

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24403013

研究課題名(和文) 初期海洋環境における一次生産者の特定

研究課題名(英文) Identification of primary producers in the early oceans

研究代表者

掛川 武 (Kakegawa, Takeshi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60250669

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)：本研究では、38億年(グリーンランドイスア)、32億年(南アフリカバーバートン)および30億年前(カナダスティーブロック)の地層が分布する3地域を調査地域として、30億年以前の初期地球海洋環境における一次生産微生物を特定することを目的としている。それぞれの地域から持ち帰った試料中の鉱物情報とともに30億年以前でも浅海域では光合成微生物が一次生産者であったことを示した。深海では一次生産者に支えられた微生物生態系が発達していた事も示していった。38億年前の地層から38億年前の生物の痕跡を新たに発見しNature Geoscience 雑誌に報告した。

研究成果の概要(英文)：The purposes of the present study are to constrain biological primary producers in 3.8, 3.2, and 3.0 Ga oceans. To approach the purpose, we performed geological surveys in Isua (Greenland), Barberton (S. Africa), and Steep Rock and Lumby Lake (Canada). Besides the detailed geological data, mineralogical and geochemical data suggest that cyanobacteria were the primary producers at least since 3.0 Ga. In addition, chemoautotrophic and heterotrophic bacteria, whose activities were supported by cyanobacteria indirectly, were also active in deep sedimentary basin. We also discovered new evidence for trace of the earliest life in rocks from Isua. This discovery was broadcasted widely through various media. Other results were reported at the major international conferences. Some papers are in reviews at major international journals.

研究分野：地球化学

キーワード：一次生産者 初期地球 イスア バーバートン スティーブロック

1. 研究開始当初の背景

現在の海洋環境では光合成生物が一次生産者となり多量の有機物を作り出し、他の従属栄養生物生態系を支えている。初期太古代においても微生物の多様性が知られ、従属栄養微生物も存在していたとされている。しかし初期地球環境で光合成微生物が一次生産者であったのか、別の一次生産者が存在していたのか明らかでない。一次生産者の解明は、初期地球における生物圏進化にとって第一級の問題である。30億年よりも前の初期地球環境には超塩基性岩を循環する海底熱水活動が蔓延していたと多くの研究者は考えている。そのために、 H_2 や Ni などが海洋に広く溶在し、メタン生成菌などの非光合成細菌が地球規模での巨大なバイオマスを有し、一次生産者の役割を担っていた可能性も指摘されている。しかし非光合成微生物が地球規模で一次生産者になるには、太陽光以外のエネルギーを用いるしかなく、太陽光以外で巨大バイオマスを作りえたか疑問視されている。申請者は「地球史の早い時期に、光合成微生物は一次生産者となり、従属栄養生物など含めた太古代生態系全体を支えていた」と考えている。しかし実際の岩石には、複数の微生物由来有機炭素が混在した状態で残されるため、従来の研究手法では一次生産者特定は困難であった。

申請者は過去の研究により、30億年よりも古い地層の中に、海水深度に対応した地層があることを見いだしてきている。光合成微生物の痕跡検出には、有光層近傍（現世では水深200m以下）で形成された堆積岩の研究が最適であろう。それに加え、より深い海洋環境で形成された堆積岩中の有機物と比較研究を行い、バイオマスとしてどちらの量が多かったか評価することで、同じ堆積盆（環境）での一次生産者の特定が可能になる。しかし30億年前の地層で、このような観点での地質学的研究は世界的にも行われてこなかった。ドイツの微生物学者らは、現世堆積物数 μm 内で異なる微生物が共生する様子をSIMS(二次イオン質量分析計)による炭素同位体分析で明らかにした。またアメリカの研究者らは、原生代微化石のSIMS炭素同位体分析により、微小領域に異なる微生物由来の有機分子が混在している事を見いだした。これらの研究例は、微小領域分析を重ねることにより、同一試料から異なる微生物由来有機炭素が識別されることを示している。しかし、こうした微小領域分析が30億年以前の試料に系統だって分析された例は少ない。また光合成微生物（特に酸素発生型）は大気中 N_2 を直接固定する能力を有する。その一方で、極端なケースとして非光合成微生物は海底熱水など無機のプロセスで生成された NH_3

