

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01204

研究課題名（和文）気候変動に対する風化フィードバックの再検証：氷床形成の影響

研究課題名（英文）Examinaiton of weathering feedbacks to climate change and glacial erosion

研究代表者

吉村 寿紘 (Yoshimura, Toshihiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋機能利用部門(生物地球化学センター)・副主任研究員

研究者番号：90710070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：気候を決定する因子として大気CO₂が社会的な注目を集めている。近年、氷河によって生産される反応性の高い細粒ケイ酸塩鉱物の溶解反応がCO₂の消費に寄与したことが提唱されており、これが寒冷化を促進した可能性がある。しかし地質イベントとの関連性に対して直接的な証拠に乏しい。本研究では氷河による削剥作用によって生産された物質が堆積するニュージーランドと南極海の堆積物試料の化学指標（元素比とリチウム同位体比）から、気候変動と氷床形成に対するケイ酸塩風化強度の変化を復元した。過去100万年間ではより新鮮な物質が供給されること、また氷床形成では化学風化が促進されたことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ケイ酸塩岩の化学風化によって生産された溶質が海洋に運搬されると、海洋生物の石灰化反応によって炭素が海底に固定されることで効率的な二酸化炭素の除去に寄与することが予想されるが、氷河により新鮮な物質の供給が促進されることで、より風化反応の強度が増加したことを確認した。地球上の気候レジームを左右する炭素動態の長期変動の理解に寄与する成果である。

研究成果の概要（英文）：Atmospheric CO₂ has received increasing public attention as a factor determining climate. Recently, it has been proposed that dissolution reactions of reactive fine-grained silicate minerals produced by glaciers contributed to CO₂ consumption, which may have promoted colder temperatures. However, there is a lack of direct evidence for a link with geological events. In this study, we reconstruct changes in silicate weathering intensity in response to climate change and ice sheet formation from chemical indices (element ratios and lithium isotope ratios) of sediment samples from New Zealand and the Antarctic Ocean, where materials produced by glacial ablation were deposited. The results indicate that fresher material was supplied in the past million years and that chemical weathering was enhanced in ice sheet formation.

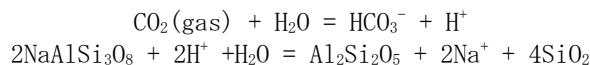
研究分野：地球化学

キーワード：氷河作用 化学風化 削剥 気候 氷期・間氷期

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球の気候を決定する重要な因子として大気二酸化炭素 (CO₂) 濃度が挙げられ、人為起源の温暖化は社会的にも注目が集まっている。大気 CO₂ は地球表層の水に溶存し、それに続くケイ酸塩岩の溶解と変質反応によって数万年の時間スケールで中和される (例: 曹長石のカオリナイト化):



これは岩石の化学風化として知られ、温室効果ガスである大気 CO₂ が地球表層システムから除去されるため気候の寒冷化に寄与する。すなわち長期的な大気 CO₂ 濃度の自然変動を規定する制御因子は陸域の化学風化作用で、岩石が溶解する過程で大気 CO₂ の多くが溶存種の炭酸水素イオンとなり、その結果として陸水のアルカリ度と pH は増加し、最終的には海に注ぐ。その後、炭素は海洋で有機炭素や炭酸カルシウムとして地層中に固定される。人為起源の二酸化炭素の過剰排出に警鐘が寄せられる近年において気候と炭素循環の関係は大きな注目を集めており、気候の調整を担う岩石の風化反応の重要性が高まっている。

大陸地殻の風化様式は輸送制限型と風化制限型の2つのレジームに大別される。前者は岩石の侵食や剥離が遅い場合で、化学風化が十分進行することで被風化物質の供給と岩石風化の総量が制限される。このレジームは低平な地形で滞留時間が長くなることで達成される。後者は隆起が活発で侵食が早い場合で、岩石の新鮮面の露出速度に対して化学風化速度が間に合わないため、岩石の化学変質は十分進行しない。造山運動などの隆起が活発に行われている場合にこれに該当する。

新生代に起こったヒマラヤ-チベットに代表される造山活動は岩石の物理侵食を促し、水-岩石の反応表面積を増加させることで風化 (寒冷化) の促進に寄与したと長らく考えられてきた。しかし、造山活動により地形の起伏が大きくなると水の滞留時間が短くなるため風化反応は進行しづらい。一般に化学風化は寒冷化と CO₂ の増加に対して負のフィードバックをもつ一種の緩衝作用として知られる。

