

論 文

微生物が促進する砂粒の膠結  
— 薩摩硫黄島にみられるバイオテラス —

四ヶ浦弘\*・田崎和江\*\*

\*金沢大学大学院自然科学研究科

\*\*金沢大学理学部

\*\*\*〒920-1192 石川県金沢市角間町

**Cementations of Sand Grains are Accelerated by Microbes**  
— Formation of bio-terrace at Satsuma Iwo-Jima Island —

**Hiroshi SHIKAURA\* and Kazue TAZAKI\*\***

\*Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University  
Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192 Japan

\*\*Faculty of Science, Department of Earth Sciences Kanazawa University  
Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192 Japan

**Abstract**

Satsuma Iwo-Jima Island (SIJ) is a small volcanic island located on the north-westernmost margin of the Kikai caldera. The acidic mineral-rich hot springs cause various tonal changes of seawater in and around of this island. The red sea water depended on high density of  $\text{Fe}^{2+}$  (191ppm) can be seen at Nagahama Port on a large scale. At this port, microbes which metabolize  $\text{Fe}^{2+}$ , make microbial mats and typical terrace-like sediment (bio-terrace). Extra cellular substance secreted by microbes adhere sand grains, and after that this bio-terrace is formed by cementation. The build-up of bio-terrace is very fast and piled up over 1 meter in just 3 months. SIJ is a good example where we can research the developing process of ancient stromatolite.

**Key words:** Microbes, sand grains, adhesion, cementation, bio-terrace, hot springs,  $\text{Fe}^{2+}$ .

**1. はじめに**

地球の水圏のあらゆる環境中には微生物が生息し、様々な堆積構造の構築に貢献している。その代表的なものにストロマトライトがある。先カンブリア時代に大規模に形成されたストロマトライ

トは、シアノバクテリアが自ら分泌する粘着物質に微細粒子を取り込み、テラス状、マッシュルーム状等の堆積構造を構築した<sup>1,2)</sup>。現在も形成されつつあるストロマトライトとしては、西オーストラリア、ハメリンプールのものが知られている。一方、日本においては、主として温泉の湧出する

環境で、ストロマトライト様堆積物が報告されている<sup>3,4)</sup>。

本研究において、海中より湧出する変色海水で知られる鹿児島県薩摩硫黄島において、現世ストロマトライトともいべきバイオテラスの形成が認められたので報告する。現在、薩摩硫黄島長浜港内に2ヶ所のバイオテラスの形成が確認されている<sup>5)</sup>が、このバイオテラスの形成速度は速く、形成開始からわずか3ヶ月で幅12 m×奥行15 m×高さ1 mにまで成長している。一方、ハメリンプールのストロマトライトの形成速度は0.5 mm/yearと緩慢である<sup>6)</sup>。なお、本研究では長浜港にみられる2ヶ所のバイオテラスが、なぜこのように短期間で砂粒を膠結し、テラスを構築するのかを検討した。その結果、微生物の存在が砂粒の膠結を促進していることが各種の電子顕微鏡観察から明らかになったので報告する。

## 2. 薩摩硫黄島とテラス形成地点の特徴

薩摩硫黄島はトカラ列島の最北端に位置する火山島であり、鬼界カルデラの北西端に位置し、島内をカルデラ壁が走る (Fig.1 点線)。島内の硫黄岳、稲村岳は鬼界カルデラの中央火口丘の一つとされ<sup>7)</sup>、硫黄岳は現在も最高877°Cの火山ガスを噴出しているが、稲村岳は現在は活動を停止している。この島の各所から多くの温泉が湧出するが、カルデラ壁の内外で泉質は大きく異なる<sup>8)</sup>。カルデラ壁内には火山ガスが天水と混合し、岩石から陽イオンを溶脱した強酸性泉が湧出している。なお、硫黄岳の岩石は上位は溶岩、下位は海面下まで続く凝灰角礫岩からなる<sup>7)</sup>。また島周辺の海域では湧出する酸性泉と海水の混合により懸濁物質が生じ、その組成により、白濁または赤濁した海水が広範囲に見られる<sup>9)</sup>。長浜港は、島内唯一の砂浜海岸であり、その砂は、硫黄岳からの降下火山灰及びその2次堆積物から供給される<sup>7)</sup>。長浜港内は高濃度の遊離CO<sub>2</sub>、Fe<sup>2+</sup>、珪酸イオンに富む弱酸性の温泉水が湧出し、このFe<sup>2+</sup>イオンの酸化により海水は赤褐色に変色している (Fig.2 A)。この変色海水の性質に対応して、様々な色調をもつバイオマットが形成されている<sup>5,10)</sup>。薩摩硫黄島の調査は1997年、1998年、1999年の

いずれも6月に実施した。バイオテラスは長浜港防波堤の内側のもの (Fig.2 B, 以下旧テラスと

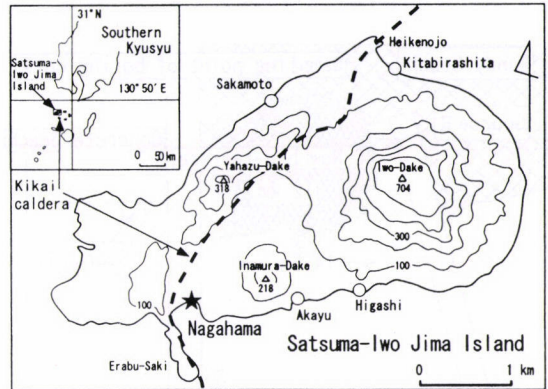


Fig.1 Location map of Satsuma Iwo-Jima Island, Japan.

- : Kikai caldera rim.
- ★: Sampling point.

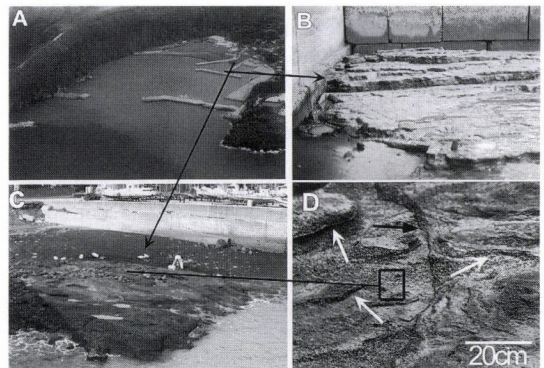


Fig.2 View of Nagahama Port.

- A: The hot spring water in and around Nagahama Port reacts with seawater to produce ferric deposit, which causes reddish brown turbidity. The arrows from A to B, C show the location of bio-terrace.
- B: Occurrence of old bio-terrace developing inside the breakwaters. Now this bio-terrace was disappeared by dredge.
- C: Occurrence of new bio-terrace developing after dredge of sandy beach. The arrow from C to D shows sampling point of boring core.
- D: Boring point on the bio-terrace.
- : Sampling point of boring core.
- : Hot spring water exudes from the crack of this sediment.
- ⇨: Biomats and layered structure are observed on the surface of bio-terrace.

称する)と長浜港の砂浜のもの (Fig.2 C, 以下新テラスと称する) の2ヶ所で認められた。Fig.2 D は本研究の分析試料を採取した場所を示

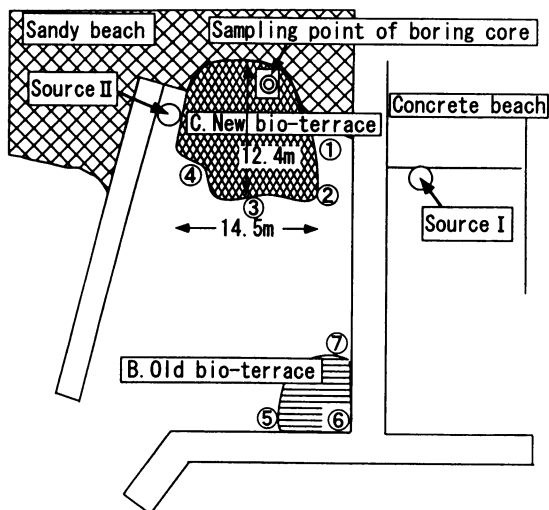


Fig.3 Schematic diagram of new and old bio-terraces at Nagahama Port.

◎: Sampling point of boring core.

①~④: Measuring points of water chemistry around new bio-terrace in June 1999.

⑤~⑦: Measuring points of water chemistry around old bio-terrace in June 1997.

Source I, II: The sampling points of hot spring water.

Table 1 Physical characteristic sea water around new and old bio-terraces at Nagahama Port. Low Eh around bio-terrace suggest formation of reducing condition inside bio-terrace.

	pH	EC (mS/cm)	Eh (mV)	wt (°C)
Nagahama Source I	5.5	15.6	69.0	58.0
Nagahama Source II	5.3	3.7	172.0	35.7
Sea water around new bio-terrace				
①	6.0	44.0	6.0	28.5
②	6.5	43.0	14.0	27.9
③	6.6	43.0	20.0	27.1
④	6.4	42.0	23.0	27.0
Sea water around old bio-terrace				
⑤	7.0	48.4	-54.0	28.3
⑥	7.0	48.6	-45.0	28.1
⑦	7.1	48.6	-57.0	28.1

す。長浜旧テラスは1998年3月に浚渫され、現在は存在しない。この浚渫にともなって新テラス形成地点の砂浜も掘削が行われた。新テラスの形成はこの時から開始され、1998年6月には上述の規模に成長した (Fig.3)。

### 3. 試料および実験方法

#### 3.1. 水質測定

薩摩硫黄島長浜港において、バイオテラス形成地点の赤色海水の水質を測定した。pH, Eh (酸化還元電位), EC (電気伝導度), DO (溶存酸素量) をそれぞれ各電極 (堀場 D-12, D-13, ES-12, OM-14) を用いて測定した。また、長浜港より湧出する温泉水について噴出口に径 7 mm, 長さ 2 m の採水用チューブを挿入し、手動ポンプを用いて源泉近くを採水した。採取した温泉水および長浜港海水は、メンブレンフィルター (0.2 μm) を用いて現地でろ過し、誘導結合プラズマ源質量分析計 (ICP-MS: Hewlett Packard 製 4500 series) を用いて分析を行った。試料は適時 1 mol/l HNO<sub>3</sub> 溶液で希釈し、多元素標準溶液 (Spex 製, XSTC-1, -8, and -13) を用いて 1, 10, 100 μg/m<sup>3</sup> の濃度で測定した。

#### 3.2. ボーリングコアの採取およびバイオテラスの観察と分析

長浜港の新バイオテラスをボーリングし (Fig.3), 径 11 cm のコアを採取した (Fig.4)。コアの採取はテラス形成開始から 1 年 3 ヶ月が経過した 1999 年 6 月である。採取したコアは表面, 上部, 中部, 下部 (Fig.4 A, B, C, D) にわけて観察と分析を行った。また, テラス表面に形成されたバイオマット (Fig.4 A) について, 落射蛍光・微分干渉顕微鏡 (ニコン製, OPTIPHOT/LABOPHOT-2: 落射蛍光装置 EFD-3 および透過型微分干渉装置 NTF-2A) を用いて観察を行った。観察の際に DAPI (4,6-diamidino-2-phenylindole) 染色を行い, フィルター (UV-1A) を通して観察して微生物の存在を確認した。さらにテラス表面にみられる微生物について, 透過型電子顕微鏡 (TEM: 日本電子製, JSM-2000EX) を用いて加速電圧 200 kV で観察するとともに,



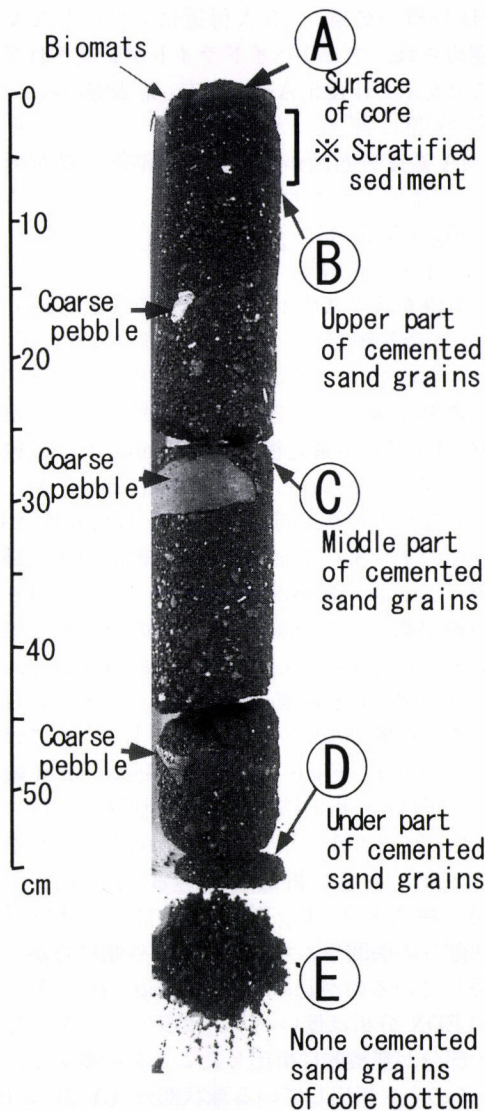


Fig.4 The boring core sampled from new bio-terrace in Fig.3. The boring core (55 cm in length) was piled up in about 3 months. The layered structure is observed on the upper part of the boring core. The under part of this boring core containing coarse pebble indicates rapid sedimentation of this part.  
 A: The most surface of bio-terrace. Biomats are observed.  
 B, C, D: Cemented parts and the points of making thin section.  
 E: On the bottom of the boring core, none cemented sand grains are observed. This sand grains shows the development of bio-terrace on the sand beach.

電子線回折で微生物表面の付着物の同定を行った。バイオマットはメノウ乳鉢を用いて粉末にし、無反射板に塗布して風乾後、X線粉末回折分析 (XRD: 理学電機製, RINT1200, 電圧 40 kV, 電流 30 mA, CrK $\alpha$  の管球) を行い鉱物組成を同定した。

ボーリングコアの膠結しているB, C, D部分 (Fig.4) については樹脂包埋後, 研磨薄片を作成し, 光学顕微鏡により観察を行った。その後炭素蒸着し, 走査型電子顕微鏡 (SEM: 日本電子製, JSM-5200 LV) を用い, 加速電圧 15 kV で砂粒の膠結状態を観察した。また波長分散型の電子線プローブマイクロアナライザー (EPMA: 日本電子製, JXA-8800R) を用いて砂粒膠結部分の元素濃度の定量分析およびカラーマッピングを行った。

砂粒膠結部分には層状の析出物と褐色の球状物質が見られるが, この部分をカッターを用いて分離採取し, SEM 観察と EDX 分析を行った。この球状物質中の微生物の存在を確認するため, 球状物質を破碎した後, DAPI 染色して光学顕微鏡観察を行った。さらに TEM 観察を行った後, そのマイクログリッドを SEM の試料台に移し, カーボンコーティング後, EDX 分析を行った。

#### 4. 結果

##### 4.1. 水質測定

長浜港の源泉およびテラス周辺の水質測定結果を Table 1 に, また各々の化学組成を Table 2 に示す。源泉の pH は 5.3~5.5 を示すのに対し, 新テラスでは 6.0~6.6, 旧テラスでは 7.0 を示す。EC 値は源泉では 4~16 mS/cm と低く, 新テラスでは 42~43 mS/cm, そして旧テラスではさらに高い 48~49 mS/cm を示す。また, Eh 値は, テラス周辺は源泉や海水に比べて著しく低い値を示し, テラス内部において還元的な環境が形成されていることを示している。源泉の水温は 36°C~58°C と高く, テラス周辺では低下し, ほぼ 27~28°C を示している (Table 1)。ICP-MS 分析の結果は, 長浜港源泉が海水に比べて高濃度の Al, Si, Mn, Fe イオンを含むことを示す (Table 2)。



#### 4.2. ボーリングコア

長浜港内のバイオテラス (Fig.2 C) をボーリングし、約 55 cm のコアが採取された (Fig.4)。コア採取地点は表面に多くのクラック (Fig.2 D: →) が認められ、クラック下部から温泉水の浸出がみられる。コア上部には層状の堆積構造 (Fig.2 D: ⇒, Fig.4: ※) が形成されている。ボーリングコアの下部には多くのレキ (Fig.4, 最大径 7 cm) を含み、上部に比べて構成粒子が粗いことから、テラス下部の堆積速度は表層に比べ急速であったことを示唆している。コアの底の砂粒は膠結しておらず (Fig.4 E)、新バイオテラスが砂浜の上に形成されたことを示す。

#### 4.3. バイオテラスの顕微鏡観察および分析結果

##### ・バイオテラス最表層

長浜港新バイオテラスの最表層の顕微鏡観察および分析結果を Fig.5 に示す。ボーリングコアの最表層 (Fig.4 A) にはバイオマットが形成されており、この粘着物質により砂粒が粘着されている。このバイオマットを DAPI 染色後、蛍光顕微鏡下で観察したところ、青色を呈し DNA の存在を示した。また、その形態からシアノバクテリア(a)、珪藻(b)、球菌、桿菌(c)、糸状微生物(d)等が認められた (Fig.5 A-1)。また、これらの微生物には紫外線により蛍光を呈するものが見られ、クロロフィルを有することを示す (Fig.5 A-2)。さらに、同バイオマットの TEM 観察と電子線回折の結果、2.5, 2.2, 1.7, 1.5 Å のスポットから桿菌の細胞周囲には、フェリハイドライトの生成が認められる (Fig.5 A-3)。これは、これらの微生物が温泉水中の  $Fe^{2+}$  を代謝する鉄細菌であることを示唆している。また、バイオマットの

XRD 分析の結果、2.5 Å 付近にブロードな反射が認められ、フェリハイドライトが形成されていることを示す (Fig.5 A-4)。一方、最表層から 1 cm の砂粒間に認められる珪藻について、Si の EPMA 濃度分布図から、珪藻が溶解し細胞周囲に Si の濃度上昇をおこしていることが認められた (Fig.5 A-5: ⇒)。

##### ・バイオテラス内部

長浜港新テラスのボーリングコア (Fig.4 B, C, D) の顕微鏡観察および分析結果を Fig.6 に示す。テラス内部ではテラス最表層とは異なる形態で砂粒の膠結が進んでいる。光学顕微鏡観察と SEM 観察、EPMA 定量分析の結果 (Table 3)、砂粒間の膠結部分に見られる褐色の球状物質は Al, Si, P, Fe 等からなり、同心円状構造 (Fig.6 B-2, C-2, D-2 の①~④) をなしている。同心円状の縞の明部 (C-2 ①) は暗部 (C-2 ②) に比べ、Fe の含有量が高く、この縞模様様が Fe の濃度差で生じていることを示唆する。また Ca の値は低く、この部分の膠結が石灰質ストロマトライトにみられるような炭酸カルシウムの沈着によるものではないことを示す。Fig.6 C-1, C-2 部分の SEM 観察および EDX 分析の結果、同心円状構造を持つ球状物質 (C-2 ③) は、Al と Si からなる層状構造 (C-2 ④) の上に析出している (Fig.7 A)。この層状構造部分 (Fig.7 A-1) には球粒状物質が板状部分の層間やふちに存在し、外側にむかって成長しているのが認められた (Fig.7 B)。A-1 部分の EDX 分析は低いバックグラウンドを示し、この部分が無機的に析出したことを示唆する。一方、その上に析出している球状部分 (A-2) には、Al, Si に加えて Fe の高いピークが認められる。また、高いバックグラウンドと P, S のピークか

Table 2 Chemical characteristics of hot spring water and general sea water.

	ppm						
	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Zn
Nagahama Source 2	0.24	51.74	145.60	332.00	12.97	191.00	0.95
Sea water at Nagahama	0.12	6.91	—	—	0.52	2.57	0.12
General sea water※	0.01	3.00	380.00	400.00	0.002	0.01	0.001

※ : general sea water (after Iwanami, 1998)

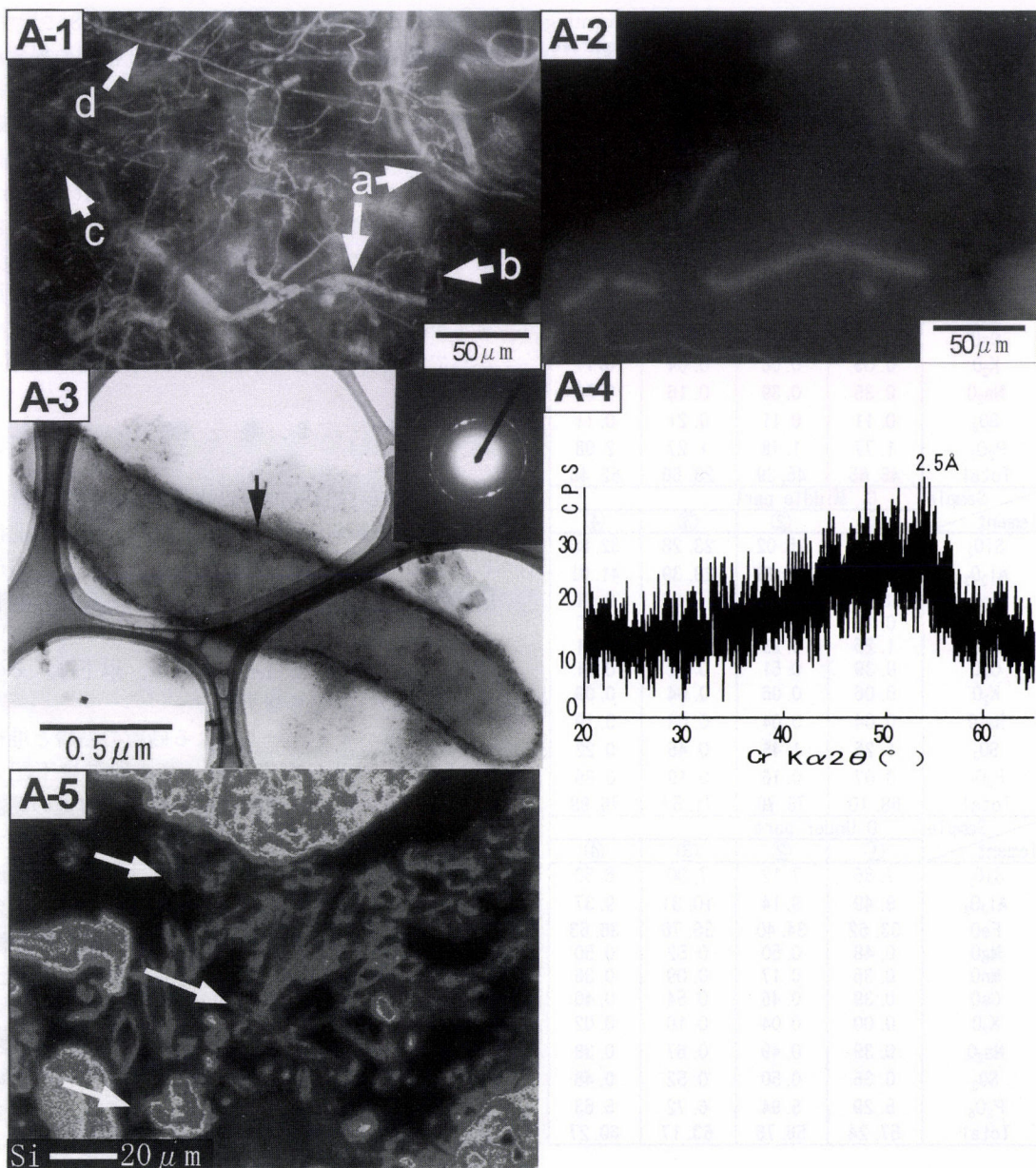


Fig.5 Optical, fluorescence and TEM micrographs of the biomats forming on the surface of new bio-terrace at Nagahama Port.

- A-1: Optical microscopy on the biomats demonstrate microbial colonies involving cyanobacteria (a), diatoms (b), bacilli and cocci (c), and filamentous bacteria (d). The surface of bio-terrace indicates viscosity by the secretory of microbes.
- A-2: Fluorescence microscopic observations confirmed the presence of cyanobacteria with chlorophyll.
- A-3: TEM image of a bacillus at oil slick floating above the terrace (A-3). Bacillus accumulating granular particles identified to be ferrihydrite by electron diffraction of the material obtained the spots at 2.5, 2.2, 1.7 and 1.5 Å (inset).
- A-4: The result of XRD analysis on bio-terrace, using Cr K $\alpha$  radiation, detected amorphous materials with broad 2.5 Å spacing, suggesting the presence of ferrihydrite.
- A-5: Elemental content map of Si showing the dissolution of diatoms at 1 cm under the surface.

Table 3 Electron microprobe analyses of cementing substance between sand gains. Sample No. correspond with B-2, C-2, D-2 in Fig.6. C. Middle part ① and ②: bright core structure and dark rim structure in Fig.6 C-2,

		Wt. (%)			
Sample		B. Upper part			
Element		①	②	③	④
SiO <sub>2</sub>		16.49	15.17	9.69	17.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		12.73	12.14	8.56	11.34
FeO		14.23	14.86	8.10	19.84
MgO		0.40	0.42	0.24	0.45
MnO		0.16	0.18	0.14	0.11
CaO		0.32	0.26	0.24	0.43
K <sub>2</sub> O		0.09	0.08	0.04	0.17
Na <sub>2</sub> O		0.35	0.39	0.16	0.50
SO <sub>3</sub>		0.11	0.11	0.21	0.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		1.77	1.78	1.27	2.08
Total		46.65	45.39	28.66	52.48
Sample		C. Middle part			
Element		①	②	③	④
SiO <sub>2</sub>		19.69	25.02	23.28	32.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		27.15	37.73	28.39	41.91
FeO		18.05	11.29	18.68	0.61
MgO		0.15	0.18	0.19	0.20
MnO		1.25	0.25	0.05	0.01
CaO		0.39	0.51	0.22	0.61
K <sub>2</sub> O		0.06	0.06	0.04	0.09
Na <sub>2</sub> O		0.04	0.04	0.08	0.19
SO <sub>3</sub>		1.25	1.46	0.45	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.07	0.16	0.19	0.36
Total		68.10	76.70	71.57	76.98
Sample		D. Under part			
Element		①	②	③	④
SiO <sub>2</sub>		7.86	7.12	7.00	6.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		8.49	9.14	10.31	9.37
FeO		33.62	34.40	36.70	36.63
MgO		0.48	0.50	0.52	0.50
MnO		0.36	0.17	0.09	0.36
CaO		0.39	0.46	0.54	0.40
K <sub>2</sub> O		0.00	0.04	0.10	0.02
Na <sub>2</sub> O		0.39	0.49	0.67	0.38
SO <sub>3</sub>		0.36	0.50	0.52	0.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		5.29	5.94	6.72	5.63
Total		57.24	58.76	63.17	60.27

ら、微生物の存在を示唆する。この部分を粉砕したものは DAPI 染色によって青色の蛍光 (Fig.7 C) を示すが、この蛍光は時間の経過とともに消光し、鉱物の自己蛍光ではなく生物の DNA によるものであることを示している。さらに、この球状部分の詳細な観察を TEM によって行った。

粉砕した球状物質の TEM 写真を Fig.8 に示す。球状物質中には長さ  $6 \mu$  と  $2 \mu$  の 2 種類の桿菌が多数認められた (Fig.8 A)。それらの微生物の細胞周辺には、電子線を通さない物質が多量に付着している (Fig.8 B)。また、微生物は 2~3 個細胞が合わさっている場合も多く認められる (Fig.8 B: →)。長さ  $2 \mu$  の桿菌の付着物は Al, Si, P に富むが、Fe の高いピークは認められない (Fig.8 C-1)。 $6 \mu$  の桿菌の細胞周囲には Al, Si, P に加えて Fe に富む物質が付着し、放射状に外側に向かって成長しているのが認められた (Fig.8 C-2)。

## 5. 考 察

長浜旧テラスは防波堤の建設後、また新テラスは砂浜の浚渫後、砂粒の堆積と膠結が急速に進行したものである。微生物の関与によるテラスの形成過程は、最表層バイオマットによる砂粒の粘着と、それに続くテラス内部での砂粒間の膠結という 2 段階で進行すると考えられる。以下に、その生成環境について考察する。

[I] 最表層バイオマットによる砂粒の粘着と堆積 Fig.9 A, B に示したように、第 1 段階は下記のように考えられる。長浜港における防波堤の建設や砂浜の浚渫により、バイオマットの形成に適する温泉の湧出と砂粒が急速に流入する環境が形成された。長浜港の  $\text{Fe}^{2+}$  や遊離  $\text{CO}_2$ 、珪酸イオンに富む弱酸性の泉質は、砂浜上に鉄細菌や珪藻、シアノバクテリア等の光合成細菌の繁殖を促した。さらに、バイオマットの形成に伴い、珪藻による珪酸イオンの濃集、鉄細菌による鉄イオンの濃集、Mg, P, K 等の各種栄養塩類のバイオマットへの濃集が生じる<sup>11)</sup>。この時、微生物の分泌する粘着物質は、バイオマット上に次々と砂粒を堆積させる重要な役割をにない、テラスの堆積が加速される。砂浜の浚渫当初は浚渫部分への砂粒の流入は急速であるため、テラス下部にはレキ等が含まれ、構成粒子が粗いものになっている。しかしテラス表面が海面に近くなるにつれ、堆積は細かい粒子による緩慢なものになり、層状構造が形成される。テラスの堆積速度はバイオマットの形成速度とバイオマット上への砂粒の流入速度に律速される。

[II] テラス内部での砂粒間の膠結



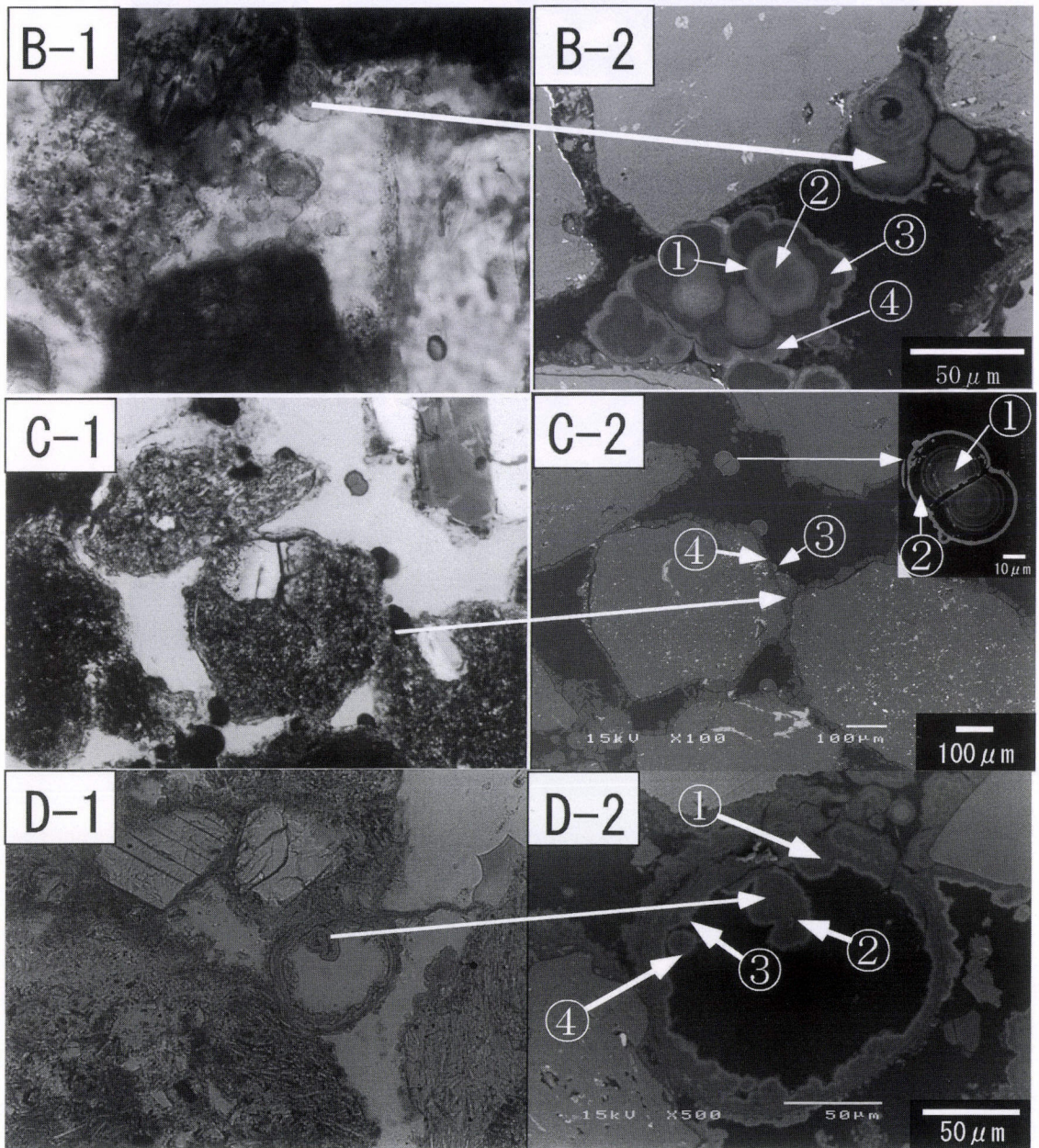


Fig.6 Optical micrographs (left side) and EPMA composition images (right side) of thin sections of sand grains with microbes. B, C and D correspond with Fig.4.  
①~④ : Quantitative analytical points by EPMA.



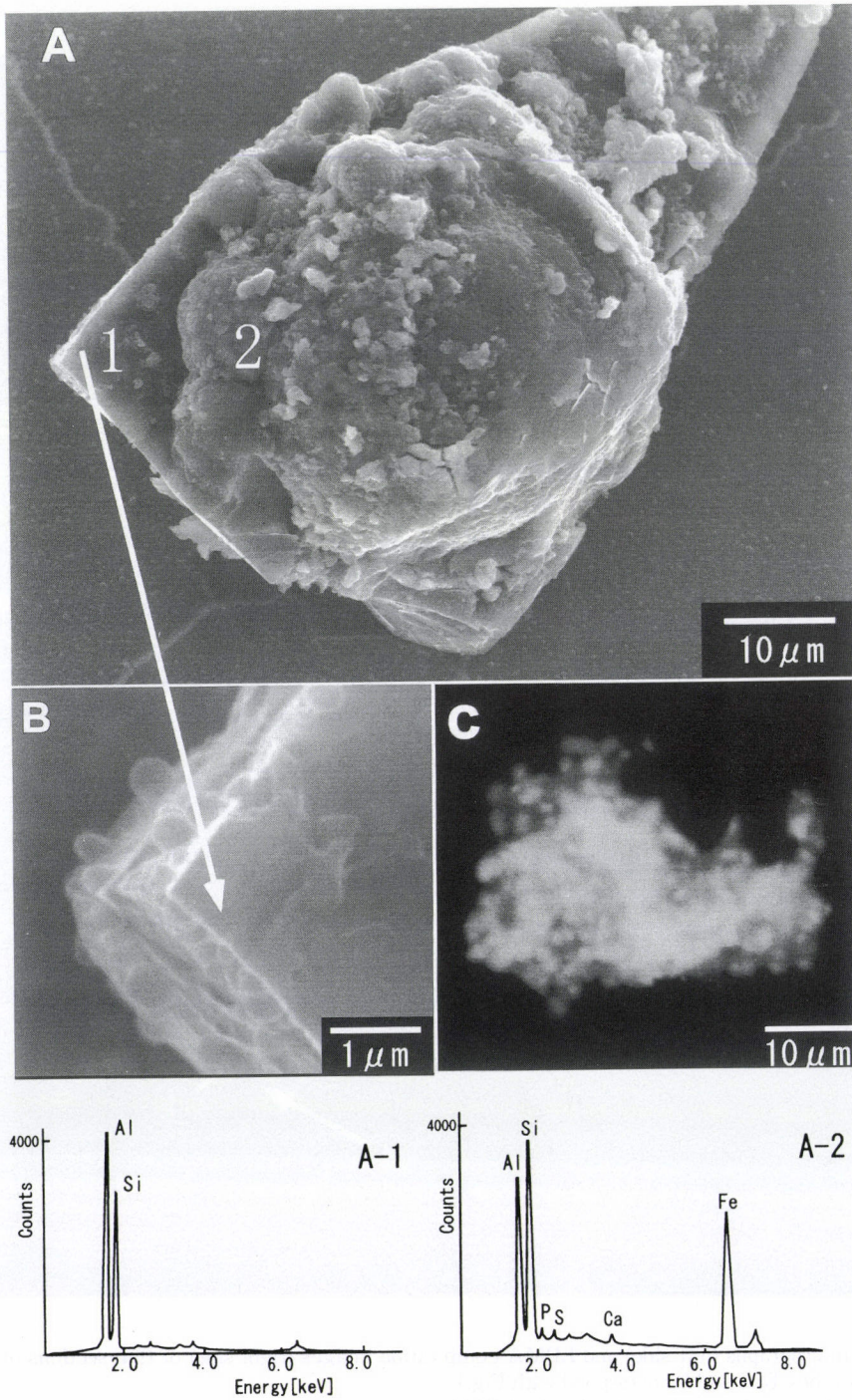


Fig.7 Scanning electron micrographs and the energy dispersive X-ray spectra in Fig.6 C-2. The part of A-1 is mainly composed of Al and Si. The grain structure is caught in layered structure. Spherical structure (A-2) is rich in Fe to add to Al, Si. Fluorescence microscopic observation of crushed spherical structure confirmed the presence of DNA stained with DAPI dye, suggesting the flock of microbes (C).



