

令和元年6月4日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06022

研究課題名(和文) 原生代-顕生代境界における微生物炭酸塩転換イベントの解明

研究課題名(英文) Elucidating drastic change of microbial carbonates in the Proterozoic-Phanerozoic boundary

研究代表者

白石 史人 (Shiraishi, Fumito)

広島大学・理学研究科・助教

研究者番号：30626908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,500,000円

研究成果の概要(和文)：原生代末期～顕生代初期に起きた微生物炭酸塩転換イベントの原因を解明するため、シアノバクテリア石灰化に関して天然試料の検討および室内実験を行った。天然試料の検討結果から、微生物炭酸塩の組織に差異を生む根本原因がシアノバクテリア細胞外高分子の酸性度であることが示唆された。室内実験の結果もこの結論を支持しており、原生代-顕生代境界での微生物炭酸塩転換イベントの原因はシアノバクテリア群集組成の変化である可能性が高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微生物炭酸塩の組織は原生代-顕生代境界(約5.4億年前)で突如変化することが知られている。本研究では、現世の微生物炭酸塩の研究に基づき、組織の差異が細胞外高分子特性の異なるシアノバクテリア群集によって生じていることを解明した。原生代-顕生代境界でシアノバクテリアの群集組成が大きく変化するイベントがあった可能性があり、カンブリア爆発やそれに先行するエディアカラ動物群の絶滅について、新たな知見が得られるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the cause of drastic change of microbial carbonates in the Proterozoic-Phanerozoic boundary, observation of natural calcified cyanobacteria and calcification experiments were conducted. Observation of natural calcified cyanobacteria implied that the fabric of microbial carbonates was controlled mainly by the acidity of secreted extracellular polymeric substances. The results of calcification experiments also supported this conclusion, indicating that the cause of drastic change of microbial carbonates in the Proterozoic-Phanerozoic boundary was the change on cyanobacterial community composition.

研究分野：地質学, 層位・古生物学

キーワード：実験古生物学

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

1. 研究開始当初の背景

原生代末期～顕生代初期は多細胞動物の爆発的進化が起きた時期であり、酸素分圧上昇や栄養塩増大などにその原因が求められている。またこの時期は、主にシアノバクテリアの炭酸カルシウム鉱物沈殿で形成された微生物炭酸塩の組織にも大転換が見られ、ストロマトライト(葉理組織)が衰退し、スロンボライト(凝集組織)や石灰化シアノバクテリア(微化石)が突如として出現し始めた(微生物炭酸塩転換イベント)。これは当初、爆発的に進化した多細胞動物の生物擾乱によるものと解釈されたが、現在では微生物炭酸塩の初生的組織変化を反映していると考えられている。つまり、本イベントは多細胞動物進化の結果ではなく、両者に共通する何らかの原因を反映したものであると考えられる。このことから、本イベントの理解は多細胞動物の爆発的進化を理解する上でも重要である。

現在のところ、微生物炭酸塩転換イベントの原因としては、シアノバクテリアの進化(内的要因)、もしくは鉱物沈殿に影響する海水化学組成の変化(外的要因)が考えられており、これまでに光合成効率上昇説、海水のMg/Ca比低下説、海水の炭酸カルシウム過飽和度低下説、海水の溶存無機炭素緩衝能低下説などが提唱されている。しかし、どの仮説も実験的な裏付けがなく、さらにこの問題が古生物学・堆積学・地球化学・微生物学など多岐にわたっていることもあり、現在まで決着がついていない。

我々の研究グループでは、これまでにシアノバクテリアの炭酸カルシウム鉱物沈殿における外的要因の評価を行い、pH・Ca²⁺濃度・溶存無機炭素濃度が重要である可能性を実験によって示した。その一方で、微生物炭酸塩転換イベントは不可逆であることから、内的要因(進化)が重要な役割を果たした可能性も高い。

