

「資源を生み出す海」

— 海底はレアメタルの宝庫か？ —

高知大学理学部門教授 白井朗（地球科学コース）

1) 海と地球

最近の私たちの快適な生活は、辺境・極限の地から探索された大量の地球資源とエネルギーを消費することによって支えられています。したがって、多様な局面において、環境問題、地質災害、生物進化、資源開発など地球の活動と我々の生活との関連を身にしみて実感するようになりました。

なかでも海洋は「地球の窓」、「地球の血液」と例えられるように、地球表層環境を強く支配し、さらに地球内部の活動・構造などを目の当たりに観察できる重要な地球科学のフィールドです。たとえば、プレートテクトニクス実証の現場も、津波や地震を引き起こす地球の動きも、様々なスケールの気候変動も、そして生物進化も、海洋が関わっていると言ってよいでしょう。そして、これらは、言うまでもなく人類の生存、生活と強く関わっています。

2) 金属資源の枯渇

この度の講演では、“海”の多様な局面のなかでも、海洋が生み出す鉱物資源（特に金属資源）について共に考えてみたいと思いました。最近、特に2000年以降、国際政治、資源経済、起業などの分野において、海底鉱物資源が話題になっていることはご存知か

と思います。近年、世界的な消費増加によっていくつもの金属が不足気味となり、世界的な枯渇までも危惧されています。この状況は、一時的な高騰ではなく、世界規模の資源枯渇の前兆と捉えられています。この背景のなかで、海底の岩石や鉱物に濃縮されるレアメタル（＝希少な金属という意味の和製英語）に関心が集まっています。ここ数年は、海底鉱物資源への期待が過熱する様相が見られていて、マスコミ、政界、時に研究界においても、「未来の資源」「資源争奪戦」「メタルウォーズ」「救世主」「準国産資源」「商業化間近」「日本近海の巨大鉱床、新鉱床発見」なるキーワードが乱れていて、あたかも数年後に商業採掘が開始されるような報道も見受けられます。

3) 海底は宝の山？

では、海底の鉱物資源は本当に「すごい」のだろうか？陸上の鉱床を上まわるほど巨大で高品質なのか？陸には類のない特異な資源なのか？？？ 実は1960年代に始まる海洋研究の結果、鉱物資源は、偏在しつつも深海底に広く大量に分布することがすでに知られています。それでもなお、深海は未知の世界です。好奇心と夢を駆り立てられる世界ですが、その実像は必ずしも明瞭ではありません。この講演では、演者が参加した、潜水艇調査、探査ロボット探査、深海ボーリングなどの現場体験、実績を踏まえながら、海底のレアメタル資源研究の現状をお伝えしました。そしてその多様性、不思議さ、利用などについて地球科学の立場からその実態を共有していただけたかと思います。

私は「今のところ、資源探索、評価に足る十分な科学的実態が解明されている訳ではない」と考えています。近年の海洋調査技術の高度化はすさまじく、海底ロボット、リモセン、センサー、ドリリング、モニタリングなどの機器によって、より多く、速く、広く、詳しいデータやサンプルが得られるようになってきました。それでもなお、海底は広く未知、というのが実感です。著者「海底鉱物資源」（オーム社2010年）には、「海底資源開発には、国家百年の計と目の前の危機の双方を満たす必要がある」と書きました。敢えて、現状での個人的な結論を言えば、「ある種の海底資源は、陸上鉱石や鉱床の埋蔵量をしのぎ、且つその濃度は陸上に匹敵或いは上まわることは確実です。」しかし、ここで重要な仮定は“海水が存在しなかったならば”ということです。この仮定はかなり乱暴であり、実際には海水の存在が大変大きな壁になっています。

