞り込み後に実施する方がコストの観点からは得策である。

上記の自然電位異常調査／電気探査と ACS による反射法地震探査によって鉱床有望域が絞り込まれた段階で精査に移行する。精査段階においては、精密地形データが必須であるため、準精査段階においてデータ取得がなされていない場合には、この段階で取得しておかねばならない。したがって、準精査における自然電位異常調査／電

気探査の際に、精密地形データを合わせて取得しておくことが、調査時間の節約（＝コスト削減）になる。

精査としては、ROV を用いた電磁探査と海底設置型の反射法地震探査（VCS 反射法地震探査）が挙げられる。

ROV を利用した曳航式電磁探査では、海底近傍における調査を行い、金属硫化物を含む岩石の IP 効果も含め、電気伝導率と充電率のイメージングが可能となる。本調査は ROV を用いたものであり、電磁探査と同時に海底観察や地質試料の採取が行えるメリットがある。加えて、小型の物理化学センサーとの同時観測も可能であり、映像データを含む環境調査データの取得も同時に実施できる。

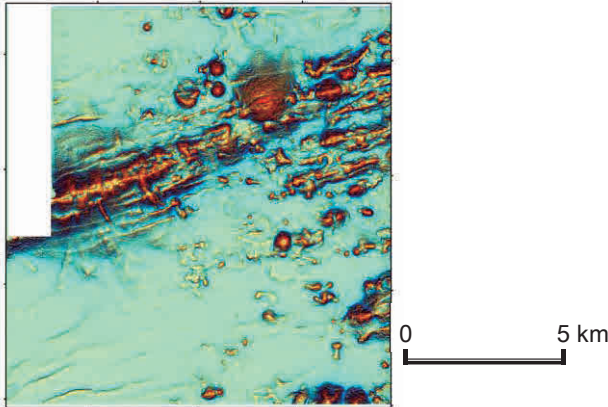
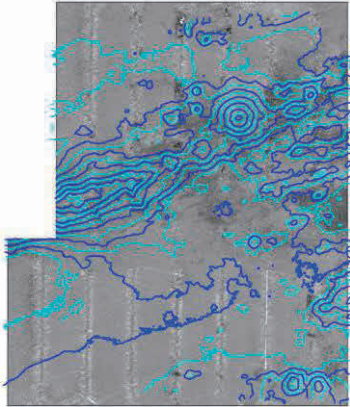
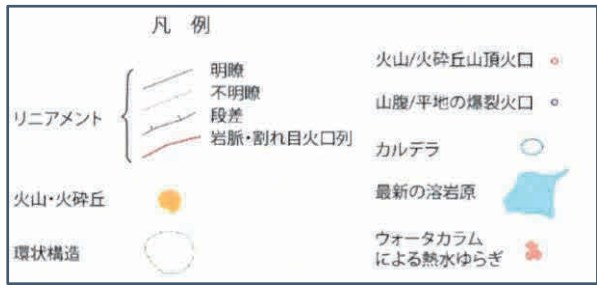
精査で行う VCS 反射法地震探査では、海底地形の起伏の激しい熱水鉱床賦存域において、速度構造を含めた 3 次元地下構造イメージング可能となる。前述した電気・電磁探査の結果を合わせ、最終的な海底熱水鉱床の有望域を絞り込み、掘削・開発への前段階とする。

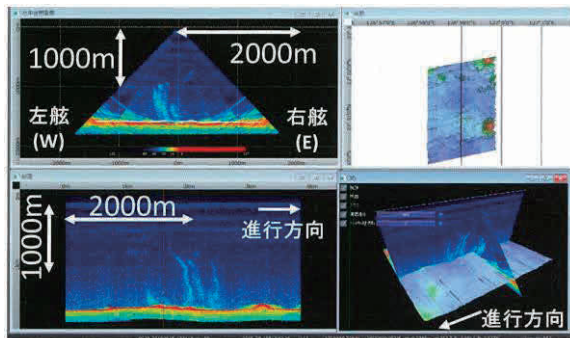
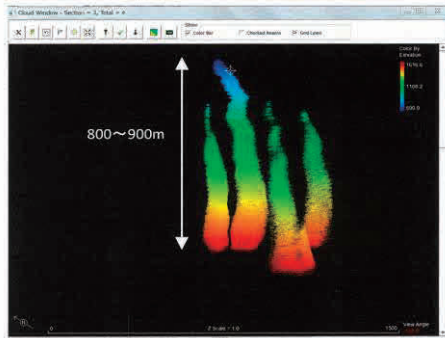
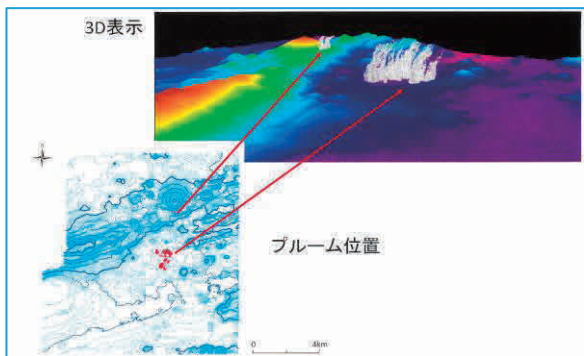
なお、前述した各調査項目で取得されたデータを処理・解析して可視化する、あるいは複数パラメーターを重ね合わせて可視化し、比較検討や考察を行うことは、概査から準精査、準精査から精査に至る過程や精査終了時に必要不可欠な作業であることを改めて指摘しておきたい。今後、これをさらに推し進めたデータの統合解析・評価技術が必要とされる（第 8 章参照）。

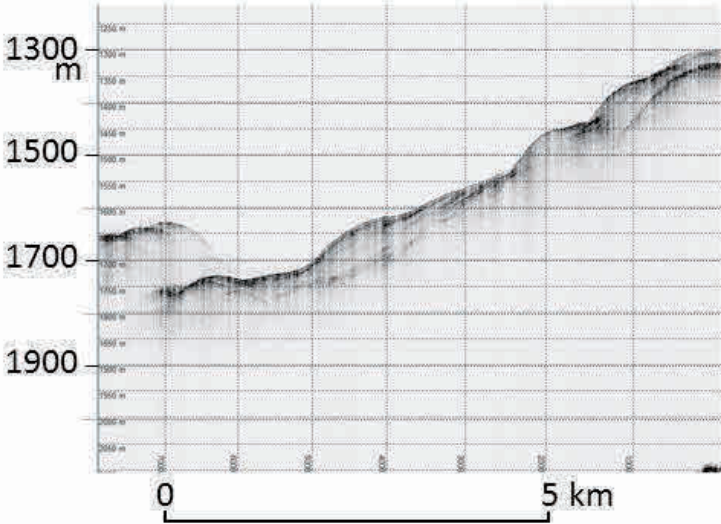
4. 音波による探査技術

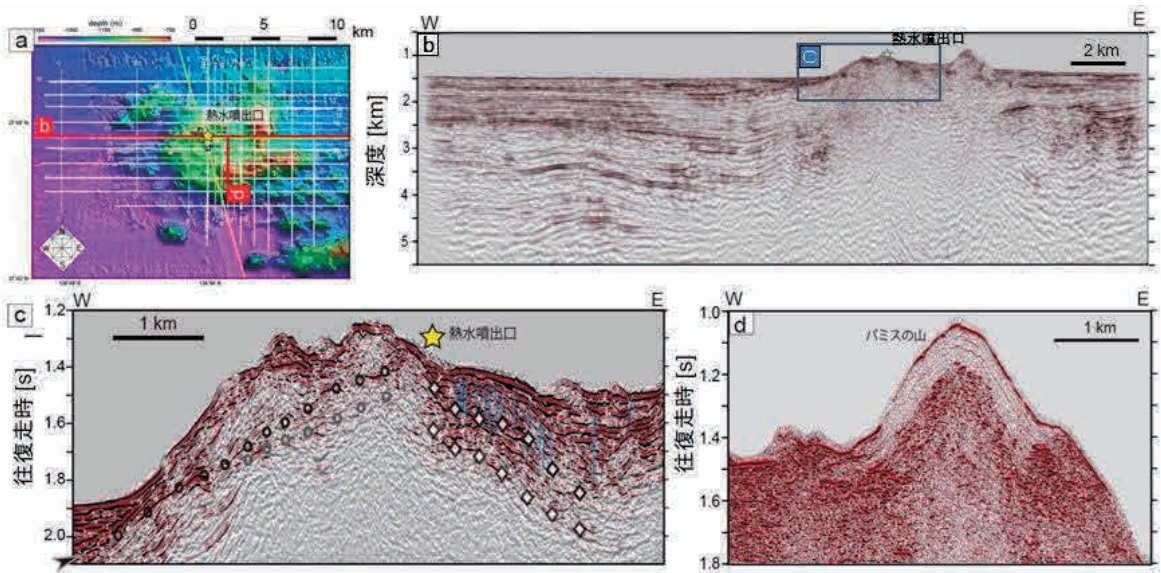
音波は、媒質中を通る粗密波（縦波）であり、光や電磁気比べ、海水中（液体）や海底・海底下（固体）への透過性が高く、かつ媒質中の伝搬速度が遅いため短波長において高い分解能を有する。また、反射、屈折、回折、干渉など波動特有の物理現象を起こし、振幅、周波数、周波数成分などの物理量を持つ。海洋ではこれらの原理や特長を利用し、海中や海底、海底下の観測に様々活用されている。

本章では、海底資源（特に海底熱水鉱床）を対象とした音波による探査技術を、調査範囲の絞り込み過程に分け概査、準精査、精査として示す。概査技術（4-1 節）では広域調査として、調査船舶を使用したマルチビーム音響測深機による海底地形調査と熱水プルーム調査、反射法・屈折法地震探査装置やサブボトムプロファイラーによる海底下構造調査を紹介する。準精査技術（4-2 節）では、概査で絞り込んだ海域において水平方向アノマリーの抽出または深度方向の構造把握として、AUV 等を使用した高周波のマルチビーム音響測深機による海底微地形調査と熱水プルーム調査、サイドスキャンソナーによる後方散乱強度調査、ACS による反射法地震探査を紹介する。精査技術（4-3 節）では、深さ方向の構造を把握する手法として、ROV や曳航体等を使用した VCS による詳細な地震探査を紹介する。

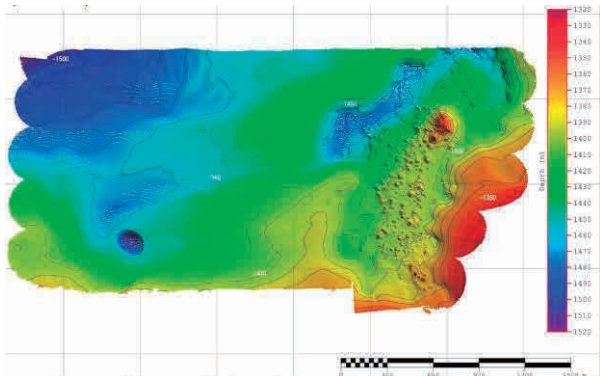
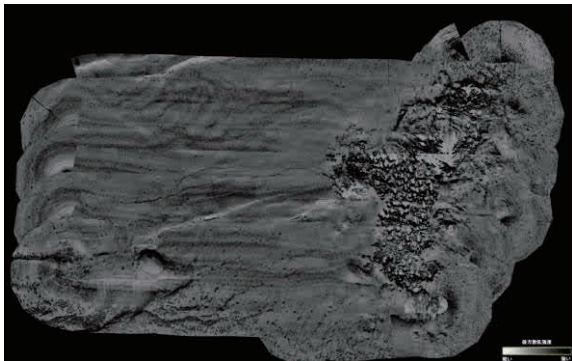
4. 音波による探査技術		4-1. 概査技術	4-1-1. 船舶 MBES 等による地形調査
調査項目	船舶 MBES 等による地形調査		
概要			
[原理] MBES：船首-船尾方向（縦方向）に群列配置したトランスデューサから同時発振した音響信号を、それと直交方向（横方向）に群列配置したハイドロフォンで受振し、インターフェロメトリック法によりマルチビームを形成し、船首方向と直交する扇状の多数の測深点を得る。 後方散乱強度：MBES のビーム信号を各ビーム角に相当する位置に部分的に記録し、これをつなげてサイドスキャン画像を形成する。			
[特徴] ・マルチビーム測深機であることから、未測域の無い海底地形情報を迅速に計測できる。 ・比較的、海況に影響を受けづらく計画的な調査が可能。 ・測線密度、船速、ビーム幅を変更することで、任意の取得地形データ密度にすることが可能。			
[用途] ・取得した海底の X・Y・水深データを用いて、等深浅図、カラー3次元図、立体視用海底地形図等に加工し、海底熱水鉱床が賦存する可能性がある海域を抽出する。			
調査の例			
[調査] ・平成 27 年に（一社）海洋調査協会が、中部沖縄トラフの伊平屋小海嶺付近で実施した海底地形調査の例を示す。使用 MBES：EM302。			
[結果] ・図 1 は MBES による海底地形、図 2 は MBES 後方散乱強度図（南北測線に対して西側ビームのみ表示、等深浅を重ねてある）。図 3 は地形判読結果。			
			
図 1. MBES による海底地形		図 2. MBES による SSS 画像	
			
図 3. 地形判読の結果			
[調査範囲の例]			
・海上磁力計調査と併せて実施 条件：水深 1300～1600m、船速対地 7knot、測線延長 90km、調査面積 149km ² 、観測時間 約 12 時間 測線方向 南北、測定モード 等距離モード（片舷 1500m 固定）、スワス角 75°、点密度：スワス方向 3.5m、進行方向 3.6m			
特性			
・広域な範囲の海底地形情報を、簡単かつ迅速に調査することができる。 ・簡易的な解析であれば、船上でデータを処理し、熱水活動域と考えられる可能性がある、特異的な地形を絞り込むことができる。			

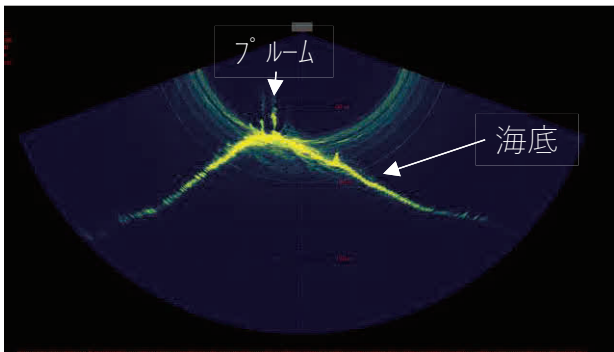
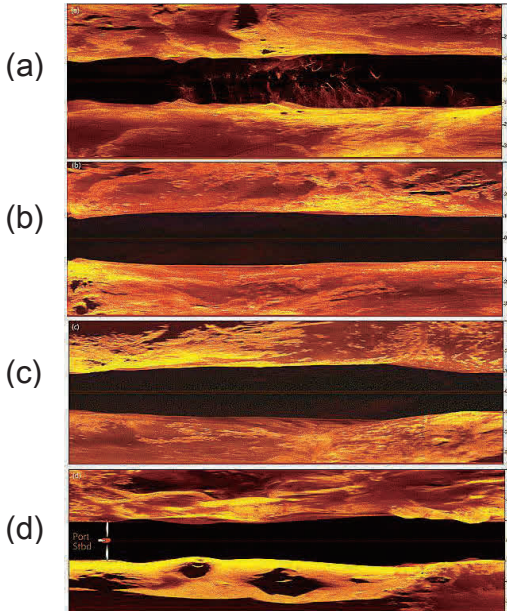
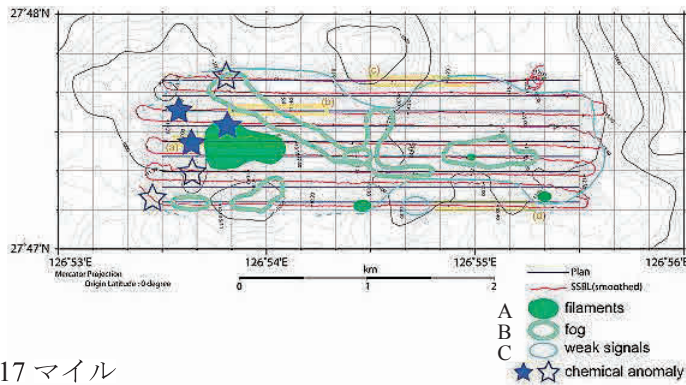
4. 音波による探査技術		4-1. 概査技術	4-1-2. 船舶 MBES 等による熱水プルーム調査
調査項目	船舶 MBES 等による熱水プルーム調査		
概要			
[原理]・ 地下から噴出する熱水やガスは、周辺の海水と音響インピーダンスが異なるため、音波を散乱させる。この現象を利用するのが音響による熱水プルーム調査であり、海底より上の水柱（ウォーターカラム：WC）部分の音響インピーダンス異常により生ずる振幅変化をとらえる。 [特徴]・ 低周波数の MBES を使用して捉えられたプルームは、二酸化炭素やメタンに起因する気泡である可能性が高い。ただし音波の周波数によって捉えられるプルームの大きさには限界があり、小さなものは AUV による SSS や ROV による高周波数の MBES でしか測定できない。 [用途]・ 広域な概査域の調査時に、海底からの音響異常記録の有無を探査することで、活動的な地域を判断するために用いる。			
調査の例			
[調査]・ 平成 27 年に（一社）海洋調査協会が、中部沖縄トラフの伊平屋小海嶺周辺海域で実施したプルーム調査の例を示す。使用 MBES：EM302。 [結果]・ 図 1 は MBES によるプルーム記録（SoundingDiver による）、図 2 は同ソフトによるプルーム記録の抽出例。図 3 は ArcGIS による 3 次元海底地形とプルーム記録の重ね図。			
			
