

## 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 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740331

研究課題名（和文） 太古の地球環境復元を目指した温泉堆積物の地球生命科学研究

研究課題名（英文） Geomicrobiological studies of hot spring deposits for ancient earth environment reconstruction.

研究代表者

高島 千鶴 (TAKASHIMA CHIZURU)

佐賀大学・文化教育学部・准教授

研究者番号：10568348

研究成果の概要（和文）：

本研究では、炭酸水素塩泉、硫黄泉および含マンガン鉱泉で生じる堆積物に焦点を当て、水—鉱物—微生物相互作用についての研究を行った。炭酸塩堆積物（トラバーチン）については流速と堆積物組織と微生物の分布との関係について明らかにした。鉄酸化物については微小電極を用いて堆積物表面でシアノバクテリアの代謝活動を確認し、硫黄泉では硫黄酸化細菌の代謝による水質変化を認識した。さらに、鉱泉中のマンガンの起源を特定し、そこで生じるマンガン酸化物の沈殿に微生物の関与を認定した。

研究成果の概要（英文）：

This study focuses on water-mineral-bacteria interaction on carbonate-rich hot spring, sulfur-rich hot spring and Mn-containing cold spring. First, relationship among flow rate, texture and bacterial distribution was cleared in carbonate sediment (travertine). Cyanobacterial metabolic activities on iron-rich deposit surface were observed with microelectrode profiles. In sulfur-rich hot spring, metabolism of sulfur oxidizing bacteria changed water chemical properties. Mn oxides in cold spring were precipitated by iron oxidizing bacteria.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：地球生命科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球史

キーワード：トラバーチン・鉄沈殿物・マンガン酸化物・微生物・縞状鉄鉱層

## 1. 研究開始当初の背景

地球が誕生してから最初の約 40 億年間は先カンブリア紀と呼ばれ、生命が誕生し、地球環境の劇的な変化をもたらされた時代である。豊かな生態系が成立するまでに、生命

は海洋環境の制御のもとで進化し、生命の代謝は大気—海洋環境に影響を与えてきた。したがって、生命の起源と進化は先カンブリア紀の環境情報と合わせて考える必要がある。

先カンブリア紀の大気海洋環境情報は、海

水から直接沈殿した成分を含む堆積岩に保存されていると期待できる。特に、縞状組織を持つ縞状鉄鉱層(主に 28-18 億年前に堆積)と炭酸塩鉱物と微生物からなるストロマトライト(主に 25-5 億年前に堆積)が重要である。しかし、数 10 億年間の続成・変成作用により、成分や堆積組織は変質しているため、初生的な情報を得ることは困難である。

そこで、縞状鉄鉱層とストロマトライトに類似したモダンアナログの研究が重要になってくる。

## 2. 研究の目的

本研究では、現世の温泉堆積物をモダンアナログとしてとらえ、最終的には先カンブリア紀環境の復元の手がかりを得ることを目的とする。

日本は火山大国であり、それに付随して温泉も多く湧出している。ミネラル成分が豊富な温泉水から炭酸塩や鉄質沈殿物が析出する。これらの温泉堆積物中には、縞状組織を持つものがある。これらを題材として、地球生命科学的プロセス(水—鉱物—微生物相互作用)を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、温泉成炭酸塩堆積物、鉄質沈殿物及び冷泉成マンガン沈殿物に焦点を当てた。

### (1) 炭酸塩堆積物

・調査地域:インドネシア・ジャワ島 Pancuran Pitu.

・分析方法:流速測定・水質分析・鉱物同定・組織観察・遺伝子解析

主に流速、堆積組織、微生物の空間分布の関係について研究を行った。

### (2) 鉄質沈殿物

・調査地域:秋田県奥八九郎温泉

・分析方法:微小電極分析

これまでの研究において、鉄酸化細菌とシアノバクテリアの共生関係により鉄酸化物が沈殿していることが判明していたため、微小電極によりこれらの代謝効果を定量的に見積もった。

### (3) 硫黄沈殿物

・調査地域:鹿児島県硫黄谷温泉

・分析方法:水質分析・鉱物同定・組織観察  
新規調査地域であり、基礎的な分析を中心に行い、水—堆積物—微生物の関連性を示した。

### (4) マンガン沈殿物

・調査地域:佐賀県平松鉱泉

・分析方法:水質分析・鉱物同定・組織観察・遺伝子解析・水質連続観測

新規調査地域であり、基礎的な水質分析を中

心に行い、鉱泉の特徴を示した。また、微生物学的手法によりマンガン酸化物の成因を明らかにした。さらに、一年間の連続観測により、高濃度マンガンの起源を考察した。

## 4. 研究成果

### (1) 炭酸塩堆積物

インドネシア・ジャワ島 Pancurn Pitu の炭酸塩主体温泉成堆積物トラバーチンについて、水流、堆積組織とシアノバクテリアの分布の関連性を明らかにし、先カンブリア紀ストロマトライトのアナログの可能性を指摘した。

- ① 流速が速い場所(~200 cm/s)では、密度の高いトラバーチン(密度 80 %程度)が堆積し、厚い結晶層と数枚の薄い結晶層との縞状組織が発達している。シアノバクテリアは堆積物表面にわずかに存在する程度である。
- ② 流速がやや早い場所(~70 cm/s)では、トラバーチンの密度は 60 %であり、結晶層と孔隙質層との縞状組織を形成している。シアノバクテリアは堆積物表面および結晶層の直下に分布している。
- ③ 流速が遅い場所(~10 cm/s)では、トラバーチンの密度は 30 %程度まで低下し、孔隙質である。そのため、シアノバクテリアは堆積物表面や孔隙質部分に多く存在している。しかし、微結晶で構成される縞状組織が見られる。
- ④ 流速が非常に遅い場所(<5 cm/s)では、シアノバクテリアが優勢な微生物マットが発達している。微生物マットの中に微結晶が存在し、縞状組織を形成している。
- ⑤ 以上をまとめると、流速が速い場所では、炭酸塩結晶成長が卓越し、シアノバクテリアは強い流速により流されてしまいバイオマットを形成できない。反対に流速が遅い場合、バイオマットが発達する。バイオマットはゲル状で多糖類を多く含み、その多糖類が炭酸塩鉱物の核形成場を提供することで微結晶が形成される(図 1)。

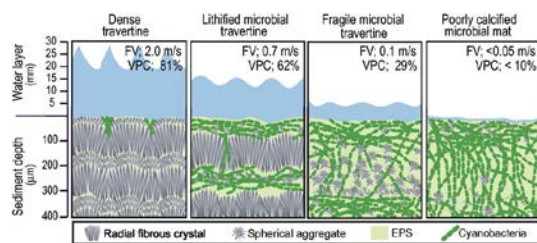


図 1. 水流に対応したトラバーチンの堆積組織とシアノバクテリアの分布

- ⑥ 流速の速い場所で形成されるトラバーチンに見られる縞状組織は、長湯温泉で確認されたトラバーチンの日輪構造と結晶の形状やサイズが類似しており、日周期

を示している可能性が高い。おそらく、シアノバクテリアの代謝活動を反映したものと考えられる。昼間はシアノバクテリアの光合成により生成される有機物やマットが炭酸塩の結晶成長を阻害する。一方、夜はシアノバクテリアの活動は抑制され、結晶が十分に発達する。

- ⑦ 先カンブリア紀前期～中期のストロマトライトは結晶層と細粒層との縞状組織を持ち、密度の高いトラバーチン (> 60%) と非常に類似している。さらに、本研究で流速に対応した組織を示すことが明らかになり、古代ストロマトライトの組織と比較することにより、当時の堆積環境や微生物の分布を復元することが可能になる。

### (2) 鉄質沈殿物

秋田県奥奥八九郎温泉の鉄質沈殿物は鉄酸化物と炭酸カルシウムとの互層を示す。微小電極を用いて、pH、溶存酸素濃度、 $Ca^{2+}$ 濃度を測定し、微生物代謝効果を見積もった。しかし、現地での微小電極実験は改良の余地があるため、予察的な結果を示す。

