

全く新しいタイプのレアアースの大鉱床を太平洋で発見

東京大学大学院工学系研究科の研究論文が英國科学誌「Nature Geoscience」に掲載されます

【概要】

東京大学工学系研究科システム創成学専攻の加藤泰浩准教授らの研究グループは、南東太平洋や中央太平洋に、見た目は普通の泥にも拘らず、高品位のレアアース(注 1)を含有した“レアアース資源泥(注 2)”が膨大な量分布していることを発見しました。海底鉱物資源としては、①熱水性硫化物鉱床、②マンガンクラスト鉱床、③マンガンノジュール鉱床の 3 種類(注 3)が従来から知られていました。これらに対し、今回発見されたレアアースを豊富に含有した泥は、全く新しいタイプの第 4 の海底鉱物資源です。この“レアアース資源泥”は、(1)レアアース含有量(注 4)が高いこと、(2)資源量が膨大(陸上埋蔵量(注 5)の約 1,000 倍)かつ探査が容易なこと、(3)開発の障害となるウランやトリウムなどの放射性元素をほとんど含まないこと、(4)レアアースの回収が極めて容易なこと(薄い酸で容易に抽出可能)など、まさに夢のような海底鉱物資源です。これは、最近の深刻なレアアース資源問題を解決に導く可能性がある画期的な研究成果と言えます。なおこの成果は、科学研究費補助金・基盤研究(S)『画期的な海底鉱物資源としての含金属堆積物の包括的研究(H22~H26, 研究代表者: 加藤泰浩)』、東レ科学技術研究助成(H20~H22, 研究代表者: 加藤泰浩)による成果の一部です。本研究成果は英國科学誌「Nature Geoscience (ネイチャー ジオサイエンス)」電子版に 7 月 4 日 2 時(日本時間)に掲載される予定です。

1. 背景

レアアースは、我が国の最先端産業を支える重要な資源ですが、その 97 % を中国一国が生産する脆弱な供給構造を持っています。2005 年以降、中国は輸出奨励政策から規制強化政策へと急激に方針を転換したため、レアアースの供給不足や価格急騰が懸念されてきました。昨年の尖閣諸島沖での漁船衝突事件をきっかけとして、中国はレアアースの輸出停止・制限を行い、世界中にレアアースショックを与えました。現在も価格の上昇は続いており、今年 6 月の価格は 1 月と比べると 3 倍以上という異常な高騰ぶりを示しています(図 1)。さらに、中国はレアアース資源を外交カードとしても利用しており、レアアースの安定確保は日本にとって喫緊の懸案事項です。

2. 研究方法の概要

1968~1984 年に東大洋研究所在古地磁気の研究のために太平洋全域から 27 本のピストンコア(注 6)試料(平均コア長 7.6 m)を採取し、保管していました。これらのコア試料を譲り受け、ICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析装置)を用いた 456 試料の全岩化学組成の分析を 2008 年より開始しました。その結果、太平洋の広範囲に、南中国のイオン吸着型鉱床(注 7)に匹敵する高品位の海底堆積物“レアアース資源泥”が分布していることを発見しました。さらに、レアアース資源泥の太平洋全域における分布範囲と海底面下の深度分布の状況を詳細に把握するために、深海掘削計画(DSDP: Deep Sea Drilling Project)/国際深海掘削計画(ODP: Ocean Drilling Program)(注 8)による掘削コア(注 9) 51 本(総コア長 = 2,491 m, 平均コア長 49 m)から得られた 1,581 試料について、ICP-MS による全岩化学組成分析を行いました。したがって、我々は総コア本数 78 本、総試料数 2,037 試料についての全岩化学組成分析を行ったことになります。

