

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02013

研究課題名(和文)革新的バイオマーカー分析を柱としたシアノバクテリア・真核生物出現時期の制約

研究課題名(英文) Constraints on timings of cyanobacterial and eukaryotic evolutions based on innovative biomarker analyses

研究代表者

杉谷 健一郎 (Sugitani, Kenichiro)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：20222052

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で最初に企図したバイオマーカーの検出は叶わなかったが、並行して行なった薄片内のものと抽出したものを対象として微化石の徹底的な形態解析により、大型(~100ミクロン)のレンズ状微化石が細胞間の情報伝達の結果としか考えられないような複雑なコロニーを形成していることを明らかにした。これは高度に組織化された細胞骨格を有していたことを示唆する。同様な細胞骨格は200ミクロン以上に達することもある大型袋状化石についても言えることを明らかにし、これらの大型微化石の真核生物性に一步近づくことができた。また申請者が発見した一連の太古代微化石群の分類体系のフレームワークを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期地球、特に太古代における生命の姿とその進化は、多くの謎に包まれており、学術論文は多数出版されてはいるものの、特に微化石に関するものはその信頼性において疑念を拭えないもの少なからずある。本研究課題を遂行するなかで、申請者が長年研究してきた西オーストラリア・ピルバラ地塊の太古代の大型微化石群についてその生物起源性と多様性、そして真核生物の黎明に関する信頼性の高いデータを提示できた。この成果は人々の生命観にあらたな視点を与えるものであり、さらに火星における有人探査と試料採取、そしてそれにもとづく地球外生命の探索と”認定”において重要な役割を果たすと期待される。

研究成果の概要(英文)：Unfortunately, we were not able to detect the biomarkers that we initially intended in this study. However, thorough morphological analysis of microfossils in specimens in petrographic thin sections and maceration products, we found that large (~100 micron) lenticular microfossils form complex colonies that can only be attributed to intercellular physical communication. This suggests that they had a highly organized cytoskeleton. Similar cytoskeletons have been shown to hold for large sack-like fossils that can reach over 200 microns, allowing us to take a step closer to understanding the eukaryotic nature of these large microfossils. In addition, we were able to build a framework for the classification system of a series of Archean microfossil groups discovered by the applicant.

研究分野：宇宙生物学

キーワード：太古代 微化石 真核生物 シアノバクテリア ピルバラクラトン 西オーストラリア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

申請者は西オーストラリア・ピルバラ地塊の前・中期太古代(30億年前と34億年前)の地層からレンズ状の本体をつば状突起が取り巻き、20 μ mから大きいものでは100 μ mに達する化石を多数発見・報告してきた。同様な形態のアクリタークは原生代からも多数報告されており、それらを真核藻類の休眠孢子、あるいはシアノバクテリアと考える研究者も多い。中・前期太古代のレンズ状微化石が現生生物のどのような分類群に対応するのかについては長い間謎であったが、申請者らの研究により、1) その大きさから従属栄養生物とは考えにくく、2) 微化石をターゲットとした炭素同位体組成分析の結果(大きな同位体分別を示した)は化学合成と光合成いずれでも説明出来るが、3) 化石を含む黒色チャートが蒸発岩を伴うこと等から生息場は太陽光が届く浅い水域であること、そして4) レンズ状仮想セルの沈降シミュレーションにより光合成に有利な浮遊生活を送っていたこと、が示された。このように、太古代レンズ状微化石が光合成生物であったことがほぼ確実となったが、さらに窒素同位体比データから好気性代謝が30億年前には始まっていたこと、34億年前のレンズ状微化石でさえ熱的に未成熟でバイオマーカー抽出の可能性があることが、研究代表者らの最近の研究から示唆された。

2. 研究の目的

『酸素発生型光合成の開始時期』と『真核生物出現時期』に対し、前・中期太古代の大型微化石群(主としてレンズ状)の正体を明らかにすることで、最適な制約を得る、これが本研究課題の目的であった。

