

# 深海のフロンティア：海底に眠る巨大鉱床の発見

東京大学大学院工学系研究科教授 加藤 泰浩

## 1. はじめに

地球は、表面積の約7割を海洋が占める、水の惑星です。宇宙から撮影された地球の写真を見ると、海と雲が美しい青と白のコントラストを作り、まるでビー玉のようです。では、その青い海の底はどうなっているのでしょうか？

実は、これほど科学が発達した現代においても、深海はまだ謎に包まれた未知のフロンティアです。地球の海の平均水深は約3,800 m、最も深いマリアナ海溝は水深1万 mを超えます。これに対し、海の中で太陽の光が届くのは、せいぜい水深200 mくらいまでです。厚い水の壁によって光をはじめとする電磁波は吸収されてしまうため、海洋のほとんどの部分は、光の届かない漆黒の闇となっています。

それでも好奇心旺盛な人類は、工夫を凝らして深海底の様子を探ろうとしてきました。深海底には、電磁波は届きませんが、水そのものの震動である音波なら届きます。そこで、船の上から海底に向けて音波を発生し、その反射を基に海底の様子を探る試みが、20世紀前半から世界中で行われてきました。その過程で発見された海底の巨大な山脈「中央海嶺」は、現代のプレートテクトニクス理論につながっています。やがて、深海底に降り積もった堆積物（泥）やその下の海洋地殻（玄武岩）を採取するために、巨大なやぐらを備えた掘削船で海底を何百mも掘り抜くボーリング調査が1960年代に始まりました。さらには、とてつもない水圧に耐えるよう設計された深海潜水艇を用いて、人間が自ら海底まで到達し、調査できるようになりました。それでもなお、海は人間にとってあまりにも大きく、深海に棲む生き物やそこで起こっている現象について、分かっていることはほんの一部に過ぎません。だからこそ、今もなお毎日のように、新たな発見が世界中で生まれ続けています。本稿の主題である海底鉱

物資源「レアアース泥」も、わずか数年前に明らかになった新しい科学的発見の1つです。

## 2. 現代文明に欠かせない元素「レアアース」

レアアース（希土類元素）とは、元素の周期表の第3族に属する原子番号21のスカンジウム ( $_{21}\text{Sc}$ )、原子番号39のイットリウム ( $_{39}\text{Y}$ ) の2元素と、原子番号57のランタン ( $_{57}\text{La}$ ) から71のルテチウム ( $_{71}\text{Lu}$ ) までのランタノイド15元素を合わせた計17元素の総称です。また、ランタンからサマリウム ( $_{62}\text{Sm}$ ) までの6元素を軽レアアース、ユウロピウム ( $_{63}\text{Eu}$ ) からルテチウムまでの9元素にイットリウムを加えた10元素を重レアアースと呼ぶことがあります。重レアアースは特に、産業上の重要性が高い元素群です。また、最近ではスカンジウムの重要性も広く認知されつつあります。

レアアースは、その特殊な電子配置のため、他の金属元素にはない独特な磁気特性および光学特性を持ちます。レアアースそのものを単体で用いることはありませんが、他の金属にわずかな量のレアアースを添加することで、元の金属単体よりもはるかに優れた素材性能を発揮するようになります。例えば、レアアースの磁気特性を生かした素材としては、世界最強の永久磁石であるネオジム-鉄-ボロン（ホウ素）磁石が有名です。この磁石はハイブリッドカーのモーターやパソコンのハードディスク、風力発電の発電機などに広く使用されており、その強力な磁力によって製品の高性能化や小型化を可能にしています。また、光学用途としては、重レアアースのユウロピウムやテルビウム ( $_{65}\text{Tb}$ )、イットリウムが優れた蛍光特性を持つことから、LED電球の材料として広く用いられています。これら以外にも、工業用や医療用レーザーの発振材料、ニッケル水素電池用の水素吸蔵合金、デジタルカメラや顕微鏡の

