

令和元年6月20日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17826

研究課題名(和文) 前期原生代における多細胞生物誕生場の解明

研究課題名(英文) The birthplace of putative multicellular organisms in the Paleoproterozoic

研究代表者

佐藤 友彦 (Sato, Tomohiko)

東京工業大学・地球生命研究所・研究員

研究者番号：80714831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ガボンにおいて地質調査を行い、最古の真核生物化石を産する前期原生代堆積盆地の詳細な岩相・化石・化学層序を検討した。その結果、フランスヴィル地域において、化石の堆積環境は比較的嫌氣的だったことを明らかにした。また、ウラン濃集層由来の局所的な高放射線場が進化を促進した可能性を示唆した。ラストウルヴィル地域では、初めて連続的な炭素同位体比層序を確立し、化石出現前後において炭素同位体比の負変動を検出した。これはグローバルなLomagundi Excursionの終焉に対応し、真核生物の出現が海洋炭素循環を大きく変えた可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原核生物(バクテリア、アーキア)から真核生物への進化は、地球史における最も大きな進化の一つである。その進化が、いつどのような環境下で起きたのか明らかにするためには、最古の真核生物化石が産する地層から当時の環境を解読することが不可欠である。本研究で明らかにした、局所的な高放射線場や、地球規模の炭素循環変動と真核生物出現の関係は、地球科学のみならず生物学において、生物進化の必要十分条件を解明するための鍵となると期待される。

研究成果の概要(英文)： This study conducted the geological fieldworks in Gabon, and investigated the detailed litho-, bio-, and chemo-stratigraphy of the Paleoproterozoic sedimentary basins that yields the putative oldest eukaryotic fossils. The depositional environment of the fossil horizons in the Franceville Basin was clarified to be relatively anaerobic. The local high-radiation setting by the uranium-concentrated bed possibly accelerated the evolution of eukaryotes. In the Lastoursville Basin, the continuous $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ stratigraphy was newly established, and a negative $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ shift was identified across the fossil appearance. This negative shift may correspond to the terminal Lomagundi Excursion and suggests that the appearance of eukaryotes dramatically changed the global oceanic carbon cycle.

研究分野：地球史

キーワード：前期原生代 ガボン 真核生物 層序

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球生命進化の中で、真核生物の誕生および多細胞生物の誕生は、極めて重要な転換点である。アフリカ・ガボンの前期原生代堆積層(約22億年前)において発見された大型化石は、その大きさと複雑さから、当初は多細胞生物と解釈されていた(Albani et al., 2010)が、近年、少なくとも真核生物コロニーの化石ではないかと思なされるようになった。これは、グリパニア(約19億年前; Han & Runnegar, 1992)よりも古く、最古の真核生物化石である。また、約22~21億年前は、世界各地で+5‰を超える高い炭素同位体比が記録されており(Lomagundi Excursion)、生物一次生産および有機物埋没の増加、さらには大気酸素の増加が示唆される時期に当たる(Karhu & Holland, 1996)。ガボンの地層からも、その炭素同位体比正異常が報告されており(Kump et al., 2011)、生物進化・環境変動のいずれにおいても鍵となる地域である。しかし、該地域は熱帯雨林に覆われ地層の露出が限られているため、連続的な層序の検討や地域間の対比が、十分に行われていなかった。

2. 研究の目的

ガボン南東部フランスヴィル堆積盆地において地質調査・岩石試料採取を行い、前期原生代の堆積層の岩相・化石・化学層序を明らかにし、真核生物がどのような環境下で出現したのか推定することを目的とした。

3. 研究の方法

1) 地質調査・岩石採取

前期原生代のフランスヴィル層群FA-FD層が分布するガボン南東部のフランスヴィル、ラストゥールヴィル、オコンジャ地域において、計20地点の露頭を観察し、詳細に層序の記載を行い、計400個以上の岩石試料の採取を行った。また、ラストゥールヴィル地域およびオコンジャ地域の2地点において陸上掘削によるコア試料採取を行った。

2) 化石の観察

フランスヴィル地域およびオコンジャ地域に産する化石について、SEM-EDSを用いた化石断面の微細構造および元素分布の観察、X線マイクロCTを用いた3次元内部構造の観察を行った。

3) 堆積年代の制約

オコンジャ地域において、化石を含む堆積岩層FB層へ貫入する花崗岩からジルコンを分離し、U-Pb年代測定を行った。

4) 化学層序による堆積環境の推定

フランスヴィル、ラストゥールヴィル、オコンジャ地域において、化石産出層準を含む堆積岩(炭酸塩岩および黒色泥岩)の無機炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 、有機炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、窒素同位体比 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ を測定した。

