

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05658
研究課題名：地球環境変動・資源生成の真に革新的な統合理論の創成

研究代表者氏名（ローマ字）：加藤泰浩（KATO Yasuhiro）
所属研究機関・部局・職：東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：40221882

研究の概要：

本研究は、海洋底の大部分を占める遠洋性粘土をキーマテリアルとして捉え、「化学層序プローブ」で網羅的に解析することで、グローバル環境変動・物質循環のダイナミクスの全容を解明する。また、有用元素の循環を定量的に議論することで、資源成因の支配プロセスの全体像を解明し、環境変動や資源生成を統一的な枠組みで説明可能な、真に革新的なグローバル物質循環についての統合理論の創成を目指す。

研究分野：地球・資源システム工学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：海底鉱物資源、資源探査、グローバル物質循環

1. 研究開始当初の背景

地球は膨大な量の液体の水を湛えた海洋が存在することにより、太陽系の中でも特に活発にエネルギーや物質が循環しているユニークな惑星である。その海洋の約70%の領域が大陸から遠く離れた「遠洋域」に属する。遠洋域の海洋は、CO₂や栄養塩、熱エネルギー、その他様々な元素・物質の「地球表層における最大の貯蔵庫」である。遠洋域の海底では主として遠洋性粘土が堆積している。遠洋性粘土は、遠洋域の環境変動の痕跡を非常に長期に渡り保存しており、地球表層における環境・物質循環の変遷史の最も重要な記録媒体である。しかしながら、外見上の特徴に極めて乏しく、年代決定に一般的に用いられる有孔虫や放射虫なども産出せず、また極めてゆっくりと堆積するために古地磁気記録が不明瞭となり、年代決定が非常に難しいという大きな欠点を有する。そのため、多くの研究者がその重要性を認識しつつも、系統的に解析する手法を確立できず、研究することを敬遠してきた。研究代表者らは、遠洋性粘土のもつ本質的な重要性に着目してその実態解明に果敢にチャレンジし、先端産業に必須のレアアースを濃集した新たな資源「レアアース泥」を世界で初めて発見した。そして、外見上均質な遠洋性粘土の層序を多元素の化学組成の特徴から詳細に読み解くことに成功した。また、海水Os同位体比と魚類の歯や鱗の微化石（イクチオリス）の生層序を組み合わせることで、遠洋性粘土の高精度年代決定を可能にした。さらに、これらを統合して、遠洋性粘土に記録された情報の時系列変化を読み解く手法「化学層序プローブ」を世界で初めて開発した。従来研究で手出しできなかった遠洋性粘土に、「化学層序プローブ」を用いて科学的に切り込む術を世界で初めて手に入れたのである。これにより研究代表者らは、北西太平洋で採取された遠洋性粘土コア試料を対比し、幾つかの時代の層準が広範囲で欠落していることを見出した。これまで変化に乏しく静穏な環境と考えられてきた遠洋域の深海底で、ダイナミックな削剥イベントが繰り返し発生していたことを初めて突き止めた。そして、これらの削剥イベントをもたらした強い底層流が粗粒なレアアース濃集鉱物を選択的に堆積させることで、高品位なレアアース泥が生成したこと、およびそれらが南北太平洋の広域で特定の時代に生じたことが見えてきた。さらに、遠洋性粘土には、海底熱水鉱床の生成に関連する中央海嶺の火山・熱水活動（すなわちマントル活動）の盛衰、およびマンガン団塊・コバルトリッチクラストの生成に関連するマンガン酸化物沈殿フラックスの変動が記録されていることも明らかとなりつつある。このように、資源を生み出す大規模な元素濃集現象は地球環境の変化と密接にリンクしており、その環境変動は様々な元素・物質の全地球スケールでの循環（グローバル物質循環）により支配されている。よって、広大な遠洋域に堆積する遠洋性粘土に記録されたグローバル物質循環の情報を本質的かつ包括的に理解すれば、有望な資源の生成場を理論的に絞り込むことも自ずと可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、様々な海域で採取された遠洋性粘土に対して、研究代表者らが開発した「化学層序プローブ」を適用することによって、遠洋性粘土に記録された時系列情報をグローバルスケールでマッピングし、地球規模の物質循環のダイナミクスの全容を一気に解明することを目的とする。「化学層序プローブ」により広域対比することで、削剥により「失われた遠洋性粘土層」の全海洋スケールの分布をも推定可能となる。これによって、地球表層における様々な元素の物質収支とそれを支配する因子・プロセスを定量的に明らかにすることで、環境変動や資源生成（有用元素の濃集）が初めて統合的に理解可能となる。従来の海底資源探査のような「偶然に」ではなく、グローバル物質循環の包括的理解に基づき「確信的に」有望な鉱床を次々と見つけ出すことこそが、本研究により創造される資源工学のパラダイムシフトである。さらに、本研究の対象である遠洋性粘土は、気候や海洋循環などを扱う地球環境学分野と、火山やマントルを対象とする固体地球科学分野の橋渡しとなる、大気-海洋系と固体地球の最も重要なインターフェースでもある。本研究は、このインターフェースの精緻な描像を初めて取得することにより、グローバル物

