

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01329

研究課題名(和文)珪質微化石の殻に記録された海洋環境：同位体比および極微量元素の種レベル分析

研究課題名(英文) Marine environments recorded in siliceous microfossil skeletons: species-level analysis of isotopic ratios and minor trace elements

研究代表者

板木 拓也 (Takuya, Itaki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長

研究者番号：30509724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：珪藻や放散虫などの珪質微化石の殻に記録された酸素の同位体比や微量元素濃度等は、炭酸塩が保存されない海域あるいは時代の堆積物を用いた古環境研究の有望なツールとして期待されているが、その値が実際にどのような環境情報を示しているかは十分に明らかにされていない。本研究では、最新技術である微粒子の自動選別・集積装置と人工知能による微化石の自動分類技術との連携システムを開発し、単種の珪質微化石を大量に集積する方法を確立した。それによって、これまでに困難であった小型珪質微化石の単種での分析に道筋をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手動では困難な小型の珪質微化石(放散虫)を自動で分類し大量に集積するシステムが構築されたことで、これまで実例のない、単種の放散虫の骨格に記録された同位体比・微量元素などの分析に道筋をつけた。これによって、古海洋研究に新たな指標の開発が可能となり、今後、多種多様な微化石に応用されることで、新規研究分野の創出にも繋がるのが期待される。

研究成果の概要(英文)：Oxygen isotope ratio and trace elements recorded in siliceous microfossil skeletons such as diatoms and radiolarians are expected to be powerful tools for paleoenvironmental studies using sediments from areas or periods where carbonates are not preserved, however what kind of environmental information these values actually indicate is not fully understood. In this study, we developed a system that links the latest technology of automatic sorting and accumulation of fine particles with the automatic classification of microfossils using artificial intelligence, and established a method to accumulate a large amount of siliceous microfossils of a single species. This has paved the way for the analysis of small siliceous microfossils as a single species, which has been difficult in the past.

研究分野：古海洋学

キーワード：古海洋 指標 珪質微化石 放散虫 同位体比 人工知能

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

海水の酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比) は、短期的には水温や塩分などの海洋環境、長期的には高緯度域の氷床に取り込まれる水の量によって変化しており、炭酸塩 ( $\text{CaCO}_3$ ) 骨格を持つ有孔虫 (海洋プランクトンの一種) に記録された酸素同位体比は生息当時の海水の値を反映したものとなる。そのため、有孔虫化石の酸素同位体比は、古海洋環境や海水準変動を調べるための基本ツールとして広く用いられている。

一方、珪酸塩 (生物源オパール,  $\text{SiO}_2+n\text{H}_2\text{O}$ ) の殻を持つ珪藻や放散虫などの珪質微化石は、炭酸塩が溶解して有孔虫が保存されない深海堆積物においても多産することから、それらの殻の同位体比が新たなツールとして期待されている。これまで、主に南極海や北太平洋から採取された海底コアについて珪酸塩の酸素同位体比が測定されている。これらのコアを構成する珪質軟泥の主組成が植物プランクトンである珪藻であることから、得られた値は海洋表層の環境を反映していると解釈されている。しかし、珪質微化石の同位体比は、海洋表層だけではなく、より多様な環境の指標としても期待が大きい。例えば、動物プランクトンの放散虫は種により表層～深層の様々な水深に生息しており、同じく珪酸塩からなる海綿骨針は底生生物を構成する部位であることから底層水の環境を反映している可能性がある。更に、それぞれの種は増殖する時期が異なることから季節的な情報を記録しているかもしれない。

しかし、有孔虫よりも殻サイズが概して小さな珪質微化石の場合、同位体比や微量元素を種レベルで分析に必要な量を確保することが極めて困難であった。また、珪酸塩の酸素同位体比を測定する代表的な手法では、第五フッ化臭素のような反応性が高く取り扱いが難しい試薬を使用するために高い専門知識と厳重な安全管理が必要であった事などの理由で研究が十分に進んでいない。その結果、珪質微化石の骨格に記録されている地球化学的な情報が、どのような環境を反映しているのか十分な議論が行われないうまに海底コアの分析に用いられていたのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、世界各地の海域から採取されてきた表層堆積物やプランクトン試料に含まれる珪質微化石の酸素同位体比を種レベルで測定し、それらがどのような環境を反映しているかを検討することで新たな古環境指標の創出を目指す。例えば酸素同位体比の場合、もし有孔虫のように水温の影響を強く受けているのであれば、低緯度の表層付近に生息する種は低い同位体比を示し、逆に高い同位体比は深海域や高緯度の表層付近に生息する種に現れることが予想される (図 1)。

