

# 1A01

## 海底鉱物資源開発と地球化学者の役割

○浦辺徹郎<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 東京大学名誉教授、SIP 次世代海洋資源調査技術プログラムディレクター)

海底鉱物資源開発の大きなうねりが世界規模で広がっており、それに伴う海洋環境評価もまた新たな学問分野として急速に展開している。日本でも、これまでの経済産業省/JOGMEC の「海底エネルギー鉱物資源開発計画」、文部科学省の「新基盤ツール」(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)に加えて、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の一つとして、「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)が省庁連携で開始された。

海のジパング計画には JAMSTEC, AIST, NMRI, PARI, NICT, NIES などの国立研究開発法人のほか、公募を通じて多くの大学、民間企業(J-MARE S, 海洋調査協会)が研究・技術開発に参画しつつある。計画は、海洋資源の成因に関する科学的研究、海洋資源調査技術の開発、および、生態系の実態調査と長期監視技術の開発、の3本柱よりなる。計画では出口戦略として海洋産業の創出を追求している。基礎研究であっても、その解析・分析ノウハウや、自ら開発した測定機器などを民間企業へ技術移転することが既に進んでいる。たとえば、物理化学センサー、現場分析装置、採水器、観測装置、物理探査システムなどである。このような動きの中で、産官学および国際的な研究連携が進むと同時に、国際政治の場でも海底資源開発に伴う環境保護に関して、各国が協調すべきとの提案がなされている。

一方、大学においても、これまでの東京大学の海洋アライアンス、横浜国立大学の総合的海洋教育・研究センターなどの既存の取り組みに加え、新たに東京海洋大学、九州大学、高知大学、神戸大学など幾つかの大学で、海洋資源開発や海洋管理に関する学部・組織が計画されている。一方で、研究者は自分の研究分野に対して保守的なことが多く、新たな動きに必ずしも対応できていない様な印象も受ける。

海底資源開発の実現は JOGMEC により平成 30 年代後半とされているが、それに向けてさまざまな努力が続けられていると同時に、関連企業のマインドが大きく変化してきており、海洋部門への進出が顕著になってきている。

海底資源の研究は、環境研究・生態系研究・モニタリングなど幅広い分野にも広がっており、今後とも世界的なニーズが広がっている。本講演では、このような社会的な状況の中で、地球化学者が果たすべき役割について広く論じる。

Development of seafloor mineral resources and the role of geochemists

\*T. Urabe<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Professor Emeritus, Univ of Tokyo, SIP “Jipangu-in-the-Ocean Project” Program Director)

# 1A02

## 沖縄トラフにおける海底熱水研究・調査

○熊谷英憲<sup>1</sup>、及川光弘<sup>2</sup>、南 宏樹<sup>2</sup>、中村謙太郎<sup>1,3</sup>、川口慎介<sup>1</sup>、北田数也<sup>1</sup>、宮崎淳一<sup>1</sup>、高井 研<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>海洋研究開発機構、<sup>2</sup>海上保安庁、<sup>3</sup>東大・工)

1970年代の発見以来、海底熱水活動は地球化学・地球生物学的に広く関心を集めてきた。さらに近年は、海底熱水噴出孔の周辺に溜まった硫化鉱物がベースメタルやレアメタル、貴金属の資源として注目されるようになってきている (e.g. Schrope, 2007)。このように海底熱水噴出孔の研究がますます重要性を増しているなか、沖縄トラフでの海底調査・熱水研究を概観すると、1) JOGMEC が行っている鉱物資源探査、2) 海上保安庁による大陸棚調査、3) 大学等による学術研究調査に大別することができる。経緯はともあれ、JAMSTEC による深海調査研究の枠組みで行われてきた研究もおおよそ3)のカテゴリに分類できるだろう。1)はもともと精力的になされてきたもので、伊是名海穴を中心に資源量把握を目的として深度数十mにおよぶ多数のボーリングによって海底下の詳細な地質情報を得ている。2)は熱水活動にのみ焦点が置かれたものではないが、あらゆる調査の基礎となるマルチビーム測深および反射法・屈折法による地下構造探査に加えて、AUV での超精細海底地形調査が行われるようになってきた。3)は九州大学・琉球大学・熊本大学・東京大学などを中心に、南部・中部・北部のそれぞれで活動的な熱水域に注目した調査が行われている。JAMSTEC では 1990年代のしんかい 2000 による伊平屋小海嶺・伊平屋北海丘・伊是名海穴での潜航等調査に始まり、2010年の統合国際深海掘削計画(IODP) 331次航海での伊平屋北海丘掘削、これを受けての2014年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による掘削同時検層を併用した掘削、これらに先立つ地下構造探査等を行ってきた。2010年代にはいり、AUV および船舶のマルチビーム測深による熱水プルームの可視化が一般化し、多くの機関が行うようになった。近年は、これらの調査・研究の相互協力が図られつつあり、久米島沖ごんどうサイトの発見・確認などに結実している。

### Studies and Exploration of Hydrothermal Activity in Okinawa Trough

\* Hidenori Kumagai<sup>1</sup>, Mitsuhiro Oikawa<sup>2</sup>, Hiroki Minami<sup>2</sup>, Kentaro Nakamura<sup>1,3</sup>, Shinsuke Kawagucci<sup>1</sup>, Kazuya Kitada<sup>1</sup>, Jun'ichi Miyazaki, and Ken Takai<sup>1</sup> (<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>JCG, <sup>3</sup>Faculty of Engineering Univ. Tokyo)

# 1A03

## マルチビーム音響測深機を用いた海底熱水噴出孔の探査：中部沖縄トラフを例として

○中村謙太郎<sup>1,2</sup>、川口慎介<sup>2</sup>、北田数也<sup>2</sup>、熊谷英憲<sup>2</sup>、高井研<sup>2</sup>、  
沖野郷子<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>東大・工、<sup>2</sup>海洋研究開発機構、<sup>3</sup>東大・大気海洋研)

海底熱水噴出孔は、地球化学的に極めて興味深い場所であるのはもちろん (例えば, German and Von Damm, 2003), 初期生命や地球外生命の実態を知る上でも重要な鍵となる場所として注目を集めている (例えば, Jannasch and Mottl, 1985). さらに近年, 海底熱水噴出孔の周辺に溜まった硫化鉱物が, Cu, Pb, Zn などのベースメタルや, In, Ga, Ge などのレアメタル, さらには Au, Ag などの貴金属の資源としても注目されるようになっている (Schrope, 2007). このような地球化学的, 生物学的, さらには鉱床学的な興味から, 海底熱水噴出孔の研究はますますその重要性を増している. 一方で, 水深 1km 以上の深海底に存在する熱水噴出孔という名の小さなスポットを探し出すことは, 現在の最先端技術をもってしても容易ではなく, 海底熱水系の研究を進展されるためにより効率的な熱水探査手法が常に求められている (German et al., 2008; Nakamura et al., 2013). 本研究では, 近年その利用が拡大しているマルチビーム音響測深機によるウォーターカラムの観測 (Colbo et al., 2014) を用いて, 中部沖縄トラフにおいて海底熱水噴出孔のマッピングを行った. その結果, 以下のことが明らかとなった.

- (1) 中部沖縄トラフの調査エリアにおいて, 既知の熱水噴出サイトを含む 10ヶ所でウォーターカラムに音響異常を検知した.
- (2) マルチビーム音響測深機で検出された音響異常は, ほとんど幅を変えることなく海底から 500~1000m 上昇し, 熱水サイトの水深に関わらず深度約 500m の地点で消滅することがわかった. 音響異常のこのような形態的特徴から, 異常は熱水そのものを捉えたものではなく, 熱水とともに噴出している二酸化炭素の液滴を捉えている可能性が高いことが明らかとなった.
- (3) 熱水噴出サイトは, 2~3 サイトをひとまとまりとする熱水フィールドを形成しており, 調査範囲全体では既知の伊平屋北フィールドと伊是名海穴フィールドを含む 4つの熱水フィールドが存在することが明らかとなった.

