

海の温泉が作り出す熱水鉱床：最新の研究成果と調査技術

鈴木勝彦¹⁾，渡慶次 聡¹⁾

(平成 28 年 11 月 29 日受付，平成 28 年 12 月 2 日受理)

Submarine Hydrothermal Ore Deposits Produced by Ocean Floor Hot Springs : Recent Research Results and Development of Exploration Technology

Katsuhiko SUZUKI¹⁾ and Satoshi TOKESHI¹⁾

1. 海の温泉 (熱水) から海底資源へ

日本温泉科学会第 69 回大会が開かれた庄川温泉郷もそのひとつであるが、環境省自然環境局によると、日本には 3000 を超える非常に多くの温泉がある。これは日本のような火山帯の特徴であり、火のあるところに煙 (温泉) があるというわけである。火山は陸上のみではなく、深い海の底にも存在する。そのため海底にも温泉が噴き出している。これを熱水と呼ぶ。そして後で述べるように、この熱水と海底鉱物資源とは密接な関係がある。

右の図は日本周辺の地図であるが、丸印で示しているのが主だった熱水活動である。

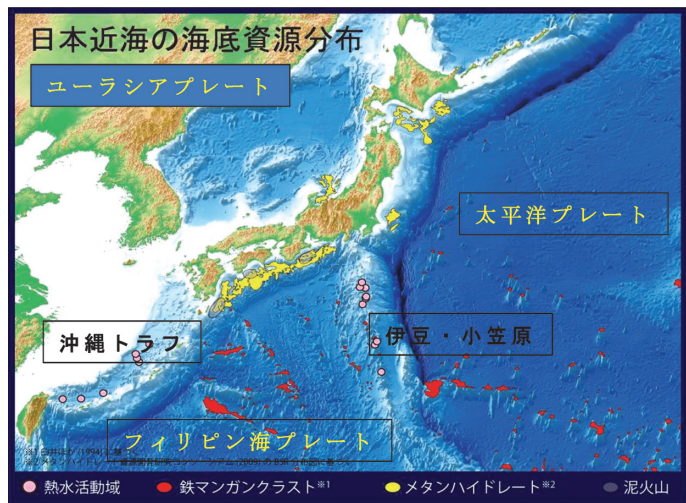


図 1 日本周辺の地形と海底資源

¹⁾ 海洋研究開発機構海底資源研究開発センター 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15. ¹⁾ Research and Development Center for Submarine Resources, 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061

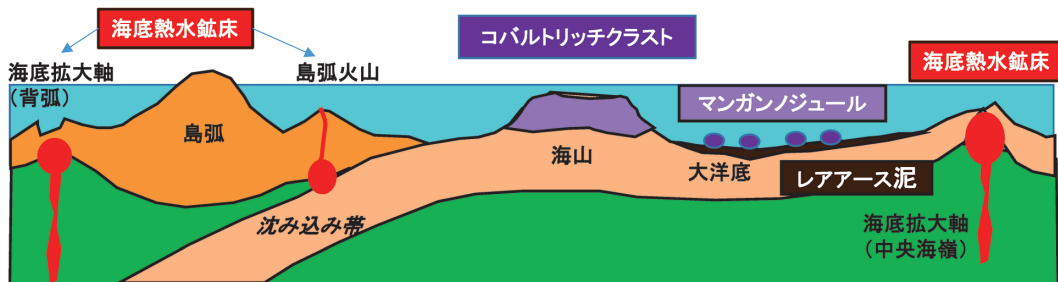


図 2 海底火山のできる地質環境

おもに沖縄周辺の沖縄トラフと呼ばれる海域と伊豆小笠原諸島には海底火山活動が見られ、そこでは活発な熱水活動が生じている。

そもそも日本の周辺で火山活動が多い理由を説明したい。地球の表面はプレートと言われる固い岩盤で覆われている。このプレートは何千 km 庭たる中央海嶺という海の大火山列で形成され、例えば右図の太平洋プレートの場合では、年間 8~9 cm ゆっくりと東から西へ移動し、日本の下に沈み込む。

