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

霜島康浩¹·高橋直人²·田崎和江³·竹原照明⁴·石垣靖人⁴·中川秀昭⁴

¹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
 ²株式会社日さく北信越支社 〒950-0891 新潟県新潟市東区上木戸 1-8-13
 ³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
 ⁴金沢医科大学総合医学研究所 〒929-0342 石川県河北郡内灘町大学 1-1

要約:2011年3月11日に発生した M9.0の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.そして,その1カ月後の4月11日に発生した M7.0の地震時に,いわき市泉玉露の立坑からも高温の温泉水が噴出した.この2つの温泉について,放射線量,水質,バイオマットの特徴,生成鉱物について明らかにした.内郷高坂町の温泉水はpH7,ECは180mS/m,ORPは90mVと酸化的であり,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顕著に認められた.泉玉露の温泉水はpH8,ECは430mS/m,ORPはマイナス240mVと非常に還元的で,イオウシバが繁茂し,イオウと石こうが形成されている.それらの地域一帯は,1977年まで石炭の採掘が行われていた常磐炭鉱の跡地であり,地質はよく似ている.形成されるバイオマットの違いは,温泉水が噴出する過程で水質や酸化還元環境が変化することにより微生物が棲み分けをしていることで生じたものであると考えられる.

キーワード:東日本大震災,放射線量,温泉水,バイオマット,微生物

Characteristics of Microbial Mats and Hot Spring Water of Two Locations in Hamadori Iwaki City, Fukushima Prefecture, That Gushed Out After the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011, Japan.

SHIMOJIMA, Y. , TAKAHASHI, N. , TAZAKI, K. , TAKEHARA, T. , ISHIGAKI, Y. , NAKAGAWA, H.

Abstract; A hot spring water gushed out from the foundation and drainpipes of a house in Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima Prefecture, after the Great East Japan Earthquake of magnitude M9.0 on March 11, 2011, Japan. The other hot spring water also gushed out from the shafts of Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, after the earthquake of M7.0 on April 11. In this study, characteristics of these hot spring water and microbial mats with radioactivity were investigated and compared with each other. This area used to be the site of the Joban coal mine until 1977. The hot spring water quality is oxidative by pH7, EC180mS/m, and ORP90mV, and the reddish brown microbial mats formed by the iron bacteria such as *Leptothrix ochracea* were found at Uchigo-Takasakamachi. The other water quality is reductive by pH8, EC430mS/m, and ORP -240mV, associated with gypsum, sulfur minerals and sulfur turf at Izumi-Tamatsuyu. Differences of microbial mats formed in Izumi-Tamatsuyu and Uchigo-Takasakamachi is arose by the segregation of microorganisms due to the changes of redox environment and water quality in the course of hot spring water gushed out.

Keywords; The Great East Japan Earthquake, radioactivity, hot spring water quality, microbial mats, bacteria



Fig.1. Location map of study area.

A :Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima where is a hot spring water gushed out after the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011.

B:Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima where is a hot spring water gushed out after an earthquake on April 11, 2011.

図1. 研究調査位置図(いわき市エリアマップを改図). A:2011 年 3 月 11 日の地震で温泉が噴出した福島県いわき市内郷高坂町. B:2011年4月11日の地震で温泉が噴出した福島県いわき市泉玉露.

はじめに

福島県いわき市の常磐湯本温泉地域では2011年 3月11日のマグニチュード M9.0を記録した東北地 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、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月現在も湧出している.

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地 震は.3つの巨大な震源断層の破壊が連続して発生 したため、地震の規模が大きくなり、マグニチュー

11日に発生した東北地方太平洋沖地震の1ヶ月後, 2011年4月11日17時16分ごろに福島県浜通りの 深さ約 5km の浅い震源で M7.0 の直下型余震が発生 した.この地震は、東北地方太平洋沖地震の直後に 活断層にそって発生した最大の内陸地震であり、海 溝で発生する巨大地震との関連が示唆される(石山 ほか,2011;杉戸ほか,2011;東京新聞,2011).