Mapping deep-sea hydrothermal vent sites with multibeam echo-sounding (MBES): An example from the mid-Okinawa Trough

\* Kentaro Nakamura<sup>1,2</sup>, Shinsuke Kawagucci<sup>2</sup>, Kazuya Kitada<sup>2</sup>, Hidenori Kumagai<sup>2</sup>, Ken Takai<sup>2</sup>, and Kyoko Okino<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>AORI)

# 1A04

## 沖縄トラフ海底熱水中の Li 同位体比から導かれた海底下における固相側の情報について

○土岐知弘<sup>1</sup>、平敷紗和子<sup>1,2</sup>、新城竜一<sup>1</sup>、石橋純一郎<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>琉球大学理学部、<sup>2</sup>九州大学理学部)

海底熱水は、海水中のさまざまな元素の物質収支や新しく形成される海洋地殻の化学組成にとって大変重要である。熱水の化学組成は幅広いバリエーションがあり、それらは主に気液分離や水-岩石相互作用の影響による。しかし、堆積物に厚く覆われている海底熱水系においては、熱水の化学組成は堆積物との相互作用も起きていると考えられる。また、堆積物中においては、金属硫化物を形成し、硫化物鉱床を形成することによる影響も考えられる。リチウムは、100°C 以上において玄武岩と堆積物が反応する際に流体に移動しやすいために、水-岩石相互作用を調べる上で大変感度のよいトレーサーである。沖縄トラフの海底熱水は、中央海嶺の海底熱水よりもリチウム濃度が高いことが報告されているが、その起源についてはほとんど議論されていない。本研究では、堆積物に覆われた沖縄トラフの海底熱水のリチウム同位体比を調べ、海底熱水における火山岩及び堆積物の影響を明らかにした。

熱水試料は、伊平屋北海丘、伊是名海穴、鳩間海丘、第四与那国海丘から採取した。試料採取には、複数の採水器を搭載した Hyper Dolphin やしんかい 6500 (JAMSTEC) を用いた。試料は、船上においてろ過し、硝酸を添加して持ち帰った。試料中のリチウムは、 $\text{HNO}_3/\text{CH}_3\text{OH}$  を溶離液に用いたカラム分離によって単離し、マルチコレクタ型誘導結合プラズマ質量分析計 (Thermo Fisher Scientific 製, Neptune Plus) を用いてリチウム同位体比を測定した。リチウム同位体比は、標準試料 L-SVEC に対するずれを、千分率で表記した。

沖縄トラフの熱水系のリチウムは著しく濃度が高く、同位体比は低い。リチウムの供給源としては、堆積物あるいは島弧性の火山岩が考えられる。熱水中のリチウムが、岩石からの溶出と二次鉱物の沈殿によってコントロールされていることを考慮したモデルを用いて反応した固相を推定すると、堆積物と反応した度合の違いで各海底熱水系間の同位体比の差が生じていると考えられた。海底熱水系ごとのメタンの炭素同位体比とリチウム同位体比の相関は悪く、リチウムとメタンの供給源の温度帯の分布の違いを示している可能性もある。一方で、リチウム同位体比とリチウム濃度から導かれた岩石に対する水の質量比 (W/R 比) は、メタンの炭素同位体比とよい相関を示した。このことから、W/R 比が固液反応の度合いを示す目安になると考えられる。また、得られた相関からは、メタンの炭素同位体比を用いて、微生物起源のメタンと熱分解起源のメタンの寄与率の大きさから、涵養域における微生物起源のメタンの寄与と反応域における熱分解起源のメタンの寄与とを模式化した MMR (Microbial Methane in Recharge zone) モデルの実効性がさらに裏付けられたと言える。

Solid phase below the seafloor estimated from Li isotope ratio in hydrothermal fluids from Okinawa Trough

\*T. Toki<sup>1</sup>, S. Heshiki<sup>1,2</sup>, R. Shinjo<sup>1</sup>, and J. Ishibashi<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Univ. Ryukyus, <sup>2</sup>Kyushu Univ.)

# 1A05

## 沖縄トラフ伊平屋北海丘の人工熱水孔を利用した黒鉛養殖プロジェクト

○野崎達生<sup>1,2</sup>・石橋純一郎<sup>3</sup>・島田和彦<sup>3</sup>・長瀬敏郎<sup>4</sup>・高谷雄太郎<sup>5,1,2</sup>・加藤泰浩<sup>2,1</sup>・川口慎介<sup>1</sup>・和辻智郎<sup>1</sup>・渋谷岳造<sup>1</sup>・山田亮一<sup>6</sup>、猿橋具和<sup>1</sup>・許正憲<sup>1</sup>・高井研<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>海洋研究開発機構, <sup>2</sup>東大・工, <sup>3</sup>九大・理, <sup>4</sup>東北大・総博, <sup>5</sup>早大・創造理工, <sup>6</sup>東北大・工)

2010年9~10月に伊平屋北海丘で行われたIODP Exp. 331において、複数の人工熱水孔が形成された。その後、掘削孔の経過観察を目的とした潜航調査が複数回実施され、Hole C0016Aでは25ヶ月で高さ15mにチムニーが急成長しており、熱水・生物・チムニーが採取されている。本研究では、これらのチムニーの記載・化学分析を行い、その生成機構や地球化学的特徴を明らかにする。また、JAMSTECで遂行中である人工熱水孔を利用した黒鉛養殖プロジェクトについても紹介する。

硫酸塩鉛物に富む部分は主に硬石膏と石膏から構成され、閃亜鉛鉛、方鉛鉛、黄銅鉛、硫酸鉛、ZnSO<sub>4</sub>鉛物、滑石を伴う。硫酸塩鉛物はしばしば硫化鉛物に置換されており、閃亜鉛鉛と方鉛鉛はしばしば樹枝状組織を示す。硫化鉛物に富む部分は、主に樹枝状組織を示す黄銅鉛、閃亜鉛鉛(±ウルツ鉛)から構成され、その間を方鉛鉛、少量の硫酸鉛鉛、硬石膏、重晶石、滑石、非晶質シリカが充填している。試料の外側には硫酸塩鉛物の溶解による空隙が存在し、硫化鉛物の仮晶や硫酸鉛鉛、ZnSO<sub>4</sub>鉛物、非晶質シリカに充填されている。硫化鉛物に富む部分の最外部では、Asを含む針状黄鉄鉛やPb-As-Ag-Sb-Cu(±Mn±Zn)に富む部分と互層した球状黄鉄鉛が認められる。

硫化鉛物に富む部分の全岩化学組成は、平均で4.5 wt% Cu, 6.9 wt% Pb, 30.3 wt% Zn, 8.7 wt% Feを含み、数百ppmのAg, Cd, Sb, Ba, Bi, 1.35 ppm Auを伴う。人工熱水孔上に生成したチムニーは脈石鉛物の割合が少なく、製錬の際にペナルティの対象となるAs, Sb濃度が高くないため、高品位の硫化鉛物である。陸上黒鉛鉛床では極めてまれな硫化鉛物の樹枝状組織や累帯構造を示す球状黄鉄鉛、ウルツ鉛が普遍的に観察されるが、これらは陸上の地質記録として残りにくい特徴であると考えられ、人工熱水孔上のチムニーは黒鉛鉛床の初期生成過程を観察するのに適している。

人工熱水孔上のチムニー急成長とその品位から、JAMSTECでは黒鉛養殖プロジェクトを進めている。次の沖縄トラフ掘削航海において、ケーシングパイプを敷設したガイドベースに3つの熱水排出口を備えた分岐管を設置し、熱水の温度・圧力・流量および沈澱物の重量変化を計測するセンサー・ロードセルを備えた養殖セルを設置予定である。初年度はROVで設置・回収可能な小型セルから試みるが、将来的には大型セル設置を目指す。本プロジェクトにより、熱水Fluxや溶存元素濃度などの基礎的情報が得られ、人工熱水孔による現場実験プラットフォームになることが期待される。

Kuroko cultivation project using an artificial hydrothermal vent in the Iheya-North Knoll, Okinawa Trough  
\*Nozaki, T.<sup>1,2</sup>, Ishibashi, J.-I.<sup>3</sup>, Shimada, K.<sup>3</sup>, Nagase, T.<sup>4</sup>, Takaya, Y.<sup>5,1,2</sup>, Kato, Y.<sup>2,1</sup>, Kawagucci, S.<sup>1</sup>, Watsuji, T.<sup>1</sup>, Shibuya, T.<sup>1</sup>, Yamada, R.<sup>4</sup>, Saruhashi, T.<sup>1</sup>, Kyo, M.<sup>1</sup> and Takai, K.<sup>1</sup> (<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Kyushu Univ., <sup>4</sup>Tohoku Univ., <sup>5</sup>Waseda Univ.)

# 1A06

(Invited)

## 黒鉱鉱床の多様性と熱水循環系の規模

○山田亮一

(東北大学大学院理学研究科)

黒鉱鉱床は、平林(1908, 1911)によって初めて定義され、全国 43 ヶ所の黒鉱鉱山が紹介された。その後、木下(1944)、堀越(1960)らによって、成因的に類似するものとして黒鉱式(型)鉱床が定義され、40 鉱山が追加された。昭和 30 年代の「黒鉱ブーム」によって黒鉱の経済的価値が高まると、やや拡大解釈が行われ、地層と調和的な鉱脈や湖底で形成された硫化物レイヤー、あるいは、黄鉄鉱染帯、石膏や重晶石を伴う全ての網状鉱床までが黒鉱タイプとされ、181 鉱山がリストアップされた(MITI, 2001)。近年、海底熱水鉱床の知見が増大するとともに、黒鉱鉱床との類似性が注目されることとなったが、その議論の前提となる「黒鉱鉱床の定義」が必ずしも研究者間で共有されていない。本講演では、初めに、黒鉱(式)鉱床の多様性と、胚胎場や形成期の相違を紹介したい。

「黒鉱および黒鉱式鉱床」のほぼ全ての鉱床は、日本海の拡大に伴う背弧海盆のテクトニクスにあり、背弧海盆の形成に引き続く背弧リフト期から、島弧火山活動に至る転換点に形成されている。この結果、黒鉱ベルト(井上, 1969)と称される南北に帯状のリフト構造場に集中し、およそ 14-15 Ma 前のほぼ同時期に形成されたものとされている(Terakado, 2001; Takaya et al, 2015)。このリフト帯において、南北に 100 km 程度の間隔において、鉱量 100 万トンを超える複数の黒鉱鉱床が集中する場(クラスタ)があり、クラスタ間には、10 万トン未満の小規模鉱床や黒鉱式の石膏や重晶石鉱床が胚胎する。背弧拡大に伴い、火山活動の様式も変遷し、不適合元素の乏しい MORB 類似の玄武岩から、背弧リフト期には、Zr, Nb が増加した背弧海盆玄武岩の場となり、徐々に珪長質火山岩の割合を増大して、黒鉱鉱床を胚胎するリフト帯(黒鉱リフト)では、珪長質岩の卓越するバイモーダル火山活動となる。Nd-Sr 同位体や不適合元素の変遷から、黒鉱形成場におけるバイモーダル火山活動は、マントル由来の玄武岩と地殻との連続的な相互作用で進化した玄武岩質親マグマから派生したものと説明できる(Yamada et al, 2012)。この結果、黒鉱鉱床と密接に関連する火山活動は、Nd-Sr 同位体比や Zr-Nb-Y 比に関して、ある一定の組成を持つ岩体として識別できる。

最も鉱床の密集する北鹿地域の黒鉱クラスタを例にとれば、南北性のリフト境界と左横ずれセンスを持つ東西系断層で境された「斜め阿弥陀くじ」形状をした一辺 30 km 程度の方角を呈し、10 個以上の大規模鉱床と 5 か所の小規模鉱床および複数の石膏鉱床や網状重晶石などから構成される。これらの多くは、直径 20 km 程度の環状構造に沿って胚胎し、環状線上において、相互に 5 km 程度離れて等間隔に分布する。この規則性は、黒鉱鉱床下盤を構成する珪長質岩(流紋岩やデイサイト)のうち、ある特定の岩相を持つ流紋岩、即ち、石英斑晶を伴わない流紋岩の活動单元(火山岩ノル)と密接に関連する。Nd-Sr や鉛の同位体およびレアアース元素のパターンから、この流紋岩は、高

温を維持したまま浅所に上昇して、大規模な海水循環を伴い、地殻との物質循環が充分に行われた特徴を有する。少なくとも北鹿地域とその南北延長に相当する非クラスタ領域とを比較すると、バイモーダル流紋岩の活動規模と、鉱床の規模や集積度に明確な相関が認められる。

環状線上に配列する個々の黒鉱鉱床群は、最大の花岡一釈迦内鉱床群で  $2 \times 4$  km 程度、比較的小規模な深沢鉱床群や餌釣鉱床群では  $1 \times 2$  km 程度の規模を持つ。花岡一釈迦内鉱床群は、20 個の単位鉱床から構成され、鉱床群中央部から周辺部へと、黄鉱卓越型→黄鉱・黒鉱累帯型→黒鉱単独型→石膏単独型の累帯があり、各々の累帯には、100-200 万トン程度の単位鉱床が複数個集合する。最大の松峰鉱床では、上下に3層の鉱床層準が識別され、同一の鉱化センターから複数回の鉱化作用が行われた証拠がある。鉱化センターは、相互に 300 m 程度離れた3列の珪化帯列があり、その列上には、150-200 m 間隔で網状脈や鉱染帯（珪鉱）を伴う顕著な珪化ドームが存在し、その上位や側面に層状鉱床を伴う。このことから、単位熱水循環系の規模は、200-300 m 程度と考えられ、数 10 万トン規模の単位鉱化帯が複数個集合して数 100 万トン規模の鉱体群を形成し、さらにそれらが、複数回行われたことで、1,000 万トン規模にまで発達したものと推定される。松峰鉱床における最上位の鉱体や花岡鉱床群の衛星鉱床では、「獅子の目」とか「虎の目」とか称される黄銅鉱—黄鉄鉱のリング構造が知られており、海底熱水鉱床のチムニー片あるいは枝チムニーに相当すると考えられる。チムニー片が見られるような原組織を比較的残している鉱体では、中空の魚卵状黄鉄鉱やフランボイダル黄鉄鉱が認められ、一部に磁性が存在する。未だ磁性の原因が十分に解明できていないが、グレイジャイト中心核の可能性も示唆される。一方、深沢鉱床のように独立した鉱床では、 $1.5 \times 2$  km の範囲に、デイサイトドームに囲まれた幅 500 m 程度の溝状地形があり、その地形低所を埋めるように 11 個の単位鉱体が分布する。これらは、幾つか集合した鉱体群を構成しており、中央部の鉱体には、黄銅鉱網状細脈からなる珪化帯、周辺部の鉱体には、黒鉱質の網状脈や鉱染帯を伴い、その間には級化構造を持つ黒鉱や凝灰岩薄層を挟在する異地性(distal)黒鉱が分布する。珪鉱や鉱染帯を独立した鉱化センターとした場合には、熱水循環系は 100-150 m、鉱体群を単位とした場合には、600-800 m。最小単位の熱水循環系で珪鉱を含めて 40-50 万トンの鉱量があり、鉱体群単位では、150 万トン程度、これが 4-5 ヶ所集合して、500 万トン規模の鉱床を形成している。

北鹿地域のほぼ全ての鉱床に、強変質帯にありながら変質の著しく弱い珪長質岩体があり、グリーンデイサイトと呼ばれている。白色流紋岩に対してデイサイトとしているが実体はよく判らない。方解石や赤鉄鉱に鉱染することから、熱水循環系の Recharge 帯で形成された可能性が高い。上盤泥岩の層厚を規制しており、黒鉱形成時の海底地形を反映していると考えられる。比高 50-80 m のドーム群として鉱床を取り巻いており、埋没した海底熱水鉱床の有効な探査指標になるかもしれない。

Variety of Kuroko deposits and several dimensions of the hydrothermal system

Ryoichi Yamada (Tohoku Univ.)

