

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800262

研究課題名(和文) 微生物代謝効果から読み解く温泉堆積物のマイクロスケール縞状組織の生成プロセス

研究課題名(英文) Microbial processes of micro-scale lamination in hot spring deposits

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は約38億-5億年前に海洋で堆積した縞状鉄鉱層とストロマトライトの生成過程を明らかにするために、現世の類似した温泉堆積物について研究を行った。インドネシアスマトラ島の2つの温泉と、鹿児島県霧島市の温泉を対象とし、温泉堆積物について水分析・堆積物観察・微生物観察等を行った。それらの結果を総合的に検討し、各温泉堆積物に発達する縞状組織の生成過程を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study focus on modern hot spring laminated deposit for analogy of ancient marine deposits, BIF and stromatolite. Study locations are two hot springs in Sumatra Island, Indonesia and one hot spring in Kagoshima Prefecture, Japan. These hot spring deposits were analyzed by geochemical, sedimentological and microbiological methods. These results clear processes of micro-scale lamination in hot spring deposits.

研究分野：数物系科学

キーワード：温泉堆積物 鉄酸化細菌 シアノバクテリア

1. 研究開始当初の背景

38-5 億年前に海洋で堆積した縞状鉄鉱層やストロマトライトは先カンブリア時代の大気海洋環境および微生物生態系情報を保持しているとされる。それらの情報を得るべく堆積学的・地球化学的研究は盛んに行われているが、長期間の続成・変成作用により、情報の抽出は容易ではない。

縞状鉄鉱層やストロマトライトの生成プロセスについては異なるモデルが提示されてきた。また、これらの堆積物に発達するマイクロオーダーの縞状組織の成因についても、初生的な堆積構造であるか、続成作用の産物であるか、いまだに決着がつかない。さらに縞形成の周期性についても理解されていない。

申請者は縞状鉄鉱層やストロマトライトに発達するマイクロオーダーの縞状組織の解明を目指して、類似した組織を持つ温泉環境での鉄質沈殿物と炭酸塩堆積物について研究を進めてきた。温泉鉄沈殿物と先カンブリア紀縞状堆積物は、i)構成鉱物、ii)マイクロオーダーの縞状組織、iii)微生物による沈殿、という共通項があり、温泉堆積物はモダンアナログとしてのポテンシャルが高い。現世の堆積物を研究する利点は、太古の堆積物から得ることのできない微生物情報を入手することが可能な点にある。

2. 研究の目的

本研究では、1)温泉水の化学・物理プロファイル、2)沈殿物の鉱物成分と組織の情報、3)微生物群集の構成と空間分布の情報を取得し、温泉堆積物における微生物-鉱物作用と縞状形成プロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

泉質と沈殿物の性質が異なる国内外の温泉を研究対象とする。

(1) 炭酸塩堆積物の調査地域：

- ・インドネシアスマトラ島 Sipoholon 温泉
- ・インドネシアスマトラ島 Blue Pool 温泉
- ・鹿児島県霧島市 塩浸温泉

(2) 鉄質堆積物の調査地域：

- ・鹿児島県霧島市 塩浸温泉

(3) 分析方法

- 化学的環境情報
- ・物理化学プロファイル測定
- ・溶存成分測定
- ・ガス成分測定
- 組成組織情報
- ・堆積物の鉱物同定
- ・堆積物の結晶構造観察
- ・薄片や電子顕微鏡による堆積物の微細構造観察
- 微生物群集情報
- ・蛍光顕微鏡観察による微生物の空間分布
- ・PCR 法を用いた微生物群集組成の特定

4. 研究成果

(1)インドネシアスマトラ島 Sipoholon 温泉
Sipoholon 温泉は多数の湯元があり、いずれも自然湧出である。その源泉の中で、流路における人工的な影響がないものを研究対象とした。Sipoholon 温泉の流下経路における水質変化、堆積物の組織、及び微生物相について考察した。