3. 結果の概要

全岩化学分析の結果、南東太平洋において平均層厚 8.0 m、平均総レアアース濃度 1,054 ppm、中央太平洋において平均層厚 23.6 m、平均総レアアース濃度 625 ppm のレアアース資源泥が存在していることが明らかとなりました(図 2~4、表 1)。例えば、南東太平洋の Site 76において、4 平方キロメートルの範囲(深度 10 m)でレアアース資源泥を開発すると、日本の年間レアアース消費量の 1~2 年分を供給することができます。さらに、陸上埋蔵量のおよそ 1,000 倍という膨大な量のレアアース資源泥がこの 2 つの海域に存在していることがわかりました(図 5)。また化学分析データを独立成分分析(注 10)で解析した結果、レアアースを濃集させたメカニズムが、鉄質懸濁物質とフィリップサイト(ゼオライト鉱物の一種)による海水中のレアアースの吸着であることが判明しました。さらに、レアアース資源泥には、バナジウム、コバルト、ニッケル、モリブデンなどのレアメタルも高濃度に含有されていることも明らかとなりました。

4. 考察と今後の展望

現在、レアアース資源泥の分布海域は、一部を除いてすべて公海上に位置していますが、公海上の資源でも、国際海底機構(ISBA : International Seabed Authority; 注 11)の合意が得られ、マイニングコード(注 12)が採択されることで、鉱区を獲得することが可能です。実際にハワイ沖のマンガンノジュール鉱床については、日本をはじめ、中国、ロシア、フランスなどの多くの国々が鉱区を獲得しています。

またレアアース資源泥は水深 3,500 ~ 6,000 m の深海に分布していますが、深海の堆積物の開発に関しては、1979 年に紅海の水深 2,000 m に分布する銅・亜鉛などの硫化鉱物を含む硫化物泥(注: 今回のレアアース資源泥とは全く別物)の開発テストがドイツの鉱山会社によって行われており、年間 4,000 万トンの採掘・回収が想定されていました。それ以降、深海の泥を採掘するテストは行われていませんが、現在のテクノロジーをもってすれば、3,500 ~ 6,000 m の深海から年間 4,000 万トンのレアアース資源泥を採掘・回収することは十分に可能と考えられます。さらに、回収したレアアース資源泥からは、薄い硫酸により短時間でレアアースを浸出(抽出)することが可能(図 6)であり、工業的にも極めて有利な条件を兼ね備えた資源といえます。

このレアアース資源泥を実際に開発することができれば、日本のみならず世界にとっても極めて重要な資源になると期待されます。また、レアアース資源泥は日本の主権がおよぶ排他的経済水域(EEZ)内にも存在している可能性が高く、その発見を最重要目標として研究を進めていく予定です。

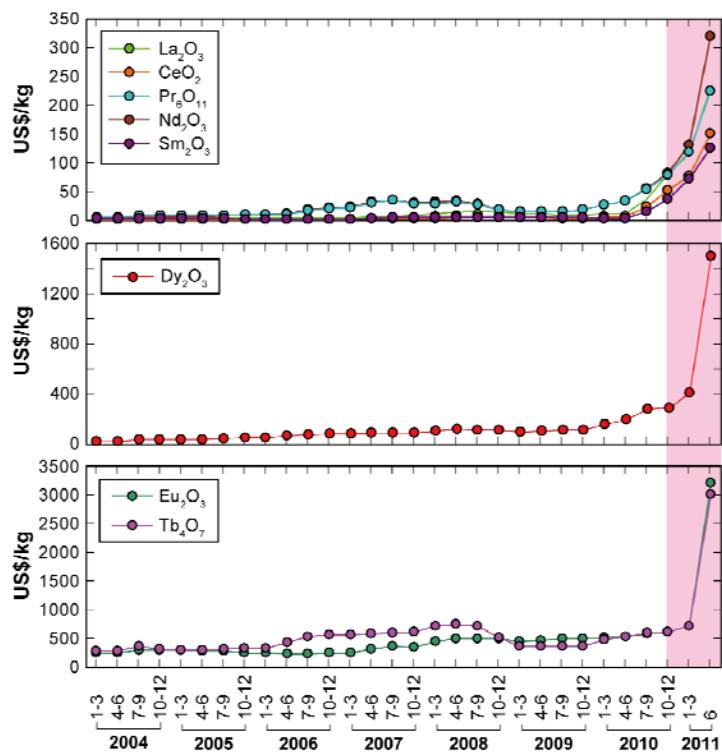


図 1 2004～2011年にかけてのレアアース価格の変動
(Lynas Ltd. および Metal-Pages のデータより)