火山は図 2 に示すようにプレートが沈み込む場所で、プレートから絞り出された水などの物質がマントルに吐き出される。この水などによってマントルが融けやすくなり、マグマができて火山となる。

海底火山のマグマは大量の熱を持っている。火山の周辺では地震などの地殻変動の影響で多くの割れ目(断層)が存在する。この割れ目を通じて比較的容易に海水がしみこんでくる。この海水がマグマの熱で熱せられ熱水となり、周囲の岩石と反応して金属(メタル)を溶かし出す。メタルを大量に含んだ熱水は海底下を移動し、海底下にいるまま温度が下がり、あるいは海底面から海水中に吹き出して海水と反応して、メタルを沈殿させる図 3。これが海底熱水鉱床である。

図 4 は、海底に形成された熱水噴出孔からブラックスモーカーというメタルを含んだ熱水が噴出している画像である。ブラックスモーカーは熱水が冷やされて様々な鉱物を沈殿させる。沖縄トラフ(図 1)の熱水の場合には、亜鉛、鉛、鉄の硫化物がメインで、これに銅の硫化物が加わる。微

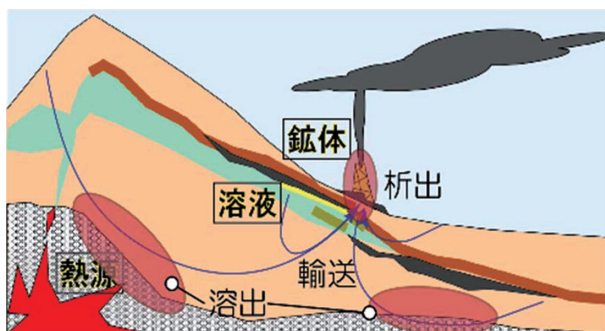


図 3 海底火山のできる地質環境と熱水鉱床ができるメカニズム¹⁾

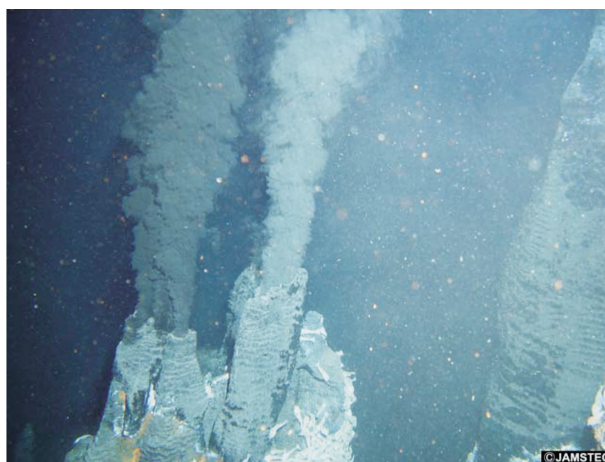


図 4 海底の熱水噴出孔とチムニー (提供: JAMSTEC)

量に金、銀などの貴金属も含まれる。沖縄トラフの熱水鉱床は、その形成メカニズムや構成鉱物などから、東北日本の黒鉱鉱床に非常に似ている。黒鉱鉱床は、日本海形成に伴って1500万年ほど前に日本海側で大規模に活動した海底火山で海底に形成された。それが堆積物に埋もれたまま、隆起して陸上に上がったものが黒鉱鉱床である。つまり、沖縄トラフの海底熱水鉱床は、現代版黒鉱鉱床と言ってよいものである。

2. 海底資源の最新の研究成果

レアメタルは、現在は陸上の鉱床から資源を採取しているが、陸上資源にも限りがあることが言われて久しい。一方、地球表面の面積の7割を占めている海に目を向けてみると、実は高品位の鉱物資源が大量にあることがわかってきている。例えば、カナダ Nautilus Minerals 社がパプアニューギニアの排他的経済水域内に鉱区を確保して開発を進めている Solwana 1 鉱床は、銅の品位が7%程度であり²⁾、現在掘っている陸上鉱床の10倍ほどの銅の品位である。また、2015年1月に、JOGMEC が発表した沖縄トラフ久米島沖の海底熱水鉱床には、銅の濃度が26%を超え、平均でも約13%であることが報告されている³⁾。