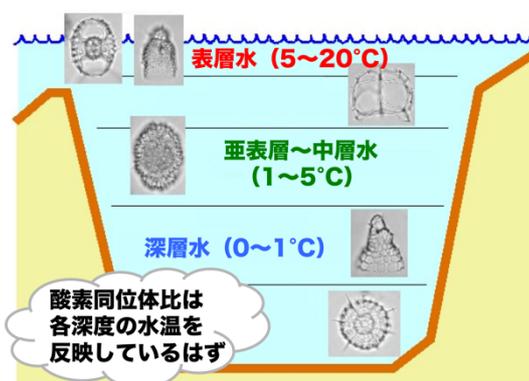


図 1. 放散虫の深度分布と生息水深の水温を示した模式図 (日本海の例)

### 3. 研究の方法

#### (1) 微化石自動分類/集積システムの構築

本研究を進めるに当たり課題となっていた単一種の分析必要量の集積は、鉍物粒子の自動選

別・集積装置に人工知能（ディープラーニング）による微化石の分類モデルと連携するシステムを構築することによって解決を図った（図2）。本システムは、コンピュータ制御の自動顕微鏡によりトレイに散布した粒子を全てスキャンし、画像処理で得られた粒子の画像を人工知能で分類後、任意の種類のみをマイクロマニピュレータを用いて自動で集積することが出来る（図3）。

自動分類に当たっては、事前に学習用の画像を大量に人工知能に覚え込ませる必要がある。本研究では、ベーリング海、日本海、太平洋、南極海で得られた試料から学習用画像を取得し、任意の種類に対して十分に高い正答率を示す分類モデルの構築に用いた。これらの分類モデルを用いて、各種類に対して数百～数千個体の微化石の集積を行った。

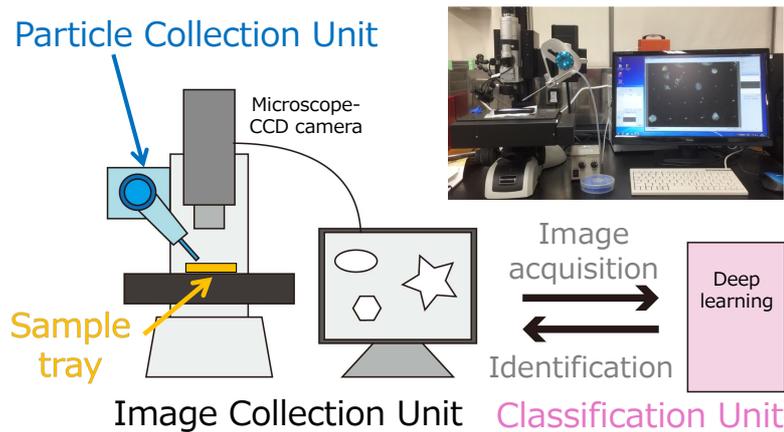


図2. 開発した微化石自動分類／集積システム

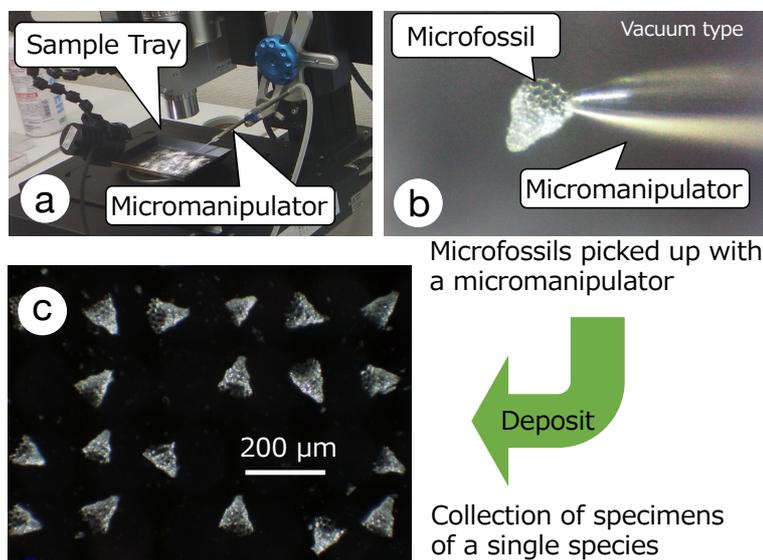


図3. 微化石（放散虫）を拾い出している様子

## (2) 酸素同位体比の測定

集積した単種の放散虫を用いて酸素同位体比の分析を行った。酸素同位体比は、極微量で、しかも危険試薬を使用せず安全に測定出来る高周波誘導加熱炭素還元法 (Ijiri et al., 2014, Journal of Quaternary Science, 29, 455-462) によって測定された。

#### 4. 研究成果

##### (1) 微化石の自動分類／集積

微化石自動分類／集積システムを用いて放散虫の自動分類及び自動集積テストを実施した(図3)。数種類の放散虫について分類モデルを構築し、概ね80%を超える正答率を得た。このうち、*Cycladophora davisiana*と*Actinomma boreale*の2種の正答率は、確信度0.9以上で90%を超えた。ここで分類された500個体の*C. davisiana*をマイクロコンピュータで抽出するのに費やした時間は約4時間である。*C. davisiana*の場合、酸素同位体比1測定に必要な量は約1,000個体なので、連続して作業を行えば1日～数日程度で必要量の集積が可能となる。一方、拾い出しの成功率は80%程度であり、残りの20%程度は化石を弾き飛ばしたり、コンピュータがターゲットに届かなかつたりして拾い出しには至らなかった。成功率を上げるためには更なる工夫が必要であり、今後の課題である。なお、この成果は国際誌に論文として発表された(Itaki et al., 2020, PEPS, 7:19, doi.org/10.1186/s40645-020-00332-4)。また本事業の期間中には、システムによる分類精度の向上に繋がる高精細画像を取得するため、CCDカメラの解像度を高くし、リング照明装置を設置するなどの改修を行った。

更に、当該システムを使って放散虫の群集解析を自動化する試みを行い、国際誌に論文として発表した(Itaki et al., 2020, Scientific Reports, 10:21136, doi.org/10.1038/s41598-020-77812-6)。*C. davisiana*, その他の放散虫, 珪藻, その他の粒子に区分する分類モデルを構築し、古海洋研究で用いられる全放散虫に対する*C. davisiana*の相対頻度(%)を求めた。その結果、人によって計数された結果との相関係数は $r=0.95$ 以上となり、その実用性が確かめられた(図4)。

##### (2) 放散虫の酸素同位体比

拾い出された放散虫3種について酸素同位体比の測定を行い、その結果が学会で発表された(垣下ほか, 2019, 第5回地球環境史学会年会)。測定数はまだ少ないものの、分析値は水温との関係性を示唆しており、今後の更なるデータ集積により、古海洋指標としての有用性を検討して句必要がある。一方で試料処理に関する基礎実験の結果では、化石のクリーニング方法等によって測定値が一定しないことが示され、より正確で安定したデータ取得に向けた課題を残したことになる。