図 1. MBES 音響イメージ		図 2. 熱水プルームの抽出結果	
			
図 3. 海底地形と熱水プルームの 3 次元表示			
[調査範囲の例] ・ 海面表層磁力計調査と併せて実施 条件：水深 1300～1600m、船速対地 7knot、測線延長 90km、調査面積 149km²、観測時間 約 12 時間 測線方向 南北、測定モード 等距離モード（片舷 1500m 固定）、スワス角 75°			
特性			
・ 広域な範囲での水中音響異常記録を、簡便かつ迅速に調査することができる。 ・ 他の調査と併せて実施できる。 ・ 簡易的な解析であれば、船上でデータを処理し熱水活動域と考えられる大まかなエリアを特定することが可能である。			

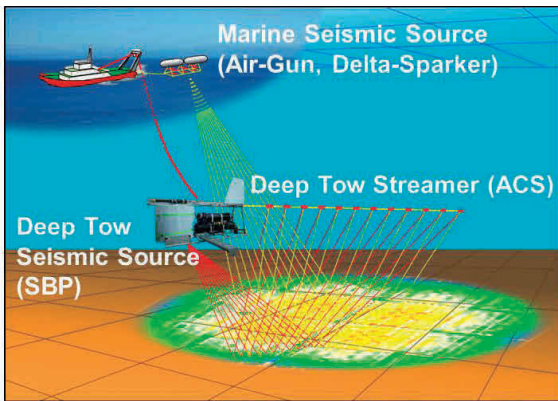
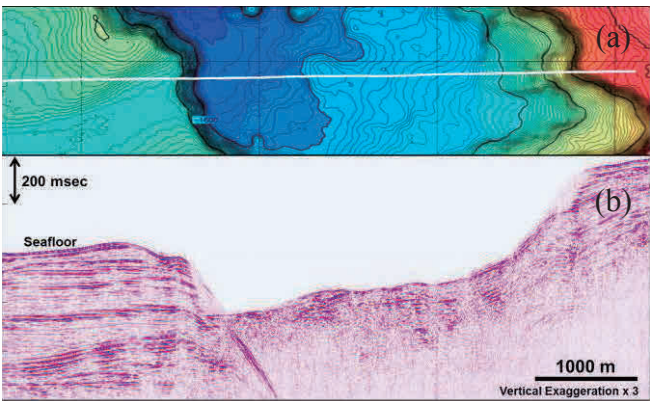
4. 音波による探査技術		4-1. 概査技術	4-1-3. 船舶による海底下構造調査
調査項目	表層探査（サブボトムプロファイラ：SBP）		
概要			
[原理]・SBP の多くは周波数掃引型（Chirp 方式）が採用されている。Chirp 波の送波信号と受波信号の相互相関処理（パルス圧縮）により、反射波形記録として収録される反射法音波探査の一種である。反射振幅は地層境界面での音響インピーダンスに依存する。 [特徴]・周波数が数 kHz と高いため、表層探査を目的とする。 [用途]・船底装備が一般的であり、広域の表層地質および堆積環境の推定に用いる。			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフ「久米島西方沖」の調査例を示す。船速対地約 6knot、FM-Chirp 方式。 [結果]・火山性地形の斜面部での記録例（図 1）であるが、地形急変部（記録左側）では回折波が現れ、地形が十分表現されていないことがわかる。また右側の最浅部付近でも周辺近傍地形からの回折波が現れている。記録中央部では表層下 100m 程度の地層境界が認められる。			
			
図 1. YK16-10 の SBP 記録例			
[調査範囲の例] ・マルチビーム音響測深器（MBES）による海底地形調査と併せて実施 <u>1 日の調査範囲：～2300km²（20 マイル×約 33 マイル）</u>			
特性			
・広域の表層堆積物の状況を、簡便かつ迅速に調査できる。 ・他の調査と併せて簡便に実施できる。 ・船上においてリアルタイムで結果を見ることができる。			

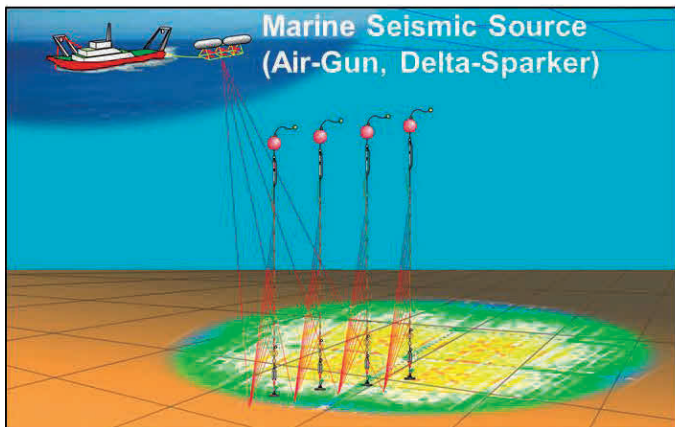
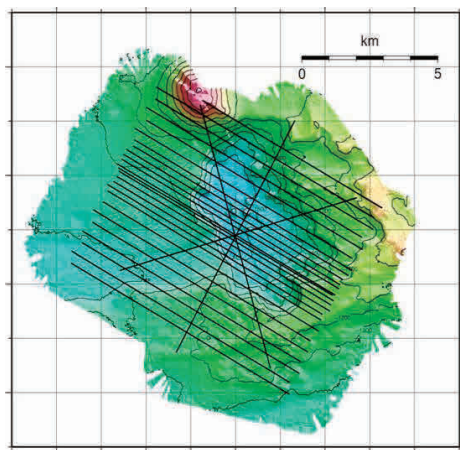
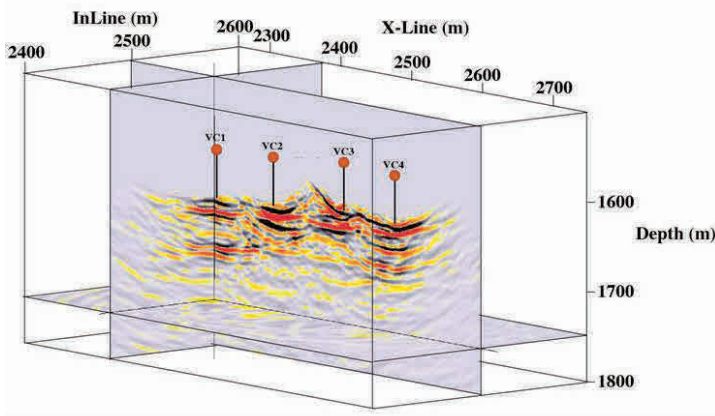
4. 音波による探査技術	4-1. 概査技術	4-1-3. 船舶による海底下構造調査
調査項目	反射法地震探査	
概要		
[原理] ・境界面までの音波の往復時間から反射面までの距離（深さ）を測り、海底下の連続的な地層構造の変化を調査する。		
[特徴] ・異なる音響インピーダンスが接する地層境界面からの反射波の振幅は、その音響インピーダンス比に依存する。		
・広域を調査する反射法地震探査は、海底熱水系を支える地質学的背景の理解に役立つ。		
[用途] ・堆積構造および基盤形状の推定に用いる。		
調査の例		
[調査] ・中部沖縄トラフの海底熱水活動域「伊平屋北海丘」で実施した反射法地震探査の例を図 1 に示す。		
[結果] ・(a)の白線は反射法地震探査の測線位置、赤線は反射断面(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が確認できる。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（鈴木他編，2016，Tsuji et al.,2012 を改変）		
		
図 1 「伊平屋北海丘」における反射法の結果。		
[調査範囲の例]		
・ 図(a)の範囲は約 12 マイル x 9 マイルで、測線数は長短合わせて 54 測線である。		
・ 結果(b)「R/V Kairei」による。測線長は 40 km、船速は約 4 knot。		
・ 結果(c)「R/V Kaiyo」による。		
・ 結果(d)「R/V Yokosuka」による。		
特性		
・ 広域の地下構造を連続的に高分解能で調査することができる。		
・ 反射波の重合速度から地層の P 波伝播速度を推定することができる。		

4. 音波による探査技術		4-1. 概査技術	4-1-3. 船舶による海底下構造調査
調査項目		屈折法地震探査	
概要			
[原理]・上層から伝播した地震波は地層境界面で屈折するが、下層の地震波速度が上層のそれより大きい場合、その地層境界面に沿って下層の地震波速度で伝わる屈折波が生ずる。この屈折波の走時から地下の地震波速度構造の変化を調査する。 [特徴]・屈折波は比較的遠方まで到達することから、広域な深部構造調査に適している。 ・広域を調査する屈折法地震探査は、海底熱水系を支える地質学的背景の理解に役立つ。 [用途]・地殻および最上部マントルの地震波速度構造調査に用いる。			
調査の例			
[調査]・琉球海溝-中部沖縄トラフを横切る測線で実施された人工震源（エアガン）と海底地震計（OBS）による屈折法地震探査の例を図1に示す[Nishizawa et al.(2017)に加筆]。 [結果]・南東から島弧下に潜り込むフィリピン海プレートの様子と、沖縄トラフ下では地殻が薄くなる様子がわかる。 ・数値は $V_p(\text{km/s})$を表し、波線で示された楕円は破碎帯を示す。			
沖縄トラフ 琉球海溝 100 km 30 km depth (km) ECr7 ECr31 ECr25 ECr6			
図1. フィリピン海から沖縄トラフを北西－南東方向に横断する屈折法地震探査の結果例。 [調査範囲の例] ・海底地震計は約 5km 間隔で設置され、震源の間隔は 200m である。反射法地震探査と併せて実施。 ・解析はフォワードモデリング [Tsuruga et al.(2008), Kubota et al.(2009)] を主とし、その結果を初期モデルとするトモグラフィック・インバージョン[Korenaga et al.(2000)]により、モデルの妥当性を検証。			
特性			
・地殻－最上部マントルの詳細な地震波速度構造を調査することができる。			

4. 音波による探査技術		4-2. 準精査技術	4-2-1. AUV-MBES/SSS 等による地形調査
調査項目	MBES/SSS による地形調査		
概要			
[原理] ・ MBES : 船首-船尾方向に群列配置したトランスデューサから同時発振した音響信号を、それと直交方向に群列配置したハイドロフォンで受振し、インターフェロメトリック法によりマルチビームを形成し、船首方向と直交する扇状の多数の測深点を得る。 ・ SSS : AUV の進行方向と直角方向に両舷から送波し、海底から散乱して戻ってきた受波信号を時系列でとらえる。			
[特徴] ・ MBES : 面的な測深が可能なことから、未測域の無い海底地形情報を迅速に計測できる。 ・ SSS : 微細な地形変化や底質の状況が受波信号の強弱に現れることから、海底面状況を迅速に調査できる。			
[用途] ・ MBES : 準精査域の精密地形図 (1-2m グリッド) の作成に用いる。 ・ SSS : 底質を含む海底面状況の推定に用いる。			
調査の例			
[調査] ・ 中部沖縄トラフ(久米島西方沖)における調査の例を示す。船速対地 3knot、海底面からの高度 70m、測線間隔 150m の東西走行と南西-北東方向の系統的な調査測線で実施。			
[結果] ・ 図 1 は MBES により得られた精密海底地形、図 2 は SSS によるモザイク図である。地形からは周辺地形に比べチムニーに富む区域が、限られた範囲に集中していることがわかる。			
			
図 1. 精密海底地形		図 2. SSS モザイク画像	
[調査範囲の例]			
・ MBES と SSS/SBP を併せて実施 条件 : 水深 1500~1600m、総測線長約 18 マイル、スワス角 128° 海底地形グリッドサイズ : 2 m			
特性			
・ 準精査域の精密地形を迅速に調査することができる。 ・ 地化学、地磁気等他の調査と併せて実施できる。 ・ 簡易的な解析であれば、船上でデータ解析を処理し、熱水活動域と考えられる可能性がある、特異的な地形を絞り込むことができる。			

4. 音波による探査技術		4-2. 準精査技術	4-2-2. AUV-MBES/SSS 等による熱水プルーム調査
調査項目		MBES/SSS による熱水プルーム調査	
概要			
[原理] ・ 地下から噴出する熱水は、周辺の海水と音響インピーダンスが異なるため、音波を散乱させる。この現象を利用するのが音響による熱水プルーム調査である。 ・ MBES：扇状に形成された多数の音響ビームのうち、海底より上の水柱部分(WC)の音響インピーダンス異常により生ずる振幅変化をとらえる。 ・ SSS：両舷から送波した信号のうち、海底より上の水柱部分の音響インピーダンス異常により生ずる振幅変化をとらえる。			
[特徴] ・ MBES：海底地形調査時に副次的に計測できる。 ・ SSS：海底面状況の計測時に副次的に計測できる。			
[用途] ・ MBES：プルーム発生域の分布推定に用いる。 ・ SSS：同上。			
調査の例			
[調査] ・ 中部沖縄トラフ(ケースⅠ：MBES 久米島西方沖、ケースⅡ：SSS 伊平屋北海丘)における調査の例を示す。			
[結果] ・ 図1にMBESによる例を、図2にSSSによる記録例(いずれも「うらしま」による)を示す。			
			
図1. MBESによる熱水プルームの記録例(上)。			
図2. SSSのWC内の散乱イメージ例(右上)。(a) Type A filament shape, (b) type B fog, (c) type C weak signals, and (d) no signal. (Kumagai et al.,2010)			
図3. 図2の(a)~(d)の平面分布(右下)			
[調査範囲の例]			
・ ケースⅠ：水深1000～1500m、総測線長17マイル ・ ケースⅡ：水深1000～1200m、総測線長約18マイル、SSS最大斜距離300m。			
特性			
・ 準精査域のプルーム調査を迅速に計測できる。 ・ 船上でクイックビューとしてプルームの発生箇所を確認できる。			

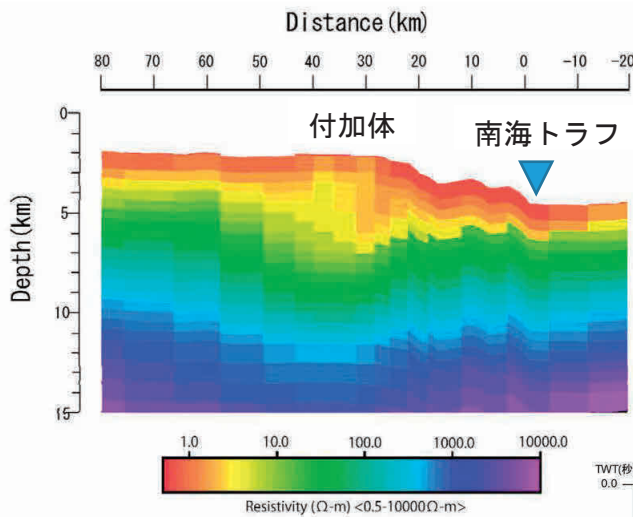
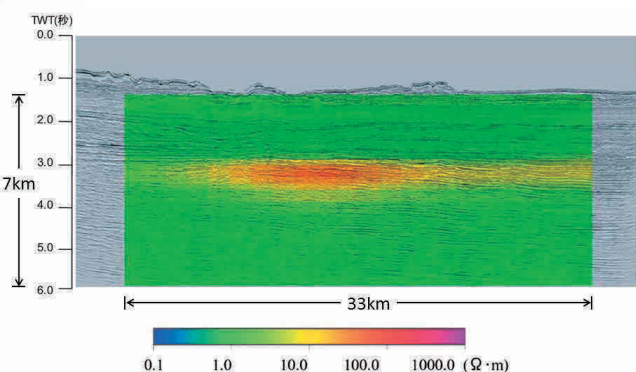
4. 音波による探査技術		4-2. 準精査技術	4-2-3. ACS による反射法地震探査
調査項目	ACS による反射法地震探査		
概要			
〔原理〕 弾性波を用いて物性境界で生じる反射波の走時や振幅を捉え、海底下地質構造を調査する。 〔特徴〕 ・2次元海底下地質構造断面が得られる。付随して概略的な速度構造が得られる。 ・ 反射イベントの周波数解析や極性解釈により熱水鉱床有望エリアを推定できる。 ・ 周波数が異なる震源の同時発震により、同じ測線の浅部/深部地質構造を同時に取得できる。 ・ 深海曳航によりシステムを海底に近づけられるため、海上ストリーマーカーケーブルを用いた場合よりも水平分解能が高い。 〔用途〕 水平数 km スケールの海底下地質構造調査に用いる。			
調査の例			
〔調査〕 沖縄トラフ海底熱水活動域で実施した ACS による反射法地震探査の例を示す（図 1）。測線は事前調査により得られた海底地形図や地形解析結果を元に設定した。船速は対地 2knot、発震間隔は 5m（海上震源）または 3m（深海震源）である。 〔結果〕 ・ 海底地形図（図 2a）の陥没地形を横断するような測線の海底下地質構造（図 2b）が得られた。 ・ 陥没地形の外側と内側で明瞭な地質構造の差異が認められる。 ・ 内側ではほとんど反射イベントが現れないことから、陥没時に堆積構造が崩れたと考えられる。			
			
図 1 ACS システム		図 2 海底地形図 (a) と海底下地質構造断面図 (b)、測線は上図白線。	
〔調査例〕 海域の水深：最大 1600m ACS 曳航水深：1300m（最浅部高度 100m） 1 日あたりの測線長：約 25km（対地船速 2knot 時、投入揚収作業時間や回頭時間等含む） 必要な人員（12 時間作業時）： デッキ 2 名、海上震源 1 名、深海震源 2 名、ナビゲーション 1 名 データロガー 1 名、データ解析 1 名			
特性			
・ 準広域（数 km スケール）の海底下地質構造が得られる。 ・ 受振器を深海曳航するためノイズの影響が小さく、高 SN 比のデータが得られる。 ・ 海上および深海曳航型の 2 つの震源を同時運用でき、調査効率が低い。 ・ 船上で簡易データ解析結果を確認でき、翌日以降の調査計画に反映できる。			

