

海底熱水地域に広がる金属資源の「二階建て」地下分布の可視化に成功

—日本発の海底資源開発に欠かせない、高効率・非破壊の海底探査技術の確立—

概要

昨今の世界的な経済成長に伴って、金属資源の減耗・枯渇が懸念される中、海域の金属資源に注目が集まっています。特に、海底火山の近くで形成される「海底熱水鉱床」は鉱石の品位が高く、次世代の金属資源として期待されています。しかし、海底熱水鉱床は深海の海底下に分布するため、鉱床の地下での分布・形状は詳しくは解明されておらず、海底熱水鉱床の形成メカニズムも不透明でした。

そこで、京都大学大学院工学研究科 小池克明 教授、兵庫県立大学大学院生命理学研究科 後藤忠徳 教授、海洋研究開発機構海洋機能利用部門 笠谷貴史 グループリーダー、九州大学大学院工学研究院 辻健 教授らの共同研究グループは、海中に微弱な電流を流して非破壊で地下断面図を作成する「海底電気探査」に注目し、探査装置を独自に開発して、実際に沖縄沖海底熱水地域の海底探査を行いました。その結果、1)「電気をよく通す岩の層」が熱水噴出孔周辺の海底面に分布すること、2) さらに「電気を非常によく通す別の岩の層」が海底下 40m 付近にも存在することが明らかになりました。本海域で採取した岩石試料の分析結果から、これらの岩層は金属資源を多く含んでおり、海底熱水鉱床だと考えられます。「海底熱水鉱床の二階建て構造」が詳細に可視化されたのは、世界初の快挙です。研究チームは、この断面図に基づいて、海底下深部での金属資源濃集に関する新たなメカニズムを提案しました。これは将来的な熱水金属鉱床での資源開発において重要な知見です。また本探査技術は、海底の資源賦存量の推定を高効率で可能とするため、日本発の海底資源開発に役立つものです。

本研究成果は、2019年9月16日に国際学術誌「Geophysical Research Letters」のオンライン版に掲載されました。



図：本研究で提案された「二階建て」の熱水鉱床の形成メカニズム

研究成果のポイント

- 次世代の金属資源として注目されている「海底熱水鉱床」について、これまで未解明であった海底下の詳細な分布を世界で初めて解明
- 研究チームは「海底電気探査」に注目し、海底下数十 m までの様子を非破壊で効率よく探査する技術を国内で独自に開発。
- 沖縄沖海底熱水地域の海底探査を実施し、海底面に露出・分布している熱水鉱床とは別に、海底下 40m 付近にも層状の熱水鉱床があることを新たに発見。海底下深部の金属資源濃集に関する新たなメカニズムを提案。
- この探査技術は、未解明であった海底熱水鉱床の成長モデルの検討を可能にするとともに、海底下の資源賦存量の正確な推定に貢献。日本発の海底資源開発にはずみ。

1. 背景

電子機器や自動車といった製品や、電力・インターネット網など、様々な用途で金属資源が使用されています。私達の暮らしに欠かすことのできない金属資源ですが、世界的な経済成長に伴って、その減耗・枯渇が懸念されています。2050 年までに多くの種類の金属資源が賄えなくなるという予測がありますが、陸上では経済性の高い優良な金属鉱床の発見が年々困難になっています。日本は世界有数の金属消費大国であり、ほぼすべてを輸入に頼っているため、金属資源の確保は大きな課題です。

現在、日本を含む世界各国は、海底に広がる未開発の金属資源に注目しています。その中でも銅・鉛・亜鉛などを高品位で含有し、金・銀も含む「海底熱水鉱床」は、次世代の金属資源として特に注目されています。海底熱水鉱床は海底火山の近くに分布しており、海底から噴出する高温の地下水（熱水）に含まれる金属成分が海底付近に沈殿してできたものです（図 1）。このように海底で熱水が噴出している地域（海底熱水地域）は世界各地に存在します。日本が有する世界第 6 位の広さの領海・排他的経済水域（EEZ）内にも多数の海底熱水地域が認められており、海底熱水鉱床が新たな国産資源として期待されています。これまでに沖縄沖海域や伊豆・小笠原海域で、海底熱水鉱床の存在が確認されており、その鉱物資源量は沖縄沖の海底熱水地域 1 箇所だけで数百万トン以上に及ぶと報告されています。