温泉水は天水起源で、中性で微好気的である。ガス成分として硫化水素と二酸化炭素を溶解している。

炭酸塩堆積物は主にアラゴナイトで構成されており、内部には幅数マイクロンの縞状組織が観察され、日輪である可能性を示した。

上流の炭酸塩堆積物表面は白色微生物マットで覆われおり、光合成を行わない硫黄酸化細菌を主体とする硫黄芝であることがわかった(図 1A)。

一方、下流の炭酸塩堆積物表面は、緑色微生物マットで被覆されている。蛍光顕微鏡観察により、シアノバクテリアで構成されていることが明らかになった(図 1B)。

シアノバクテリアを主体とするこの微生物種の分布は、水流や水温に応答したものである。高温な上流では硫黄酸化細菌が生息し、50℃以下で流速が小さい下流にはシアノバクテリアが繁栄している。

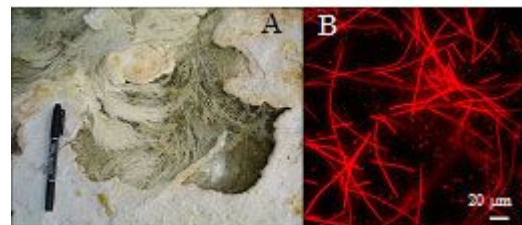


図 1. インドネシア スマトラ島 Sipoholon 温泉。(A)湯元付近の硫黄芝、(B)下流に見られる緑色微生物マットの蛍光顕微鏡観察写真。

この研究成果は、学会で発表している。

(2)インドネシアスマトラ島 Blue Pool 温泉
Blue Pool 温泉の炭酸塩堆積物について、鉱物学的・地球化学的・微生物学的分析を行い、流下経路における地球化学的環境と微生物相の変化について明らかにした。また炭酸塩堆積物の堆積学的・鉱物学的特徴を示した。

源泉の水温は約 62℃と高温であり、硫化水素と二酸化炭素に富む水である。しかし、湧出後すぐに大気との交換により、硫化水素と二酸化炭素は脱ガスし、溶存酸素濃度は増加する。

炭酸塩鉱物はカルサイトとアラゴナイトが共存しているが、アラゴナイトが主体である。また、下流に向かって Mg/Ca 比が増加するため、アラゴナイトの割合が

大きくなっている (表 1)。

表 1. インドネシア スマトラ島 Blue Pool 温泉の流下経路におけるアラゴナイトとカルサイトの割合。

	(Weight %)	
	Calcite	Aragonite
Carbonate mineral		
ISN-1WH	24.9	75.1
ISF-1WH	58.0	42.0
IS5-1WH	28.8	71.2
Average sub-code 1	40.9	59.1
ISN-2PN	11.0	89.0
ISN-2LG	11.7	88.3
ISF-2LG	10.3	89.7
IS5-2LG	10.5	89.5
Average sub-code 2	10.8	89.2
ISN-3DG	1.8	98.2
ISN-3BR	2.6	97.4
ISF-3DG	1.7	98.3
IS5-3DG	1.8	98.2
Average sub-code 3	2.5	97.5
ISF-5	14.0	86.0
Average of all sites	18.2	81.8

炭酸塩堆積物表面の色は上流から下流に向かって、白色、ピンク色、明緑色、暗緑色、茶色に変化する。微生物の遺伝子解析により、微生物相の変化を反映していることがわかった。

湯元付近の白色微生物マットは化学合成独立栄養細菌の集合体であり、ピンク色微生物マットは非酸素発生型光合成を行う紅色硫黄細菌で構成されている。明緑色微生物マットは緑色非硫黄細菌が主体であり、暗緑色微生物マットは非酸素発生型光合成を行う緑色非硫黄細菌と酸素発生型光合成細菌のシアノバクテリアが共存している。最下流の茶色微生物マットは緑色硫黄細菌で構成される。

このような流下経路における微生物相の変化は水質変化に回答したものである。特に硫化水素が1 マイクロモル以上含まれている場合は硫黄を用いた非酸素発生型光合成が優勢である (図 2)。

