

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654059

研究課題名（和文） 微生物マットの準その場観測から見積もる太古の海洋環境

研究課題名（英文） Ancient marine environments estimated from semi-in-situ observation of microbial mat

研究代表者

狩野彰宏 (KANO AKIHIRO)

九州大学・大学院比較社会文化研究院・教授

研究者番号：60231263

研究成果の概要（和文）：温泉環境での微生物マットは始生代～原生代の地層に残された微生物作用の痕跡を解く鍵である。本研究では、炭酸カルシウムの沈殿を伴うトラバーチンを主な対象として、水／堆積物界面での化学的-物理的条件の変化を媒介として、微生物群集が組織に与える影響を考察した。その結果、大分県長湯温泉・鹿児島県安楽温泉・インドネシア Pancuran Pitu におけるトラバーチンの縞状組織がシアノバクテリアの代謝活動を反映した日輪であることを明らかにした。また、冷水条件で沈殿するトゥファについても同様の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Microbial mats in hydrothermal environments provide a key to understand the signatures from microbial processes recorded in Archean-Proterozoic sediments. For the mats on the calcium carbonate travertines, this study investigated microbial effects to the sedimentary textures through the physicochemical change at the water-sediment interface. The results from Nagayu hot-spring (Ohita Prefecture), Anraku hot-spring (Kagoshima Prefecture), and Pancuran Pitu (Indonesia) indicate that the laminated textures are daily owing to the cyanobacterial metabolic cycle. Similar investigation was also performed for tufa deposits in the ambient temperature setting.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	360,000	3,060,000

研究分野：数物系科学 A

科研費の分科・細目：地質学

キーワード：トゥファ, 鍾乳石, 古気候解析, 安定同位体, アジアモンスーン

1. 研究開始当初の背景

熱水／温泉環境に生きる好熱菌が生命系統樹の根幹を占めることが示されて以来、「温泉は太古の海洋環境を暗示する」という古典的な考えが再認識されている。温泉環境の高い二酸化炭素と低い酸素分圧は、始生代～原生代の表層環境と共通し、温泉沈殿物の中に

はストロマトライトや縞状鉄鉱層と類似する組成・組織を持つものもある。これら温泉沈殿物の表面には厚さ数 mm～数 cm の微生物集合体（微生物マット）が発達し、鉱物の沈殿に関与している。

太古の海洋環境と温泉環境の共通点を念頭に、研究代表者は萌芽研究の交付を受け

て、温泉に発達する炭酸塩堆積物（トラバーチン）の研究を進めてきた。研究対象の奈良県入之波温泉では、シアノバクテリアが光に応答して夕方頃薄い微生物マットをつくり、それが規則的な日輪構造としてトラバーチンに保存されることを示したが、鉱物沈澱に及ぼす微生物代謝の影響については未解決の問題として残された。水質条件を維持できず、培養実験が失敗したためである。

2. 研究の目的

温泉の特殊な水質条件を実験室で再現するためには、高額かつ大掛かりな設備が必要である。本研究では、発想を転換し、現場から温泉水を供給して実験・計測（準その場観測）のための装置を作成することで問題を解決する。研究対象とする温泉では、炭酸塩鉱物や鉄質沈殿物を主成分とした堆積物上に微生物マットが発達しており、これを「準その場観測装置」へ移植し、1) 微小電極法によりマット内の微環境プロファイルを観測（pH, DO, Ca 濃度など）し、2) マット試料への溶存成分フラックスを測定する。マット試料は凍結保存し、3) 微生物群集の遺伝子解析を行い、4) 遺伝子プローブ法により微生物グループの空間的分布とバイオマスを評価する。これらの結果から、「微生物マットでの微生物-水-鉱物相互作用」を定量的に考察し、ストロマトライト組織の成因とチャートの化石化問題にアプローチする。

3. 研究の方法

国内外の温泉環境に発達する炭酸塩堆積物（鹿児島県安楽温泉・大分県長湯温泉など）の微生物マットでの鉱物沈澱作用の実態を解明するために、野外に設置可能な「準その場観測装置」を製作する。装置は、流量・光量の可変的供給と、改良型微小電極法による微環境プロファイルの測定を可能にしたものである。また、合わせて水質分析を行い、マットへの溶存成分のフラックスを定量的に見積もる。さらに、微生物学的な分析を行う。まず、マット試料内の微生物群集を遺伝子解析により特定する。次に、遺伝子プローブ法を用いて、検出された微生物の空間分布とバイオマスを評価する。

