

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14828

研究課題名（和文）前期原生代における真核生物誕生場の解明

研究課題名（英文）The birthplace of eukaryote in the Paleoproterozoic

研究代表者

佐藤 友彦（Sato, Tomohiko）

岡山理科大学・基盤教育センター・准教授

研究者番号：80714831

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球史における真核生物進化の場と見なされているガボン・フランスビル地域において、生物進化・環境変動の時間・空間分布の解明を目的とした地域間層序対比（岩相、化石、炭素・窒素同位体比など）を行った。フランスビル地域よりも浅海で堆積したラストゥールビル地域において、炭素・窒素同位体比ともに漸進的な変動が明らかになり、真核生物様化石の産出前に低酸素環境へ推移したことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真核生物の誕生は、地球生命史における最も大きな進化のジャンプである。その進化がいつどのような環境で起きたのかを地質学・層序学的に解読することは、生物進化の必要十分条件を解明する鍵として、地球科学だけでなく生物学においても重要な意義を持つ。本研究課題で得られた成果を下敷きに、ガボンにおける国際的な陸上掘削プロジェクトも動き始めており、前期原生代の研究が今後さらに活発化していくと予想される。

研究成果の概要（英文）：In the Earth's history, the Paleoproterozoic Franceville Basins in Gabon is regarded as the birthplace of eukaryote. In order to clarify the temporal and spatial distribution of the biological evolution and the environmental changes in that period, this study conducted the geological fieldwork and inter-regional stratigraphic correlation of litho-facies, fossils, carbon and nitrogen isotopes, etc. In the Lastourville sub-basin, which was located in shallower ocean than the Franceville sub-basin, gradual changes in both carbon and nitrogen isotope ratios were identified. It suggests a gradual change into an anaerobic condition before the appearance of the eukaryotic fossils.

研究分野：地球史

キーワード：前期原生代 真核生物 炭素同位体 酸化還元 ガボン

1. 研究開始当初の背景

地球史の中で、真核生物の誕生は最も重要な事件の一つである。その進化は、原核生物であるバクテリアとアーキアの細胞内共生によるものと推定されているが、一体どのような環境下でその進化が起こったのかは未だ謎に包まれている。最古の真核生物化石の候補として、アフリカ・ガボンの約22億年前 (Sawaki et al., 2017, Geosci.Front.) の地層から、数cm大で複雑な形状を持つ化石が発見された (Albani et al., 2010, Nature)。しかし、この化石が真核生物の化石であるという決定的な証拠は、未だ示されていない。近年、ガボンの複数の地域から類似の化石が発見されつつある (Moussavou et al., 2015, J. Geol. Geophys.) が、層序の地域間対比が確立されておらず、化石の時間・空間分布が未解明である。また、化石層序と同位体層序を組み合わせた研究が十分に行われておらず、どのような造構場・環境で真核生物の進化が起きたかは明らかにされていない。

全地球的にも、前期原生代は環境激変の時代であった (図1)。大気海洋が大きく酸化的に変化した、いわゆる大酸化事件 (Great Oxidation Event; Lyons et al., 2014, Nature) が起こり、酸素濃度の増加が真核生物の出現に関係していると考えられているものの、定量的な酸素レベルや因果関係は未だ示されていない。他にも、無機炭素同位体比の正異常が地球史で最も長く大きく見られる、いわゆるロマグンディ異常 (Lomagundi Excursion; Martin et al., 2013, Earth Sci. Rev.) と呼ばれる極めて特異な表層炭素循環の時期として知られている。ガボンにおいても、炭素同位体比の正異常は検出されているものの、真核生物化石の出現との関係性は未だ明らかにされていない。

そこで、本研究では、ガボンの化石が真核生物であるか否かを検証するとともに、真核生物が出現した場所を詳細に特定することを目的とした。さらに、その同位体層序を用いて当時の地球化学的環境変動を調べることで、真核生物の進化に必要な条件の解明を試みる。