光学ガラス，半導体や液晶ガラス基盤の研磨剤，自動車用排気ガス浄化触媒，インフルエンザ治療薬の合成触媒など，レアアースの産業分野での用途は極めて多岐にわたっています。皆さんの家やカバンの中にも，レアアースが関わる製品がいくつもあることでしょう。また，近年特に注目を集めている元素がスカンジウムです。アルミニウムにスカンジウムを添加したアルミニウム-スカンジウム合金は，非常に軽量かつ高強度の新合金であり，航空宇宙産業や自動車産業での実用化を見据えた研究開発が精力的に進められています。さらに，スカンジウムは燃料電池用の固体電解質材料としても高い性能を発揮します。

スカンジウムを用いた固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) は，非常に高い発電効率と低コスト・長寿命を両立可能な次世代燃料電池の大本命とされ，日本が目指す水素エネルギー社会の基盤になると期待されています。以上のように，レアアースは，現代社会にいまや欠かすことのできない重要な元素群であり，日本が誇るハイテク産業や省エネ技術を支えています。

### 3. 新しい海底鉱物資源「レアアース泥」の発見

2008年から2011年にかけて，私は研究室の大学院生たちと共に，2,000試料以上もの「泥」の化学分析を行いました。かつての国際深海掘削計画により，深海底をボーリングして得られた深海堆積物コア試料です。そして研究の結果，レアアースを非常に高い濃度で含んだ「レアアース泥」が，水深4,000 mを超える太平洋の深海底に広く分布していることを発見し (図1)，2011年の夏に世界に向けて発表しました<sup>1)</sup>。レアアースが産業上重要な元素であり，その安定的な確保が必要であるのは，日本以外の諸外国にとっても同じです。折しもレアアースの価格が急騰していた時期であったため，私たちの発見は世界中で大きな反響を巻き起こしました。

このレアアース泥は，(1) 高いレアアース含有量

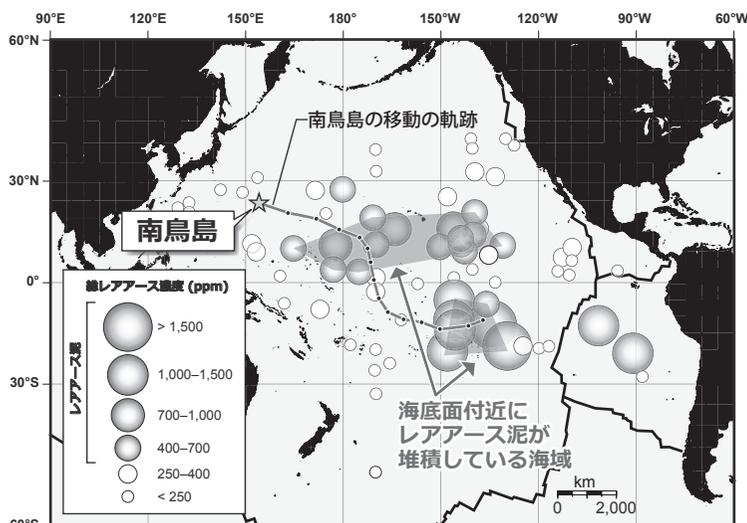


図1 太平洋における海底面付近のレアアース泥の分布と南鳥島の軌跡。南鳥島の移動の軌跡上にある黒丸は，100万年ごとの位置を表す。Kato et al. (2011)<sup>1)</sup>を基に作成。

を持つ (特に重レアアースやスカンジウム)，(2) 資源量が膨大，(3) 層状に分布するため探査が容易，(4) 開発の障害となるトリウムやウランなどの放射性元素をほとんど含まない，(5) 希塩酸などで容易にレアアースが抽出可能であるなど，資源開発に有利な特長をいくつも兼ね備えた，まさに夢のような鉱物資源といえます。現在の太平洋で，このレアアース泥が海底面付近に広く分布しているのは，主にタヒチ沖の南東太平洋とハワイ沖の中央北太平洋であることが分かりました (図1)。せっかくの有望な資源なのに，日本の近くにはないのでしょ

### 4. 南鳥島「超高濃度レアアース泥」の衝撃

地球の表面はプレートと呼ばれる十数枚の板で覆われており，これらのプレートは活発に運動しています。「活発に」とは言っても，速いところで1年に10 cm くらいであり，これは私たちの髪の毛が伸びるのと同じくらいのスピードです。それでも，数千万年から数億年という長い時間スケールで見ると，大陸や海底は大きく動いているのです。

