

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32503

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20354

研究課題名（和文）海洋生態系変遷から紐解く地球環境変動と高品位レアアース泥生成のリンケージ解明

研究課題名（英文）Elucidating the linkage between changes of marine ecosystems and deposition of deep sea mud highly enriched in rare earth elements

研究代表者

見邨 和英（Mimura, Kazuhide）

千葉工業大学・次世代海洋資源研究センター・主任研究員

研究者番号：10909435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、新規資源として注目される深海堆積物「レアアース泥」の成因を、海洋生態系の変遷との関連から明らかにすることを目的とした。本研究ではまず、魚類の歯や鱗の微化石「イクチオリス」を、深層学習に基づいて顕微鏡画像から自動で検出する技術確立した。この深層学習システムを用いて太平洋の深海堆積物から網羅的にイクチオリス観察を行った。この結果、南鳥島周辺海域における高品位なレアアース泥の生成に、より古い時代の堆積物が再堆積した可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イクチオリスを用いた海洋生態系変遷史の解釈は近年大きな注目を集めているが、熟練の技術を持つ観察者が時間をかけて実施する必要があることから十分な観察が進んでいなかった。本研究で確立した観察技術により、網羅的なイクチオリス観察が可能になり、今後層序学や古環境学の議論を大きくアップデートすることが期待される。さらに、この技術はあらゆる微化石や粒子鉱物の観察に適用可能であることから、学術的・社会的意義の大きい成果であるといえる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to elucidate the linkage between deposition of deep-sea mud highly enriched in rare earth elements, termed as REE-rich mud, and changes of marine ecosystems. In this study, deep-learning based system to detect microfossil fish teeth and denticles, called “ichthyoliths” from microscopic images, was constructed. Using the system, ichthyoliths were observed from deep-sea sediments obtained at various areas of the Pacific Ocean. Based on the observation, it was suggested that redeposition of older sediments affected the occurrence of mud high grade REE-rich mud.

研究分野：資源地球学

キーワード：海底鉱物資源 レアアース泥 微化石 機械学習

1. 研究開始当初の背景

レアアースは、風力発電や電気自動車など最先端の低環境負荷技術に不可欠な元素群であるが、その世界的な生産は寡占状態にあることが問題視されている。この資源問題を背景として、レアアースを高濃度で含む深海堆積物「レアアース泥」が新たな海底鉱物資源となる可能性が報告された (Kato et al., 2011)。続く調査により、総レアアース濃度が陸上鉱床の約 20 倍にも達する「超高濃度レアアース泥」が日本の南鳥島周辺の排他的経済水域内で発見されたことで、この国産レアアース資源の実開発に向けた機運も急速に高まっている (Takaya et al., 2018)。このような高品位なレアアース泥を広大な海洋底から効率的に探査するためには、深海堆積物にレアアースが濃集するメカニズムを明らかにし、資源の生成する海域を理論的に制約することが有効である。

先行研究によって、深海堆積物におけるレアアースの主要なホスト相が魚類の微小な骨片であることが明らかになっている (Takaya et al., 2018; Kashiwabara et al., 2018)。従来、レアアース泥が堆積するような遠洋域では魚骨片は概ね一定のフラックスで供給されると考えられてきた。このため、魚骨片を希釈する大陸由来の風成塵などのフラックスが小さいことが、レアアースの濃集に重要な条件であると考えられてきた (Toyoda et al., 1990; Yasukawa et al., 2016)。これに対し研究代表者らは、地球の環境変動に伴って魚類の生産性が変化し、魚骨片のフラックス自体が増加することで、高品位なレアアース泥が形成されることを明らかにした (Ohta et al., 2020)。この知見に基づく、遠洋域における魚類の生産性が地球環境変動に対してどのように応答するかを明らかにすることが、高品位なレアアース泥の成因を解明するための重要な鍵となる。

2. 研究の目的

近年、魚類の歯や鱗の微化石「イクチオリス」が魚類の生産性や海洋生態系の変遷を理解するための重要なツールとして注目されている (Sibert et al., 2020)。そこで本研究では、まず網羅的なイクチオリス観察に基づいて、地球の環境変動に対する海洋生態系の応答メカニズムを明らかにする。さらに、高精度な堆積年代決定を行うことで、魚類の生産性が地球史の中で「いつ・どこで・なぜ」高まったのかを明らかにし、魚骨片を濃集した高品位なレアアース泥の成因および分布を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、南北太平洋の様々な海域で採取された深海掘削コアを検討の対象とした。これらのコアは、レアアース泥の堆積学上の区分である遠洋性粘土を厚く連続的に回収しており、時代や地球のプレート運動を考慮した堆積場のバリエーションを議論するのに適したコアを選定したものである。