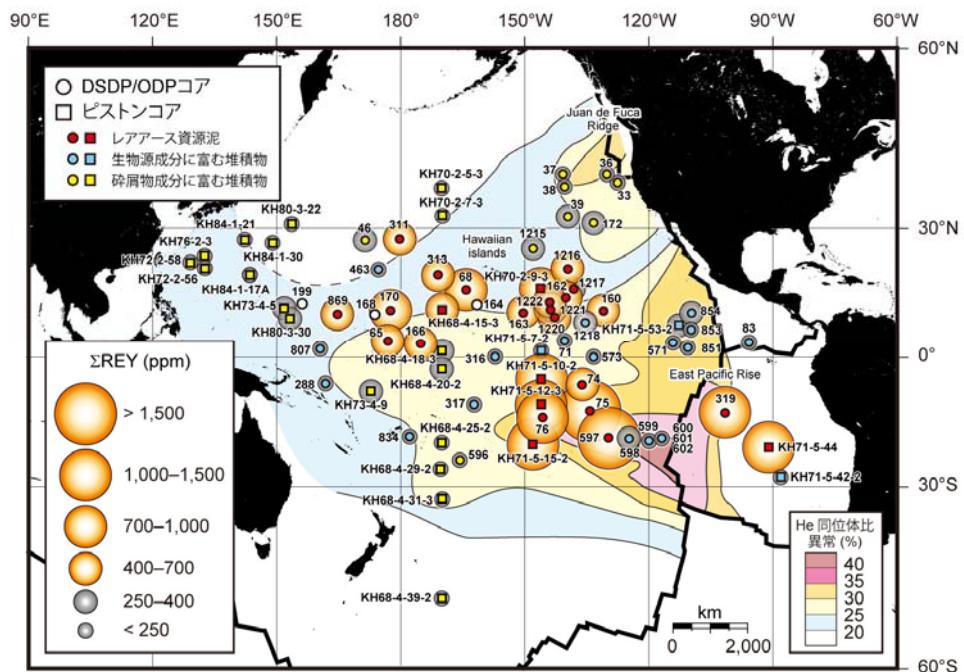


図 2 太平洋におけるレアアース資源泥の分布(< 2 m の表層)と
平均総レアアース含有量(Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

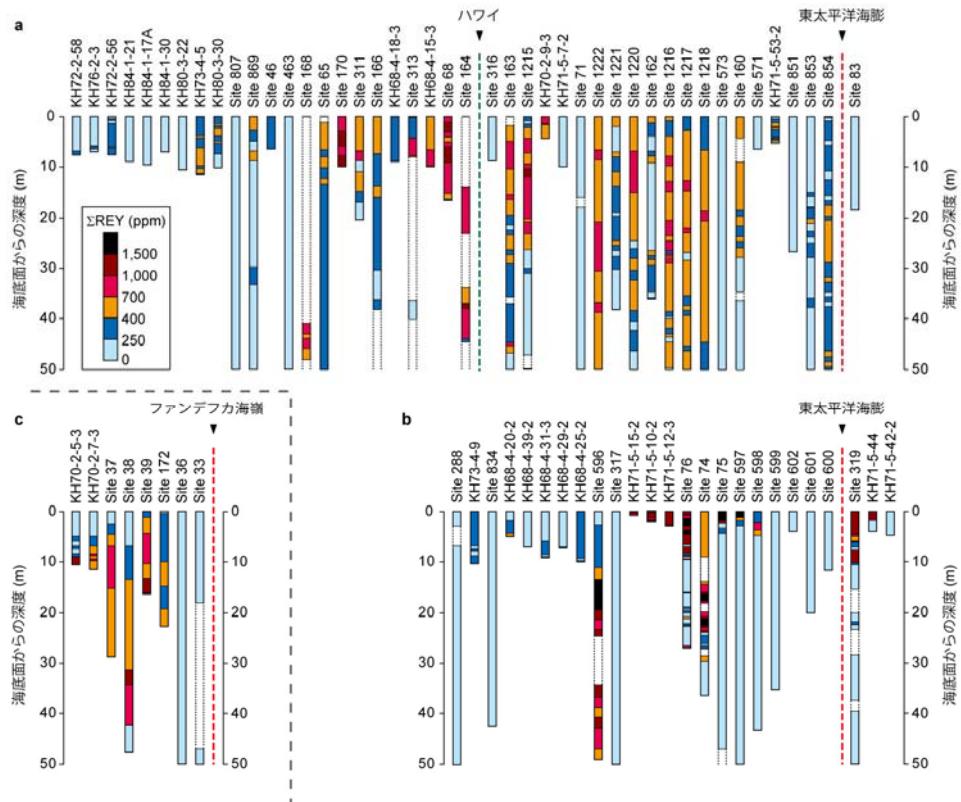


図3 レアアース資源泥の深度分布(< 50 m)と総レアアース含有量
(Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

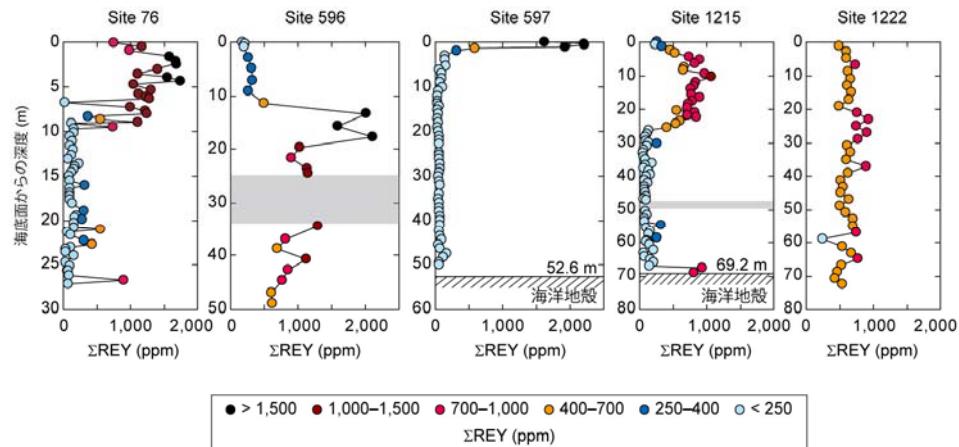


図4 代表的なコア試料のレアアース資源泥の深度分布と総レアアース含有量
(Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