2. 研究の目的

本研究では氷河により削剥作用が働く海域の堆積物の化学組成から、大気 CO₂ 増加に対して負のフィードバックをもつ化学風化反応の様式を明らかにすることを目的とする。本研究は氷床による岩石の削剥が細粒粒子を生産し継続的な寒冷化を促したとする氷床と気候フィードバックに着目し、ニュージーランド沖と南極海の堆積物から同位体比と元素比などの地質記録から風化強度の復元を行った。特にケイ酸塩岩に含まれるリチウムの安定同位体比によって、岩石の削剥と二次鉱物の生成に代表される陸域の風化作用の履歴を読み解き、気候変動のタイミングとの関連性を探る。ケイ酸塩岩の化学風化によって生産された溶質が海洋に運搬され、海洋生物の石灰化反応によって炭素が海底に固定されることで効率的な二酸化炭素の除去に寄与することが予想される。

3. 研究の方法

堆積物の同位体組成と未変質のケイ酸塩岩の組成を比較することで、気候変動に対応した岩石の風化の強度の時系列変化を復元する。堆積物試料は炭酸塩、ケイ酸塩、マンガン酸化物など多様な成分の混合物であるため、これらを化学試薬によって段階的に抽出する必要がある。抽出ターゲットに交換性イオン・炭酸カルシウム・ドロマイト・ケイ酸塩の4つの異なる化学画分を選定した。合計 240 試料抽出し、それぞれの金属濃度から古海洋環境や鉱物の風化強度の情報を抽出した。リチウムについては濃度が低い炭酸塩試料の微量リチウムを陽イオン交換樹脂による事前濃縮を行うことで効率的に単離精製した (図 1)。単離精製されたリチウムは、マルチコレクター型 ICP-MS でリチウム同位体比の分析に供した。化学風化の気候変動への応答は数万年スケールで進行する氷期-間氷期変動よりも長期的な変動を示しており、数十万年の時間スケールで効率的な地球表層の炭素消費に寄与したと考えられる。

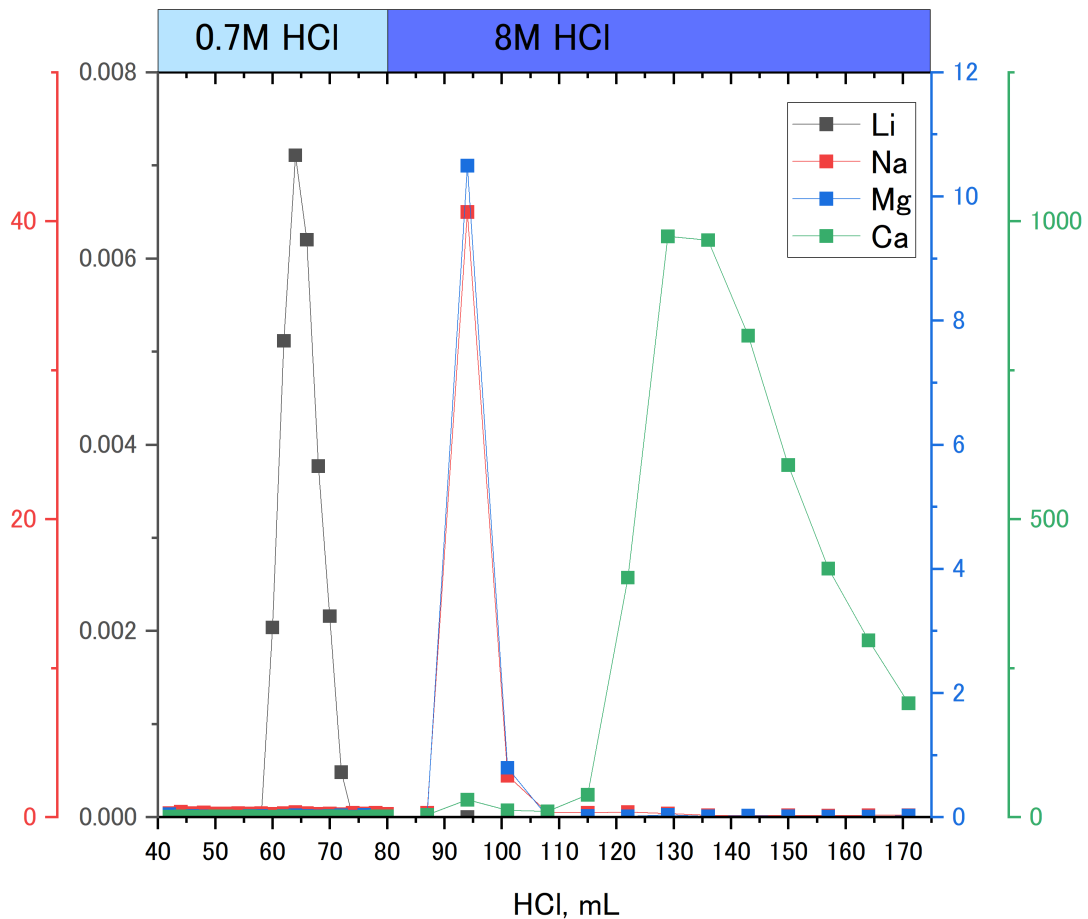


図1. 堆積物からリチウムを濃縮する陽イオン交換樹脂による単離濃縮の溶出曲線。得られたリチウムはイオンクロマトグラフによる精製に供した。

4. 研究成果

ニュージーランド沖の堆積物は過去 100 万年間の風化強度の履歴を記録しており、およそ 20 万年以降により新鮮な物質が堆積(風化強度が低い)していることが判明し、岩石の溶解反応がより効率的に進んでいたことがわかった。風化反応は氷期・間氷期変動よりも長い時間スケールの応答を示した。また主成分鉱物とその変質物である粘土鉱物の組成変化では、斜長石からイライトへの変質が主たる風化反応であることが明らかとなった(図2)。

南極海の堆積物においても、より明瞭な風化強度変化の信号を抽出するために段階リーチングを行うことで炭酸塩鉱物とケイ酸塩鉱物のそれぞれを選択的に溶解する手法を確立した。新生代の主要な寒冷化イベントである始新世-暁新世の移行期(EOT: Eocene-Oligocene Transition)に着目し、南極大陸の縁辺部から得た堆積物からケイ酸塩鉱物のみを化学分離を試みた。EOTは白亜紀型の温暖気候から、新生代型の寒冷気候への急激な移行が起こった時期にあたる。実際に氷床形成に伴う化学風化強度の大きな変化が認められ、リチウム同位体比の変化からケイ酸塩風化が促進された証拠を得た。