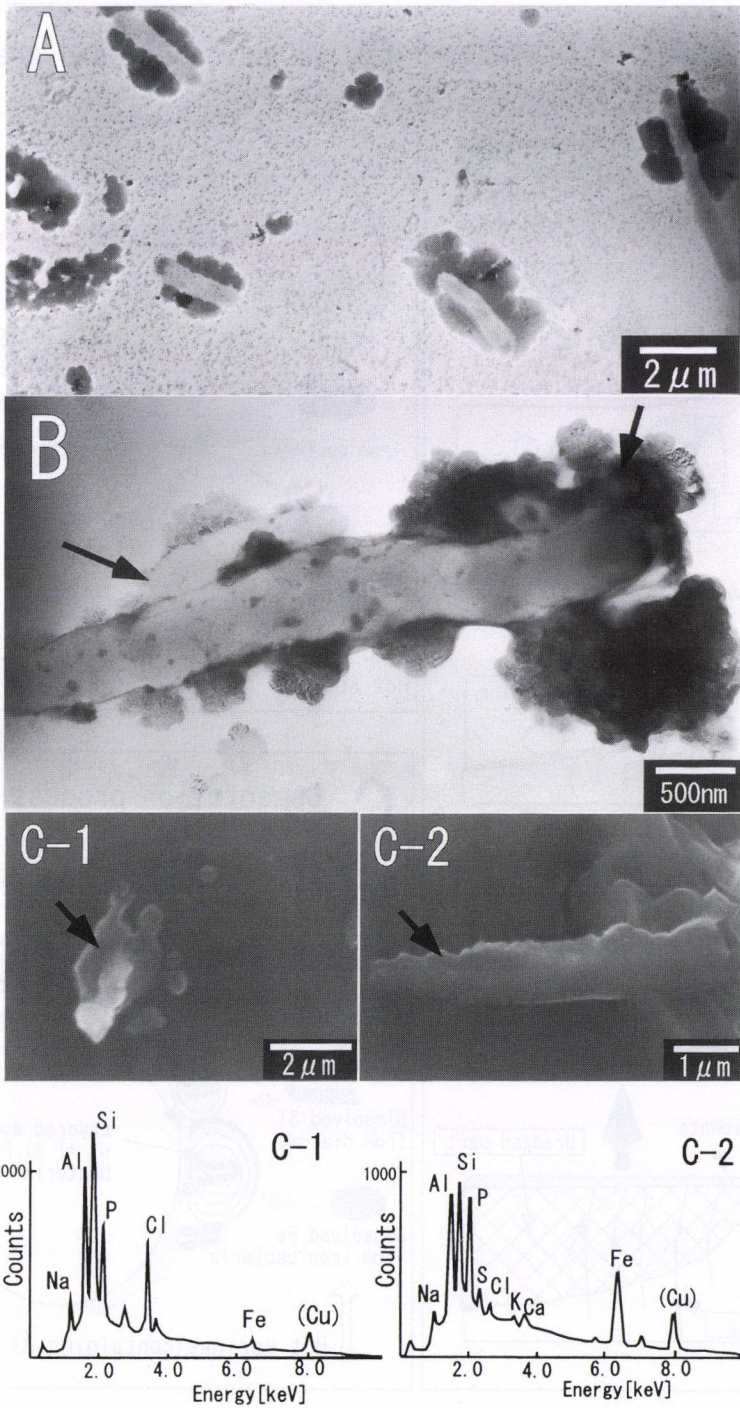


Fig.8 Transmission electron micrographs of bacillus in the crushed spherical structure (A, B). Energy dispersive X-ray spectra of the material surround the cell wall (C-1, C-2) of bacillus. Cu peak is the reflection of TEM micro grid.



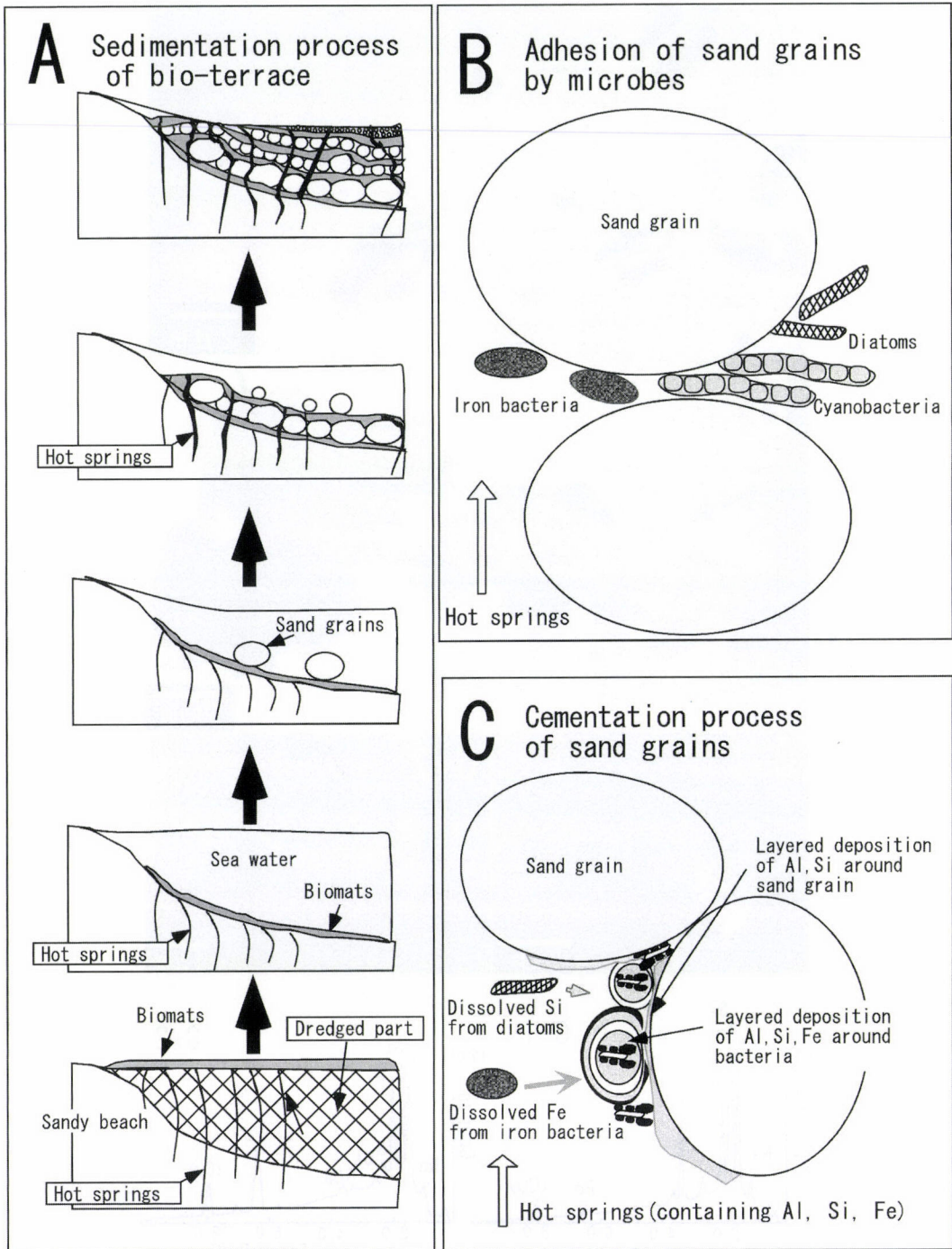


Fig.9 Schematic diagrams of sedimentation (A, B) and cementation (C) processes of bio-terrace.  
 A, B: Adhesion of sand grains by microbes on the surface of bio-terrace under aerobic conditions.  
 C: Cementation of sand grains by microbes at the inside of bio-terrace under anaerobic conditions.