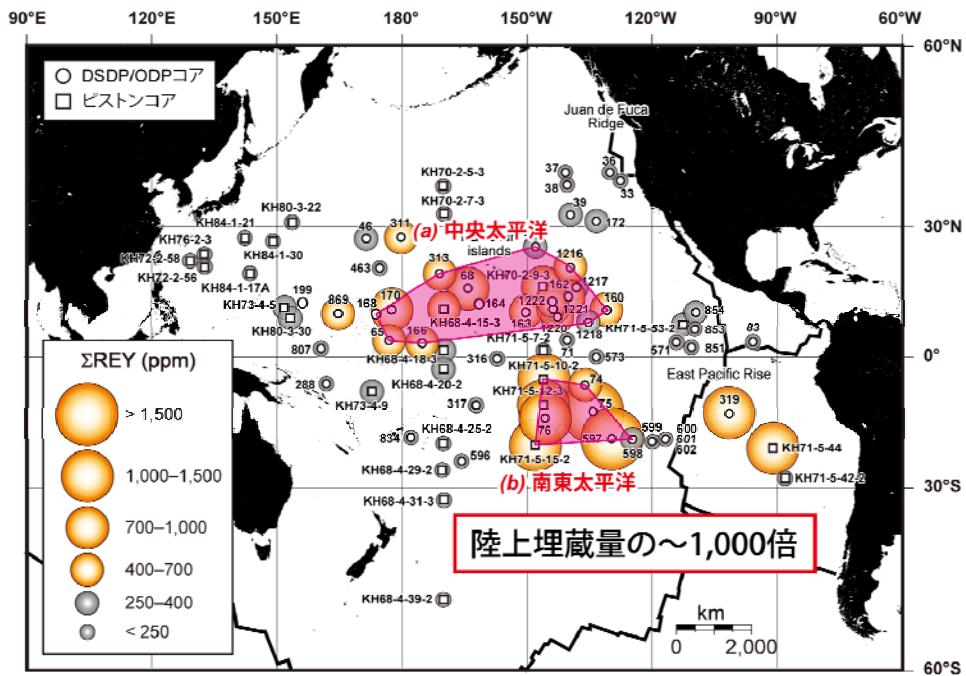


図 5 高濃度レアアース資源泥の推定分布海域と推定資源量

表 1 推定分布海域におけるレアアース資源泥の層厚と総レアアース含有量
(Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

(a) 南東太平洋				(b) 中央太平洋			
サイト	水深 (m)	レアアース資源泥の 総層厚 (m)	平均総レアアース 含有量 (ppm)	サイト	水深 (m)	レアアース資源泥の 総層厚 (m)	平均総レアアース 含有量 (ppm)
74	4,431	18.5	880	65	6,130	16.8	451
75	4,181	2.3	1,526	68	5,467	16.4	886
76	4,598	9.6	1,178	160	4,940	17.4	488
597	4,163	1.6	1,628	162	4,854	4.4	495
平均	4,343	8.0	1,054*	163	5,230	23.4	660
レンジ	4,163–4,598	1.6–18.5	880–1,628	164	5,499	29.8	720
				166	4,962	8.6	506
				168	5,420	7.1	680
				170	5,792	9.9	1,002
				313	3,484	5.7	727
				1215	5,396	25.6	759
				1216	5,153	43.7	603
				1217	5,342	43.6	525
				1218	4,826	37.8	569
				1220	5,218	33.8	570
				1221	5,175	6.4	472
				1222	4,989	70.3	641
				平均	5,169	23.6	625*
				レンジ	3,484–6,130	4.4–70.3	451–1,002