を直接、窒素源として用いることが予想される。これらの窒素源の違いは堆積岩に残される有機物窒素同位体組成に現れる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、30億年よりも前の地層の調査を行い、一次生産者の特定を可能にする地質調査・各種先端分析を重ね、申請者の仮説を検証することを目的とする。30億年以前の海洋環境における一次生産微生物を決めるために3つの地域を設定し、浅海～遠洋性堆積岩の地質調査を行う。それぞれの地域から採集された岩石中有機物に対して、SIMSによる微小領域炭素同位体分析、段階燃焼法による窒素同位体組成分析、TEMを用いた微細組織観察、FT-IR分析、および初生鉱物の同定を行う。具体的には、南アフリカ・バーバートン地域で32億年前の浅海性と半遠洋性堆積岩の地質調査を行う。それぞれの海洋環境を表す岩石から有機物を見だし、上記分析を行い浅海性堆積岩から光合成微生物の痕跡が、半遠洋性堆積岩では、非光合成微生物（特に化学合成微生物）が見いだされることを示す。グリーンランド・イスア地域で38億年前の堆積岩を広域的に調査し、砕削性物質が卓越する場（浅海～半遠洋性と解釈）と、そうでない場（遠洋性と解釈）の地質調査を行う。採集された試料に対して上記分析を行い、変成作用時に生成された「非生物的炭素」を識別しながら生物的炭素を限定する。微小領域安定同位体分析および段階燃焼法により微生物が持っていた初生的な炭素、窒素同位体組成を見積もり、一次生産者微生物相を限定する。カナダのアティコーカン地域で30億年前の浅海性と半遠洋性堆積岩の広域的調査を行う。半遠洋性堆積岩の中に海底熱水活動の痕跡も見られ、光合成以外の微生物痕跡が見つかりやすい地域である。またこの時代は、光合成微生物が活動的であったと考えられている時代で、リスク無く目的が達成できると予想される地域である。堆積環境変化に応じて光合成微生物から化学合成微生物に変化する様子を具体化させる。

3. 研究の方法

38億年（グリーンランド）、32億年（南アフリカ）および30億年前（カナダ）の地層が分布する3地域を調査地域とした。それぞれの地域では、浅海から遠洋性堆積岩へと変化が追跡できる候補地を既に特定した。その地層に対して詳細な地質調査と岩石採集を海外共同研究者とともに行った。光合成微生物の記録が残りやすい浅海性の堆積岩が調査対象の中心となった。それとの対比研究として半遠洋性～遠洋性の堆積岩や海底熱

水の影響を受けた堆積岩も調査・採集した。採集された試料は段階燃焼法などで微小領域炭素、窒素安定同位体組成が決められた。更に試料中有機物が TEM 観察やラマン分光分析で特徴付けられ、地質、鉱物情報とともに 30 億年以前でも浅海域では光合成微生物が一次生産者であったことを示した。顕微鏡観察や EPMA 分析などで岩石鉱物の記載を行った。特に鉱物相の詳細研究は堆積環境を知る上で重要な要素を占める。酸素発生型光合成微生物が活動した場合は、酸化鉱物を堆積させ、石英中包含物などとして残されることがある。初生酸化物の確認によって、光合成微生物が活動的であったかの傍証を与えることが可能である。これに合わせて全岩炭素、硫黄、窒素含有量、およびそれぞれの安定同位体測定は東北大で行った。

4. 研究成果

本研究では、38 億年（グリーンランドイスア地域） 32 億年（南アフリカバーバートン地域）および 30 億年前（カナダステープロック地域）の地層が分布する 3 地域を調査地域として、30 億年以前の初期地球海洋環境における一次生産微生物を特定することを目的としていた。それぞれの地域から持ち帰った試料の薄片観察、EPMA 分析、粉末エックス線解析などから詳細な鉱物情報を得た。これら鉱物情報（赤鉄鉱の存在、特徴的な炭素安定同位体組成）とともに 30 億年以前でも浅海域では光合成微生物が一次生産者であったことを示した。深海では一次生産者に支えられた微生物生態系や熱水活動に依存する化学合成生物が発達していた事も鉱物および安定同位体データから示していた。38 億年前の地層から 3 8 億年前の生物の痕跡を新たに発見し Nature Geoscience 雑誌に報告した。特に TEM による炭素質物質のナノレベル分析が功を奏し、最古の微生物である決定的証拠を得た。この報告は各種メディアを通して国内外で大きく報道された。南アフリカの試料からは、新たに鉄酸化物、クロム酸化物を見いだした。特にクロム鉄鉱の SIMS による安定同位体分析は、浅海でシアノバクテリアが一次生産者として活動する事によって作られたものであることを示した。カナダの試料からは海底熱水活動の影響を強く受けた岩石を新たに見いだした。そこに含まれる炭素はバイモダルな組成をしており、シアノバクテリアと化学合成菌が同じ堆積盆に生息していた事を示した。これら成果は主要な国際学会で発表されると同時に、国際雑誌に投稿中である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. Ohtomo Y., Kakegawa T., Ishida A., Nagase T., Rosing M.T. (2014) Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks. *Nature Geo.* Vol.7, 25-28 査読有
DOI: 10.1038/NGE02025
2. Nara Watanabe F., Watanabe T., Kakegawa T., other 6 authors (2014) Biological nitrate utilization in south Siberian lakes (Baikal and Hovsgol) during the last glacial period: the influence of climate change on primary productivity. *Quaternary Sci. Rev.* vol.90, 69-79 査読有,
DOI:10.1016/j.quascirev.2014.02.014
3. 掛川武(2014)グリーンランドで最古の生命の痕跡を発見！化学 vol. 69, No2,73-75 査読無
<http://www.kagakudojin.co.jp/book/b199775.html>
4. 掛川武 (2014) グリーンランドで発見された最古の生物活動の痕跡. *Isotope News.* vol. 723, 12-15. 査読無
<http://www.jrias.or.jp/books/cat3/406.html>
5. Takahashi S., Kaiho K., Hori RS., Gorjan P., Watanabe T., Yamakita S., Takemura S., Aita Y., Sporli K.B., Kakegawa T. (2013) Sulfur isotope profiles in the pelagic Panthalassic deep sea during the Permian-Triassic transition, *Global and Planetary Change*, Vol.105, 68-78, 査読有
DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.006
6. 掛川武 (2013) 隕石海洋衝突と有機物合成：生命起源のきっかけ、*噴流工学*, vol. 30., No.1. 1-3 査読無
<http://www.wdc-jp.com/wjtsj/publication.html>
7. Ishida, A., Hashizume, K., Kakegawa, T., Stepwise combustion analyses of distinct nitrogen isotope compositions of Paleoproterozoic organic matter. *Geochem. J.*, 46, 249-253 (2012) 査読有
<http://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/4603/46030249.pdf>
8. Watanabe T., Minoura K., Nara F.W., Shichi K., Horiuchi K., Kakegawa T. and Kawai T. (2012) Last glacial to post glacial climate changes in continental Asia inferred from multi-proxy records (geochemistry, clay mineralogy, and paleontology) from Lake Hovsgol, northwest Mongolia. *Glob.Planet Change.*

〔学会発表〕(計17件)

- (1) 石川 宏,大竹 翼,川井 洋二,佐藤 努, 掛川 武 (2014) 南アフリカ・バーバトン地域ムーディーズ層群中の縞状鉄鉱層中におけるクロム濃集の空間的広がり日本地球化学会年会、富山(9月16日)
- (2) Kakegawa T. (2014) Biogenic and abiogenic graphite in banded iron formations of Isua Supracrustal Belt, Origin 2014, Nara (7月9日)
- (3) Mishima S., Kakegawa T. (2014) Discovery of boron-rich metasediments in Isua Supracrustal Belt: RNA genesis in Hadean marine sediments? Origin 2014, Nara (7月9日)
- (4) Kakegawa T. (2014) Discovery of Boron-Rich Metasediments in Isua Supracrustal Belt: Window to RNA Genesis? Goldschmidt Conference, Sacramento, USA (6月10日)
- (5) 二階堂 映美, 掛川 武(2014)カナダオンタリオ州、ガンフリント層(19億年前)中の初生鉱物と続成作用による変化,日本地球惑星連合大会年会、横浜(4月30日)
- (6) 大友 陽子, 掛川 武(2014) 38億年前初期太古代岩石中に発見された最古の生命の痕跡(招待講演) 日本地球惑星連合大会年会、横浜(4月30日)
- (7) 川井 祥二, 掛川武 (2014) 南アフリカバーバトン地域ムーディーズ層(32億年前)に産出する碎屑性堆積岩の鉱物学的地球化学的研究日本地球惑星連合大会年会、横浜(4月30日)
- (8) Kakegawa T. (2014) Cu-Zn ores in 2.7 Ga komatiite-basalt assemblages in Abitibi Greenstone Belt, Canada, and their associations to microbes 日本地球惑星連合大会年会、横浜(4月28日)
- (9) Kawai S., Kakegawa T. (2013) Mineralogical and geochemical studies of clastic sedimentary rocks of ca. 3.2Ga Moodies Group in Barberton Greenstone Belt, South Africa, Biogeoscience Conference for the Early Earth, Nagoya, (11月2日)
- (10) 大友陽子, 掛川武, 石田章純 (2013) 西グリーンランドイスア表成岩帯におけるグラファイトの成因と生命の痕跡、口頭、地球化学会年会、東京、(9月13日)
- (11) Otake T., Y. Sakamoto, S. Itoh, H. Yurimoto, and T. Kakegawa (2013) Chromium Enrichment in sedimentary rocks deposited in shallow water in the 3.2 Ga Moodies Group, South Africa,

Goldschmidt Conference, Florence, Italy(8月27日)

- (12) 掛川武 (2013)地球が生み、地球が育てた生命(招待講演)地球惑星連合大会、幕張、5月21日
- (13) 掛川武 (2013) 38億年前のグラファイトのSTEMによる観察(招待講演)地球惑星連合大会、幕張(5月21日)
- (14) 川井祥二, 掛川武 (2013)南アフリカバーバトン地域ムーディーズ層(32億年前)碎屑性堆積岩の鉱物学的研究、地球惑星連合大会、幕張(5月21日)
- (15) 掛川武 (2013) 隕石海洋衝突と有機物合成: 生命起源のきっかけ(招待講演)ウォータージェット学会年会、仙台(1月25日)
- (16) T. Otake, Y. Sakamoto, S. Itoh, H. Yurimoto, and T. Kakegawa (2012) Chromium Enrichment in sedimentary rocks deposited in shallow water in the 3.2 Ga Moodies Group, South Africa, American Geophysical Union, San Francisco, USA(12月5日)
- (17) Otake T., Sakamoto Y., Kakegawa T. (2012) Origin of chromite found in chemical and clastic sedimentary rocks of the 3.2 Ga Moodies Group, South Africa. Goldschmidt Conference, Prague, Czech Republic (8月16日)

〔図書〕(計1件)

1. 掛川 武 (2013) 生命の痕跡を記録した太古の岩石 化学同人. 132-144

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://epms.es.tohoku.ac.jp/nreg/intro.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

掛川 武 (KAKEGAWA TAKESHI)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：60250669

(2) 研究分担者

橋爪 光 (Hashizume Ko)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：90252577

長瀬 敏郎 (Nagase Toshirou)
東北大学・学術資源研究公開センター・
准教授
研究者番号：10237521