# 1A07

## 秋田県北鹿地域にみられる鉄・マンガンに富む化学堆積岩の鉄同位体比の特徴と黒鉱鉱床との関係性

○ 大竹翼<sup>1</sup>, 鈴木陵平<sup>1</sup>, 山田亮一<sup>2</sup>, 申基澈<sup>3</sup>, 昆慶明<sup>4</sup>, 佐藤努<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北大院工, <sup>2</sup> 東北大院理, <sup>3</sup> 地球研・CRP, <sup>4</sup> 産総研)

秋田県北鹿地域にみられる黒鉱鉱床は、日本海形成後の海底火山活動により形成した塊状硫化物鉱床である。主に硫化物から構成される黒鉱鉱床の形成・保存には海底カルデラの形成とカルデラ中の海水の非酸化的環境が重要な要因であった可能性があるが、地球化学的な証拠は得られていない。本研究の目的は、黒鉱鉱床の周辺部に産する熱水由来と考えられる鉄やマンガンに富む化学堆積岩を採集し、これらの地球化学的な特徴、特に鉄安定同位体比を用いて、当時の北鹿海盆における酸化還元環境や海底熱水活動と大規模黒鉱鉱床の形成要因との関係性を明らかにすることである。採集試料は、北鹿地域の露頭および鉱山から得られた黒鉱中の鉄酸化物相、黒鉱直上の鉄石英、マンガンに富む珪質泥岩、泥岩や凝灰岩中のアンバーなどである。化学分析は、ガラスビードを用いたXRFによって岩石中の主要元素含有量を、LA-ICPMSによってREEを含む微量元素濃度を求めた。一部の試料は、酸分解によって得られた溶液試料をICP-MSによって微量元素濃度を求めた。鉄安定同位体比 ( $\delta^{56}\text{Fe} (\text{‰}) = 1000 \cdot [({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{sample}}/({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{IRMM014}} - 1]$ ) は酸分解試料を陰イオン交換カラムによって鉄のみを分離し、MC-ICPMSによって求めた。

分析の結果、黒鉱鉱床形成期および200-300万年後までの試料は、火成起源の岩石が持つ $\delta^{56}\text{Fe}$ 値である0‰や典型的な海底熱水の持つ-0.5‰と比較して、-1.75‰から+2.02‰と大きく分別していた。このことから、黒鉱鉱床の形成時および形成後も北鹿海盆の一部が局所的に非酸化になっていたと考えられ、硫化鉄の保存の要因になった可能性がある。また、このような大きな同位体分別を起こしている試料はレアアースパターンが負のセリウム異常を示すものが多く、酸化された海水の影響を強く受けている一方で、Mn/Fe比と $\delta^{56}\text{Fe}$ 値に相関性がみられないことから、非酸化された堆積場において鉄とマンガンの挙動はデカップルしていたと考えられる。また、黒鉱鉱床を伴う試料が-0.80から+2.02‰と ${}^{56}\text{Fe}$ に富んでおり、比較的分別の程度が小さい一方で、黒鉱鉱床を伴わない試料は-1.75から+0.69‰と ${}^{56}\text{Fe}$ に乏しく、より大きな分別を示した。モデル計算の結果、これは黒鉱鉱床形成時には活発な熱水活動により熱水からの溶存鉄のインフラックスが大きく、レイリー分別が起きにくかったこと、また、 ${}^{54}\text{Fe}$ を選択的に濃集しやすい黄鉄鉱の沈殿により溶存鉄が ${}^{56}\text{Fe}$ に富むようになったことが原因と考えられる。

Fe isotope variations in ferruginous and manganeseiferous chemical sedimentary rocks associated with Kuroko deposits in the Hokuroku district, Northeast Japan.

\* T. Otake<sup>1</sup>, R. Suzuki<sup>1</sup>, R. Yamada<sup>2</sup>, K. Shin<sup>3</sup>, Y. Kon<sup>4</sup>, T. Sato<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Faculty of Eng., Hokkaido Univ.; <sup>2</sup>Grad. Sch. of Sci., Tohoku Univ.; <sup>3</sup>RIHN, <sup>4</sup>AIST)

○塚本雄也<sup>1</sup>、掛川武<sup>1</sup>( <sup>1</sup> 東北大学大学院地学専攻)

Mn に富んだ堆積物は、海底熱水活動の存在や古環境の酸化還元環境を評価するためによく使われてきた。最古の Mn 鉱床は 24 億年前に縞状 Mn 鉱床として発見されており、それは先カンブリアン紀の海水の酸化状態と対応している。これらの研究によって Mn の地球化学は地球の歴史だけでなく、古環境の評価にとって重要であることが示唆される。

北鹿地域は黒鉱鉱床の多産地域としてだけでなく、Mn に富んだ層が存在していることでも知られている。その Mn の起源はまだあまりわかっていないが、Mn に富んだ層は黒鉱鉱床形成期後の海底熱水活動によって形成された可能性がある。それゆえに Mn に富んだ層が黒鉱鉱床形成期後の海底熱水活動による産物かどうか考察することを研究目的とする。

小雪沢や茂内(現地の地名)から” R2”、” T2”、ドレライト、泥岩の岩石サンプルを採取し、分析を行った。サンプル中の鉱物の化学組成は SEM、EDS を用いて分析を行った。サンプルの全岩化学組成は EDXRF を用いて分析を行った。

小雪沢では3つの沢において地質調査を行った(ルート A、B、C)。ルート A、B では貫入岩であるドレライトを見ることができた。ルート A で見られたドレライトは赤色、もしくは赤褐色の熱水による変質が見られた。このルート A において、化学分析の結果、Mn に富んだ層を発見することができた(3.7 wt%、1.8 wt%)。 ” T2” とドレライトの境界付近に部分的に Mn が濃集していることもわかった。その一方でルート A から 300 m ほどしか離れていないルート B のドレライトにおいて赤色変質は見られなかった。ルート C と茂内では” R2” を熱源とした熱水活動の跡が見られた。ただし、ここでは Mn に富んだ層は見られなかった。

これらのことから、小雪沢周辺の形成過程について考察を与える。まず黒鉱形成に関与した” R2” を熱源とした高温の海底熱水活動が起きた。しかし、Mn に富んだ層は形成されなかった。その後、ドレライトが貫入したことによって比較的低温の海底熱水活動が起きた。それにより Mn がリサイクルされ、地層中の酸化的な場所に選択的に濃集したことによって Mn に富んだ層が形成したことが推察される。以上のことから低温の海底熱水活動であっても Mn を濃集させられることが示唆される。また、小雪沢は現在低温の海底熱水活動が起こっている場所の地下を模擬していることが示唆される。

Mobilization of manganese and iron in marine sediments and tuffs by dolerite in Hokuroku District

\*Y. Tsukamoto<sup>1</sup>, T. Kakegawa<sup>1</sup>, S. Yamasaki<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Graduated school, Tohoku University)