次に、イクチオリス微化石を網羅的に観察するため、顕微鏡画像から自動でイクチオリスを検出する深層学習システムの開発を行った。そして、開発したツールを活用して、上述した深海堆積物試料から網羅的なイクチオリスの検出を実施した。

さらに、堆積物のオスミウム同位体比を分析し、既知である海水のオスミウム同位体比の時代変動曲線と対比する「オスミウム同位体比層序」に基づいて、堆積年代をより高精度で決定することを試みた。

4. 研究成果

(1) 深層学習を用いた微化石観察ツールの開発

微化石の観察に深層学習を適用した先行研究は複数存在する (Itaki et al., 2020; Marchant et al., 2020) が、これらの研究ではいずれも顕微鏡画像から個々の粒子を切り出す段階までは、深層学習ではなくルールベースでの検出を行っており、その際に顕微鏡画像で半透明なイクチオリスの認識が困難であるという課題があった。そこで本研究では、画像に含まれる複数の物体の位置とクラスを同時に推定することが可能な、物体検出

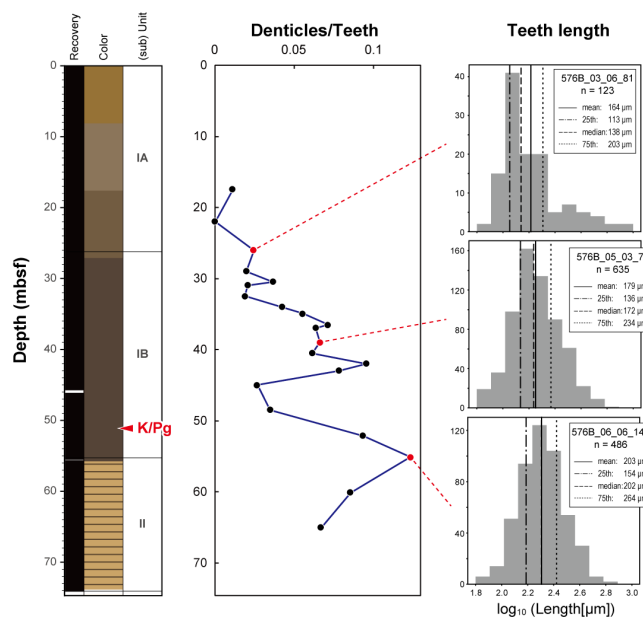


図 1. 北西太平洋の深海掘削コア DSDP Site 576 において深層学習モデルによって効率的に取得された鱗と歯の個数比、および代表的な層準における歯のサイズ分布。

と呼ばれる深層学習手法を検討した。

本研究ではまず、物体検出モデル Mask R-CNN と画像分類モデル EfficientNet-V2 を組み合わせたイクチオリス検出システムを構築した。精度評価を行った結果、Mask R-CNN のみでは F1 score が 10.5% にとどまったのに対して、画像分類モデル EfficientNet-V2 を併用することで、Mask R-CNN モデルの誤検出を取り除くことができ、F1 score を 83.5% まで高めることができた。この内容は国際誌 *Applied Computing and Geosciences* にて報告した。さらに教師データの蓄積やモデルの検討を進め、物体検出モデル YOLO-v7 のみを用いたイクチオリスの検出モデルも開発した。深層学習を用いることで、イクチオリス微化石を効率的に観察できるようになっただけでなく、先行研究の堆積環境や生態系変遷の議論に使われてきた、歯と鱗の個数比や歯のサイズ分布などの指標も効率的に取得できるようになった (図 1)。この内容は国際誌に投稿中であるほか、プレプリントサーバー *ESS Open Archive* にて公開されている。

(2) 開発したツールによる網羅的なイクチオリス観察

開発した深層学習ツールを活用して、南北太平洋の 6 サイト、121 層準から合計で約 12 万個のイクチオリスを観察した。観察の結果、鱗と歯の個数比が、中生代白亜紀と新生代古第三紀の時代境界 (K/Pg 境界、およそ 6,600 万年前) を境に減少する事が明らかとなった (図 1)。先行研究において、鱗と歯の個数比は海洋生態系におけるサメ類の割合の指標とされており (Sibert et al., 2016)、白亜紀から新生代に入った時に硬骨魚類の数が増えることでサメ類の割合が相対的に減少したことが指摘されている。本研究の結果、太平洋の全域でこの先行研究と整合的な結果が得られた。また、南鳥島周辺の排他的経済水域内で採取された深海堆積物コア MR14-E02 PC05 において、白亜紀に特徴的に出現する種が新生代のごく一部の層準にも例外的に出現することを確認した (図 2)。この層準は、レアアースが異常濃集している「超高濃度レアアース泥」の層準に対応しており、高品位なレアアース資源の生成に再堆積が関係していることが示唆された。