研究により得られた、「温泉沈澱物の成分と組織」・「微環境プロファイル」・「微生物グループの空間的分布とバイオマス」・「微生物群集」に関するデータから、温泉微生物マットの4サイトについての微生物プロセスを特定し、組織との関連性について検討する。

さらに、検討事項をもとに、ストロマトライトや縞状鉄鉱層の微生物プロセスと生成条件について考察する。また、微環境プロファイルによりえられた溶存成分や pH の値から、太古の海洋環境を具体的な数値として見

積もる。

4. 研究成果

以下の重要な成果が研究期間内に得られた。

(1) 大分県長湯温泉の日輪トラバーチン：長湯温泉のトラバーチンは、アラゴナイトの針状結晶が底質から垂直方向に伸長し、並置した組織を示す。この組織は、カルサイト質トラバーチンに一般的に見られる立方体から斜方体の結晶が枝状に連なる組織とは全く違うものであった。アラゴナイト質トラバーチンの縞組織と微生物群集は温泉水の水流条件により大きく異なる。ここで詳細に検討した2つのタイプは日輪組織を形成していた。流速の大きい（ ~ 100 cm/秒）場所では、微生物に乏しく、規則的な縞を持つ硬質なトラバーチンが形成されている。硬質トラバーチンでは、昼間、従属栄養バクテリアを主体とするバイオフィームが表面を覆い、アラゴナイトの針状結晶の成長を妨げていた。この従属栄養細菌は、シアノバクテリアの光合成によって分泌された有機物により増殖したものと考えられる。シアノバクテリアは表面には分布せず、針状結晶集合体間にある垂直な隙間に分布する。光合成が生じない夜間には、バイオフィームの形成が生じないため、比較的長い（ >100 μ m）針状結晶が表面で成長し、明色の結晶層が生成する。一方、流速の小さい（ ~ 5 cm/秒）ところでは微生物マットに富む軟質なトラバーチンが形成されている。軟質トラバーチンでは、昼間、フィラメント状シアノバクテリアが走光性によりトラバーチン表面に移動し、バイオフィームを形成する。昼間の沈殿はバイオフィーム上では起こらず、小径（ <50 μ m）のミクライト質のアラゴナイトがバイオフィーム中でまばらに晶出する。これに対し、夜間にはシアノバクテリアのバイオフィームを覆うように針状結晶が生じ、結晶層が形成する。これらの2タイプの縞の形成には、シアノバクテリアが間接的・直接的に寄与している。そこで、前者を間接プロセス、後者を直接プロセスと定義した。長湯温泉のケースでは、流速を反映した炭酸カルシウムの沈殿速度が堆積物中でのシアノバクテリアの分布に影響を及ぼすことで、縞の形成プロセスに違いが生じていると予測された。

(2) Pancruran Pitu での流速条件の検討：長湯温泉で得られた予測は、様々な流速条件が見られる Pancruran Pitu（インドネシア・ジャワ島中央部）の大規模トラバーチンマウンドで検証された。Pancruran Pitu のトラバーチンでも流速条件を反映した組織の変化が見られ、約 200 cm/秒の場所では間接プロセスによる日輪を持つ硬質トラバーチンが、流

速 70 cm/秒以下の場所では直接プロセスによる軟質トラバーチンが形成されていた。Pancuran Pitu の硬質トラバーチンからは長湯温泉の硬質トラバーチンで優占種であった従属栄養細菌と近縁種が同定された。フィラメント状シアノバクテリアの分布と組織の類似性から、これらの縞組織も日周期であると示唆される。また、流速が 5 cm/秒以下では明瞭な縞組織が発達しないことも明らかとなった。

(3) 鹿児島県安楽温泉のカルサイト質トラバーチン：鹿児島県安楽温泉では、カルサイト質とアラゴナイト質トラバーチンが共存する。両者は同様の温度と水質条件で生成するが、微生物マットに富む場所ではアラゴナイトが、乏しい場所ではカルサイトが沈殿するという傾向が認められた。流速が大きい場所 (>100 cm/秒) で生成するカルサイト質トラバーチンは、枝状結晶集合体から構成され、やや空隙質な特徴を持つ。ここでは昼間にシアノバクテリアのバイオフィームが形成され、直接プロセスによって日周期の縞が形成されることが明らかとなった。ただし、水温は上記の 2 か所のものよりも高く (約 50°C)、好熱性のココイド状シアノバクテリアが優占していることも分かった。また、流速が不安定なところでは縞の厚さや間隔が異なる非日周期の縞組織が形成されることが明らかとなった。