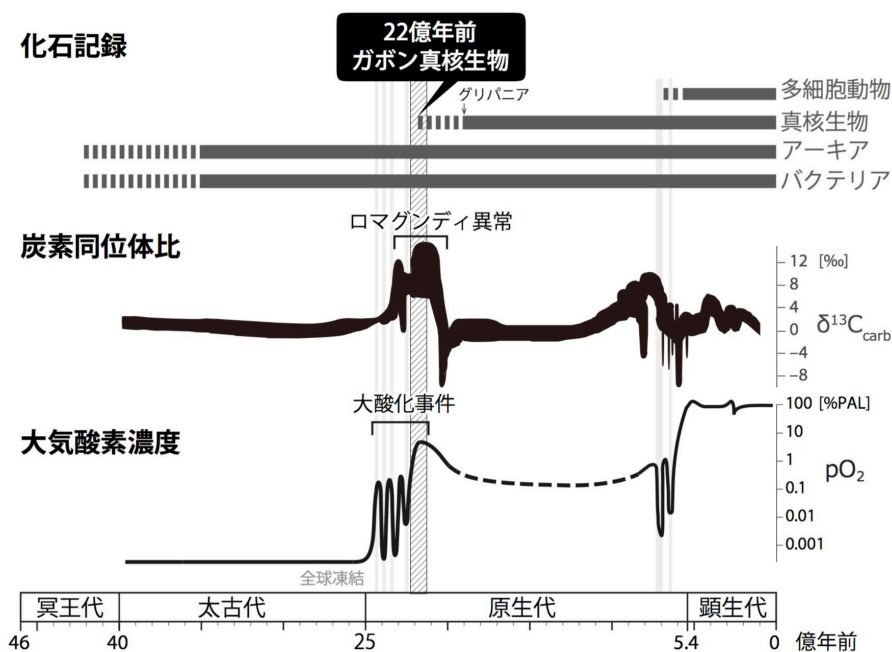


図1. 地球史46億年における生物進化と環境変動の歴史。

2. 研究の目的

(1) 最古のガボン化石産出地の特定

ガボン生物化石の産地は、前期原生代リフト海盆堆積層である (図2)。本研究では、フランスビル、ラストゥールビル、オコンジャ各地域の岩相層序を対比し、化石の産出層準を比較することで、真核生物の誕生場が一体どの地域であったのか、またその場所はどのような堆積環境にあったのかを解明する。とくに、化石が発見されてはいるものの地層の露出が乏しい森林地帯のため層序が十分に検討されてこなかったオコンジャ地域において、新たに採取した陸上掘削試料を用いて、化石出現前後における連続的な環境変動の復元を目指す。詳細な層序対比のもと、リフト海盆各地域における化石の時間・空間分布を明らかにする。

(2) ガボン化石産出前後の環境変動(炭素循環・窒素循環)の解明

採取した岩石試料を用い、微生物活動の指標となる炭素・窒素同位体比層序を確立する。ガボンのフランスビル地域で見られる有機炭素同位体比の負のシフトは、ロマグンディ異常の終了に相当すると考えられてきた (Kump et al., 2011, Science) が、申請者らの新たな年代制約 (Sawaki

et al., 2017, Geosci. Front.) によって時期のずれが明らかになり、グローバルな炭素同位体比変動ではない可能性が出てきた。データが報告されていない他の2地域において炭素同位体層序を確立することにより、この炭素同位体比変動の実態解明を目指す。窒素同位体比は、真核生物の代謝および酸化還元状態の指標にもなりうる (Kipp et al., 2018, Earth Planet. Sci. Lett.)。フランスビル地域よりも浅海で堆積したラストゥールビル地域および、これまでに検討されていないオコンジャ地域においても分析を行い、真核生物活動および酸化還元環境の地域差を明らかにする。また、窒素同位体比の示す酸化還元を正しく評価するため、酸化還元鋭敏元素 (REEなど) の分析を合わせて行う。

(3) ガボン化石が真核生物であることの検証

ガボンで産出する化石の3次元構造観察および局所分析により、真核生物起源の有機物を探す (図3)。これまでに検討されてきたガボンの化石は、いずれも黄鉄鉱で置換されているため、有機物が残存しておらず、決定的な証拠を示すに至らなかった。申請者と共同研究者の保有する化石の中には、珪酸-炭酸塩質のものも存在するため、分析に十分な有機物が残存していることが期待される。そこで、ガボンの各種化石について、X線μ-CT観察による内部構造観察を行う。また、保存状態の良い有機炭素を含有する化石を発見出来れば、顕微赤外分光法 (μ-FTIR) を用いて脂肪酸炭化水素を分析することにより、バクテリア・アーキア起源か、真核生物起源かを判別することができる (Igisu et al., 2012, Environ. Microbiol. Rep.) と期待される。これらの分析により、ガボンの化石が「最古の真核生物」か否かを検証する。