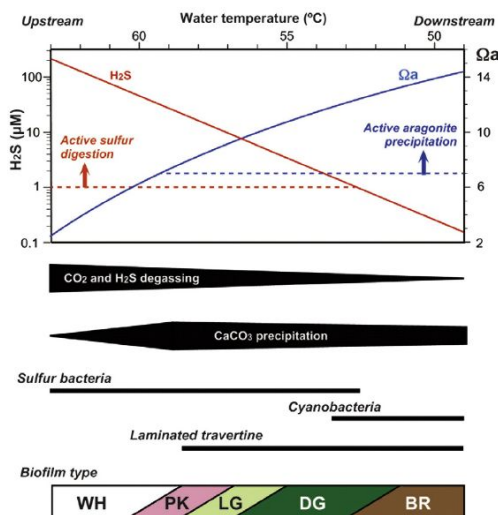


図 2. Blue Pool 温泉の流下経路におけるガス成分の変化とそれに回答した微生物相。

炭酸塩堆積物には幅ミクロン単位の縞状組織が発達しており、非酸素発生型光合成の日周期を反映したものと考えられる。これは、シアノバクテリアが出現する前のストロマタイトの生成過程に応用できる可能性がある。

この研究成果は、学会および論文として発表している。

(3) 鹿児島県塩浸温泉

塩浸温泉では、上流に鉄質沈殿物、下流に炭酸塩堆積物が発達している。両堆積物の生成過程を明らかにするために、鉱物学的・地球化学的・堆積学的・微生物学的分析を行った。

湯元の水質は、中温・中性で溶存酸素に乏しく、二酸化炭素を多量に溶解し、カルシウムイオン・ナトリウムイオン・炭酸水素イオンを多く含んでいる。

水素安定同位体比・酸素安定同位体比・炭素安定同位体比より、温泉水は天水起源の水が加熱され、マグマ起源の二酸化炭素が溶解して生成したことが明らかになった。

鉄質沈殿物は鉄水酸化物であり、断面には幅数ミクロンの縞状組織が肉眼で確認できる (図 3A)。薄片観察では、鉄水酸化物はフィラメント状であり、堆積面に対して垂直な方向に分岐した形状をとっている (図 3B)。

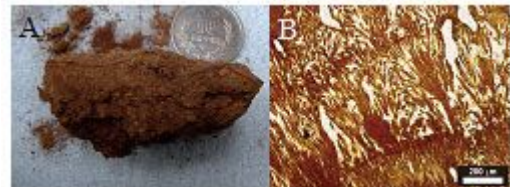


図 3. 鹿児島県塩浸温泉の鉄質堆積物。(A)鉄質堆積物の写真。(B)薄片写真。

フィラメント状鉄水酸化物の幅は約 10 ミクロン程度で、直径約 2 ミクロンの球状が集合したものである。その内部には幅 nm 単位のフィラメントが集合している。このことから、鉄水酸化物の沈殿に微生物が関与していることが示唆された。鉄質沈殿物中の微生物群集で最も多く検出されたベータプロテオバクテリア綱 Rhodocyclaceae は非酸素発生型光合成や窒素固定を行う好気性の微生物など多様な代謝様式を持つ。鉄を酸化する非酸素発生型光合成細菌により鉄水酸化物が沈殿した可能性があり、縞状組織は日周期を反映しているかもしれない。

下流の炭酸塩堆積物は堆積面に対して垂直に成長した結晶と堆積面に平行な細粒バンドで構成される幅 200-500 ミクロンの縞状組織を示す (図 4A, 4B)。細粒バンドの部分には微生物の代謝により生成さ

れる EPS(Extra polymeric substances)が多く(図 4C), 蛍光顕微鏡下で緑色バ イトマットを観察すると, 結晶間にシア ノバクテリアの自家蛍光を確認できる (図 4D). また, 微生物群集の遺伝子解 析の結果も, シアノバクテリアが主要構 成メンバーであることを支持する. 縞状 組織はシアノバクテリアの代謝日周期を 反映していると考えられる.

