

海底熱水域での金属資源の生成メカニズムを数値シミュレーションで解明

—日本発の海底資源開発の実現に向けて—

概要

近年の世界的な経済成長・人口増加により陸域の金属資源の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、その豊富な資源量から、近未来の金属資源として期待されています。しかし、開発の実現に重要である海底熱水鉱床の生成メカニズムは十分には明らかになっていませんでした。海底熱水鉱床の開発は陸上とは異なり調査が難しく、コストがかかるため、生成メカニズムの解明、およびそれを利用した効率的な調査・解析手法の確立が求められています。

そこで、京都大学大学院工学研究科 小池克明 教授・富田昇平 同研究科大学院生・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 鈴木勝彦 センター長らの共同研究グループは、鉱床生成に重要な役割を果たす高温流体の挙動を明らかにする「熱水流動シミュレーション」に着目し、次のような海底熱水鉱床の生成メカニズムを世界で初めて明らかにしました（図1）。

- ① 鉱床生成の初期: 海底面から噴出した熱水と海水の混合によって**海底面上**に鉱石の集合体（鉱体）が形成される。
- ② 鉱床生成の成熟期: 水を通しにくい「キャップ層」の形成により、熱水の側方流動が生じる。また、海底下への低温海水の流入が抑制され、熱水の温度が上昇して沸騰することによって**海底下**に鉱体が形成される。

これらのシミュレーション結果は、実際の海域観測データとよく一致しています。海底熱水鉱床の生成メカニズムと形成条件を明らかにした本研究結果は、調査候補地を絞り込み、効率的な調査を行う上での貢献が期待されます。本研究結果は、2020年10月13日に国際学術誌「Geophysical Research Letters」のオンライン版で公開されました。

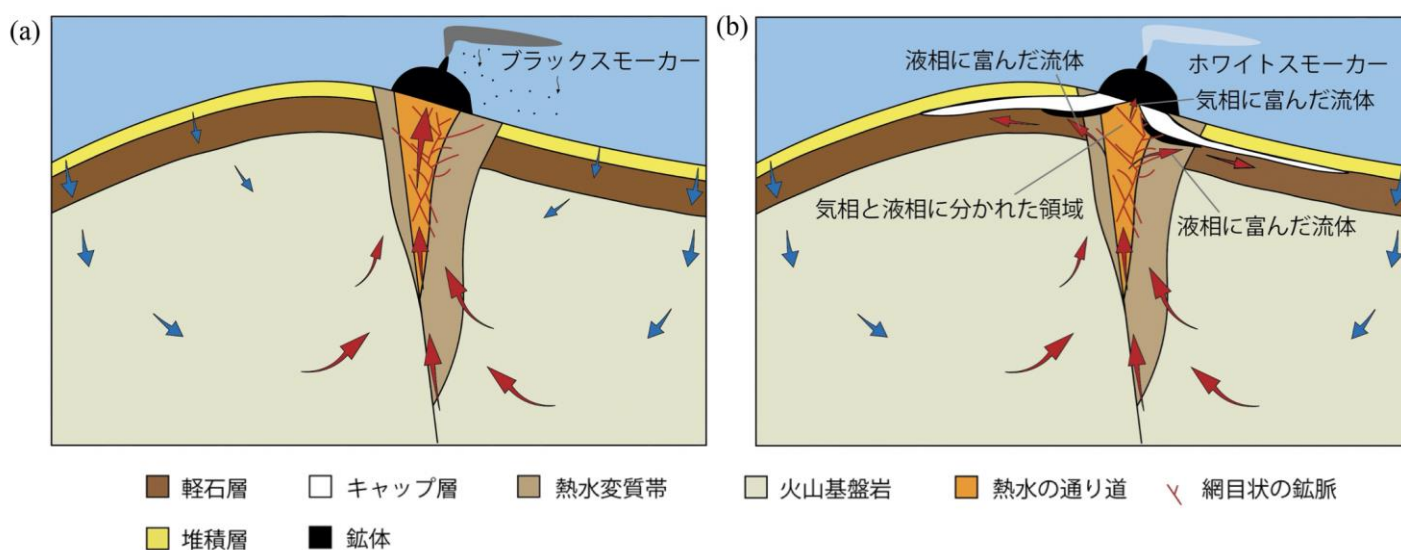


図1: 本研究で明らかとなった海底熱水鉱床の生成メカニズム（断面図）。(a)鉱床生成の初期、(b)鉱床生成の成熟期。ブラックスモーカー：金属成分を多量に含んだ流体、ホワイトスモーカー：金属成分に乏しい流体。