# 1A09

## インドネシア・バンテン州・チサダン地域における 金鉱化作用の鉱物学的特徴

○黒田敦弘<sup>1</sup>、米津幸太郎<sup>1</sup>、Mega F. ROSANA<sup>2</sup>、  
Sukmandaru PRIHATMOKO<sup>3</sup>、渡邊公一郎<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>九大・工、<sup>2</sup>Padjajdaran Univ.、<sup>3</sup>PT AGC Indonesia)

本研究で対象としたチサダン地域が位置するインドネシア・ジャワ島西部にはポンコール金鉱床やチバリオン金鉱床といったインドネシアでも有数の金鉱床が集中している。チサダン地域は漸新世から第四紀にかけて形成された火山複合岩体 Bayah Dome Complex の最西端に胚胎されており、チサダン地域を含むケルタ地区での地表調査が PT AGC Indonesia によって 2007 年より開始された。しかしながらこの調査によって金鉱化作用に関連した地化学異常は認められたものの、開発に至るまでの基礎情報が不足しているのが現状である。そこで本研究ではチサダン地域に見られる金鉱化作用の特徴を、採取した露頭・ボーリングコア試料を用いて、地質学・鉱物学的な観点より明らかにすることを目的とした。

変質鉱物として XRD 及び薄片観察により同定された緑泥石とセリサイトの組み合わせより、本地域における鉱化流体の pH が中性付近であったことを示している。

研磨片試料を用いた反射顕微鏡観察によって、鉱石鉱物としては黄鉄鉱、黄銅鉱が支配的であることが分かり、少量の閃亜鉛鉱、方鉛鉱、銀鉱物も共生していることが分かった。また主にエレクトラムは他形、又は半自形鉱物として他の硫化鉱物と共生して晶出していた。さらに SEM-EDS によりエレクトラム中の金銀比を分析したところ、エレクトラム中の銀の比率は約 60at% であり、チサダン地域におけるエレクトラムは銀に富むことが分かった。

さらに金-銀鉱物を内包する石英脈は、石英脈の Band を色や形成する鉱物の組織の違いによって 4 つの異なる Band に分類することができた。エレクトラムをはじめとした金-銀鉱物は、母岩である火山角礫岩との盤際に形成された細粒の石英からなる Band I の後に沈殿する粗粒の石英と氷長石によって構成された Band II の中のみ確認され、このことは金-銀鉱物の鉱化作用は石英脈の成長時において特定のタイミングによってのみ引き起こされたことを示している。また Band I から Band III までの鉱化サイクルが繰り返し見られたことから、鉱化作用は複数回存在したと考えられる。

エレクトラムの晶出が確認された石英脈を用いた流体包有物均質化温度測定では、均質化温度は 187.0°C から 260.3°C の範囲の値をとった。今回、得られた均質化温度とエレクトラム中の銀の比率より鉱化流体の硫化状態を推定したところ、本研究地域は低硫化型に分類されることが分かった。

# 1A10

## 海底熱水性硫化鉱物の銅同位体比の特徴

○池端 慶<sup>1</sup>、石橋純一郎<sup>2</sup>、平田岳史<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>筑波大生命環境、<sup>2</sup>九大理、<sup>3</sup>京大院理)

昨今の多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS)の発展と普及にともない、銅、鉄、亜鉛、ニッケル、モリブデンなどの、"非伝統的"な金属元素の安定同位体比の高精度な測定が世界的に行われている。遷移金属元素の銅には、<sup>63</sup>Cu と <sup>65</sup>Cu の 2 つの安定同位体が存在する。地球の火成岩の銅同位体比  $\{\delta^{65}\text{Cu} (\text{‰}) = [({}^{65}\text{Cu}/{}^{63}\text{Cu})_{\text{試料}} / ({}^{65}\text{Cu}/{}^{63}\text{Cu})_{\text{NIST976}} - 1] \times 1000\}$  は、非常に均質( $\delta^{65}\text{Cu} = 0 \pm 0.3\text{‰}$ )であるが(Ikehata and Hirata, 2012)、鉱床試料からは 27‰もの銅同位体比の変動が報告されている(Mathur et al., 2009)。この変動は、主に低温での酸化還元反応にともなう同位体分別により生じることが実試料の分析や、室内実験の結果から明らかになってきたため、銅同位体比は銅鉱床の成因解明に有効な指標となる可能性が高い。

本研究では、現世と過去の海底熱水性硫化鉱物の銅同位体比の特徴を明らかにする目的で南部マリアナトラフの背弧拡大軸上(Yamanaka サイト)および拡大軸から数 km 離れた海丘の頂部に位置(Pika サイト)する海底熱水活動域から採集された試料と、日本列島の三波川帯にみられる 2 つの別子型鉱床から得られた試料に含まれる黄銅鉱の銅同位体比を測定した。これらの黄銅鉱は、大きさが数十ミクロンと微細なものもあり、また複数の硫化鉱物や脈石鉱物と複雑に組み合って産出するため、フェムト秒レーザーと MC-ICP-MS とを組み合わせた手法(Ikehata et al., 2008)により局所分析した。

南部マリアナトラフの 2 つの熱水活動域のチムニーを構成する硫化鉱物は、どちらも主に黄鉄鉱、白鉄鉱、閃亜鉛鉱、黄銅鉱からなる(Ikehata et al., 2015)。拡大軸から数 km 離れた海丘の頂部から採集されたチムニー試料中の黄銅鉱の銅同位体比は  $-0.7 \sim +0.8\text{‰}$  であり、背弧拡大軸上のチムニー試料中の黄銅鉱は 4‰を超える同位体比変動幅を示し(Ikehata et al., 2012)、最大値は  $+4.2\text{‰}$  であった。これらの同位体比の変動は、初期に晶出した黄銅鉱からの銅の溶脱と再沈殿時の同位体分別や、海水との反応により低温で形成された高い銅同位体比をもつ銅二次鉱物起源の銅の混入など複数の過程で生じたと考えられる。2 つの別子型鉱床試料を構成する硫化鉱物は、どちらも主に黄鉄鉱と黄銅鉱からなる。これらの黄銅鉱の銅同位体比は 0.5‰以下の狭い変動幅を示し、形成後の続成作用や広域変成作用時の再結晶作用により、銅同位体比の初期変動幅は減少したことを示唆する(Ikehata et al., 2011)。

Copper isotopic characteristics of submarine hydrothermal sulfide minerals

\*K. Ikehata<sup>1</sup>, J. Ishibashi<sup>2</sup> and T. Hirata<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Faculty of Life and Environmental Sciences, Univ. of Tsukuba, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu Univ., <sup>3</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto Univ.)

# 1A11

## 鉄マンガング塊への微量元素の濃集機構：ヒ素、アンチモン及びモリブデン

○上杉宗一郎<sup>1</sup>、田中雅人<sup>1</sup>、柏原輝彦<sup>2</sup>、高橋嘉夫<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 東京大学・院理、<sup>2</sup> 海洋研究開発機構)

**[序]** 鉄マンガング塊は、海洋に存在するマンガング酸化物( $\delta\text{-MnO}_2$ )および鉄水酸化物を主成分とする化学的沈殿物である。これまでの研究から、鉄マンガング塊中の微量元素の濃集の1つの要因として、 $\delta\text{-MnO}_2$ が負電荷を帯びるため、海水における溶存状態が陰イオンよりも陽イオンの元素の方がより濃集するとされている(Koschinsky and Hein, 2003)。一方で、正電荷を持つ鉄水酸化物に選択的に濃集する元素が存在することも示唆されている(Mitsunobu et al., 2006)。さらに、鉄マンガング塊への微量元素の濃集過程は、静電的な効果だけではなく、溶存イオンと $\delta\text{-MnO}_2$ の構造の類似性にも影響を受ける(Kashiwabara et al., 2009)。しかし、鉄マンガング塊への微量元素濃集過程において、 $\delta\text{-MnO}_2$ や鉄水酸化物の特定の相への微量元素の濃集や、その要因となる電荷や構造的な要因についての分子レベルでの機構解明は、依然として重要な課題である。そこで本研究では、鉄マンガング塊に濃集する微量元素の中でも、溶存状態が同じ4配位4面体の陰イオンでありながら異なる相への選択的な濃集が示唆されているヒ素(As)とモリブデン(Mo)、及びヒ素と同族のアンチモン(Sb)の濃集機構に注目し実験を行った。