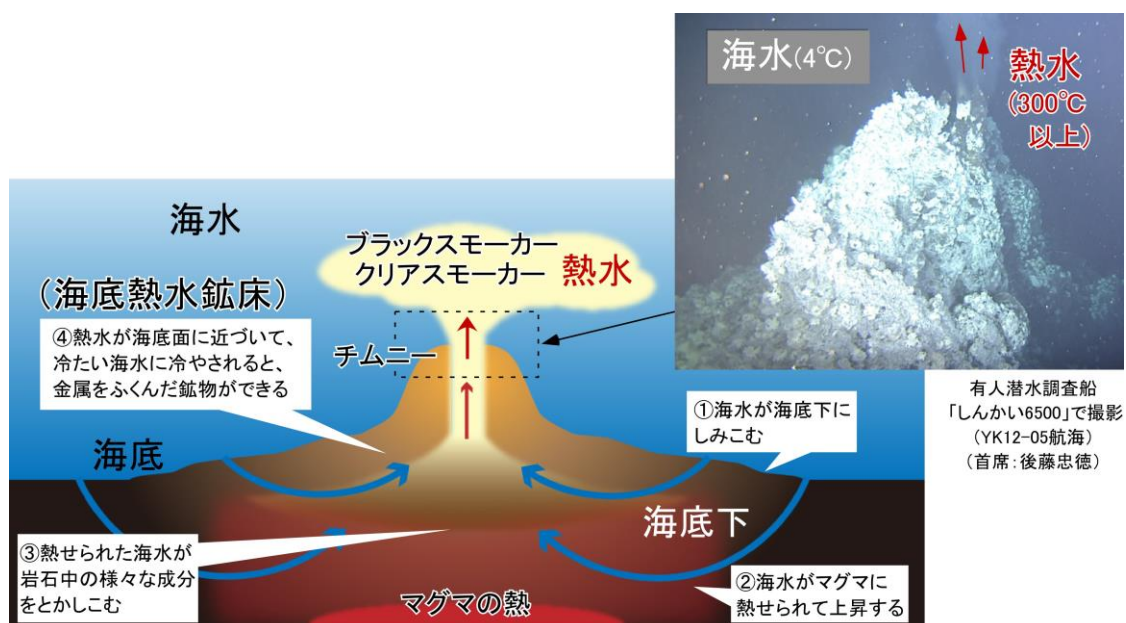


図 1. 海底熱水鉱床の形成メカニズムの模式図（写真は海底熱水噴出孔）右記ページの図に加筆

(www.jamstec.go.jp/j/kids/press_release/20120323/)。ただし、具体的なメカニズムは不明だった。

しかしながら、海底熱水鉱床は水深約 700m~2000m の深海の、さらに海底下に分布するため、鉱床の詳しい様子は解明されていません。これまでに世界各地で、海底掘削によって海底熱水鉱床の厚さなどが調査されてきましたが、海底掘削は高コストであり掘削地点数が限られます。さらに海底熱水地域の岩石は変質しているために、掘削を行っても岩石試料を取得できない場合が度々ありました。陸上の資源開発の知見から、金属資源の効率的な開発を行うためには、鉱床が成長するメカニズムの把握が重要ですが、海底熱水鉱床の詳細な分布・形状が分からないために、その形成メカニズムも不透明なままでした。

欧米諸国はそれぞれ、この未解決の科学的・技術的な問題に挑むために、電気信号を海底付近で送信して、海底下の電気の通りにくさを調べる探査技術（海底電気・電磁探査）を開発しました。実際に大西洋などで探査を行った結果、海底熱水鉱床は金属鉱物を多く含むために電気を通しやすい性質を持つことが明らかになっています。しかし、これらの先行研究では、海底下の地質構造の解像度は高くはなく、海底熱水鉱床の海底下の詳細な分布は未解明のままでした。これまでの海底掘削の結果から、海底熱水鉱床の形成メカニズムを議論するためには、海底下 50m 程度までの可探深度を有し、10m 間隔程度の解像度を有する、広域の海底探査技術が新たに必要でした。

2. 研究手法・成果

本共同研究チームは、海底下浅部を高い解像度で可視化する技術として、「海底電気探査」に注目しました（図 2）。これは非破壊探査（物理探査）技術の一つであり、海底付近で海水中に微弱な電流を流し、その時に発生する電圧信号を受信することで、海底下の電気の通りにくさの分布（比抵抗構造）を断面図として求める手法です。図 2 のように、電流送信装置と電流送信用・受信用の電極をひとまとめにして、深海を曳航することで、高効率で海底下を可視化することができます。このような技術はこれまでに存在しておらず、日本が独自に開発したものです。最初の曳航式海底電気探査装置は、2005 年に海洋研究開発機構によって開発され、日本海でのメタンハイドレート調査に用いられました。その後、文部科学省公募事業“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”などの支援のもと、京都大学・海洋研究開発機構によって汎用性と探査性能の大幅な向上がなされました。さらに地下構造の可視化のためのデータ逆解析（インバージョン）ソフトウェアについても、京都大学・兵庫県立大学とタイ国立マヒドン大学、カール E ジオフィジクス社が共同研究を行い、独自に開発しました。