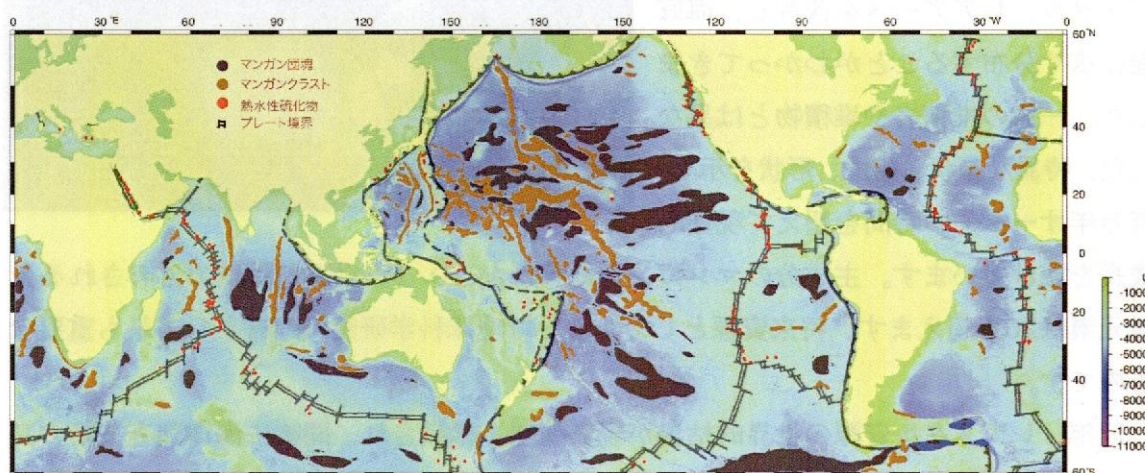
4) 海底資源も地質の産物

さて、海底近傍またはその直下に金属の濃集物、濃集帯が所々に認められます。これらは全て、堆積現象や火成活動が原因となって、特定の鉱物や元素が濃縮したものです。言い換えれば海底で生成した（また現在も生成しつつある）岩石や堆積物の1つです。つまり、多様な地質現象の産物の1つにすぎないと言えます。そのなかで、我々人類が産業的価値を見いだしている資源は、1) マンガンクラスト、2) マンガン団塊、3) 熱水性硫

化物の三つです。以下に、まず、その起源、生成プロセスの概要を整理しておきます。注意すべきことは、これらの資源は世界のどこでもどの国も、未だ商業開発に着手していない、ということです。石油、天然ガス、海底砂利とは大きく異なり、次世代の資源とすべきでしょう。

鉄・マンガン酸化物を構成物とするマンガン団塊、クラストは、鉱床成因タイプに当てはめれば「化学堆積鉱床」に相当します。その直接の起源は普通の海水です。もちろん究極の金属の起源は岩石風化や火山活動ですが、ともあれ直前は普通の海水中のごく小さな酸化物粒子であり、長い地質時代を経て海底に固定、沈積したものです。その成長速度つまり沈積の速さは非常に遅く、数千万年の長い地質時代にわたって連続的に成長してきたものです。

一方、海底熱水性硫化物は、陸上にある火山活動に伴う「火山起源塊状硫化物鉱床」に相当します。もちろん、媒体としての水の存在は重要ですが、熱水性硫化物は海底火山などの熱エネルギーによって地殻中で加熱された水が元素の抽出、移動、沈殿を引き起こしたものであり、岩石の分類から言えば火成岩に分類されるべきものです。



5) 生成中の海底資源：堆積起源と火山起源

ここで、海底鉱物資源のユニークさは、現在の海底において、現在の海洋環境に支配されながら形成中であるということです。鉄・マンガン酸化物も熱水性硫化物も、成長速度の差は大きいものの共に現世の生きた鉱床といえます。

