

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06144

研究課題名(和文)独立成分分析に基づく超高濃度レアアース泥の生成機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of the genesis of extremely REY-rich mud based on independent component analysis

研究代表者

安川 和孝 (Yasukawa, Kazutaka)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：00757742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本の南鳥島周辺の排他的経済水域 (EEZ) で近年発見され、新規レアアース資源として有望視されている「超高濃度レアアース泥」の生成機構を解明することを目的とする。本研究では、平成27年度までに南鳥島EEZ内で採取された深海堆積物1192試料(うち本研究による新規データ625試料)の多元素組成データセットを構築し、独立成分分析による多変量解析を実施した。その結果、南鳥島EEZの深海堆積物の化学組成は、5つの独立な成分から構成されることが分かった。それらの深度方向変化の特徴から、超高濃度レアアース泥の生成には、底層流の強化による堆積層の削剥が密接に関連している可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study aims to elucidate the genesis of "extremely REY-rich mud" that is recently discovered within the Japanese Exclusive Economic Zone (EEZ) around Minamitorishima Island. In this study, I constructed a huge geochemical data set composed of major- and trace-element contents in bulk sediments collected from the Minamitorishima EEZ. The data set contains 1192 sediment samples, and 625 samples of them were newly analyzed by this study. Subsequently, I statistically analyzed the data matrix by using independent component analysis. As a result, I found that the multi-elemental data structure of the sediments in the Minamitorishima EEZ can be explained by five geochemical independent components. On the basis of the features of their downhole variations, it is implied that the extremely REY-rich mud is closely associated with an enhancement of a bottom water current.

研究分野：資源工学，地球化学

キーワード：海洋資源 地球化学 多変量解析 独立成分分析

### 1. 研究開始当初の背景

レアアースは、最先端のハイテク製品や低環境負荷技術に必要な不可欠な元素群である。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）が太平洋の広範囲に分布しており、潜在的なレアアースの巨大鉱床となる可能性が報告された (Kato et al., 2011)。その後、日本の排他的経済水域である南鳥島周辺海域（以下「南鳥島 EEZ」という）にもレアアース泥の存在が確認され、その詳細な分布や品位の把握が新しくかつ重要な資源工学上の課題となってきた。こうした背景の中、2013 年 1 月に海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と東京大学が実施した KR13-02 航海によって、南鳥島 EEZ 内で総レアアース濃度が 6,000 ppm を超える「超高濃度レアアース泥」が発見され、日本が独自に開発可能な新規レアアース資源として注目を集めることとなった。

この超高濃度レアアース泥の成因は未解明であり、その分布は多数の堆積物コア試料を採取することで把握するほかない。そこで、より効率的な資源探査のための方策として、深海底で特異的なレアアース濃集を引き起こす機構を本質的に理解し、高品位のレアアース泥が生成するための必要条件を満たす有望海域を絞り込むという、理論的なアプローチが考えられる。

これを実現するには、レアアース泥の起源成分を特定する必要がある。深海堆積物は、海底熱水活動や生物体、大陸地殻などに由来する多様な成分の混合により形成される。その化学組成の特徴を定量的に把握することが、起源成分を特定するための重要な鍵となる。超高濃度レアアース泥を含む南鳥島 EEZ の深海堆積物については、その化学組成や鉱物組成などの地球化学データが蓄積されつつあるものの、これらの情報は十分に活用されていなかった。

### 2. 研究の目的

深海底で特異的な元素濃集を引き起こすメカニズムを明らかにし、高品位のレアアース泥が生成するための必要条件を把握することができれば、資源ポテンシャルの高い有望海域に焦点を絞った効率的な探査が可能になると期待される。そこで本研究では、超高濃度レアアース泥の生成機構を、地球化学データセットの多変量統計解析に基づき解明することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、2013 年から 2015 年にかけて南鳥島 EEZ 内で JAMSTEC と東京大学により実施された 6 回の調査航海 (KR13-02, MR13-E02, KR14-02, MR14-E02, MR15-E01, MR15-02 航海) において、ピストンコアを用いて採取された深海堆積物試料を対象とした。このうち、2014 年末までに採取されたコアから分取された 567 試料については、研究

開始時点で既に化学組成データが利用可能であった。本研究では、2015 年に行われた 2 航海で採取したコアから 625 試料を分取し、新規に全岩化学組成分析を実施した。

堆積物試料は 40°C で乾燥させた後、メノウ乳鉢・乳棒を用いて均質になるまで粉末化し、全岩化学組成分析に供した。主成分元素濃度については、ガラスビード法を用いた蛍光 X 線分析により分析を行った。微量元素濃度についてはフッ酸-硝酸-過塩素酸により分解した試料溶液を誘導結合プラズマ質量分析により測定した。