**[試料・実験]** 分析試料として、中央太平洋海底から採取された海水起源及び続成起源の鉄マンガング塊を用いた。鉄マンガング塊中のAs、Mo、Sbの存在形態を明らかにするため、X線吸収微細構造(XAFS)法による化学種解析を行った。また、実験室で合成した $\delta\text{-MnO}_2$ と鉄水酸化物へのAsおよびMoの吸着実験を行い、回収した実験試料についてもXAFS法を用いた化学種解析を行った。

**[結果と考察]** XAFS法による解析により、Asは鉄水酸化物に4配位4面体構造で濃集している一方で、Moは6配位8面体構造で $\delta\text{-MnO}_2$ に選択的に濃集していることがわかった。このことは、(i) 構造的に未解明な点が多い海水起源鉄マンガング酸化物の主要鉱物であるFe-vernaditeにおいて、鉄水酸化物と $\delta\text{-MnO}_2$ が微量元素の吸着サイトとして独立に機能すること、(ii) 微量元素の濃集には静電的な効果だけでなく化学結合の安定性が重要であること、などを示す。一方、溶存種が6配位8面体構造であるSbは、同族でpKaが類似するAsに比べて濃集度が大きかった。これは、アンチモン( $\text{Sb}^{5+}$ )が構造や中心イオンのサイズが類似している $\text{Fe}^{3+}$ や $\text{Mn}^{4+}$ の6配位8面体構造に取り込まれ易いためと考えられる。今後は、(i) 量子化学計算によるこれらの微量元素の吸着時の安定構造のエネルギーの検討、(ii) 選択的抽出実験、などの結果も含めて、これらのイオンの鉄マンガング酸化物への濃集機構の系統的な理解を進める。

Concentration mechanisms of trace elements in ferromanganese nodule : Arsenic, Antimony and Molybdenum \*S. Uesugi<sup>1</sup>, M. Tanaka<sup>1</sup>, T. Kashiwabara<sup>2</sup>, Y. Takahashi<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Graduate School of Science, The University of Tokyo., <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

# 1A12

## 海水条件での $\delta$ -MnO<sub>2</sub> への Pt(II)、Pd(II) の濃縮異常の 解明

○田中和也<sup>1</sup>、川本大祐<sup>1</sup>、岡上吉広<sup>1</sup>、大橋弘範<sup>2</sup>、横山拓史<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>九大院理、<sup>2</sup>福島大理工)

【緒言】オキシ水酸化鉄と酸化マンガンが主成分であるマンガングラストは海山の山頂付近に広く分布しており、このマンガングラストは Co、Ni、Zn、Pb など多くの金属を濃縮している。マンガングラストは比較的採鉱しやすい水深に存在するため、海底資源として注目されている。Pt と Pd については海水中での Pt/Pd 濃度比は約 1 であるがマンガングラスト中の Pt は Pd と比べて最低でも 100 倍以上濃縮していることが報告されている。この現象は“Pt/Pd 異常”と呼ばれこの原因は解明されていない。Pt/Pd 異常を解明することは水圏におけるこれら貴金属の移行挙動を明らかにするうえで重要である。Pd(II)の吸着挙動は明らかになっていない。また Pt(II)の  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> (IV)への吸着挙動は報告されているが海水条件での結果は報告されていない。そこで本研究では海水条件(pH 8、Cl<sup>-</sup>濃度 0.56 mol/dm<sup>3</sup>)における Pd(II)、Pt(II)の  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> (IV)への吸着挙動をから、“Pt/Pd 異常”を解明することを目的とした。

【実験】Cl<sup>-</sup>濃度 0.56 mol/dm<sup>3</sup> に調整した塩化ナトリウム溶液にテトラクロリドパラジウム(II)酸カリウムとテトラクロリド白金(II)酸カリウムを溶解させ、任意濃度の Pd、Pt 溶液(0.2, 1.4, 2.8, 5.6 × 10<sup>-4</sup> mol/dm<sup>3</sup>)を調製した。その溶液を pH 8 に調整した。吸着率を上記の溶液 500 cm<sup>3</sup> に  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> (IV) 0.5 g を添加し、攪拌しつつ任意の時間で懸濁溶液の一部を採取した。懸濁溶液を 0.45  $\mu$ m メンブランフィルターによりろ過し、ろ液中の Pd、Pt 濃度を原子吸光法と ICP-AES で測定した。得られた沈殿物中の Pd、Pt の化学状態を分析するために SAGA-LS の BL06 と SPring-8 の BL14B2 にて Pt L<sub>3</sub>-吸収端 Pd K-吸収端の XAFS スペクトル測定を行った。

【結果・考察】図の吸着率の変化を見ると、吸着率変化の初期の時間では Pd が多く吸着し、その後やや減少しつつ一定となった。一方、Pt は直線的に増加し、24 時間後には Pd の吸着率を超えた。このように Pd(II)と Pt(II)の  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> への吸着挙動は全く異なった。発表では XAFS の結果も含めて“Pt/Pd 異常”の原因を考察する。

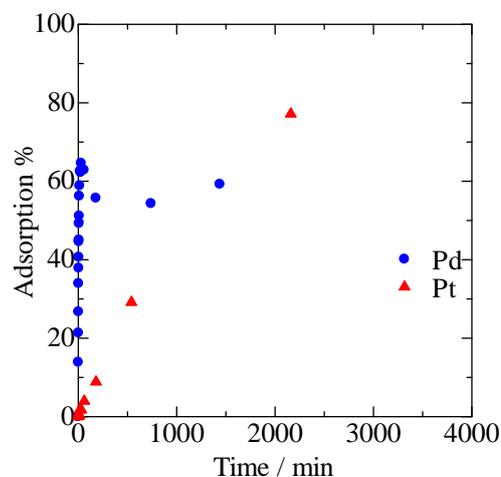


図 Pt と Pd の吸着率の時間変化

# 1A13

## インド洋深海堆積物の地球化学：インド洋におけるレアアース泥の分布に対する示唆

○安川和孝<sup>1</sup>、中村謙太郎<sup>1,2</sup>、藤永公一郎<sup>1</sup>、町田嗣樹<sup>2</sup>、大田隼一郎<sup>1</sup>、高谷雄太郎<sup>3</sup>、加藤泰浩<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>東大・工、<sup>2</sup>海洋研究開発機構、<sup>3</sup>早大・創造理工)

レアアースは他の金属に少量添加することで、製品の光学的特性や磁気的特性を飛躍的に向上させることができるため、小型化と高性能化が同時に求められる最先端の電子機器や低環境負荷技術にとって、今や必要不可欠な元素群となっている。近年、このレアアースを高濃度で含有する深海堆積物「レアアース泥」が南東太平洋や中央北太平洋に広く分布しており、有望な新規海底鉱物資源となる可能性が報告された [1]。さらに最近では、太平洋に続いて東部インド洋にもレアアース泥の厚い層が存在することが明らかとなり [2]、グローバルなレアアース泥分布の把握が資源工学的・地球科学的に重要な課題となりつつある。

本研究では、Deep Sea Drilling Project (DSDP)/Ocean Drilling Program (ODP) によりインド洋の 19 地点で掘削された堆積物コア試料から分取した 1,338 試料について、蛍光 X 線分析による主成分元素分析および誘導結合プラズマ質量分析による微量元素分析 (いずれも全岩化学組成) を実施した [3]。さらに、既に公表されている 325 試料のデータ [2] と合わせ、インド洋の広域をカバーする合計 1,663 試料の深海堆積物の大規模な化学組成データセットを新規に構築した。

