

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13891

研究課題名(和文) 砕屑岩に見られる微生物マット構造の成因解明

研究課題名(英文) Elucidation of the origin of microbial mat-related structures formed on siliciclastic rocks

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：微生物マット構造の形成を理解するため、インドにおいて現世・岩石試料の検討を行った。現世試料については、先行研究が微生物マット構造と認定していたものの多くは、蒸発作用による岩塩セメント化による構造であることが明らかとなった。岩石試料については、当初着目していた砂岩試料からは、微生物マット構造の成因の手がかりを見出すことはできなかった。一方、縞状鉄鉱層からも微生物マット構造が認識され、それらは石英の微小ノジュールが地層中で成長することで形成されることが明らかとなった。この結果は、砂岩の微生物マット構造についても同様の形成プロセスが当てはまる可能性を示唆する。

研究成果の概要(英文)：Modern and ancient samples of microbial mat-related structures were investigated in India for understanding the origin of these structures. For modern samples, it has been revealed that the structures affiliated to microbial mat-related structures by previous studies were the products of evaporitic halite cementation. For ancient samples, sandstone did not provide useful information for understanding their origin, although they were considered to be prospective. On the other hand, we have newly recognized microbial mat-related structures from banded iron formation. These structures were formed by growing the siliceous nodules inside the deposits. This finding implied the similar origin of microbial mat-related structures found in the siliciclastics.

研究分野：地球微生物学

キーワード：微生物マット構造

1. 研究開始当初の背景

堆積岩中において微生物に由来する構造は石灰岩などの炭酸塩岩に多く見られ(ストロマトライト, スロンボライトなど), それらは過去 100 年以上にわたって研究が行われてきた. その一方で, 珪碎屑岩(砂岩など)において微生物に由来する構造が認識・注目されるようになったのは比較的最近のことである(珪碎屑岩では微生物マット構造と呼ばれている). 微生物マット構造は始生代から顕生代に至るまで幅広い時代で見られ, 硬組織をほとんど持たないエディアカラ動物群の化石化過程や(Callow and Brasier, 2009, Earth-Science Reviews 96, 207-219), ペルム紀末の大量絶滅に関連して産出することが報告されているなど(Pruss et al., 2004, Geology 32, 461-464), 生命の進化や古環境の変遷を理解する上で重要な堆積構造である.

珪碎屑岩中に見られる微生物マット構造の成因は, 主に過去に形成された「岩石試料」と現在でも形成されている「現世試料」両方の観察結果に基づいて推定されており, それによればシアノバクテリアなどの光合成微生物による碎屑粒子の捕獲作用・結束作用が微生物マット構造の形成に重要であると考えられている(例えば Noffke et al., 2003, Earth-Science Reviews 62, 163-176). また最近では, 微生物マット構造形成の室内実験が行われるようになり, 「実験回収試料」の検討結果からシアノバクテリアの影響が評価されている(Hagadorn and McDowell, 2012, Sedimentology 59, 795-808; Mariotti et al., 2014, Nature Geoscience 7, 736-740). しかしながら, 微生物マット構造の研究に微生物学的手法を用いた研究例はほとんどなく, そのような構造の成因について詳細には理解されていない.

2. 研究の目的

本研究では, まず「現世試料」に対して様々な地質学的・地球化学的手法に加え, 最先端の地球微生物学的手法(共焦点レーザー走査顕微鏡, レクチン結合性解析など)も適用することで, 微生物マット構造の形成におけるシアノバクテリアなど光合成微生物の影響評価を行う. 具体的には, シアノバクテリアの 1) 成長様式と細胞配列, 2) 代謝生成物(主には細胞外高分子)の有無やその物理化学特性, 3) 光合成による菌体近傍の炭酸化学平衡の変化が鉱物沈殿や溶解, ひいては堆積組織に与える影響について評価する. 一方, 「岩石試料」に対しても地質学的・地球化学的手法を適用する. そして「現世試料」と「岩石試料」から得られた結果を対比することで, 「岩石試料」では失われている微生物学的情報を推定する.

本研究は, このような学際的なアプローチを適用することにより, 微生物マット構造の成因についてより詳細に理解することを目

指す.

3. 研究の方法

「現世試料」としては, インド東部・グジャラート州スラート近郊・キャンベ堆積盆周辺の砂浜表面に見られる様々な微生物マット構造を選定し, 研究協力者であるインド工科大学ボンベイ校サンタノウ・バナジー教授のサポートを得て試料採集を行った. 「岩石試料」としては, インド中央部・マディヤプラデーシュ州グワリオール近郊に分布する古原生界グワリオール層群に見られる様々な微生物マット構造を選定し, 研究協力者であるデリー大学パチャ・チャクラボティー教授, インド工科大学ボンベイ校プリタム・ポール氏, および広島大学の河口陽氏のサポートを得て試料採集を行った.