陸の鉱床タイプとの比較において、類型(analogue)つまり同タイプはあるのか、あるいは地質時代の海洋においても生成していたのか、という課題があります。熱水性硫化物の類型は、秋田周辺などの黒鉱鉱床、四国の別子型鉱床など、陸上の熱水起源鉱脈鉱床として、類型鉱床が発見されています。海底活火山域には、陸上生態系とは独立した生物群と激しい海底熱水噴出現象が特徴です。金属沈殿物の濃集体（熱水性硫化物鉱床）がさまざまな海底で広く認められるようになり、いまでは決して珍しいものではなく、世

界のすべての海で発見されています。

一方で、マンガン団塊とマンガンクラストも同様に、世界の大洋底に広く分布していて、それらも現在も持続的に生成中であると考えられています。しかしそれらは、硫化物鉱床のように成長が観察できるほど速く成長しているわけではありません。海底のマンガン団塊やマンガンクラストに相当する鉱床タイプが陸上の鉄・マンガン鉱床の中にもあるのかという重要な課題に結論は出ていません。陸上に明白な種類の鉄・マンガン鉱床タイプは認められておらず、その起源、成因は、陸上の鉱床からの類推では解決できないため、おそらく海底の鉱床は独自に考えなければならないでしょう。

6) 海底マンガン鉱床各論

上記の三種の鉱物資源の中で、もっとも膨大な量と広い分布を示すのが、前二者の「海底マンガン鉱床」です。世界的な枯渇・不足が深刻とされるレアメタル、レアアースを含有し、海底面に広く分布することがわかってきました。一般の堆積岩や堆積物とは異なった、特異な産状、組成、形状を示し、百万年オーダーの時間を超えて現在も



成長を続けています。主成分のマンガンと鉄のほか、0.1%以上の濃度で含有される金属元素は20を超えます。将来資源としてあるいは地球科学研究の題材として最も重要なものです。

近年、レアメタル資源の世界的枯渇が現実問題と認識され、同時に海洋調査技術の高精度化・迅速化がすすんだため、海底マンガンクラスト・団塊、熱水性硫化物などへの関心が急激に高まっています。地質資源および研究対象としてその価値が再評価されています。探査、採掘・処理、環境影響予測の分野における技術開発が進展するものの、商業開発はまだ遠いと思われます。地球科学分野研究の貢献が大きく期待されています。

6.1 分布実態の解明

経済評価を主な目的とした組成・資源量（単位体積・面積当たりの金属量など）、分布、海域特性、偏在性・変動の特徴付けと周辺基礎データの充実を目指します。広域スケールの変化からサブミクロンまで、鉱床形態、組成の地域変化、個々の鉱床・鉱石について、様々なスケールでの変動を記載することが必要です。ほかに、船舶を用いた現場調査が不可欠であるため、大学、海洋研究開発機構(JAMSTEC)や石油天然ガス・金属資源機構(JOGMEC)などが所有する調査船・研究船を用いた航海を実施しています。広域的・局地的スケールの組成・分布量の変動、顕微鏡スケールまでの変動のパターンを

把握します。船上調査では、特殊な装備、新たな探査機器の開発など、先進技術が必要です。

6.2 有用金属元素の濃集プロセス解明

鉄・マンガン酸化物の強い吸着能力はよく知られていますが、水圏での両元素の挙動、元素濃縮の選択性、濃縮の鉱物化学的プロセス、元素の鉱物・化学形態、超低濃度の海水中での金属酸化あるいは濃縮促進メカニズムの詳細は不明で、実験的・理論的裏付けも不十分です。放射光などを用いたナノスケールの元素状態分析、レーザーアブレーション等による高感度・微小領域分析などが求められています。