質循環という真に俯瞰的なスコープで、気候変動から火山・マントル活動を含む地球上の諸現象を統一的に説明する理論の創成を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、多元素情報と年代情報を統合した「化学層序プローブ」により、遠洋性粘土の広域対比・解析を行う。まず、国際深海科学掘削計画 (IODP) コアを対象として高精度化学分析を実施し、遠洋性粘土の大規模・高次元地球化学データセットを構築する。次に、Os 同位体比とイクチオリス層序を組み合わせることで、遠洋性粘土コアに高精度の時間軸を入れる。さらに、様々な海域の遠洋性粘土が持つ全元素情報を対象として、独立成分分析等を用いた高次元データ解析を実施する。これにより、遠洋性粘土の化学組成の時間変化とその原因、さらには堆積層の削剥の記録などを網羅的に把握することができる。また、得られた遠洋性粘土の全元素情報とその時間変化を組み込んだグローバル物質循環モデルを構築し、大気-海洋系と固体地球の間の物質収支およびそのフラックス変動を定量的に把握する。その一環として有用元素の循環に着目することで、海洋における資源生成メカニズムの全体像を明らかにする。

4. これまでの成果

本研究において研究代表者らは、太平洋全域で採取された遠洋性粘土試料の高精度化学分析および堆積年代決定を行い、太平洋広域における遠洋性粘土の「化学層序プローブ」を用いた情報抽出に成功した。また、本研究および過去2回の基盤研究 (S) (2010~2014年度および2015~2019年度、研究代表者：加藤泰浩) で取得した膨大な堆積物化学組成データセットを統計的に解析し、プレート運動および堆積年代を考慮することでそれらの時空間分布を可視化することに成功した。これは、海洋・陸上の様々な地質試料に関する地球化学データ解析の新しいプロトコルを世界に向けて提示した、極めてインパクトの大きな成果である。さらに、こうした地球の物質循環の変化と遠洋性粘土への元素濃集過程の関連を検討するために、海洋と堆積物の間におけるレアアースのマスバランスについてモンテカルロシミュレーションを適用し、定量的に検討した。その結果、堆積速度が一定値より小さくかつ魚類生産性が高い堆積環境下でのみ超高濃度レアアース泥は生成しうることを示した。このような堆積環境は、定性的にはこれまで代表者らが提案している海山近傍での底層流強化という地質学的条件を支持する。これに加えて、遠洋性粘土の最表層に広く分布するマンガンジュール試料を対象に、X線CT分析による非破壊3次元構造解析と微小領域蛍光X線分析による2次元断面元素マッピングを行い、マンガンジュールの成長履歴を詳細に解読した結果、南極の周囲を流れる下部周極深層水に端を発する海洋深層の海流が北上し、南鳥島海域に長期的に流入したことがマンガンジュールの形成・成長を促したことを初めて明らかにした。さらに、地球環境変動の解読とグローバル物質循環の解明については、南太平洋ラウ海盆の海底掘削コア試料の全岩化学組成とOs同位体比の分析・解析により、過去30万年間の氷期-間氷期サイクルに連動して海水のOs同位体比が変動していることを見出した。この成果は、近年の地球温暖化で注目を集めている氷床体積の変動が、大気・海洋・生物圏のみならず、固体地球圏のプロセスにも影響しうることを示した点で画期的といえる。これは従来、大陸と海底火山で別個に議論されていたが、本研究ではそれらの影響を統合的に海水のOs同位体比から復元し、新しい地球化学的証拠を提示することに成功した。

5. 今後の計画

地球表層における様々な元素の収支とそれを支配する因子・プロセスを定量的に明らかにすることで、環境変動と資源生成(有用元素の濃集)の成因的関連の全容が初めて統合的に理解可能となる。これにより、有望な新資源の真に有効な探査指針が得られると期待される。さらに、本研究の対象である遠洋性粘土は、大気-海洋系と固体地球の最も重要なインターフェースでもある。本研究は、このインターフェースの精緻な描像を初めて取得することにより、グローバル物質循環という真に俯瞰的なスコープで、気候変動から火山・マントル活動を含む地球上の諸現象を統一的に説明する理論の創成を目指す。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Tanaka et al.: "Secular variations in provenance of sedimentary components in the western North Pacific Ocean constrained by Sr isotopic features of deep-sea sediments" *Geochemistry Geophysics Geosystems* **23**, e2021GC009729 (2022)

Ohta et al.: "Geological features and resource potential of deep-sea mud highly enriched in rare-earth elements in the Central Pacific Basin and the Penrhyn Basin" *Ore Geology Reviews* **129**, 104440 (2021)

Kuwahara et al.: "Rapid coupling between solid earth and ice volume during the Quaternary" *Scientific Reports* **11**, 5695 (2021)

Yasukawa et al.: "Geochemical features of Fe-Mn micronodules in deep-sea sediments of the western North Pacific Ocean: Potential for co-product metal extraction from REY-rich mud" *Ore Geology Reviews* **127**, 103805 (2020)

Tanaka et al.: "Chemostratigraphic Correlations of Deep-Sea Sediments in the Western North Pacific Ocean: A New Constraint on the Distribution of Mud Highly Enriched in Rare-Earth Elements" *Minerals* **10**, 575 (2020)

7. ホームページ等

<https://kato-nakamura-yasukawa-lab.jp/>