

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04053

研究課題名(和文) マイクロX線CTを用いた海洋酸性化が有孔虫の石灰化に及ぼす影響の検証

研究課題名(英文) Examining the effects of ocean acidification on foraminiferal calcification using microCT analysis

研究代表者

黒柳 あずみ (KUROYANAGI, Azumi)

東北大学・学術資源研究公開センター・准教授

研究者番号：20536510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年の急激な二酸化炭素濃度上昇に起因する海洋酸性化に伴い、石灰質(炭酸塩)の殻・骨格を形成する海洋生物への多大な影響が懸念されている。しかし、海洋表層における主要な石灰化生物である有孔虫が、海洋酸性化をどう反映するのかについては定性的な議論にとどまっている。本研究では環境パラメータを制御した環境で飼育した大型底生有孔虫を用いたマイクロX線CT分析を行った。その結果、将来の海洋酸性化による海水のpH低下は、大型底生有孔虫の炭酸塩殻において、量的(体積)減少のみならず質的(殻密度)な減少にも影響をおよぼすことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の急激な二酸化炭素濃度上昇に起因する海洋酸性化に伴い、石灰質(炭酸塩)の殻・骨格を形成する海洋生物への多大な影響が懸念されている。本研究の結果、低緯度域において重要な海洋石灰化生物である、大型底生有孔虫の炭酸塩殻において、将来の海洋酸性化による海水のpH低下は、量的(体積)減少のみならず質的(殻密度)な減少にも影響をおよぼすことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Rapid increases in anthropogenic atmospheric CO₂ partial pressure have led to a decrease in the pH of seawater. Foraminifera are one of the major carbonate producers in the ocean; however, whether calcification reduction by ocean acidification affects either foraminiferal shell volume or density, or both, has yet to be investigated. Our results suggest that changes in seawater pH would affect not only the quantity (i.e., shell volume) but also the quality (i.e., shell density) of foraminiferal calcification. Our findings also suggest that, under the IPCC RCP8.5 scenario (pCO₂ = 1250 ppm and global mean temperature +3.7 °C in 2100), ocean acidification and warming will have a significant impact on reef foraminiferal carbonate production by the end of this century, even in the tropics.

研究分野：古海洋学、微古生物学

キーワード：海洋酸性化 大型底生有孔虫 飼育実験 海洋石灰化生物 マイクロX線CT

1. 研究開始当初の背景

産業革命後の二酸化炭素増大により、海洋酸性化が急激に進行している(図1)。IPCC2014報告書によれば今世紀末までに、大気中二酸化炭素濃度は420-1250ppmとなり、それに伴い、海水pHは7.9(pCO₂=560ppm)付近から7.7(pCO₂=1000ppm)以下まで減少することが予想されている(Gattuso et al. 1998)。この海水のpH低下により、炭酸カルシウムの飽和度が減少するため、海洋の石灰化生物にとって、多大な脅威となることが様々な研究結果より指摘されている(IPCC, 2014)。

浮遊性有孔虫は、単細胞の動物プランクトンで、低緯度から極域までの、海洋表層(主に200m以浅)に生息する。この生物は炭酸カルシウム(カルサイト)の殻を持ち、円石藻と共に、海洋表層における炭酸塩殻の主要な生産者であり、海洋における炭酸塩流量の30~70%を担う(Schiebel, 2002)ため、将来の海洋酸性化の影響評価で重要な役割を担っている。また、サンゴ礁棲大型底生有孔虫は、生息域は限られているもの、カルサイト(浮遊性有孔虫など)やアラゴナイト(サンゴ骨格など)よりも、容易に溶解しやすい高Mg-カルサイトの殻を持つため、酸性化の影響を大変受けやすいことがよく知られている。しかし、微小かつ複雑な殻形態を持つ有孔虫は、これまで、殻全体のカルサイト量を正確に測定する手段がなかったため、エラーの大きな間接的手段(殻長、殻重量の回帰直線を基に推定)に頼らざるを得なかった。例えば、約2万年前の最終氷期最盛期(LGM)(低温、低pCO₂)から現在(高温、高pCO₂)にかけて、浮遊性有孔虫殻は殻重量を減少させているという報告は多数あるが(e.g., Barker and Elderfield, 2001)、水温とpCO₂の両方が変化するため、従来のエラーの大きな測定では、炭酸塩殻重量の減少がどちらの環境因子の影響によるものかが区別できない(Schiebel and Hemleben, 2017)。