6.3 古海洋環境の記録

重金属酸化物の中でも、露岩域を層状に成長するマンガンクラストは他に類を見ない変わった堆積岩です。クラストは非常にゆっくりと連続的に成長し、北西太平洋では少なくとも古第三紀から現世まで、海洋の広い水深帯において生成中と予想されています。海水を起源とする(hydrogenetic)クラストは百万年に10mm以下の極めて小さい速度で沈積するため、「一片のマンガン酸化物から数百万年間の環境変動記録復元」という斬新な着想が実現するかも知れません。過去には、年代測定法への疑問、普遍的分布の未確認、生成モデルの欠如等によって、研究が低迷した時期があります。筆者らは、Be同位体年代の検証(Usui et al., 2007)、微化石による複合年代推定、残留磁化反転の発見(Joshima and Usui, 1999)、超伝導磁気センサーによる磁気縞模様年代決定(Oda, Usui et al., 2011)などを踏まえて、マンガンクラストを海洋コアとして見直すことを提案し、その環境記録体としての検証を始めました。海洋環境変遷やイベントと、クラスト内部の組成・組織の微小スケール変動との対比を目指して、「マンガンクラスト微細層序学」を提唱しました。組成・構造の微細変化を環境変化のプロキシと位置付け、内部に認められる記録された長レンジ・低解像度の古海洋環境およびイベント記録の解析と復元を目指します。

6.4 マンガン鉱床形成と地球史・海洋変遷史

地球表層環境において、マンガンは、酸化・還元環境に強く影響をうけるため、最も移動しやすい重金属元素の1つです。例えば、地球史の中で、縞状鉄鉱層が生成した原生代と同じかそれ以降の時期に、大陸周辺に堆積起源の巨大層状マンガン鉱床(南ア、インド等)が形成されています。我が国の古生代〜中生代の付加体にも小規模の層状マンガン鉱床が広く見られますが、これらの生成には緑色岩にともなう熱水活動が大きな役割を果たしていると言われます。一方で新生代の海洋底は酸化物であるマンガンクラスト・団塊が海底を一面に覆っていて、特別に酸化的な環境と考えられます。四国中部

に広く分布する小規模の鉄・マンガン鉱床の起源を考察するには海底マンガン鉱床の形成プロセスも重要な手がかりになるかも知れません。

7) 今後の研究体制

最後に、2012年現在の研究体制を紹介します。高知大学の臼井研究室では、以下のような枠組みで海底鉱物資源の研究を実施中です。そしてこの研究は、学部生から卒論生、修士課程の院生3名、博士課程院生2名（2012. 11. 1現在）の若い学生達に支えられています。

- 高知大学：学内研究拠点プロジェクト「掘削コア科学による地球環境システム変動研究拠点」（リーダー池原実）海底資源研究グループ 2010－2014
- 共同研究：科学研究費助成事業（基盤研究C）「現世および新生代海洋におけるマンガングラストの形成環境」（代表者臼井朗） 2011－2013
- 海洋研究開発機構「海底資源研究プロジェクト」資源成因研究グループ（リーダー鈴木勝彦）との共同研究 2011－
- ほかに産業技術総合研究所（地質情報研究部門）や石油天然ガス・金属資源機構（JOGEMEC）との研究協力、海外では韓国地球科学資源研究院、米国地質調査所、ニュージーランド核科学研究所などとも協力関係を持っています。



8) 最近の実施した研究航海

- －2012年3月（7日間）淡青丸：マンガングラスト生成の時空変動と海洋環境／ドレッジ
- －2012年3月（17日間）なつしま：マンガングラストの音響センサーマッピングツール
- －2012年 月（14日間）なつしま：マンガングラストの組成変動と生成環境。

「遠隔探査機HyperDolphin3K」

- －2012年12月（8日間）なつしま：マンガングラストから読む海洋環境

「遠隔探査機HyperDolphin4. 5K」

- －2013年3月（7日間）低温熱水活動に伴うマンガン酸化物の沈着実験。

「遠隔探査機HyperDolphin3K」

以上の研究活動は高知大学理学部の多くの大学院生や卒論生にも支えられています。2012年5月現在、地球コースでは、博士課程2名、修士課程4名、卒業研究生3名が海底鉱物資源の研究を実施しています。さらに多くの方々が海底マンガン鉱床に興味を持ってくれることを期待します。