- ① 昼夜において明瞭な変化が見られた。昼間は堆積物表面において、pHの上昇、溶存酸素量の増加がみられた。これはシアノバクテリアの光合成によるものである。それに伴って、わずかに $Ca^{2+}$ 濃度が低下している。一方、夜はpHと $Ca^{2+}$ 濃度は明瞭な変化が見られなかった。溶存酸素濃度のみ堆積物表でわずかに減少していた。
- ② 以上の結果から、堆積物表面でシアノバクテリアの代謝活動による変化起きていることは確認できた。しかし、鉄と炭酸カルシウムが昼と夜、どちらに形成されるかは不明のままである。昼間に $Ca^{2+}$ 濃度のわずかな減少がみられるが、増加した溶存酸素により鉄酸化物が沈殿している可能性もある。また、夜の溶存酸素濃度減少は呼吸によるものと、鉄との酸化反応を反映しているかもしれない。
- ③ 今後は $Fe^{2+}$ 濃度の微小電極プロファイルを取り、縞状組織における微生物の代謝影響を定量的に見積もり、縞状組織の周期を明らかにする予定である。

### (3) 硫黄沈殿物

鹿児島県霧島市の硫黄谷温泉は硫酸塩泉に分類される。上流では白色の微生物マット、下流では赤褐色の鉄酸化物が沈殿している。今回の調査では上流に焦点を当て、水質変化と微生物代謝との関連性について検討した。

- ① 源泉の水温は87℃と高温である。溶存酸素は含んでおらず、pHは7.15を示す。源泉は無酸素で中性環境である。
- ② 約5m流下するとpHは6.21、約10m

で4.14まで急激に低下し、酸性環境になる。その後も緩やかにpHは低下する(図2)。

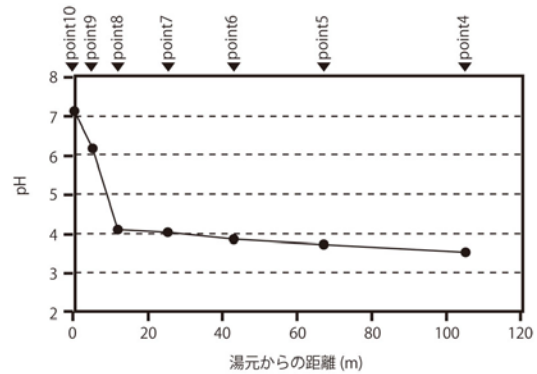


図2. 流路におけるpHの変化

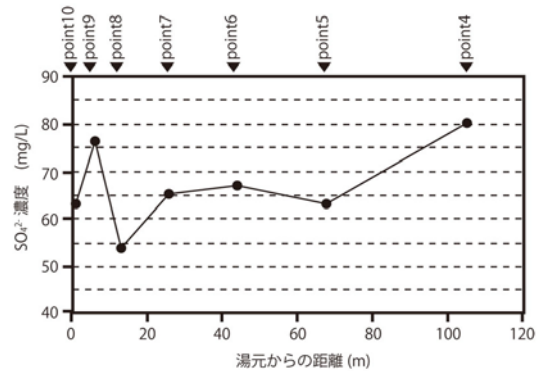


図3. 流路における硫酸濃度の変化

- ③ 硫酸は源泉で63.4 mg/L含まれており、約5m下流で増加し、約10m下流で一端減少するものの、下流いくに従って増加する傾向がある(図3)。
- ④ 源泉付近に分布する白色の微生物マットは硫黄芝と呼ばれ、形態観察および蛍光顕微鏡により観察した結果、硫黄酸化細菌と硫黄粒子で構成されることが判明した(図4)。

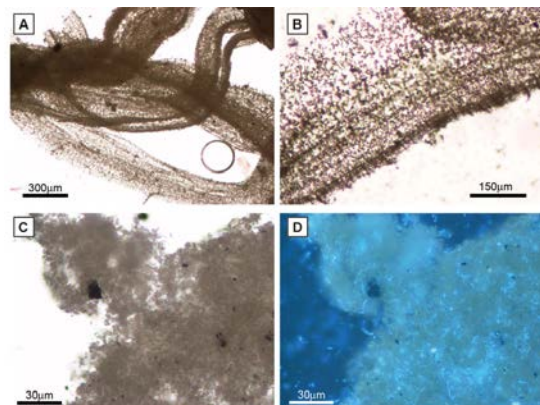


図4. A:硫黄芝は幅300~500ミクロンの繊維状で構成されている。B:繊維状物質には数µmサイズの硫黄粒子が付着している。C:光学顕微鏡では微生物組織は観察されない。D:Cの蛍光顕微鏡写真で、青い蛍光はDAPI染色液による核酸の蛍光を示し、フィラメント状に発光している。