2. 研究の目的

そこで本研究は、シアノバクテリアの種類の違いが微生物炭酸塩組織の違いに与える影響を評価した。シアノバクテリアの種類が異なれば、主に1)菌体近傍の炭酸カルシウム鉱物過飽和度を上昇させる光合成の速度と、2)細胞外高分子による結晶核形成作用が変化し、微生物炭酸塩組織に差が生じることが予想される。本研究は、このような実験古生物学的アプローチにより、原生代末期～顕生代初期に起きた微生物炭酸塩転換イベントの原因、特に内的要因の影響を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

シアノバクテリアの炭酸カルシウム鉱物沈殿における内的要因の影響を評価するため、天然試料の検討および石灰化実験を行った。石灰化実験については、シアノバクテリア菌株を用いて以下の4ステップからなる実験を行った。

- 1) 菌株の培養: 国立環境研究所からシアノバクテリアの菌株を購入し、培養を行う。
- 2) 細胞外高分子の評価: 石灰化実験に用いる培養シアノバクテリアについて、結晶核形成作用に影響を与える細胞外高分子の組成および酸性官能基の総量・濃度を決定する。
- 3) 沈殿実験: 培養シアノバクテリアを用いた炭酸カルシウム鉱物の沈殿実験を行う。その際、pH・酸素・Ca²⁺微小電極を用いて光合成・沈殿反応の速度、および溶存無機炭素による緩衝効果を定量的に評価する。
- 4) 回収試料の観察: 石灰化実験後の回収試料に対し、透過型電子顕微鏡・走査型透過X線顕微鏡・共焦点レーザー走査顕微鏡を組み合わせることで、菌体・細胞外高分子・官能基・鉱物の関係をnm~mmスケールで観察する。

4. 研究成果

天然試料に関しては、まず岡山県高梁市上野に見られるストロマトライトとスロンボライトの検討を行った。水化学組成、鉱物組成、および微生物代謝の影響(主に光合成誘導沈殿)については、両堆積物で有意な差は見られなかった。一方、DNA解析および顕微鏡観察により、それらを構成するシアノバクテリアが大きく異なることが示された。ストロマトライトは細胞外高分子の酸性官能基密度が高い*Phormidium* sp.が優勢であり、それらの石灰化によって葉理組織が形成されていた。一方、スロンボライトは細胞外高分子の酸性官能基密度が低い*Leptolyngbya* sp.と高い*Coelosphaeriopsis* sp.が優勢であり、それぞれ窓状構造とペロイドを形成し、結果として凝集組織が形成されていた。集束イオンビーム加工切片などを用いた透過型電子顕微鏡および走査型透過X線顕微鏡の観察から細胞外高分子の酸性官能基密度が高い*Phormidium* sp.と*Coelosphaeriopsis* sp.の表面に方解石(一部に前駆体である非晶質炭酸カルシウム)が形成されていた。これらの結果は、微生物炭酸塩の組織に差異を生む根本原因がシアノバクテリア細胞外高分子の酸性度であることを示唆している(図1)。この結果に基づいて原生代-顕生代境界での微生物炭酸塩転換イベントの原因を考察し、それをまとめた論文がScientific Reportsに掲載された。また温泉性炭酸塩堆積物についても検討を行い、極めて高い炭酸カルシウム過飽和度条件においてもシアノバクテリア細胞外高分子の酸性度が微生物炭酸塩組織を制御していることを明らかにした。これらの成果については、Chemical GeologyおよびSedimentologyに論文が掲載された。

石灰化実験に関しては、培養した4種類のシアノバクテリア(*Spirulina* sp., *Phormidium* sp., *Scytonema* sp., *Leptolyngbya* sp.)について、まず酸塩基滴定およびレクチン結合解析によ