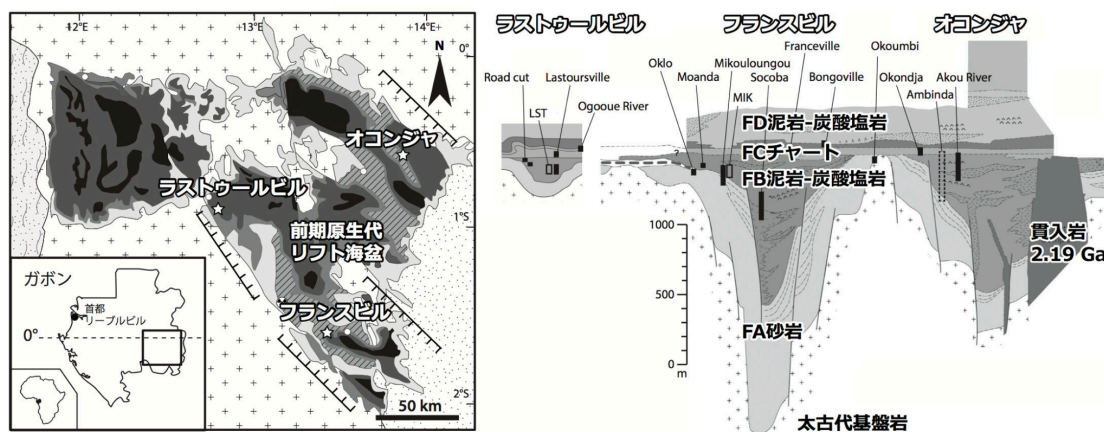


図2. ガボン南東部の地質図・模式断面図。前期原生代リフト海盆は3つの地域に区分される。

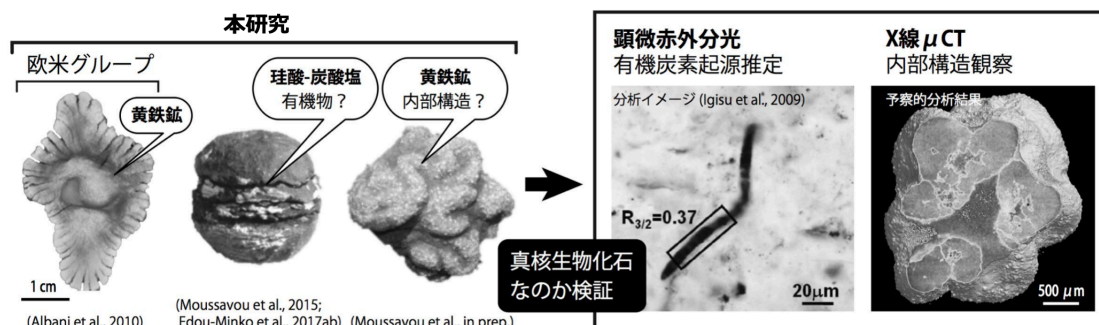


図3. 本研究で扱うガボンの真核生物様化石と、その分析計画。

3. 研究の方法

(1) ガボンにおける地質調査

2019年8月にガボンで地質調査を行い、新たな陸上掘削コアの記載および試料採取を行った。岩石試料を日本へ運搬し、岩石薄片の作成・観察を行い、化学分析に適した試料の選定を行った。

(2) 同位体分析・その他分析

安定同位体質量分析計を用いて、黒色泥岩試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ および炭酸塩岩試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ を測定した。

(3) 化石分析

X線μ-CTを用いて化石内部構造観察を行い、SEM-EDSを用いて化石断面の観察を行った。

4. 研究成果

(1) 同位体分析および層序対比

炭素・窒素同位体分析を行い、各地域における連続的な層序を確立した。中でも、ラストゥールビル地域およびオコンジャ地域のFD層について連続的な有機炭素・窒素同位体層序を示したのは世界初である。さらに、ラストゥールビル地域のFB層中部において無機炭素同位体比の負シフトを特定した。従来の最古真核生物とされる化石の産出（フランスビル地域FB層最上部）よりも、明らかに下位（ラストゥールビル地域FB層中部）において、それまで安定していた炭素循環に変化があったことが示された。また、フランスビル地域よりも浅海で堆積したラストゥールビル地域において窒素同位体比の変動が先行したことが明らかになった（図4; Sato et al., in prep.).