(3) オスミウム同位体比分析

本研究では、超高濃度レアアース泥が確認された北西太平洋の深海掘削コア ODP Site 1149 (Mimura et al., 2019) において 33 試料のオスミウム同位体比分析を実施した。その結果、イクチオリスの生層序から制約される堆積年代とは整合的でない同位体比が得られた。この原因としては、堆積物からオスミウムを抽出する酸処理のプロセスにおいて、火山ガラス等の海水に由来しないオスミウムが抽出されてしまったため、堆積当時の海水のオスミウム同位体比とは異なる値が得られた可能性が考えられた。今後は、海水起源成分だけを抽出できるような Os 同位体分析手法の再検討、遠洋性粘土において古くから堆積速度の指標とされてきたコバルトのフラックス (Zhou and Kyte, 1992; Dunlea et al., 2015) 等を組み合わせてより複合的に年代を制約できる手法の検討などを行い、堆積年代モデルを精緻化するとともに、(2) での検討と組み合わせるさらなる考察を行う予定である。

(4) 深層学習技術を活用した地球科学研究への新展開

本研究で得られた深層学習・画像処理技術に関する知見を活かして、調査船からマルチビーム音響測深機によって取得した画像から、海底熱水活動のシグナルを自動で検出する物体検出モデルの検討を行った。この成果は国際誌 *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* にて報告した。さらに、2023 年 1 月に実施された KM23-01 航海において、この検出システムを海洋研究開発機構の調査船「かいめい」に搭載し、伊豆・小笠原火山弧に位置する東青ヶ島カルデラにて、リアルタイムでの熱水活動検出を行うことに成功した。この成果として、既知の熱水サイトにおいて正しくシグナルを検出することができたほか、今後重点的に調査を行うべき興味深い海域を発見することができた。この内容についても、国際誌に投稿する原著論文を執筆中である。

<引用文献>

Kato et al. (2011) *Nat. Geosci.*, **4**, 535-539.;
Takaya et al. (2018) *Sci. Rep.*, **8**, 5763.;
Kashiwabara et al. (2018) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **240**, 274-292.; Toyoda et al. (1990) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 1093-1103.; Yasukawa et al. (2016) *Sci. Rep.*, **6**, 29603.; Ohta et al. (2020) *Sci. Rep.*, **10**, 1-11.; Sibert et al. (2020) *Nat. Geosci.*, **13**, 238-242.; Itaki et al. (2020) *Prog. Earth and Planet. Sci.*, **7**, 1-7.; Marchant et al. (2020) *J. Micropalaeontol.*, **39**, 183-202.; Zhou and Kyte (1992) *Paleoceanogr.*, **7**, 441-465.; Dunlea et al. (2015) *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **16**, 2694-2710.