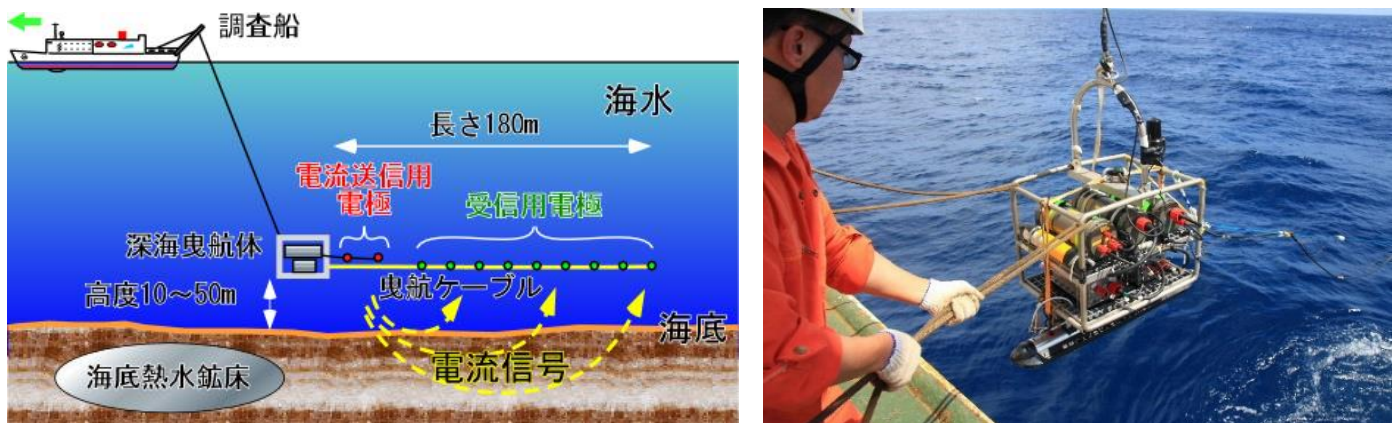


図 2. 海底電気探査の模式図（左）と実機（右）。深海曳航に電流送信装置を搭載し、その後方に電流送信・電圧受信用電極を多数曳航しながら、海底下の比抵抗構造を連続的にスキャンできる。

この海底電気探査システムを用いて、実際に海底熱水地域において探査を行ったところ、海底熱水鉱床の分布・形状を詳細に可視化することに成功しました。調査海域は海底火山が多数分布する沖縄トラフ（図 3）、実

施時期は 2014 年 10 月（海洋研究開発機構深海潜水調査船支援母船「よこすか」YK14-19 航海）です。海底電気探査による受信電圧信号や、超音波で測定した海底地形、海水の比抵抗などを用いて、海底下の比抵抗構造を解析したところ、図 4(a)のような断面図を得ることができました。特徴としては、1) 海底熱水噴出孔の周辺の海底面付近に電気をよく通す層（低比抵抗層）が分布しており（図 4(a)の CD1）、さらに海底下 40m 付近にも別の低比抵抗層（図 4(a)の CD2=CD1 よりも電気をよく通す層）が分布することが分かりました。これらは海水よりも電気を通しやすい岩層であり、金属鉱物を含む海底熱水鉱床である可能性が高いと考えられます。ただし、海底下の熱水も電気を通しやすい性質を持っているため、より定量的な検討が必要です。

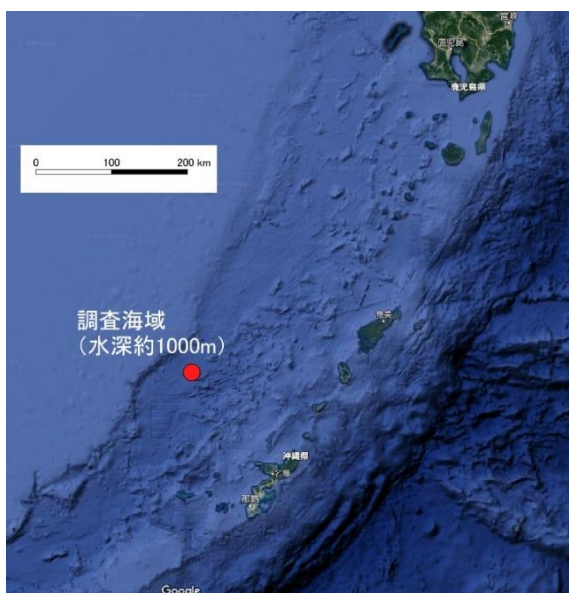


図 3. 海底電気探査の実施海域（赤丸）。水深約 1000m の海底熱水地域で実施。

(a)