ラストゥールビル地域における黄鉄鉱について、多種硫黄同位体比分析を行った結果、FB層での無機炭素同位体比の負シフトに対応して、硫黄同位体比の変動が見られ、低酸素環境への移行が示唆された（Kurihara et al., in prep.). また、希土類元素（REE）分析を行った結果、FB層の炭酸塩岩は海洋環境で堆積したことが、周囲海水は続成過程でマンガン酸化物を形成する程度に酸化していたことを明らかにした（Yoshida et al., submitted).

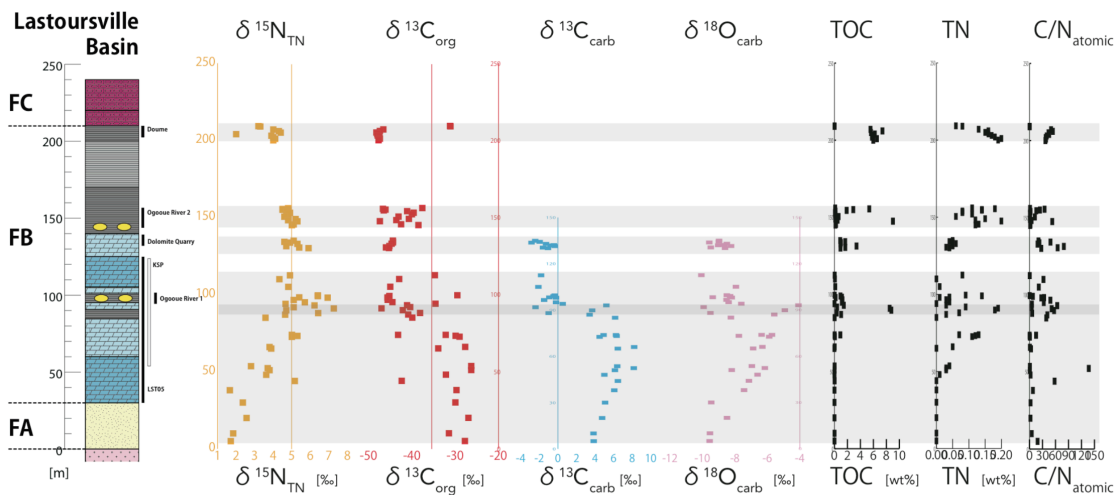


図4. ラストゥールビル地域で得られた同位体 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$) 層序。

(2) 化石分析

新たに発見された黄鉄鉱主体の化石および珩酸-炭酸塩質の化石について、形態・内部構造観察を行った（図5; Moussavou et al., in prep.). 化石内部有機物局所分析（顕微赤外分光分析）に適した化石試料は、未だ見つかっていないが、今後、有機炭素起源分析に十分な有機物が残存する個体の発見が期待される。