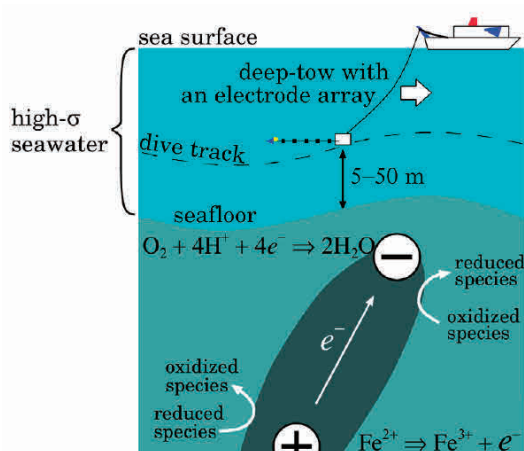
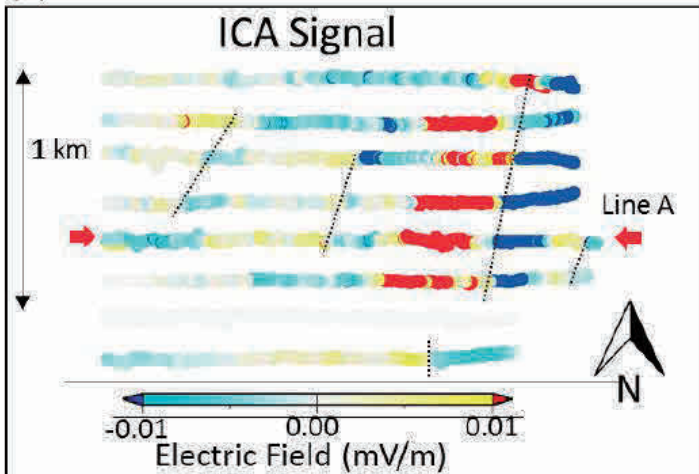
4. 音波による探査技術		4-3.精査技術	4-3-1. VCS による反射法地震探査
調査項目	VCS による反射法地震探査		
概要			
[原理] 弾性波を用いて物性境界で生じる反射波の走時や振幅を捉え、海底下地質構造を調査する。VCS は Vertical Cable Seismic の略称であり、通常、水平に曳航するストリーマー(ハイドロフォンアレイ)を海底面に鉛直に配置して、海底近傍で反射波を受信するシステムである。 [特徴] ・VCS では起伏の激しい海底地形下の詳細な 3 次元海底下地質構造と速度構造が得られる。 ・ 周波数が異なる震源の同時発震により、同じ測線の浅部/深部地質構造を同時に取得できる。 [用途] 水平数 100m スケールの海底下地質構造推定に用いる。掘削予定点の選定や資源量評価に利用可能である。			
調査の例			
[調査] 沖縄トラフ海底熱水活動域で実施した VCS による反射法地震探査の例を示す (図 1、図 2)。測線設定には準精査 (ACS 調査) により得られた海底下地質構造断面図や GC サンプル分析結果、電磁調査結果等を用いた。 [結果] ・ VCS データ解析により海底熱水鉱床賦存域周辺の三次元海底下反射ボリュームを得た (図 3)。			
			
図 1 VCS 探査システム		図 2 発震測線図	
			
図 3 三次元反射ボリューム(PSDM 結果)			
特性			
・ ACS による反射法地震探査と比較して、起伏の激しい海底地形でも海底下からの反射波を抽出できる。海上および深海曳航型の 2 つの震源を同時運用でき、調査効率が高い。 ・ 船上で簡易データ解析結果を確認でき、翌日以降の調査計画に反映できる。 ・ VCS は水平約 300m x 300m の 3 次元海底下地質構造が得られる (VCS4 基使用時、発震 24 時間)。 ・ 詳細なデータ解析により、明瞭な反射イベントを利用して速度構造を推定可能。			

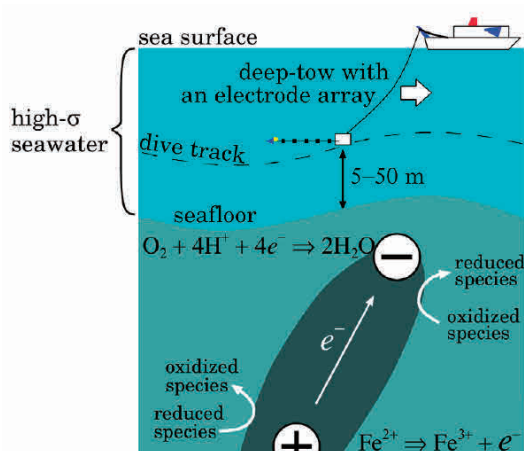
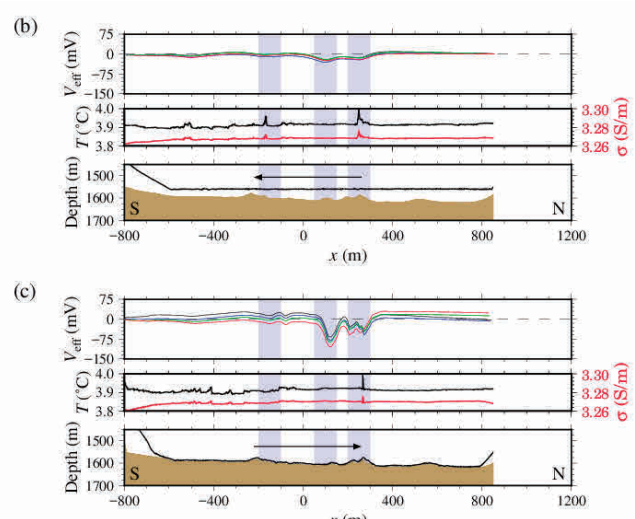
5. 電気・電磁探査技術

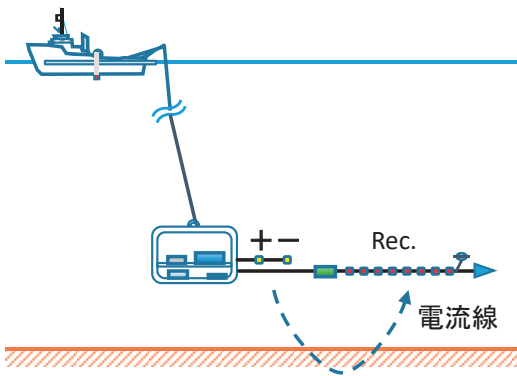
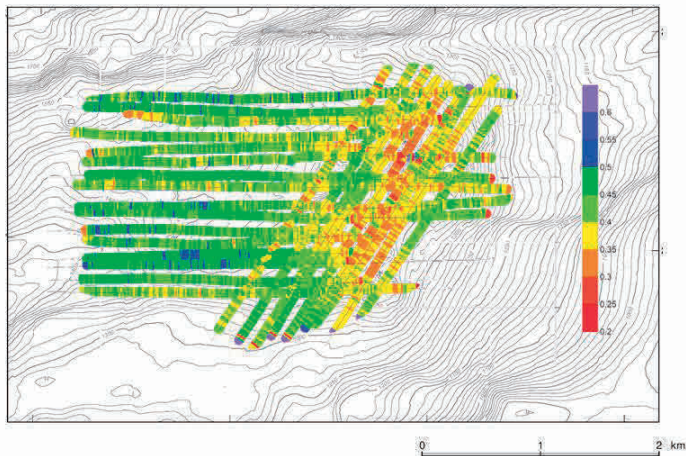
電磁気学的手法に基づく物理探査法は、陸域の金属鉱床探査において、重要な探査法となっている。これは、主として金属鉱床に対して敏感に反応する電氣的なパラメーターである比抵抗や充電率として地下を可視化できることに依る。海域においても陸域と同様に、電磁気学的手法に基づく物理探査法が有望と考えられるが、海水の存在が多くの場合で探査を困難にする。そのため、海域での探査に特化した技術や探査法および探査計画が求められる。

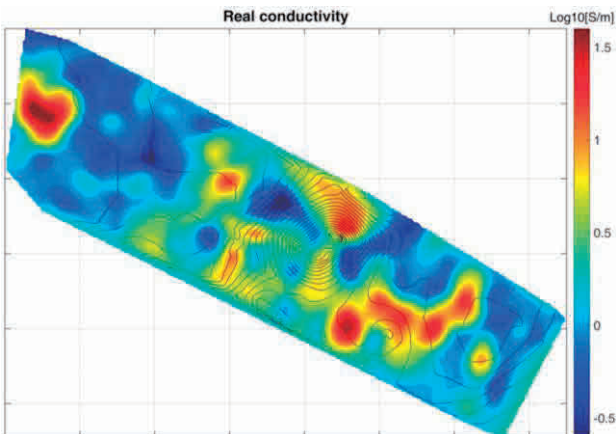
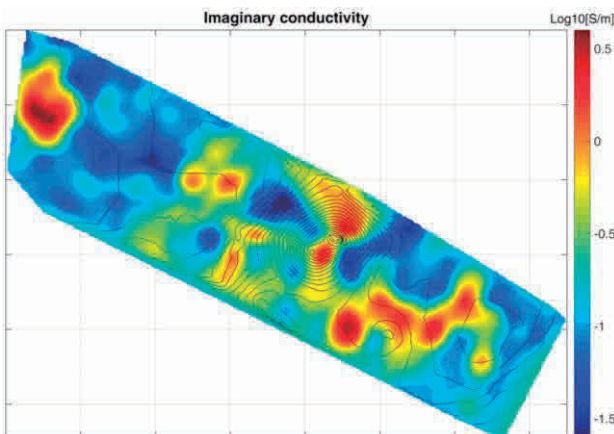
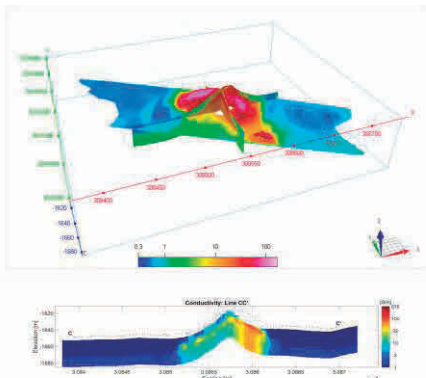
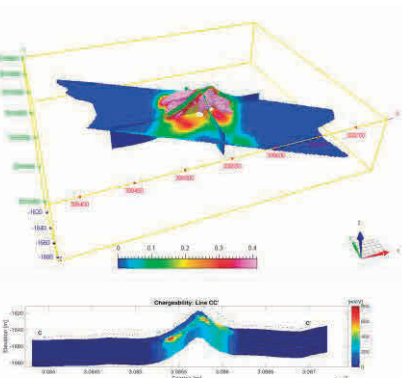
本章では、海底資源（特に海底熱水鉱床）を対象とした電磁気学的手法による探査技術を、調査範囲を絞り込む過程ごとに分け概査、準精査、精査として示す。概査技術（5-1 節）では広域の比抵抗構造を把握することを目的とする自然電磁場変動を利用した MT 法および人工電流源を用いた CSEM 法を紹介する。準精査技術（5-2 節）では、他の探査手法も含めた概査で絞り込んだ海域において曳航体や AUV 等を使用した自然電位探査および電気探査を紹介する。特に自然電位探査は、簡便に計測が可能であるため地球化学データなど他のセンサーとの同時観測が容易である。精査技術（5-3 節）では、ROV を利用した電磁探査法について紹介する。

5. 電気・電磁探査技術		5-1. 概査技術	5-1-1. MT 法等による電磁探査
調査項目	海洋 MT 法、海洋 CSEM 法		
概要			
[原理]・海底下を構成する岩石の比抵抗の違いを利用し、海底下の構造を可視化する。 [特徴]・金属鉱床は通常の岩石に比べ低比抵抗を示し、油層・ガス層等は高比抵抗を示す。 ・海洋 MT 法は、信号となる短周期の自然の磁場変動が海水により減衰するため、水深に依るが一般的に海底下数 km 以浅の情報量が少なくなる。 ・広域かつ深部構造を調査する海洋 MT 法は、海底熱水系全体の構造や、トラフ軸全体の地質学的背景の理解に役立つ。 ・海洋 CSEM 法は人工電流原を利用することから、浅部から比較的深部（10km 程度）までの比抵抗分布の情報が得られる。 [用途]・海底下の比抵抗構造の推定に用いる。			
調査の例			
[調査]・ケース 1（海洋 MT 法）：紀伊半島沖（1944 年東南海地震震源域） ・ケース 2（海洋 CSEM 法）：西オーストラリア州沖大陸棚における油ガス層調査 [結果]・ケース 1（海洋 MT 法）：付加体ウェッジ内の低比抵抗は、沈み込むプレートから供給される流体による可能性を示唆している（後藤他, 2003）。 ・ケース 2（海洋 CSEM 法）：高比抵抗帯は既知のガス層に対応している。			
		図 1 ケース 1（左）： 木村他(2010)に加筆。 図 2 ケース 2（下）： 山根他(2009)に加筆。	
[調査範囲の例] ・ケース 1：約 100km の測線上に 9 台の OBEM を設置し、測定は約 10 日間。 ・ケース 2：33km の測線上に 23 台の OBEM を設置。送信源は約 250m のダイポールで海底面上 30m の高さ、2 ノットで曳航。			
特性			
・海洋 MT 法では浅部構造は得られないが、広域の地下深部の比抵抗構造を調査することができる。 ・海洋 CSEM 法は浅部から比較的深部までの比抵抗構造を得ることができる。			

5. 電気・電磁探査技術		5-2. 準精査技術	5-2-1. AUV/曳航体による自然電位異常調査
調査項目	AUVによる自然電位異常調査		
概要			
[原理]・地下の電気化学的反応に起因する地電流によって生ずる電位分布を利用し、海底下の鉱体の位置や地質構造を調査する。 [特徴]・陸域の鉱体電池モデルと同様に、酸化還元現象によって生じていると考えられているが、熱水が深部から浅部へと上昇する際に、鉱体下部で還元的、鉱体上部は酸化的な反応を示すことから、海底・海中での電位は負となる。 ・陸域と異なり、海中において連続的に電位計測を行うことで電場計測を容易に行うことが出来る。そのため、最も単純な計測系は、水中航行体（AUV や曳航体）に装備された 2 極間の電位差を連続的に測定すれば良い。 ・自然電位が負を示す範囲が金属鉱床存在の可能性を示唆するが、観測されるのは電位差であるため、負の異常では正負の変曲点となる。一方で鉛直電場は負として観測される。 [用途]・鉱床徴候域の絞り込みに用いる。			
図 1 			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフにおける調査の例を示す。船速対地約 2knot、海底面からの高度 70～100m、測線間隔約 180m の東西走向の調査測線で実施した。 [結果]・右図は取得されたデータを測線毎に切り出して、複数の電極組み合わせの時系列データに対して独立成分分析による信号抽出を行った例である(佐藤ほか, 2017; 特開 2017-138254)。計測域の東側で正負の異常が南北に渡って存在しているのが特徴的であるが、弱い異常が図の中央および西側にも認められる。ビークルの計測高度が高い場合や、異常のシグナルが小さい場合、ノイズレベルが高い場合には、佐藤ほか (2017) の様な特徴抽出をする信号処理が必要となる場合がある。			
図 2 AUV「うらしま」に電位計を搭載して取得された複数の組の電位データを独立成分分析により情報抽出を行った例 (佐藤ほか, 2017) 			
特性			
・準精査域の自然電位分布を、簡便かつ迅速に調査することができる。 ・ビークルに音響機器が搭載されている場合は海底地形や後方散乱強度データ、地層探査データも同時に取得できるため、精査にとっても有効である。 ・ビークルに CTD、濁度計、ORP 計を同時搭載することも容易である。 ・ビークルに電極を取り付け、あるいは曳航することで観測を実施できる。			

5. 電気・電磁探査技術		5-2. 準精査技術	5-2-1. AUV/曳航体による自然電位異常調査
調査項目		曳航体による自然電位異常調査	
概要			
[原理]・地下の電気化学的反応に起因する地電流によって生ずる電位分布を利用し、海底下の鉱体の位置や地質構造を調査する。 [特徴]・陸域の鉱体電池モデルと同様に、酸化還元現象によって生じていると考えられているが、熱水が深部から浅部へと上昇する際に、鉱体下部で還元的、鉱体上部は酸化的な反応を示すことから、海底・海中での電位は負となる。 ・陸域と異なり、海中において連続的に電位計測を行うことで電場計測を容易に行うことが出来る。そのため、最も単純な計測系は、水中航走体（AUV や曳航体）に装備された 2 極間の電位差を連続的に測定すれば良い。 ・自然電位が負を示す範囲が金属鉱床存在の可能性を示唆するが、観測されるのは電位差であるため、負の異常では正負の変曲点となる。一方で鉛直電場は負として観測される。 [用途]・鉱床徴候域の絞り込みに用いる。		 The diagram illustrates a deep-tow system with an electrode array. A ship on the sea surface is connected to a towed vehicle that carries an electrode array at a depth of 5-50 m. The array is shown as a series of electrodes along a track. Below the sea surface, the seawater is labeled 'high-σ seawater'. The seafloor is shown with a chemical reaction: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$. The diagram also shows 'oxidized species' and 'reduced species' near the seafloor, with a specific reaction: $Fe^{2+} \Rightarrow Fe^{3+} + e^-$. A positive (+) and negative (-) sign are indicated near the electrodes, and an arrow labeled e^- shows electron flow. 図 1	
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフにおける調査の例を示す。船速対地約 0.5～1knot、海底面からの高度数 m～100m で、2 本の測線において高度変化と計測方向による差異を検討した。 [結果]・右図は 1 つの測線での測線進行方向の計測電場を積分した結果と温度・電気伝導度、地形・曳航航跡を示した図である。図中の紫色の領域は熱水域を表す。高度が高いほど異常体に伴う自然電位の振幅が小さく、高度が低いと大きく出るほか、細かな変化が検出されていることが分かる。また、観測の方向に関わらず、ほぼ同じ自然電位分布をしていることが分かる。 ・測線端では、曳航体の高度の急激な上昇や地形の高まりがあるが、自然電位分布にはほとんど影響していない。 ・温度、電気伝導度で相関は見られない。		 Figure 2 consists of two panels, (b) and (c), showing natural potential measurements. Each panel displays four stacked plots against distance x (m) from -800 to 1200. The top plot is V_{eff} (mV) ranging from -75 to 75. The second plot is temperature $T(^{\circ}C)$ ranging from 3.8 to 4.0. The third plot is conductivity σ (S/m) with values 3.26, 3.28, and 3.30. The bottom plot shows depth (m) from 1500 to 1700 and a bathymetric profile. Panel (b) shows data for a specific direction, and panel (c) shows data for a different direction. Both panels include a purple shaded region indicating a hydrothermal field. 図 2 計測高度と計測方位を変えた場合の計測結果 (Kawada and Kasaya, 2017 の Fig. 4 より抜粋)	
特性			
・準精査域の自然電位分布を簡便かつ迅速に調査可能 (特願 2016-020642、特開 2017-138254、PCT/JP2016/081915)。 ・比抵抗探査の副次的調査としても扱える (特願 2016-176889、PCT/JP2017/030527)。 ・測定システムは極めて簡単であることから、あらゆる水中航走体に取り付けが可能である。			