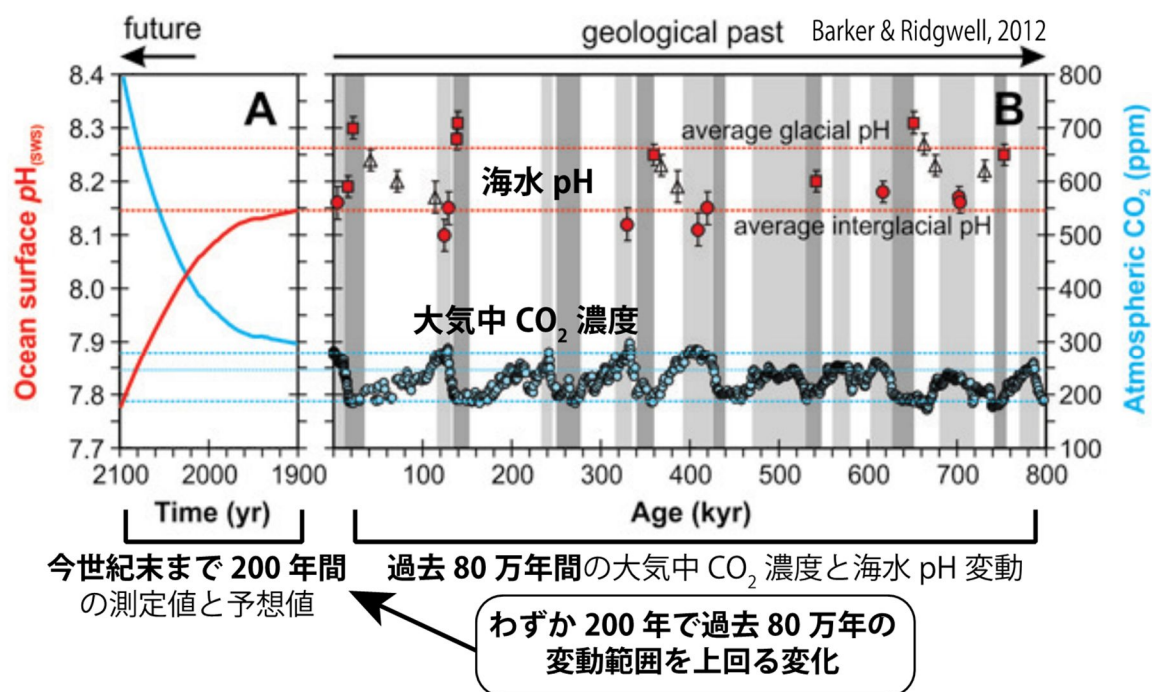


図1: 過去80万年前から今世紀末までの大気中CO₂濃度と海水pHの変動

2. 研究の目的

海洋酸性化の進行する環境下で、海水pHの変化に、海洋の主要な石灰質(炭酸塩)殻プランクトンである浮遊性有孔虫はどう応答するのかを明らかにするためには、有孔虫の持つ微小な炭酸塩殻の精密な測定が不可欠である。これまではエラーの大きな間接的手法しかなかったが、近年実用化されたマイクロX線CT装置を用いれば、直接、殻体積および密度の精密測定を行うことが可能となった。本研究では、マイクロX線CT装置を使用して、有孔虫試料(の炭酸塩殻を精密測定し、環境因子(水温、炭酸イオン等)と炭酸塩殻の密度・体積との定量的関係を明らかにすることを目的とする。そして、過去および将来の二酸化炭素濃度変化に伴い、海洋表層の炭酸塩生産量がどう変遷するかを定量的に検証する事を最終的な目標とする。