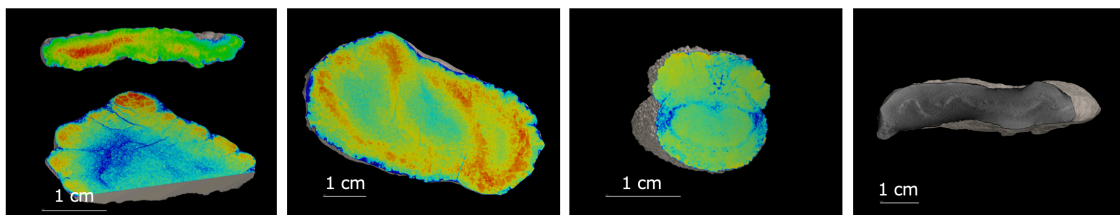


図5. ガボン真核生物様化石（黄鉄鉱，珩酸-炭酸塩）のマイクロCT像の例。

(3) 今後の展望

2020年から2022年にかけては、COVID-19の世界的流行の影響により、ガボンにおける地質調査やガボン人共同研究者の招聘を当初の予定通り行うことができなかった。既存の岩石・化石試料を用いて研究課題を推進しつつ、現地とのより強い協力関係を構築しなければならない困難に直面した。2022年11月に、ガボン人共同研究者と共に、陸上掘削プロジェクトの国際ワークショップに参加し、これまでの研究成果の発表を行った。本研究課題で得られたデータを元に、地域間層序対比による生物進化・環境変動の時間・空間分布の解明を目的とした今後の共同研究・掘削計画について、13ヶ国42人の研究者と議論を行った。2023年1月には、ガボン・マスク工科大学のMoussavou教授を東京工業大学へ招聘し、フランスビル地域で新たに採取された岩石・化石試料の分析（顕微鏡観察、元素分布測定、炭素・硫黄同位体分析、マイクロCT分析）を行った。新たに得られた成果についても、論文の投稿を準備しており、今後もガボンの研究チームとの共同研究を継続し、前期原生代の真核生物誕生場の解読を推進するつもりである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TAKEYAMA Naota, TAKAHASHI Yuka, NAGATA Shohei, SAWAKI Yusuke, SATO Tomohiko, MARUYAMA Shigenori, KANA I Akio	4. 巻 129
2. 論文標題 Importance of Prokaryotes for the Origin of Eukaryotes and the Global Environment at 2.4-2.0 Ga	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 899 ~ 912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.129.899	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 Suda Konomi, Aze Takahiro, Miyairi Yosuke, Yokoyama Yusuke, Matsui Yohei, Ueda Hisahiro, Saito Takuya, Sato Tomohiko, Sawaki Yusuke, Nakai Ryosuke, Tamaki Hideyuki, Takahashi Hiroshi A., Morikawa Noritoshi, Ono Shuhei	4. 巻 585
2. 論文標題 The origin of methane in serpentinite-hosted hyperalkaline hot spring at Hakuba Happo, Japan: Radiocarbon, methane isotopologue and noble gas isotope approaches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117510 ~ 117510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2022.117510	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 Savinskiy Ilya, Safonova Inna, Perfilova Alina, Kotler Pavel, Sato Tomohiko, Maruyama Shigenori	4. 巻 111
2. 論文標題 A story of Devonian ocean plate stratigraphy hosted by the Ulaanbaatar accretionary complex, northern Mongolia: implications from geological, structural and U?Pb detrital zircon data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 2469 ~ 2492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00531-021-02150-5	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 庄司 真史、小林 佑介、河合 研志、佐藤 友彦	4. 巻 74
2. 論文標題 視点の水平移動可能なBYOD型地学VR巡検教材の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地学教育	6. 最初と最後の頁 13 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18904/chigakukyoiku.74.1_13	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 MARUYAMA Shigenori、SATO Tomohiko、SAWAKI Yusuke、SUDA Konomi	4. 巻 129
2. 論文標題 Unravelling the Origins of Life: Hakuba Hot-spring Chemistry of Oldest Microbes and Significance of Microbes Surviving in a Hadean-like Environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 757 ~ 777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.129.757	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 Yoshida, S., Bakakas, K.M., Ishihara, Y., Moussavou, M., Asanuma, H., Sato, T., Hirata, T., Ligna, C., Sawaki, Y., Edou-Minko, A.	4. 巻 -
2. 論文標題 Depositional condition of Paleoproterozoic Francevillian carbonate rocks revisited from rare earth element contents	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geoscience Frontiers	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 Retonda-Kondja Stevy, Ndong-Ondo Simplicie Marin, Edou-Minko Ambroise, Sato Tomohiko, Musavu-Moussavou Benjamin, Moussavou Mathieu	4. 巻 17
2. 論文標題 Archean Itabirites From Ovan, NE-Gabon: Petrography, Mineralogy And Elemental Mapping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Scientific Journal ESJ	6. 最初と最後の頁 380 ~ 395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19044/esj.2021.v17n25p380	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 SATO Tomohiko、YOSHIYA Kazumi、MARUYAMA Shigenori	4. 巻 128
2. 論文標題 History of the Hadean "Living Microfossil" OD1 and Ultra-reducing Environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 571 ~ 596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.571	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 YOSHIYA Kazumi, SATO Tomohiko, OMORI Soichi, MARUYAMA Shigenori	4. 巻 128
2. 論文標題 Birthplace of Proto-life: Role of Secondary Minerals in Forming Metallo-proteins through Water-Rock Interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 625 ~ 647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.625	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 SAWAKI Yusuke, SATO Tomohiko, FUJISAKI Wataru, UEDA Hisahiro, ASANUMA Hisashi, MARUYAMA Shigenori	4. 巻 128
2. 論文標題 Geology around Natural Reactors and Birthplace of Eukaryotes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 549 ~ 569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.549	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 Sawada Hikaru, Mugandani Ernest Tafumanei, Sato Tomohiko, Sawaki Yusuke, Sakata Shuhei, Isozaki Yukio, Maruyama Shigenori	4. 巻 31
2. 論文標題 Age constraints on the Palaeoproterozoic Lomagundi-Jatuli Event in Zimbabwe: Zircon geochronology of the Magondi Supergroup	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Terra Nova	6. 最初と最後の頁 438 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ter.12407	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 KONO Sena, ISOZAKI Yukio, SATO Tomohiko, ZHANG Xingliang, LIU Wei	4. 巻 130
2. 論文標題 High-resolution Stratigraphy of the Lowermost Cambrian Sequence at the Xiaolantian Section, Yunnan, South China: Lithofacies, Key Bed, and Local/Regional Correlation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 43 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.43	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 該当する