研究成果のポイント

- 近未来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、これまではっきりとは解明されていなかった生成メカニズムを熱水流動の観点から初めて解明した。
- 沖縄沖・海底熱水域の温度・地質データを基に、熱水流動シミュレーションを実施し、海底面付近の鉱体と海底下の鉱体それぞれに対する具体的かつダイナミックな形成メカニズムを解明した。
- 生成メカニズムを解明することにより、調査候補地の絞り込みが可能となり、効率的な探査の実現に貢献し、日本発の海底資源開発にはずみとなることが期待される。

1. 背景

金属資源は様々な用途で使用されており、私達の暮らしに欠かすことのできないものですが、世界的な経済成長・人口増加に伴い、ますます大きな需要が見込まれます。そのため多くの種類の金属資源に枯渇するリスクがある一方で、陸域の鉱床探査はますます深部化し、新規鉱床の発見が困難な状況になっています。日本は世界有数の金属消費大国であり、その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。

このような状況の中で、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、近未来の金属資源として注目されています。海底熱水鉱床は海底火山付近に分布しており、海底下でマグマによって温められた海水（熱水）に溶存して移動する金属元素が海底面周辺で沈殿してできたものです（図 2）。このような海底熱水域はこれまでに世界で 300 箇所以上発見されています。日本の領海・排他的経済水域内にも多数の海底熱水域の存在が知られており、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。

海底熱水鉱床の開発を実現するためには、科学的な成因論に基づいて調査候補地を絞り込む方法を確立することが重要です。これまでに、海底熱水鉱床の形成メカニズムに関して様々なモデルが提案されていますが、それらはいずれも解釈に基づく定性的なものでした。鉱床形成のために最も重要な役割を果たす熱水の挙動も、岩石の観察に基づいて推定されており、不確かなものでした。そのため、鉱床の生成を引き起こす具体的な条件やメカニズムは不透明なままでした。

2. 研究手法・成果

本共同研究チームは、海底下の熱水の挙動を明らかにする技術として、「熱水流動シミュレーション」に注目しました。鉱床生成を引き起こす熱水活動は非常に長期間（数万年程度）かつ広範囲（数 km 程度）にわたるため、物理条件と現象を正確に観測することは不可能であり、これらは熱水流動シミュレーションによってのみ明らかにできます。本研究では、観測データが豊富に存在する沖縄沖・海底熱水域（図 3）を対象に、実際に海底で測定された地中温度データとボーリングによる地質データを基に数値モデルを構築し、解析を行いました。

解析の結果、海底下の温度、熱水の流動形態、沸騰領域の解明に成功しました（図 4）。また、解析結果と現地観測結果を統合することで、以下に示すように、これまで明らかとなっていなかった海底面付近と海底下の二層に分かれた海底熱水鉱床の「二階建て構造」の形成メカニズムを解明できました（図 1）。

- 鉱床生成の初期：海底面から噴出した金属成分を多量に含む高温流体（ブラックスモーカー）が、海水と混合して急冷されることにより、海底面近くで鉱体が形成されます。
- 鉱床生成の成熟期：水を通しにくい「キャップ層」が海底面下の浅い部分に形成されます。その結果、

海底下への低温海水の流入が抑制され、熱水の温度が上昇して沸騰が生じます。沸騰により、気相に富み金属成分に乏しい熱水と、液相に富み金属成分を多量に含む熱水とに分かれます。気相に富んだ熱水は軽いため、海底面から「ホワイトスモーカー」として噴出しますが、液相に富んだ熱水は周囲の熱水よりも重いいため、側方に流動し、海底面下に鉱体が形成されます。