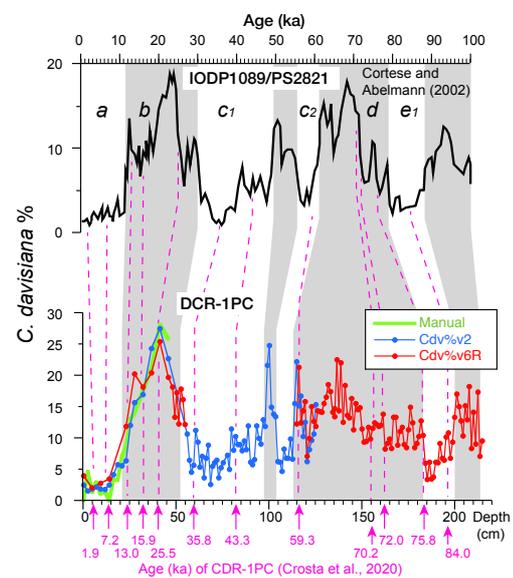


図4. 全放散虫に対する*C. davisiana*の相対頻度変化。人による計数結果(緑)を人工知能の分類モデルで出した結果(赤と青)と比較した。他の地点から得られた結果(黒)とも整合的である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Matsuzaki, K., Itaki, T., Sugisaki, S.	4. 巻 24
2. 論文標題 Polycystine radiolarians vertical distribution in the subtropical Northwest Pacific during Spring 2015 (KS15-4)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PALEONTOLOGICAL RESEARCH	6. 最初と最後の頁 113-133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2517/2019PR019	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 Matsui, H., Horikawa, K., Chiyonobu, S., Itaki, T., Ikehara, M., Kawagata, S., Wakaki, H., Shinohara, Y., Seki, O., Okazaki, Y.	4. 巻 53
2. 論文標題 Integrated Neogene biochemostratigraphy at DSDP Site 296 on the Kyushu Palau Ridge in the western North Pacific	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 NEWSLETTERS ON STRATIGRAPHY	6. 最初と最後の頁 313-331
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1127/nos/2019/0549	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 Itaki, T., Taira, Y., Kuwamori, N., Maebayashi, T., Takeshima, S., Toya, K.	4. 巻 7
2. 論文標題 Automated collection of single species of microfossils using a deep learning-micromanipulator system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-020-00332-4	査読の有無 有
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
1. 著者名 Matsuzaki Kenji M., Itaki Takuya, Tada Ryuji, Kamikuri Shin-ichi	4. 巻 5
2. 論文標題 Paleoceanographic history of the Japan Sea over the last 9.5 million years inferred from radiolarian assemblages (IODP Expedition 346 Sites U1425 and U1430)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-018-0204-7	査読の有無 有
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

1. 著者名 Matsuzaki Kenji M., Itaki Takuya, Tada Ryuji	4. 巻 6
2. 論文標題 Paleoceanographic changes in the Northern East China Sea during the last 400 kyr as inferred from radiolarian assemblages (IODP Site U1429)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-019-0256-3	査読の有無 有
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

1. 著者名 Itaki Takuya, Taira Yosuke, Kuwamori Naoki, Saito Hitoshi, Ikehara Minoru, Hoshino Tatsuhiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Innovative microfossil (radiolarian) analysis using a system for automated image collection and AI-based classification of species	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-77812-6	査読の有無 有
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5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Itaki, T.
2. 発表標題 A new tool for micropaleontology using AI (artificial intelligence): automation of identification and collection for microfossil species
3. 学会等名 J-DESCワークショップ「Scientific Ocean Drilling beyond 2023/科学掘削の未来: 2023年からその先へ」(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板木 拓也, 河地正伸, 平 陽介, 鎌守直樹, 斎藤 仁志, 星野辰彦
2. 発表標題 微化石分析の新たなツール: 人工知能と連携した顕微鏡画像の自動取得システム
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板木 拓也, 平 陽介, 鎌守直樹, 斎藤 仁志, 星野辰彦
2. 発表標題 人工知能を用いた放散虫群集の自動データ取得へ向けた試み
3. 学会等名 日本古生物学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Itaki Takuya, Taira Yosuke, Kuwamori Naoki, Saito Hitoshi, Hoshino Tatsuhiko and Ikehara Minoru
2. 発表標題 A new tool for microfossil analysis in the Southern Ocean -automatic image collector equipped with deep learning-
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 垣下涼太, 岡崎裕典, 板木拓也, 井尻 暁
2. 発表標題 人工知能を用いた放散虫自動拾い出し及び放散虫酸素同位体比の測定
3. 学会等名 第5回地球環境史学会年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 分類装置、分類方法およびプログラム	発明者 板木拓也ほか	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-163981	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

産総研プレスリリース(2018/12/8)  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2018/pr20181203/pr20181203.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20181203/pr20181203.html)  
 さがせ、おもしろ研究！ブルーバックス探検隊が行く(2019/1/4)  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/bluebacks/no19/](https://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/bluebacks/no19/)

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
研究分担者	堀川 恵司  (Horikawa Keiji)  (40467858)	富山大学・学術研究部理学系・准教授    (13201)	
研究分担者	井尻 暁  (Ijiri Akira)  (70374212)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員    (82706)	
研究分担者	岡崎 裕典  (Okazaki Yusuke)  (80426288)	九州大学・理学研究院・准教授    (17102)	

	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
研究協力者	池原 実  (Ikehara Minoru)  (90335919)	高知大学・教育研究部自然科学系理学部門・教授    (16401)	

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
---------	---------