期待がますます高まる海底鉱物資源であるが、現時点において、商業開発に成功している海底鉱物資源はない。陸上の鉱床に比べて、海では調査にも、開発にも非常に大きなコストがかかる。陸上では、ヘリコプターを飛ばして物理探査を行い、ボーリングを数十本掘って、資源の賦存量を見積もり、環境影響評価とその長期的な計画を立てた上で、投資に見合うだけの利益が出ることが確認できたところで開発に進む。一方、海底では物理探査の手法は確立していない。ボーリングは、海底着座式の掘削装置か、海底掘削船が必要であり、その費用は陸上の数十倍である。1000mの深海では約100気圧にも及ぶ水圧がかかり、特殊な耐圧装置が必要となる。開発には動力が必要であるが、それを効率よく供給するシステムは未開発である。また、環境影響評価の標準的な手法も

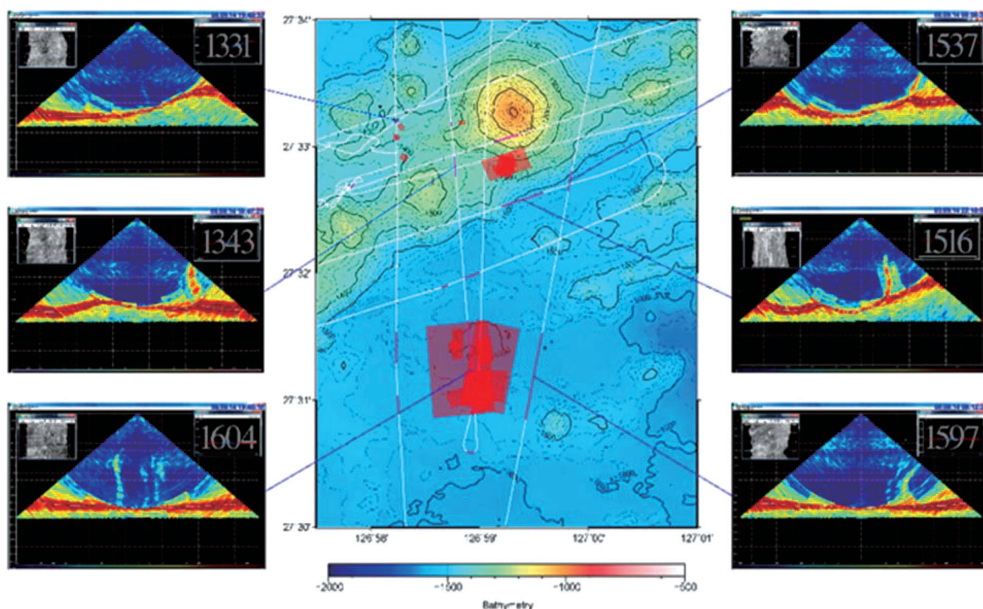


図5 音響によって熱水が上昇の様子をとらえる (Nakamura *et al.*, 2015) から転載⁴⁾

確立していない。

海洋研究開発機構では、海底からわき上がる温泉（熱水）を見つける手法の研究も行っている。熱水のあるところには、熱水鉱床が存在する可能性が高くなるため、まずは熱水活動を探すことが重要である。図5は船から発した音波が様々な物質で反射されて戻ってくるまでの時間を計測して、図示したものであり、海底までの物質の存在を知る。いわゆる魚群探知機も同様の原理である。図5の中央の図の濃い部分が熱水が噴き出している場所を示している。左下、あるいは、右の中、下の図には、この熱水が噴き出している個所を通過する際に、熱水が上昇しているのがはっきりと見えている。このように熱水の兆候が見えると、無人探査艇を用いて現場まで行き、熱水の吹き出しを確認する。そうして確認された熱水噴出孔からの熱水の吹き出しの例が図4に示されている。

さらに我々は、海底下の熱水の通り道と熱水鉱床形成過程を明らかにするために、地球深部探査船「ちきゅう」を用いて、海底下数百 m を掘削し、海底下の地質構造を調べている。海底下の試料を解析することによって、地下で起きている化学反応や物理プロセスを明らかにし、海底熱水鉱床が形成されるメカニズムに迫る予定である。