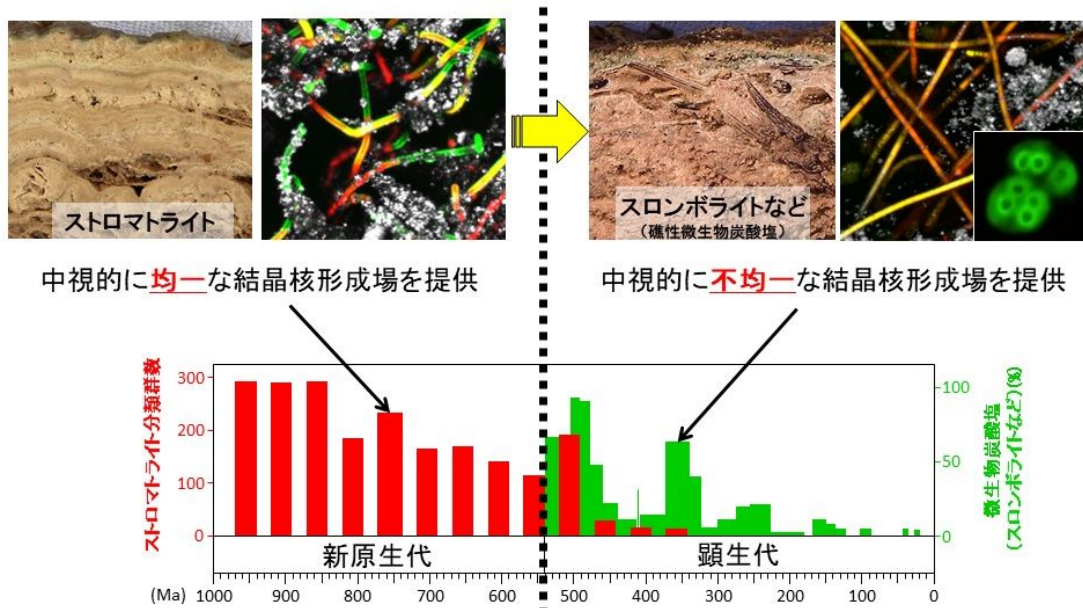


図1．本研究成果に基づく微生物炭酸塩転換イベントの解釈．

て細胞外高分子に含まれる酸性官能基の定性・定量を行った。次に石灰化実験を行ったところ、4種類とも光合成によって炭酸カルシウム沈殿を誘導するが、形成される結晶形態は大きく異なっていることが明らかとなった。これらの結果から、シアノバクテリアの石灰化には細胞外高分子特性が重要な役割を果たしていることが追認された。特に *Spirulina* sp., *Phormidium* sp., *Scytonema* sp. の周囲で形成された方解石には非晶質炭酸塩・多結晶（サブミクロンサイズ）・超構造などの特徴が見られ、酸性細胞外高分子上における非晶質炭酸塩ナノ粒子を介した核形成が示唆される。一方、上記3種類のシアノバクテリアに比べて細胞外高分子分泌量が非常に小さい *Leptolyngbya* sp. では、そのような特徴はほとんど見られない。これらの結果から、シアノバクテリア表面において以下のような炭酸カルシウム形成過程が考えられる：1) 酸性細胞外高分子上で非晶質炭酸塩ナノ粒子が形成 2) 成長した非晶質炭酸塩粒子中で結晶化が進行し、サブミクロンサイズの方解石多結晶が形成、3) それらが単結晶方解石へと成長し、非晶質炭酸塩や方解石多結晶が部分的に残存する。これらの結果は、シアノバクテリア細胞外高分子の酸性度が微生物炭酸塩組織に差異を生む根本原因であるという、天然試料から得られた結論を支持するものであり、原生代 顕生代境界での微生物炭酸塩転換イベントの原因がシアノバクテリア群集組成の変化にある可能性が一段と高まった。この成果については、現在国際誌に論文を投稿準備中である。

また、原生代末におけるシアノバクテリア鉱物化の別の例としてアパタイト化についても検討を行い、細胞外高分子よりも代謝による周辺水環境組成変化の影響が大きいことを明らかにした。この成果については、*Sedimentary Geology* 誌に論文が掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Shiraishi F., Ohnishi S., Hayasaka Y., Hanzawa Y., Takashima C., Okumura T., Kano A. (2019) Potential photosynthetic impact on phosphate stromatolite formation after the Marinoan glaciation: Paleoceanographic implications. *Sedimentary Geology* 380, 65-82, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.11.014> (査読有)。

Shiraishi F., Eno Y., Nakamura Y., Hanzawa Y., Asada J., Bahniuk A.M. (2019) Relative influence of biotic and abiotic processes on travertine fabrics, Satono-yu hot spring, Japan. *Sedimentology* 66, 459-479, <https://doi.org/10.1111/sed.12482> (査読有)。

Shiraishi F., Nakao K., Takashima C., Kano A., Itai T. (2018) Fe(II) oxidation processes at the surface of bacterially colonized iron deposits. *Chemical Geology* 476, 161-170, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.11.014> (査読有)。

Shiraishi F., Hanzawa Y., Okumura T., Tomioka N., Kodama Y., Suga H., Takahashi Y., Kano A. (2017) Cyanobacterial exopolymer properties differentiate microbial carbonate fabrics. *Scientific Reports* 7, 11805, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12303-9> (査読有)。

〔学会発表〕(計10件)

白石史人, 森川朝世 (2018) 北海道二股温泉に発達するトラパーチンの分布と特徴. 日本地

質学会第 125 年学術大会。

尾森武尊, 富岡尚敬, 麿聡子, 高橋嘉夫, 白石史人 (2018) シアノバクテリアの石灰化における細胞外高分子の役割. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.

小谷野将, 知念正昭, 白石史人, 藤田和彦 (2018) 琉球列島の完新統サンゴ礁堆積物コア中に発見された礫性微生物被殻における微生物の痕跡. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.

森川朝世, 白石史人 (2018) 北海道二股温泉に発達するトラバーチンの形成・続成過程. 日本地質学会西日本支部第 169 回例会.

尾森武尊, 白石史人, 富岡尚敬, 麿聡子, 高橋嘉夫 (2018) シアノバクテリアの石灰化における細胞外高分子の役割. 日本地質学会西日本支部第 169 回例会.

白石史人, 大西咲, 早坂康隆, 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏 (2018) マリノアン氷河期後に見られるリン酸塩ストロマトライトの成因. 日本地質学会西日本支部第 169 回例会.

白石史人, 大西咲, 早坂康隆, 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏 (2017) マリノアン氷河期後に見られるリン酸塩ストロマトライトの成因. 日本地質学会第 124 年学術大会.

白石史人, 江野友樹, 中村有希, 半澤勇作, 朝田二郎, Anelize Manuela Bahniuk (2017) トラバーチン組織における生物的・非生物的過程の相対的影響. 日本地質学会第 124 年学術大会.

白石史人 (2017) 微生物岩から読み解く地球史. 地球史研究所オープニング記念国際会議.

白石史人, 半澤勇作, 奥村知世, 狩野彰宏 (2016) シアノバクテリアの細胞外高分子がストロマトライト・スロンボライト形成を規制する. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

〔図書〕(計 1 件)

Kano A., Okumura T., Takashima C., Shiraishi F. (2019) Geomicrobiological Properties and Processes of Travertine. Springer Singapore, 176 p.

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

Scientific Reports に掲載された論文の紹介:

<http://hiper.hiroshima-u.ac.jp/wp-content/uploads/2017/12/3fb21e2e652181a9f47399767c64cba.pdf>

本研究を含む成果の紹介:

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/fshirai/research.html>

天然試料の紹介記事:

毎日新聞 2017 年 4 月 16 日 石灰華ドームまるで火星, 北海道・二股らぢうむ温泉

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 大西 咲

ローマ字氏名: (OHNISHI, saki)

研究協力者氏名: 森川 朝世

ローマ字氏名: (MORIKAWA, asayo)

研究協力者氏名: 尾森 武尊

ローマ字氏名: (OMORI, takeru)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。