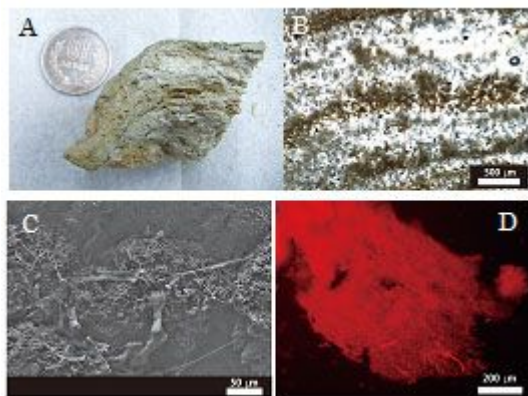


図 4. 鹿児島県塩浸温泉の炭酸塩堆積物. (A)炭酸塩堆 積物の写真, (B)炭酸塩堆積物の薄片写真, (C)堆積物 表面の EPS, (D)緑色微生物マットの蛍光顕微鏡写真.

下流の炭酸塩堆積物は流下経路により, 鉱物種が異なる. 基本的にはアラゴナイト であるが, 湯元から約 5 m の地点はカル サイトが沈殿している. アラゴナイト とカルサイトの生成条件を決定する要因 はいくつか提案されており, 1) 水温, 2) Mg/Ca モル比, 3) 過飽和度, 4) 微生物 が放出する EPS である. 各項目について 検討を行ったところ, EPS 量に明瞭な違 いが見られた. EPS の多い場所ではアラ ゴナイトが沈殿し, EPS の少ない場所ではカルサイトが堆積することがわかった. この研究成果は学会で発表し, 内容の一 部を論文として発表している.

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 3 件)

1) 都築奈美・高島千鶴(2017) 鹿児島県塩浸温泉の流下経路による水質変化. 佐賀大学教育学部研究論文集, 1, 47-52. (査読無) <http://portal.dl.saga-u.ac.jp/handle/123456789/122929>

2) Sugihara, C., Yanagawa, K., Okumura, T., Takashima, C., Harijoko, A., Kano, A. (2016) Transition of microbiological and sedimentological features associated with the geochemical gradient in a travertine

mound in northern Sumatra, Indonesia. *Sedimentary Geology*, 343, 85-98. (査読有) DOI

<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.07.012>

3) 杉原千耶・高島千鶴・柳川勝紀・森 大器・奥村知世・Agung Harijoko (2015) スマトラ島北部の温泉に発達する多様な微生物マット. *地球科学*, 69, 141-142. (査読有) DOI

<http://doi.org/10.15080/agc/chikyukagaku.69.3.141>

[学会発表](計 20 件)

1) Kano, A., Takashima, C., Okumura, T. Processes and patterns of daily lamination in geothermal carbonate sediments: analog for stromatolites? *Precambrian World 2017*, 2017/3/5, 九州大学西新プラザ(福岡県福岡市)

2) 都築奈美・高島千鶴, 鹿児島県塩浸温泉の流下経路における水質変化と鉱物組成. 日本地質学会第 123 年学術大会, 2016/9/12, 日本大学(東京都世田谷区)

3) Okumura, T., Takashima, C., Yanagawa, K., Sugihara, C., Harijoko, A., Kano, A., Daily lamination formed by sulfur oxidizing bacteria and chloroflexus in a hot spring stromatolite. *IGC 2016/8/31*, Cape Town (南アフリカ)

4) Sugihara, C., Kano, A., Yanagawa, K., Okumura, T. and Takashima, C. Transition of microbial communities and laminated structures in travertines: case study in northern Sumatra, Indonesia. 日本地球惑星科学連合大会, 2016/5/23, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

5) 高島千鶴・都築奈美, 鹿児島県塩浸温泉にみられる縞状堆積物の形成過程. 日本地球惑星科学連合大会, 2016/5/23, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

6) 都築奈美・高島千鶴 鹿児島県塩浸温泉に発達する温泉堆積物. 炭酸塩コロキウム, 2016/3/14, 筑波大学館山研修所(千葉県館山市)