これまでに、詳細な地中温度データと地質データを基に海底熱水鉱床のモデルを構築した例はなく、本研究成果は、海底熱水鉱床の生成に重要な役割を果たす熱水の温度、流動形態、沸騰領域の分布を明らかにできた初めての例です。また、この海底熱水鉱床の「二階建て構造」の形成条件として、(i)低透水性の堆積層の存在、(ii)高透水性の軽石層の存在、(iii) 比較的浅い水深（日本近海海底熱水鉱床は水深 1000 m 程度にあり、鉱床生成に有利。世界的には 2000–3000 m 程度が一般的）、(iv) キャップ層の形成が重要であることが明らかとなりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の特筆すべき社会的意義は、海底熱水鉱床の生成メカニズムと形成条件を解明した点です。鉱床の成因を考える上で重要な過程として、次の三つがあげられます。(1) 元素の分別（どこから元素が集まってくるか）、(2) 元素の移動（どのような形で元素が鉱床に移動するのか）、(3) 元素の濃集（どのようなメカニズムで元素が濃集して鉱床生成に至るのか）。本研究では、このうちの元素の濃集メカニズムとその条件を明らかにできました。鉱床の生成メカニズムと形成に至る条件を明らかにできたことにより、そこから逆に、その条件を満たす場所を探索候補地として絞り込むことが可能となり、効率的な探索・開発に貢献できると期待できます。

今後は、熱水流動シミュレーションに化学反応を考慮することにより、鉱物沈殿プロセス、鉱床形成に至るまでに必要な時間スケールを解明し、これまで困難であった鉱床存在の可能性の高い領域の特定を目指します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「次世代海洋資源調査技術」(管理法人：海洋研究開発機構) によって実施されました。

<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、ある種の元素の濃度が局所的に、平均を大幅に超えて増加すること。この自然に生じる濃集過程により、地下資源として利用可能な程度まで金属元素濃度が高まった場所を「金属鉱床」と呼ぶ。

キャップ層：水やガスを通しにくい地層をキャップ層（キャップロック）という。地下水がマグマ溜まりに加熱されて熱水となり、この熱水が地表に向かうにしたがって温度が低下し、熱水中に溶け込んでいた成分が析出して周辺の岩石や堆積物の隙間を塞ぐことにより、難透水性のキャップ層を形成する。

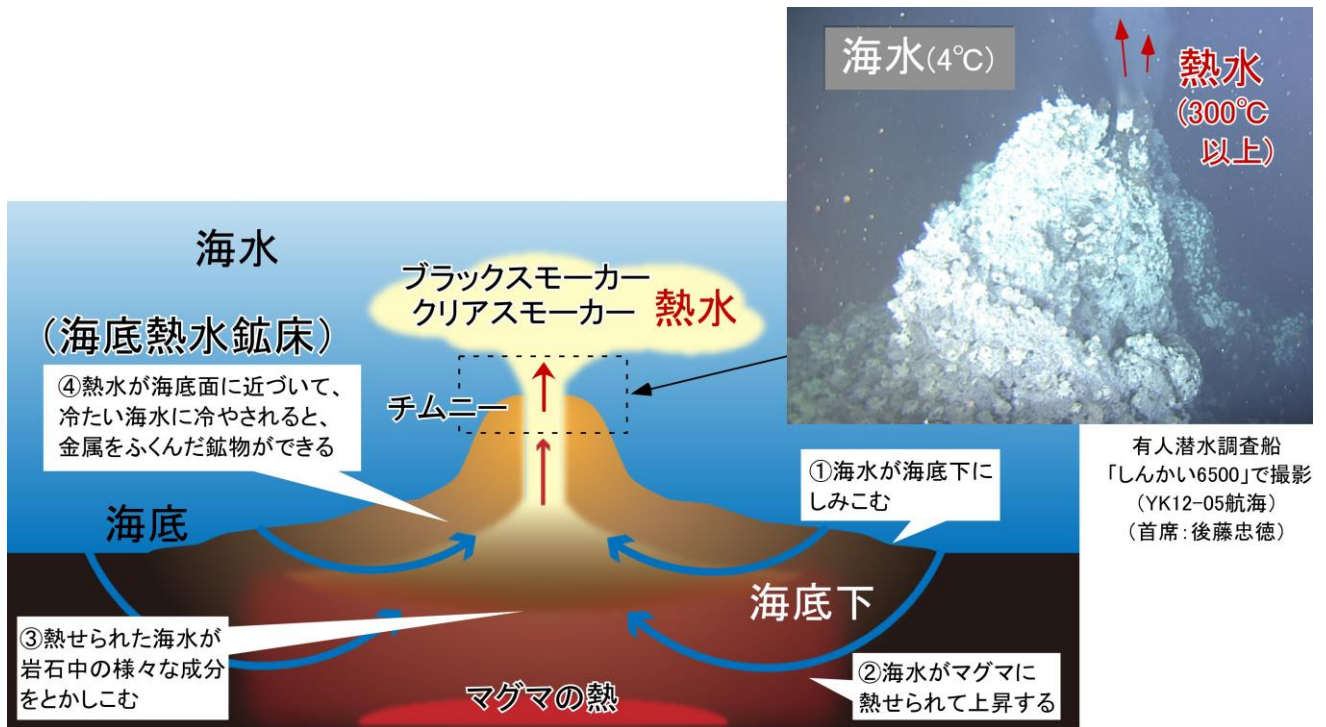


図 2. 海底熱水鉱床の生成メカニズムの模式図 (右上の写真は海底熱水噴出孔) 右記ページの図に加筆 (www.jamstec.go.jp/j/kids/press_release/20120323/). ただし、具体的なメカニズムは不確かであった。

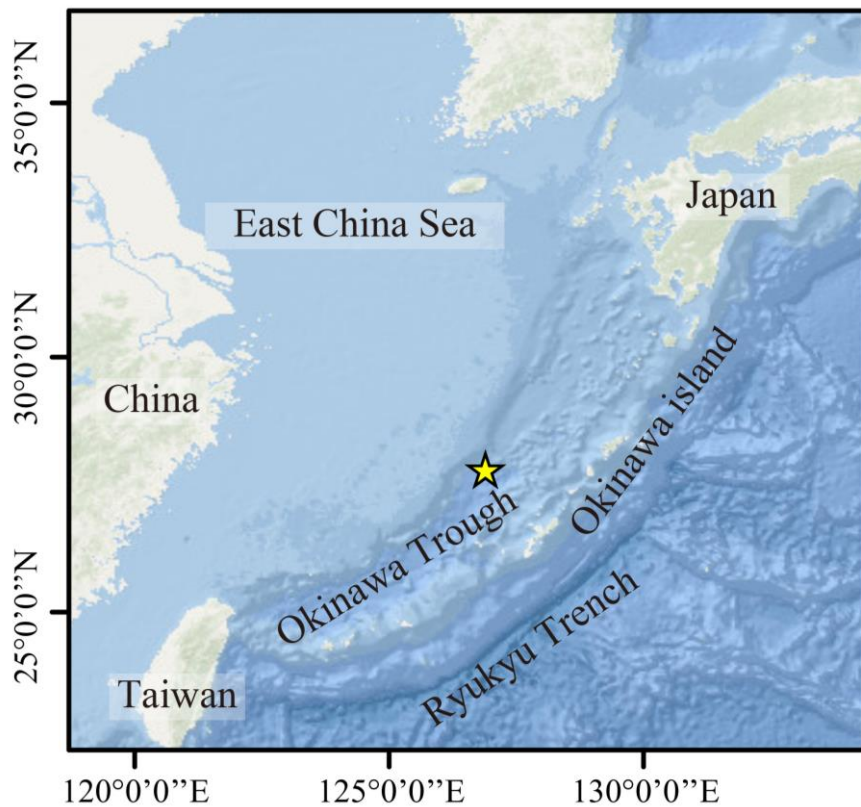


図 3. 本研究の対象領域 (星印)。水深約 1000m の海底熱水域を対象に熱水流動シミュレーションを実施。

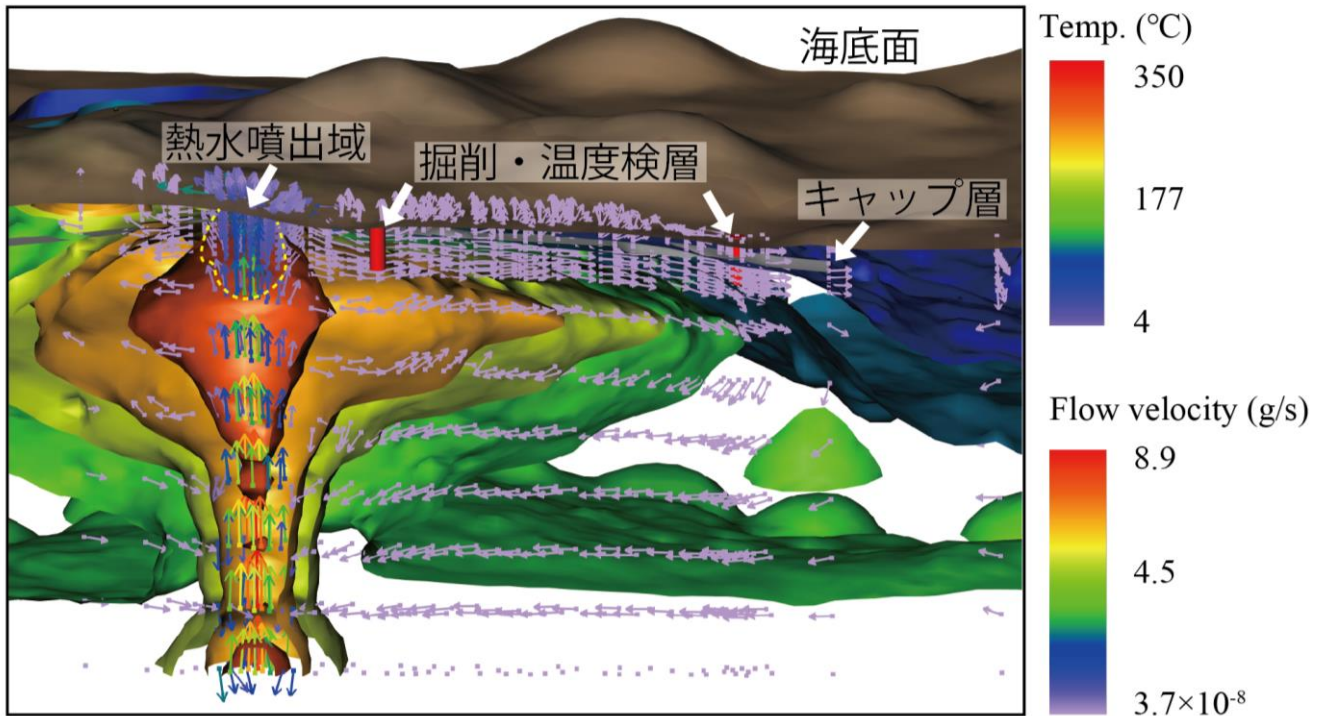


図 4. 本研究によって明らかにできた海底下の温度分布（等値面）と熱水流動形態（矢印）。図中の黄色の破線は沸騰領域を表す。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Numerical Simulation-Based Clarification of a Fluid-Flow System in a Seafloor Hydrothermal Vent Area in the Middle Okinawa Trough（数値シミュレーションによる中部沖縄トラフ海底熱水噴気域での流体流動システムの解明）

著者：Tomita, A. S., Koike, K., Goto, T., and Suzuki, K.

掲載誌：Geophysical Research Letters

DOI：10.1029/2020GL088681