

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82617

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18H03364

研究課題名(和文) 急激な環境変化と生物の適応と絶滅—海洋酸性化応答生物学の創設

研究課題名(英文) Adaptation of marine calcifiers to a rapid environmental change: Creation of ocean acidification biology

研究代表者

久保田 好美 (Kubota, Yoshimi)

独立行政法人国立科学博物館・地学研究部・研究主幹

研究者番号：80710946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,547,500円

研究成果の概要(和文)：本研究では、特に炭酸カルシウムの殻を持つ微小な海洋生物(有孔虫・貝形虫)への酸性化の影響を過去の事例から明らかにするため、現在の海洋酸性化との類似性(進行の急速さ、程度)が高い5600万年前の暁新世・始新世境界温暖期に着目し、有孔虫・貝形虫が、急速な環境変動に対しどのように殻形成を変化させてきたのかを評価した。殻密度をマイクロフォーカスX線CTで計測した結果、密度変化は環境pHの変化に従わず、むしろpH変化と無関係の時期に密度が低下する現象が見られた。これは、有孔虫の殻密度は個体差が大きく環境変化に対してランダムに変化する可能性があることと、有孔虫が酸性化耐性を持つことも示唆するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業革命以降の大気中二酸化炭素濃度の上昇に伴い、海洋酸性化とその生物への影響が深刻な問題となりつつある。本研究では、5600万年前の暁新世・始新世境界温暖期に着目したが、過去の地質時代の事例からは、数十年の観測や実験では知ることができない長期の生物の応答と環境変動からの回復過程での挙動を理解することができる。本研究で明らかにした有孔虫が酸性化耐性を持つという性質は、近年の有孔虫の飼育実験や、研究代表・分担の久保田・木下が見出した比較的低いpHである現在の深海環境でも高密度の殻を形成している事実と矛盾せず、有孔虫が進化の過程で酸性化耐性を獲得してきたことを示唆するものである。

研究成果の概要(英文)：The Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM; ~56 million years ago) is a rapid climatic warming event and associated with ocean acidification. At the onset of the PETM, deep-sea benthic foraminifers and ostracodes went extinct and planktic foraminifers and calcareous nannofossils underwent origination. Here we focus on the change in the shell density of fossil planktic foraminifers through the PETM event to elucidate how the planktic foraminifers adapted to the rapid environmental change. The micro-focus X-ray tomography of the planktic foraminifer *Subbotina patagonica* allows us to estimate the shell density of a foraminifer specimen, that is the intensity of calcification. The shell densities indicate considerable individual variability. The temporal change in the mean shell density has not coincided with changes in sea-surface pH, suggesting that no linear calcification response to ocean acidification.

研究分野：古生物学

キーワード：海洋酸性化 有孔虫 pH PETM Ocean Acidification Foraminifers X-ray tomography Calcification

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。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在の世界の海洋表層の pH は 8.1 程度の弱アルカリ性である。近年、海洋の広域的な観測により、表層の pH が酸性側に傾いてきていることが明らかになってきた (Doney et al., 2009, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1:169–92)。これを海洋酸性化と呼ぶ。IPCC による海洋酸性化予測では、今後 100 年間で 0.14–0.35 の急速な pH 低下が予測されている。海洋酸性化の影響は、炭酸カルシウムの殻を作る海洋生物 (有孔虫、貝形虫などの甲殻類、サンゴ、貝類等) にとってより深刻である。これらの生物は、細胞内の pH を上げて炭酸カルシウム殻を沈殿させるため、低い pH (低い炭酸カルシウム飽和度) の海水ではより多くのエネルギーが必要となって成長が阻害されると懸念されている。実際、殻の形成が阻害される現象がすでに世界各地で報告され始めている (研究業績 8)。これらの生物は海洋の食物連鎖において主要な役割を果たしており、海洋酸性化によって個体数の減少や絶滅がおこると生物多様性や海洋生態系に大きな変化をもたらす危険性がある。しかしながら、現在行われている多くの室内飼育実験では、世代を超えた長期間に亘る観測が困難であるため、今後の海洋酸性化への応答を完全に予測するまでに至っていない。

一方、地質時代の微化石を用いれば、急速な海洋酸性化への生物の応答をその回復過程まで含めて千年～万年オーダーの一連の現象として理解することが可能である。地質時代の環境変動の中でも、急激な二酸化炭素の増加による温暖化とそれに伴う急速な海洋酸性化という点で現在と最も類似する時代が 5600 万年前の暁新世・始新世境界温暖期 (Paleocene/ Eocene Thermal Maximum: 以下 PETM と呼ぶ) である。PETM では 4-5 万年間に 0.3 の pH 低下が起こり、元の pH に回復するまで 10 万年程度かかったと見積もられている (Penman et al., 2014, *Paleoceanography*, 29, 357–369)。海洋酸性化の速度が現代のそれよりも遅かったのにも関わらず、PETM 前後の微化石の記録からは、当時の環境変化が炭酸カルシウムの殻をもつ微小生物に大きな影響を及ぼしたことがわかっている。例えば浮遊性有孔虫、石灰質ナンノプランクトンでは顕著な構成種の入れ替わりが起こり、体サイズの減少が共通して報告されている。最も大きな影響を受けたのが底生有孔虫で、40-60%の種が絶滅した。これらの微化石のうち、底生有孔虫 2 種については石灰化の変化が報告され、pH が低下した PETM にそれ以前より高密度の殻を作ったことが判明した。そして、急速な炭酸カルシウムの飽和度低下に適応できたことで絶滅を免れたのではないかと推測された (Foster et al., 2013, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 9273–9276)。これらの結果は、地球規模の環境変動が生物の硬殻にさまざまな証拠として記録されうるということを明確に示している。しかし一方で、このような生物記録の証拠はいまだ限定的であり、PETM に起こったとされる汎世界的な海洋酸性化の生物へのインパクトの総体をとらえきれていない。生物の適応と絶滅、回復へいたる履歴を詳細に復元することは、生命と地球環境の共進化を解明する上で、極めて重要な基礎的情報である。この意味において、PETM は海洋酸性化への長期間の生物の応答を検証できる唯一の時代であるといえる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、南大洋の ODP Site 690 試料を用いて 5600 万年前に起こった急速な海洋酸性化の炭酸カルシウム殻生物へのインパクトと生物の適応・絶滅の過程を解明することである。具体的には、PETM 前後の 30 万年間を対象として、海洋酸性化が炭酸カルシウム殻を持つ微小生物にどのような変化をもたらしたのかを、殻の形態と密度変化に着目し、環境の回復過程も含めて明らかにする。

これまで、古第三紀において数万年～数十万年程度の時間スケールでの形態変化を詳細に調べ

た研究はなく、海洋酸性化への環境適応がどのような形態・群集変化を伴って起こっていたかを初めて詳細に明らかにできる研究となる。さらに、本研究では炭酸カルシウム殻生物にとっての極限的環境から、長期間にわたり準安定環境へ再適応した際の応答過程を、複数の生物種を用いて総合的に明らかにする。これは堆積物に記録された過去の生態研究なしには解明し得ないものである。このように本研究は、「**海洋酸性化応答生物学の創設**」とも言うべき、全く新しい切り口で生物と環境の共進化を議論する第一歩となる。ここで得られる生物の応答に関する情報は、現在地球環境分野で積極的に行われている海洋酸性化研究とその生態系の将来予測に対しても十分に貢献するものであるといえる。

### 3. 研究の方法

本研究では、マイクロフォーカス X 線 CT(MXCT)を活用することで、数百ミクロンサイズの微小生物の殻密度変化を高精度に評価する。MXCT は、X 線を照射しその透過像から 3 次元立体構造を構築する技術である。これまでの木元（研究分担者）らの研究では、炭酸カルシウム殻を持つ現生生物の殻密度測定に MXCT を応用できる独自の技術を確立してきたが微化石に応用した例は世界的にも数例しかない。化石の場合は、貴重な試料であることも多く、非破壊で計測できる点も MXCT の利点である。海洋酸性化に関連した研究として MXCT を活用した研究は今後増加することが予想されるため、本研究で世界に先駆けて古環境研究に資する微化石に応用することで、世界を牽引できるインパクトの高い成果が期待される。こうした点で、本研究は極めて先見性かつ独自性の高い研究テーマである。同時に、本研究は微化石研究の新しい方向性も提案するものである。すなわち、MXCT では殻密度という情報以外にも形態に関するあらゆる情報をデジタルで同時に取得し定量化できるという利点がある。秤や写真での判断によって微化石の重さやサイズを計測する従来の方法は誤差が大きく、定量的評価に課題があったが、MXCT では微小な形態変化を 3 次元かつサブミクロンスケールで正確にとらえられる。この強みを活かし、本研究では殻密度・体サイズ・厚み・重量といった物理パラメータを相互に比較し、形態情報を統合的に解析する。

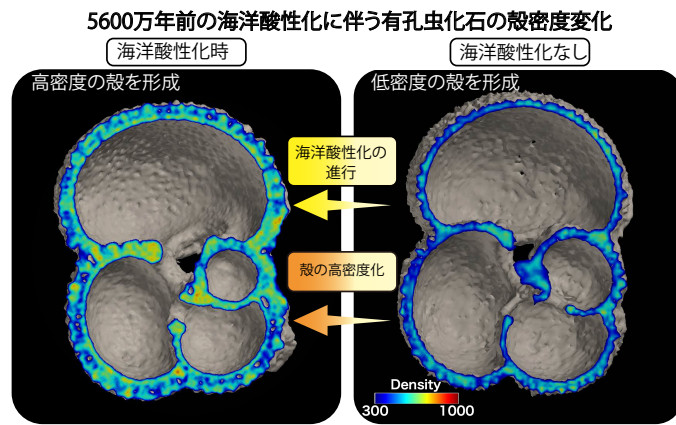
### 4. 研究成果

MXCT での測定手法は、分担の木元が確立した。有孔虫化石の殻密度は、基準物質となるカルサイト結晶と有孔虫の X 線吸収量の比(カルサイト CT 値)を用いて相対値として評価した。また、殻サイズによる殻密度の違いを検討するため、300 $\mu\text{m}$  以上、212-300 $\mu\text{m}$  の分画に分けてピッキングを行い、これまでに 370 個体の計測を行った。体サイズの指標として殻の長径と体積を用いるが、これらは 3D 解析ソフト Molcer Plus を用いて CT 画像より計算した。その結果、有孔虫化石の一部では、長径が小さいと密度も小さくなるという傾向が見られた。一方、用いた試料は本研究の前に一部の有孔虫化石が別の研究に用いられていたため、殻の長径と体積については偏りがある可能性が無視できない。そこで、代表の久保田、分担の木下・山口は、体サイズに依存しない殻密度の評価方法を検討し解析した。密度の時系列解析において、体サイズによる密度の偏りを補正するため、長径で規格した密度を用い、先行研究の水温変化と pH

変化と比較した。

先行研究における pH の変化は、PETM の始まり (onset) で 7.7, ピーク時で 7.3, その後 7.5 に落ち着く。規格化した密度変化はこうした pH の変化に従わず、むしろ pH 変化と無関係の時期に密度が低下する現象が見られた (図 1)。これは、有孔虫の殻密度は個体差が大きく環境変化

に対してランダムに変化する可能性があることを示唆する。また、PETM のピーク時を抽出すると、それ以前の時代よりも密度の増大が見られた。これは、0.4 程度の pH の低下に対し、有孔虫が耐性を持つことも示唆する。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamaguchi Tatsuhiko, Kubota Yoshimi, Kimoto Katsunori	4. 巻 129
2. 論文標題 Review: Ocean acidification during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 179 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2022.0056	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 Kinoshita Shunichi, Wang Quan, Kuroyanagi Azumi, Murayama Masafumi, Ujii? Yurika, Kawahata Hodaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Response of Planktic Foraminiferal Shells to Ocean Acidification and Global Warming Assessed Using Micro-X-Ray Computed Tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 390-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2517/PR200043	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 Yamaguchi Tatsuhiko	4. 巻 *
2. 論文標題 Valve calcification in the evolutionary history of marine ostracodes (Ostracoda)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crustacean Biology	6. 最初と最後の頁 ruy086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jcbiol/ruy086	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 木元克典	4. 巻 121
2. 論文標題 海洋酸性化と生物影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 18 - 21
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 無
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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kinoshita S, Kuroyanagi A, Nishi H, Fujita K, Suzuki A, Kawahata H
2. 発表標題 Effects on shell quality of large benthic foraminifers under different temperature conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kinoshita S, Kuroyanagi A, Nishi H, Fujita K, Suzuki A, Kawahata H
2. 発表標題 Decrease in shell volume of large benthic foraminifers with progressing ocean warming
3. 学会等名 EGU General Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下 峻一
2. 発表標題 マイクロフォーカス X 線 CT による大型底生有孔虫研究の現状とこれから
3. 学会等名 地球環境史学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保田 好美
2. 発表標題 化石から探る過去の海洋酸性化が生命に与えた影響：有孔虫化石の解析からひもとく海洋酸性化の歴史
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保田好美
2. 発表標題 過去の環境を解き明かす有孔虫化石~プランクトン学と古気候学の連携にむけて~
3. 学会等名 日本プランクトン学会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kinoshita, S., Wang, Q., Kuroyanagi, A., Murayama, M., Ujiie, Y., Kawahata, H.
2. 発表標題 Effects of environmental changes on planktic foraminiferal shells assessed by the investigation of micro-X-ray CT
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保田好美・木元克典・山口龍彦・堀内里香・Richard D. Norris
2. 発表標題 暁新世・始新世境界温暖期における浮遊性有孔虫の炭酸塩殻密度
3. 学会等名 日本古生物学会第 170 回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木元克典、佐々木理、岩下智洋
2. 発表標題 微化石試料の自動X線形態計測
3. 学会等名 MRC微化石研究集会2019つくば大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsunori Kimoto, Jonaotaro Onodera, Koji Sugie, Naomi Harada
2. 発表標題 Technical development of Micro X-ray Computed Tomography (MXCT) and research activity on ocean acidification in the western Arctic Ocean
3. 学会等名 ArCS Workshop for Promoting Arctic Collaboration between IARC/UAF and Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 木元克典	4. 発行年 2019年
2. 出版社 講談社ブルーバックス	5. 総ページ数 14
3. 書名 「深海 極限の世界 生命と地球の謎に迫る」海洋酸性化と深層循環	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	木元 克典  (Kimoto Katsunori)  (40359162)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・グループリーダー代理   (82706)	
研究分担者	木下 峻一  (Kinoshita Shunichi)  (40910758)	独立行政法人国立科学博物館・地学研究部・支援研究員   (82617)	
研究分担者	山口 龍彦  (Yamaguchi Tatsuhiko)  (80397207)	独立行政法人国立科学博物館・地学研究部・協力研究員   (82617)	

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	University of California San Diego			