本研究で新規に取得した主成分及び微量元素の組成データと、本研究課題の開始以前に得られていた組成データを統合し、南鳥島 EEZ 内の深海堆積物 1,192 試料×43 元素の大規模化学組成データセットを構築した。このデータセットに対して、独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) を適用した。ICA とは、データ構造の非正規性を利用してデータに内在する統計的に独立な情報を分離・抽出する多変量解析手法である。ICA は 1990 年代に脳科学や情報科学分野で確立され、現在では画像の圧縮やノイズ除去、脳波・脳磁図の分離など、その応用範囲は分野を超えて多岐に渡る (Hyvärinen et al., 2001)。本研究では、この ICA を用いて南鳥島 EEZ 内の深海堆積物を構成する地球化学的独立成分を抽出し、それらの特徴を基に、超高濃度レアアース泥の生成機構を検討した。

### 4. 研究成果

構築した南鳥島 EEZ 内堆積物の全岩化学組成データセットのうち、レアアース元素については、ランタノイド及びイットリウムを合わせて REY (rare-earth elements and yttrium) とし、1 つの変数として扱った。ただし、地球化学的挙動の異なるセリウム (Ce) については他のレアアース元素と区別し、単独の変数とした。すなわち、レアアースについては「Ce を除いた総レアアース (以下単に REY と記す)」及び「Ce」という 2 種類の変数に分けて解析に用いた。これらと、他の主成分元素及び微量元素濃度を合わせて、1,192 試料×30 元素群の濃度データセットを ICA により解析した。

解析の結果、南鳥島 EEZ 内の深海堆積物の化学組成は、全分散 (全情報量) の 88% を 5 つの成分で説明できることが分かった。本研究で抽出した地球化学的独立成分 (independent component, IC) は、堆積物の化学組成が変化する互いに独立な方向を表すベクトルとして得られ、堆積物を構成する起源物質や、それらに作用する物理化学的過程の影響を反映していると考えられる。なお、各 IC に付された番号は便宜的なものであり、IC 間の重要度の差異を表すものではないことに注意が必要である。以下、それぞれの IC の特徴について述べる。

IC1 は, Ca, P, REY, Sc, Sr, Ce, Th, U の正相関を抽出しており, その信号強度 (IC 得点) の深度方向変化は REY 濃度のプロファイルと一致した. このことから, IC1 は REY を濃集した生物源リン酸カルシウムが堆積物の全岩化学組成に与える影響を抽出していると考えられる.

IC2 は, Ti, Fe, Na, V, Cr, Nb, Ba, Ta の正相関を抽出しており, IC2 得点の深度方向変化を見ると, 超高濃度レアアース泥を境界として, いずれのコアでも IC2 の符号がステップ的に変化することが分かった. これらの特徴は, IC2 が堆積物を構成する大陸起源の碎屑性成分の違いを抽出しており, 超高濃度レアアース泥を挟んで大陸起源成分の組成が切り替わっていることを示唆している. これは, 超高濃度レアアース泥の生成が, 海底堆積物の削剥を伴うような底層流の強化と関係している可能性を示唆している (Ohta et al., 2016).

IC3 は, Mg, V, Cr, Rb, Ba, Pb, Th の正相関を抽出しており, 特に Ba や Rb によって特徴づけられる. IC3 の深度方向変化は, IC2 とは異なり層準毎に符号が変化し, 時間的に一方向の変化を示さない. これらの特徴から, IC3 は, IC2 とは無関係に供給される別の碎屑性成分 (火山起源等) の影響を反映している可能性が考えられる.

IC4 は, Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Pb の正相関を抽出しており, IC4 の符号は堆積層の色に対応することが分かった. すなわち, IC4 得点が正の値を取る堆積層は堆積物の色が暗く, 負の値を取る堆積層は堆積物の色が明るい. これは, IC4 が堆積物中のマンガン酸化物量の違いに対応することを示している.

IC5 は, Cu, Ni, Zn, Ba の正相関を抽出している. IC5 得点の深度方向変化を見ると, 他の IC とは異なり層準毎の規則性が不明瞭であった. 更なる検討が必要ではあるが, IC5 は堆積層内での続成過程における元素移動の痕跡を抽出している可能性がある.

以上のように, 本研究によって, 超高濃度レアアース泥を含む南鳥島 EEZ 内の深海堆積物の多元素化学組成から, 統計的に独立な 5 つの成分を分離・抽出することに成功した. それらの特徴から, 超高濃度レアアース泥の生成は堆積物層の多元素化学組成のステップ的な切り替わりと関連していることが示唆された.

本研究では, 深海堆積物・鉱物資源の化学組成データ解析における ICA の有効性を立証し, 地球化学分野及び資源工学分野に新たな展開の可能性を示した. 本研究課題を通じて確立した, ICA による堆積物化学組成データの統計的解析手法と上記成果については, 以下に示す論文及び学会発表等で一部を公表したほか, 成果をまとめた原著論文を国際誌に投稿すべく準備中である.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. **Yasukawa, K.**, Nakamura, K., Fujinaga, K., Iwamori, H. and Kato, Y. Tracking the spatiotemporal variations of statistically independent components involving enrichment of rare-earth elements in deep-sea sediments. *Scientific Reports* **6**, 29603, 2016. DOI:10.1038/srep29603. (査読有)
2. Ohta, J., **Yasukawa, K.**, Machida, S., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Iijima, K., Suzuki, K. and Kato, Y. Geological factors responsible for REY-rich mud in the western North Pacific Ocean: Implications from mineralogy and grain size distributions. *Geochemical Journal* **50**, 591-603, 2016. DOI:10.2343/geochemj.2.0435. (査読有)
3. Fujinaga, K., **Yasukawa, K.**, Nakamura, K., Machida, S., Takaya, Y., Ohta, J., Araki, S., Liu, H., Usami, R., Maki, R., Haraguchi, S., Nishio, Y., Usui, Y., Nozaki, T., Yamazaki, T., Ichiyama, Y., Ijiri, A., Inagaki, F., Machiyama, H., Iijima, K., Suzuki, K., Kato, Y. and KR13-02, MR13-E02 Leg 2 and KR14-02 Cruise members. Geochemistry of REY-rich mud in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island. *Geochemical Journal* **50**, 575-590, 2016. DOI:10.2343/geochemj.2.0432. (査読有)
4. Iijima, K., **Yasukawa, K.**, Fujinaga, K., Nakamura, K., Machida, S., Takaya, Y., Ohta, J., Haraguchi, S., Nishio, Y., Usui, Y., Nozaki, T., Yamazaki, T., Ichiyama, Y., Ijiri, A., Inagaki, F., Machiyama, H., Suzuki, K., Kato, Y. and KR13-02 Cruise members. Discovery of extremely REY-rich mud in the western North Pacific Ocean. *Geochemical Journal* **50**, 557-573, 2016. DOI:10.2343/geochemj.2.0431. (査読有)
5. 野崎達生・飯島耕一・藤永公一郎・中村謙太郎・高谷雄太郎・**安川和孝**・大田隼一郎・加藤 泰浩: 第 4 の海底鉱物資源『レアアース泥』. *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan* **70**, 90-96, 2016 (査読無).

[学会発表] (計 5 件)

1. **安川和孝**・中村謙太郎・藤永公一郎・岩森光・加藤泰浩, レアアース泥の起源と地球システムのダイナミクス: 独立成分分析による数理統計的アプローチの成果. 日本地質学会第 123 年学術大会, R24-O-2, 2016 年 9 月 11 日, 日本大学 (東京・桜上水). 【招待講演】
2. **Yasukawa, K.**, Nakamura, K., Fujinaga, K.,

Iwamori, H. and Kato, Y. Spatiotemporal distribution of independent components constituting deep-sea sediments. *Goldschmidt Conference*, 2016年6月29日, パシフィコ横浜 (神奈川・横浜).

3. **安川和孝**・中村謙太郎・藤永公一郎・大田隼一郎・岩森光・加藤 泰浩, 南鳥島 EEZ 内の深海堆積物を構成する地球化学的独立成分. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, BPT05-04, 2016 年 5 月 25 日, 幕張メッセ (千葉・幕張).
4. **安川和孝**・中村謙太郎・加藤 泰浩・池原実, 前期始新世「超温暖期」を記録するインド洋深海堆積物の多元素組成データ構造. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS17-P28, 2016 年 5 月 23 日, 幕張メッセ (千葉・幕張) 【招待講演】
5. **安川和孝**・中村謙太郎・藤永公一郎・岩森光・加藤 泰浩: 深海堆積物へのレアアース濃集を支配する地球化学的独立成分. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MTT27-04, 2016 年 5 月 22 日, 幕張メッセ (千葉・幕張).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://egeo1.geosys.t.u-tokyo.ac.jp/kato/yasukawa.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安川 和孝 (YASUKAWA, Kazutaka)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 00757742

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし