# 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震後の福島県内のバイ オマットの特徴

霜島康浩<sup>1</sup>·加藤智弘<sup>2</sup>·奥野正幸<sup>3</sup>·大友幸子<sup>4</sup>·田崎和江<sup>5</sup>

 <sup>1</sup>株式会社開発技術コンサルタント 〒951-8133 新潟県新潟市中央区川岸町 3-33-3
 <sup>2</sup>株式会社地球システム科学 〒160-0022 東京都新宿区新宿 1-23-1 新宿マルネビル 7 階 <sup>3</sup>金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 石川県金沢市角間町
 <sup>4</sup>山形大学地域教育文化学部 〒990-8560 山形県山形市小白川町 1-4-12

<sup>5</sup>河北潟湖沼研究所 〒 929-0342 石川県河北郡津幡町字北中条ナ 9-9

要約:2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後に福島県内4カ所のバイオマットについて調査した.そして、それらの形成環境、化学組成、電子顕微鏡観察から、バイオマットの特徴について明らかにした.東北地方太平洋沖地震により津波被害を受けた福島県南相馬市鹿島区烏崎の水田土壌表面に形成した白色バイオマットは、ケイソウにより構成され、ハライト、石こうを生じていた.また、ゲルマニウム半導体検出器を用いた核種分析ではセシウムが検出され、SEM-EDSによる半定量分析から特定の元素が微生物に濃集されていることが明らかとなった.福島県南相馬市原町区東ヶ丘公園では、湧水が流れる水路で鉄酸化細菌 Leptothrix ochracea により形成された赤褐色バイオマットが認められ、SEM-EDSによる半定量分析では主に鉄が濃集されていた.さらに、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震直後に、福島県いわき市内郷高坂町の住宅の土台や水抜き穴から温泉水が噴出した.内郷高坂町では、鉄酸化細菌 Leptothrix ochracea により赤褐色バイオマットが形成された.泉玉露では、イオウシバが繁茂し、還元性細菌によりイオウと石こうが形成された.これら4カ所で観察されたバイオマットは、それぞれの地域の環境にあわせて微生物が棲み分けており、また環境変化によりもたらされた特定の元素を濃集する可能性が明らかになった.

キーワード:東日本大震災、バイオマット、電子顕微鏡、細菌

# Characteristics of Microbial Mats in Fukushima Prefecture, after the Pacific Coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011

## SHIMOJIMA, Y., KATO, T., OKUNO, M., OHTOMO, Y., TAZAKI, K.

Abstract; The characteristics of microbial mats formed after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (henceforth the 3.11 Earthquake) were clarified by studies of their living environment, chemical compositions and microscopic observation at following four study sites. White microbial mats formed in flooded paddy fields at Karasuzaki, Kashima, Minamisoma City, Fukushima Prefecture were damaged by salt water of Tsunami after the 3.11 Earthquake. This microbial mats consist largely of diatom with mineralized halite and gypsum. Cesium of the radionuclides were detected in microbial mats by using a Ge semiconductor analyzer. Particular elements concentrated in microbial mats were detected using SEM-EDS. At Azumagaoka park, Haramachi, Minamisoma City, Fukushima Prefecture, reddish brown microbial mats aggregated with iron oxidizing bacteria, *Leptothrix ochracea*, were found in spring water along a gutter. Iron concentrated in microbial mats were detected using SEM-EDS. At this site, we observed reddish brown microbial mats, formed by iron oxidizing bacteria, *Leptothrix ochracea*. Similarly,

very hot spring water spewed out from a shaft of old coal mining situated in Izumi-tamatsuyu, Iwaki City after the aftershock happened in 11th April 2011. At this site, we observed that sulfur and gypsum were formed in sulfur-turf develop in sulfide-containing hot springs water. It could be concluded that the bacteria inhabit adopting each growing environment selectively forming microbial mats and they concentrate particular elements.

Keywords; The Great East Japan Earthquake, microbial mats, electron microscopy, bacteria

## はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地 震(M9.0)では、大津波が発生し、東北地方太平 洋沿岸に多くの被害を発生させた.東北地方太平洋 沖地震の震源は、三陸沖で震源の深度は24kmとさ れている(気象庁,2011).この地震による津波で、 多くの構造物や農地が被害を受けた.なかでも東京 電力福島第一原子力発電所(以下福島第一原発)で は、津波被害による電源喪失が原因による原子炉損 傷で広範囲に放射性物質が飛散して、福島県沿岸部 の農地では津波と放射能汚染の二重被害が発生して いる(国分ほか,2013;田崎ほか,2014a).

福島県いわき市の常磐湯本温泉地域では2011年 3月11日の東北地方太平洋沖地震により,いわき 市内郷高坂町の住宅の土台や水抜き孔から温泉が噴 出した.また,その1カ月後の2011年4月11日の 地震により,いわき市泉玉露の旧炭鉱施設の立坑(排 気口)からも温泉が大量に噴出した.これらの温泉 は2014年1月現在も噴出している.

津波で浸水し,放射能汚染された農地や地震により温泉が噴出したような環境の中においても,微 生物が大量に棲息していることが明らかにされている(霜島ほか,2014;田崎ほか,2013a,2013b, 2014a). これらの微生物は有機物の分解や窒素の 固定,微量重金属元素の濃集を通じて生態系の物質 循環のなかで重要な役割をになっている.これらは しばしば集合体を作って間欠泉,熱水噴出孔,温泉, 鉱山廃水,河川などさまざまな水辺の環境に広く生 息し,バイオマット(微生物被膜 Microbial mats) とよばれる構造物をつくる(田崎,2010).福島県 内における地震や津波発生のメカニズムや原発事故 による放射性物質の拡散や汚染状況,物理的,化学 的な除染方法の研究,地震による温泉噴出のメカニ ズムや地下水の挙動などの研究は多く認められる. 一方,津波堆積物中の微生物や地震により噴出した 温泉に生息する微生物により形成されたバイオマッ トと生成鉱物などについての科学的データは限られ ている.

本研究では2011年3月11日の地震と津波の被 害を受けた福島県鹿島区烏崎漁港付近の水田バイオ マット,福島県南相馬市原町区東ヶ丘公園のバイオ マット,3月11日の地震直後に噴出した温泉に形 成された福島県いわき市内郷高坂町のバイオマット, 4月11日の地震により噴出した温泉に形成された 福島県いわき市泉玉露のバイオマットについて電子 顕微鏡観察や化学組成,水質,放射線量からバイオ マットの特徴や形成環境について検討を行ったので 報告する.

#### 福島県内の調査地と現地の状況

調査地は、福島県北東部の南相馬市鹿島区烏崎、 南相馬市原町区東ヶ丘公園、福島県南東部のいわき 市内郷高坂町、泉玉露に位置する(Fig.1).南相馬 市を含む東北地方の太平洋沿岸部では2011年3月 11日のM9.0の地震により、大津波に襲われ、多 くの水田や宅地などが浸水した.試料採取地に最 も近い相馬市の検潮所では9.3 mを超える津波が 観測されたと報告されている(気象庁,2011).し かし、南相馬市では、10 mを超える津波が押し寄 せ、最大の津波は、海岸から約800 m離れた標高 10.5 mを示す地点で、1.5 mも冠水した(田崎ほか、 2014a).このように実際の津波は検潮所の記録を超 えるものであった.

烏崎の試料採取地は,福島第一原発から北へ約





Fig. 1. Locality map of microbial mats in Fukushima, Japan.

 図1.本研究で扱った福島県内のバイオマットの分布図.南相馬市烏崎(A),南相馬市原町区東ヶ丘(B),いわき市内郷高坂町(C),いわき市泉 玉露(D),福島第一原発(FDNPP).

29 km 離れた, 烏崎漁港に近い水田として利用され ていた平坦地で, 広い範囲に津波堆積物の砂が認め られる. 試料採取地の烏崎は最大の浸水範囲となっ た地域に含まれている. 水田跡には白いシート状の 物質が津波堆積物表面を薄く覆っている状況が確認 され (Fig.2A), 一部では水たまりも形成されてい る. 水田土壌表面には白色~灰色のシート状の物質 (バイオマット) が数 mm の厚さで覆っており, 乾 燥が進んだ場所では亀裂が生じ, 一部分めくれ上が り,簡単に剝ぐことができた. 剝いだ白色バイオマッ トは, 柔軟で, 折り曲げても容易にちぎれない状態 であった.

福島県南相馬市原町区の東ヶ丘公園内の湧水が流 れる土水路内には,赤褐色のバイオマットが形成さ れている(Fig.2B).東ヶ丘公園は,南相馬市の中 心街にあたる原町区の丘陵地に位置する自然公園で ある.バイオマットは,水中に綿状に形成され,水 面にはオイルスリック状の薄膜も確認できる.バイ オマットが形成されている水路は公園内に湧出した 湧水を処理するためのもので,一部はコンクリート ブロック製の水路となっているものの,ほとんどの 区間は土水路となっている. 湧水の湧出やバイオ マットの形成の時期は不明であり,2011年3月11 日の地震前から存在していたものと考えられる.

福島県いわき市では2011年3月11日に発生した 東北地方太平洋沖地震直後に,福島県いわき市内郷 高坂町の住宅の土台や水抜き穴など約20カ所から 温泉水が噴出し,その周辺に赤褐色のバイオマット が形成された(Fig.2C).その1カ月後の4月11日 に発生したM7.0の地震時には,いわき市泉玉露の 立坑から高温の温泉水が噴出し,白色のバイオマッ トが形成された(Fig.2D).

福島県南東部のいわき市浜通りに位置する内郷高 坂町と泉玉露の周辺はかつて,常磐炭田が広く分布 した地域であった.常磐炭田は温泉水を伴う炭田と しても知られており,常磐湯本温泉が両調査地域 のほぼ中間地点に位置する.いわき市内郷高坂町は, かつて常磐炭鉱のズリ山となっていた場所で,ズリ 山を造成して住宅団地が形成された.噴出した温泉 の2011 ~ 2013 年の湧出量は,毎秒 2 ~ 6 L,温度 は約 27℃である(産業総合研究所地質調査センター, 2013).2014 年 1 月 12 日の測定では湧出量の多い 数カ所での合計は毎秒 2.8 L であり,湧出量に大き な変化は認められない(霜島ほか, 2014).

いわき市泉玉露は常磐炭鉱の西端にあたり,地下 約 600 m 坑道から延びる立坑(排気口)跡がある. 2011 年 4 月 11 日の余震により,立坑から約 60℃ の温泉水が多量に噴出し,隣接する河川に排水して いる.温泉の排水口には,白色を呈する糸状のバイ オマットが形成されている.常磐炭鉱では全面閉山 後は 1979 年にいわき市常磐湯本町に常磐湯本温泉 株式会社を設立し,地下約 600 m の温水が湧出する 坑道にパイプラインを通して,湯本の温泉街に配湯 するようになった.このパイプラインは泉玉露の立 坑まで延びている.

### 試料の観察および測定・分析方法

#### 試料の採取

福島県南相馬市烏崎の水田跡では,津波堆積物表 面に形成された白色バイオマットを剝ぎ取り採取し た.採取した試料は、カッターナイフで表層と砂が



Fig. 2. Field views of microbial mats at paddy field in Karasuzaki (A), microbial mats in Azumagaoka Park, Haramachi (B), microbial mats in Uchigo-Takasakamachi(C) and sulfur turf in Izumi-Tamatsuyu (D).
図 2. 南相馬市烏崎の水田のバイオマット (A), 南相馬市原町区東ヶ丘公園のバイオマット (B), いわき 市内郷高坂町のバイオマット (C) といわき市泉玉露のイオウシバ (D).

付着する裏面の部分に分け,白色を呈する表層部分 について観察と分析を行った.水田跡地内の窪地に できた水たまりの水をポリエチレンビンに採取し た.烏崎における現地測定は,2013年10月14日, 2014年1月11日に実施し,試料採取は2013年10 月14日に行った.

福島県南相馬市原町区の東ヶ丘公園内では、土水 路内に形成された綿状の赤褐色のバイオマットの表 層部を移植ごてで水中から掬い取った.採取した試 料は、ろ紙で水分を取り除いた後、自然乾燥させ たものについて観察と分析を行った.土水路の水は、 ポリエチレンビンに採取した.東ヶ丘公園における 現地測定は2014年1月11日に実施し、試料採取は 2013年2月23日、2014年1月11日に行った. 福島県南東部のいわき市内郷高坂町では温泉が噴 出する出口付近に付着していた赤褐色バイオマット を移植ごてで採取した.泉玉露では,隣接する河川 の温泉排出口に形成されたバイオマットをステンレ ス網で採取した.採取した試料は,ろ紙で水分を取 り除いた後,自然乾燥させたものについて観察と分 析を行った.また,それぞれの温泉の排出口から温 泉水をポリエチレンビンに採取した.内郷高坂町お よび泉玉露における空間線量測定は2012年11月 14日,2014年1月12日に実施し,試料採取およ び現地水質測定は,2014年1月12日に行った.

#### 試料の測定・分析方法

バイオマット試料はガイガー・ミュラーカウン

ター (Aloka GM サーベイメータ TGS-136 計数管, 単位 cpm)を用い、ビニールで保護した検出器を 対象に接触させて放射線量を測定した。また、試料 との比較を行うため、地上 1m の高さで空間線量を 測定した.本研究では、金沢大学 RI センターにお いて、絶対値(<sup>137</sup>Cs線量率校正線源; )線のみ)と (<sup>137</sup>Cs 線源 Am: americium :  $\beta$  線 +  $\gamma$  線) をもとに して GM サーベイメータ TGS-136 を校正した. なお, 1000cpm は 1.52 µSv/h に相当し, 2-3 割の誤差があ る.

放射能汚染された烏崎のバイオマット試料につ いては、ゲルマニウム半導体検出器(CANBERRA GC2520) を用いた y 線スペクトロメトリーによる 核種分析法で<sup>131</sup>I,<sup>40</sup>K,<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>Csの4核種を分 析した.分析は2013年10月14日に採取した試料を, 2013年10月19日に行った.

採取したサンプルは日立製 S-3400N 型走査型電 子顕微鏡 (SEM) を用いて微細形態を観察した.視 野に対応した微小領域の放射性核種を含む化学組成 分析を行うため、HORIBA 製 EMAX X-act 型エネ ルギー分散型分析装置を装着した走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) を用いて、加速電圧 15 kV、電流 70-80 µA. 分析時間 1000 秒で半定量分析を行い.ス ペクトルを得た. 半定量分析は標準試料を用いず各 元素の理論強度をもとに実測された強度と比較して 元素を求める方法で、分析方法の詳細は田崎ほか (2013a, b) に記述した.

本研究で使用したエネルギー分散型・走査型電子 顕微鏡装置(HORIBA EMAX X-act)は、少量の 元素でも、含有の可能性がある場合はマップ上に表 示される.予想外の元素の混入や微粒子が点在す る場合も検出し、判別できる(堀場製作所、2010; Burgess et al., 2013;小豆川, 2014). エネルギーが 接近している元素についてはピーク分離ソフトによ り処理された計算値が示され、エネルギーウインド のリストが重複している場合はゼロと表示される.

バイオマットの形成環境を推定するため、バイオ マットを形成する水の水質は、現地において水温 (℃), pH, 電気伝導度 (EC), 酸化還元電位 (ORP) を計測し、ポリエチレンビンに採水を行った、現地 測定では、HORIBA 製 B-212 型 pH メータ, B-173 を用いた. 採水した水は JIS K 0102 もしくは上水 試験方法により主要イオン分析を行い、水質の分類 を行った。 烏崎の試料は 2013 年 10 月 14 日に採取 した試料を 2013 年 10 月 17 日に、東ヶ丘公園、内 郷高坂町、泉玉露の3 試料は2014年1月11~12 日に採取した試料を2014年1月22日に水質分析 を行った.

## 調査及び測定・分析結果

#### 現地水質測定結果

南相馬市烏崎のバイオマット周辺に認められた水 たまりの水の主要イオン分析の結果、津波による海 水を起源とする Na-Cl 型の水質を示し、2011 年3 月11日の津波被害から3年たった現在でも、海水 の影響を受けた状態にある。pH. ECも同様に海水 の影響を受けており、pH 7.5-7.8、EC 3480-4520 mS/m (試験室計測値) である (Table1).

東ヶ丘の湧水は、湧水の一般的な水質である Ca<sup>2+</sup> -HCO<sup>3-</sup>型を示した. 現地計測では pH 6.9, EC 36 mS/m, ORP 22 mV である (Table1).

内郷高坂町の温泉水はNa<sup>+</sup> (Ca<sup>2+</sup>) -SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 型を示 す. 現地計測では、pH 7.3-7.8、EC 186-187 mS/ m, ORP -42 から -82 mV であり, 弱還元的である (Table1).

泉玉露の温泉水は Na-Cl 型を示す.現地計測では、 pH 8.0-8.3, EC 480 mS/m, ORP -331 mV であり, 著しく還元的である (Table1). なお, 常磐湯本温 泉の泉質は、含イオウ-ナトリウム-塩化物・硫酸 塩温泉であり、泉玉露の水質とは硫酸塩濃度がやや 異なっている.

## バイオマットの放射線測定とゲルマニウム半導体検 出器を用いた γ線スペクトロメトリーによる核種分 析

バイオマットの現地放射線量測定では、烏崎の 白色バイオマットで85-160cpm, 東ヶ丘公園で 115cpm, 内郷高坂町で 60-430cpm あった. 泉玉露 では、白色バイオマットが 80-110cpm であり、温 泉水の排水溝が330cpmであった.また、バイオマッ トを乾燥させた後の放射線量測定では、烏崎の白色 型電気伝導率計,カスタム製 ORP-6041 型 ORP 計 バイオマットで 140cpm であり,その他 3 か所の試

Location	A : Karasuzaki	B : Azumagaoka Park	C : Uchigo- Takasakamachi	D : Izumi-Tamatsuyu	
Sample	White microbial mats	Reddish brown microbial mats	Reddish brown microbial mats	White sulfur turf	
Characteristics	Na <sup>+</sup> -Cl <sup>-</sup> type	Ca <sup>2+</sup> -HCO <sup>3-</sup> type	$Na^{+}(Ca^{2+})-SO_{4}^{2-}$ type	Na <sup>+</sup> -Cl <sup>-</sup> type	
of the water	Salt water (Tsunami)	Spring water	Hot spring water	Hot spring water	
Temp. (°C)	1.0	-0.2	7.0	11.0	
Water temp. ( $^{\circ}C$ )	0.1	7.5	22.0, 25.0	59.0	
pН	7.5, 8.0	6.9	7.3, 7.8	8.0, 8.3	
EC (mS/m)	3480, 4520	36	186, 187	480	
ORP (mV)	79, 94	22	-42, -82	-331	
	(Oxidative)	(Oxidative)	(Weak reductive)	(Reductive)	
Bacteria	Diatom	Iron oxidizing bacteria	Iron oxidizing bacteria	Reducing bacteria	
Mineral	Gypsum, Halite Ferrihydrite Ferrihydrite		Ferrihydrite	Sulfur, Gypsum	

Table 1. Characteristics of microbial mats and water quality in Fukushima Prefecture, Japan. 表 1. 福島県内のバイオマットと水質の特徴.

料は全て 80cpm であった (Table2).

烏崎の水田バイオマットについて 2013 年 10 月 14日に採取した試料を,2013 年 10 月 19日にゲ ルマニウム半導体検出器を用いた<sup>131</sup>I,<sup>134</sup>Cs,<sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K,の分析結果を Table2 に示す.<sup>134</sup>Cs は 400 Bq/ kg-dry であり,<sup>137</sup>Cs は 890 Bq/kg-dry であった. <sup>131</sup>I は物理的半減期が 8 日と短いため、本研究にお いては全試料で不検出であった.<sup>40</sup>K は少量検出さ れた.原発事故から 3 年たった現在,<sup>40</sup>K と<sup>131</sup>I が ほとんどの試料で不検出であったことは、原発事故 由来の両放射性核種の物理的半減期に合致する.

さらに、同地点で2012年9月15日に採取し、 2013年6月5日に測定した水田バイオマット表面 の<sup>134</sup>Csは2000 - 2200 Bq/kg-dryであり、<sup>137</sup>Csは 4200 - 4300 Bq/kg-dryであった(田崎ほか2014a). 2013年6月5日と2013年10月19日の測定結果 を比較すると、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csは1年でともに線量が約 1/5に減少している。

#### バイオマットの走査型電子顕微鏡観察

烏崎の白色バイオマットの表面の走査型電子 顕微鏡観察では、白色バイオマットの最表面に は、ササノハケイソウ(*Nitzschia* 属)が観察される (Fig.3A). 珪藻殻のまわりには糸状の微生物や球 菌が認められる. そのほか, 微細な鉱物粒子や粒径 20-30 µm の無機物質が点在している. Nitzschia 属 は湖沼や河川など淡水域に広く分布しており, 好ア ルカリ性, 貧塩—不定性流水不安定性, 広温性, 富 栄養性で, 中腐水域までの耐性を持つ(小島ほか 編, 1995). この属の中でも Nitzschia filiformis と Nitzschia scalpeliformis はともに淡水から海水まで 広く分布するが, 河口域などの汽水域に多い着生種 で, 汽水域では中腐水域までの耐性を持つ(小島ほ か編, 1995). 現地水質測定による測定結果は本属 の棲息環境の範囲にほぼ合致する.

東ヶ丘公園の赤褐色バイオマットの SEM 観察で は、太さ 1~2 μm,長さ 10 μm の長管状物質とその周 囲に微細な付着物が多数観察される (Fig.3B).長 管状物質は中空で分岐のない直線的な形態を示して いる.中空の長管状物質は、その形態および元素分 析結果から鉄細菌 Leptothrix ochracea により形成さ れ、細胞が抜け出して空になった鞘が集合したもの である.

内郷高坂町の赤褐色バイオマットの SEM 観察で は、太さ 1~2 μm,長さ 10 μm の長管状物質とその 周囲に微細粒子や粒径 20-30 μm の無機物が観察さ れる (Fig.3C).長管状物質は中空で分岐のない直 線的な形態を示している、中空の長管状物質は、そ Table 2. SEM-EDS and Ge semiconductor analysis of microbial mats collected from in Karasuzaki (A), Azumagaoka Park, Haranomachi (B), Uchigo-Takasakamachi (C) and Izumi-Tamatsuyu (D).

表 2.	エネルギー分散	型・	走査型電子顕微鏡装置とな	ブルマ	ニウム半導体検出器に。	よるノ	バイオマットの分	<b></b> 桁結
果	,南相馬市烏崎	$(\mathbf{A})$	,南相馬市原町区東ヶ丘公開	氢 (B)	),いわき市内郷高坂町	(C).	いわき市泉玉露	(D).

	Element		A	В	C	D
Methods			White microbial	Reddish brown	Reddish brown	White sulfur turf
			mats	microbial mats	microbial mats	10.00
	С	K	0.00	0.00	13.34	10.92
	Na	K	*	*	1.57	0.15
	Mg	Κ	2.06	0.62	0.10	ND
	Al	Κ	3.13	0.00	2.55	0.09
	Si	Κ	28.08	2.25	11.13	2.20
	S	Κ	2.02	0.77	1.56	16.80
	Cl	Κ	6.58	2.83	0.20	0.10
	Κ	Κ	0.56	0.72	0.30	0.49
	Ca	Κ	1.13	2.89	1.03	4.23
	Mn	Κ	0.13	0.23	0.20	ND
SEM EDS	Fe	Κ	2.73	57.43	12.15	0.31
SEMI-EDS	Zn	L	7.31	6.02	0.00	ND
(Wt%)	Zr	L	*	*	25.22	*
	Ag	L	0.00	0.00	ND	0.85
	Ĩ	L	0.08	0.02	ND	ND
	Cs	L	0.00	0.17	ND	0.00
	Ce	L	*	0.06	0.00	*
	Nd	L	0.13	0.03	ND	*
	Hg	М	*	*	0.00	1.89
	Th	М	2.05	1.66	0.00	0.00
	U	М	0.17	0.13	0.00	0.00
	Np	М	1.00	0.38	0.00	0.00
	Ő	Κ	42.83	23.77	30.02	18.27
	I 1	31	N.D.			
Ge semiconductor	Cs 134		400			_
analysis (Bq/kg-dry)	Cs 137		890	_	_	_
	K 40		140	_	_	_
	Dry Se	amnle	140	80	80	80
	2011/11/14				420	Drainage 320
Radiodosage (cpm)	2011/11/14 2012/10/14		85 120	_	- 430	
	2013/10/14		160	115	60.00	80 110
	2014/1	/11-12	100	115	00-90	80-110

Mass concentration, \*: Element that is not set, 0.00: Analysis value shows zero, ND: not detected, —: Not analyzed

の形態および元素分析結果から鉄細菌 Leptothrix ochracea により形成された鞘が集合したものである. Leptothrix ochracea は偏性の微好気性細菌であり, 鉄分を含む水中に好んで増殖する.発育最適 pH は,  $6.5 \sim 7.5$ と中性域である.細胞は, $2 \sim 4 \mu m$ の円 筒形で,長管状の鞘中に縦に一列に並んで糸状体を 形成する.糸状体は直線状でほとんど分岐せず,幅 約 $2 \mu m$ ,長さは $200 \mu m$ 前後に達することがある. 糸状体の幅はどの部分をとっても,ほぼ一定である. 細胞が抜け出して空になった鞘のみが検出されるこ とが珍しくない(小島ほか編, 1995).東ヶ丘公園 および内郷高坂町の現地水質測定結果は酸化還元境 界に近く,類似しており,好気的から微好気的とい え,pH6.9~7.8の中性域の環境であり,Leptothrix ochraceaの棲息環境の範囲にほぼ合致する.

泉玉露の白色バイオマットの SEM 観察では,40-50 μm の立方体状のケイソウと粒状の物質が認めら れる (Fig.3D).形態的特徴および元素分析結果から, 白色バイオマットは還元性細菌が温泉成分のイオウ 分 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> や HS<sup>-</sup> など)を取り込んで生育するイオ



Fig. 3. Scanning electron micrographs of microbial mats in Karasuzaki (A), microbial mats in Azumagaoka Park, Haramachi (B), microbial mats in Uchigo-Takasakamachi (C) and sulfur turf in Izumi-Tamatsuyu (D). 図 3. 走査型電子顕微鏡によるバイオマット観察結果, 南相馬市烏崎 (A), 南相馬市原町区東ヶ丘公園 (B), いわき市内郷高坂町 (C), いわき市泉玉露 (D).

ウシバである.

#### バイオマットの分析電子顕微鏡による化学分析結果

烏崎の白色バイオマットにおける SEM-EDS によ る元素分析では, Si が最も多く, Mg, Al, Cl, Ca, S, Zn も検出された. (Table 2A, Fig.4A). SEM 観察 による形態や元素分析結果から, Si はケイソウに由 来するほか,海水(津波)由来の硫酸カルシウムや 塩化ナトリウムが微生物により石こうおよびハライ トを形成している (Table 1A 下欄).

東ヶ丘公園の赤褐色バイオマットにおける SEM-EDS による元素分析では, Fe が最も多く, Si, Cl, Ca, Zn も検出されている. (Table 2B, Fig.4B). SEM 観察による形態や元素分析結果から, 鉄細菌 により水酸化鉄 (ferrihydrite) が形成されたと考え られる (Table 1B 下欄).

烏崎の白色バイオマットおよび東ヶ丘公園におけ る元素分析ではThやUが検出されたものの、これ らの放射性核種については今後、別の方法によって の検証を進める.なお、微生物による放射性核種の 濃集についてはアメリカやカナダで多くの研究報告 があり、Uを濃集した微生物細胞の電子顕微鏡写真 が示されている.また、実験により微生物は水溶液 中のU、Thを濃集する(坂口、1996).

内郷高坂町の赤褐色バイオマットにおける SEM-EDS による元素分析結果からは, C, Si, Fe が



Fig. 4. Energy dispersive X-ray spectra of microbial mats in Karasuzaki (A), microbial mats in Azumagaoka Park, Haramachi (B).

図 4. バイオマットの蛍光 X 線スペクトル,南相馬 市烏崎 (A),南相馬市原町区東ヶ丘公園 (B).

多く検出された (Table 2C). SEM 観察による形 態や元素分析結果から, 鉄細菌により水酸化鉄 (ferrihydrite) が形成されたと考えられる (Table 1C 下欄). なお, Zr は試料の蒸着によるものである.

泉玉露の白色バイオマットにおける SEM-EDS による元素分析結果からは、Sが最も多く、C、Si、 Caも検出された(Table 2D). SやCaは、バイオマッ トにより温泉成分からイオウや石こうを形成してい る(Table 1D下欄). なお、SEM で観察されたケイ ソウが存在するため、その主成分である Si も検出 された.

## 考察

#### 放射能と微生物

微生物の代謝活動により生み出された生体鉱物は 鉱床を作ると同時に、微生物はより高度なものへと 進化し、生命の維持に必要な構造として生体鉱物化 作用(バイオミネラリゼーション)を行っていると 考えられる.独立栄養生物は,太陽の光や酸化還元 作用などのエネルギーを得て生息している.酸素を エネルギーとして利用する呼吸細菌の代表的なもの が S, Mn, Feを酸化・還元して生きられる微生物 である(Tazaki and Hattori, 2009).ほとんどすべて の生命体は体の中にイオウを蓄えており,かつ,硫 化鉱物は太古の海底熱水環境に一般的に存在し,触 媒としての機能を持っていた.現在も独立栄養化学 合成生物はさまざまな場所に生息し,赤,白,緑, 黒,黄色などのバイオマットを作っている(田崎, 2010).

近年、世界各地における原発事故と水爆実験の 影響を反映し、放射線抵抗性細菌についての研究 報告が多くなった(Alve and Murray, 1999; Lioyd and Macaskie, 2000 ; Yong and Mulligan, 2004 ; Mulligan et al., 2007; Krejci et al., 2011; 久保ほ か、2011; Vysotskii and Kormilov, 2011; Tazaki, 2013;田崎、2012;田崎ほか、2013a、2013b;田 崎ほか、2014a、2014b)、実例として、Abdelouas (2006) は高濃度の重金属や放射性核種によるウラ ン鉱床のズリの環境汚染について報告している。汚 染された地下水やズリから U.<sup>226</sup>Ra.<sup>222</sup>Rn.<sup>230</sup>Th. Asが放たれ、周囲の土壌、河川水、地下水に影響 を及ぼす. その中で、土着のバクテリアは成長し、 細胞の周囲に鉱物粒子を付着している電子顕微鏡写 真が示されている. さらに、ロシアのバイカル湖の バイオマットには Ca と U が濃集している (Tazaki et al., 2001). このように微生物は高放射線量の環 境下でも繁殖が可能で. 放射性元素を濃集する働き がある.

2011年3月11日の東京電力福島第一原子力発 電所の事故により,多量の放射能核種が放出し,大 気中のみならず海洋にも流出し,3年たった現在で も放射能汚染は深刻な状態である.本研究によりゲ ルマニウム半導体検出器,ガイガー・ミュラーカウ ンター(GM計数管,単位 cpm)を併用すること で,烏崎の白色バイオマットでは長半減期の放射 性核種の存在を知ることができた.微生物は細胞 内に取り込んだ元素を濃縮し鉱物化する作用があ る.特に,比表面積が大きく,孔が多い構造をもつ 珪藻や有孔虫に放射性核種が沈着・固定されてい る(Tazaki, 2013;田崎ほか, 2013a, 2013b;田崎 ほか、2014a:2014b). 今回の結果は、バイオマッ トが放射性物質を取り込んでいることを示唆してい る. バイオマットの鉱物化作用により形成された石 こう、ハライト、水酸化鉄はいずれも放射性核種と 化合物を作りにくいので、放射性核種は微生物・有 機物と微量の粘土鉱物に吸着していると考えられる. さらに、放射性核種は南相馬市内のバイオマットで 確認され、いわき市内のバイオマットでは確認され ていない. これは、放射性核種を烏崎の白色バイオ マット、東ヶ丘公園の赤褐色バイオマットが取り込 み、固定化したものと考えられる. 放射性核種の存 在については、今後、SEM-EDX だけではなく別の 方法によっての検証を進める.

ウラン鉱床やズリ捨て場において,鉄細菌により 放射性核種を効率的に回収できる実例が多く報告さ れている(Waite *et al.*, 1994; Lioyd and Macaskie, 2000; Yong and Mulligan, 2004; Mulligan *et al.*, 2007; Krejci *et al.*, 2011; Cygan and Tazaki, 2014). さらに,汚染環境における微生物の応用と利用によ り環境回復した例も報告されており,現地の粘土や 土着の土壌微生物の挙動を考慮したバイオレメディ エーションも有望の方法の一つとなっている(田崎, 2010;田崎ほか, 2013a, 2013b).

人体にとって有害な重金属汚染地帯や放射線障害 を与える汚染地域において、微生物によるバイオミ ネラリゼーションは持続可能な環境修復法として期 待される.

さらに、2013年10月14日に烏崎で採取した試 料で実施したゲルマニウム半導体検出器による放射 性核種分析は、2012年9月15日に採取された試 料でも実施されており(田崎ほか、2014、2014b), 両者の結果を比較すると、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csはともに線 量が約1/5に減少している、<sup>134</sup>Csの物理的半減期は 2.06年で、<sup>137</sup>Csのそれは30.3年であり、測定結果 による減少量と物理的半減期とは合致しない.この 物理的半減期と1/5への減少の違いは微生物の働き による吸着、吸収、固定、鉱物化よる作用によるも のと示唆され、放射性物質を微生物体内に吸収、固 定し、鉱物化作用により遮蔽することで拡散を防ぐ 『ミクロ石棺』として役立つ可能性がある.

### 放射能と温泉

秋田県玉川温泉,鳥取県三朝温泉,山梨県増富鉱 泉,台湾の北投温泉は放射性物質を産出することで 知られている.また,放射能を持つ北投石が微生物 により作り出されている.これらの微生物は実験室 で培養しなくとも,現地で採取した試料はそのまま 電子顕微鏡で観察・分析ができる.かつ,微生物が 内因や外因により変化する様子を短時間で観察でき るメリットがある.水素イオン濃度がpH 1.2,温 度が99.5℃の強酸性・高温の玉川温泉には赤褐色 バイオマットが広く分布し,その線量は5000 – 5700cpm,そして,バライト(BaSO<sub>4</sub>)が生成して いる(Tazaki and Watanabe, 2004; Tazaki, 2009).

さらに、三朝温泉の黒色バイオマットは温泉水 が 0.17  $\mu$ Sv/h に対して、バイオマットは 11.9  $\mu$ Sv/ h と高く、<sup>238</sup>U (6.4Bq/kg)、<sup>226</sup>Ra (6.9×10<sup>4</sup>Bq/kg)、 <sup>228</sup>Ra (8.3×10<sup>4</sup> Bq/kg)、<sup>228</sup>Th (8.8×10<sup>3</sup>Bq/kg) を 含んでいる.このバイオマットは低結晶性の水酸化 鉄鉱物 (ferrihydrite) とマンガンを高濃度に濃縮し ている (藤澤・田崎、2007).中性の三朝温泉 (pH 7.2) のバイオマットの化学組成は Fe が 66.0wt%、 Mn が 15.3wt%、Si が 6.9wt%、Ca が 5.0wt%、As が 4.9wt%、S が 0.5wt%、Sr が 0.2wt% 含まれ、そ の中にはシアノバクテリア、球菌、桿菌が多く生息 している.また、<sup>226</sup>Ra は微生物の狭膜や粘質層な どの細胞外物質をはじめとして、そこに付着してい る微細な水酸化鉄鉱物粒子に吸着している.

以上の実例のように、バイオマット中の非常に 高い<sup>226</sup>Ra値と微生物による濃縮作用は放射性物 質の汚染地域における環境修復法を考える糸口 となる.水酸化鉄鉱物 (ferrihydrite)は広い表面 積(25×105 m<sup>2</sup>/kg)を持つため、有害元素、重金 属、放射性核種を鉱物表面に吸着する働きを持つ (Schwertmann and Fitzpatrick, 1992).ferrihydrite はその鉱物表面に、中性水溶液中の6価ウランを吸 着する(Waite *et al.*, 1994).

地震後に温泉水が噴出したいわき市内郷高坂町お よび泉玉露の温泉水は、温泉水を伴う常磐炭田の範 囲に当たり、地下深部では、類似した酸化還元環境 にあったことが推察される.しかし、地表に噴出す る温泉水は、内郷高坂町が泉玉露に比べ酸化的な水 質であるのに対し、泉玉露では、著しく還元的であっ た. これは内郷高坂町の温泉水がズリ山を崩した埋 土内を通過し,酸素に接触することで酸化されたも のと推察される.一方,泉玉露では炭鉱の坑道内に 湧出した温泉水が地上まで通じる立坑から噴出した ため,還元的な状態にあった.内郷高坂町の温泉水 は,泉玉露に比べて酸化的環境にあるため,還元性 細菌が繁殖せず,微好気性の鉄酸化細菌により温泉 水に溶け込んでいた鉄分を濃集したものと推察され る.

泉玉露の温泉水は 2011 年 4 月 11 日の余震により 常磐湯本温泉のパイプラインが破壊されたために噴 出した.泉玉露の温泉水の水質は Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>型である が,常磐湯本温泉は含イオウ - ナトリウム - 塩化物・ 硫酸塩温泉とされ,やや異なる水質を示した.こ れは,温泉水に形成された白色バイオマットが,還 元性細菌の作用により温泉成分の  $SO_4^{-2}$  や HS<sup>-</sup> をイ オウとして濃集したことを示している.さらに,白 色バイオマットでは温泉成分に含まれる  $Ca_2^+$  およ び  $SO_4^{-2}$  から石こうが形成されており,温泉成分の  $SO_4^{-2}$  が減少したもう一つの原因となっている.

このように、福島県内に形成されたバイオマット は、環境変化に適応した微生物が棲み分けをし、特 定の元素を濃集し固定化する作用がある.このよう なバイオマットによる元素濃集作用は、汚染され た水や水辺の環境回復への活用、放射性元素濃集作 用は原発事故により長期間にわたって影響が懸念さ れる放射性物質の除染に活用することが期待できる. 本研究で対象とした微生物による環境回復は大規模 な機器やプラントを必要としないことから、持続可 能で安価な方法としての利用が期待される.

## 謝 辞

金沢医科大学の竹原照明氏,石垣靖人博士,中川 秀昭博士には走査型電子顕微鏡観察およびエネル ギー分散分析を行うにあたり,便宜を図っていただ いた.株式会社堀場製作所の宮坂真太郎氏には,エ ネルギー分散型・走査型電子顕微鏡装置による化学 組成分析において,ご指導いただいた.福島県の常 磐炭鉱温泉株式会社および庄建技術株式会社には現 地調査において便宜を計っていただいた.権上かお る氏,井本香如氏,石橋矩久氏,根本直樹博士,鈴 木祐恵氏,高橋直人博士には野外調査や討論などで ご協力いただいた.また,匿名の査読者の方々には 適切なご意見を頂き,原稿を改善できた.ここに感 謝申し上げる.