3. 研究の方法

近年の急激な二酸化炭素濃度上昇に起因する海洋酸性化に伴い、石灰質（炭酸塩）の殻・骨格を形成する海洋生物への多大な影響が懸念されている。しかし、海洋表層における主要な石灰化生物・プランクトンである浮遊性有孔虫が、海洋酸性化をどう反映するのかについては定性的な議論にとどまっている。その理由は、有孔虫骨格が微小かつ複雑な形態であるため、石灰質殻の正確な測定方法がなく、これまで間接的手法でしか酸性化の影響を検証できなかったからである。

近年実用化されたマイクロ X 線 CT は、1 μ m 以下の解像度で有孔虫殻（体積・密度）を測定可能なため、これを用いれば、直接、有孔虫の石灰化への影響を精密に検証できる。本研究では、将来の海洋酸性化および温暖化に対応させ、1) pH を変化させた (pH7.7-pH8.3) 飼育実験、および、2) 水温を変化させた (19-29 $^{\circ}$ C) 飼育実験、この2つの環境パラメータを制御した飼育実験で飼育した有孔虫個体を用いてマイクロ X 線 CT を行った。飼育対象としたのはより溶解しやすい大型底生有孔虫 (*Amphisorus kudakajimensis* および *Calcarina gaudichaudii*) である。

4. 研究成果

上述の1) では、無性生殖後の *Amphisorus kudakajimensis* を飼育個体として、水温一定 (25 $^{\circ}$ C) で pH のみを4段階で変化させた (pH7.7-pH8.3) 環境で生育させており、pH と炭酸塩生産量との定量的な関係性を明らかにすることができる。また、有孔虫の殻体積・殻密度は、マイクロ X 線 CT 測定および殻重量測定より求めることができる。その結果、標準試料も含めた122サンプルの分析より、pH と有孔虫殻体積との間に明瞭な相関があることを明らかにした。また、殻体積を確定できたことにより、個体重量測定を基に殻密度の算出ができるため、pH と有孔虫殻密度にも相関があることが明らかになった。そして本研究より、海水の pH 低下は、大型底生有孔虫の炭酸塩殻において、量的（体積）減少のみならず質的（殻密度）な減少にも影響をおよぼすことが示唆された(図2)。以上の結果を取りまとめ、国際学術誌である Scientific Reports 誌に論文を投稿し、受理、出版された(Kuroyanagi et al., 2021)

また、2) では、無性生殖後の *Calcarina gaudichaudii* を飼育個体とし、水温のみを6段階で変化させた (19-29 $^{\circ}$ C) 環境で生育させた。有孔虫の殻体積・殻密度は、マイクロ X 線 CT 測定および殻重量測定より求めることができる。その結果、水温により殻重量および殻体積が明瞭に減少することを明らかにした。また、殻体積を確定できたことにより、個体重量測定を基に殻密度の算出ができるため、今回検証した水温変化範囲においては、有孔虫の殻密度は全く変化しないことが明らかになった。以上の結果を取りまとめ、国際学術誌である Marine Micropaleontology 誌に論文を投稿し、受理、出版された(Kinoshita, Kuroyanagi et al., 2023)。

1) および2) の本研究より、将来の海水温上昇は、大型底生有孔虫の炭酸塩殻において、重量および体積が減少する一方で、殻密度には影響をおよぼさず、pH 低下による海洋酸性化の影響とは異なる結果になることが示唆された。つまり、将来の海水温上昇は、大型底生有孔虫の炭酸塩殻において、重量および体積が減少する一方で、殻密度には影響をおよぼさず、pH 低下による海洋酸性化の影響とは異なる結果になることが示唆された。

引用文献（研究結果）

Kuroyanagi, A., Irie, T., Kinoshita, S., Kawahata, H., Suzuki, A., Nishi, H., Sasaki, O., Takashima, R., Fujita, K. (2021) Decrease in volume and density of foraminiferal shells with progressing ocean acidification. Scientific Reports 11, 19988.