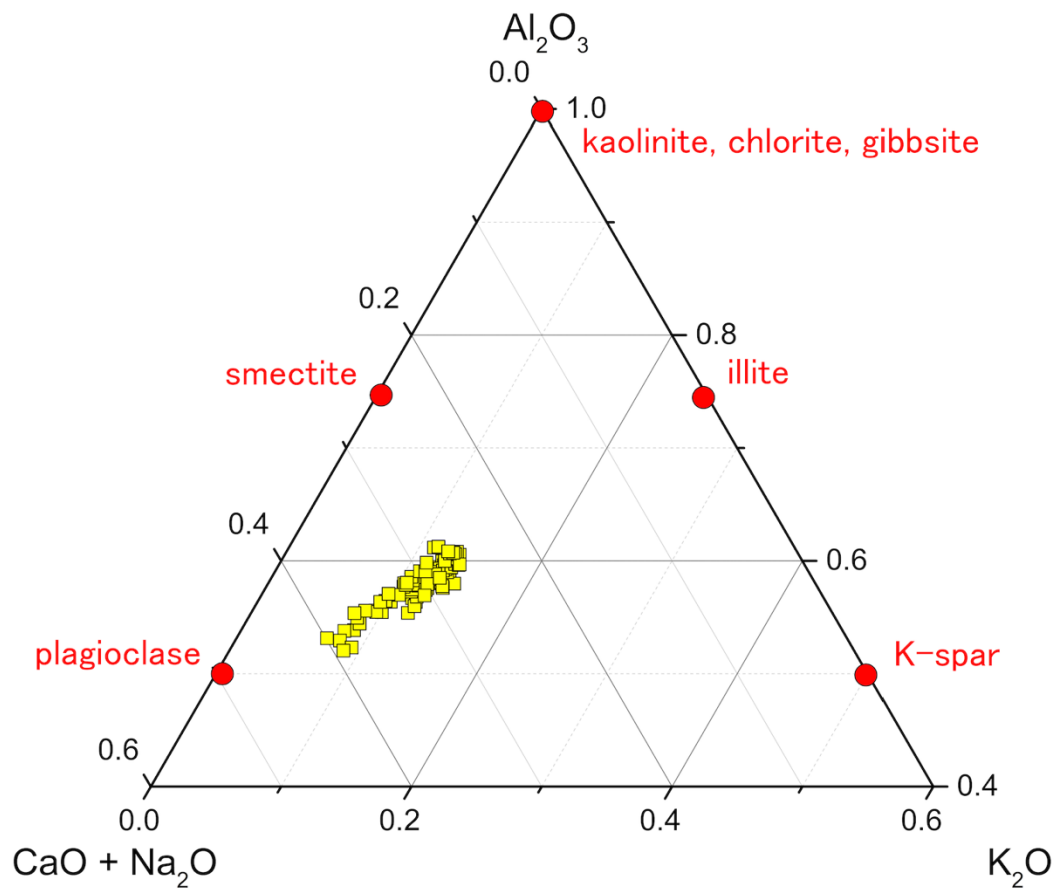


図2. ニュージーランド沖の堆積物における主成分元素組成比。代表的なケイ酸塩鉱物および粘土鉱物の端成分を赤丸、堆積物の測定データを黄色四角で示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshimura, T., Takano, Y., Naraoka, H., Koga, T., Araoka, D., Ogawa, N.O., Sakai, S., Yamaguchi, M., Suzuki, T., Yokoyama, T., Yurimoto, H., et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Chemical evolution of primordial salts and organic sulfur molecules in the asteroid 162173 Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-40871-0	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 Dekov, V.M., Yasuda, K., Kamenov, G., Yasukawa, K., Guguen, B., Kano, A., Yoshimura, T., Yamanaka, T., Bindi, L., Okumura, T., Koski, R.A. Asael, D., Araoka, D. and Kato, Y.	4. 巻 460
2. 論文標題 Mn-carbonate deposition in a seafloor hydrothermal system (CLAM field, Iheya Ridge, Okinawa Trough): Insights from mineralogy, geochemistry and isotope studies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Marine Geology	6. 最初と最後の頁 107055
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.margeo.2023.107055	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 Nitzsche, K.N., Ishikawa, N.F., Yoshimura, T., Kajita, H., Ogawa, N.O., Kawahata, H., Yokoyama, Y. and Ohkouchi, N.	4. 巻 -
2. 論文標題 Historical trend of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from Osaka Bay	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Holocene	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） 10.1177/09596836241236320	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 Kochi, T., Yoshimura, T., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N. and Kuroda, J.	4. 巻 48
2. 論文標題 Carbonate associated sulphate extraction method using weakly acidic cation exchange resins	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geostandards and Geoanalytical Research	6. 最初と最後の頁 77-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ggr.12536	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 Miyajima, Y., Araoka, D., Yoshimura, T., Ota, Y., Suzuki, A., Yoshioka, H., Suzumura, M., Smrzka, D., Peckmann, J. and Bohrmann, G.	4. 巻 361
2. 論文標題 Lithium isotope systematics of methane-seep carbonates as an archive of fluid origins and flow rates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 152-170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2023.10.022	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 Xiao, J., Zhao, Z., Bochez, J., Ma, X., Pogge von Strandmann, P.A.E., Araoka, D., Yoshimura, T., Hossain, H.M.Z., Kawahata, H. and Jin, Z.	4. 巻 621
2. 論文標題 Geothermal input significantly influences riverine and oceanic boron budgets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 118397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2023.118397	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 Yoshimura, T., Wakaki, S., Iwasaki, N., Ishikawa, T. and Ohkouchi, N.	4. 巻 9
2. 論文標題 Stable Sr isotope ($^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) fractionation in calcite precious corals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine 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) 10.3389/fmars.2022.1045909	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 Li, W., Liu, X.-M., Hu, Y., Suzuki, A. and Yoshimura, T.	4. 巻 615
2. 論文標題 Factors controlling coral P/Ca nutrient proxy: Insights from Porites culture experiments and synchrotron-based X-ray spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology	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.palaeo.2023.111449	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 Araoka, D., Simandl, G. J., Paradis, S., Yoshimura, T., Hoshino, M. and Kon, Y.	4. 巻 240
2. 論文標題 Formation of the Rock Canyon Creek carbonate-hosted REE-F-Ba deposit, British Columbia, Canada: constraints from Mg-Sr isotopes of carbonates and fluorite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geochemical Exploratio	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.gexplo.2022.107045	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 Eom, J., Yoshimura, T., Akizawa, N., Wakaki, S., Ishikawa, T., Takazawa, E., Yamaoka, K. and Kawahata, H.	4. 巻 606
2. 論文標題 The magnesium isotopic compositions of the crust and mantle: a study on the Oman ophiolite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Geology	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.chemgeo.2022.120969	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 Li Wenshuai, Liu Xiao-Ming, Wang Kun, Hu Yongfeng, Suzuki Atsushi, Yoshimura Toshihiro	4. 巻 581
2. 論文標題 Potassium incorporation and isotope fractionation in cultured scleractinian corals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	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.epsl.2022.117393	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 Nitzsche Kai Nils, Yoshimura Toshihiro, Ishikawa Naoto F., Ogawa Nanako O., Suzuki Katsuhiko, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 134
2. 論文標題 Trace metal geochemical and Zn stable isotope data as tracers for anthropogenic metal contributions in a sediment core from Lake Biwa, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Geochemistry	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.apgeochem.2021.105107	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Adam David Sproson, Toshihiro Yoshimura, Shigeyuki Wakaki, Takahiro Aze, Tsuyoshi Ishikawa, Yusuke Yokoyama and Naohiko Ohkouchi
2. 発表標題 The impact of Antarctic ice sheet expansion (ca. 34 Ma) on silicate weathering, erosion and the carbon cycle: insights from Li and Mg isotopes
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Miyajima, Daisuke Araoka, Toshihiro Yoshimura, Yuki Ota, Atsushi Suzuki, Hideyoshi Yoshioka, Masahiro Suzumura, Daniel Smrzka, Jorn Peckmann and Gerhard Bohrmann
2. 発表標題 Insights into fluid sources and flow rates from lithium isotope composition of methane-seep carbonates
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaoru Kubota, Tsuyoshi Ishikawa, Toshihiro Yoshimura, Katsunori Kimoto, Qing Chang, Minoru Ikehara, Yusuke Yokoyama, Francisco J. Jimenez-Espejo, Sidney R Hemming, Stephen Barker and Ian R. Hall
2. 発表標題 Seven million year record of multiple geochemical proxies of planktonic foraminifera shells collected from marine sediment core (IODP Exp.361 Site U1476) after removal of clay and boron-specific contamination influences
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉村寿紘、若木重行、岩崎望、石川剛志、大河内直彦
2. 発表標題 寶石サンゴのカルサイト骨格における Sr 安定同位体($88\text{Sr}/86\text{Sr}$)分別
3. 学会等名 地球化学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古知 武、黒田 潤一郎、小川 奈々子、吉村 寿紘、大河内 直彦
2. 発表標題 蒸発実験とシチリア島塩田から採取した石膏および塩水試料を用いた石膏形成時の硫黄同位体分別の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sproson, A.D., Yoshimura, T. Aze, T., Wakaki, S., Ishikawa, T., Yokoyama, Y., Ohkouchi, N.
2. 発表標題 A novel application of Mg and Li isotopes reveals a link between erosion, chemical weathering, and atmospheric CO ₂ during the expansion of Antarctica's ice sheets (ca. 34 Ma)
3. 学会等名 2022 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sproson, A.D., Yoshimura, T. Aze, T., Wakaki, S., Ishikawa, T., Yokoyama, Y., Ohkouchi, N.
2. 発表標題 Can Mg and Li isotopes in the authigenic and detrital fractions of sediments be used to trace paleoweathering? Case study: The EOT
3. 学会等名 America Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 寿紘、常 青、大河内 直彦、石谷 佳之、ウラノバ ダナ、遠藤 博寿、黒田 潤一郎、氏家 由利香
2. 発表標題 表層堆積物に含まれる浮遊性有孔虫チャンバーの微量元素比の変化と個体差
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 寿紘, 大河内 直彦
2. 発表標題 ニュージーランドの更新世陸棚斜面堆積物から読む気候変動
3. 学会等名 地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. D. Sproson, T. Yoshimura, T. Aze, S. Wakaki, T. Ishikawa, Y. Yokoyama, N. Ohkouchi
2. 発表標題 The Mg and Li isotopic composition of authigenic and detrital sedimentary phases record Antarctic chemical silicate weathering across the EOT
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若木 重行, 吉村 寿紘, 高柳 栄子, 若木 仁美
2. 発表標題 第四紀海水Sr同位体進化曲線の再構築に向けた超高精度 $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ 同位体比測定法の開発
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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			
米国	University of North Carolina			
韓国	Seoul National University			
カナダ	British Columbia Geological Survey			