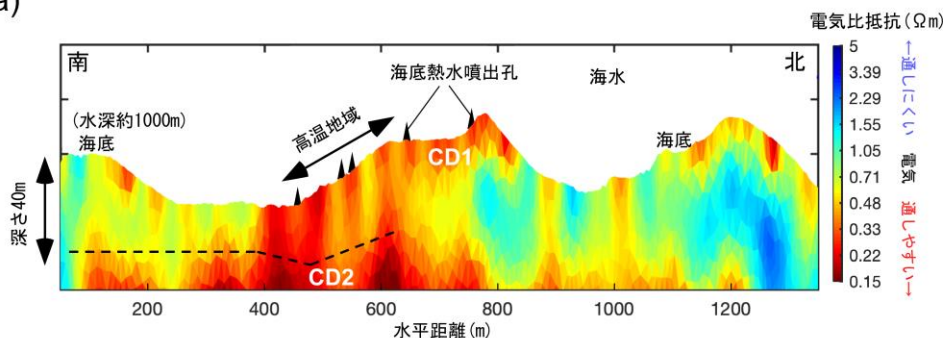
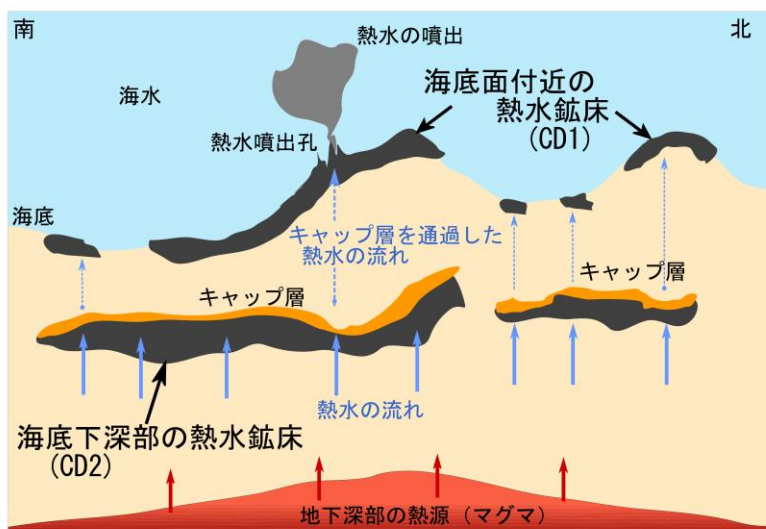


図 4.

(a) 本研究によって得られた、海底下の比抵抗構造
 (b) 比抵抗構造から推測された、「二階建て」の熱水鉱床の形成メカニズム

(b)



そこで、本共同研究チームは海洋研究開発機構有人潜水調査船「しんかい 6500」や同機構無人探査機「ハイパードルフィン」などを用いて、沖縄沖海底において岩石を採取し、比抵抗・金属鉱物含有量・密度・間隙率などを実験室で分析しました（図 5）。その結果、海底電気探査で発見した低比抵抗層は、熱水の影響のみで説明することはできず、電気を通す金属鉱物を 9%以上含む岩石からなることが明らかとなりました。この金属含有率は陸上の金属鉱床に匹敵する高さであり、海底下の低比抵抗層（CD1, CD2）は海底熱水鉱床であると結論づけられました。本研究では海底下で二層に分かれた海底熱水鉱床が発見されましたが、このような海底熱水鉱床の「二階建て構造」が詳細に可視化されたのは、世界初の快挙です。このうち深部の熱水鉱床（CD2）に関しては、音波を用いた海底下の構造調査（地震探査）でも同様の地下構造が確認されています（図 4(a)の点線：CD2 の直上に音波を跳ね返す「硬い」層が分布することが判明）。さらに海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」が実施した海底掘削の結果からは、CD2 の直上には石英や硬石膏を含む硬い層があることが分かりました。これらから、熱水鉱床 CD2 の上部には水を通しにくい層（キャップ層）が存在すると推測されます。本研究とは独立に、沖縄の別海域において石油天然ガス・金属鉱物資源機構が実施した海底掘削でも、同様の二層の海底熱水鉱床が一部で認められることから、このような「二階建て構造」は海底熱水鉱床において普遍的な構造であると思われます。