4. 研究成果

1) 地質調査・岩石採取

フランスヴィル、ラストゥールヴィル、オコンジャ地域において、それぞれ真核生物様化石のFB層における産出層準を特定した。フランスヴィル地域の化石は、自然原子炉を胚胎するウラン濃集層の上位の黒色泥岩層から産出し、地層を貫く石英脈の三次元分布から、高放射線環境が生物進化を促進させた可能性があることを示した(澤木ほか, 2019)。FB層の岩相は地域により異なり、フランスヴィル、オコンジャ地域では砂岩・泥岩が主体なのに対し、ラストゥールヴィル地域では炭酸塩岩が卓越することが明らかになった。オコンジャ地域においては、砂岩・泥岩中に玄武岩が挟在することを報告した(Ligna et al., 2018)。また、ラストゥールヴィル、オコンジャ地域における掘削コア採取により、両地域のFD層の連続的な層序が初めて確立された。

2) 化石の観察

オコンジャ地域に産する化石 *Akouemma hemisphaeria* が、内部微細構造および元素分布に基づき、球状の微生物コロニーの化石である可能性を示した(Edou-Minko et al., 2017a, b)。従来ガボンで報告されていた黄鉄鉱化石とは異なり、この化石は珪酸-炭酸塩質であるため、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。

3) 堆積年代の制約

FB 層へ貫入する花崗岩のジルコン U-Pb 年代 2191 ± 13 Ma が得られた (Sawaki et al., 2017). この結果から、真核生物化石を含む FB 層の堆積年代は、従来考えられていたよりも約 1 億年古いことが示された。

4) 化学層序による堆積環境の推定

本研究では、これまで十分検討されてこなかった炭酸塩岩堆積場であるラストゥールヴィル地域を中心に、新たに同位体層序を確立した。ラストゥールヴィル地域において、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ は、FB 層中部から FD 層下部にかけて +5 ‰程度の値を示すことが初めて明らかになった。このことは、硝化・脱窒が卓越する比較的好気的な環境での堆積を示唆する。フランスヴィル地域において、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ は、FB 層上部に当たる化石産出層において 0 ‰まで下がる。このことは、化石の堆積場が、窒素固定が卓越する比較的嫌気的な環境であったことを示唆する。化石産出層は、先行研究 (Canfield et al., 2013) では、鉄の化学種分析に基づいて「酸化的」と判別されていたが、薄片観察から黄鉄鉱が多産することが確認され、むしろ「還元的」な堆積場であったことが示された。一方、ラストゥールヴィル地域の FB 層中部において $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ の +5 ‰から -2 ‰への負シフトが得られた。この負シフトは、炭酸塩岩に乏しいフランスヴィル地域では報告されていない変動であり、これは、グローバルな Lomagundi Excursion の終焉に対応すると考えられる。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ と概ね平行に推移し、その差は約 -27 ‰であった。この分別は、カルビン回路により説明可能である。特筆すべきは、FB 層中部において、分別が -45 ‰に達することである。この大きな分別は、一般にメタン資化菌によるものと解釈されるが、該当層準は、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ および予察的 REE 分析の結果から、比較的好気的な環境にあったと推定されている。好気的な環境で -45 ‰の分別を達成できる特殊なメカニズムが存在していた可能性を考える必要がある。同位体層序に関する研究成果は、論文公表準備中である (Sato et al., in prep).

5) まとめ・今後の展望

本研究により得られた主要な新知見は以下の通りである。(i) フランスヴィル地域において、FB 層上部に産する化石は、比較的嫌気的な環境で堆積した。また、ウラン濃集層由来の局所的な高放射線場が真核生物の進化を促進した可能性がある。(ii) ラストゥールヴィル地域において初めて FB-FD 層の連続的な同位体層序を確立した。その結果、FB 層中部において無機炭素同位体比の負シフトが認められた。これは、Lomagundi Excursion の終焉と対応すると考えられる。原核生物よりも飛躍的にサイズが大きい真核生物の出現が、全球的な海洋炭素循環に大きな変化をもたらし、地球史上でも特異な炭素同位体比異常期の終焉を導いたと推察される。

今後、本研究で完全連続層序の確立を達成できなかったオコンジャ地域において、より連続的かつ詳細な試料採取を行い、化石出現前後における環境の復元を目指す。また、ガボンの化石が真核生物であるか否か、未だに決定的な証拠が示されていないため、その評価手法および適した化石試料の検討を行う。ガボン・マスク工科大学の Edou-Minko 教授、Moussavou 教授ら研究チームと、引き続き共同研究を推進していくつもりである。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

1. Sawada, H., Mugandani, E.T., **Sato, T.**, Sawaki, Y., Sakata, S., Isozaki, Y., Maruyama, S., Age constraints on the Paleoproterozoic Lomagundi-Jatuli Event in Zimbabwe: zircon geochronology of the Magondi Supergroup. *Terra Nova*, 00: 1–7, 2019. <https://doi.org/10.1111/ter.12407> (査読有)

