

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04058

研究課題名（和文）太古の環境と微生物復元につなげる温泉成シリカ堆積物の長期観測

研究課題名（英文）Long-term observation of hot spring silica deposits for reconstruction of ancient environment and microbial community

研究代表者

高島 千鶴（Takashima, Chizuru）

佐賀大学・教育学部・准教授

研究者番号：10568348

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は温泉成シリカ堆積物に焦点を当て、長期的な堆積速度見積もり実験を行い、縞状組織の周期と要因を明らかにすることを目的とした。堆積物の観察や分析により、1) シリカ沈殿は微生物により引き起こされていること、2) ミリオーダーの縞状組織は季節変化により形成され、長期的な微生物代謝の変化や微生物群衆の変化が一因となっている可能性がある、3) ミクロンオーダーの縞状組織はより短期的な微生物代謝を反映した可能性があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、いまだに未解明である先カンブリア時代の環境や微生物群衆の手がかりを探るため、当時の堆積岩のモダンアナログである温泉成シリカ堆積物の縞状組織の周期や生成過程について研究を行った。シリカ堆積物に発達するミリオーダーとミクロンオーダーの2つの縞状組織はそれぞれ、季節変化や夏季限定で起こる微生物代謝を反映している可能性があることが示された。この結果は、先カンブリア時代の縞状鉄鉱層やストロマトライトの周期や生成過程、及び当時の微生物群衆を解き明かす手がかりになる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we will search for clues about the environment and microbial communities in the Precambrian period, which are still unexplained. We focused the hot spring silica deposit that is very similar to Precambrian sedimentary rocks and studied the cycle and formation process of the laminations of silica deposits. Silica deposits have two of scale laminations. One is milli-order scale lamination that reflect seasonal changes. The other is micron-order scale lamination that may reflect the microbial metabolism only in summer. These results provide clues to the formation process of Banded Iron Formations and stromatolites in the Precambrian period, as well as the microbial communities at that time.

研究分野：地球生命科学

キーワード：シリカ堆積物 縞状組織 微生物

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の酸素の富む地球環境は太古の微生物と環境と相互作用により作られた。しかし、酸素を最初に発生させたシアノバクテリアなどの初期地球における微生物の進化には多くの謎が残されている。先カンブリア時代の生物の起源と進化を理解する鍵は、主に 38-18 億年前に堆積した縞状鉄鉱層と主に 25-5 億年前に堆積したストロマトライトにある。これら 2 つの海水から沈殿した縞状堆積物の生成過程については、安定同位体比やバイオマーカー、またはチャート質の部分に稀に保存されている有機構造から微生物の関与が指摘されている (e.g., Konhauser et al., 2002)。しかし、多くの場合、微生物群衆や活動の痕跡は数 10 億年間の続成作用や変成作用により消し去られている。そのため、地質試料を対象とした研究からは、縞状組織や周期性、微生物群衆の構成についての特定は進んでいない。

本研究では、先カンブリア時代の環境や微生物群集を理解するためのモダンアナログ (類似現存物で過去を探る方法) としてシリカ質温泉堆積物を対象とする。シリカ質温泉堆積物と先カンブリア時代の堆積岩は i) 構成鉱物、ii) ミクロ・ミリオーダーの縞状組織、iii) 鉱物沈殿への微生物の影響という点で類似しており、シリカ質温泉堆積物はモダンアナログとして最も適切である。

2. 研究の目的

研究対象である鹿児島県指宿市にあるたまたま箱温泉は高温 (源泉の水温は約 90°C)、中性であり、ナトリウムイオン、カルシウムイオンや塩化物イオンを多く含む主に海水起源の温泉である。源泉から流路に沿って非晶質シリカが堆積しており、堆積物の断面には異なるスケールの縞状組織が認められる。このシリカ堆積物の長期観測を行い、縞の本数と堆積時間との関係を示し、その周期が反映している要因を特定し、堆積物に見られる縞状組織の形成プロセスと周期を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 調査地の概要

たまたま箱温泉には湧出口が 2 つあり、1 つは上流に位置する塩田から流れる流路 (主水系) と下流に設置されたパイプから噴き出すもの (パイプ系) である。主水系は流量が多く、流速は大きい。主水系ではシリカ温泉堆積物は湯元から下流に向かって傾斜のある扇形状に堆積し (主水系堆積物)、上流から中流ではテラスを形成し、テラスの縁は固く縞状組織が明瞭に観察できる。パイプ系は主水系からの温泉が合流しているが、流速は小さい。パイプ系のシリカ温泉堆積物は薄く、地面に平行に沈殿している (パイプ堆積物)。パイプ堆積物は常時温泉水に浸かっている部分がある表面が緑色の堆積物と常時温泉水面下にあるピンク色の堆積物がある。

(2) 現地堆積速度実験

堆積速度を見積もるために、縞状組織が最も明瞭に見られる主水系の中流域に 5cm 四方のタイルを設置し、その上にシリカ堆積物を成長させる。2020 年 7 月にタイルを設置し、2020 年 12 月に 1 回目の回収、2021 年 10 月に 2 回目の回収を行った。3 回目の採集として、2023 年 1 月に新たに設置したタイルを 2023 年 9 月に回収した。

(3) 水分析

サンプル採集地点にて水温、pH、Eh の測定し、水試料を分析用に採集した。実験室にて溶存成分の分析や酸素・炭素安定同位体比の測定を行った。

(4) 堆積物の観察

タイル堆積物と比較対象としてタイル周辺の主水系堆積物及びパイプ堆積物を採集した。これらのシリカ堆積物はホルマリン溶液に浸し、組織を保存した。実体顕微鏡による観察、薄片を用いた光学顕微鏡と蛍光顕微鏡による観察、EPMA による三次元観察を行った。また、主水系堆積物とパイプ堆積物については元素分析を行った。

4. 研究成果

(1) 主水系堆積物の組織と特徴

主水系堆積物にはミリオーダーの白色層と有色層からなる縞状組織が見られる。最上流部の堆積物は中流部や下流部の堆積物と比較すると有色層が多く、白色層は孔隙質である。中流堆積物は縞状組織が明瞭であり、白色層の孔隙には透明なフィラメント状微生物が確認できる。下流の堆積物の厚さは薄い。中流堆積物と同様に白色層の孔隙に透明なフィラメント状微生物が存在する。シリカ堆積物の白色層は孔隙質で微生物が多く、一方、黒色層は緻密で、微生物は少ない。

(2) タイル堆積物の組織と特徴

タイル堆積物にも主水系と同様にミリオーダーの縞状組織が認められる。白色層は孔隙質で、フィラメント状の微生物菌体を核として、その周囲を直径約 5-10 μm のアモルファスシリカが被覆している。被覆された微生物は堆積面に対して垂直に伸びている。一方、緻密な有色層はさらに細かいミクロンオーダーの縞状組織が発達している。ミクロンオーダーの縞状組織は、シリカ鉱物主体層と堆積面に水平なフィラメント状微生物層で構成される。

(3) タイル堆積物に見られるミリオーダーの周期

タイル堆積物は約 1 年 3 ヶ月の間に有色層と白色層を周期的に繰り返していた。1 回目に採集したタイル堆積物は厚さ 1.5mm、2 回目に採集したタイル堆積物は厚さ 3~11mm であった。タイル直上は有色層であることから、有色層は夏に堆積すると考えられる。12 月に採集を行なった時のタイル堆積物の表面は、白色層で冬に対応すると考えられる。また、採集 2 回目の 10 月にも最表面が薄い白色層であったことから、10 月頃には白色層が堆積し始めていることがわかる。したがって、夏に有色層が堆積し、冬(夏以外)に白色層が堆積していると推測される。ミリオーダーの縞状組織は季節変化により生成されることが明らかになった。その要因としては、有色層と白色層で微生物量や形態が異なることから、長期的な微生物代謝の変化や微生物群衆の交代が考えられる。