1. 著者名 Kono Sena, Isozaki Yukio, Sato Tomohiko, Yasuhara Moriaki, Liu Wei, Zhang Xing-Liang	4. 巻 30
2. 論文標題 Unique lowermost Cambrian small shelly fossils (SSFs) from eastern Yunnan, South China: implications for the early diversification history of animals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Palaeoworld	6. 最初と最後の頁 199 ~ 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.palwor.2021.02.001	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 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yoshida, S., Asanuma, H., Sato, T., Sawaki, Y., Hirata, T.
2. 発表標題 The depositional setting of Francevillian Group, Gabonese Republic, revisited from REE geochemistry
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kurihara, A., Sato, T., Sawaki, Y., Moussavou, M., Ueno, Y.
2. 発表標題 Redox change in Paleoproterozoic estimated from multiple sulfur isotope analysis of Francevillian successions in Gabon
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kurihara, A., Sato, T., Sawaki, Y., Moussavou, M., Ueno, Y.
2. 発表標題 Multiple sulfur isotope geochemistry of pyrites in black shales of the Paleoproterozoic Francevillian successions, Gabon
3. 学会等名 Goldschmidt 2023 Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sato, T., Sawaki, Y., Maruyama, S., Bakakas, K., Ligna, C., Moussavou, M., Edou-Minko, A.
2. 発表標題 The demise of the positive carbon isotope excursion in the Paleoproterozoic Francevillian Basins, Gabon.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤友彦, 澤木佑介, 浅沼尚, 上田修裕, 丸山茂徳
2. 発表標題 カボン前期原生代フランスヴィル層群の炭酸塩炭素同位体層序
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤友彦, 澤木佑介, 松井洋平, 丸山茂徳
2. 発表標題 前期原生代における炭素同位体比正異常の終焉と真核生物の出現
3. 学会等名 日本地質学会第126 年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤友彦, 庄司真史, 小林佑介, 河合研志
2. 発表標題 バーチャル巡検：360度画像を用いた地学教材のオンライン授業での実践
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamaguchi, K., Sato, T., Aoki, K.
2. 発表標題 A field guide using virtual reality technology: Introduction of outcrops around Okayama, Japan
3. 学会等名 The 9th International Conference on Geoscience Education (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤友彦, 磯崎行雄, 堤 之恭, 重田康成, 小玉一人, 長谷川 卓
2. 発表標題 日本列島弧海溝系の北方延長：サハリンにおける白亜紀前弧砂岩の後背地解析
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ https://sites.google.com/ous.ac.jp/earth/
--

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			
ガボン	マスク工科大学			