これらの地震による活断層、温泉湧出のメカニズ ムについての報告は多い.しかし、地震に関連する 温泉噴出とバイオマットの形成についての科学的 データの報告はされていない.本研究では、この2 つの噴出した温泉について, 放射線量, 温泉の水質, ドは M9.0 となった (気象庁, 2011). 2011 年 3 月 バイオマット中の微生物および含有鉱物について検

調査地の概要

本研究の2つの調査地は、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であり、こ れらの周辺は常磐炭田が広く分布する地域として知 られている.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 間地点に位置している(図1).常磐炭田の湯本や内 郷地区では、排湯対策が課題であり、1936年に入 山第六坑の坑内作業中に、突然湧き出た温排水は湯 本川に廃棄されていた.1957年に内郷地区の採炭 を終了した常磐炭鉱は、内郷市御厨町に御厨排水立 坑を設け、新川に地下の排湯を放流した(常磐炭田 史研究会、2008).

調査地周辺には古第三紀鮮新世の白水層群に区分 される岩城層や白坂層が分布する.岩城層は細粒~ 中粒砂岩・礫岩からなり石炭層を伴い,白坂層は泥 岩層より構成される.これら古第三紀層の下位に 白亜系の花崗岩類・閃緑岩類が分布する(福島県, 1994,1995).両地域は井戸沢断層と湯ノ岳断層に 近い場所であり,これらの断層は2011年4月11日 の地震により活動した活断層とされている.この地 震により井戸沢断層と湯ノ岳断層にそって,地表地 震断層と考えられる地表変状が長さ10km以上に わたり出現した(国土地理院地理地殻活動研究セン ター,2011).

いわき市内郷高坂町は、かつては常磐炭鉱のズリ 山となっていた場所で、ズリ山を崩して住宅団地が 造成された。内郷高坂町の家屋の敷地内では2011 年3月11日の地震により、排水管や水抜き孔など 約20カ所から温泉が流れ出している。当初2カ所 から温泉が出てきたが、その場所が変動し、1カ所 が止まると新しい所から湧き出している。このため 周囲の地盤が沈下し、敷地内は一時、足が埋まるぐ らいまで地面が柔らかくなり、20cmほど地盤が下 がった(福島民報、2011).2011~2013年の湧出 量は、毎秒2~6リットル、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リットルであり、湧出量に大きな変化は認 められない.

内郷地区は、常磐炭田石城北部地区の中核をなす 地域であった。1957年に内郷地区の採炭が終了す ると1967年にはズリ山を崩して高坂住宅団地が造 成された.すなわち、内郷高坂町の家屋はズリ山を 崩して埋め立てた土地に建てられ、地盤がゆるいた め、2011年3月11日の地震により温泉水が噴出し たと考えられる.

一方,いわき市泉玉露は常磐炭田の西端にあたり, 地下約 600m 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,立坑から多量の温 泉水が噴出した.常磐炭鉱では 1977 年に西部坑が 閉山となり全面閉山となった(石山,2002).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 600m の排温水が湧出す 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.

試料および分析方法

放射能線量の測定

本研究に用いた放射線測定器 GM サーベイメー タ TGS-136 (β (γ)線用)は、微量の β 線を効率 よく測定できるので、汚染箇所などの精密な測定が 可能である。GM サーベイメータ TGS-136 は放射 線が 1 分間に"何回"入ったかという数(cpm)で 測定される、本研究では、金沢大学 RI センターに おいて、絶対値(137Cs線量率校正線源; γ 線のみ) と(137Cs線源 Am: americium; β 線+ γ 線)をも とにして GM サーベイメータ TGS-136 を校正した. 1000cpm は 1.52 μ Sv/h に相当し、2-3 割の誤差があ る.放射能線量測定では、地表面より 1m の位置で 空間線量を測定し、路面や試料の線量はビニールで 保護した検出器を対象に接触させて測定した。

試料の観察および測定・分析方法

内郷高坂町の家屋の土台の水抜き穴から噴出した 温泉水についてpHと電気伝導度(EC),水温,酸 化還元電位(ORP),放射線量を現地にて測定した 後,温泉水と赤褐色バイオマットを採取した.また, 泉玉露においても,現地水質測定と放射線量測定後, 立坑から噴出する温泉水と白色バイオマットを採取 した. 採水した温泉水は主要イオンの分析を行っ た. イオン分析は, イオンクロマトグラフィーを用 い, JIS K 0102 もしくは上水試験方法による公定分 析を実施した. イオンクロマトグラフィーは, 無機 イオンの分析のために開発され, 環境関連の多くの 分野で活用され, 試験方法が定められている(後藤, 2011).

現地調査は2011年11月14日,2012年1月3 日,2014年1月12日に実施し,2012年1月3日, 2014年1月14日には温泉水とバイオマットを採取 した.現地測定では,HORIBA製B-212型pHメー タ,B-173型電気伝導率計,カスタム製ORP-6041 型ORP計を用いた.

バイオマット中の鉱物の同定を行うためにメノウ 乳鉢で粉末にしたものを水に溶かした後,ガラス板 に塗り,X線粉末回折分析を行った.分析には理学 電機製 RINT2200型X線回折装置を使用し,CuKa 線を用いて電圧 40 kV,電流 30 mA で測定した.

バイオマット試料は,OLYMPUS 製 BX-60 型光 学顕微鏡を用いて観察を行った.さらに,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(加速電圧 15kV,電流 70-80µA). 採取したバイオマットの化学組成は,日本電子製 JED-2100 型機器を用いてエネルギー分散型 X 線分 析(EDS)による定性分析を行った.

視野に対応した微小領域の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日立製 S-3400N 型走査型電子 顕微鏡 (SEM-EDS)を用いて,加速電圧 15kV,電 流 70-80µA,分析時間 1,000 秒で元素濃度分布写真 を得た.

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; 田崎ほか, 2013a, 2013b).

調査および測定・分析結果

いわき市内郷高坂町の現地調査結果

2011年11月14日の初回調査時には家屋の土台 の北側(図2A)と西側(図2B,C)の水抜き孔から は約27℃の温泉が噴出し、赤褐色と黒色のバイオ マットの形成が認められた(図2).この時点では、 約20カ所の水抜き孔のうち数カ所はすでに湧出が 止まっており、そこには乾燥した赤褐色バイオマッ トの痕跡が認められた。2014年1月現在、多量の 温泉水が湧出している周辺にはバイオマットは幅広 く形成しているが、湧出量の衰退のため、中心部分 のみが湿っている状態の水抜き孔も認められた(図 2C) 西側奥の部分の赤褐色バイオマットは乾燥し ているが、その下層から新たな温泉水の湧出が認め られ、その周辺には黒色バイオマットが湿った状態 で観察される.これはコンクリート壁の裏側の上層 と下層とでは土壌・地質が異なっており、上層の赤 水の湧出が止まった後に、下層の水が湧出を始めた ことを示唆している (図 2C).

地域住民の情報によれば、この地域は元常磐炭鉱 が地下水をくみ上げて溜めてあった貯水槽の場所で ある. 貯水槽を埋め立てた後もこの周辺一帯からは 常時, 渋水(赤水)が出ていたとのことである. そ の後, 住宅が建てられ, 最初のころは西側(図2B) から多量の温泉水が出ていたが, その後その湧出は 止まり, 新たに他の水抜き孔から温泉水が出るよう になった.

いわき市泉玉露の現地調査結果

いわき市泉玉露において噴出した温泉水は,土の うとU字溝で南側に流れる釜戸川へ流す措置が施さ れた(図3).温泉水には白色のバイオマットと緑色 藻類の形成が認められた(図3A).釜戸川の排水口 にはイオウシバと呼ばれる白色の糸状物質が大量に 形成しているのが認められた(図3B,C).

常磐湯本温泉では地下 600m の炭鉱坑道に湧出し た温泉水を地下約 40 ~ 50m の貯湯層までパイプ で導き,そこからポンプでくみ上げている.これ は,坑道に設置された配湯管が地震により破壊され て,立坑から温泉水が噴出したことを裏付けている.



Fig.2 Hot spring water gushed out from underneath the house in Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima, showing reddish brown and black microbial mats. (A;taken on January 12, 2014, B,C,D; November 14, 2011.)

図2 温泉噴出の様子とバイオマットの生成.

2011 年 3 月 11 日の地震で温泉が噴出した福島県いわき市内郷高坂町の住宅の北側の土台(A)と西側の水抜き穴(B,C,D).(A;2014 年 1 月 12 日に撮影, B,C,D;2011 年 11 月 14 日に撮影). 温泉水の流出する周囲には赤褐色(A,B,D)や黒色(C)のバイオマットが形成している.

空間線量,バイオマットの放射線量,および水質測 定

いわき市内郷高坂町および泉玉露の空間線量測定 の結果を表1に,温泉水の現地水質測定結果を表2 に示す.温泉水については2012年1月に採水した 内郷高坂町の赤褐色バイオマット形成地点と黒色バ イオマット形成地点,泉玉露の3試料および2014 年1月に内郷高坂町の赤褐色バイオマット形成地点 と泉玉露で採水した2試料について水質分析を行っ た(表3).参考として常磐湯本温泉の成分表からイ オン等量に換算した値も示す. いわき市内郷高坂町の2011年11月の放射線量 測定では、空間線量は100-140cpmであったのに対 し、バイオマットは430cpm、アパート周辺の道路 面や排水溝では400-430cpmと約4倍高かった.流 出する温泉水は110-140cpmと低かった(表1).内 郷高坂町の水質測定では、平均で水温25℃,pH7, EC180mS/m,ORP90mVであった.2011年11月 の水質測定では、赤褐色および黒色バイオマットの 酸化還元電位は、温泉水と比較していずれも低い値 を示した.特に、黒色バイオマットの酸化還元電位 は-53mVと、還元的な環境にある(表2).



Fig.3 Hot spring water gushed out in Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, showing green algae (A) and white sulfur turf near drainage pipe (B,C).

図3 2011年4月11日の地震で温泉が噴出した泉玉露(A). 排水口には白色のイオウシバが繁茂している(B,C). CはBの破線円の接写. (A:2011年11月14日に撮影, B,C:2014年1月12日に撮影).

バイオマットが異なる色を呈した内郷高坂町の3 種類の温泉水の水質は、いずれも Na⁺ (Ca²⁺) -SO₄²⁻ 型を示した.全鉄およびマンガン濃度については、 赤褐色バイトマットを形成した水抜き穴からの温泉 水の方が約2倍の濃度を示した.2年後の2014年 に採水した温泉水では全鉄濃度が2012年の分析値 に比べ40倍以上となった(表3).

いわき市泉玉露での2011年11月の放射線量 測定では、立坑周辺の住宅地の空間線量は150-180cpmであるが,排水溝の上は330cpmと高い(表 1).泉玉露の水質測定では、平均で水温55℃, pH8, EC430mS/m, ORP -240mV であった. この温泉水 の酸化還元電位は -190mV ~ -300mV と, 著しく還 元的な環境を示した (表 2).

泉玉露における温泉水の水質は強い Na⁺-Cl⁻型を 示した. 常磐湯本温泉の泉質は含イオウ-ナトリ ウム-塩化物・硫酸塩温泉とされ, SO₄²⁻含有量は 7.1meq/Lである. 2012年に採水した泉玉露の SO₄²⁻ 含有量は常磐湯本温泉に比べて 1/2と少ない. 2014 年に採水した温泉水の SO₄²⁻含有量は 2 年前に比べ 2/3に減少しているが, SO₄²⁻以外の含有量に大きな 違いは認められない (表 3).

Table 1 Radiation dosage in Uchigo-Takasakamachi and Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima. (Measurement on November 14, 2011 and on January 12, 2014)

表1 地震で温泉が噴出した福島県いわき市内郷高坂町および泉玉露の放射線量. (2011年11月14日, 2014年1月12日測定).

測定E]		試料採取地	(単	位 cpm)		
		福島県いわき市内約 2011.3.11. の地震	郡高坂町 で噴出		福島県い 2011.4.11.	わき市泉玉露 の地震で噴出	
2011/11/	[14 空]	間線量	100-140	_	空間線量	150-180	_
	道	路面	300		排水溝	330	
	排	水溝	430				
	温	泉水	110-140				
	バ	イオマット	430				
	コ	ンクリート面	400				
	道	路面	140-165				
	階.	段上の隙間	140				
2014/01/	/12 空	間線量	100-140				
	バ	イオマット	60-90		イオウシバ	60-70	
	道	路割れ目	150		乾燥後	80	
	枯	れ草	100				
	地	衣類	230				

Table 2 Hot spring water analysis in Uchigo-Takasakamachi and Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima. (Measurement on November 14, 2011, January 3, 2012, and January 12, 2014). 表 2 地震で噴出した温泉水の水質. (2011 年 11 月 14 日, 2012 年 1 月 3 日, 2014 年 1 月 12 日測定).

採取地		ŕ	畐島県いわ 2011.3.11.	き市内郷高坂町 の地震で噴出		福島県いれ 2011.4.11.	っき市泉玉露 の地震で噴出
試料		温泉水 (赤褐色バイ オマット形 成部分)	赤褐色 バイオ マット	温泉水 (黒色バイオ マット形成 部分)	黒色 バイオ マット	温泉水	白色 イオウシバ
水温	2011/11/14	28.0		27.0		60.0	60.0
(°C)	2011/11/18	17.5		17.5		17.5	
	2012/01/03	25.5		24.3		46.9	
	2014/01/12	22.0		21.0		59.0	
pН	2011/11/14	6.8-7.1		7.0		7.7	
	2011/11/18	8.9	8.8	8.8	8.7	9.0	
	2012/01/03	7.0		7.0		7.8	
	2014/01/12	7.3		7.1		8.0	
EC	2011/11/14	123-127		124-126		310	
(mS/m)	2011/11/18	187	183	185	189	453	
	2012/01/03	173		179		462	
	2014/01/12	186		183		480	
ORP	2011/11/18	271	117	281	-53	-196	
(mV)	2012/01/03	47		50		-194	
	2014/01/12	-82		-21		-331	

Table 3 Chemical analysis 表3 福島県いわき市内郷高	of hot spring w 技町および泉玉	ater in Uc 露の温泉フ	higo-Tal 水の水質	sasakam および化	achi and 学組成	l Izumi-7 分析結果	l'amatsu	yu, Iwak	i City, Fı	ukushin	1a.			
採取地	探水日			~	オン当量 (meq	·换算值 (L)				Hq	EC (mS/m)	全鉄 (mg/L)	マンガ゛ン (mg/L)	が大を報告
	I	$\mathrm{Na}^{\scriptscriptstyle +}$	\mathbf{K}^{+}	Ca ²⁺	${ m Mg}^{2_+}$	CI_	HCO ₃ ⁻	SO_4^{2-}	NO3 ⁻)) ,	(mg/L)
いわき市内郷高坂町 (赤褐色バイオマット部分)	2012/01/03	8.26	0.08	8.48	1.15	2.20	4.75	10.62	0.00	8.1	129	0.07	1.10	22
いわき市内郷高坂町 (黒色バイオマット部分)	2012/01/03	8.26	0.07	7.98	1.15	2.37	4.59	10.62	0.00	8.0	124	<0.03	0.44	22
いわき市内郷高坂町 (赤褐色バイオマット部分)	2014/01/12	8.70	0.06	8.48	1.07	2.60	4.75	10.41	0.01	7.2	162	3.00	1.10	22
いわき市泉玉露	2012/01/03	31.32	0.28	4.99	0.43	31.03	3.28	2.91	0.00	7.8	323	0.07	0.07	43
いわき市泉玉露	2014/01/12	32.19	0.33	5.99	0.25	33.85	2.13	1.89	0.01	8.0	408	0.13	0.05	44