3. 研究の方法

本研究課題の遂行のために、まずピルバラ地塊で調査を行い、分析に必要な試料を確保する。微化石を含むピルバラ地塊の地層(約30億年前のファレル珪岩層、約34億年前のスティルリー・プール層)はすでに従来のマッピングにより明らかになっている。本研究では、太古代の微化石を直接熱分解および有機溶媒抽出することで「有機分子バイオマーカー」を検出するという世界で初めてとなる革新的アプローチを試みる。微化石を含む岩石をフッ化水素酸と塩酸で分解することによって微化石を抽出し、それを回収して質量分析計で分析する。この方法を補完するとともに、有効なバイオマーカーが検出できなかった場合のセイフティーネットとして、1) "In situ"炭素同位体比測定、2) 元素マッピング、3) 形態や産状の解析、4) 超微細構造等分析、を行う。炭素同位体比測定と元素マッピングにはNano-SIMS(二次イオン質量分析計)を用い、形態や産出状態の記載と解析には通常の偏光顕微鏡を、超微細構造の解析にはSEM(走査型電子顕微鏡)やFIB-TEM(収束ビーム-透過型電子顕微鏡)を用いる。

4. 研究成果

本研究課題は2019年度から開始したが、2020年にはコロナ禍が始まったことにより、当初予定していた複数回の海外調査が2019年のみでしか行えなかった。微化石産出地点であるゴールズワージー緑色岩帯のファレル珪岩層、スティルリー・プール層、パノラマ緑色岩帯のスティルリー・プール層の再調査を行い、いずれの地点でも微化石を多く含む試料を再採取したが全体としての量は十分でなく、研究活動は2019年に採取した試料と保管してあった過去に採取した試料を利用することで遂行した。

バイオマーカー分析

バイオマーカー分析の結果、多くの有機分子とともにセルロースの分解産物が検出された。セルロースは真核藻類やシアノバクテリアによって生産されるため重要な知見であるが、分析手

順においてセルロースを含む紙などを使っていたためコンタミネーションの可能性も排除できなかった。この問題の解決はいくつかの理由で叶わなかったが、形態分析に方針転換したことがかえって実質的な成果を得られたことに繋がったと考えている。

衝突ケイ酸塩球の発見

2019年の現地調査では副次的ではあるが重要な成果が得られた。すなわちスティルリー・プール層では既存試料に隕石衝突の痕跡(衝突球体)が認められた地点で試料採取を行い、その結果、量的には少ないが衝突球体を再確認し、その分析結果を *Astrobiology* 誌に発表することができた。この成果には世界で初めてとなる太古代チャートの Re-0s 系年代測定も含まれている。またファレル珪岩層でもあらたにケイ酸塩球体を含む層を発見し、その中にニッケルに富むスピネル(衝突起源の証拠となる)があることを確認した。

大型球状微化石の進化学的意義の認識

ファレル珪岩層について2地点から採取した既存試料計100g以上を酸分解し、抽出した微化石の総数は推定5000個に及ぶ。この回収作業に伴って、これまであまり重要視してこなかった数百個のフレキシブルな膜からなり長径が80-270 μm の大型球状微化石の標本を得ることができた。薄片観察においてフィルム状微化石の1タイプと理解されていたものが、実は球状微化石であったことがはっきりとした意義は大きい。このタイプは南アフリカ32億年前の地層から産出が報告されているが、それ以降では25億年前からしか知られていない。すなわち今回の研究によってその間をつなぐ化石記録が確認されたことになる。またSEM顕微鏡観察によって厚い皮膜、薄い皮膜それぞれで特徴付けられる2タイプがあることが確認できたが、それらについてNano-SIMSによる同位体分析を行い、薄いタイプで炭素同位体値が-33.9パーミル、厚いもので-59.5パーミルという値を得た。この大型微化石に関してはFIB-TEM分析も行なったが膜は単純な1枚構造であったものの中央が開裂しているように見えるもの、両端が尖ったものなど、原生代のアクリタークで初期の真核生物の可能性が高いレイオスファエリディア属に見られる特徴を有するものが見つかった。

レンズ状微化石の組織とコロニーの多様性とその意義

レンズ状微化石についても大量の抽出試料を得ることで、フランジの構造の多様性(フランジ幅、フランジの微細構造:繊維状、筋状、網目状など)を認識するとともに、コロニーの多様性(鎖状、平面状、枝分かれ等)も正確に捉えることができた。このような二次元的かつシステムティックなコロニー構造形成は複雑かつ高度に組織化された細胞骨格を必要とする。また収束イオンビームを用いた薄膜の作成と透過型電子顕微鏡観察を行った。内部は径1 μm 程度の炭素質の小胞と微粒子の集合体からなっており、小胞の内部は空洞であることがわかった。また隣り合う小胞と微粒子同士が網目状に接着し合っており、これが比較的強固な構造を維持していることが示唆された。レンズ状微化石についても高度に組織化された細胞骨格の存在無しにその形態学的な複雑性やコロニーの多様性を説明することはできず、プロトタイプの真核生物の可能性が示唆された。またこれらの分類学的検討とともに、文献研究にもとづいてこれら大型微化石の真核生物性について考察した。現生真核生物が後期原生代におけるミトコンドリアの獲得でその進化を完結されたという見解が主流となりつつあり、それ以前のアクリタークは真核生物のプロトタイプとして位置付けられること、を認識した。すなわち、ミトコンドリアにおける酸化的リン酸化によるATP生産によらずとも大型で複雑な形態を獲得できることが理解され、長年の課

題であったピルバラの太古代大型微化石群のエネルギー論的障害を克服することができた。

微化石の体系的分類法の提案

薄片観察とマセレーションを続けることで得られた微化石標本は 6000 以上に達した。それらの標本群を形態学的側面と産出状況（散在型，鎖状，シート状などのコロニーのタイプ）にもとづいて整理を進めた。それにより球状微化石を，従来の 1) 5-15 μm の小型球状微化石，2) 20 μm 以上の大型球状微化石に分類できるだけでなく，後者についてさらに詳細な分類体系を提案することができた（図書 1）。その分類体系は，Flexible-walled large spheroid, robust and thick-walled large spherical spheroid, Robust-walled large oblate spheroid, robust and thin-walled large spherical spheroid からなり，現在海外の共同研究者と進めているピルバラの太古代微化石群の Systematic Paleontology への道筋をつけることができた。またレンズ状微化石についても全体の形態にもとづいて symmetric type と asymmetric type に分類できること，そしてフランジは，ガラス状，繊維状，網目状，櫛状に分類できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Delarue Frederic, Bernard Sylvain, Sugitani Kenichiro, Robert Francois, Tart?se Romain, Albers Sonja-Verena, Duhamel R?mi, Pont Sylvain, Derenne Sylvie	4. 巻 358
2. 論文標題 Microfossils with tail-like structures in the 3.4 Gyr old Strelley Pool Formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precambrian Research	6. 最初と最後の頁 106187 ~ 106187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2021.106187	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 Delarue, F., Robert, F., Derenne, S., Tarts, R., Jauvion, C., Bernard, S., Pont, S., Gonzalez-Cana, Duhamel, R., Sugitani, K.	4. 巻 336
2. 論文標題 Out of rock: A new look at the morphological and geochemical preservation of microfossils from the 3.46 Gyr-old Strelley Pool Formation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precambrian Research	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 Coutant Maxime, Lepot Kevin, Fadel Alexandre, Addad Ahmed, Richard Elodie, Troadec David, Ventalon Sandra, Sugitani Kenichiro, Javaux Emmanuelle J.	4. 巻 20
2. 論文標題 Distinguishing cellular from abiotic spheroidal microstructures in the ca. 3.4?Ga Strelley Pool Formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geobiology	6. 最初と最後の頁 599 ~ 622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gbi.12506	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kenichiro Sugitani
2. 発表標題 Life on the early Archean Earth - new insights from lenticular microfossils
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichiro Sugitani, Kathleen Grey
2. 発表標題 Palynology of Archean microfossils - a new window into the ancient life
3. 学会等名 53rd Annual Meeting of the AASP-The Palynological Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichiro Sugitani, Koichi Mimura, Ryoko Senda, Yui Koketsu, Simon Wallis, Natsuko Takagi, Tsuyoshi Iizuka, Donald R. Lowe
2. 発表標題 Silicate spherules of possible impact origin from the Paleoproterozoic Strelley Pool Formation, Western Australia
3. 学会等名 1st WHEEL Seminar (5th IGS Precambrian World 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Kenichiro Sugitani	4. 発行年 2022年
2. 出版社 CRC press	5. 総ページ数 332
3. 書名 Early Life on Earth: Evolution, Diversification, and Interactions	

〔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	石田 章純 (Akizumi Ishida) (10633638)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	掛川 武 (Takeshi Kakegawa) (60250669)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	三村 耕一 (Koichi Mimura) (80262848)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	大友 陽子 (Yoko Ohotomo) (80612902)	北海道大学・工学研究院・特任助教 (10101)	

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