本研究のデータから、インド洋レアアース泥の全岩化学組成には中央海嶺からの熱水起源成分の影響がほとんど見られない一方で、生物起源リン酸カルシウムと海水起源マンガン酸化物の影響が強く反映されていることが明らかとなった。これは、インド洋におけるレアアース泥の生成を支配する重要な因子が「堆積速度の遅さ」であることを示唆している。堆積速度が極端に遅くなるのは、(1) 水深が炭酸塩補償深度より深いこと、(2) 海洋表層の生物生産性が低いこと、(3) 大陸起源物質の流入が少ないこと、の 3 条件を同時に満たす海域である。インド洋でこれに該当する海域として、(I) 東部インド洋 Wharton 海盆南～南東部、及び (II) 中央インド洋海盆南部の 2 つが挙げられ、これらの海域ではレアアース泥が海底面付近に眠っている可能性が高いといえる。

[1] Kato, Y. et al. (2011) *Nature Geoscience* **4**, 535-539. [2] Yasukawa, K. et al. (2014) *Journal of Asian Earth Sciences* **93**, 25-36. [3] Yasukawa, K. et al. (2015) *Geochemical Journal*, in press.

Geochemistry of deep-sea sediments in the Indian Ocean: Implications for the potential distribution of REY-rich mud in the Indian Ocean.

\*K. Yasukawa<sup>1</sup>, K. Nakamura<sup>1,2</sup>, K. Fujinaga<sup>1</sup>, S. Machida<sup>2</sup>, J. Ohta<sup>1</sup>, Y. Takaya<sup>3</sup>, and Y. Kato<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Waseda Univ.)

# 1A14

(Invited)

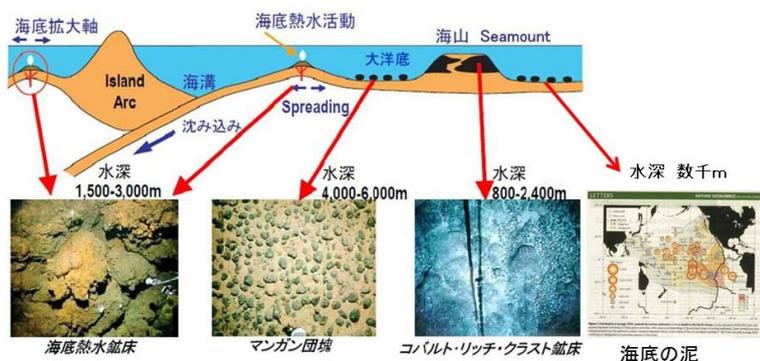
## 海底鉱物資源回収のための選鉱学の応用に関する研究

○藤田 豊久

(東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻)

### 1. はじめに

海底鉱物資源は図1のように記載されているが、ここではマンガン団塊を除く3種の鉱物を取り扱う。広義の選鉱・湿式製錬技術を表1に掲げるが、破碎、分級、浮選、浸出をここでは主に取り上げる。海底での鉱物採取の破碎方法を表2に示す。ついで破碎した鉱物は粒度により表3のような方法で選別される。それぞれの3種の海底鉱物資源回収のための選鉱学の応用を次に示す。



(出典: JOGMEC [http://www.jogmec.go.jp/english/activities/technology\\_metal/mineralresources.html](http://www.jogmec.go.jp/english/activities/technology_metal/mineralresources.html) より)

図1 海底鉱物資源について (JOGMECより)

表1. 広義の選鉱・湿式製錬技術の応用

- 破碎と分粒(ふるいわけと分級)
- 比重分離
- 磁選
- 浮選
- 電気応用選別
- ソーター選別、形状選別
- 脱水・ろ過・乾燥
- 浸出
- イオン交換吸着
- 沈殿分離
- 溶媒抽出
- セメンテーション・晶析

表2. 海底での破碎方法

破碎なし・・・柔らかい海底の泥、マンガン団塊

機械による破碎が必要・・・熱水鉱床およびコバルトリッチクラスト鉱床、(硬い海底の泥)

火薬による海底での方向性発破も可能性あり・・・熱水鉱床

電気破碎も可能・・・コバルトリッチクラスト鉱床

表3. 粒度ごとの選別方式の分類

• 3-10mm  
比重選鉱(jigなど)、磁選(マトリックスなし)

• 0.1-3mm  
比重選鉱(spiral, サイクロンなど)、磁選

• 0.01-0.1mm (10 $\mu$ m-100 $\mu$ m)  
浮選、比重選鉱(遠心式 Knelsonなど)、磁選(マトリックスあり)

• 0.001-0.01mm (1 $\mu$ m-10 $\mu$ m)  
磁選(マトリックスあり)、液液分離

### 2. コバルト・リッチ・クラストの回収技術

クラスト中には電池に必要な白金とコバルト、さらにレアアースなどのレアメタル濃度が高く、クラストの価値は高い。また、他の海底資源と比較して 1000m 深度の浅い海山に存在するので採取が容易と考えられる。厚さ数 cm の硬いクラストを海山から剥がすには、電気破碎が有効で、破碎後、破碎物を流体輸送することが1つの手段と考えられる。また、海底のクラストを破碎後、その部分を被覆し、塩酸を注入して直接浸出して、その液体を海上まで引き上げる、あるいは海草に吸着させてその海草を回収

The application of mineral processing and related technology to recover mineral and metals from ocean floor mineral resources

\*T. Fujita (Dept. of Systems Innovation, Graduate School of Eng., The University of Tokyo)

する方法も考えられる。また、クラストと岩を粗粒で比重選別するにはジグが適する。クラストを濃縮後に粉碎し、白金および各種金属は塩酸 2mol/l 以上の濃度で浸出可能である。次に、白金の選択的吸着回収には活性炭が有効であった。他の元素は溶媒抽出や晶析法で選択回収できる。また、クラストの乾式製錬による各種金属の選択的回収も考えられる。クラスト下部の海山の岩には燐灰石があり、クラスト選別後の脈石は肥料としての活用が挙げられる。

### 3. 海底熱水鉱床鉱物の回収技術

熱水鉱床は銅、鉛、亜鉛、金、銀などが存在し、比較的砒素が高い特徴を有する。陸上の硫化鉱物の鉱山と比較的類似している。鉱石量が多ければ、方向性発破で破碎する方法も 1 手段である。海底環境保護も考慮する必要がある。海底下で破碎、選鉱して有用な鉱物のみを海上に引き上げる方法と海上に引き上げてから選鉱する方法がある。ここでは、模擬試料として黒鉱を主とした硫化鉱物を用いた。海底で破碎する方法としてボールミルを使用し、大気圧下と 10MPa(水深 1000m) 下における粉碎結果を比較したが、 $-150\mu\text{m}$ 以下に粉碎し平均粒度約  $50\mu\text{m}$ であり、それほどの変異は見られなかった。 $-150\mu\text{m}$ 以下の鉱石を用いて、浮選の基礎実験として 1MPa 下でのカラム浮選を試みたところ、銅(黄銅鉱)、鉛(方鉛鉱)、亜鉛(閃亜鉛鉱)共に、浮上物側により多く濃縮された。イオン交換水よりも海水を用いた方が若干、選別成績が低下した。選鉱後の鉱物は通常の製錬工程に運ばれ、金属が回収される。選鉱は浮選のほか、磁選も考慮できるが今後の課題である。海底下の選鉱と海上での選鉱とどちらが効率的か、砒素含有鉱物の処理も含めて考察することが今後の課題である。

### 4. レアアース泥の回収技術

レアアースの泥はレアアースが高濃度であるが放射性が低く、資源量が多い特徴を有する。水深が 4000-6000m と深い海底の数m程度の深度に高濃度のレアアース泥があるがエアリフトなどの効率的な採取方法が期待される。海底熱水鉱床と同様に選鉱して有用な鉱物のみを海上に引き上げる方法と海上に引き上げてから選鉱する方法がある。泥の粗粒およびアパタイトにレアアース濃度は高く、海底選鉱にはハイドロサイクロンによる分粒、浮選あるいは油滴を用いた液液分離によるアパタイトの選別が期待される。このアパタイトのみを海上に引き上げれば、ずりとしての脈石は減少する。模擬試料によるアパタイトの浮選ではアパタイトを浮遊させるのにドデシルスルホン酸塩の界面活性剤が有効であった。ただ、泥は粒径が  $20\mu\text{m}$ 以下の微粒子であり、液液分離、即ち油にアパタイトを界面活性剤で吸着させて回収分離することが有効と考えられる。また、水深が深いので、体積膨張がない油が適している。海上に引き上げた泥はすぐに固液分離する必要があり、効果的な凝集剤を調査したところ、強アニオン性凝集剤が適していることが明らかとなった。

最後に、本研究を行なうにあたり、試料の提供および研究でお世話になった JOGMEC の関係者各位、高圧下の共同実験を行った(国)海上技術安全研究所の中島様、システム創成学専攻の加藤研究室および当研究室の関係者各位に感謝の意を表す。

# 1A15

## 液体の遮蔽効果を利用した水中放射能探査法

○池田和隆

水中で放射能探査を行う場合、水による減衰が大きく、地表面(海底、湖底)から数 cm 離れるだけで検出器からの計数率は大幅に変化する。したがって、検出器は地表面から一定の距離でほぼ接した状態で測定する必要がある。その際、検出器が軟らかい泥の中に埋まってしまうとジオメトリーが変わり、放射線強度が大幅に変化する。測定精度を上げるためには、検出器のジオメトリーを一定にし、軟泥質の物質が舞い上がっても放射線強度が変化することを抑える必要がある。

図1のように検出器の周囲をタンクで囲み、タンクの中に水や燃料などの液体を充填する。液体の遮蔽効果により、舞い上がった軟泥質の物質からの放射線は減衰し、軟泥質中にめり込んでも遮蔽効果によって検出器のジオメトリーは一定に保たれ、検出器底面が接する地表面の放射線強度のみを測定することができる。

防水・耐圧容器の底面は、遮蔽効果が少ない方がよい。タンクの周囲からの放射線が、液体の遮蔽効果によって a% に、防水・耐圧容器の遮蔽効果によって b% に、両者の遮蔽効果によって T% まで減少するとする。この T% は、解析する上で必要な遮蔽効果であり、求める測定精度により決まる。

防水・耐圧容器の底面を除いた部分の遮蔽効果が一定の b% と仮定した場合、a% の遮蔽効果を持つ液体の厚さを d cm とする。図2のように防水・耐圧容器の表面から半径 d cm の球を合成して得られる立体の表面が、解析する上で必要な遮蔽効果を示す範囲となる。したがって、この立体を包括するようにタンクの形状、大きさを決定する。

このように、タンクの形状は理論的には半球で表されるが、実機を作製する上では、半球でなくてもよい。多面体のタンクの方が作製しやすく、また曳航する際の水の抵抗を減らすために流線型のタンクを用いてもよい。

この方法は遮蔽体の材料費が発生せず、耐水・耐圧構造は検出器を含めた電子回路部分のみでよく、装置を安価に作製できる。また液体の遮蔽体は測定開始時にタンク内に取り入れ、測定終了後にタンクから抜き出すことができるので、装置を軽量化できる。

この方法が日本の海底資源探査に役立てば、幸いである。なお個人の知的財産なので、使用する場合は連絡していただきたい(連絡先: ikeda11az@outlook.jp)。

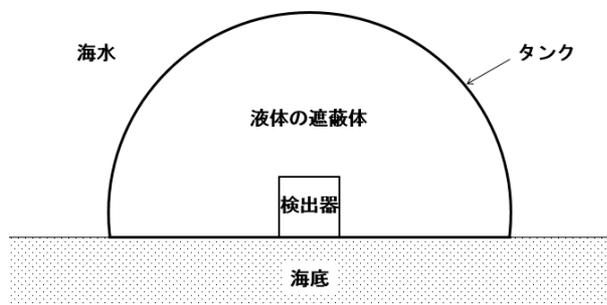


図1 液体の遮蔽効果を利用した水中放射能探査装置の基本構造

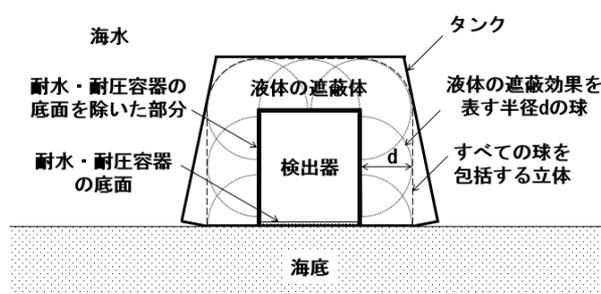


図2 液体の遮蔽効果を利用した水中放射能探査装置の適用方法

Underwater gamma ray surveying with liquid shield

\*K.Ikeda

# 1A16

(Keynote)

## 海底資源開発の環境影響評価と地球化学研究

○川口慎介<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 海洋研究開発機構)

海底資源採掘などの海底開発事業においても、陸上での種々の開発事業と同様に、事前の環境影響評価事業が必要とされている。しかし、評価のための科学的調査の方法論や、調査でえられた結果を利用した開発可否についての判断基準、あるいはそうした方法や判断基準についての国際標準化は、いまだ達成されていない。この原因の一つとして、実際に開発事業と類似した海底環境の擾乱を引き起こさないことにはどのような影響が引き起こされるか予測できないが、こうした実験的擾乱を実施する場合には開発の可否と同様にその実施可否を事前に判断せねばならない、というジレンマがある。

演者らはこれまでに、大規模地震や海底科学掘削の後に、ただちに海洋研究調査を実施してきた。調査の結果、大規模地震や海底科学掘削といった海洋底環境擾乱に対して、周囲の海水・海底の生態系が迅速に応答すること、またその生態系の応答は擾乱に伴う物理・化学場の変化と調和的に説明できることが明らかとなった[Kawagucci et al., 2012 Sci. Rep.; 2013b G-cubed; Nakajima et al., 2005 PLOS ONE]。これらの成果は、海洋底の擾乱によって生じる海洋(底)環境の地球化学的な変化を予測できれば、さらに生態系の応答までの予測が可能となることを示唆している。またこれらの成果は、(天然に生じる)地震や(少なくとも地球科学研究業界的にはその実施が承認されている)科学掘削の機会に(いわゆる理学的な立場で)海洋研究調査を実施した結果としてえられたものである。今後もこうした地震や科学掘削などの(擾乱を目的とした人間活動ではない)海洋底擾乱の発生を把握し、地球化学を中心とした海洋科学調査を積み上げることは、(社会が要請する)環境影響評価事業への科学者の貢献の一つと言えるだろう。

環境影響評価事業それ自体は、(いわゆる理学的な)研究調査とは一線を画すものである。(特に政治的な)価値判断との濃厚な接触が懸念されることからか、科学者の中にはこうした事業との関わりを忌避する向きもある。しかし一方で、環境影響評価事業として実施する科学的調査でえられる結果それ自体は、研究調査でえられる成果と区別されるものではない。むしろ、影響評価事業の方法論確立において科学者側が明示的に貢献することで、事業として実施する調査を通じて研究調査と同等の科学的知見を蓄積できれば、影響評価事業の推進による学術の発展が期待できるのではないだろうか。

Environmental impact assessment on seafloor exploitation and geochemistry.

\*S. Kawagucci<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>JAMSTEC)