

審査の結果の要旨

氏名 安川和孝

本論文は、「独立成分分析によるレアアース泥の生成機構の解明」と題し、全7章から構成される。

第1章では、本研究の背景について述べている。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「レアアース泥」をはじめとする深海底堆積物について概説するとともに、それらの構成要素の時空間変化を紐解くことで、有用資源の生成機構とグローバル物質循環や環境変動の関連を体系的に理解できる可能性について言及している。そのための有用な手段として地球化学データの多変量解析を挙げ、従来用いられている古典的な手法にはデータ構造に正規性を要求するという問題点があることを指摘するとともに、新しいアプローチとして独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) を適用することを提案している。

第2章では、研究対象試料について記載がなされている。本研究では、国際深海掘削計画及び東京大学海洋研究所により太平洋及びインド洋の深海底から採取された堆積物コア試料が用いられた。コア試料の採取方法について概説した後、合計101地点から採取された個別のコアについて岩相を記載している。

第3章では、化学分析手法について説明がなされている。蛍光X線分析装置を用いた主成分元素分析及び誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた微量元素分析について述べている。

第4章では、一般的な独立成分分析の数学的原理とアルゴリズムにつき概説した後、実際の深海底堆積物の化学組成データに対する適用方法について述べている。

第5章では、太平洋及びインド洋深海底堆積物の化学組成データセットに見られる統計的な特徴が記載されている。まず、検出限界以下のデータの扱いについて検討した後、本研究で対象とする太平洋及びインド洋の深海底堆積物試料 (合計3,968試料) について、個別の元素濃度を確率変数とみなし、その基本的な統計量及び標準化変数を用いてデータ構造の特徴を記述している。また、各海洋のデータ構造間に見られる差異とその要因について検討している。

第6章では、本研究で構築したデータセットに対し独立成分分析を適用し、その結果について記載している。まず、次元低減について検討し、抽出する独

立成分 (IC) の数を 7 とした。続いて、非正規性の評価関数及び直交化法の異なる 6 通りの解析結果を比較し、IC 空間に投影したデータ分布が最も良い直交性を示す場合を標準的な結果と定義している。この標準的な結果について、各 IC と元素濃度の関係を整理するとともに、データに人工的な擾乱を与えることで解析結果の頑健性評価を行っている。さらに、文献等により生層序学的情報が利用可能な試料について年代値の推定を行うとともに、過去 6,500 万年間の新生代における試料掘削地点及び大陸・海嶺の位置をプレートテクトニクスに基づき復元し、抽出した各 IC の時空間変化をマッピングしている。

第 7 章では、各 IC の表す地球化学的意味を解釈し、特にレアアース濃集を示す成分について詳細な検討を行い、レアアース泥の生成機構について議論を行っている。組成空間における IC ベクトルの方向と IC 空間に投影されたデータ分布の特徴から、IC1 は Ce と P に富むレアアース泥、IC3 は生物源炭酸カルシウム、IC4 は P に富むレアアース泥、IC5 は生物源シリカ、IC6 は火山性砕屑物、IC7 は熱水起源 Fe-Mn 酸化水酸化物を表す独立成分であることが示されている。IC7 は中央海嶺からの熱水プルームに含まれる Fe-Mn 酸化水酸化物が海水からレアアース等の元素を取り込むことで生成する、熱水起源型レアアース泥に対応する。一方、IC1 と IC4 は、より高いレアアース濃度を持つ遠洋性粘土型レアアース泥と呼べるものであり、Ce を選択的に濃集する海水起源 Fe-Mn 酸化物 (δMnO_2) と魚類の歯や骨として含まれるリン酸カルシウム (apatite) の量の違いにより特徴づけられる。IC1 と IC4 の違いを生み出す要因としては、堆積速度の違いや海水中の Fe-Mn 酸化水酸化物コロイド濃度の不均質、apatite の沈積フラックスの不均質といった環境条件の違いが想定される。また、レアアース泥に含まれるレアアースの起源は海水であると考えられることから、深海底におけるレアアースの沈積フラックスに関する定量的な検討を行っている。これらの結果から、非常に遅い堆積速度 (~ 0.5 m/Myr) がレアアース泥の生成に重要な必要条件であることが示された。さらに、IC1 型レアアース泥の時空間分布と新生代の大陸配置及び気候変動の関連を検討した結果、全球的に温暖であった前期始新世には偏西風による南太平洋への大陸起源物質の供給が現在よりも少なく、非常に堆積速度の遅い環境下でレアアース泥の生成が起こっていた可能性が示唆された。

以上、本研究では、ICA を用いた新たなアプローチにより、プレート運動や環境変動に関連して生じる堆積速度の非常に遅い条件下でレアアース泥が生成することを明らかにした。これは、高品位のレアアース泥が存在する有望海域の選定に資する重要な成果であり、システム創成学専攻の重点研究分野の 1 つであるグローバル循環システムに関する新たな知見をもたらすものである。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。