

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05468

研究課題名(和文) 化学合成微生物群集によるストロマトライト形成の検証

研究課題名(英文) Investigation of stromatolite formation by chemosynthetic microbes

研究代表者

奥村 知世 (Okumura, Tomoyo)

高知大学・海洋コア総合研究センター・特任助教

研究者番号：90750000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,650,000円

研究成果の概要(和文)：先カンブリア時代に多産するストロマトライトはシアノバクテリアの関与で形成されたと考えられているものの、反例も多く、その成因は完全に解明されていない。本研究では、蛇紋岩化作用に関連した湧水で発達する深海のチムニーにおいて、化学合成微生物の関与の下ストロマトライト組織が発達しうることを明らかにした。本試料から得られた堆積組織や鉱物・安定同位体組成・年代・微生物の種類や分布様式といった生物地球化学的データセットは、ストロマトライト化石を再解釈するための指標となりうる。

研究成果の概要(英文)：Stromatolite is one of abundant fossil record in Precambrian Era, and thought to be formed by association with cyanobacteria. However its formation processes are still unknown because of some counter-examples. This study showed that stromatolitic textures were formed within deep-sea chimneys by association with chemosynthetic microbes. Biogeochemical dataset such as sedimentary texture, mineralogy, stable isotope characteristics, chronology, and microbial composition and distributions could be useful information for reinterpretation of fossil stromatolites.

研究分野：地球生命科学

キーワード：ストロマトライト シアノバクテリア 化学合成微生物 深海 蛇紋岩化作用 炭酸塩 ブルーサイト

1. 研究開始当初の背景

ストロマトライトは、ドーム状で細かい縞を持つ炭酸塩堆積物で、微生物マットの存在下で形成すると考えられている生痕化石の一種である。先カンブリア時代に普遍的に産出するため、初期生命圏の進化を連続的に記録する唯一の化石試料と言える。

現在でも浅海・湖・河川・温泉などの光の届く様々な環境で発達するストロマトライトの研究から、酸素発生型光合成を行うシアノバクテリアが優占する微生物マットの発達によって縞組織が形成されることが示されている(引用①)。シアノバクテリアの誕生は、酸素に富む地球特有の大気組成を生み出し、現在の多様な生命にあふれる地球の姿になるために最も重要な地球史イベントであり、ストロマトライトはその記録媒体であると期待される。

しかし、地質試料の中にはシアノバクテリアの関与が定かでないものが認められる。例えば、大気酸素濃度が低い 24 億年前より古い時代や(引用②)、深海で堆積した地層からもストロマトライトが報告されている(引用③)。ストロマトライトに対する現段階の知見は、「シアノバクテリアが作る表層試料」のみから集められているため、地質試料の中から「シアノバクテリアが関与しない試料」を見分けることも、成因を解釈することもできない。

2. 研究の目的

本研究では、シアノバクテリアのいない深海のストロマトライトの成因や特徴を調べる。その結果とシアノバクテリアが作った試料とを比較することで、太古試料の形成にシアノバクテリアが関与したか否かを判定可能にすることを目的とした。

3. 研究の方法

南部マリアナ前弧域の水深約 5700m に位置する Shinkai Seep Field(以下 SSF)のチムニーを主な研究対象とし、チムニー内部で発達するストロマトライト組織の成因を下記の方法で検討した。

● 試料の入手

チムニー試料は、2013 から 2016 年の調査航海では採集された全 18 試料を対象とした。2015 年と 2016 年の調査では、約 1 年間に成長したチムニーを確認した。さらに、湧出速度が極めて遅く、1 日の潜行調査では採集できなかった湧水については、2015 年に捕集用容器を現場に設置し、約 1 年後の 2016 年の調査で容器内にたまった流体の捕集に成功した。

● チムニーの各種分析

採集したチムニー及び流体は、下記の方法で分析を行った

(1) 湧水の溶存成分分析

採集に成功した流体は、船上にて pH、アルカリ度等の分析とガス成分を抽出したのち、陸上で溶存成分を分析した。

(2) 堆積組織の観察

ホルマリン固定したチムニー試料を脱水した後樹脂で埋包し、微生物マットとともに薄片を作成し組織観察をおこなった。偏光顕微鏡観察では鉱物種の同定が困難な微細結晶については、レーザーラマン顕微鏡にて、鉱物同定をおこなった。3 次元的構造は走査型電子顕微鏡で観察し、付属の EDS で元素の定量分析をおこなった。

(3) 鉱物同定

チムニーを構成する主要鉱物を X 線回折装置による分析により同定した。

(4) 年代測定

チムニーの年代は、U-Th 法及び¹⁴C 法を用いて決定を試みた。U-Th 法は台湾国立大学との共同研究で、¹⁴C 法は企業に委託して分析した。

(5) 微生物の群衆解析

真正細菌・古細菌をターゲットとした 16S rRNA 遺伝子のアンプリコンシーケンスにより、チムニーに分布する微生物群衆組成を明らかにした。解析には、肉眼で確認できるチムニーの組織や色のバリエーションをカバーするようにサブサンプリングした試料を用いた。

(6) 安定同位体比

チムニーの有機・無機炭素同位体比は元素分析計を接続した質量分析計にて分析した。また、チムニーに吸着したメタンの炭素同位体比も、適宜抽出等の前処理をおこなった後、質量分析計にて分析した。

4. 研究成果

● 深海チムニーの発達過程

SSF のチムニーは主にブルーサイトとカルサイト、アラゴナイトから構成され、PHREEQC ver. 3 を用いて周辺海水に対する飽和度を計算したところ、全ての鉱物が未飽和であった。2016 年の調査で採集に成功した流体は、pH9.89 を示した(発表論文①)。5700m という大水深でこのような鉱物組成のチムニーが存続するのは、アルカリ性流体が断続的に供給されているためであると言える。

SSF のチムニーは鉱物組成・堆積組織・外観より 3 つのタイプに分類された(発表論文

②).

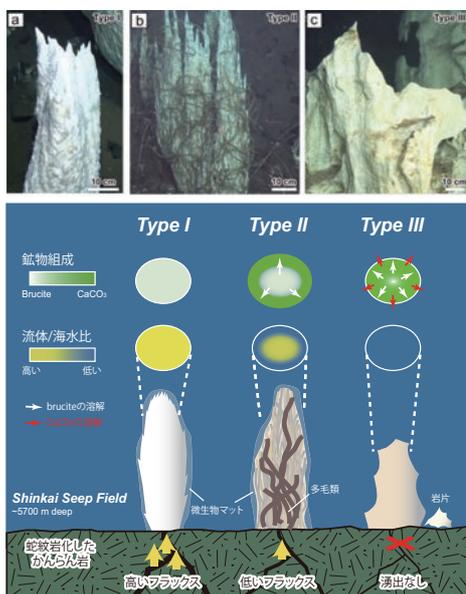
タイプ1 : 白色を呈し、とげとげとした結晶が表面に露出し、白色～灰色の微生物マットを伴う。ブルーサイトが卓越し、カルサイトやアラゴナイトも少量含まれる。内部には菱形自形のカルサイトとブルーサイトの微細結晶が集まった直径数100 μm のチューブ状構造が観察された。

タイプ2 : くすんだ茶色を呈し、チューブ状構造が束のように集まった構造をとり、灰色の微生物マットと多毛類のツノツバサゴカイ *Phyllochaetopterus* sp.や腹足類の *Provanna* sp.が表面に多数定着していた。ブルーサイトも含まれるが、カルサイトやアラゴナイトがタイプ1よりも多く含まれる。内部は、ブルーサイトの微細結晶から構成される直径数mmのチューブ状構造と、その隙間を埋めるようにして分布するカルサイトとアラゴナイトの微細結晶が観察された。

タイプ3 : 象牙色を呈し、内側に凹んだなめらかな表面を持つ。表面には微生物マットの発達や動物の密集する様子は確認できなかった。このタイプにはブルーサイトはほとんど含まれず、アラゴナイトとカルサイトから主に構成された。内部には、数100 μm オーダーのアラゴナイト針状結晶とカルサイトの微細結晶が観察された。

2015年の調査では、2014年の調査で採集したタイプ2のチムニー試料の採集跡から新たにタイプ1のチムニーが成長している様子が確認できた。このことは、チムニータイプの違いは流水の化学組成を反映しているのではなく、湧水流量の大小が異なる事で生じたと考えられる。一方、タイプ3の組織は、タイプ1やタイプ2の組織を不整合の関係で切るように、チムニーの外側表面に分布していた。このことから、タイプ3は、湧水の供給が止まった後、チムニーが溶解していく段階にできる構造であると考えされる。

以上の観察結果から、下図のようなチムニー形成条件を推定した。

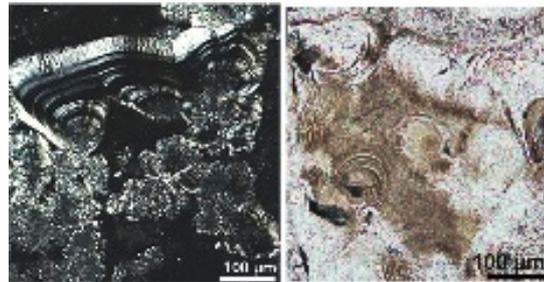


↑チムニーの写真(上)と形成条件(下)

●深海チムニーのストロマトライト組織

ストロマトライト組織はタイプ1とタイプ2で確認され、タイプ1よりもタイプ2で卓越していた。チムニー内のストロマトライト組織は、微細結晶と有機物から構成される1~5 μm ほどのラミナから構成され、幅100 μm 前後、高さ数100 μm のドーム状から柱状の形状をとっていた(下図; 発表論文②)。また、その組織は、1 cm^3 以下の範囲で密集し、かつチムニーの内部に散在して発達していた。一方、SEM-EDSによる観察と元素同定では、これらのストロマトライト組織は、ブルーサイトの微細結晶から構成されていることを示した。

以上の結果から、SSFのチムニー内において、アルカリ性流体が豊富に存在する局所的な閉鎖環境でストロマトライト組織が発達することが明らかとなった。確認されたストロマトライト組織は、コロイド状粒子がランダムウォークしながら沈降することで形成される様子を実験と数値シミュレーションで再現されたものと共通しており(引用④)、同様の条件がチムニー内で成立してできた可能性が高い。



↑SSFチムニー内のストロマトライト組織の偏光顕微鏡写真(左)と透過光顕微鏡写真(右)

●深海チムニーの年代

U-Th法によるチムニーの年代測定の結果、タイプ1からはmodernから15000yrBP*、タイプ2からは1800yrBP*から21000yrBP*の年代値が得られた。また、近接した部位の年代値が数1000年の幅を持つことから、チムニーの成長は、沈殿と溶解を繰り返しながら数万年のオーダーでゆっくりと進行することが明らかとなった。

*yrBP: 1950年より遡った年数

●深海チムニーの微生物群衆組成

チムニーに分布する微生物群衆組成を調べた結果、タイプ1とタイプ2ともに古細菌は卓越しておらず、Bacteroidetes, α -Proteobacteria, γ -Proteobacteria, Firmicutes, Chroloflexiが主要なグループであった。ストロマトライト組織が多く認められたタイプ2のチムニー内では、特に α -Proteobacteria, γ -Proteobacteria, Firmicutesに属するメタン栄養とメチル栄養のグループが多く認められた。SSFの湧水は、蛇紋岩化作用に関連したアルカリ性流体

で、同システムの流体中にはメタンをはじめとする炭化水素が豊富に含まれることが知られている(引用⑤)。SSFのチムニー内で発達するストロマトライト組織は、炭化水素に富むアルカリ性流体が豊富に存在する環境で、メタン栄養やメチル栄養の微生物が関与してできた可能性がある。

●深海チムニーの安定同位体組成

チムニーの有機炭素同位体比は、-14‰から-36‰であった。チムニーに吸着されたメタンの炭素同位体比は、-9‰から-22‰であったことから(発表論文①)、メタン酸化の他に硫酸化細菌などによる炭素固定が生じていると解釈できる。また、チムニーの炭酸塩の炭素同位体比は、海水の値を反映していると考えられる。0‰付近から、最大で+24‰までの幅広い値を示した。この高い炭素同位体比は、閉鎖環境において、微生物による炭素固定により軽い炭素が選択的に消費された後に沈殿した結果であると解釈できる。

これまでに、メタン湧水域で発達する炭酸塩ノジュール(引用⑥)や、光の届かない廃棄物埋立処分場の排水パイプライン中で沈殿した炭酸塩クラスト(引用⑦)といった光の届かない環境においてもストロマトライト組織が発達することは報告されていたものの、複数回のサンプリング調査に基づく詳しい成因までは調べられていなかった。5700mという大水深でゆっくりと染み出すアルカリ性の流体に支えられたチムニーの成長は、特異的な環境ではあるものの、サブミクロンオーダーのストロマトライト組織が局所的に発達すること、無機・有機炭素同位体比が幅広い値をとることは、このシステムにおける特徴であると考えられる。本研究の成果は、深海環境で発達するストロマトライト組織の形成過程に関する初の生物地球化学的総合データセットといえる。

【引用文献】

- ① Grotzinger, J.P., Knoll, A.H., *Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks?* (1999) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 27, 313-358.
- ② Bosak, T., Knoll, A.H., Petroff, A.P. *The meaning of stromatolites.* (2013) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 41, 21-44.
- ③ Cavalazzi, B., Barbieri, R., Ori, G.G. *Chemosynthetic microbialites in the Devonian carbonate mounds of Hamar Laghdad (Anti-Atlas, Morocco).* (2007) *Sedimentary Geology*, 200, 73-88.
- ④ McLoughlin, N., Wilson, L.A., Brasier,

M.D. (2008) Growth of synthetic stromatolites and wrinkle structures in the absence of microbes -implications for the early fossil record. *Geobiology*, 6, 95-105.

- ⑤ Kelley, D. S. et al. An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N. *Nature*, 412, 145-149.
- ⑥ Greinert, J., Bohrmann, G., Elvert, M. (2002) Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crusts: result of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4,850 m water depth. *Int. J. Earth Sci.* 91: 698-711.
- ⑦ Maliva, R.G., Missimer, T.M., Leo, K.C., Statom RA, Dupraz, C., Lynn, M., Dickson, J.A.D. (2000) Unusual calcite stromatolites and pisoids from a landfill leachate collection system. *Geology*, 28: 931-934.

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 2件)

- ① Onishi, Y., Yamanaka, T., Okumura, T., Kawagucci, S., Watanabe, H., Ohara, Y. Evaluation of nutrient and energy sources of the deepest known serpentinite-hosted ecosystem using stable carbon, nitrogen, and sulfur isotopes. *PLOS One*, 受理済み, (査読有)
- ② Okumura, T., Ohara, Y., Stern, R. J., Yamanaka, T., Onishi, Y., Watanabe, H., Chen, C., Bloomer, S. H., Pujana, I., Sakai, S., Ishii, T., Takai, K. (2016) Brucite chimney formation and carbonate alteration at the Shinkai Seep Field, a serpentinite-hosted vent system in the southern Mariana forearc. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 17, 3775-3796, doi:10.1002/2016GC006449. (査読有)

[学会発表] (計 10件)

- ① Okumura, T., Shen, C-C., Lone, M. A., Yu, T-L., Kano, A., Amekawa, S., Mori, T., Ohara, Y. ²³⁰Th ages of brucite chimneys at the Shinkai Seep Field, southern Mariana forearc. 日本地球惑星科学関連合 2018 年大会 (千葉) 2018 年 5 月

- ② **奥村知世**・高井研・平井美穂・布浦拓郎・高木喜弘・砂村倫成・小原泰彦, しんかい湧水域で発達するチムニーの微生物群衆組成とその多様性. InterRedge-Japan 研究集会, (千葉) 2017年11月,
- ③ 小原泰彦・**奥村知世**・Stern, R. J.・大西雄二・大家翔馬・渡部裕美・山中寿朗・藤井昌和・Martinez, F.・石井輝秋・道林克禎・高井研・Science party for the Shinkai Seep expeditions, Expeditions to the world's deepest serpentinite-hosted seep system, the Shinkai Seep Fields, the southern Mariana forearc. 日本地球惑星科学関連合 2017 年大会 (千葉) 2017 年 5 月
- ④ **奥村知世**・平井美穂・布浦拓郎・高井研・小原泰彦, Microbial community in brucite-carbonate chimneys discovered in the Shinkai Seep Field, the deepest serpentinite-hosted vent system in the Southern Mariana Forearc. 日本地球惑星科学関連合 2017 年大会 (千葉) 2017 年 5 月
- ⑤ **Okumura, T.**, Ohara, Y., Stern, R. J., Yamanaka, T., Onishi, Y., Watanabe, H., Chen, C., Bloomer, S. H., Pujana, I., Sakai, S., Ishii, T., Takai, K. Brucite chimney formation and carbonate alteration at the Shinkai Seep Field, a serpentinite-hosted vent system in the Southern Mariana Forearc. AGU Fall meeting 2016 (San Francisco, U.S.A.) 2016 年 12 月
- ⑥ Ohara, Y., **Okumura, T.**, Stern, R. J., Fujii, M., Kasaya, T., Martinez, F., Michibayashi, K., Comprehensive understanding of the Shinkai Seep Field in the Southern Mariana Forearc based on high-resolution bathymetry data. AGU Fall meeting 2016 (San Francisco, U.S.A.) 2016 年 12 月
- ⑦ **Okumura, T.**, Takai, K., Hirai, M., Nunoura, T., Ohara, Y. Brucite-carbonate chimneys discovered in the Shinkai Seep Field, a serpentinite-hosted vent system in the southern Mariana forearc. 5th International Workshop on Deep-Sea Microbiology, (Kyoto, Japan) 2016 年 9 月
- ⑧ **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. 35th International geological congress (Cape Town, South Africa) 2016 年 8 月

- ⑨ **奥村知世**[○], 化学合成生態系で発達するマイクロバイアライト. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (千葉) 2016 年 5 月, 招待講演
- ⑩ **奥村知世**[○]・石井輝秋・小原泰彦・高井研・YK13-08 及び YK14-13 乗船研究者, 南部マリアナ前弧しんかいシープで発達するチムニーの鉱物組成と堆積組織. 日本地質学会第 122 年学術大会 (長野) 2015 年 9 月

[図書] (計 0 件)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥村知世 (OKUMURA, Tomoyo)

高知大学海洋コア総合研究センター・特任助教

研究者番号: 90750000