7) 都築奈美・高島千鶴, 鹿児島県塩浸温泉に見られる堆積物の特徴. 日本地質学会西日本支部第 167 回例会, 2016/2/20, 熊本大学(熊本県熊本市)

8) 杉原千耶・柳川勝紀・狩野彰宏・奥村知世・高島千鶴, 北部スマトラ島の縞状トラバーチンと硫黄細菌. 日本地質学会西日本支部第 167 回例会, 2016/2/20, 熊本大学(熊本県熊本市)

9) 高島千鶴, 鉄質温泉堆積物に見られる縞状組織の生成プロセス. 日本地球化学会第 62 回年回, 2015/9/17, 横浜国立大学(神奈川県横浜市)(招待講演)

10) Kano, A., Okumura, T., Takashima, C.,

Geomicrobiological processes in daily laminated travertines. 31st IAS Meeting of Sedimentology, 2015/6/23, Krakow (ポーランド)

11) 杉原千耶・柳川勝紀・狩野彰宏・高島千鶴・奥村知世・ハリジョコ アグン, トラバーチン見られる微生物分帯: スマトラ島北部の例. 日本地球惑星科学連合大会, 2015/5/26, 幕張メッセ (千葉県千葉市)

12) 杉原千耶・狩野彰宏・柳川勝紀・高島千鶴・奥村知世, スマトラ島北部のトラバーチンに見られる微生物群集遷移. 日本古生物学会, 2015/1/31, 豊橋市立博物館 (愛知県豊橋市)

13) 高島千鶴・平野未沙・奥村知世・狩野彰宏, スマトラ島北部 Sipoholon 温泉水の生成過程とトラバーチン表面に分布する微生物相の流路変化. 日本地質学会第 121 年学術大会, 2014/9/15, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

14) 奥村知世・高島千鶴・平野未沙・狩野彰宏 (2014), クロコフレクサスと硫酸化細菌が形成する温泉成ストロマトライト. 日本地質学会第 121 年学術大会, 2014/9/15, 鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

15) 高島千鶴, 鉄質温泉堆積物のミクロスケール縞状組織の生成プロセス. 地学団体研究会第 68 回総会, 2014/8/24, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

16) 高島千鶴・森大器・奥村知世・狩野彰宏, マンガン酸化物を沈殿させる平松鉱泉水の季節変化. 地学団体研究会第 68 回総会, 2014/8/24, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

17) 平野未沙・高島千鶴・奥村知世・狩野彰宏, スマトラ島 Sipoholon 温泉の流下経路での水質と微生物相変化. 地学団体研究会第 68 回総会, 2014/8/24, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

18) 高島千鶴・平野未沙・奥村知世・狩野彰宏, スマトラ島北部に発達するトラバーチンの流下経路での水質変化と微生物相の応答. 日本地球惑星科学連合大会, 2014/4/30, 横浜パシフィコ (神奈川県横浜市)

19) 白石史人・奥村知世・高島千鶴・狩野彰宏, 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大会, 2014/4/30, 横浜パシフィコ (神奈川県横浜市)

20) 奥村知世・高島千鶴・平野未沙・狩野彰宏, 硫酸化細菌とシアノバクテリアが関わる温泉成ストロマトライトの縞組織形成プロセス. 日本地球惑星科学連合大会, 2014/4/30, 横浜パシフィコ (神奈川県横浜市)

〔図書〕(計 1 件)

1) 大沢信二・網田和弘・板寺一洋・高島千鶴・柴田智郎・渡部直喜・西村進 (2016) 温泉と地球化学. ナカニシヤ出版 p.1-189

〔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:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://takashima.pd.saga-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織
(1) 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

(2) 研究分担者 ()
研究者番号:

(3) 連携研究者 ()
研究者番号:

(4) 研究協力者
狩野彰宏 (Kano, Akihiro)
東京大学・理学研究科・教授
研究者番号: 60231263

白石史人 (Shiraishi, Fumito)
広島大学・理学研究科・助教
研究者番号: 30626908