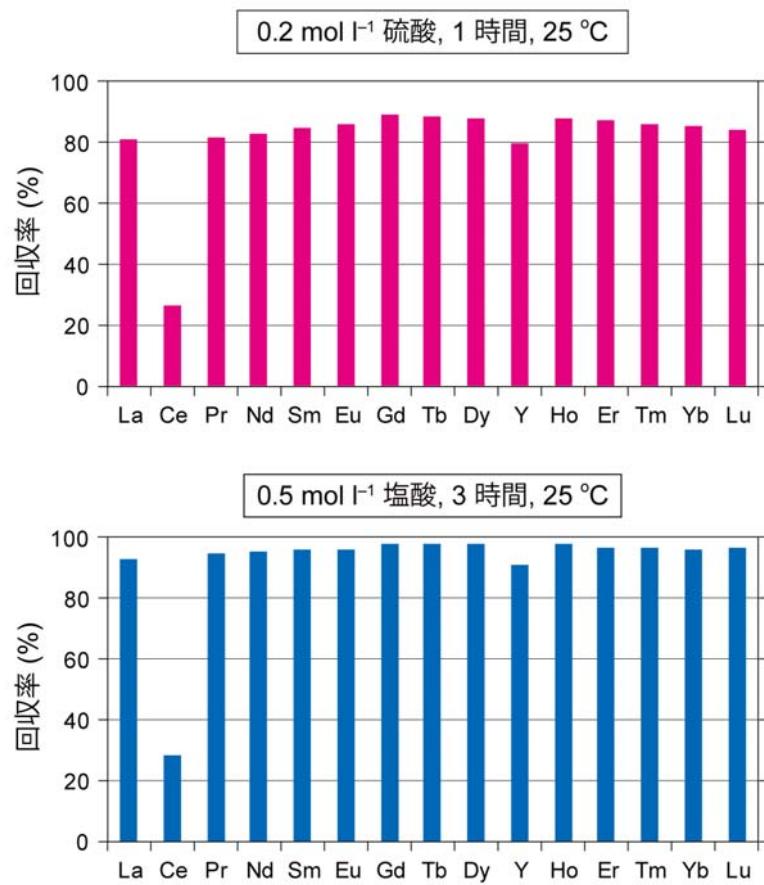


図 6 0.2 mol l⁻¹ 硫酸(上)および 0.5 mol l⁻¹ 塩酸(下)を用いたレアアース抽出結果
硫酸は 25°C, 1 時間, 塩酸は 25°C, 3 時間 (Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

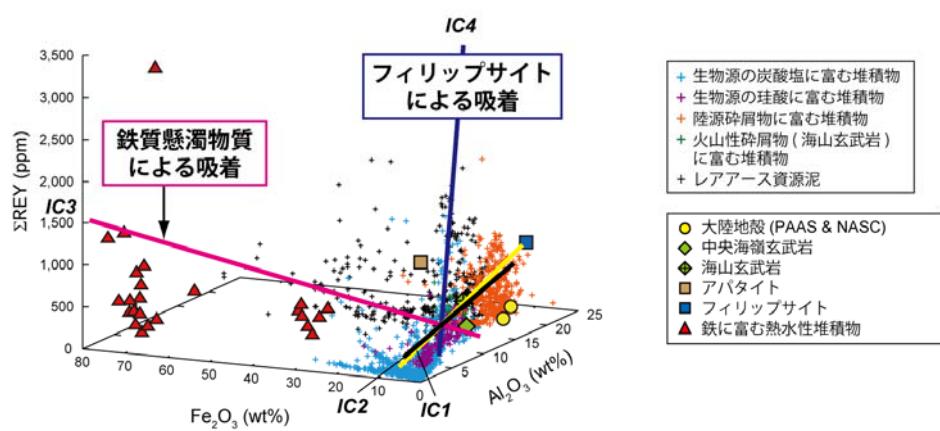


図 7 独立成分分析により推定されたレアアースホスト相
(Kato et al., 2011 *Nature Geoscience*)

5. 用語解説

注 1 レアアース

希土類元素(REE: rare-earth element). 原子番号 57 番のランタンから 71 番のルテシウムまでのランタノイド元素 15 元素の総称で、21 番のスカンジウム(Sc), 39 番のイットリウム(Y)を加えて 17 元素とすることもある。なお、原子番号 59 番のプロメチウムは自然界には存在しない。レアアースは独特的な光学的特性や磁気的特性を持つことから、ハイブリッドカーのモーターに使われる Nd-Fe-B 磁石や LED の蛍光体などの最先端グリーン・テクノロジー(省エネ・エコ技術)に不可欠な資源であり、今後も需要は増加の一途を辿ると予想されている。

注 2 レアアース資源泥

本研究により発見された、レアアースを高濃度で含有する深海底堆積物。深度 3,500 ~ 6,000 m の深海底に層状に広く分布する。海底の火山山脈(中央海嶺)の熱水活動によって放出された鉄質懸濁物質や、火山ガラス等が変質してできたフィリップサイト(ゼオライト(沸石)の一種)が、海水中のレアアースを吸着・濃集し、それらが堆積したものと考えられる(図 7)。

注 3 既存の海底鉱物資源

- ①熱水性硫化物鉱床：中央海嶺や日本近海の海底火山の熱水活動によって形成された硫化物鉱床。煙突状のチムニ一群や、それらが崩れたマウンドといった独特の形状をとる。銅、亜鉛などを多く含有し、金、銀を含むこともある。
- ②マンガンクラスト鉱床：海山などの表面を、数～十数 cm の厚さで被覆するマンガン酸化物鉱床。コバルトを多く含有し、コバルトリッチクラストとも呼ばれる。また、白金を比較的多く含む場合もある。
- ③マンガンノジュール鉱床：マンガン団塊とも呼ばれ、ハワイ沖やインド洋などの大洋底の堆積物上に広く分布するマンガン酸化物鉱床で、直径数～十数 cm の球状や楕円状を呈する。銅、ニッケル、コバルトなどを多く含有する。