(4) トラバーチン組織の規則性とストロマトライトのモダンアナログとしての可能性：本研究で得られた結果と、過去に報告されたカルサイト質トラバーチンの縞組織形成プロセスを総合すると、間接プロセスは、流速が 100 cm/秒以上のところで発達する結晶充填率が 80%以上の緻密なアラゴナイト質トラバーチンに特有であることが分かった。これは菌体そのものではなく、シアノバクテリアが分泌する細胞外高分子物質 (EPS) の影響を受けたプロセスとも言える。緻密なアラゴナイト質トラバーチン内では、シアノバクテリアは垂直に伸長する狭い隙間に生息し、昼間でもトラバーチン表面へ移動し増殖できないため、間接的に縞の形成に関わる。同様の水流条件であっても、トラバーチンがカルサイト質であれば、結晶充填率が 70%を超えることはなく、シアノバクテリアが分布できる空間は確保されるため、昼間表面にバイオフィームを形成できると考えられる。直接プロセスの日輪は非生物的沈殿とバイオフィームの石化により起こる。2つの要素の比率は、流速と水の化学組成を反映した鉱物沈殿のポテンシャルに関係する。また、流速が著しく小さく沈殿量が少ない場所では規則的な縞が成立しないことから、日周期

の縞には夜間にトラバーチン表面を覆う沈殿が必要であることが示唆された。急速な石灰化は菌体の生存にとっての脅威であるが、トラバーチン環境でのシアノバクテリアは温泉水の高い過飽和環境であっても石灰化されていない。長湯温泉の軟質トラバーチンでは、EPS の濃度が高く、表面のバイオフィーム中では、結晶の密度が小さくなっていた。EPS は酸性の多糖類を主成分とし、カルシウムイオンを吸着することが知られている。EPS の分泌は細胞増殖の負担となるが、細胞の石灰化を免れるために役立てているのだろう。

バイオフィーム層に残されたシアノバクテリアは数日のうちに分解され、その部分はミクライトがまばらに分布する空隙となる。その結果、結晶質のラミナとミクライト質のラミナが互層する縞状構造が出来上がる。これは始生代後期から原生代のストロマトライトが示す sub-mm オーダー以下の明色・暗色層の繰り返しの組織と類似する。ミクライトにより埋められなかった空間は、最古 (3.45 Ga) のストロマトライトにも見られる様な窓状構造として保存される。また、シアノバクテリアが石灰化されないことも先カンブリア時代のストロマトライトとトラバーチンの共通点である。これは先カンブリア時代の海水が中性 pH で高い溶存炭酸濃度を持つという従来の解釈とも整合的である。興味深いことに、初期のケイ化作用によって例外的に微生物化石を保存する原生代のストロマトライトでは、長湯温泉と Pancuran Pitu の軟質トラバーチンと類似したフィラメント状シアノバクテリアの成長パターンが保存されている。これらの考察は先カンブリア時代のストロマトライトの生物起源を支持し、少なくともいくつかの縞が日周期であることを示唆する。もしそうであれば、先カンブリア時代の海水の炭酸塩過飽和度は現在よりも明らかに高かったと言える。

(5) 脱ガス誘導沈殿の理論式：トラバーチンの非常に大きい沈殿速度 (mm/日) を初めて理論的に説明した。トラバーチン堆積場では、水からの二酸化炭素の脱ガスによって炭酸塩の沈殿が促される。本研究が提案する二酸化炭素の脱ガス誘導型沈殿 (DIP) のプロセスは、水質から求められる鉱物生成と比べると、沈殿速度を数十倍に増加させる。脱ガス誘導型沈殿プロセスは流速にも影響される。流速を加味した DIP のモデルはトラバーチンの実際の沈殿速度と整合的であることに加え、冷水成トウファの沈殿速度との違いを明確に示した。