本共同研究チームは、海底下の比抵抗構造や地震探査・海底掘削調査に基づいて、海底下深部での金属資源濃集に関する新たなメカニズムを提案しました（図 4(b)）。まず地下深部で熱せられた地下水（海水）は熱水となり、海底面へと上昇を開始します。熱水は、水を通しにくいキャップ層の下に一旦蓄えられ、徐々に冷却されます。その間に海底下深部の熱水鉱床（CD2）が形成されます。熱水の一部はキャップ層を突き破り、海底面へと達しており、そこでも熱水鉱床（CD1）が形成されます。このような「二階建て」の海底熱水鉱床の形成メカニズムも、本研究によって世界で初めて提案されたものです。

3. 波及効果、今後の予定

本研究での特筆すべき社会的意義は、海底探査にかかる時間を大幅に短縮できる技術を確立した点です。図 4 の海底下の断面図を取得するために、海底電気探査の開始から終了までに必要となる時間はわずか 4 時間程度でした。我が国が独自に開発した本探査技術は、海底掘削に比べてはるかに短時間かつ広範囲の調査を可能にすることが、本研究で実証されました。このような新しい技術と海底掘削や海底での岩石採取を組み合わせることで、高効率・低コストでの海底下の可視化・解釈技術が実現可能となることを本研究は示しています。海底電気探査に関しては、すでに国内の民間企業も導入を始めており、今後の海底資源探査への幅広い適用が期待されます。

本研究によって、未解明であった海底熱水鉱床の成長モデルの検討が可能となりました。これは、どんな海底金属資源がどのように集まっているかを知るための「鍵」となる情報であり、将来的な熱水金属鉱床での資源開発において重要な知見となります。また、実際の海底資源開発時に不可欠となる資源賦存量（理論的に算出される潜在的存在量）の正確な推定においても、海底電気探査による海底熱水鉱床の可視化の貢献度は大きいと考えられます。本探査技術は日本近海における海底熱水鉱床の探査・開発を促進するものとなると期待されます。また世界各地には同様の海底熱水鉱床が分布しているため、本技術の海外輸出（日本発の海底資源開



図 5. 海底岩石試料の一例。直径 4cm。金属鉱物を多く含んでいる。

発) も将来的には可能となると考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

文部科学省公募事業「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」(平成 20~24 年度)(関連研究機関: 京都大学、海洋研究開発機構, 早稲田大学, 東海大学、産業技術総合研究所)

文部科学省公募事業「海洋資源利用促進技術開発プログラム 海洋鉱物資源広域探査システム開発」(平成 25~29 年度)(関連研究機関: 京都大学、海洋研究開発機構)

科学研究費補助金基盤研究(A)「大規模フラクチャーの強度・透水性を非破壊技術で把握できるか?」(平成 30~令和 3 年度予定)(関連研究機関: 兵庫県立大学、京都大学、大阪市立大学、高知大学、海洋研究開発機構、名古屋大学)

<用語解説>

濃集: 地層の形成やマグマの冷却、マグマによって熱せられた地下水の移動などによって、ある種の元素の量が局所的に、平均量以上に増加すること。この自然に起きる濃集過程によって、地下資源として利用可能な程度まで金属元素の濃度が高まった場所を「金属鉱床」と呼ぶ。

比抵抗・比抵抗構造: 物質中の電気の流れにくさを示す度合いを「比抵抗」と呼ぶ。この比抵抗の地下または海底下での分布の様子を「比抵抗構造」と呼ぶ。一般に、金属鉱物や水を含む岩体は、低い比抵抗を示す。

<研究者のコメント>

海底下の非破壊探査・岩石分析・海底掘削等の多様な手法を組み合わせることで、これまで不可能であった詳細な海底熱水鉱床の可視化に成功しました。本研究のような可視化技術を用いると、海底鉱物・石油天然ガス資源や、極限環境で生きる生命体などの研究が大きく進みます。無数のフロンティアの眠る深海底は、もはや縁遠い場所ではありません。今後も最先端の海底調査技術を開発していき、海や地球の謎に挑み続けたいと思います。

<論文タイトルと著者>

タイトル: Internal structure of a seafloor massive sulfide deposit by electrical resistivity tomography, Okinawa Trough (電気比抵抗トモグラフィ法による沖縄トラフ海底塊状硫化物鉱床の内部構造)

著者: Ishizu, K., Goto, T., Ohta, Y., Kasaya, T., Iwamoto, H., Vachirastienchai, C., Siripunvaraporn, W., Tsuji, T., Kumagai, H., and Koike, K.

掲載誌: Geophysical Research Letters

DOI: 10.1029/2019GL083749