注 4 レアアース含有量

レアアース含有量は一般的には百万分率(ppm: parts per million)で表す。総レアアース含有量(Σ REY)として、ランタノイド 15 元素とイットリウムの合計値を用いる。

注 5 陸上埋蔵量

「埋蔵量」とは、経済的、技術的に採掘可能な資源の量をさす。現在確認されている世界の陸上レアアース鉱床の総埋蔵量は 1 億 1,000 万トン(酸化物換算)である。

注 6 ピストンコア

船上から 5 ~ 20 m 程度の金属の筒(ピストンコアラー)を落下させて海底から採取した柱状の堆積物試料。堆積物を乱さずに層序を保ったまま採取が可能。

注 7 イオン吸着型鉱床

花崗岩が風化して形成された土壌中において、レアアースが粘土鉱物に吸着されて濃集した鉱床。中国南部(江西省、湖南省など)以外では見つかっていない。総レアアース含有量は 500 ~ 2,000 ppm 程度であるが、特に重要なレアアースであるジスプロシウム、テルビウムなどの重希土に富み、さらに薄い酸に浸出させるだけでレアアースの大部分が抽出可能という特長を持つ。世界の重

希土のほとんどはこのイオン吸着型鉱床から生産されている。レアアース資源泥の総レアアース含有量(400 ~ 2,230 ppm)はイオン吸着型鉱床に匹敵しており、総重希土含有量(70 ~ 430 ppm)はイオン吸着型鉱床(50 ~ 200 ppm)の2倍程度と非常に高い。

注 8 深海掘削計画/国際深海掘削計画

深海掘削計画(DSDP: Deep Sea Drilling Project)は1969 ~ 1983年、国際深海掘削計画(ODP: Ocean Drilling Program)は1985 ~ 2002年にかけて実施された。世界中の海洋底を掘削し、海底の岩石および堆積物を採取して研究する国際的な地球科学計画。プレートテクトニクスの実証、急激な気候変動の実態の解明、地下生命圏の重要性の認識などについて多くの実績を上げている。2003年からは統合国際深海掘削計画(IODP: Integrated Ocean Drilling Program)に発展し、継続中。

注 9 掘削コア

DSDP/ODPではボーリングによって海底掘削を行い、柱状のコア試料を採取している。これらは、テキサスA&M大学、ブレーメン大学、高知大学などに保管されており、研究者であれば申請することで自由に使用できる。

注 10 独立成分分析

情報科学分野で目覚しい発展を遂げつつあるデータ解析手法の一つであり、データ構造の非正規性に注目し、内在される独立な特徴を抽出する。この概念・手法は、多変量データ、時系列データ、画像データ、音声データなど、データの形態を問わずに成立し、脳科学分野、情報通信科学分野などで幅広く応用されている。

注 11 国際海底機構

International Seabed Authority(ISBA)。1994年11月14日設立。事務局はジャマイカのキングストン。国連海洋法条約により人類の共同の財産であると規定された深海底の資源の管理を主たる目的とし、国連海洋法条約及び第11部実施協定の規定に従って深海底における活動を組織し及び管理する機構(外務省HPより)。

注 12 マイニングコード

国際海底機構が採択する、海洋底の資源についての「概要調査及び探査に関する鉱業規則」の通称。2000年にマンガンノジュール鉱床、2010年に熱水性硫化物鉱床のマイニングコードが採択された。2011年にはマンガンクラスト鉱床の規則が採択される見通し。

6. 発表雑誌

英国科学誌 *Nature Geoscience* 電子版(2011年7月3日)に掲載予定

Yasuhiro Kato*, Koichiro Fujinaga, Kentaro Nakamura, Yutaro Takaya, Kenichi Kitamura, Junichiro Ohta, Ryuichi Toda, Takuya Nakashima and Hikaru Iwamori.

“Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements”

Nature Geoscience, published online on 3 July, 2011. (DOI 10.1038/NGEO1185)