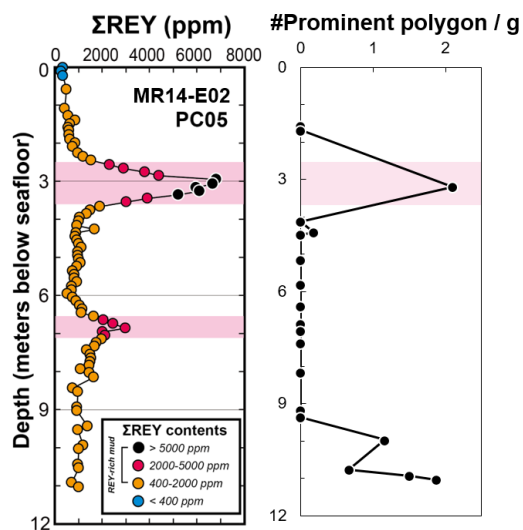


図 2. MR14-E02 PC05 コアにおける、総レアアース濃度 (Takaya et al., 2018) と白亜紀の固有種 Prominent polygon の出現頻度の深度方向プロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Cendi, D. P. D., Agangi, A., Idrus, A., Chelle-Michou, C., Lai, C., Ishida, M., Guillong, M., Gonzales-Alvarez, I., Takahashi, R., Yano, M., Mimura, K., Ohta, J., Kato, Y., Simbolon, D. R., Xia, X.	4. 巻 -
2. 論文標題 The age and origin of the Ruwai polymetallic skarn deposit, Indonesia: evidence of Cretaceous mineralization in the Central Borneo metallogenic belt.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Economic Geology (accepted)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mimura Kazuhide, Nakamura Kentaro, Takao Kazuhiro, Yasukawa Kazutaka, Kato Yasuhiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Automated Detection of Hydrothermal Emission Signatures From Multibeam Echo Sounder Images Using Deep Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2703 ~ 2710
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSTARS.2023.3247467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka Erika, Mimura Kazuhide, Nakamura Kentaro, Ohta Junichiro, Yasukawa Kazutaka, Kato Yasuhiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Rare Earth Elements in Deep Sea Sediments in the South Pacific Gyre: Source Materials and Resource Potentials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GC010681	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mimura Kazuhide, Nakamura Kentaro	4. 巻 47
2. 論文標題 Datasets for training and validating a deep learning-based system to detect microfossil fish teeth from slide images	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 108940 ~ 108940
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dib.2023.108940	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mimura Kazuhide, Minabe Shugo, Nakamura Kentaro, Yasukawa Kazutaka, Ohta Junichiro, Kato Yasuhiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Automated detection of microfossil fish teeth from slide images using combined deep learning models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Computing and Geosciences	6. 最初と最後の頁 100092 ~ 100092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.acags.2022.100092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mimura Kazuhide, Nakamura Kentaro, Yasukawa Kazutaka, Sibert Elizabeth, Ohta Junichiro, Kitazawa Takahiro, Kato Yasuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Applicability of Object Detection to Microfossil Research: Implications from Deep Learning Models to Detect Microfossil Fish Teeth and Denticles Using YOLO-v7	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ESS Open Archive	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22541/essoar.168500340.03413762/v1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 見邨和英, 三鍋秀悟, 中村謙太郎, 大田隼一郎, 安川和孝, 藤永公一郎, 高尾和宏, 加藤泰浩
2. 発表標題 深層学習によるイクチオリス微化石自動検出技術の検討: レアース泥の堆積年代制約に向けて
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 見邨和英, 中村謙太郎, 安川和孝, 大田隼一郎, 藤永公一郎, 白井洋一, 加藤泰浩
2. 発表標題 イクチオリス生層序と堆積物の全岩コバルト濃度を制約としたモンテカルロ法に基づく遠洋性粘土の堆積年代決定
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 見邨和英、中村謙太郎、高尾和宏、安川和孝、加藤泰浩
2. 発表標題 深層学習を用いたMulti-Beam Echo Sounder (MBES) 画像からの海底熱水活動シグナルの自動検出
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 見邨和英、中村謙太郎、安川和孝、町田嗣樹、大田隼一郎、藤永公一郎、加藤泰浩
2. 発表標題 太平洋の遠洋性粘土に見られる地球化学的パリエーションとそのグローバル物質循環における重要性
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 見邨和英、中村謙太郎、安川和孝、Elizabeth Sibert、大田隼一郎、加藤泰浩
2. 発表標題 体検出技術の微化石研究への適用可能性：YOL0-v7を使用したイクチオリス微化石の自動検出モデルの検討からの示唆
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中えりか、見邨和英、大田隼一郎、宮崎隆、VagIarov Bogdan、安川和孝、中村謙太郎、加藤泰浩
2. 発表標題 イクチオリス生層序・ストロンチウム同位体層序・化学層序に基づく南北太平洋レアアース泥の堆積年代の推定
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北澤堯大、見邨和英、安川和孝、大田隼一郎、藤永公一郎、中村謙太郎、加藤泰浩
2. 発表標題 深層学習に基づくイクチオリス画像検出システムを用いた南鳥島レアアース泥の化学層序の年代制約
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子純二、笠谷貴史、野崎達生、見邨和英、杉本洋平、熊谷英憲、中村謙太郎
2. 発表標題 Hydrothermal plume survey at Higashi-Aogashima Knoll Caldera in the Izu-Bonin arc by shipboard multi-beam echo sounder
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北澤堯大、見邨和英、安川和孝、大田隼一郎、藤永公一郎、中村謙太郎、加藤泰浩
2. 発表標題 深層学習に基づく画像検出システムを用いた南鳥島レアアース泥のイクチオリス層序年代決定
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北澤堯大、見邨和英、安川和孝、大田隼一郎、藤永公一郎、中村謙太郎、加藤泰浩
2. 発表標題 深層学習に基づくイクチオリス画像検出システムを用いた南鳥島レアアース泥の堆積年代決定
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ai_ichthyolith
https://github.com/KazuhideMimura/ai_ichthyolith
eNetV2_for_ai_ichthyolith
https://github.com/KazuhideMimura/eNetV2_for_ai_ichthyolith
Datasets for ichthyolith detection
<https://data.mendeley.com/datasets/zdpz6m9gzf/1>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Woods Hole Oceanographic Institution			