Kinoshita, S., Kuroyanagi, A., Kawahata, H., Fujita, K., Ishimura, T., Suzuki, A., Kano, H., Kubota, Y., Nishi, H. (2023) Constant shell density of hyaline large benthic foraminifers under thermal stress. Marine Micropaleontol., 181, 102232.

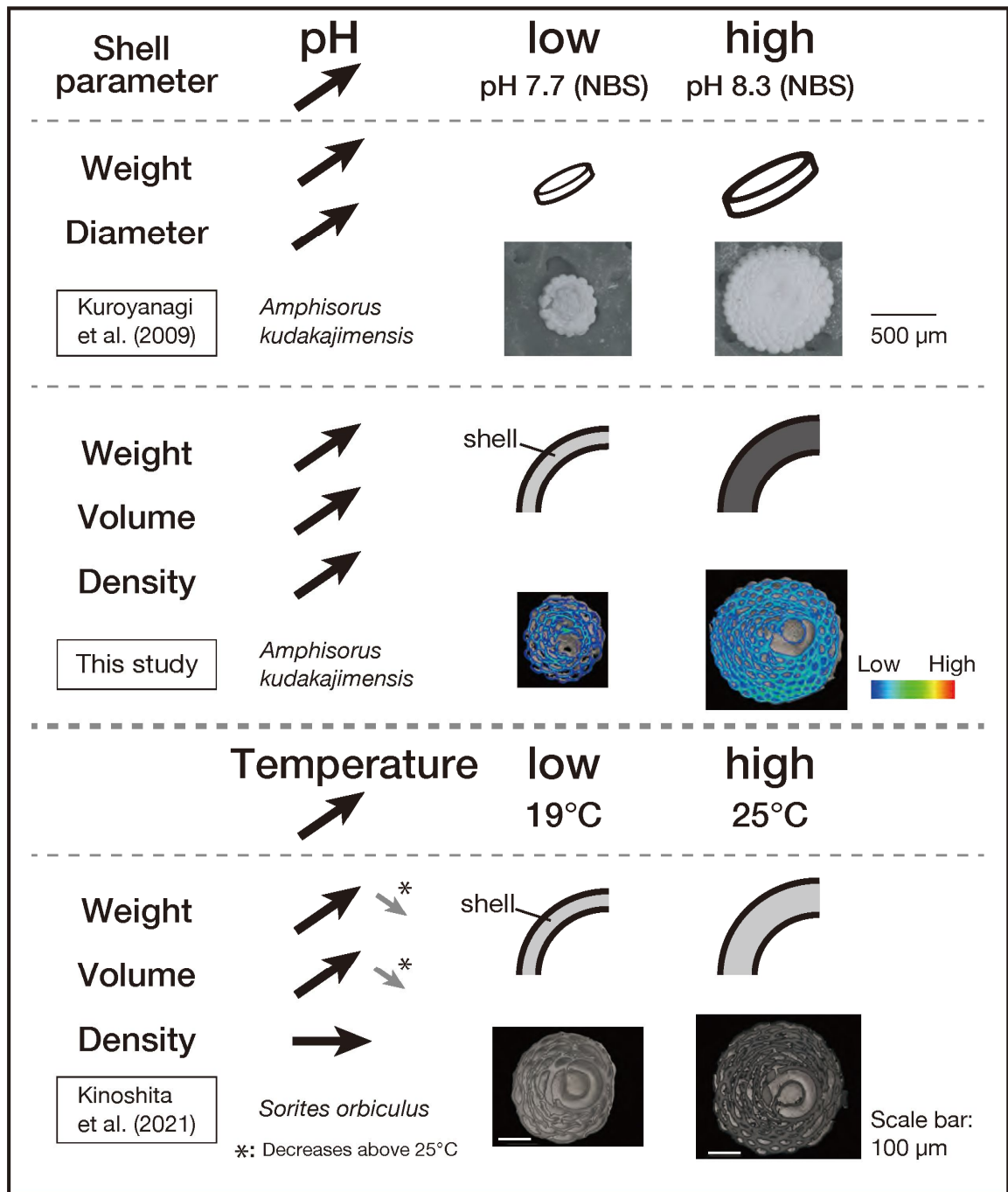


図 2 : 大型有孔虫における pH 温度による殻密度と殻体積への影響 (Kuroyanagi et al., 2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kinoshita Shunichi, Kuroyanagi Azumi, Kawahata Hodaka, Fujita Kazuhiko, Ishimura Toyoho, Suzuki Atsushi, Kano Harumasa, Kubota Yoshimi, Nishi Hiroshi	4. 巻 181
2. 論文標題 Constant shell density of hyaline large benthic foraminifers under thermal stress	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Marine Micropaleontology	6. 最初と最後の頁 102232 ~ 102232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marmicro.2023.102232	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 黒柳あずみ	4. 巻 10月号
2. 論文標題 微化石から読み解く海洋環境 過去・現在,そして未来	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 岩波科学	6. 最初と最後の頁 910 ~ 914
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 -

1. 著者名 Kinoshita Shunichi, Wang Quan, Kuroyanagi Azumi, Murayama Masafumi, Ujiie 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 de Garidel-Thoron Thibault, Chaabane Sonia, Giraud Xavier, Meilland Julie, Jonkers Lukas, Kucera Michal, Brummer Geert-Jan A., Grigoratou Maria, Monteiro Fanny M., Greco Mattia, Mortyn P. Graham, Kuroyanagi Azumi, Howa Helene, Beaugrand Gregory, Schiebel Ralf	4. 巻 9
2. 論文標題 The Foraminiferal Response to Climate Stressors Project: Tracking the Community Response of Planktonic Foraminifera to Historical Climate Change	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2022.827962	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 Maeda Ayumi, Kuroyanagi Azumi, Iguchi Akira, Gaye Birgit, Rixen Tim, Nishi Hiroshi, Kawahata Hodaka	4. 巻 183
2. 論文標題 Seasonal variation of fluxes of planktic foraminiferal tests collected by a time-series sediment trap in the central Bay of Bengal during three different years	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers	6. 最初と最後の頁 103718 ~ 103718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2022.103718	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 Kuroyanagi, A., Irie, T., Kinoshita, S., Kawahata, H., Suzuki, A., Nishi, H., Sasaki, O., Takashima, R., Fujita, K	4. 巻 11
2. 論文標題 Decrease in volume and density of foraminiferal shells with progressing ocean acidification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-99427-1	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 -