東京から南東に約1,900 kmのかなたに，一辺が2 km ほどの三角形をした小さな島があります。この南鳥島は東京都小笠原村に属し，日本最東端 (北緯24度18分，東経153度58分) の領土として知られています (図2)。南鳥島周辺の海底は，1億数

千万年前に南太平洋の中央海嶺で生まれ、太平洋プレート運動に伴って移動し、南北太平洋のレアース泥分布域を通過して現在の位置にやってきました(図1)。日本は6,800以上の島々で構成される島国ですが、このように太平洋をはるばる渡ってやってきたのは、実は南鳥島ただ1つです。そのため、南鳥島周辺の海底下には日本で唯一、はるか昔に南太平洋や北太平洋で降り積もったレアース泥が存在するのではないかと期待されました。

そこで私たちは2013年に、海洋研究開発機構(JAMSTEC)と共同で、南鳥島周辺の排他的経済水域(EEZ)のレアース泥調査航海を実施しました。EEZとは、ある国が漁業や資源探査を独自に行う権利を与えられた海域のことで、干潮時の海岸線から200海里(約370km)以内の範囲となります(図2)。南鳥島は大変小さな島ですが、その周辺を取り囲むEEZは日本の国土よりも大きな面積(約43万km<sup>2</sup>)となります。2011年に発表したレアース泥の多くは公海上にあるため、ただちに開発できるわけではありません。しかし、日本のEEZ内にレアース泥があれば、それらは日本が独自に開発できます。EEZ内に存在するかどうかは、将来の日本の資源開発を見据えたとき、非常に重要な問題なのです。

私たちの調査航海では、ピストンコアラーと呼ばれる長さ15m程度の金属パイプを海底に突き刺すことで、泥の試料を採取しました(図3)。南鳥島の南方沖の6地点において水深5,700mの深海底か

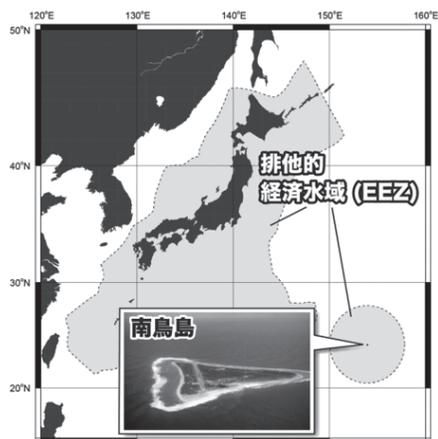


図2 日本の排他的経済水域(EEZ)と南鳥島。南鳥島の写真はWikipediaより引用。

らコア試料を採取し、陸上に持ち帰って化学分析を行いました。その結果、誰も予想すらしなかった発見がありました。海底面から5m以内に、総レアース含有量が6,600ppm(1ppmは100万分の1)を超える極めて高濃度のレアース泥が存在する海域があることが分かったのです<sup>2)</sup>。従来の研究で知られていたレアース泥は1,500ppmがせいぜいで、太平洋全域での最高濃度でも2,200ppmでした。最高値の3倍もの濃度を日本のEEZ内でいきなり叩き出したのですから、大変な驚きでした。私たちはこれを「超高濃度レアース泥」と呼んでいます(図4)。研究の現場では時として、このように思いもよらない展開が生まれることがあります。

## 5. 海に潜らずに海底資源を調べよう

超高濃度レアース泥の発見以降、私たちは繰り返し調査航海を行い、南鳥島EEZ内を縦横無尽に調査しました。その際に用いたのが、音波です。調査船には、サブボトムプロファイラー(SBP)と呼ばれる音響探査機器が搭載されています。船から海底に向かって音波を発すると、音波は海底下の地層



図3 ピストンコアラーを用いた試料採取の様子。写真中央のクレーンで吊された金属パイプがピストンコアラー。



図4 南鳥島EEZ内で採取された超高濃度レアース泥。

の中まで進んでいきます。その途中で密度などの物性が異なる境界があれば、そこで音波は反射されます。船上に返ってくる複雑な反射音を解析することで、海に潜ったり泥を掘り抜いたりすることなく海底下の地層の構造を読み解くことができるのです(図5)。

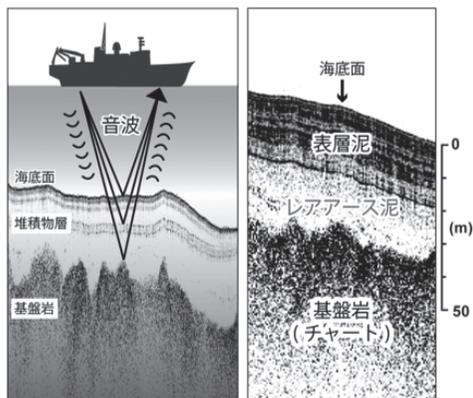


図5 船上SBP探査の概念図(左)と探査結果の例(右)。Nakamura et al. (2016)<sup>3)</sup>を基に作成。

図6は、SBPによる音響探査データを基に推定された、南鳥島EEZ内の海底面付近のレアアース泥の分布です<sup>3)</sup>。SBP調査とピストンコアラで実際に採取された泥の結果を照らし合わせることで、超高濃度レアアース泥が海底面下の浅い深度に存在し、将来の開発対象として有望な海域は、EEZの南部に限定されることが明らかとなりました。

調査船には、SBPの他にもう1つ、マルチナロービーム音響測深機(MBES)と呼ばれる海底地形を調べるための機器が積まれています。MBESは、海底面からの反射音をデータとして取り、水深を測定したり海底地形図を描いたりするために用いられます。そしてこの反射音は、海底面が硬いほど強く(大きく)なります。私たちはレアアース泥調査のために南鳥島EEZ内を船で走り回っている間、MBESの反射強度データも取り続けました。その反射強度を地図上に表してみると、場所によって強度が大きく異なることが分かりました。これは一体何を表しているのでしょうか?

## 6. 海に潜って海底資源を調べよう

2016年4月、JAMSTECが誇る有人潜水調査船「しんかい6500」を用いた海底調査が行われました。「しんかい6500」はその名の通り、水深6,500mまで潜って海底を調査することができる潜水艇です(図7)。軽くて丈夫なチタン合金製の耐圧殻と呼ばれる直径2mの球体の中に、2人のパイロットと1人の研究者の合計3人が入り、海底で様々な調査を行います。人の目で直接海底を観察し、丁寧に試料を採取することで、音響探査からだけでは知り得ない実際の海底の様子を詳しく知ることができます。

この潜航調査のターゲットは、南鳥島EEZ南部

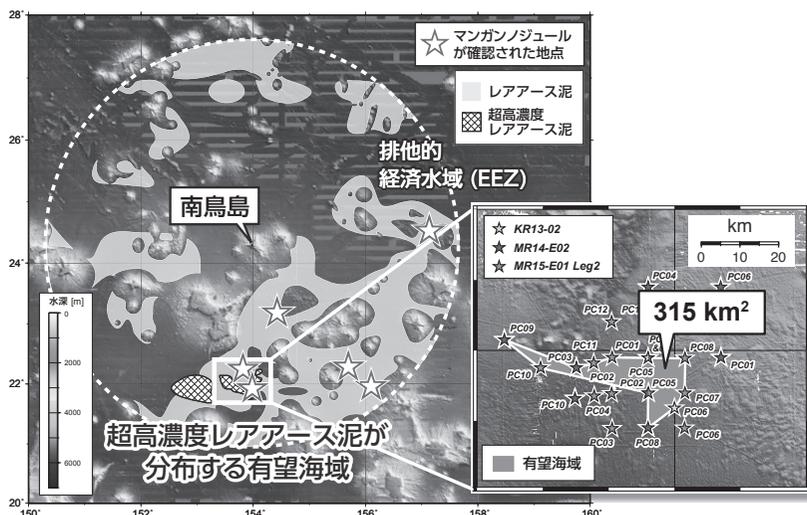


図6 音響探査により推定された南鳥島EEZ内の海底面付近におけるレアアース泥の分布<sup>3)</sup>。拡大図中の白枠で囲まれた領域は総レアアース濃度が2,000ppm以上の高品位なレアアース泥が海底面下10m以浅に分布し、将来の開発対象として有望と考えられる海域。☆印は「しんかい6500」を用いた海底調査によってマンガンジュールの分布が確認された地点<sup>4)</sup>。



図7 海洋研究開発機構の有人潜水調査船「しんかい 6500」。



図8 南鳥島 EEZ 内のマンガンノジュール密集域。中央に映る四角形の一边は 50 cm。海洋研究開発機構プレスリリース<sup>4)</sup>より。

の音波反射強度が非常に強い海域です。そこに広がっていたのは、見渡す限り海底を覆い尽くす「マンガンノジュール」の密集域でした<sup>4)</sup> (図8)。

マンガンノジュールとは、コバルトやニッケルなどのレアメタルを豊富に含む海底鉱物資源の一種です。大きさは直径数 cm から 10 cm 程度で、中心に泥の塊や岩石の破片、サメの歯などの核を持ち、その周囲を同心円状に鉄やマンガンの酸化物が取り巻いています。硬い金属の塊であるマンガンノジュールが密集していたため、音波を強く反射していたのです。マンガンノジュールの主成分は鉄やマンガンですが、これらは陸上の鉱山から大量に供給できるため、資源としての対象にはなりません。重要なのは、微量元素として含まれるレアメタルです。例えばコバルトは、モバイル電子機器に欠かせないリチウムイオン電池の原料の 1 つです。「しんかい 6500」によるこの発見によって、南鳥島 EEZ の海底にはレアアース泥だけでなく、マンガンノジュールの巨大鉱床も広がっていることが初めて明らかになりました。

## 7. 南鳥島の海底鉱物資源が意味すること

SBP から推定されたレアアース泥の分布と MBES 及び「しんかい 6500」の調査から明らかになったマンガンノジュールの分布を比較すると、2 つの資源が分布する範囲はよく一致することが分かりました (図6)。このことは、レアアース泥とマンガンノジュールの生成メカニズムに、何らかの共通性 (起源物質や地質学的条件など) が存在することを示唆しています。その謎を解くための重要な鍵は、これらの資源が「いつできたのか」を明らかにすることです。現在私たちは、海水中の極微量元素であるオスミウムの同位体比を用いて、レアアース泥やマンガンノジュールの生成年代を決定することにチャレンジしています。

レアアース泥もマンガンノジュールも、その形成には数百万年～数千万年という、途方もない時間がかかるかと私たちは考えています。これだけの長い時間スケールで起こるメカニズムを考えるには、大陸や海底の移動や長期的な地球環境変動などを考慮に入れる必要があります。逆に言えば、南鳥島の深海底に眠っている巨大鉱床は、人類の歴史よりもはるかに長い時間にわたって地球の気候や海洋環境の変遷を記録してきた、重要な記録媒体でもあるのです。

海底鉱物資源に関する従来の研究では、それぞれが個別の資源を対象とする研究に終始してきました。しかし、南鳥島周辺で近年次々と明らかになってきた事実は、一見すると異なる複数の海底鉱物資源を、より大きな枠組みの中で合わせて考える必要があることを示しています。これまで私達が手に入れてきた科学的知見は、もっと大きなパズルのピースに過ぎない可能性があるのです。そのピースがつながり、パズルの全体像が明らかになったとき、プレート運動や環境変動といった地球システムのダイナミックな変化と海底鉱物資源の生成・分布が、数千万年という遠大な時間の中で密接にリンクしているという、地球と資源についての新しい統合的な描像が得られることでしょう。

### <参考文献>

- 1) Kato et al. *Nat. Geosci.* 4, 535-539 (2011) .
- 2) Iijima et al. *Geochem. J.* 50, 557-573 (2016) .
- 3) Nakamura et al. *Geochem. J.* 50, 605-619 (2016) .
- 4) 海洋研究開発機構プレスリリース (2016年8月26日)