- ⑤ 硫黄酸化細菌は嫌氣的～微好氣的環境に生息し、硫黄谷温泉の上流の環境は硫黄酸化細菌に適している。硫黄酸化細菌は硫化水素などの無機硫黄化合物を酸素で酸化させ、エネルギーを得ている。その酸化過程で、硫酸イオンと水素イオンが生成される。硫黄谷温泉では、硫黄酸化細菌の代謝により、pHは下流に行くほど低下し、反対に硫酸濃度が上昇していると考えられる。
- ⑥ 今後は、下流に堆積している鉄酸化物に焦点を当て、研究を進めていく予定である。これまで重点的に研究してきた炭酸水素塩泉の鉄酸化物と比較し、類似点や相違点を明らかにし、縞状鉄鉱層の成因の手がかりを得る。

#### (4) マンガン酸化物

佐賀県佐賀市にある平松鉱泉に沈殿しているマンガン酸化物の成因を明らかにした。また、高濃度マンガンの起源を含めた鉱泉水の生成過程と水質の季節変化について研究を進めた。

- ① 平松鉱泉は加熱され、約 60 m 離れた平松老人福祉センターの浴槽に利用されている。貯水タンクや浴槽の水は茶色く着色し、底や淵には非常に柔らかく、濃茶～黒色を呈しているマンガン酸化物が沈殿している(図5)。このマンガン酸化物量は季節により変化する。

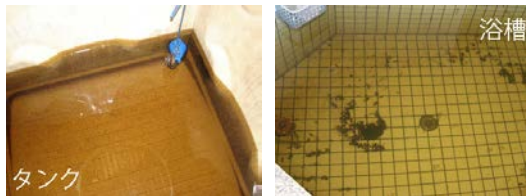


図 5. 平松鉱泉のマンガン酸化物

- ② マンガン酸化物はXRD分析により二酸化マンガンであることが判明した。光学顕微鏡で未処理のマンガン酸化物を観察すると、幅数ミクロン～幅数十ミクロンのフィラメント状の集合体であり(図6A)、フィラメントの周囲にマンガン酸化物が被覆されている(図6A, 6B)。クエン酸でマンガンを溶解すると、微生物組織が明瞭に観察された。蛍光顕微鏡下ではフィラメント状微生物の集合が確認された(図6C)。電子顕微鏡では長さ3ミクロン、幅1.5ミクロン程度の細胞が連結し、鞘を持つ微生物が観察され、蛍光顕微鏡下で観察されたものと同様であると考えられる(図6D)。このことは、マンガン酸化物の沈殿が微生物に引き起こされている可能性を示す。

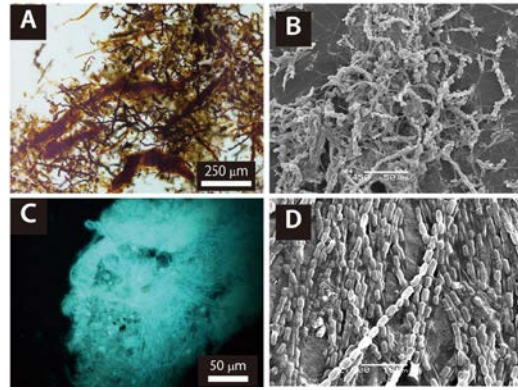


図 6. A:光学顕微鏡写真。マンガン酸化物はフィラメント状の集合体である。B:電子顕微鏡写真。Aと同様にフィラメント状であり、周囲に鉱物が付着している。C:クエン酸で溶解したサンプルの蛍光顕微鏡写真。フィラメント状の微生物が確認できた。D:クエン酸で溶解したサンプルの電子顕微鏡写真。細胞連結し、鞘を持つ微生物であることが判明した。

- ③ 微生物を特定するために、遺伝子解析を行った。その結果、鉄酸化細菌や鉄水酸化物やマンガン酸化物をフィラメントに沈着させる微生物が特定された。鉄酸化細菌はマンガンを沈殿させることが知られている。したがって、これらの微生物が代謝によりマンガン酸化物を沈殿させ、菌体が核として働いている。

表 1. 遺伝子解析の結果。赤字で示した微生物種がマンガン酸化物の沈殿に関与していると考えられる。

Phylotype (No. of clones)	Accession no.	Phylogenetic relationship Closest database match	Identity(%)	Cell
HM1-27 (1)	DQ295898	<i>Crenothrix polyspora</i> clone 6 (methane oxidizing)	γ 91	filaments with sheath
HM1-29 (1)	DQ386858	<i>Sideroxydans pallidicola</i> strain BrT (iron oxidizing)	β 96	filaments
HM2-4 (3)	CP002691	<i>Haliscobenobacter hydrossis</i> DSM 1100 B. (calcium bacteria)	99	filaments with sheath
HM1-1 (2)	HQ897926	<i>Thiothrix unzii</i> strain A1 (sulfur oxidizing)	γ 99	filaments without sheath
HM2-15 (2)	CP002355	<i>Sulfurcurvum kujiense</i> DSM 16994 (sulfur oxidizing)	ε 97	curved rods
HM1-11 (5)	AF035813	<i>Nitrospira</i> sp. (nitrite oxidizing)	N. 99	-
HM1-18 (1)	NR_029287	<i>Nitrospira moscoviensis</i> strain NSP M-1 (nitrite oxidizing)	N. 96	curved rods

- ④ 平松鉱泉は標高約 2 m に位置し、掘削深度は約 7.5 m と非常に浅く、有明粘土層とその上にある砂礫・泥を主体とする蓮池層との境界付近から汲み上げられていると考えられる。平均水温が約 19°C であり、pH は中性付近を示す。溶存成分はマグネシウム・カルシウム・ナトリウムに富み、マンガンは約 2 mg/L 含む。また、カルシウムよりマグネシウムが多いという特徴がある。
- ⑤ 鉱泉の生成過程を解明するため、約 1 年間の水質連続観測を行った。その結果、各パラメーターに明瞭な季節変化が認められ、特に 6 月から 8 月にかけての変動が大きい(図7)。源泉の水温は 1 月から 5 月にかけて安定し、6 月から 8 月にかけて上昇し、9 月以降は再び低下し、安定する。pH は弱アルカリ性で安定傾向

にあるが、7月と8月は中性付近を示した。溶存酸素濃度は1月から4月には1.5 mg/L以下と少なく、5月から8月は1.0~2.8 mg/Lと増加し、それ以降は1月から4月と同レベルまで低下する。溶存成分の変動は、Mg, Na, Cl, Mnに大きく見られ、いずれも6月から8月にかけて減少している。酸素安定同位体比は1月から5月、9月以降で-7~-6パーミルの値を示すが、6月から8月は-8.5~-7パーミルと軽くなる。