1. 著者名 Kinoshita, S., Kuroyanagi, A., Kawahata, H., Fujita, K., Ishimura, T., Suzuki, A., Sasaki, O., Nishi, H.	4. 巻 163
2. 論文標題 Temperature effects on the shell growth of a larger benthic foraminifer (Sorites orbiculus): Results from culture experiments and micro X-ray computed tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Marine Micropaleontology	6. 最初と最後の頁 101960 ~ 101960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marmicro.2021.101960	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 Kuroyanagi Azumi, Kawahata Hodaka, Ozaki Kazumi, Suzuki Atsushi, Nishi Hiroshi, Takashima Reishi	4. 巻 161
2. 論文標題 What drove the evolutionary trend of planktic foraminifers during the Cretaceous: Oceanic Anoxic Events (OAEs) directly affected it?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Micropaleontology	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) 10.1016/j.marmicro.2020.101924	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 Arimoto Jun, Nishi Hiroshi, Kuroyanagi Azumi, Takashima Reishi, Matsui Hiroki, Ikehara Minoru	4. 巻 193
2. 論文標題 Changes in upper ocean hydrography and productivity across the Middle Eocene Climatic Optimum: Local insights and global implications from the Northwest Atlantic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	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) 10.1016/j.gloplacha.2020.103258	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 Kawahata Hodaka, Fujita Kazuhiko, Iguchi Akira, Inoue Mayuri, Iwasaki Shinya, Kuroyanagi Azumi, Maeda Ayumi, Manaka Takuya, Moriya Kazuyoshi, Takagi Haruka, Toyofuku Takashi, Yoshimura Toshihiro, Suzuki Atsushi	4. 巻 6
2. 論文標題 Perspective on the response of marine calcifiers to global warming and ocean acidification? Behavior of corals and foraminifera in a high CO2 world "hot house"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	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) 10.1186/s40645-018-0239-9	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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 黒柳あずみ
2. 発表標題 有孔虫から読み解く過去の環境変遷ー 古環境研究が拓く未来
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下 峻一・黒柳 あずみ・西 弘嗣・藤田 和彦・鈴木 淳・川幡 穂高
2. 発表標題 Effects on shell quality of large benthic foraminifers under different temperature conditions Invited Papers
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒柳 あずみ・鈴木 淳・山岡 香子・橋本 優里・藤井 武史・近藤 俊祐・湊谷 純平
2. 発表標題 Seasonal changes of planktic foraminifera in the subtropical Northwest Pacific based on sediment trap samples
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒柳あずみ・川幡穂高・尾崎和海・鈴木 淳・西 弘嗣・高嶋礼詩
2. 発表標題 白亜紀の海洋無酸素事変(OAE)が浮遊性有孔虫の進化傾向に及ぼす影響の検証
3. 学会等名 日本古生物学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒柳あずみ
2. 発表標題 過去・現在・未来の海洋環境と有孔虫
3. 学会等名 2022年度海洋若手研究集会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒柳あずみ
2. 発表標題 地質学が担う将来の地球環境: 海洋酸性化と有孔虫
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下 峻一、王 権、黒柳 あずみ、村山 雅史、氏家 由利香、川幡 穂高
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 日本地球惑星科学連合2021年大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田 潤一郎、後藤 孝介、石川 晃、黒柳 あずみ
2. 発表標題 海洋リソスフェアと地球表層環境 ~海洋プレート生成史が地球表層環境に与えた影響~
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 歩、黒柳 あずみ、吉村 寿紘、Gaye Birgit、Rixen Tim、鈴木 淳、川幡 穂高
2. 発表標題 Calcification depths of planktic foraminifers constrained using geochemical signatures in the sediment trap samples collected from the Bay of Bengal
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高柳 栄子、若公 良太、木本 ゆうな、若木 重行、黒柳 あずみ、石輪 健樹、横山 祐典、若木 仁美、石川 剛志、井龍 康文
2. 発表標題 Sub-surface water mass exchanges around the eastern equatorial Indian Ocean during the last 50,000 years
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒柳 あずみ、豊福 高志、長井 裕季子、木元 克典、西 弘嗣、高嶋 礼詩、川幡 穂高
2. 発表標題 Effect of euxinic conditions on planktic foraminifers: results from laboratory culture experiments and implications for oceanic anoxic events
3. 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2020 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下 峻一、黒柳 あずみ、西 弘嗣、佐々木 理、藤田 和彦、鈴木 淳、川幡 穂高
2. 発表標題 Effects of larger benthic foraminifers from global warming analysed by Micro-X-ray CT
3. 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2020 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田 歩、黒柳 あずみ、西 弘嗣、Gaye Birgit、川幡 穂高
2. 発表標題 Seasonal variation in assemblage of planktic foraminifera from the sediment trap samples in the Bay of Bengal
3. 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2020 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下峻一・王 権・黒柳あずみ・村山雅史・氏家由利香・川幡穂高
2. 発表標題 マイクロX線CT計測による浮遊性有孔虫コア記録を用いた海洋環境が石灰化生物に及ぼす影響の検証
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 Shunichi Kinoshita, Azumi Kuroyanagi, Hiroshi Nishi, Osamu Sasaki, Kazuhiko Fujita, Atsushi Suzuki, Hodaka Kawahata
2. 発表標題 Effects on larger benthic foraminiferal shell density under global warming
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本古生物学会、西 弘嗣	4. 発行年 2023年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 790
3. 書名 古生物学の百科事典	

〔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

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		
フランス	FRB-CESAB	CEREGE	