

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800280

研究課題名(和文) 微生物岩の生物起源性を示す新規指標の確立

研究課題名(英文) Establishment of new index showing the biogeneity of microbialite

研究代表者

白石 史人 (Shiraishi, Fumito)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30626908

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)：微生物岩の生物起源性は、主にその形状に基づいて認定されているが、同様の形状は無機的にも形成されうる。そこで本研究では、微生物岩の生物起源性を確実に示す指標の探索および実用化を目指した。その結果、1) 炭酸塩鉱物からなる微生物岩の形成にはシアノバクテリア細胞外高分子の化学特性が重要であること、2) マンガン団塊に生物起源性を示す鉱物学的特徴が存在すること、3) 全球凍結後に見られるリン酸塩ストロマトライトが微生物によって初生的に形成されたことなどが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：While biogeneity of microbialite is identified by mainly its morphology and fabric, similar characteristics are also formed by inorganic processes. The present study, therefore, tried to find out and apply the indicator of biogeneity. Following results were obtained: 1) chemical property of cyanobacterial extracellular polymeric substances is crucial for the formation of carbonate microbialite, 2) mineralogical features of biogenic origin were found from ferromanganese nodule formed in the abyssal seafloor, 3) phosphate stromatolite formed after the snowball earth is considered to be the initial product of microbial activity.

研究分野：炭酸塩堆積学

キーワード：微生物堆積物

1. 研究開始当初の背景

微生物堆積物が岩石化して形成される微生物岩は 35 億年前から見られ、地球史・生命史を理解する上で重要な研究対象である。また近年、微生物岩を貯留岩とする巨大油田が相次いで発見され、その経済的重要性も高まっている。

一般的に、微生物岩は形成に関与した微生物の化石を欠くため、その形成機構は類似形状を示す現世の微生物堆積物に基づいて推定されており、特に光合成や硫酸還元など微生物代謝の重要性が明らかになっている。しかし同様の形状は無機的にも形成されうるため、微生物岩の生物起源性に対しては疑義もある。実際には生物起源性の支持者が多数派だが、形状だけではその立証は困難である。

2. 研究の目的

微生物岩の生物起源性を確実に示す指標は本研究の開始時点では存在していなかった。そこで本研究では、その探索および実用化を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、1) 初生的な微生物堆積物、2) 続成作用を受けた微生物堆積物、3) 微生物岩の 3 つを研究対象とした。分析手法としては、鉱物・化学分析(薄片観察、カソードルミネッセンス法、XRD、XRF、LA-ICP-MS、EPMA、 μ -XAFS、イオンクロマトグラフィー、ICP-OES など)に加え、初生的な微生物堆積物に対しては微生物学的分析(核酸染色、微小電極、共焦点レーザー走査顕微鏡、遺伝子解析など)を適用した。

4. 研究成果

微生物堆積物・微生物岩は主要構成鉱物によっていくつかのタイプに分けられる。本研究では炭酸塩鉱物から構成されるものに主眼を置いたが、それ以外にもマンガン酸化物、鉄酸化物、リン酸塩鉱物から構成されるものも対象とした。主な調査対象は上野トウファ、長湯温泉、木部谷温泉、三瓶温泉、オンネトウの滝、リン酸塩ストロマトライトである。以下では主に 4 つの対象について、現時点までに得られている結果を紹介する。

1) 上野トウファ

ストロマトライトとスロンボライトは、微生物岩の主要構成要素である。原生代 - 顕生代境界ではストロマトライト衰退とスロンボライト多産が起きたが、それが生物的要因(生物進化など)によるものか、無機的要因(海水化学組成の変化など)によるものか、不明であった。その原因を検討するためには、ストロマトライト・スロンボライト両方が一カ所で見られる現世環境が適しているが、そのような例は世界でもほとんど知られていなかった。そのような中、本研究によりストロマトライトとスロンボライトが同

一環境で形成されている場所を、岡山県高梁市のトウファ(淡水性炭酸塩堆積物)堆積場から発見した。この試料を用いることで、微生物岩組織の形成要因について検討を行った。

ストロマトライトおよびスロンボライト形成場において、水化学組成に大きな違いはなく、また微小電極測定の結果から両者とも光合成誘導 CaCO_3 沈殿によって形成されていることが明らかとなった。共焦点レーザー走査顕微鏡観察や DNA 解析の結果からは、ストロマトライトに生息するシアノバクテリアが主に *Phormidium* sp. であり、それらの細胞外高分子は酸性官能基を持つために結晶核形成場となり、その結果としてストロマトライト組織を形成していることが示された。一方、スロンボライトに生息するシアノバクテリアは主に *Leptolyngbya* sp. であり、それらの細胞外高分子は酸性官能基を持たないために結晶核形成場とはならず、その結果としてスロンボライト組織を形成していることが示された。これらの結果は、微生物岩組織の形成において細胞外高分子の化学的性質が極めて重要であることを示している。