2. Ligna, C., Moussavou, M., Bakakas, K., Mbina, M., **Sato, T.**, Petrology, Geochemistry and Geodynamic Significance of the Mafic and Ultramafic Rocks of the Akou (Okondja Basin, Gabon). *European Scientific Journal*, 14, 12, 347-359, 2018. (査読有)

3. Edou-Minko, A., Moussavou, M., **Sato, T.**, Sawaki, Y., Ndong Ondo, S., Maire, R., Fleury, G., Mounquengui, M.M., Kaestner, A., Ortega, R., Roudeau, S., Carmona, A., Mvoubou, M., Moussavou, B.M., Sasaki, O., Maruyama, S., Growth, Duplication and Lateral Mutual Compressive Deformation of Akouemma hemisphaeria on the Seafloor of Okondja Basin at 2.2 Ga (Gabon). *International Journal of Geosciences*, 08(09), 1172-1191, 2017. (査読有)

4. Edou-Minko, A., Moussavou, M., **Sato, T.**, Tchikoundzi, C., Sawaki, Y., Ndong Ondo, S., Ortega, R., Maire, R., Kaestner, A., Mbina Mounquengui, M., Roudeau, S., Fleury, G., Carmona, A., de Parseval, P.H., Makaya Mvoubou, Musavu Moussavou, B., Ogandaga Agondjo, M., Sasaki, O., Maruyama, S. An Akouemma hemisphaeria Organic Macrofossils Colony Hosting Biodiversity Assemblage on the Seafloor of Okondja Basin (Gabon) dated at 2.2 Ga. *Journal of Geology & Geophysics*, 6:281, 1–21,

2017. (査読有)

5. Sawaki, Y., Moussavou, M., **Sato, T.**, Cédric, L., Asanuma, H., Sakata, S., Obayashi, H., Hirata, T., Edou-Minko, A. Chronological constraints on the Paleoproterozoic Francevillian Group in Gabon. *Geoscience Frontiers*, 8, 397–407, 2017. (査読有)
6. Yoshiya, K., **Sato, T.**, Omori, S., Maruyama, S., The Birthplace of Proto-Life: Role of Secondary Minerals in Forming Metallo-Proteins through Water-Rock Interaction of Hadean Rocks. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 48, 373-393. 2018. (査読有)
7. Kato, D., Aoki, K., Komiya, T., Yamamoto, S., Sawaki, Y., Asanuma, H., **Sato, T.** Tsuchiya, Y., Shozugawa, K., Matsuo, M., Windley, B., Constraints on the P–T conditions of high-pressure metamorphic rocks from the Inyoni shear zone in the mid-Archean Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Precambrian Research*, 315, 1-18. 2018. (査読有)
8. Zhang, XL., Liu W., Isozaki, Y., **Sato, T.**, Centimeter-wide worm-like fossils from the lowest Cambrian of South China. *Scientific Reports*, 7:14504, 2017. (査読有)
9. Asanuma, H., Fujisaki, W., **Sato, T.**, Sakata, S., Sawaki, Y., Aoki, K., Okada, Y., Maruyama, S., Hirata, T., Itaya, T., Windley, B.F. New isotopic age data constrain the depositional age and accretionary history of the Neoproterozoic-Ordovician Mona Complex (Anglesey-Lleyn, Wales). *Tectonophysics*, 706-707, 164–195, 2017. (査読有)
10. Fujisaki, W., Sawaki, Y., Yamamoto, S., **Sato, T.**, Nishizawa, M., Windley, B.F., Maruyama, S. Tracking the redox history and nitrogen cycle in the pelagic Panthalassic deep ocean in the Middle Triassic to Early Jurassic: Insights from redox-sensitive elements and nitrogen isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 449, 397–420. 2016. (査読有)
11. Han, J., Kubota, S., Li, G., Ou, Q., Wang, X., Yao, X., Shu, D., Li, Y., Uesugi, K., Hoshino, M., Sasaki, O., Kano, H., **Sato, T.**, Komiya, T. Divergent evolution of medusozoan symmetric patterns: Evidence from the microanatomy of Cambrian tetramerous cubozoans from South China. *Gondwana Research*, 31, 150-163, 2016. (査読有)
12. Han, J., Li, G., Kubota, S., Ou, Q., Toshino, S., Wang, X., Yang, X., Uesugi, K., Hoshino, M., Sasaki, O., Kano, H., **Sato, T.**, Komiya, T., Internal Microanatomy and Zoological Affinity of the Early Cambrian Olivoooides. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 90, 38-65, 2016. (査読有)
13. **佐藤友彦**, 吉屋一美, 丸山茂徳. 冥王代の「生きた微化石」と超還元場の歴史. 地学雑誌, 受理. (査読有)
14. 吉屋一美, **佐藤友彦**, 大森聡一, 丸山茂徳. 原始生命誕生場で起こる岩石 水相互作用と金属タンパク合成のための二次鉱物の役割. 地学雑誌, 受理. (査読有)
15. 澤木佑介, **佐藤友彦**, 藤崎渉, 上田修裕, 浅沼尚, 丸山茂徳. 天然原子炉の地質と真核生物誕生. 地学雑誌, 受理. (査読有)