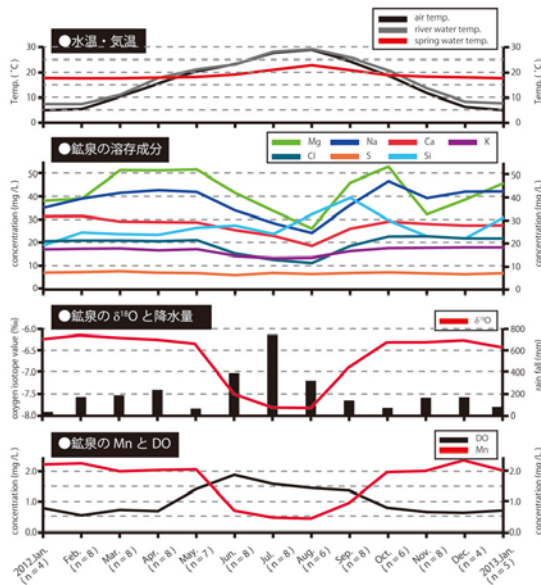


図7. 平松鉱泉の源泉の各パラメーターの季節変化

- ⑥ 平松鉱泉の源泉の深度や地質を考慮すると降水起源の水が鉱泉水を形成していると考えられるが、降水のみでは溶存成分や水温の結果を説明できない。鉱泉水の上流域に分布する脊振山系は花崗岩が主体である。花崗岩地域の地下水はカルシウムを多く含む特徴があり、マグネシウムを多く含む平松鉱泉の泉質とは異なる。さらに、水温が夏期以外は安定しており、帯水層中の水が含まれることが示唆される。鉱泉の掘削深度を考慮すると、平松鉱泉水の水を構成する帯水層は有明粘土層と考えられる。有明粘土層はモンモリロナイト・イライト・クローライトなど Na, Mg, Al, Mn などに富む粘土鉱物を含み、平松鉱泉水の溶存成分の特徴と一致する。平松鉱泉は浅い地下を流れる降水と塩類に富む有明粘土層地下水との混合であると考えられる。
- ⑦ 鉱泉水の各パラメーターの変動が大きい6月から8月は降水量が多い時期であり、有明粘土層地下水が降水により希釈されていることを反映している。夏期は降水量が多く、気温が高いため、密度の小さい降水が地下で有明粘土層の上部

を流れる。その結果、鉱泉水の水温は高くなり、溶存成分が減少したものと考えられる。一方、冬期は降水量が少なく、気温が低いため、密度の大きい降水が有明粘土層の下部を流れるため、有明粘土層地下水が上昇し、有明粘土層地下水の割合が多くなる。

- ⑧ マンガン濃度の夏期に減少する原因は降水による希釈効果と増加した溶存酸素濃度との酸化反応である。夏期には降水が浅いところを速く流下し、地下での溶存酸素の消費が抑制されるため、鉱泉水中の溶存酸素濃度が高い。しかし、マンガン酸化物は微生物により引き起こされることが判明しているため、微生物代謝の効果を考慮しなければならず、今後は沈殿物量と微生物の定量を行う必要がある。

### 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6件)

- ① Okumura, T., Takashima, C., Kano, A. (in press) Textures and processes of laminated travertines formed by unicellular cyanobacteria in Myoken hot spring, southwestern Japan. *Island Arc*. (査読有)
- ② Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Nishida, S., Kano, A. (in press) Processes forming daily lamination in a microbe-rich travertine under low flow condition at the Nagano-yu Hot Spring, Southwestern Japan. *Geomicrobiology Journal*. (査読有)
- ③ Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Akmaluddin, Kano, A. (2012) Textural transition in an aragonite travertine formed under various flow conditions at Pancuran Pitu, Central Java, Indonesia. *Sedimentary Geology*, **265-266**, pp. 195-209. (査読有)  
Doi:10.1016/j.sedgeo.2012.04.010
- ④ 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**, pp. 294-304. (査読有)  
Doi:10.1111/j.1440-1738.2011.00768.x
- ⑤ Takashima, C., Okumura, T., Nishida, S., Koike, H. and Kano, A. (2011) Microbial control to lamina formation in a travertine at Crystal Geysir, Utah.

In: Reitner, J., Queric, N.-V. and Arp, G. (eds.) Advances in Stromatolite Geobiology. *Lecture Notes in Earth Science*, **131**, pp.123-133. (査読有)

- ⑥ Takashima, C., Okumura, T., Hori, M. and Kano, A. (2010) Geochemical characteristics of carbonate hot-springs in Japan. *Bulletin of the Graduate School of Social and Cultural Studies, Kyushu University*, **16**, pp.67-74. (査読有)  
<http://hdl.handle.net/2324/17112>

〔学会発表〕(計6件)

- ① 高島千鶴・東 佑香・森 大器・奥村知世, 平松鉱泉に見られるマンガン沈澱物の成因. 地球惑星科学関連合同学会(幕張メッセ) 2012年5月20-25日
- ② 狩野彰宏・高島千鶴・白石史人, ブラジル・バーミア州のキオゲニアン炭酸塩岩中のスロンボライトと有殻生物. 地球惑星科学関連合同学会(幕張メッセ) 2012年5月20-25日
- ③ 奥村知世・高島千鶴・白石史人・狩野彰宏, 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) 2012年2月11日
- ④ Okumura, T., Takashima, C., Shiraiishi, F., Kano, A., Variation of the microbial processes forming lamination in aragonite travertines. International Symposium on Environmental Biogeochemistry 2011 (Istanbul, Turkey). 2011年9月27-30日
- ⑤ 奥村知世・高島千鶴・白石史人・Akmaluddine・狩野彰宏, 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) 2011年5月22-27日
- ⑥ 奥村知世・高島千鶴・狩野彰宏, 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) 2010年9月18-20日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高島 千鶴 (TAKASHIMA CHIZURU)  
佐賀大学・文化教育学部・准教授  
研究者番号: 10568348