5. 電気・電磁探査技術		5-2. 準精査技術	5-2-2. AUV/曳航体による電気・電磁探査
調査項目	曳航体による電気探査（比抵抗法）		
概要			
[原理]・海底下を構成する岩石の比抵抗の違いを利用し、海底下の構造を調査する。 [特徴]・金属鉱床のような相対的に比抵抗の低い物質が分布していれば、一定の送信電流に対して電位電極では小さな電圧が、逆に高比抵抗であれば高い電圧が観測される。 ・電流電極－電位電極間距離を大きくすることにより、探査深度が大きくなる。 ・精査/準精査を調査する比抵抗探査は、金属鉱床の存否判断に役立つ。 [用途]・鉱床徴候域の絞り込みに用いる。			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフにおける調査の例を示す。船速対地約 1.5knot、海底面からの高度 50m、測線間隔 100m の南西－北東走行および東西走行の調査測線で実施した。 [結果]・図 1 は曳航式電気探査装置の模式図、図 2 は電流-電位電極間距離 230m に対する見掛け比抵抗分布。南西-北東方向測線付近に低比抵抗帯が分布している。			
			
図 1. 曳航式電気探査装置の模式図		図 2. 見掛け比抵抗分布	
[調査範囲の例] ・地化学調査と併せて実施 条件：水深 1400～1600m、海底面高度 50m で曳航、総測線長 92km			
特性			
・準精査域の比抵抗分布を、簡便かつ迅速に調査することができる。 ・地化学調査と併せて簡便に実施できる。 ・自然電位データ、電磁法（CSEM 法）のデータも得ることができる。			

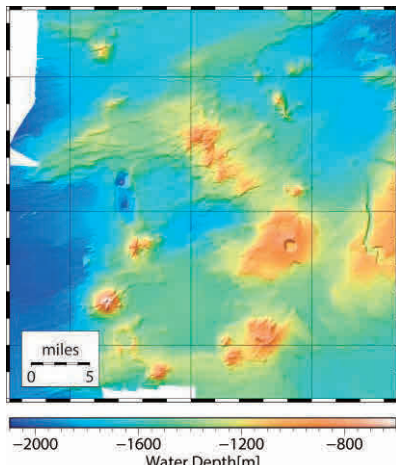
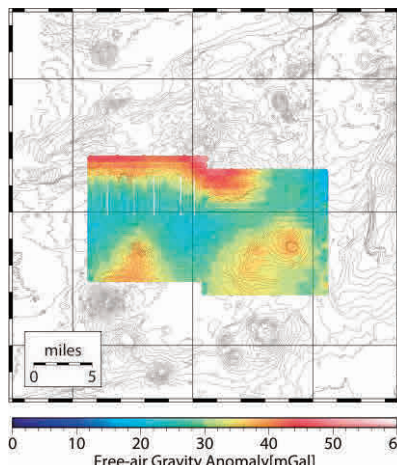
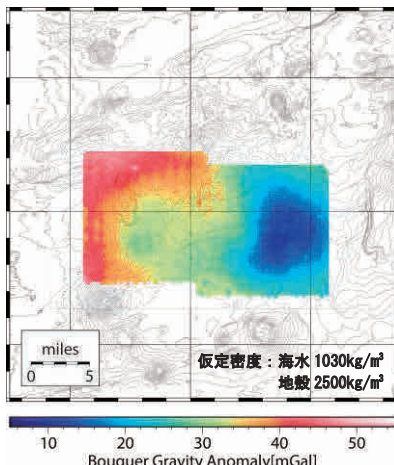
5. 電気・電磁探査技術		5-3. 精査技術	5-3-1. ROV による電磁探査
調査項目	海底電磁探査		
概要			
[原理]	・海底の 1km 四方内の調査対象範囲において、ROV 利用曳航式電磁探査によって得られる電磁応答により、海底の比抵抗値を推定し、海底熱水鉱床の有無を評価する		
[特徴]	・電磁探査システムの海底接近が容易で、海底での着底計測および一定高度での曳航計測が可能 ・電磁探査とともに、海底観察や地質試料の採取など、調査作業の効率が高い		
[用途]	・海底資源探査・資源量調査、海底下地質調査、埋没物の探査など		
調査の例			
[調査]	・沖縄トラフにおける海底熱水活動域において、海底近傍における ROV を利用した曳航式電磁探査を実施した ・送・受信用ループケーブルを含む電磁探査システムを装着した曳航体を海底からの一定高度(4m)において、ROV が測線上を航走(0.5knot)しながら計測を行った		
[結果]	・同海域において採取した硫化鉱石を含む岩石試料の IP 効果を反映し、インバージョン解析を行った結果を図 1 と図 2 に示す ・3 次元インバージョン解析による電気伝導率と充電率を図 3 に示す		
 			
図 1 1次元インバージョン解析(実部電気伝導率) (測線: NW-SE 方向の等間隔による 5 測線) 図 2 1次元インバージョン解析(虚部電気伝導率)			
  図 3 3次元インバージョン解析による電気伝導率(左)と充電率(右)			
特性			
・海底下地質構造への高精度・高分解能なデータ取得が可能 ・海底着底式および曳航式計測が可能で、測線、高度、航走速度など随時変更可能 ・計測と同時に船上へのデータ伝送が可能 ・計測と同時に海底観察および地質試料の採取が可能			

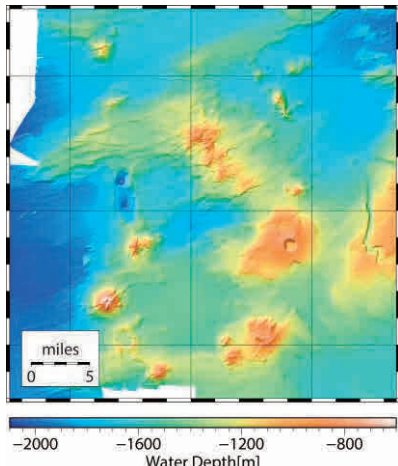
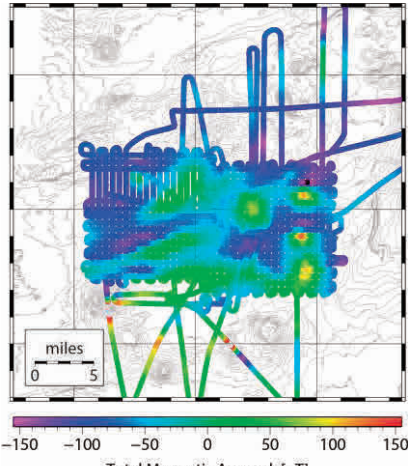
6. 重磁力探査技術

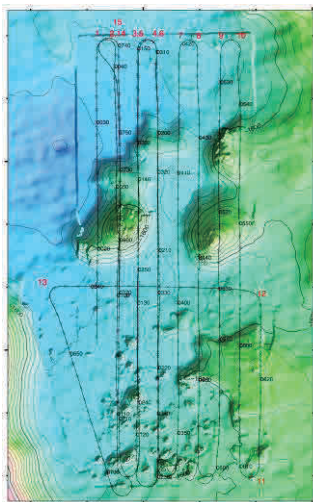
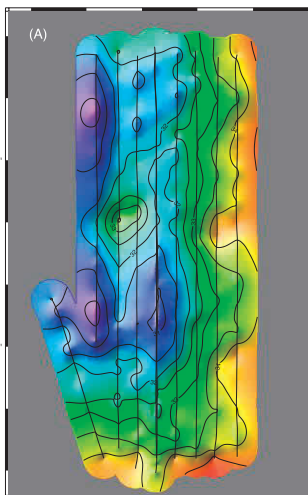
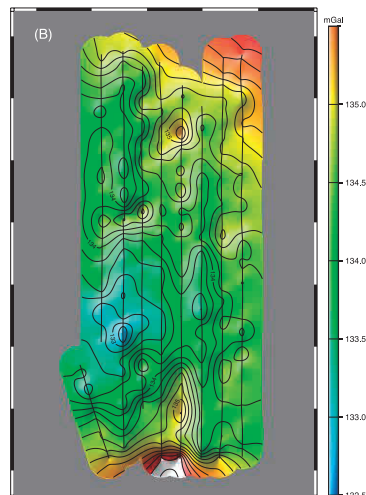
重力異常および磁気異常は、海底下を構成する岩石の密度分布および磁化強度分布を明確に反映するため、これらの異常を利用した重磁力探査は、海底下の構造の平面分布とその深さを推定する有効な探査手法である。本章では、海底熱水鉱床を対象とした重磁力探査について観測プラットフォームごとに紹介していく。船舶、AUV、ROV など、使用するプラットフォームに応じて探査対象との距離が変わるため、得られるデータの精度が変わる（例えば、図1）。船舶による調査（6-1-1 節）では、広範囲を簡便かつ迅速に調査できることや、海底地形調査などの他の調査と併せて実施できるなどのメリットはあるが、その代わりにデータの分解能が低くなる。そのため、広域テクトニクスや海底熱水系を支える地質学的背景の理解のためには重要であるものの、潜頭性熱水鉱床を絞り込むための重力異常および磁気異常の検出は難しい。一方で、より調査対象に近づいて観測する AUV による調査（6-2-1 節）や、ROV による調査（6-3-1 節）では、調査範囲が限られることや測定に時間がかかるというデメリットがあるが、海底熱水鉱床に伴う異常値を含んだデータを取得することが可能である。このように重磁力探査においては、それぞれのプラットフォームを、概査、準精査、精査などの目的に応じて適切に使い分けることが重要となる。

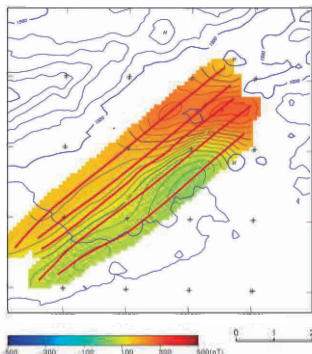
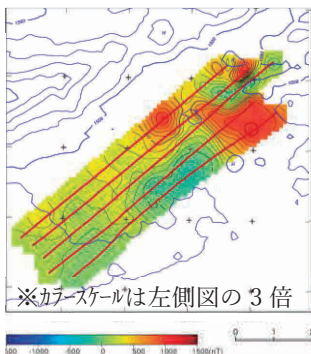
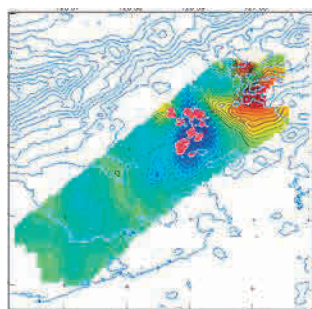
探査手法	使用船舶		探査エリア	精 度	探査対象距離
海上重力	調査船	 ©JAMSTEC	広い	1 mGal	~1,000 m
海中重力	航行型 AUV	 ©JAMSTEC	中程度	0.1 mGal	~100 m
海底重力	調査船 (吊下)		狭い	0.01 mGal	~10 m
	着底型 AUV				
	ROV				

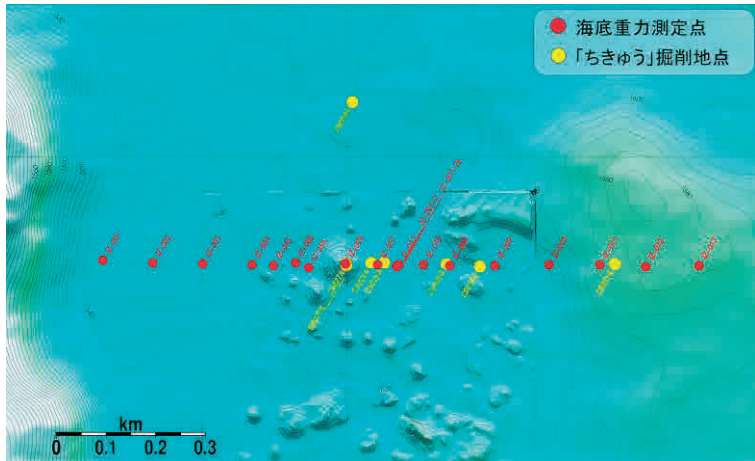
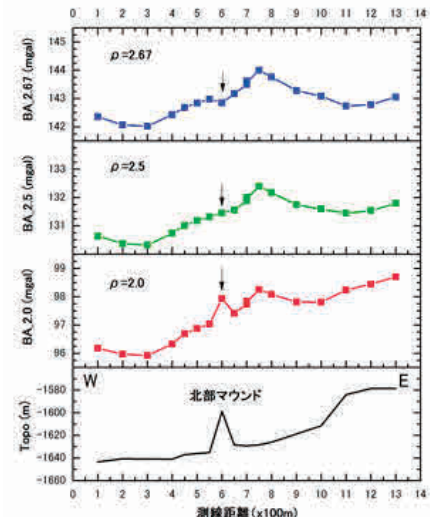
図1 海域における重力探査手法の比較

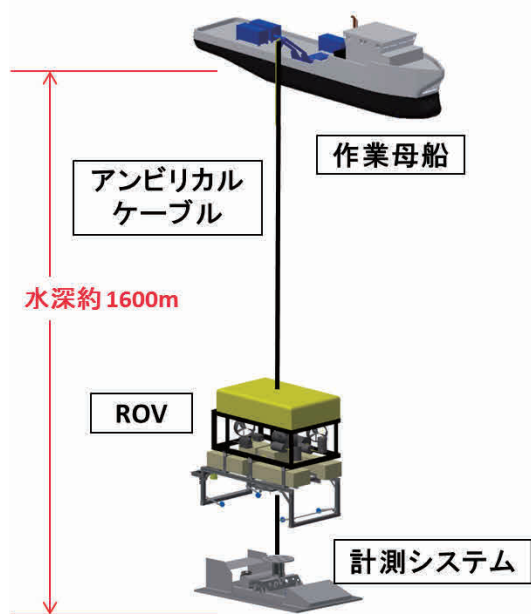
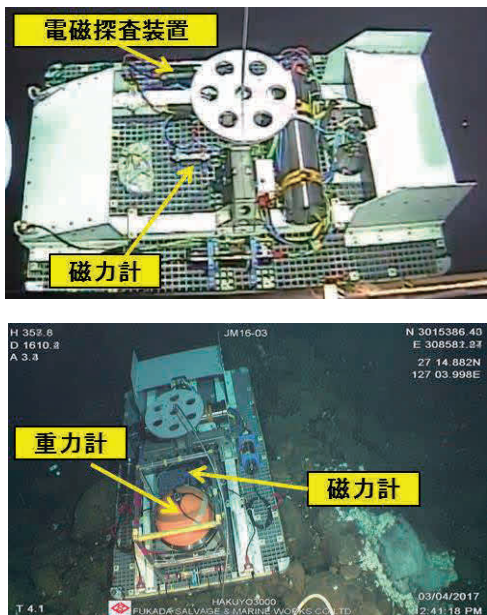
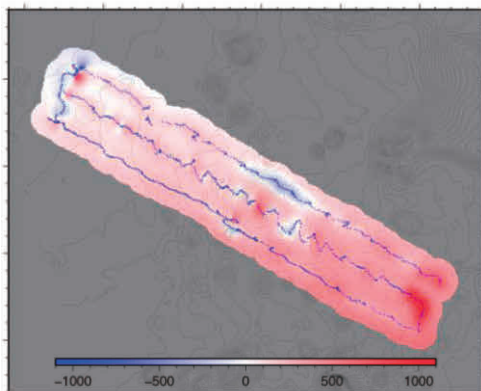
6. 重磁力探査技術		6-1. 概査技術		6-1-1. 船舶による調査	
調査項目		海上重力探査			
概要					
[原理]・海底下を構成する岩石の密度差を利用し、海底下の構造を調査する。 [特徴]・金属鉱床のような相対的に高密度の物質が分布していれば高重力異常となり、逆に堆積層などの低密度域が分布していれば低重力異常となる。 ・深部の密度構造異常ほど長波長の重力異常として現われる。 ・広域を調査する海上重力探査は、海底熱水系を支える地質学的背景の理解に役立つ。 [用途]・堆積層の層厚（基盤地形）や海底下の密度構造の推定に用いる。					
調査の例					
[調査]・中部沖縄トラフの海底熱水活動域で実施した海上重力探査の例（YK16-10、YK16-12 航海）を示す。船速対地 6knot、測線間隔 0.5 マイルの南北および東西走向の系統的な調査測線で調査を実施した。 [結果]・フリーエア重力異常図（図 2）は、海底地形（図 1）と相関のある重力異常分布を示す。 ・東側海域の海丘部で負のブーゲー重力異常が卓越しており（図 3）、地殻の厚さが厚いか、低密度の物質の存在を示唆している。					
  					
図 1 海底地形図 図 2 フリーエア重力異常図 図 3 ブーゲー重力異常図 （すべての図の範囲・縮尺は同じ。フリーエアおよびブーゲー重力異常の図には、海底地形のコンターを合わせて表示している。）					
[調査範囲の例] ・ケース 1：マルチビーム音響測深器（MBES）による海底地形調査と併せて実施 条件：水深 2000m、船速 10knot、測線長 20 マイル、スワス角 120°、20%をオーバーラップ 海底地形グリッドサイズ：~50m グリッド <u>1 日の調査範囲：~2300km²（20 マイル×約 33 マイル）</u> ・ケース 2：MBES を用いた熱水プルーム調査と併せて実施 条件：水深 1500m、船速 5knot、測線長 10 マイル、測線間隔：0.5 マイル 海底地形グリッドサイズ：~20m グリッド <u>1 日の調査範囲：~190km²（10 マイル×5.5 マイル）</u>					
特性					
・広域の地下構造を、簡便かつ迅速に調査することができる。 ・他の調査と併せて簡便に実施できる。 ・簡易的な解析であれば、船上でデータを処理し、結果を表示することが可能である。					

6. 重磁力探査技術		6-1. 概査技術	6-1-1. 船舶による調査
調査項目	海上磁気探査		
概要			
[原理]・海底下を構成する岩石の磁氣的性質の差を利用し、海底下の構造を推定する。 [特徴]・海底熱水鉱床域では、熱水循環に伴う変成作用で岩石が磁化を失い、鉱床周辺に低磁化域が存在する場合や、強磁性鉱物の濃集により高磁化域が存在する場合などがある。 ・広域を調査する海上磁気探査では、分解能が低いが広範囲のデータを得ることができるため、広域のテクトニクスや、海底熱水系を支える地質学的背景の理解に役立つ。 [用途]・海底下の磁化強度分布の推定に用いる。			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフの海底熱水活動域で実施した海上磁気探査の例（YK16-10、YK16-12 航海）を示す。船速対地 6knot、測線間隔 0.5 マイルの南北および東西走向の系統的な調査測線で調査を実施した。 [結果]・海底火山などの海丘部に対応する磁化強度分布と、東北東－西南西の走向の線構造をもつ磁化強度分布の 2 つの異なる特徴が見られた。 ・東北東－西南西方向に延びるトラフ軸に沿って、高磁化強度分布域が連続している、これらの走向は、海底地形の線構造の走向と対応しており、背弧海盆のリフティングに伴う火山活動との関連が示唆される。			
			
図 1 海底地形図		図 2 全磁力異常図	
(2 つの図の範囲・縮尺は同じ。全磁力異常図には、海底地形のコンターを合わせて表示している。)			
[調査範囲の例]			
・ケース 1：マルチビーム音響測深器（MBES）による海底地形調査と併せて実施 条件：水深 2000m、船速 10knot、測線長 20 マイル、スワス角 120°、20%をオーバーラップ 海底地形グリッドサイズ：～50m グリッド <u>1 日の調査範囲：～2300km²（20 マイル×約 33 マイル）</u> ・ケース 2：MBES を用いた熱水プルーム調査と併せて実施 条件：水深 1500m、船速 5knot、測線長 10 マイル、測線間隔：0.5 マイル 海底地形グリッドサイズ：～20m グリッド <u>1 日の調査範囲：～190km²（10 マイル×5.5 マイル）</u>			
特性			
・広域の地下構造を、簡便かつ迅速に調査することができる。 ・他の調査と併せて簡便に実施できる。 ・簡易的な解析であれば、船上でデータを処理し、結果を表示することが可能である。			

6. 重磁力探査技術		6-2. 準精査技術	6-2-1. AUV/曳航体による調査
調査項目	海中重力探査		
概要			
[原理]・海底下に存在する物質の密度の違いを利用し、海底下の構造を推定する。 [特徴]・海底熱水鉱床や海底下の鉱床のような相対的に高密度の物質が分布していれば高重力異常となり、逆に厚い堆積層などの低密度域が分布していれば低重力異常となる。 ・空間的分解能が高い密度構造推定のために、対象近傍である海底付近での計測が必要となる。 ・重力計を AUV に搭載することにより、比較的高速で移動しながら計測することが可能となる。 ・高精度である海中重力探査は、海底熱水鉱床や潜頭性鉱床の探査に直接寄与する。 [用途]・海底熱水鉱床や潜頭性鉱床の存在有無や規模の推定に用いる。			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフの海底熱水活動域で実施した海中重力探査の例（YK14-14 航海）を示す。AUV には、海洋研究開発機構「うらしま」を用いた。AUV は等高度等速航行とし（対水速度約 2 knot）、測線長約 2 km で測線間隔 100 m の南北走向の系統的な 8 本の測線上で、調査を実施した。 [結果]・フリーウォーター重力異常図（図 2）は、海底地形（図 1）にある小海丘に対応する高異常が明瞭に認められる。 ・ブーゲー異常図では、観測域の南側では、正の異常が存在しており、鉱床との関係が期待される。			
  			
図 1 海底地形図 図 2 フリーウォーター重力異常図 図 3 ブーゲー重力異常図			
調査域は、南北約 2 km、東西約 800 m である。海底地形は、調査域では AUV により取得されたデータ、それ以外の領域は、母船のマルチナロービームのデータを用いている。フリーウォーター重力異常は、海上におけるフリーエア重力異常に対応しており、海底地形を反映している。ブーゲー重力異常の計算には、地殻密度 2.5 g/cm³ を用いた。			
[調査範囲の例]			
・条件：水深 1,500 m、AUV の速度 2 knot、測線長 2 km、測線間隔 100 m、等高度航行、潜航 10 時間 1 日の調査範囲：～4 km²（2 km × 2 km）			
特性			
・海底重力計による重力探査に比べて、より広い領域を迅速に調査することができる。 ・船舶による海上重力測定に比べて、空間的に高い分解能が得られることにより、海底熱水鉱床や潜頭性鉱床の推定を直接的に目的とする調査を行うことができる。 ・海中重力偏差計と併用することで、より高精度な鉱床推定が可能となることが期待される。			

6. 重磁力探査技術		6-2. 準精査技術	6-2-1. AUV/曳航体による調査
調査項目	海中磁気探査		
概要			
[原理]・海底下を構成する岩石の磁化強度の差を利用し、海底下の構造を調査する。 [特徴]・海底熱水鉱床地域では主に以下のような現象が想定されるため、海中磁気探査が有効な探査手段となる。 ① 断層破碎帯或いは熱水変質による低磁化帯の存在 ② 鉱床中の強磁性鉱物の濃集による高磁化帯の存在 ・海中磁気探査は探査対象により接近する手法であるため、海上磁気探査に比べ、短波長小振幅の磁気異常を捉えることが可能である。 [用途]・小規模な海底下の磁化構造（≒海底熱水鉱床又は背景となる地質構造）の推定に用いる。			
調査の例			
[調査]・中部沖縄トラフの海底熱水活動域で実施した曳航体による海中磁気探査の例（JA15-01 航海）を示す。曳航体速度約 1knot、測線間隔 500m、測線長 7.5km、曳航深度 600m 及び 1400m で北東-南西方向の調査測線を各深度 5 測線で調査を実施した。 [結果]・磁気異常は曳航深度が大きい程短波長が卓越し振幅も大きくなる。極磁力変換或いはインバージョンにより推定される磁化強度が小さいエリアと、地化学センサに反応が見られた箇所、ウォーターカラムイメージでブルームが検出された箇所、さらに地形判読から新しい溶岩流が分布する地域との間に相関がみられた。このことから、この例では海中磁気探査の結果は上記特徴①の断層破碎帯或いは熱水変質による低磁化帯の存在が示唆するものと考えられる。			
			
図1 地磁気異常(D=600m)		図2 地磁気異常(D=1400m)	
			
		図3 極磁力変換(D=1400m)とブルーム検出位置	
[調査範囲の例]			
・ケース1：小型曳航体（Edgetech 2000DSS）と G880 セシウム磁力計を使用した場合 条件：水深 1,600m、曳航速度約 0.8-1.5knot(対地)、曳航深度 600m & 1,400m、 測線長 7.5km、測線間隔 500m 調査効率：実働準精査時間 44.5 時間（2015/8/17 02:00- 8/18 22:30）2 日間合計 D=600m：7.5km x 5 本、D=1400m：7.5km x 5 本、高度 50m：7.5km x 1 本			
特性			
・断層破碎帯或いは熱水変質による低磁化帯が検出可能。 ・鉱床中の強磁性鉱物の濃集による高磁化帯が検出可能。 ・操船及びウインチオペレーションにある程度の慣れが必要。 ・ワイヤーをある程度巻き込む必要があるため回頭時に時間がかかる。			

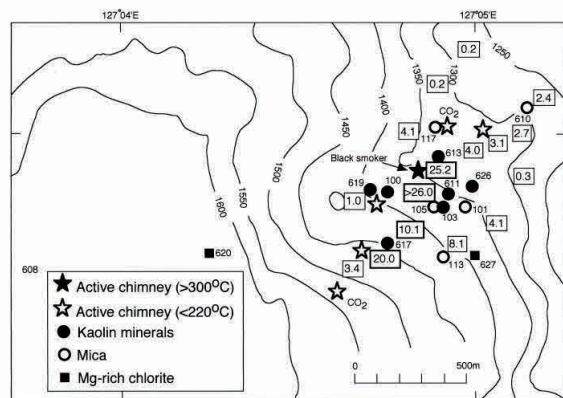
6. 重磁力探査技術		6-3. 精査技術		6-3-1. ROV による調査	
調査項目		海底重力探査			
概要					
[原理]・海底下を構成する岩石の密度差を利用し、海底下の構造を調査する。 [特徴]・金属鉱床のような相対的に高密度の物質が分布していれば高重力異常となり、逆に堆積層などの低密度域が分布していれば低重力異常となる。 - 対象に接近して測定を行うため、海上、海中より大きな重力異常を観測することができる。 - 海底に設置した状態で測定を行うため、陸上重力測定と同等の精度を確保でき、より小さな重力異常の検出が可能である。 - 調査形態から概査には不向きであり精査に向く。 [用途]・小規模な海底下の密度構造（≒海底熱水鉱床）の推定に用いる。					
調査の例					
[調査]・中部沖縄トラフの海底熱水活動域で実施した海底重力探査の例（JM16-03 航海）を示す。ROV 移動速度 1-2knot、測点間隔 50-100m の全長 1,200m の東西方向調査測線で調査を実施した。 [結果]・測線距離 600m にある海底熱水活動により形成されたと考えられる北部マウンド頂上でのブーゲー異常に注目してみると、$\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ で最も地形との相関が低く、同マウンドの平均的な密度は 2.5 g/cm^3 程度と推測される。また、測線距離 700m～1,000m に地形とは相関がない高重力異常が認められ、掘削及び ACS 地震探査結果との対比から高密度を有する潜頭性鉱床によるものと推察される。					
					
図 1 測定点位置図			図 2 単純ブーゲー重力異常と海底地形プロファイル		
[調査範囲の例] ケース 1：ROV と曳航ウインチシステムを使用した場合 条件：水深 1,600m、ROV 速度 1-2knot、測線長 1,200m、測点間隔 100m（一部 50m）、潜航毎に閉合測定実施 調査効率：実働海底滞留時間 11 時間（2 日間合計）で 21 点 ⇒30 分/点（含移動時間）					
特性					
- 対象に接近して測定を行うため、海上、海中より大きな重力異常を観測することができる。 - 海底に設置した状態で測定を行うため、陸上重力測定と同等の精度を確保でき、より小さな重力異常の検出が可能である。 - 調査形態から概査には不向きであり精査に向く。					

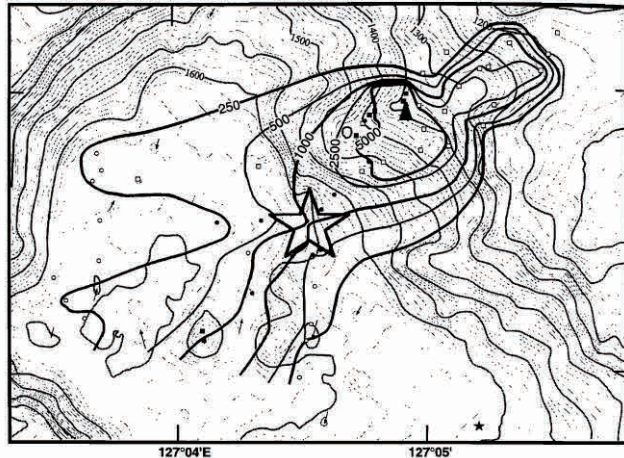
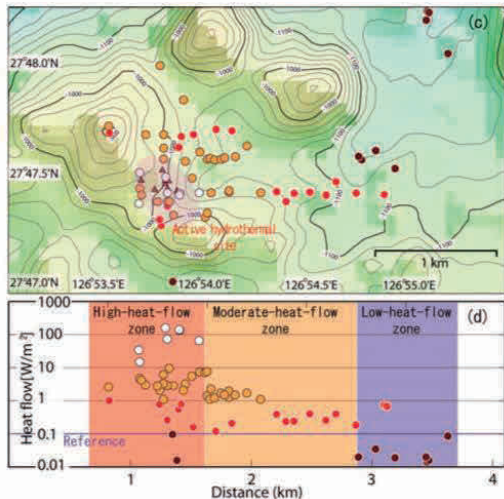
6. 重磁力探査技術		6-3. 精査技術	6-3-1. ROV による調査
調査項目	海底磁気探査		
概要			
[原理]	・ 3 成分磁力計を海底に接近させて計測し、地磁気異常(3 成分)を算出することで、海底下の磁化構造を求める。		
[特徴]	・ 海底面に接近しての計測となるため、高分解能の磁気異常分布が得られる。 ・ ROV を利用した曳航計測であるため、作業効率が高く測線変更などに柔軟に対応可能。		
[用途]	・ 海底資源探査、海底地下構造の調査など。		
調査の例			
[調査]	・ 沖縄トラフ伊是名海穴において、3 成分 FG 磁力計を用いた ROV 利用式曳航型磁気探査を行った。図 1 に計測の概観図、図 2 に計測システムの写真を示す。また、図 3 に伊是名海穴北部マウンド周辺で調査した結果を示す。		
			
図 1 ROV による電磁探査、重磁力調査システム		図 2 上図 電磁探査と磁力探査の同時計測(海中曳航) 下図 重力探査と磁力探査の同時計測(海底設置)	
		図 3 J-MARES によって実施した沖縄トラフの伊是名海穴内での ROV 利用式曳航型磁気探査結果。ROV-曳航体間は 6m で、磁力計は海底から 4m の高度を維持し、移動速度は～1.0knot で計測した。この図は全磁力の異常値 (IGRF との差)を表している (単位は nT)。	
特性			
・ 調査対象エリアにおける精密調査が可能。 ・ 計測と同時に海底観察および地質試料の採取が可能。 ・ 計測中の測線変更や計測条件(高度・曳航速度など)に対する柔軟な対応が可能。 ・ 計測と同時に船上へのデータ伝送が可能。			

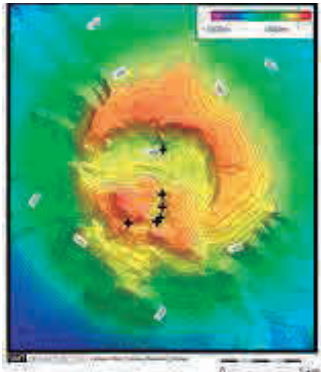
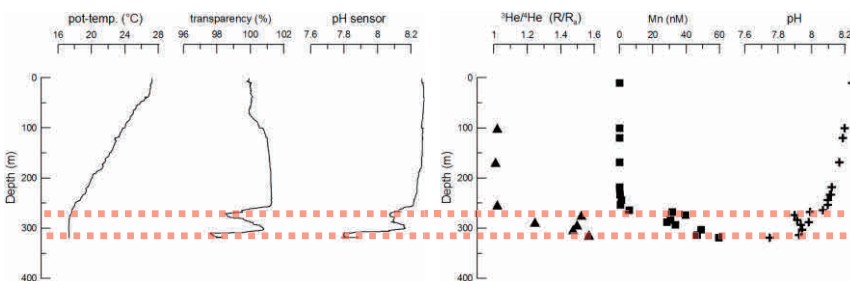
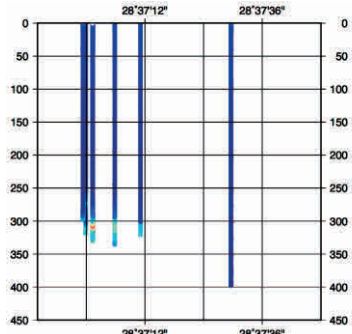
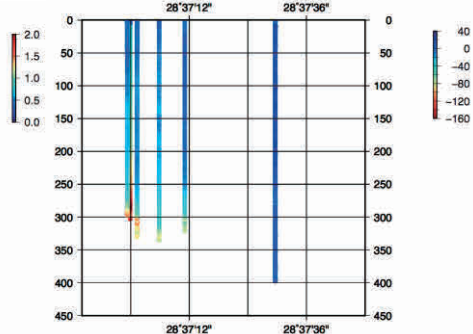
7. 物理探査的手法と並行して行いうる調査

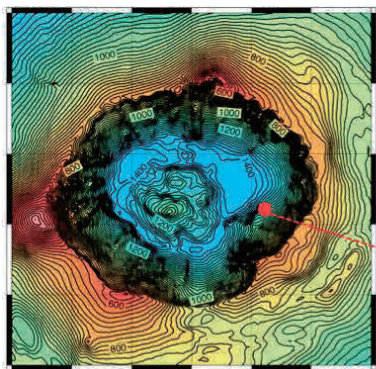
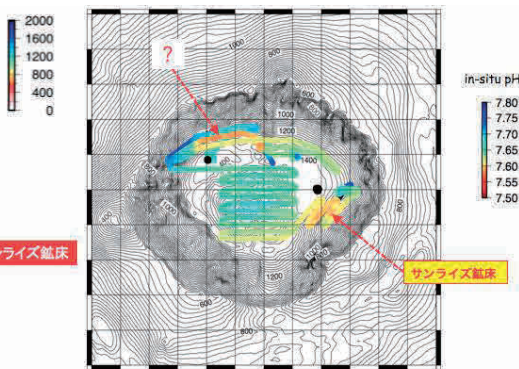
第4章～第6章までは、物理探査的手法を軸に要素調査技術について紹介してきた。特に、第5章の電気・電磁探査技術は本「海のジパング」計画で開発ないし実用化が大きく進展したもので、最新の観測法といえる。一方、一般的な海洋学・海洋地質調査も4-1節で紹介されたような海底地形調査に引き続いて実施されるものであつて、船舶を共用して実施できるだけでなく、相補的な情報を得ることもできる。何より、地質試料という物的証拠、いわば、グランドトゥルースを得ることが出来るのは何にも代えがたい価値がある。

よって、第7章では、従来広く実施されてきた海洋地質学・地球物理学・海洋学的手法について紹介するとともに(7-1節)、現在開発中の手法のうち、有望なものについても触れている(7-2節)。この中には、海盆ないし山体スケールでの活動性を評価できる海底地殻熱流量調査(7-1-2節)、地球化学的指標、とくに、間隙水中の微量元素同位体を用いて未知の熱水活動域の存否、あるいは、試料採取地点の熱水活動ポテンシャルを判定できると期待される調査法の提案(7-2-2節)を含んでいる。

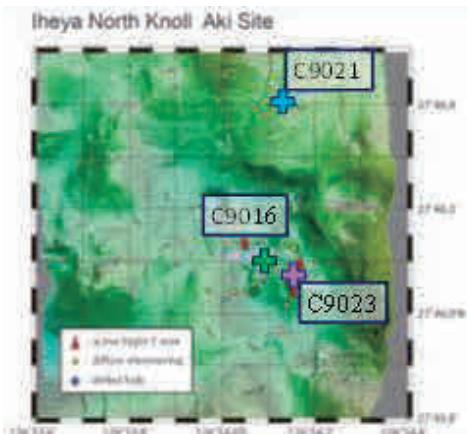
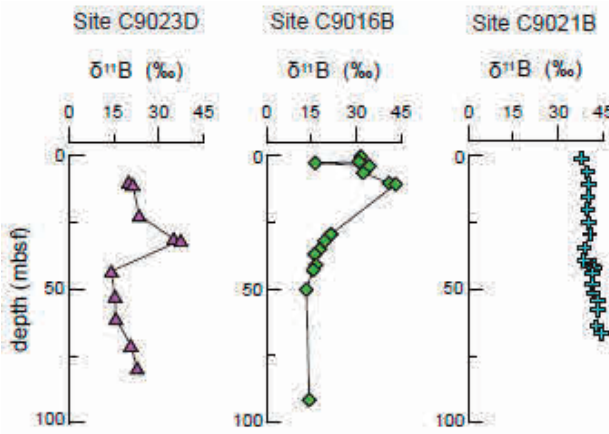
7. 並行調査		7-1. 確立された調査技術	7-1-1. 船上からの地質調査
調査項目	海底地質調査		
概要			
[原理]・熱水活動に伴う変質反応の痕跡、熱水活動からの堆積物を検知する。 [特徴]・高温流体の希釈拡散による熱水プルームからの沈殿・堆積物、熱水反応で生成された変質鉱物が堆積物中に見出される。 [用途]・熱水域の活動中心の位置や活動分布域の広さを推定する。			
調査の例			
[調査]・沖縄トラフ伊是名海穴の Jade サイトを含む海域で、1988-1990 年にかけて実施された調査(SO56, KT88-17, GH89-3, SO71 航海)の例(Marumo & Hattori, 1999)を示す。 [結果] ・図1に示すように、熱水噴出が観察された地域で、変質鉱物の一種である熱水性粘土鉱物の産出が確認される。高温熱水噴出サイトの直近は雲母類(イライト)、その周囲にクロライト(緑泥石)、熱水域周縁部の低温で気相に富む熱水噴出が見られる周囲でカオリン鉱物の産出が特徴的に見られることが多い。			
 図1 伊是名海穴 Jade サイト周辺の堆積物に認められた粘土鉱物。●カオリン鉱物 ○雲母類(イライト) ■クロライト。枠で囲った数字は、熱流量(単位は mW/m²)を示す。(Marumo & Hattori, 1999)			
[調査時間] ・ピストンコア／グラビティコアによる堆積物採取は、半日で 2-4 測点ぐらい実施できる。多くの作業者を要するので、一般の調査船では、昼間の作業として実施されるのが通例である。 ・コアラの外側に熱電対を貼り付けてコア採取と同時に温度勾配を測定するシステムで行なうこともできる(次節)。			
特性			
・海底面下数 m までの地質状況を把握することが出来る。この点で、現在のスナップショットである地球物理的探査とは相補的である。			

7. 並行調査		7-1. 確立された調査技術	7-1-2. 海底地殻熱流量調査
調査項目	海底地殻熱流量調査		
概要			
[原理]・海底堆積層内の鉛直温度分布を精密に測定して、温度勾配と熱伝導率から熱流量を求める。 [特徴]・熱水だまりが海底下浅部にある測点では高い温度勾配(熱流量)が検出される。 [用途]・海底堆積層内の熱水流体移動に伴って生じる特異的に高い熱流量を検知する。熱水域の活動中心の位置や活動分布域の広さが推定できる。			
調査の例			
[調査]・沖縄トラフ伊是名海穴の Jade サイトを含む海域で、1988-1990 年にかけて実施された調査(SO56、KT88-17、SO71 航海)の例(Kinoshita & Yamano, 1997)、および、伊平屋北海丘上での潜水船・ROV を用いた稠密観測の例(Masaki et al., 2011)を示す。 [結果] ・図1に示すように熱流量のコンターは、高温の熱水噴出が観察された地点(▲)を中心とした同心円状に分布し、また熱流量の値は中心部に向かって急激に高くなる。 ・SAHF と呼ばれる短尺(～50cm)の槍を用いると、潜水船や ROV で稠密な観測を実施することができ(図 2)、海底面を観察しながらのピンポイントでの実施も可能となる。			
			
図 1 伊是名海穴 Jade サイト周辺の熱流量分布。(数字の単位は mW/m²)。(Kinoshita & Yamano, 1997) 図 2 伊平屋北海丘での稠密調査。数字の単位は mW/m² (Masaki et al., 2011)			
[調査時間] ・熱流量の測定は、半日で 6-10 測点ぐらい実施できる。熱流量測定だけであれば夜間観測が可能 ・7-1-1 節で示したように、底質試料を採取する際にコアラの外側に熱電対を貼り付けることでコア採取と同時に温度勾配を測定するシステムで行なうこともできる。			
特性			
・海底下温度の鉛直分布が熱伝導が支配的な直線ではなく曲線を呈した場合には、移流によっても熱輸送が担われていることとなるので、堆積層内の熱水流体の上昇・下降を検知することもできる。			

7. 並行調査		7-1. 確立された調査技術	7-1-3. 船上からの CTD-CMS パッケージによる調査
調査項目	CTD-CMS パッケージを用いた熱水プルーム探査		
概要			
[原理]・熱水噴出に起因する特異的な水塊である熱水プルームについて、物理化学センサによりウォーターカラム中の分布を検知し、採取した海水試料の化学分析により熱水活動に関する情報を得る。 [特徴]・温度異常、濁度異常、電位差異常などの物理パラメーターの特異値をセンサ類で検知するとともに、採水試料の化学成分について通常海水との差を検出する。 ・熱水活動の化学的特徴(metal-rich か gas-rich かなど)に関する情報を得ることができる。 [用途]・アクティブな熱水サイトの位置や分布域を推定する。			
調査の例			
[調査] ・北部沖縄トラフの海底火山である第一奄美海丘で実施した熱水プルーム調査の例(KS14-10 航海 Leg.2)を示す。図1に示すように山頂部に分布する複数の火口内を中心に7つの測点を設定し、調査を実施した。			
 図1 調査海域の海底地形図。 (+印で測点を示す)  図2 火口内の測点での観測例. 左図：センサによる温度・透過度・pH 右図：採水試料の化学分析によるヘリウム同位体比・マンガン濃度・pH			
 図3 各測点においてセンサにより検出された値の鉛直分布。 左図：濁度  右図：ORP (酸化還元電位)			
[結果] ・図2に示すように、火口内のウォーターカラムにおいて、センサ観測データから、特異値が観察された。その深度から採取された試料の化学分析からも通常の海水とは異なる水塊であることがわかり、熱水プルームであることが特定できる。 ・図3に示すように、センサにより検出された特異値の大きさは、火口内で南側(図で左側)に行くほど高くなっており、熱水の噴出源が小火口の南端にあると推定できる。 ・化学成分から熱水活動のキャラクター化をすると、この海域の熱水プルームは $\Delta \text{CO}_2 / \Delta 3\text{He}$、$\Delta \text{Mn} / \Delta 3\text{He}$ が伊豆小笠原弧のものに比べて一桁近く高い値を示し、熱水への堆積物成分の寄与を示唆する [調査時間] ・水中作業に必要な時間は当然ながら水深に依存する。ワイヤ繰り出し速度を 0.5-1m/s とすると、水深 1000m の場所では1時間ぐらいを要する。 ・投入前準備に 10-20 分、揚収後作業に 30-40 分ほど必要。ただし、この間に低速で移動しても大丈夫。			
特性			
・ウォーターカラム調査なので、詳細な地形図がない海域でも実施が可能である ・ここでは一つの火山体内を詳細に調べる例を解説したが、広大な海域(例えば伊豆小笠原弧全体)の中の海底火山をしらみつぶしに調べるという手法も考えられる(参考資料 Resing et al., 2009 を参照)			

7. 並行調査		7-1. 確立された調査技術	7-1-4. AUV/曳航体等に搭載した物理化学センサによる調査
調査項目		AUV/曳航体等に搭載した物理化学センサを用いた熱水調査	
概要			
[原理]・熱水噴出に起因する特異的な水塊である熱水プルームについて、物理化学センサによりウォーターカラム中に分布する熱水プルームを検知し、アクティブな熱水活動の位置や分布域を推定する [特徴]・温度異常、濁度異常、電位差異常などの物理パラメータの異常をセンサ類で検知することが可能 ・船上からの CTD/CMS 調査に比べて一定深度もしくは海底から一定高度で面的観測が可能であり、アクティブな熱水活動の詳細な位置推定に有用 [用途]・アクティブな熱水サイトの位置や分布域を推定する			
調査の例			
[調査] ・明神海丘カルデラにおいては、1987 年の白嶺丸 (GH87-3) 航海における CTD/採水による熱水プルーム探査や 1994 年の「しんかい 2000」による採水試料の分析結果から、熱水活動の兆候が示され、1997 年に図1の赤マルで示された地点においてアクティブな熱水噴出活動が確認され、“サンライズ鉱床”と名付けられた。 ・伊豆小笠原の海底火山である明神海丘カルデラにおいて AUV「うらしま」を用いて実施した熱水プルーム調査 (YK14-11 航海) の例を示す。YK14-11 航海では、「うらしま」に濁度センサ・CTD センサ・pH センサ・酸化還元電位 (Oxidation Reduction Potential: ORP) センサ等を搭載し、海底から一定高度で WP (ウェイポイント) グリッド走行を実施した。 [結果] ・図2に示すように、サンライズ鉱床の直上 60～80m 程度では、0.1～0.2pH 程度の低 pH 異常が確認できる。 ・また、カルデラ壁の北西部において、低 pH 領域が確認されており、直下に熱水噴出活動の可能性が示唆される。同領域では、ORP や濁度にも異常が見られる。 ・中央火口丘は、一見すると頂上で pH が高く、周辺域で低 pH のように見えるが、これは航行深度の上下動 (ウォーターカラムの鉛直分布) による pH 変動範囲に入るものであり、明瞭な熱水噴出は検知されない。			
			
図 1 調査海域の海底地形図		図 2 明神海丘カルデラにおける pH 異常	
[調査時間] ・基本的には AUV 運用プロトコルの範囲で物理化学センサ観測が可能 (ただし、巡航型 AUV による 24 時間を超えるような運用を実施する場合においては、物理化学センサのデータ保存容量との兼ね合いで、計測間隔を長くする必要が生じる可能性がある。)			
特性			
・同軸ケーブルを用いた曳航体観測では、船上からのトリガーにより採水を実施することも可能であるが、AUV や鋼鉄ワイヤーウィンチを用いた曳航体観測でも、タイマー機能による採水は可能である。 ・CTD 採水器ユニットによる観測に比べて高速かつ任意の深度・高度で WP 航行が可能であり、特にカルデラ様地形の探査には非常に有効である。			

7. 並行調査		7-2.将来有望と考えられる調査技術	7-2-1. 海底下の物理化学多項目計測装置による調査
調査項目	海底下の物理化学多項目観測プラットフォームによる面的調査		
概要			
[原理]			
【海底下観測プラットフォーム(SpearHead)】			
・海底表層の地質試料採取に用いられるグラビディ(もしくはピストン)コアラのような方式により、温度・圧力・pH 等のセンサや間隙水採取器のアレイを海底下へ打ち込み、計測と試料採取を行う。			
【現場間隙水採取装置(PileBunker)】			
・ROV や有人潜水艇のマニピレータ等により間隙水抽出装置をアレイ状に配置した物理化学センサと共に海底に突き刺し、タイマーもしくは物理スイッチによりポンプを駆動させ採水、その前後にセンサ計測する。			
[特徴]			
・活動的な熱水噴出域周辺における物理パラメータの海底下の多深度・多項目観測が可能			
・センサ観測とともに間隙水試料の採取も実施し、熱水鉱石の成因解明に資する海底下における化学平衡状態等の直接観測が可能			
・複数プラットフォームを用いた面的観測、ならびに船上での待機時間軽減を目的として、音響切り離し装置により、計測槍部・センサ制御部(データ保存を含む)・電源部のみを海底に設置することが可能(SpearHead)。			
[用途]・海底下の熱水流動を観測し、活動的な熱水サイト周辺海底での潜頭性熱水鉱床の範囲を推定する。			
調査の例			
[調査]			
【海底下観測プラットフォーム(SpearHead)】(図 1)			
○SIP による傭船航海(2017 年 1 月 5 日～10 日@伊平屋海嶺、第一開洋丸)			
・観測地点の底質が細粒な半遠洋性堆積物			
・SpearHead の重量 500kg により、4m 以上の貫入が確認			
・音響によるシステム切り離し機能の確認(観測時にはスラストによる音響ノイズの低減が必要)			
【現場間隙水採取装置(PileBunker)】(図 2)			
○「新青丸」(KS17-J06)航海にて、大室ダシ北東斜面におけるタイマー駆動による現場間隙水採取を実施			
・本試験では ROV マニピレータにて槍長 120cm に対して 70cm 程度の貫入が可能(底質に依存)			
・シリンジポンプの駆動により 2.5mL の試水を 8 層から採取(うち下から 4 層が間隙水試料)			
図 1			
図 2			
特性			
活動的な熱水噴出域周辺に埋没する潜頭性熱水鉱床探査に資する物理化学因子の多次元観測を可能とする			
図 3			
図 4			

7. 並行調査	7-2.将来有望と考えられる調査技術	7-2-2. 底質試料の地球化学的指標に基づく調査
調査項目	地質調査で採取された堆積物試中の間隙水の地球化学的解析	
概要		
[原理]・熱水反応の地球化学的指標をもとにして熱水域の中心部か周縁部かを識別する。 [特徴]・海底下で進行する熱水（変質）反応に伴ってホウ素同位体比が変動することを利用して、堆積層内で起こる熱水反応の痕跡および堆積層内への熱水成分の浸入を検出する。 [用途]・試掘を行なった地点が、熱水域の中でどのような位置に当たるのかを推定する。		
調査の例		
[調査] ・伊平屋北海丘のアキサイトでCK14-04航海, CK16-01航海によって得られた掘削試料の研究結果を示す。図1に示すように高温熱水を噴出するマウンドに対して、直近(Site C9023D)・200m 離れた低温熱水域(Site C9016B)・1000m 離れた参照サイト(Site C9021B)の3サイトで掘削を行なった。		
 図1 伊平屋北海丘アキサイトにおけるSIP 科学掘削による試料採取地点  図2 伊平屋北海丘アキサイトにおける間隙水中ホウ素同位体比の鉛直分布		
[結果] ・図2に示すように3つのサイトでホウ素同位体比の鉛直分布は異なるパターンを示す。参照サイト(C9021B)では、海水の値($\delta^{11}\text{B} = +37\text{‰}$)よりわずかずつ ^{11}B に富む側にシフトしていく、すなわち$\delta^{11}\text{B}$ 値が大きくなる傾向が見られる。これに対して、他の2つのサイトでは40mbsf 以深において、^{11}B に乏しい$\delta^{11}\text{B} = +15\text{‰}$前後の値が見られる。この値は、アキサイトの熱水のホウ素同位体比($\delta^{11}\text{B} = 5\text{‰}$ 前後と推定されている)に近く、熱水成分の浸入を検出していると考えられる。 ・ホウ素濃度の逆数と同位体組成で2成分プロットをつくと(図3)、海水の値を出発点として、熱水成分との混合により$\delta^{11}\text{B}$ 値が低くかつホウ素濃度が高くなる傾向と、堆積物中の熱水変質反応により$\delta^{11}\text{B}$ が高くなかつホウ素濃度が低くなる傾向があることがわかる。 [調査時間] ・堆積物からの間隙水抽出作業:1試料あたり約 30 分 (できれば船上で実施することが望ましい) ・間隙水のホウ素同位体比測定:1日に数十試料の分析が可能		
特性		
・間隙水の主成分組成の分析を合わせて行うことで、間隙水のキャラクタリゼーションがより適確に行なえる		

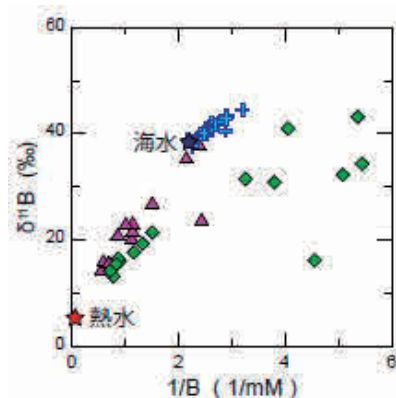


図3 ホウ素濃度の逆数とホウ素同位体比の関係(青の星印が海水、赤の星印が熱水の組成)

8. 統合地質解釈評価

SIP『次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）』では、本調査技術プロトコルを作成して、これを基に統合調査システム航海を計画し、実施してきた。第3章にはその調査技術パッケージを示したが、これらの航海の中で、第4章から第7章に解説したような海底面上から得る地震波反射構造、自然電位、比抵抗などの物理データや、海洋底掘削やサンプリングによって得られた海底面上、および、海底下の試料を計測・分析・解析して得られた物性・化学データなど、大量のデータが得られる。調査を次のステップに進めるため、および、解析結果を利用するためには、得られたデータに科学的な解釈を施し、地質モデルなどを構築して、それを可視化する技術が必須となる。

個々のデータを解析してそれを2次元的に図示する、あるいは、複数のデータを重ねて示すことは、データの解釈の過程でこれまでも行われてきた。一方、最近では数理科学的な手法が大きく進展し、ビッグデータを利用した人工知能が様々な分野で利用されている。その流れの中、海洋資源では石油開発の過程で複数の物理データを統合解析する手法が発展してきた。海洋鉱物資源に関しては、未だそのような統合解析を行い、地質モデルを構築する試みはなされていない。

そこで、SIP『次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）』においては、個々の物理データの相関関係を調べて統合インバージョンを行い、単なるデータの重ね合わせではないデータの統合解析の試みを行っている。統合によって、鉱床の位置と広がりを精度よく推定できれば、資源ポテンシャルの把握のみではなく、調査のための掘削点を減らすことができ、非常に有用なツールとなる。現時点では、海底鉱物資源から得られた物理データの統合インバージョンは開発途上である。さらには、これら3次元物理データと、掘削コアやサンプリングした試料の分析から得られる化学データとを統合して統合インバージョンを実施し、岩石物理的な3次元データにすることが可能になれば、海底熱水鉱床の鉱体やその周辺の地質構造を3次元で観察することも可能になる。本章では、これら統合地質解釈評価技術について概説する。

8. 統合地質解釈評価		8-1. 数理科学による ポテンシャル予測	8-1-1. 陸上黒鉱鉱床・海底熱水鉱床の数理 科学的解釈
調査項目	統合的データ解析技術		
概要			
海洋資源調査において、調査コストを抑えるには、限られた量のデータの適切な解析と事前の有望海域の予測の精度を高めることが極めて有効である。しかしながら、陸上の金属資源調査に比べて海底の掘削データの本数は格段に少なく、掘削深度も浅いので、少ない情報量からこのような予測を高精度で行うことは困難である。この問題に対しては、地球統計学（Geostatistics）という地質データに適した数理解析法が有効であり、この活用によって、金属濃度などの対象とする物性の尤もらしい空間分布モデルを作成できる。これにより鉱床存在ポテンシャルを広域的に評価し、ポテンシャルの高低を海底地形などの他の情報と重ねて図化できれば、ポテンシャルが高い部分の規則性などの解釈が容易になる。 地球統計学ではデータの空間的相関構造をセミバリオグラムで定量化し、クロス確認によって最も精度の高いクリギング法を選択する。セミバリオグラムとクリギング法の内容に関しては後述のとおりである。また、多変量解析も一般的である。例えば物理探査データは広域的に取得されているデータであるので、これと元素濃度との関連性があれば、濃度データが存在しない部分の情報を補う補助変数として利用できる。データ分布の空間的滑らかさ、あるいは断層などの地質構造に起因したデータの異方性などを反映させるために、インバージョン解析にも地球統計学が用いられている。			
地球統計学技術			
地球統計学では、データは広域化されたランダム変数であり、その期待値はデータの位置にかかわらず一定であるという統計学的定常性（stationarity）を満たし、さらに一定の間隔にある任意の 2 点間のデータには共分散が存在し、それは領域内に占める点の位置には無関係である、という前提条件が必要になる。地球統計学解析は下記の 4 つのステップから構成される。 (1)データ分布の確認 この操作は通常統計解析と同じである。データ分布をヒストグラム等で確認し、異常値があればそれが計測誤差に由来するのか、あるいは意味のある数値であるのかを判断する。地球統計学ではデータが正規分布に従っていることが望ましい。通常、金属濃度データなどは低い範囲に集中し、濃度が高い方に長い尾を引くことが多い。この場合、データの対数変換を施すと正規分布に近づく、すなわち対数正規分布をとる場合も多い。それでも正規分布から大きく外れる場合には、元データを標準正規分布に従うデータへと置き換えることも行われる。これは正規スコア変換（normal score transform）と呼ばれる。 (2)セミバリオグラム解析 地球統計学で最も重要となる統計量は、測定データの空間的な相関構造を表すセミバリオグラム$\gamma(h)$である。通常、2 つのデータが近接していればそれらは同様の値を示すが、データ間の距離 h が大きくなるにつれて値の相違（分散）が増加し、独立した関係になると分散はほぼ一定の値となる。この一定値はシルと呼ばれ、理論的には従来の統計学での分散に等しい。$\gamma(h)$は次式によって h と分散との関係を明らかにし、これによってデータ間に相関性が存在する距離の範囲（レンジ）が見出される。 $\gamma(h)=E\left[\left\{z(\mathbf{u}+h)-z(\mathbf{u})\right\}^2\right] / 2$ ここで、$z(\mathbf{u})$は位置 $\mathbf{u}$ でのデータ値、E は期待値を表す。100 m 刻みなどの複数の h に対して計算された $\gamma(h)$は、実験セミバリオグラムと呼ばれる。通常、任意の h に対する $\gamma(h)$を計算できるように、実験セミバリオグラムを球モデルやガウスモデルなどで近似する。このとき $h=0$ での$\gamma(h)$モデルの値はナゲット効果と呼ばれ、データの測定誤差などに関連する（図 1）。h の方位を考慮すれば、$\gamma(h)$の異方性を抽出できる。また、$\gamma(h)$が複数のモデルから構成されるという入れ子状構造（nested structure）も見出される場合も多い。 (3)クリギング（Kriging）による推定 統計学では最確値μに標準偏差σを付けて $\mu \pm \sigma$と表す。このとき、σは推定の不確実性（uncertainty）を表す指標で、これが大きいほどμは曖昧で信頼性が低い。地球統計学では$\gamma(h)$に基づき、個々の測定データに重みを付けて、データがない点や領域（ブロックなど）での値を推定する。この手法はクリギング			

と総称されるが、クリギングによる推定値が μ 、不確実性の指標がクリギング分散 σ_k^2 に相当する。

クリギングには多くの種類があるが、基本的には計算点 $\mathbf{u}$ の周辺に分布する m 個のデータ $z(\mathbf{u}_k)$ に重み係数 λ_k を与え、その加重平均によって推定値 $z(\mathbf{u})^*$ を求める。すなわち、

$$z(\mathbf{u})^* = \sum_{k=1}^m \lambda_k z(\mathbf{u}_k)$$

λ_k は $z(\mathbf{u})^*$ の誤差の分散を最小化することで得られる。これはデータペア間の共分散、データと計算点間の共分散に関する連立一次方程式を導く。距離 h にある共分散はシルから $\gamma(h)$ を差し引くことで得られる（図1）。

クリギングで最も広く用いられているのが普通クリギング (OK: ordinary kriging) である。解析領域全体にわたって上記の定常性が満たされるという前提条件は、地質関連データに対して無理がある場合が多い。そこで、推定点周辺の限られた領域内であれば定常性が満たされると仮定するのが OK の原理である。不偏条件より λ_k の総和は1である。限られた領域内でも期待値がトレンドをもつ場合には、トレンド付きクリギングが必要となる。

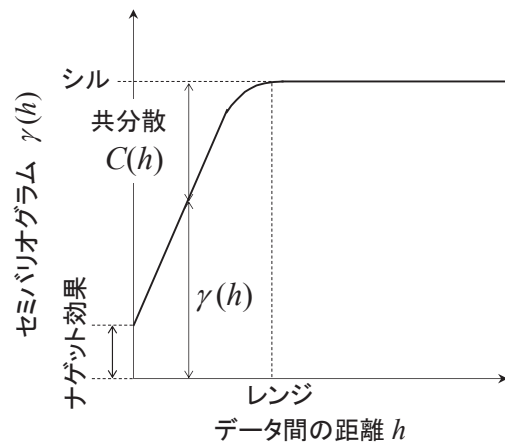


図1 セミバリオグラムの模式図

(4)地球統計学的シミュレーション

クリギングによる推定値は、データの共分散構造に基づいて出現確率が最も高い値であり、確率が低い分布を含めた無数の可能性の中からの1つの実現化 (realization) である。推定値の不確実性を考慮して、確率的に起こる空間分布を幾通りも描くことが地球統計学的シミュレーションの目的である。このシミュレーションの代表的手法として逐次ガウスシミュレーション (SGS: Sequential Gaussian Simulation) と回転バンド法 (TB: Turning band) があげられる。SGS は多変量データに適用しやすい、TB は極端にデータが少ない場合にも適用できるという特長がある。

SGS では、OK による推定値を平均、クリギング分散を分散とする正規分布を各計算点で仮定し、これにモンテカルロ法を適用して一つの実現値を決める。これをデータに順次組み込んで情報量を増やし、次の対象点での計算を行う。この座標は「ランダムパス」によって乱数で選ぶ。

一方、TB では、まず計算の対象とするセルを通る複数の線分を設定し、その線分上で定義したセミバリオグラムに合うように値をランダムに与える。これらを平均化した後、データ点ではその値とシミュレーション値が等しくなるようにクリギングを用いて補正し、条件付きシミュレーションへと変換する。

具体的なアプローチ例

海底熱水地域の金属濃度の3次元モデリングを行うのにまだ十分なデータ量が得られていないので、海底熱水鉱床に起源をもつと考えられる陸域の黒鉱鉱床を地球統計学的手法のモデル・ケースに選ぶ。黒鉱はCu、Zn、Pbに富んだ緻密な鉱石で、火山性塊状硫化物 (VMS) の一種である。鉱床の形成は、海底火山活動に起因した鉱液が海水との混合によって冷却され、金属が沈殿したことによる。解析には、大規模な黒鉱鉱床を対象とし、垂直に近い調査ボーリングデータを用いた。データにはサンプル点の座標、地質柱状図と海底熱水鉱床の主要金属でもあるCu、Pb、Zn、および普遍的に存在するFeの濃度が含まれている。データ数は1000以上あり、統計的に有意義な金属間の相関性の抽出や信頼性の高いセミバリオグラムの作成、およびクリギングによる空間モデリングが可能になり、データ量が少ない海底熱水地域での空間モデリングの教師情報になり得ることが期待できる。

まず、鉱床のCu、Pb、Znの等方性のセミバリオグラムを図2に示すが、いずれも球モデルで近似できるような空間的な相関構造をもつ。レンジは170~350 m程度の範囲にあり、鉱床の規模を見積もるのに利用できる。ただし、ナゲット効果はシルの40%程度を占め、10m以内のデータ間距離でも金属濃度は大きく変動することが意味される。よって、鉱石サンプルを用いての微小スケールでの解析のように、距離が短いデータ間の変動の特徴を考慮することが金属濃度の空間分布と資源量の高精度評価には必要となる。このセミバリオグラムを用いての3次元Cu濃度分布のOKによる推定、およびSGSによるシミュレーション結果を図3に表す。対象領域の大きさは水平方向に420 m×940 m、垂直方向に390 mにわたる。OKとSGSの全体的な傾向は類似し、高濃度部の位置は対応しているが、OKではデータ

の偏在性の影響が強く、データの少ない領域では同様の濃度が連続するという平滑化効果が顕著に現れている。SGS によればその効果を軽減でき、特に領域下部のデータが疎の領域でも高濃度が推定され、これは鉱液のルートを示唆すると考えられる。このようにデータ量がある程度確保できればシミュレーションにより資源分布の過大、あるいは過小評価を抑制でき、より適切な資源分布のモデリングが可能になる。

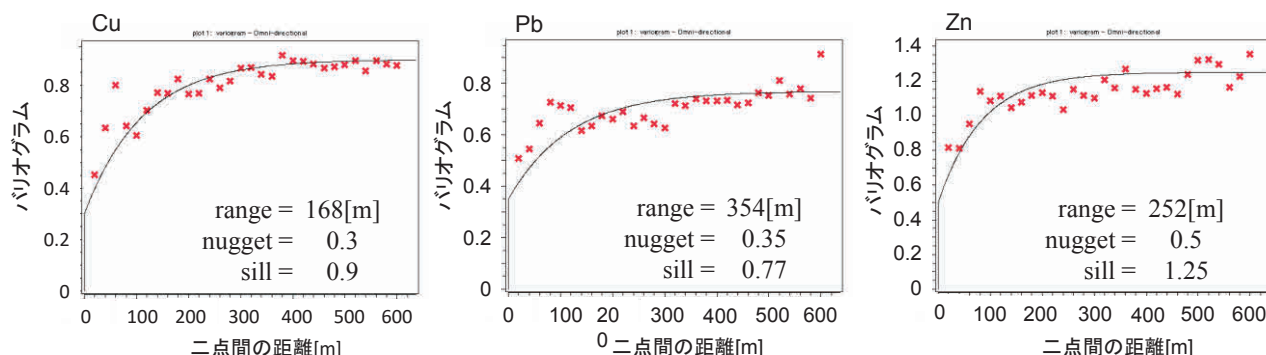


図2 陸域黒鉱鉱床での Cu、Pb、Zn の等方性のセミバリオグラム

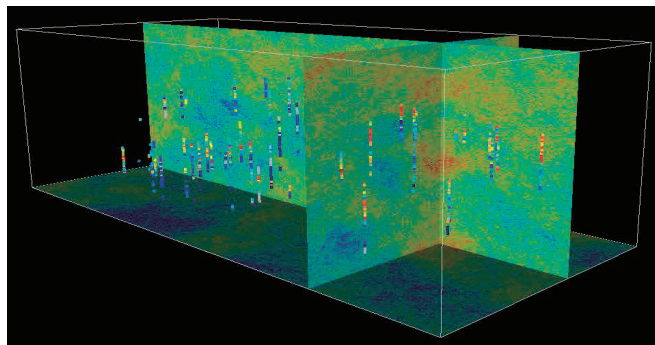
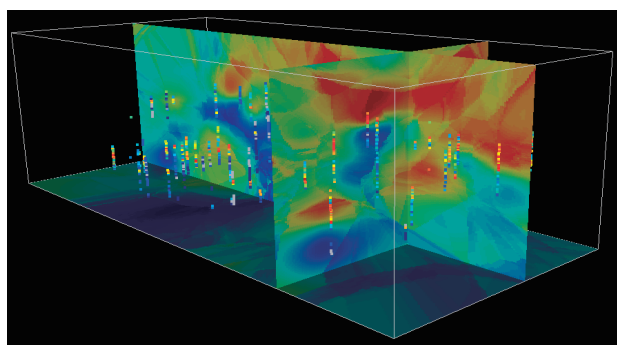


図3 黒鉱鉱床での Cu 濃度の OK による推定 (左) と SGS によるシミュレーション結果 (右) の比較。元のボーリングデータと重ね合わせており、寒色から暖色にかけて濃度が増加する。

次に、伊平屋北海丘の海底熱水地域において、相対的に近接する 4 地点の電気検層比抵抗データの解析例を示す。セミバリオグラムによる垂直と水平方向の相関距離はそれぞれ 42 m、550 m 程度である。このセミバリオグラムを用いて、4 地点を含む東西・南北方向ともに 1 km、海底から深度 400 m までの領域を対象として、TB による比抵抗の 3 次元分布の推定を試みた。その結果、比抵抗分布は水平方向に連続性が良いことがわかり、高比抵抗と低比抵抗ゾーンの存在が明らかである (図 4 左)。概して領域西部の海丘部の方が比抵抗は低い。3 つのボーリング地点付近を通る北西－南東方向の垂直断面からは数枚の高比抵抗部の連続性が顕著であり、浅部では深度 20～40 m 付近に現れている (図 4 右)。シミュレーションによって明らかにできた高比抵抗部の連続性は、熱水の存在と流動に対応する可能性が示唆

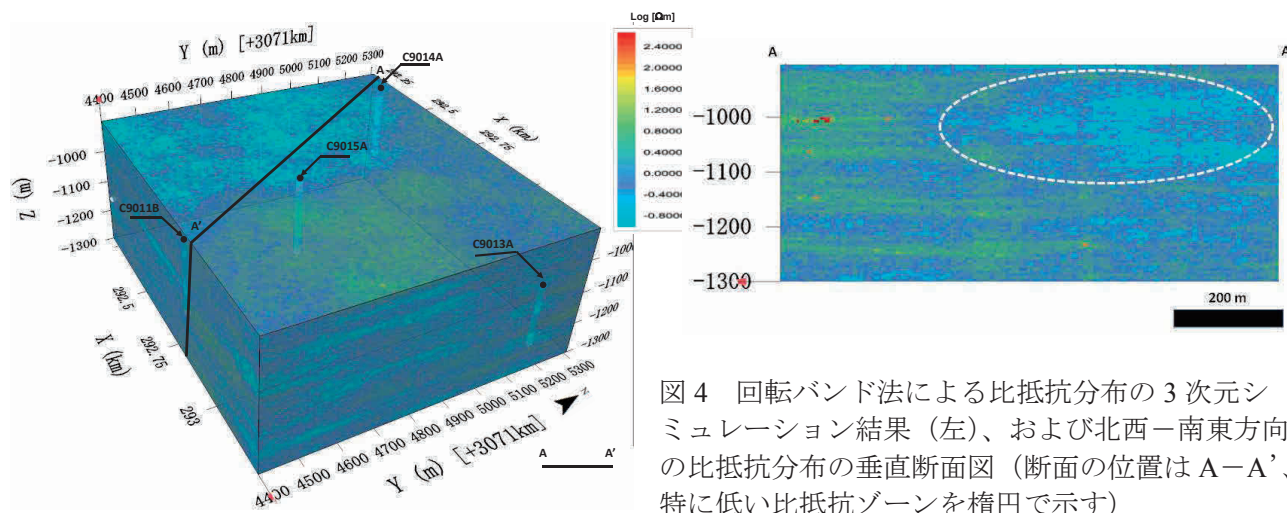


図4 回転バンド法による比抵抗分布の 3 次元シミュレーション結果 (左)、および北西－南東方向の比抵抗分布の垂直断面図 (断面の位置は A-A'、特に低い比抵抗ゾーンを楕円で示す)