分析手法としては, 鉱物・化学組成分析(偏光顕微鏡による薄片観察, 粉末 X 線回折分析, 蛍光 X 線分析, レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析, 電子線マイクロアナライザー, 誘導結合プラズマ発光分光分析など)といった地質学的・地球化学的手法に加え, 以下に示す地球微生物学的手法も適用した.

1. 共焦点レーザー走査顕微鏡: シアノバクテリアの成長様式・細胞配列, 代謝生成物の有無・性状, 碎屑粒子の分布を観察する. これにより, 捕獲作用(粘着質な細胞外高分子による碎屑粒子の付着や, フィラメント状シアノバクテリアの阻流効果による碎屑粒子の集積)および結束作用(夜間にフィラメント状シアノバクテリアが水平に成長することによる碎屑粒子の繰り込み)の影響を評価する. 無色透明な細胞外高分子の観察には, レクチン結合性解析という染色法を適用する.
2. 樹脂包埋技術: 微生物を含んだ未固結の砂試料について, シアノバクテリア・碎屑粒子の空間分布を保持した状態で樹脂を浸透させて固化し, 薄片を作成する. その薄片に対して共焦点レーザー走査顕微鏡を用いて蛍光・反射光を観察することで, 捕獲作用および結束作用の影響を評価する.

4. 研究成果

「現世試料」について, キャンベ堆積盆の砂試料表面の観察を行ったところ, パリンプセスト・リップル, Kinneyia・リップル, パッチャ・リップル, 多方向リップル, リンクルストラクチャー, シーブストラクチャー, ガスドーム, ピティリッジ, ピット, セトルフ, カールマット断片, 網状表面, 円盤状微生物コロニーなど, 過去の砂岩表面に発達する微生物マット構造に類似するものが数多く見られた. しかしながら, 共焦点レーザー走査顕微鏡などの観察結果から, 先行研究が現世の砂試料において微生物マット構造

と認定していたものの多くは、海水の蒸発作用に起因する岩塩セメントの晶出によって砂表面の体積が膨張することで形成された変形構造であることが明らかとなった。実際に、これらの構造物を人工海水（500 mmol/L 塩化ナトリウム水溶液）に浸漬したところ、比較的短時間で容易に崩壊したことから、それらが堆積構造として地層中に残存することは期待できない。

その一方で、「現世試料」の一部からはシアノバクテリアなどの光合成微生物による砂粒子の捕獲作用・結束作用の結果で形成されたと考えられる堆積構造も見いだされた。それらはフィラメント状シアノバクテリアを含んでおり、表面の形態はリンクルストラクチャーに類似していた。また、それらを人工海水に浸漬しても構造が保持されたことから、堆積構造として地層中に残存する可能性が高い。

これら「現世試料」を用いた検討から得られた結果について、研究協力者であるパチャ・チャクラボティー教授およびサンタナウ・バナジー教授と議論を行い、真の微生物マット構造と岩塩セメント化による偽構造の特徴をまとめた論文を現在準備中である。この成果は、過去の碎屑岩層理面上に見られる「微生物マット構造」の生物起源性を正しく評価するために重要な新知見を含んでいる。

「岩石試料」については、研究開始当初はグワリオール層群下部パー層の砂岩層理面上に見られる微生物マット構造に着目した。実際に、これらの砂岩層理面上にはパリンプセスト・リップル、リンクルストラクチャー、ピティーリッジ、ピット、ガスドーム、エレファントスキンなど、多種多様な微生物マット構造が見られた。ただし、これらの構造に対する薄片の観察・分析結果からは、微生物マット構造が存在する部分に特異的な物理的・化学的特徴を見出すことができず、その成因解明の手がかりを得ることは困難であった。

しかしながら、グワリオール層群分布地域の地質調査を網羅的に行う過程において、グワリオール層群上部モーラー層の縞状鉄鉱層層理面上にもパー層の砂岩と同様の微生物マット構造（特にリンクルストラクチャーに類似した構造）が発達することが明らかとなった。薄片の観察・分析結果から、それらの構造は圧密前に微小な石英質ノジュールや石英質ストロマトライトが堆積物中で成長し、その後圧密を受けることで層理面が不均質に圧縮されることで形成されていた。このような微生物マット構造は、縞状鉄鉱層においては鉄酸化鉱物と石英の組成・色調コントラストが強いために比較的識別が容易であった。その一方で、石英を主体とする砂岩の場合では、微小な石英質ノジュールや石英質ストロマトライトが存在していたとしても、組成・色調コントラストが弱いために識

別は容易でない。それゆえ、これら縞状鉄鉱層から得られた結果は、砂岩に見られる微生物マット構造の形成についても微小な石英質ノジュールや石英質ストロマトライトが関与している可能性を示唆している。特に石英質ノジュール・ストロマトライトの形成には微生物が関与していると考えられるが、その種類や具体的プロセスの詳細については今後の検討が必要である。

これらの検討に加えて、縞状鉄鉱層に見られる微生物マット構造についてはこれまで報告例がなかったことから、縞状鉄鉱層自体の成因解明についても重要な知見が得られることが期待されたため、詳細な検討を行った。縞状鉄鉱層に狭定する石英質ストロマトライトについて薄片観察を行ったところ、現世の化学合成無機独立栄養鉄酸化細菌（*Leptothrix ochracea*, *Gallionella ferruginea*, *Ferriphaselus* spp., *Mariprofundus ferrooxydans*, 未培養の Zetaproteobacteria など）に形態及びサイズが類似した微化石を複数発見した（直径約 1~17 μm , 長さ約 10~180 μm のフィラメント状微化石）。これらの微化石は比較的透明なチャート中においてしばしば茶褐色を呈しており、鉄酸化物で被覆されていると考えられる。このような鉄酸化細菌に類似した微化石の存在は、グワリオール層群の縞状鉄鉱層形成時に鉄酸化細菌を含む底生微生物群集が寄与したことを示唆している。実際にこれらのフィラメント状微化石は、Planavsky et al. (2009, Earth and Planetary Science Letters 286, 230–242) が報告した上部古原生界の珪質ストロマトライト中に見られる底生鉄酸化細菌の微化石とも形態及びサイズが共通する（ただしこの先行研究では、縞状鉄鉱層層理面上に微生物マット構造が発達するという記載はない）。仮に鉄酸化細菌の化学合成無機独立栄養代謝によって鉄酸化鉱物が沈殿することでグワリオール層群の縞状鉄鉱層が形成されているのであれば、微生物マット構造の形成には捕獲作用・結束作用以外のプロセスが重要な役割を果たしていることになる。したがって、これらの成果はシアノバクテリアなどの光合成微生物以外の微生物であっても、微生物マット構造を形成するという数少ない実例となる可能性があり、今後さらに検討を進める予定である。

以上のように、「現世試料」についても「岩石試料」についても、研究開始当初には予期しなかった方向に研究が展開したため、2年の補助事業期間中における成果発表数は必ずしも多くはない。しかしながら、「現世試料」・「岩石試料」どちらからも非常に重要な知見が得られており、それらの成果は数年以内に複数の論文として発表できる見込みである。それらのうち、特に縞状鉄鉱層形成における底生微生物群集の寄与については、将来的に重要な研究テーマに発展することが

期待される。

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 0件)

なし

〔学会発表〕(計 4件)

1. Shiraishi F., 2018, The present is the key to the past. 1st Hiroshima Institute of Plate ConvErgence Region Research (HiPeR) International Symposium, 26 January 2018, Higasihirosshima.
2. 白石史人, 2017, 微生物と鉱物. 第7回 広島大学・海洋研究開発機構合同シンポジウム, 第3回 Hiroshima Institute of Plate ConvErgence Region Research (HiPeR)特別セミナー, 2017年12月1日, 広島県東広島市.
3. 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, 2017年10月15日, 岡山県岡山市.
3. Shiraishi F., 2016, Elucidation of life and Earth history from microbial deposits. 第2回日英先端科学(UK-Japan FoS)シンポジウム, 7-9 November 2016, Milton Keynes, United Kingdom.

〔図書〕(計 0件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

白石 史人 (SHIRAISHI FUMITO)
広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30626908

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

パーチャ チャクラボティー
(CHAKRABORTY PARTHA P.)
デリー大学地質学科・教授
研究者番号: なし

サンタナウ パナジー

(BANERJEE SANTANAU)

インド工科大学ボンベイ校地球科学部
・教授

研究者番号: なし

プリタム ポール (PAUL PRITAM)

インド工科大学ボンベイ校地球科学部
・ポスドクトラルフェロー

研究者番号: なし

森川朝世 (MORIKAWA ASAYO)

広島大学大学院理学研究科・大学院生
研究者番号: なし

谷川雄亮 (TANIGAWA YUSUKE)

広島大学大学院理学研究科・大学院生
研究者番号: なし

河口陽 (KAWAGUCHI MINAMI)

広島大学大学院理学研究科・学部生
研究者番号: なし