〔学会発表〕(計 13 件)

1. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 浅沼尚, 上田修裕, 丸山茂徳. ガ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. 日本地球惑星科学連合大会, 招待講演, BCG07-02, 千葉, 2019年5月.
2. **Sato, T.** Uranium ore through time: Did the natural nuclear reactor exist on the Hadean Earth? ELSI 7th International Symposium: Comparative Emergence, Tokyo, Japan, 2019年1月.
3. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 丸山茂徳. ガボン・フランスヴィル堆積盆における大型化石出現前後の前期原生代有機炭素・窒素同位体層序. 日本地球惑星科学連合大会, BCG09-16, 千葉, 2018年5月.
4. **Sato, T.** Geotectonic history of ultra-reducing habitat of Hakuba OD1: 4 billion-year-old living fossils. ELSI 6th International Symposium: Building bridges from Earth to Life, P31, Tokyo, Japan, 2018年1月.

5. **Sato, T.**, Sawaki, Y., Saitoh, M., Matsui, Y., Maruyama, S., Bakakas, K., Ligna, C., Moussavou, M., Edou-Minko, A. Paleoproterozoic organic carbon and nitrogen isotopic stratigraphy across the appearance of macrofossils in the Francevillian Basins, Gabon. The Geological Society of America Annual Meeting, 174-9, Seattle, USA, 2017 年 10 月.
6. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 斎藤誠史, 松井洋平, 丸山茂徳. ガボンにおける前期原生代炭素同位体層序. 日本地質学会, R23-O-16, 松山, 2017 年 9 月.
7. **Sato, T.**, Isozaki, Y., Zhang, X. The Early Cambrian phosphorite deposition and the cradle of early skeletal animals. IGCP 630 Annual Meeting (Permian-Triassic Climatic & Environmental Extremes and Biotic Response), O43, Sendai, Japan, 2017 年 6 月.
8. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 丸山茂徳. ガボン・前期原生代フランスヴィル層群における生物多様性. 日本地球惑星科学連合大会, BPT05-14, 千葉, 2017 年 5 月.
9. **Sato, T.** Paleoproterozoic organic carbon and nitrogen isotopic stratigraphy across the appearance of macrofossils in the Francevillian Basins, Gabon. Fifth ELSI International Symposium: Expanding views on the emergence of the biosphere, S3-P7, Tokyo, Japan, 2017 年 1 月.
10. **佐藤友彦**. 付加体遠洋深海チャート中の鉄化学種に記録された古海洋酸化還元環境. 日本地質学会, 招待講演, T9-O-1, 東京, 2016 年 9 月.
11. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 丸山茂徳, 斎藤誠史, 松井洋平. ガボン・フランスヴィル盆地における前期原生代有機炭素・窒素同位体層序: 大型化石出現後の嫌氣的環境. 日本地質学会, R22-O-10, 東京, 2016 年 9 月.
12. **佐藤友彦**, 澤木佑介. カンブリア爆発. 日本進化学会, S3-1, 東京, 2016 年 8 月.
13. **佐藤友彦**, 澤木佑介, 丸山茂徳. ガボン南東部における前期原生代 (2.1 Ga) 堆積盆地の造構場: 初期大型生物の進化のホットスポット. 日本地球惑星科学連合大会, BPT05-10, 千葉, 2016 年 5 月.

〔図書〕(計 1 件)

1. **佐藤友彦**, (分担執筆). 「トピックス・地球の歴史とリン」p.30, 大竹久夫, 黒田章夫, 佐竹研一, 杉山 茂, 竹谷 豊, 橋本光史, 三島慎一郎, 村上孝雄 編, 『リンの事典』, 360pp., 朝倉書店, 2017 年.

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/piyohiko310/>

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名: アンボアーズ・エドウミンコ (ガボン・マスク工科大学)

ローマ字氏名: Prof. Ambroise Edou-Minko (USTM, Gabon)

研究協力者氏名: マシウ・ムサヴォ (ガボン・マスク工科大学)

ローマ字氏名: Prof. Mathieu Moussavou (USTM, Gabon)