される。また、断面図右側に深度 200 m まで広範囲に存在する特に低い比抵抗ゾーンは、一般的には硫化金属鉱物の高濃度部に対応することが推察できる。
精度、分解能 クリギングによる推定精度の検証方法としてクロス確認 (cross-validation) が代表的である。これは実際のデータ値 (実測値) を周囲のデータからどれほどの精度で推定できるかを表し、これによる推定値と実測値との関係をすべてのデータ点において求め、その結果をグラフにプロットする。推定値と実測値とが 45°の直線に近いほど精度の良い手法といえる。ただし、実際には高い実測値は低めに、低い実測値は高めに推定されるという平滑化効果が生じる。平滑化効果が小さく、推定精度が高くなるのは、データ量が多い、データ値の空間的な変動が小さくナゲット効果はゼロに近い、および実験セミバリオグラム のばらつきが小さくてほぼ曲線上にのる、という特殊な場合に限られ、これらによってクリギング分散も小さくなる。金属濃度データの空間的な変動は大きい、すなわち近距離でも値が大きく変動するので、この条件には当てはまらない。比抵抗などの物理探査情報は面的に得られ、金属濃度と相関性をもつ場合もある。よって、このような相関性が存在する場合、ボーリングデータという線上の点データで、しかもデータ数と分布が限られた情報から推定精度を高くするには、物理探査情報をトレンドとして用いた多変量地球統計学の適用が有効である。 また、地球統計学的推定の空間分解能はナゲット効果に依存する。ナゲット効果が大きいと、現状の測点配置では近接するデータの距離以内のデータ値の変動は正確には捉えられないことが意味され、より密な間隔でのデータ採取が望まれる。セミバリオグラムでデータペア間の最小のラグか、それよりも少し小さい距離がセルサイズ設定の目安になる。
ソフトウェア フリーの地球統計学解析ソフトウェア SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) http://sgems.sourceforge.net/ 市販品の地球統計学ソフトウェア ISATIS (Geovariances 社) http://www.geovariances.com/en/software/isatis-geostatistics-software/, および ArcGIS Geostatistical Analyst (esri 社) http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/geostatistical
参考文献等 Chilès, J.-P., Delfiner, P., 2012. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty (2nd ed.), Wiley. Lu, L., Koike, K., Kubo, T., Kashiwaya, K., Tada, Y., Yamada, R., 2016. Towards physical-geostatistical modeling of metal grade in an ore deposit, Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2016, p. 93-96. Remy, N., Boucher, A., Wu, J., 2009. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide, Cambridge University Press. Rossi, M.E., Deutsch, C.V., 2014. Mineral Resource Estimation, Springer.

8. 統合地質解釈評価		8-2. 統合解釈	8-2-1.異種物理探査結果の統合解析
調査項目	統合的データ解析技術		
概要			
海底熱水鉱床海域では、図1に示すような様々な種類の調査を行い地下構造推定や鉱床探査が行われる。各調査手法の概要については、本プロトコルの該当項目を参照されたい。			
図1左側に記載の「地下の情報を得る」調査は地下構造・鉱物の持つ物理的な特性に注目して、海底面上から間接的な調査を行うものであり、「物理探査」と呼ばれている。海底熱水鉱床探査手法としては、音波探査、電気・電磁探査、磁気探査、重力探査等が用いられる。各物理探査では、得られたデータからそれぞれ異なった物理量(物性)を推定することができる。一般的には地下構造をグリッドモデル化して、各探査データから各グリッドでの物性値を計算する。このような解析手法をインバージョン(逆解析)と呼ぶ。従来は、各探査データを個別にインバージョンをして、地下の物性を推定が行われてきた。しかしながら、これらの物性の間には、相関がみられることが多く、その関係式をもとに異なる探査データを統合的にインバージョンして、より信頼性の高い物性把握を行う処理が統合解析(ジョイントインバージョン)である。これにより、地下構造や鉱物の賦存状況をより確実に把握することができるようになる。			
音波探査は物性(音波速度、密度)の推定だけではなく、地下構造を直接的にイメージング(可視化)できる手法であるため、音波探査で得られた構造をベースにジョイントインバージョンを行うのが一般的である。			
地下(海底面下)の情報 電気探査 電磁探査 磁気探査 重力探査 自然電位 比抵抗・IP 磁化率 密度 速度 音波探査 岩質境界 物性 構造 総合地質 解釈・評価 掘削・検層・コア情報 精密海底地形 海中音響異常 化学分析 データ 音響調査 地化学調査 海底・海中の情報			
図1 海底熱水鉱床探査のための各種調査			

ジョイントインバージョン技術

「概要」で述べた「ジョイントインバージョン」は「統合解析・解釈」で最も重要な解析技術である。取得されているデータの種類、またその品質によって統合度は異なってくるが、図2に示す様に段階的に細かつ定量的な解析へと進められる。

(1)Co-rendering

各物理探査データに対して個別にインバージョンをして、地下の物性を推定する。その結果を重ね合わせて解釈することで、より確実な地下構造・物性把握を行う(統合解釈)

(2)Structural Constrained Inversion

音波探査から得られる地下構造をベースにした各種物性モデルを作成する。それを初期モデル、あるいは、その構造を制約条件として、各探査データでインバージョンを行う。得られた結果を初期モデルとして、別の探査データのインバージョンを行う(例えば、音波探査→重力探査→磁気探査→電磁探査)。このループを適宜反復する。

(3)Quantitative integrated Inversion (Physical Inversion)

複数の探査データ間に関係性を仮定して、複数の物性を同時に推定する(ジョイントインバージョン)。関係式は、坑井データや検層データから導出、あるいはインバージョン過程で適当な関係性を推定する。

(4)Petrophysical Joint Inversion

得られた各種物性値(音波速度、比抵抗、IP、磁化率、密度)を坑井データや岩石サンプルから作成した変換式により、貯留層物性値(孔隙率、飽和度、鉱物組成等)へと変換する。

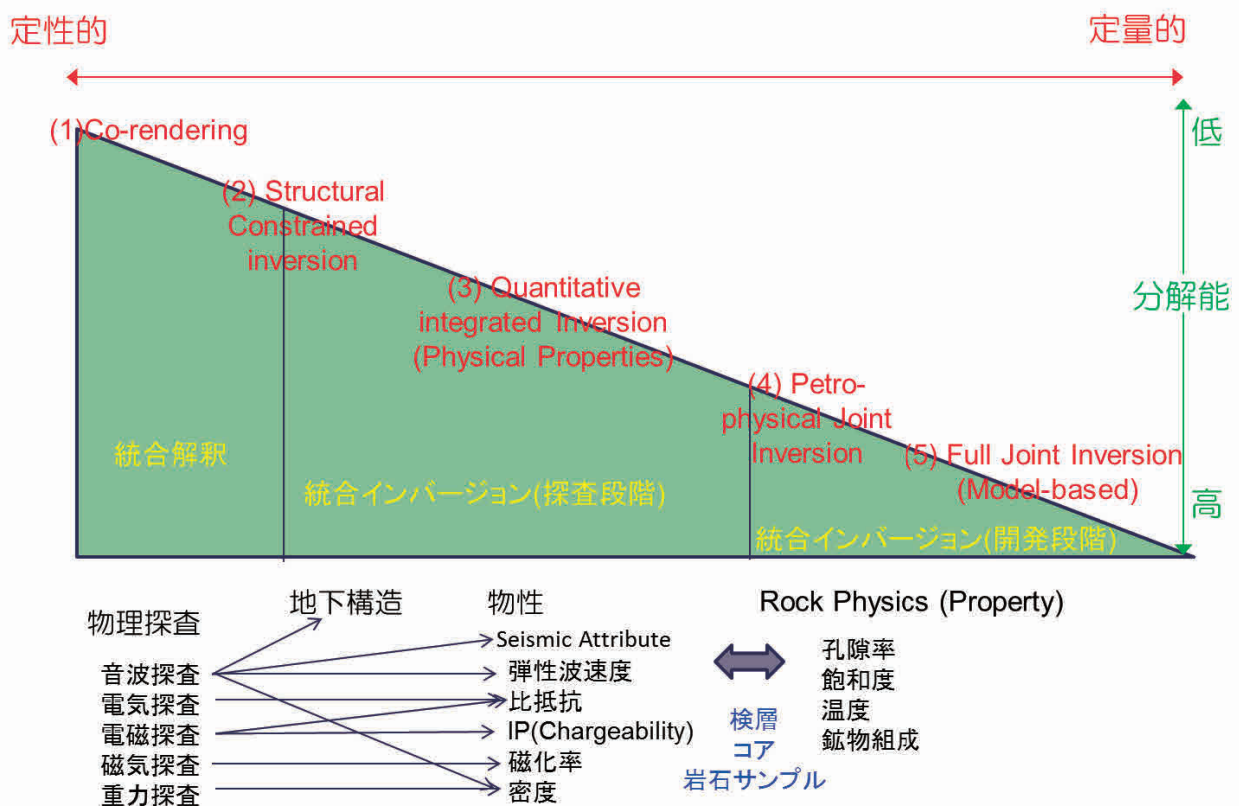


図2 物理探査データの段階的統合解析プロセス

具体的なアプローチ例

海底熱水鉱床探査において本手法は確立されたものではなく、未だ研究開発途上にある。ジョイントインバージョン処理の研究開発で先行する石油・ガス探査分野でも、上記段階(2)でとどまっており、(3)が試験的に実施されている段階である。

海底熱水鉱床探査の場合には、個別の物理探査法・インバージョンにも課題が残されており、ジョイントインバージョン技術確立には開発費用、開発期間が必要となる。そのため、SIP「次世代海洋資源調査技術」においては、既に確立されている解析技術を組み合わせることにより統合解析を進めるとともに、より信頼度の高い解析技術を研究開発中である。

図3に現状でのアプローチを示す。まず、図3の左上図にあるように、音波探査によって地下構造の把握、また、音波探査から得られる物性値(音波速度及び密度)構造を推定する。また、同時に音響探査により詳細地形データを得る。その結果から、右上図のような「アトリビュート解析」を実施する。これは、地下構造の中で、海底熱水鉱床形成に大きな影響を与えるフラクチャー(断裂)構造を推定するものである。一方、左下図では、異種物理探査のインバージョンを行い、より信頼度の高い物性の分布を把握するものである。この技術は図2で示したものであるが、現状では完全なジョイントインバージョンはできておらず、推定された物性モデルを初期値にして逆解析を行うという緩い制限を設けた解析を行う。最終的には、物性値と断裂構造とを使って、地球統計学、マルチアトリビュート解析を実施して、確からしいモデルを構築するとともに、化学分析やコア分析から岩相推定や岩石物理モデルの構築を行うという手法を採用している。

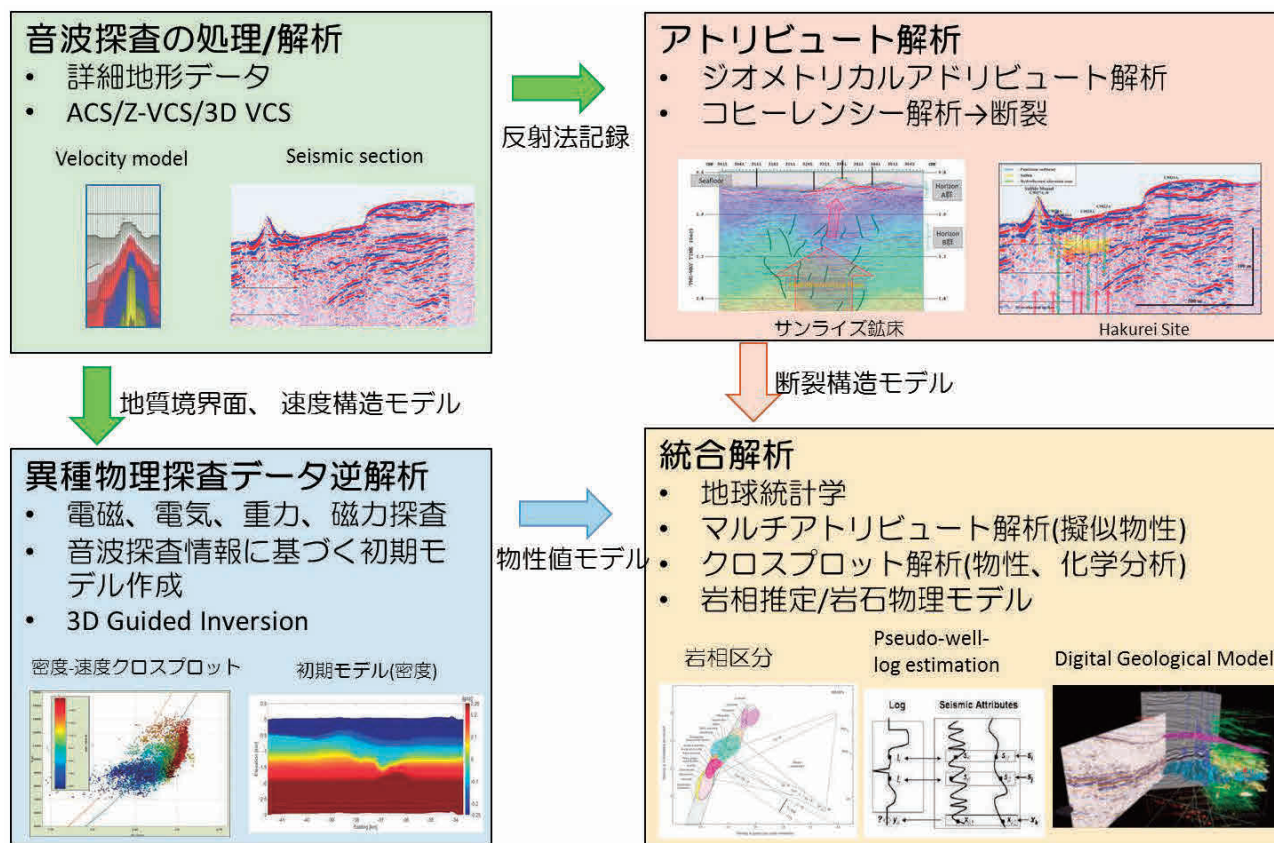


図3 海底熱水鉱床における統合地質モデル構築のアプローチ

精度，分解能
図 3 に示すような統合解析アプローチの場合に、構築される統合地質モデルの分解能は、音波探査の精度による。これは、音波探査のみが「イメージング」により地下構造を直接的に可視化でき、また、現状では最も高分解能な探査技術であるためである。そして、その分解能は震源の周波数に大きく依存する。デルタスパーカーを震源とした場合（卓越周波数 150Hz を想定）、地質構造断面図の水平/垂直分解能は約 2.5m である。また SBP を震源とした場合（卓越周波数 1500Hz を想定）、地質構造断面図の水平分解能は 1m 程度、垂直分解能は 25cm 程度である。 物性値を推定するためのインバージョンで用いられるグリッドサイズは、計算の安定性等の要因から決定される場合が多く、地下構造の分解能の直接的な指標とはならない。
ソフトウェア
反射法地震探査データ処理・解析・解釈ソフトウェア(市販品) 重磁力データ処理・解析ソフトウェア(市販品) 電気・電磁探査データ解析ソフトウェア(海洋電磁に対しての市販品は存在しない)
参考文献等
Paolo Dell'Aversana. 2014, Integrated Geophysical Models: Combining Rock Physics with Seismic, Electromagnetic and Gravity Data. EAGE Publications. Zhdanov, M.S., 2015, Inverse Theory and Applications in Geophysics, Elsevier. Published, 09/2015.

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

2017年 12月 18日 発行

執筆者（順不同、敬称略）

- 1章 浦辺 徹郎（プログラムディレクター）、鈴木 勝彦（海洋研究開発機構）
- 2章 浦辺 徹郎（プログラムディレクター）、熊谷 英憲（海洋研究開発機構）
- 3章 町山 栄章・北田 数也（海洋研究開発機構）、浅川 栄一（J-MARES）、久保田 隆二（JAMSA）
- 4章 奥村 勝紀・橋本 健太郎・久保田 隆二（JAMSA）
多良 賢二・齊藤 秀太郎（J-MARES）
- 5章 笠谷 貴史（海洋研究開発機構）、李 相均（J-MARES）
岡田 力・石川 秀浩・久保田 隆二（JAMSA）
- 6章 北田 数也（海洋研究開発機構）
篠原 雅尚（東京大学）、押田 淳（JAMSA）、李 相均（J-MARES）
- 7章 石橋 純一郎（九州大学）、正木 裕香（海洋研究開発機構）
岡村 慶・野口 拓郎（高知大学）
土岐 知弘・新城 竜一（琉球大学）
- 8章 小池 克明（京都大学）、浅川 栄一（J-MARES）

編 者 国立研究開発法人海洋研究開発機構 木川 栄一
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り込み手法の開発」

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研究開発
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）

ISBN 978-4-901833-32-5

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り込み手法の開発」課題の平成29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り込み手法の開発」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研究開発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

※本書に掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます。