Fig.9 C に示したように、第2段階は下記のように考えられる。一般に堆積物内では微生物により嫌気的な環境が形成されるが<sup>12,13)</sup>、水質測定結果 (Table 1) の Eh, pH 値はテラス内部において、 $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+}$  の変化の起き易い境界的環境が形成されていることを示す<sup>14,21)</sup>。この還元環境は、鉄細菌によって濃集されたり自然酸化により沈積したフェリハイドライト等の溶解をもたらす<sup>15)</sup>。

無機的な  $Fe^{2+}$  の酸化と競合する環境下では、鉄酸化細菌は量的に  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  の代謝によってエネルギーを得にくいとされるが<sup>16,17)</sup>、テラス下部から浸出する温泉水中の  $Fe^{2+}$  と、内部の還元環境による  $Fe^{2+}$  の溶出がこれを補い、鉄酸化細菌を繁殖させると考えられる<sup>18,19,20)</sup>。砂粒間の褐色球状物質に認められる細胞周囲に Al, Si, P, Fe に富む物質を付着した長さ  $6 \mu$  の桿菌は、鉄酸化細菌と考えられる。

一方、珪酸イオンは酸や金属イオンの存在下に珪酸ゲルを形成するが、長浜温泉水のような温度、pH 条件下で、0.5% 以下の珪酸濃度ではゲル化は生じないとされる<sup>22,23)</sup>。しかし、テラス内を浸透する温泉水にテラス内部での珪藻の溶解が加わって珪酸イオンの濃度が上昇し、これに微生物代謝による  $Fe^{3+}$  の生成と温泉水中の  $Al^{3+}$  等の浸透が加わることで、砂粒間に層状、同心円状の珪酸ゲルの生成が促進されると思われる。褐色球状物質は微生物と珪酸ゲルの凝集体と考えられる。また、この部分に見られる長さ  $2 \mu$  の桿菌は、付着物に Fe の高いピークが認められないことから、バイオマット中の有機物を Electron donor とする細菌であることが示唆される<sup>21)</sup>。同一の球状物質内に2種類の桿菌が存在し、それぞれ成分の異なる物質を付着していることは、これらの付着物が菌体に無機的に付着したものでなく、微生物の代謝活動の違いを反映して生成したものであることを示唆する。

以上のように、テラス表面と内部での活発な微生物活動の結果、3ヶ月という短期間で  $12 m \times 15 m \times 1 m$  という広大なテラスの形成が促進されたと考えられる。

ストロマトライトは、一般に微生物集団が構築する堆積構造物で、内部に細かいラミナをもつもの

のと定義される<sup>24,25)</sup>。また、藍菌の炭酸カルシウム沈着作用でできたものが骨格性ストロマトライト、堆積物を捕獲し結合したものは非骨格性ストロマトライトで石灰質のものはほとんどないとされるが<sup>26)</sup>、薩摩硫黄島にみられるバイオテラスは、Al, Si, P, Fe 等からなるゲル状物質で砂粒間が層状同心円状に膠結された非骨格性ストロマトライトの一種といえることができる。このバイオテラスの形成過程の検討は、ストロマトライトや綫状鉄鉱床の形成メカニズムを解明する手がかりとなる。

## 6. まとめ

バイオテラスの形成において微生物は、最表面におけるバイオマット上への砂粒の粘着と Si, Fe 等の濃集、テラス内部における還元環境の形成、代謝活動に伴う砂粒間の膠結等に重要な役割を果たしている。薩摩硫黄島長浜港のように、既存の環境に浚渫等の外的な変化が加えられ、微生物がエネルギー代謝に活用する  $Fe^{2+}$  等の物質が十分に供給される環境下では、微生物の繁殖とその代謝産物によって、ストロマトライト様バイオテラスの形成速度は非常に急速なものになりうることが示された。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、金沢大学大学院自然科学研究科佐藤努助教授には有益なご助言、ご協力をいただいた。日本原子力研究所の柳瀬信之博士には ICP-MS 分析でお世話いただいた。田崎研究室の院生の皆様には調査、実験に際し様々のご協力をいただいた。以上の方々に深くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) Kalkowsky, E. (1908) *Deutsch Geologisches Gesellschaft Zeitschrift* **60**, 68-125.
- 2) Hofmann, H. J. (1969) *Attributes of Stromatolites*, 1-58.
- 3) 赤井くるみ・黒川勝己・赤井純治 (1995) 地

- 球科学49, 292-297.
- 4) 田崎和江・松本和也・赤井純治・青木歩・朝田隆二・加藤裕将・大野源広・四ヶ浦弘・俵健二・上島雅人・渡辺弘明・山本啓之 (1997) バイオマットー身近な微生物がつくる生体鉱物ー金沢大学 91頁.
  - 5) Shikaura, H., Tawara, K. and Tazaki, K. (1999) Proceeding of the International Symposium Kanazawa, -Earth-Water-Humans-, 209-216.
  - 6) NHK 取材班 (1987) 地球大紀行 2 pp.7-23. 日本放送協会 東京.
  - 7) 小野晃司・曾屋龍典・細野武男 (1982) 薩摩硫黄島地域の地質 地質調査所 80頁.
  - 8) 篠原宏志・風早康平・Hedenquist, J.W. (1993) 地質ニュース472, 6-12.
  - 9) 鎌田政明 (1964) 地熱 3, 1-23.
  - 10) Tazaki, K. (2000) Clays and Clay Minerals, 48, 511-520.
  - 11) Seibold, E. and Berger, W. H. (1993) 海洋地質学入門, pp.93-94. シュプリンガー・フェアラーク東京 東京.
  - 12) 木村真人 (1994) 土壤生化学 pp.150-153. 朝倉書店 東京.
  - 13) Berner, R. A. (1984) Geochim. Cosmochim. Acta, 48, 605-615.
  - 14) Andrews, J. E. and Brimblecombe, P. (1997) 地球環境科学入門 pp.142-143. シュプリンガー・フェアラーク東京 東京.
  - 15) 岡崎正樹・佐藤幸夫 (1989) 土の化学 (日本化学会編) 68-80 学会出版センター 東京.
  - 16) 若尾紀夫 (1996) 月間地球18, 56-60.
  - 17) 山中健生 (1986) 微生物のエネルギー代謝学会出版センター 東京 254頁.
  - 18) Lovley, D. R. (1997) FEMS Microbiology Reviews 20, 305-313.
  - 19) NAVAS, A. S., Algarra, A. M. and Nieto, F. (1998) Sedimentology 45, 519-533.
  - 20) Lovley, D. R. and Phillips, E. J. (1986) Applied and Environmental Microbiology, Apr, 683-689.
  - 21) Bolt, G. H. and Bruggenwert, M. G. M. (1995) 土壌の化学 pp.177-178 学会出版センター 東京.
  - 22) 樽谷俊和 (1956) 日本化学雑誌77, 11, 89-95.
  - 23) Iler, R. K. (1979) The Chemistry of Silica. J. Wiley, New York, 866pp.
  - 24) Awaramik, S. M. and Margulis, L. (1974) Definition of Stromatolites, Stromatolite Newsletter, 2, 5.
  - 25) 千原光雄 (1997) 藻類多様性の生物学 pp.32-33 内田老鶴圃 東京.
  - 26) 渡部哲光 (1997) バイオミネラリーゼーション pp.50-51 東海大学出版会 東京.