3. 調査技術の開発

先述のように、海底資源は探すにも、回収するにも、現状では大きなコストがかかる。そこで、2014年に、内閣府と総合科学技術・イノベーション会議が司令塔機能を果たし、戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program : SIP）10 課題（2016年3月時点で11課題）のうちのひとつとして「次世代海洋資源調査技術研究開発」別名「海のジバング計画」が始まった⁵⁾。海のジバング計画では、実施項目1「海洋資源の成因に関する科



図 6 海のジバング計画の全容の概念図

学的研究」, 実施項目2「海洋資源調査技術の開発」, 実施項目3「生態系調査・頂機関誌技術開発」の3つの課題を遂行している(図6)。詳しい実施内容はこのプロジェクトのホームページを参照されたい⁴⁾。SIPは府省をまたがった研究・技術開発によりイノベーションを引き起こし, 新たな産業の創出を目標としている。府省連携を旗印にしているだけに, 課題には海洋研究開発機構を実施項目1, 海洋資源の成因の科学的研究は, 海洋研究開発機構と産業技術総合研究所を中心に, 九州大学, 高知大学, 東京大学が公募課題として, 海底資源の生成プロセスの研究を研究して成因モデルを構築し, それを基にした調査技術の開発を進めている。対象としているのは, 海底資源のうち, 海底熱水鉱床, コバルトリッチクラスト, レアアース泥である。

海底熱水鉱床では図3に示すように, 鉱体だけを見るのではなく, 火山全体を1つのシステムとして捉え, そこで起きている化学反応・物理現象を明らかにする。ここでは, 熱源の実態と火成岩・熱水反応を明らかにし, 熱水循環の経路と反応を理解する。そして, 鉱液の物理化学条件を見出し, 鉱液からの有用メタル, レアメタルが熱水から析出・沈殿するメカニズムを知るとともに, 鉱床の時空分布を把握する。それによって, 海底熱水鉱床の成因モデルを構築する。海底下の鉱体の情報を得るために有効な電気・電磁探査にも力を入れている。硫化物の鉱体は, 非常に比抵抗が小さく, 様々な工夫を施し, 海底下100mくらいまでのデータが得られるようになっており, これによって実際に海底下の鉱体の様子を探る。

そしてこの課題によって得られた科学的研究は, すでに海底資源の開発を担ってきたJOGMECや民間会社との協力も欠かせない。次世代海洋資源調査技術研究開発課題が始まって, 海底資源の成因の科学的研究の重要性が広く認識されてきたと感じる。今後も研究を強力に推し進め, ローコスト, 高効率の調査技術の確立を目指して, 研究活動を行っている。

謝 辞

日本温泉科学会第69回大会(庄川温泉郷)の杉森賢司大会委員長には, 公開講演の機会をいただき, それが本稿の基となった。佐々木信行教授には, 本誌への執筆の機会をいただいた。本稿で記した研究に関しては, 海洋研究開発機構の海底資源成因研究の共同研究者を始め, 多くの共同研究者と行っているものである。これらの方々に感謝の意を示したい。本研究の一部は, 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: JAMSTEC), および, 科学研究費補助金・新学術領域研究(研究領域提案型, 計画研究, 課題番号15H05830)によって実施された。

引用文献

- 1) 石橋純一郎(2016)海底熱水鉱床能勢委員に関する現状の理解, 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」, p. 11-14.
- 2) Nautilus Minerals社のホームページ <http://www.nautilusminerals.com/irm/content/png.aspx?RID=258>
- 3) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)のプレスリリース http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000184.html
- 4) Nakamura, K., Kawagucci, S., Kitada, K., Kumagai, H., Takai, K. and Okino, K. (2015) Water column imaging with multibeam echo-sounding in the mid-Okinawa Trough: Implications for distribution of deep-sea hydrothermal vent sites and the cause of acoustic water column anomaly. *Geochemical Journal*, 49, 579-596.
- 5) 次世代海洋資源調査技術研究開発のホームページ <http://www.jamstec.go.jp/sip/>