この結果をそのまま過去に当てはめるならば、酸性官能基を含まない細胞外高分子鞘を持ったシアノバクテリアが古生代前期に進化したという仮説が立てられる。その妥当性については、今後の検討が必要である。

2) 長湯温泉

温泉成炭酸塩堆積物であるトラバーチンは、非常に高い CaCO_3 飽和度条件下で形成されることから、無機的要因が重要であると考えられている。本研究ではこのような状況において、微生物が堆積物形成に果たす役割の評価を行った。

長湯温泉において、水化学組成はほぼ同じであるが、微生物存在度と流速の異なる 3 地点を選定し、微生物の構成・代謝と堆積組織の関係を調べた。共焦点レーザー走査顕微鏡観察と遺伝子解析の結果から、比較的低流速の地点では *Phormidium* sp. と *Spillurina* sp. が卓越しており、前者は酸性官能基を含む細胞外高分子を分泌して石灰化されていた。また微小電極測定の結果から、光合成による CaCO_3 沈殿も見られたが、無機的沈殿も顕著であった。一方、比較的高流速の地点では *Spillurina* sp. による厚いマットが形成されており、それらはほとんど石灰化されていなかった。また、光合成による CaCO_3 沈殿はあまり起きておらず、無機的沈殿が優勢であった。高流速環境においては微生物群集の多様性が大きく低下し、*Nostoc* sp. がわずかに生息するのみであった。それらの光合成の影響は小さく、無機的沈殿が優勢であった。

これらの結果から、流速増加に伴って微生物の多様性が減少すること、シアノバクテリアの種類によって光合成誘導 CaCO_3 沈殿の程度が大きく異なること、光合成誘導 CaCO_3 沈殿が顕著でなくても無機的沈殿が顕著であれば酸性官能基を含むシアノバクテリアの細胞外高分子が結晶核形成場を提供すること、無機的沈殿が顕著であってもシアノバクテリアの細胞外高分子が酸性官能基を含まなければ結晶核形成を阻害することなど、微生物岩形成における重要な知見が数多く得られた。

3) 鉄マンガン団塊

深海底のマンガン団塊はストロマトライトに類似した組織を持っており、また最近では原核微生物が生息していることも報告されているが、それら微生物の果たす役割は不明であった。本研究では微生物的バックグラウンドが極めて低い南太平洋還流下の深海底に見られるマンガン団塊、およびその周辺堆積物を用いて団塊の生物起源性について検討を行った。

まず、マンガン団塊から凍結切片試料を作成し、SYBR Green I を用いて核酸染色を行ったところ、団塊表面約 0.5 mm における微生物細胞密度 (~ 108 cells/cm³) が周辺堆積物のそれよりも三桁ほど高いことが明らかとなった。また、16S rRNA 遺伝子解析 (~ 1400 bp) の結果から、真正細菌および古細菌の群集構成がマンガン団塊と周辺堆積物とは大きく異なっていることも明らかとなった。マンガン団塊から検出された微生物のうち、含銅酵素 (マルチ銅オキシダーゼ) を使ってアンモニア酸化を行う Thaumarchaeota Marine Group I (化学合成無機独立栄養の古細菌) が、団塊表面で見られる高い微生物細胞密度の原因であると推定された。すなわち、銅 (団塊に濃集) とアンモニア (海水中にわずかに存在) の両方が利用可能な団塊表面において Thaumarchaeota Marine Group I の独立栄養代謝が最大となり、その代謝生成物 (亜硝酸イオンや有機炭素) が他の化学合成菌や従属栄養菌の生育を支えていると考えられる。

マンガン酸化菌はこれまで真菌および真正細菌から報告されているが、本研究で得られた真正細菌クローン中にそれらと近縁のものは見られなかった。一方、既知のマンガン酸化菌ではほとんどの場合、マルチ銅オキシダーゼがマンガン酸化に重要な役割を果たしていることから、Thaumarchaeota Marine Group I がマンガン酸化に関与している可能性も考えられる。実際に、マンガン団塊の凍結切片試料を放射光 (μ -XAFS) によって分析したところ、生物性マンガン酸化物に特徴的な δ - MnO_2 類似の hexagonal birnessite

や、生物性マンガン酸化物の二次生成物である triclinic birnessite が団塊表面に存在することが示された。

4) リン酸塩ストロマトライト

ブラジル・バイーア州には新原生代に形成されたリン酸塩ストロマトライトが分布する。先行研究ではその形成過程について、初生的に炭酸塩鉱物から構成されていたストロマトライトが続成作用でリン酸塩鉱物に置換されたものと解釈されていた。本研究ではリン酸塩鉱物そのものが微生物起源であると予想し、その生物起源性を検討した。

まず薄片観察により、リン酸塩ストロマトライト試料から保存のよい微化石 (シアノバクテリアに類似) を多数発見した。これは微化石をほとんど含まない大多数の炭酸塩鉱物からなるストロマトライトとは対照的である。次に後期原生代海洋において、光合成時にリン酸塩鉱物の飽和度がどのように変化するかシミュレーションしたところ、海洋に数 μM のリンが溶存していれば、光合成によって CaCO_3 鉱物よりもハイドロキシアパタイトが形成されやすいことが示唆された。また、リン酸塩ストロマトライトを用いて LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定を行ったところ、マリノアン氷河期直後の年代が得られた。

これらのことから、リン酸塩ストロマトライトは全球凍結後に高リン濃度深層水が存在していた証拠であると考えられる。すなわち、深層水が湧昇流によってシアノバクテリアが生息する浅海域まで到達し、数 μM のリン濃度が達成されることで、シアノバクテリアの光合成によるリン酸塩鉱物沈殿が起きたと考えられる。

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 1 件)

1. Shiraishi F., Mitsunobu S., Suzuki K., Hoshino T., Morono Y., Inagaki F., 2016, Dense microbial community on a ferromanganese nodule from the ultra-oligotrophic South Pacific Gyre: Implications for biogeochemical cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, vol. 447, pp.10-20.

[学会発表](計 17 件)

1. 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, 2016 年 5 月 23 日, 千葉県千葉市.
2. Shiraishi F., Mitsunobu S., Suzuki K.,

- Hoshino T., Morono Y., Inagaki F., 2016, Dense microbial community on a ferromanganese nodule from the ultra-oligotrophic South Pacific Gyre: Implications for biogeochemical cycles. International Workshop on Manganese Minerals, 18 Mar. 2016, Kochi.
3. 白石史人, 2016, 微生物岩の炭酸塩堆積学. 日本堆積学会 2016 年福岡大会, 2016 年 3 月 6 日, 福岡県福岡市.
 4. Shiraishi F., 2016, Carbonate, iron and manganese mineralization. Course in Chemical / Microbial Carbonate Sedimentology, 29 Feb.-4 Mar. 2016, Curitiba, Brazil.
 5. Shiraishi F., 2016, Microbialites (formation process, classification and history). Course in Chemical / Microbial Carbonate Sedimentology, 29 Feb.-4 Mar. 2016, Curitiba, Brazil.
 6. 中尾鴻兵・白石史人, 2015, 鉄微小電極測定法の確立と BIF 類似沈殿物への適用. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 2015 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市.
 7. 白石史人・千原亮二, 2015, 温泉成マンガン沈殿物形成における微生物の役割. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 2015 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市.
 8. 白石史人・光延聖・諸野祐樹・鈴木勝彦・稲垣史生 (2015) 超貧栄養海域のマンガン団塊表面に密集する微生物群集. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市.
 9. 白石史人, 2014, 先端的手法を用いた微生物性堆積物の研究, 地学団体研究会第 68 回総会, 2014 年 8 月 24 日, 佐賀県佐賀市.
 10. 中村有希・白石史人 (2014) 微生物鉱物化における細胞外高分子の役割: 島根県木部谷温泉の例. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 30 日, 神奈川県横浜市.
 11. 半澤勇作・奥村知世・白石史人, 2014, トッファ堆積物から推定される微生物岩組織の規制要因. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 30 日, 神奈川県横浜市.
 12. 白石史人・奥村知世・高島千鶴・狩野彰宏, 2014, 全球凍結後に見られるリン酸塩ストロマトライトの成因. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 30 日, 神奈川県横浜市.
 13. Shiraishi F., 2014, Evolution of life and Earth environment elucidated from microbial mineralization. Hiroshima International Symposium on Future Science (Hi-SFs) 2014, 3 Mar. 2014, Hiroshima.
 14. Shiraishi F., 2013, Microbial fossils and Earth history. SEGEPAR Seminar, 18 Oct. 2013, Curitiba, Brazil.
 15. 千原亮二・白石史人, 2013, 三瓶温泉のマンガン沈殿物形成における微生物の役割. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 20 日, 千葉県千葉市.
 16. 半澤勇作・奥村知世・白石史人, 2013, ストロマトライト・スロンボライトにおける堆積組織の形成要因. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 20 日, 千葉県千葉市.
 17. Shiraishi F., 2013, Fossil cyanobacteria as a potential pH proxy for Phanerozoic ocean. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 20 日, 千葉県千葉市.
- 〔図書〕(計 1 件)
1. 広島大学理学部地球惑星システム学科 (編), 広島大学出版会, 地球のしくみを理解する 広島大学理学部地球惑星システム学科へようこそ, 2015, 330 p.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
- 白石 史人 (SHIRAIISHI FUMITO)
 広島大学大学院理学研究科・助教
 研究者番号: 30626908