-:データなし

0.00

8.2

0.00

7.13

0.00

17.42

0.10

3.00

0.18

23.51

温泉揭示資料

磐城湯本温泉

河北潟総合研究 17, 2014

38



Fig.4 X-ray powder diffraction analysis of the microbial mats.

A: Reddish brown microbial mats in Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima. Formation of lowcrystalline iron hydroxide minerals.

B: White sulfur turf in Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima. Formation of sulfur and gypsum. 図4 バイオマットの X 線粉末回折分析

A: 福島県いわき市内郷高坂町の赤褐色バイオマット;低結晶性水酸化鉄鉱物の生成 B: 福島県いわき市泉玉露の白色イオウシバ;イオウと石こうの生成

X 線粉末回折分析結果

内郷高坂町の赤褐色バイオマットの定方位試料の 分析結果では,3.3 Åおよび2.0 Å付近にブロード な反射を示し,非晶質物質の存在を示している(図 4A).水質分析結果による全鉄濃度が増加している ことや後述する SEM-EDS による元素分析結果では 鉄のピークが強く検出されたことから、これは低結 晶性水酸化鉄($Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$)であると同定した.

泉玉露の白色バイオマットの定方位試料の分析結 果では、イオウ(S)のほか石こう(CaSO₄•2(H₂O)) の反射が認められた(図4B).石こうは温泉水の水 質分析により確認された Ca²⁺ および SO₄²⁻ から形成



されたものと考えられ、イオウは **SEM-EDS** でピー クが検出されている.これは、白色バイオマットで は温泉成分に含まれる **SO**² がイオウだけではなく 石こうの形成にも利用されていることを示している.

バイオマットの観察と分析結果

内郷高坂町の赤褐色バイオマットの光学顕微鏡の 観察では、太さ 1~2µmの長管状構造とその周囲に 褐色の微細な付着物が多数観察される(図 5A).長 管状物質は分岐のない直線的な形態を示している. SEM 観察では太さ 1~2µmや7µmの太さ、長さの 多種多様な長管状の微生物とそれに付着する球状の 物質が顕著である(図 5B,C).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 が集合したものである。その表面には粘 土粒子が付着している.なお、黒色バイオマットは、 藻類の集合体である.

EDS による元素分析結果からは,鉄(Fe)およ び酸素(O)のピークが強く検出され,ケイ素(Si), カルシウム(Ca),炭素(C)のピークも検出された(図 5D).

SEM-EDS による元素濃度分布写真では、長管状の鉄細菌が分布する範囲で、鉄、カルシウム、イオ

- Fig.5 Observations of reddish brown microbial mats in Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima.
 - A: Optical microscope observation.; Long tubular microorganism with iron particles.

B: Scanning electron micrograph.; Iron-oxidizing bacteria form the microbial mats.

C: Scanning electron micrograph.; Hundreds of iron bacteria with diverse size and shape are found in microbial mats.

D: Energy dispersive spectrum of the reddish brown microbial mats.

図5 福島県いわき市内郷高坂町における赤褐色バ イオマットの観察およびエネルギー分散分析ス ペクトル.

A:光学顕微鏡写真;中空の長管状微生物と鉄の 微粒子.

B:走査型電子顕微鏡写真;長管状鉄酸化細菌が 集合したバイオマット.

C:走査型電子顕微鏡写真;太い管と細い中空の 管がみられ,管の表面を微粒子が覆っている.

D:赤褐色バイオマットのエネルギー分散型分 析のスペクトル.



Fig.6 Analytical electron micrograph of reddish brown microbial mats and the elemental content maps in Uchigo-Takasakamachi, Iwaki City, Fukushima.

図 6 福島県いわき市内郷高坂町における赤褐色バイオマットの走査型電子顕微鏡写真(SEM)と主要な 元素の濃度分布写真。



Energy(KeV)

Fig.7 Observations of white sulfur turf in Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima.

A: Wriggle microscopic structure of sulfur turf by the scanning electron microscope.

B: Microorganisms in the of sulfur turf by the scanning electron microscope.

C: Energy dispersive spectrum of the sulfur turf.

図7 福島県いわき市泉玉露における白色イオウシ バの電子顕微鏡観察およびエネルギー分散分析 スペクトル。

A:走査型電子顕微鏡によるイオウシバのくねったような微細形態.

B: 走査型電子顕微鏡によるイオウシバ中の微生物の微細形態.

C:イオウシバのエネルギー分散分析のスペクト ル. ウ,塩素が濃集し,かつ,炭素,酸素も広く分布する. これは,水質分析結果と整合する.一方,ナトリ ウム,アルミニウム,ケイ素が濃集した微粒子が局 在し,長石類または粘土粒子と推定される(図 6).

泉玉露の白色バイオマットの SEM 観察では,粘 着物質により表面がなめらかになった糸状の物質が 認められる(図7A).糸状物質には長さ40~50µm の長管状の微生物も認められた(図7B).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(SO₄²⁻ や HS⁻ など) を取り込んで生育するイオウシバである.

EDS による元素分析結果からは、イオウ(S)のピー クが強く検出され、その他に若干の酸素(O)、炭素 (C) が検出された(図7C).

SEM-EDS による元素濃度分布写真では、広い範 囲でイオウが濃集し、ナトリウム、カルシウム、塩素、 カリウムも認められ、かつ、炭素や酸素も広く分布 する。これらは、バイオマットにより濃集されたイ オウや石こうである、ケイソウも多数確認され、そ の殻にはケイ素が濃集している(図8).

考察

2011 年 3 月 11 日の地震後に噴出した内郷高坂 町の温泉水では、赤褐色および黒色のバイオマッ トが形成された.赤褐色バイオマットは鉄細菌 Leptothrix ochracea が集合体を形成し、鉄を濃集 したものである. Leptothrix ochracea による鉄濃 集作用は、無機沈殿の5倍以上とされており(佐 藤・田崎,2004)、鉄細菌が鉄・マンガン元素を濃 集したことを示している. 2011年11月の放射線量 測定では空間線量と比較して、排水溝やバイオマッ トの放射線量は相対的にやや高い値を示した.なお. 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ウラン、ラジ ウム 226、ラドン 222、トリウム 230、ヒ素が放た れると周囲の土壌、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を示して いる。

泉玉露の温泉水は2011年4月11日の余震によ



Fig.8 Analytical electron micrograph of white sulfur turf and the elemental content map in Izumi-Tamatsuyu, Iwaki City, Fukushima.

図 8 福島県いわき市泉玉露における白色イオウシバの走査型電子顕微鏡写真(SEM)と主要な元素の濃度分布写真.

り常磐湯本温泉の配管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⁺-Cl⁻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 温泉であり,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 $SO_4^{2^{2}}$ や HS⁻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 $Ca^{2^{4}}$ および $SO_4^{2^{2}}$ か ら石こうが形成されており,温泉成分の $SO_4^{2^{2}}$ が減 少したもう一つの原因となっている.

内郷高坂町と泉玉露との温泉水の比較では,内郷 高坂町では,ズリ山を崩した埋土内を通過した温泉 水であり,この際に地層中の成分を溶かし込むこと や地下水が混ざることで水質が変化し,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,常磐湯本温泉の水質に近く,還元的な状態 にある.内郷高坂町の温泉水にはSO4²が10meq/L 以上含まれるが,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,イオウや石こうが形 成されなかったものと推察される.このように両地 区に形成されたバイオマットの違いは,温泉水の湧 出過程で生じた水質や酸化還元環境の変化による微 生物の棲み分けによりもたらされたものといえる.