(4) タイル堆積物に見られるミクロンオーダーの周期

タイル堆積物の有色層に見られたミクロン単位の縞状組織は縞 1 本あたり幅約 180 μm であった。タイル堆積物は堆積開始日から採集日の 466 日間で、全体の厚さとして約 11.1 mm 成長しているため、1 日に厚さ約 25 μm ずつ堆積していると見積もることができる。このことから有色層に見られるミクロン単位の縞状組織は日周期ではないと考えられる。ミクロンオーダーの縞状組織の周期を明らかにするために、過去に採集したものを含めた 7 サンプルについて、有色層中のミクロンオーダーの縞状組織の観察を行なった。その結果、縞の本数や間隔にばらつきがある事から、定期的な周期ではないことが判明した。そこで、有色層にフィラメント状微生物が確認できることと下流のパイプ堆積物中にはシアノバクテリアが存在することから、微生物代謝が関係しているのではないかと推測した。縞の間隔と堆積速度実験から見積もった 1 日の堆積厚さ (1 日に約 25 μm : 堆積速度は一定と仮定) から縞の形成された日を割り出し、各年の日ごとの日照量と比較した。明瞭な関係性は得られなかったが、ミクロンオーダーの縞状組織は、夏の日照量の比較的少ない期間の生成している傾向が見られた。今後は微生物群集の特定を行い、日射量や紫外線量、降雨量などと比較していく予定である。

(5) パイプ堆積物の特徴

ピンクの堆積物の断面は硬く緻密で、ミリオーダーの縞状組織が確認できる。縞状組織は白(白色層)・緑・ピンク・黒(有色層)の層で構成されており、多様な色を示す点で主水系堆積物やタイル堆積物と異なる特徴を持つ。

緑の堆積物の表面は、約 1cm のコブ状の突起で構成され、凹凸が激しいのが特徴的である。また細かく観察するとさらに小さな突起が見られる。上流や中流の堆積物とは全くかけ離れた様子である。緑の堆積物の断面は、表面に近いコブ状の部分は緻密で硬い構造である。また、ピンク色堆積物と同様にコブ状の部分より下位にはミリオーダーの縞状組織が見られる。

両堆積物を蛍光顕微鏡で観察すると、堆積物表面にシアノバクテリアの自家蛍光が認められた。パイプ堆積物は鉱物沈殿や縞状組織の形成にシアノバクテリアが関与している可能性がある。

(6) まとめ

シリカ温泉堆積物の長期的観測により、ミリオーダーとミクロンオーダーの縞状組織の周期について明らかになった。しかし、その要因については不明な点が多い。堆積組織によると両スケールの縞状組織には微生物が関与していることは明白であり、今後遺伝子解析による微生物群集の特定を行う予定である。微生物代謝と縞状組織の関連性を明らかにすれば、先カンブリア時代の縞状堆積物の生成過程や当時の微生物群集の解明に繋がる。

(引用文献)

Konhauser et al., (2002) Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? *Geology*, **30**(12), 1079-1082.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Okumura, C. Takashima, K. YanagawaA. HarijokoA.Kano	4. 巻 440
2. 論文標題 Stromatolite formation by Anaerolineae-dominated microbial communities in hot spring travertine in North Sumatra, Indonesia	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sedimentary Geology	6. 最初と最後の頁 106263 106263
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sedgeo.2022.106263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏, 角縁進
2. 発表標題 シリカ温泉堆積物に発達する縞状組織の周期および成因
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏, 角縁進
2. 発表標題 Textual characteristics of laminated silica hot spring deposits in Kagoshima Prefecture
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏
2. 発表標題 鹿児島県たまたま箱温泉に発達するシリカ堆積物の堆積速度実験
3. 学会等名 日本地質学会第130年学術大会京都大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡部日陽, 坂井清花, 高島千鶴, 奥村知世, 狩野彰宏
2. 発表標題 温泉成シリカ堆積物の堆積速度実験から見積もった縞状組織の周期
3. 学会等名 炭酸塩コロキウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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	狩野 彰宏 (Kano Akihiro) (60231263)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	奥村 知世 (Okumura Tomoyo) (90750000)	高知大学・海洋コア総合研究センター・准教授 (16401)	

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
---------	---------