## 文 献

- Abdelouas, A. 2006. Uranium mill tailings : Geochemistry, minerarogy, and Environmental Impact. ELEMENTS. 2 : 335-341.
- Alve, E. and Murray, J. W., 1999. Marginal marine environments of the Skagerrak and Kattegat : A baseline study of living (stained) benthic foraminiferal ecology. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology. 146 : 171–193.
- Burgess, S., Li, X. and Holland, J. 2013. High spatial resolution energy dispersive X-ray spectrometry in the SEM and the detection of light elements including lithium. Microscopy and Analysis. 27 : S8-S12.
- Cygan, R. T., and Tazaki, K. 2014. Interactions of Kaolin Minerals in the Environment. ELEMENTS. 10: 195-200.
- 藤澤亜希子・田崎和江.2007. 温泉水のバイオマットにおける放射性元素の濃集.化石研究会誌. 40:52-62.
- 堀場製作所. 2010. エネルギー分散型X線分析装置. EMAX Energy Dispersive X-ray Micro Analysis. 堀場製作所. 京都. 21p.
- 気象庁.2011.災害時地震・津波速報 平成23年
   (2011年)東北地方太平洋沖地震.気象庁.災
   害時自然現象報告書2011年第1号.224p.
- Krejci, M. R. Wasseman, B., Finney, L. and McNulty, I. 2011. Selectivity in biomineralization of barium and strontium. J. Struct. Bio. 176 : 192.
- 小島貞夫・須藤隆一・千原光男編.1995.環境微生 物図鑑.講談社サイエンティフィック.東京. 758p.
- 国分牧衛・南條正巳・日塔明広・塚田祥文・根本圭介・ Peter Slavich・島田和彦・近藤始彦・井上眞理. 2013. 東日本大震災からの農業再生と作物生産

技術. 日本作物学会紀事.82:86-95.

- 久保 幹・森崎久雄・久保田謙三・今中忠行.2011. 環境微生物学;地球環境を守る微微生物の役割 と応用.化学同人.東京.188p.
- Lioyd, J.R. and Macaskie, L.E. 2000. Bioremediation of radionuclide-contaminated wastewaters. In : Lovley, D.R. (Ed.). Environmental microbemetal interactions. ASM Press. Washington, D.C. 277-327.
- Mulligan, C.N. 著. 福江正治・佐藤義夫・小野信一訳. 2007. 技術者のためのバイオトリートメント; 生物分解による廃液・土壌・空気・地下水およ び廃棄物の浄化. 東海大学出版会. 秦野. 428p.
- Schwertmann, U. and Fitzpatrick, R.W. 1992. Iron minerals in surface environment. In: Skinner, H.C.W. and Fitzpatrick, R.W.(Eds) Biomineralization processes of Iron and Manganese-Modern and Ancient Environments. Catena Suppl. Germany No. 21 : 7-30.
- 坂口孝司.1996. ウランの生体濃縮.九州大学出版 会.190p.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター. 2013. 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震(M7.0) に伴う温泉の変化.産業技術総合研究所地質調 査総合センターホームページ.https://unit.aist. go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen.html.
- 霜島康浩・高橋直人・田崎和江・竹原照明・石垣靖人・ 中川秀昭.2014.東日本大震災後に噴出した福 島県いわき市浜通りの二つの温泉の泉質とバイ オマットの特徴.河北潟総合研究.17:31-45.
- 小豆川勝見.2014.みんなの放射線測定入門.岩波書 店.120p.
- Tazaki, K. 2009. Observation of microbial mats in radioactive hot springs. The Science Report of Kanazawa University. 53 : 25-37.
- 田崎和江.2010. バイオミネラリゼーションからみ た微生物の進化と地球環境.化石研究会会誌. 42:206-215.
- 田崎和江.2012. 微生物を生かした放射性物質汚染 土壌処理技術開発の可能性.斉藤勝裕編.東日 本大震災後の放射性物質汚染対策.株式会社エ ヌ・テイ・エス (NTS).120-136.

- Tazaki, K. 2013. Clays, micro-organisms, and biomineralization. In: Bergaya, F., and Lagaly, G.(Eds.). Handbook of Clay Science Volume 5 Second edition. Elsevier. 613-654.
- Tazaki, K., Miyata, K., Belkova, N. and R, Asada. 2001. Sr-rich microbial mats at Zhemchug hot springs, southwest Lake Baikal, Russia. The Science Report of Kanazawa University. 46 : 67-78.
- Tazaki, K. and Watanabe, H. 2004. Biomineralization of radioactive sulfide minerals in strong acidic Tamagawa Hot Springs. The Science Report of Kanazawa University. 49 : 1-24.
- Tazaki, K. and Hattori, T. 2009. Bacterial contribution to precipitation of manganese nodules in freshwater environments: An electron microscope study of experimental biomineralization by cultured bacteria. The Science Report of Kanazawa University. 53 : 39-54.
- 田崎和江・竹原照明・石垣靖人・中川秀昭・根本直 樹・横山明彦・木村 元.2013a. 放射能汚染環 境における生物の元素濃度分布.河北潟総合研 究.16:7-24.
- 田崎和江・竹原照明・石垣靖人・中川秀昭. 2013b. 放射能汚染した水田土壌と生物における Sr, Cs, Np, Pu の分布. 化石研究会会誌. 46:35-57.
- 田崎和江・霜島康浩・根本直樹・鈴木克久・竹原照 明・石垣靖人・中川秀昭.2014a.津波被害を受 けた水田に形成したバイオマットの放射能除染 能力の可能性(前編) – 福島での災害の実態と 地域に根ざした取り組み – . 地学教育と科学運 動.72:59-71.
- 田崎和江・霜島康浩・根本直樹・鈴木克久・竹原照 明・石垣靖人・中川秀昭.2014b. 津波被害を受 けた水田に形成したバイオマットの放射能除染 能力の可能性(後編) – 福島での災害の実態と 地域に根ざした取り組み – . 地学教育と科学運 動.73:63-69.
- Vysotskii, V. I. and Kormilova, A. A. 2011. Lowenergy nuclear reactions and transmutation of stable and radioactive isotopes in growing biological systems. J. Condenced Matter Nucl.

Sci. 4 : 146-160.

- Yong, R. N. and Mulligan, C. N. 2004. Natural attenuation of contaminants in soils. CRC Press, Boca Raton. 319p.
- Waite, T.D., Davis, J.A., Payne, T.E., Waychunas G.A. and Xu, N. 1994. Uraniumu(VI) adsorption to ferrihydrite: Application of a surface complexation model. Geochimica et Cosmochimica Acta 58 : 5465-5478.