放射能と微生物との相互作用については、多く の研究や報告がある(Abdelouas, 2006; Cuif and Sorauf, 2011). 秋田県玉川温泉や鳥取県三朝温泉 では、 微生物により放射性物質が濃集されたバイオ マットが形成されている(Tazaki, 2009). 今回の 原発事故後の放射能汚染環境下において、微生物や バイオマットには放射性物質が濃集されている(Li et al., 2004; Tazaki, 2009; 田崎ほか, 2013a, 2013b). 津波被害を受けた水田では、ケイソウを主体とする 白色バイオマットに石こうと放射性物質が濃集され ている(田崎ほか,2014).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.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).

バイオマットを形成する微生物は温泉水に含まれ

る鉄やイオウなどの元素を濃集する働きがある.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, 安価な方法としての利用が期待できる.

謝 辞

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,産総研の宮下由香里博 士,山形大学の大友幸子博士,石橋矩久氏,鈴木祐 恵氏には野外調査でご協力いただいた.金沢大学の 奥野正幸博士にはX線粉末回折分析をご指導いただ 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.これらの方々に感謝申 し上げる.

文 献

- Abdelouas, A. 2006. Uranium mill tailings : Geochemistry, minerarogy, and Environmental Impact. ELEMENTS. 2 : 335-341.
- 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.
- Cuif J.P., Dauphin, Y., and Sorauf, J.E. 2011. Biominerals and fossils through time. Cambridge University Press. 490pp.
- 福島県.1994.土地分類基本調査,平5万分の1国 土調査.
- 福島県.1995.土地分類基本調査,川辺・小名浜5 万分の1国土調査.
- 福島民報.2011.10月12日版.市民生活に今も影; 温泉流出止まず,深刻な地盤沈下.
- 後藤良三.2011.イオンクロマトグラフと環境測定. かんぎきょう.108.15-16.

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,21pp.

- 石山達也・佐藤比呂志・杉戸信彦・越後智雄・伊藤 谷生・加藤直子・今泉俊文.2011.2011年4月 11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層 とそのテクトニックな背景.日本地球惑星科学 連合2011年大会.MISO36-P105.
- 石山揚子. 2002. 常磐炭田の時代;ヤマに生きた記 億.発行・編集いわき市. 286pp.
- 常磐炭田史研究会.2008.写真が語る常磐炭田の歴 史.平電子印刷所.203p.
- 気象庁. 2011. 平成 23 (2011) 年東北地方太平洋沖 地震について(第15報).
- 国土地理院地理地殻活動研究センター.2011.いわ き市内陸部における4月11日福島県浜通りの 地震に係わる災害現地調査報告.13pp.
- Li, S., Shen, J., and Xu, H. 2004. Mineralogy and geochemistry: Resources, environment and life. Geological Publishing House. Beijing, China. 256p.
- 佐藤一博・田崎和江. 2004. 中性 pH に生息する Leptothrix ochracea の鉄濃集作用.環境技術学 会.33:57-65.
- 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.センターホームページ https://unit.aist.go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen. html

- 杉戸信彦・石山達也・越後智雄・佐藤比呂志・加藤 直子・今泉俊文.2011.2011年4月11日の福 島県浜通りの地震に伴う地表地震断層とその変 位量分布(速報).日本地球惑星科学連合2011 年大会.MISO36-P106.
- 小豆川勝見.2014.みんなの放射線測定入門.岩波書 店.120pp.
- Tazaki, K. 2009. Observation of microbial mats in radioactive hot springs. The science reports 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. 化石研究会誌. 42: 206-215.
- 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.2014. 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.
- 東京新聞. 2011. 2011 年 11 月 22 日版. 湯ノ岳は活 断層.