(6) 秋田県の鉄質沈殿物：秋田県小坂町の奥々八九郎温泉には、源泉付近に鉄沈殿物が

発達する。これはフェリハイドライトとアラゴナイトで構成される sub-mm オーダーの縞状組織を示す。走査型電子顕微鏡観察や遺伝子解析の結果は、微好気性の鉄酸化細菌がフェリハイドライトを沈殿させたことを示す。源泉は酸素を含まず、鉄酸化細菌の生息には適さないが、沈殿物中に認められるシアノバクテリアの光合成が酸素を供給していた。奥々八九郎温泉の鉄沈殿物のシアノバクテリアと鉄酸化細菌の共生関係は、縞状組織が光合成活動の強度を反映した可能性を示し、浅海性縞状鉄鉱層に対する新しいメカニズムを提供するかもしれない。

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6件)

- 1) Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Akmaluddin, Kano, A. (in press) Textural transition in an aragonite travertine formed under various flow conditions at Pancuran Pitu, Central Java, Indonesia. *Sedimentary Geology* 査読有
- 2) Takashima, C., Okumura, T., Nishida, S., Koike, H. and Kano, A. (2011) Bacterial symbiosis forming laminated iron-rich deposits in Okuoku-hachikurou hot spring, Akita Prefecture, Japan. *Island Arc*, 20, 294-304. 査読有
- 3) Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Nishida, N., Yukimura, K., Naganuma, T., Koike, H., Arp, G. and Kano, A. (2011) Microbial processes forming daily lamination in an aragonite travertine, Nagano-yu hot spring, southwest Japan. *Geomicrobiology Journal*, 28, 135-148. 査読有
- 4) Takashima, C., Okumura, T., Nishida, S., Koike, H. and Kano, A. (2011) Microbial control to lamina formation in a travertine at Crystal Geysir, Utah. *Lecture Notes in Earth Science*, 131, 123-133. 査読有
- 5) 狩野彰宏・奥村知世 (2011) 炭酸塩と水の酸素同位体分別に関する非温度依存. *比較社会文化*, 17, 85-93. 査読有
- 6) Shiraishi, F., Okumura, T., Takahashi, Y., Kano, A. (2010) Influence of microbial photosynthesis on tufa stromatolite formation and ambient water chemistry, SW Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5289-5304. 査読有

[学会発表] (計8件)

- 1) 奥村知世・高島千鶴・白石史人・狩野彰宏 (2012) アラゴナイト質トラバーチンの組織と水流条件の関係. 地質学会西日本支部 (鹿児島大学)
- 2) Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F.,

Kano, A. (2011) Variation of the microbial processes forming lamination in aragonite travertines. *International Symposium on Environmental Biogeochemistry 2011* (Istanbul, Turkey)

- 3) 狩野彰宏・奥村知世 (2011) トラバーチンに見られる弱酸性環境での酸素同位体分別. 日本地質学会 (茨城大学)
- 4) 奥村知世・高島千鶴・白石史人・Akmaluddine・狩野彰宏 (2011) インドネシアジャワ島中央部に発達する縞状トラバーチンの生命地球化学, 地球惑星科学関連合同学会 (幕張メッセ)
- 5) Kano, A. (2011) Processes and textures of carbonate travertines and tufas: a potential modern analog for the ancient laminated microbial carbonates. Short Talk in Ventura Building at Petrobras (Rio, Brazil)
- 6) Okumura, T., Kano, A. (2010) Microbial compositions of travertines in Anraku hot spring, Kagoshima, Japan. 日本微生物生態学会 (筑波大学)
- 7) 奥村知世・高島千鶴・狩野彰宏 (2010) 鹿児島県安楽温泉に発達するトラバーチンの生命地球化学的特徴. 日本地質学会 (富山大学)
- 8) 奥村知世・白石史人・狩野彰宏 (2010) トラバーチン上の微生物-化学マイクロプロファイル. 地球惑星科学連合大会 (幕張メッセ)

[図書] (計1件)

- 1) Kano, A. (2011) Tufa Freshwater. In: Reitner, J. and Thiel, V. (eds.) *Encyclopedia of Geobiology*, 889-891, Springer, Berlin.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.scs.kyushu-u.ac.jp/earth/kano/hotspring.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

狩野彰宏 (KANO AKIHIRO)

九州大学・大学院比較社会文化研究院・教授
研究者番号: 60231263

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし