

## 長崎県橘湾における浅海底熱水系

武田 重信<sup>\*1</sup>, 田中 大揮<sup>\*2</sup>, 高尾 芳三<sup>\*3</sup>, 兼原 壽生<sup>\*2</sup>Shallow submarine hydrothermal system in Tachibana Bay,  
Nagasaki, JapanShigenobu TAKEDA<sup>\*1</sup>, Daiki TANAKA<sup>\*2</sup>, Yoshimi TAKAO<sup>\*3</sup>  
and Hisao KANEHARA<sup>\*2</sup>

Distribution of hydrothermal activities and chemical composition of surrounding sediments were investigated for shallow submarine hydrothermal systems in Tachibana Bay, Nagasaki, Japan as a first step to elucidate its possible influences to the coastal ecosystem. Based on the observations of fumarolic gas emissions using quantitative echosounder, existence of hydrothermal activities was confirmed at 33-34 m depth near the coast of Obama hot springs. These were many small (2-6 mm in diameter) holes on the surface of the bottom sediment, and the area of the fumarolic gas emissions had a horizontal scale of 6-63 m. Hot (78°C) and dark subsurface-sediment at the hydrothermal activity region showed unusual elemental composition characterized by higher contents of Al, S and As, and lower amounts of Ca, Cl and Br compared with that of the typical coastal sediment.

**Key Words** : 熱水噴出孔 Hydrothermal vent, 橘湾 Tachibana Bay, 堆積物 Sediment

沿岸域に存在する浅海底熱水系では、湧出する熱水が有光層内にまで拡散するため、周囲のベントス群集だけでなく、動植物プランクトンを始めとする多様な沿岸生態系の構成生物に影響を及ぼしている可能性がある。高温高压下の堆積物中での化学反応を経た熱水には、硫化水素やヒ素など生物活動に悪影響を及ぼし得る様々な還元性化学物質が含まれている一方、アンモニアや溶存ケイ酸、鉄などの栄養素も比較的高濃度で存在している<sup>1-3)</sup>。また、植物プランクトンなどの必須栄養素でもある銅や亜鉛など親銅元素は海底下あるいは噴出孔付近で速やかに硫化物となって沈殿して特徴的な熱水鉱床を形成するとともに、熱水中の二価鉄は海底直上で溶存酸素等により急速に酸化されて水酸化物として沈殿する。熱水中に含まれるヒ素の一部も噴出孔の近傍で沈殿堆積するが、その大部分は水和酸化鉄と共沈したもので、生物に利用され難い形態であることがサンゴ礁内の浅海底熱水系で報告されている<sup>4)</sup>。しかしながら、比重の軽い熱水に含まれるヒ素な

どの溶存物質は速やかに海表面に拡散して植物プランクトンに取り込まれて、浮遊生態系の食物網を介して生物濃縮される可能性も指摘されている<sup>5)</sup>。このように、熱水の噴出量や噴出孔からの距離、拡散状況によって浅海底熱水系が沿岸生態系へ及ぼす影響は複雑に変化すると考えられる。

長崎県の橘湾では、水深22m付近に120~128°C、pH8.7の熱水を湧出する浅海底熱水系が存在し、熱水噴出孔付近から好熱性の真正細菌および超好熱古細菌が採取されている<sup>6,7)</sup>。しかし、この浅海底熱水系の位置や規模などの詳しい情報については記載されていない。一方、湾東岸に位置する小浜温泉地先の水深16-20mの海底 (Fig. 1) には、長さ40m幅10mの岩盤が露出しており、岩盤の各所にある小さな噴出口から熱水が出ていたことが潜水調査によって報告されている<sup>8)</sup>。また、長崎県の雲仙活断層群に関する調査報告書<sup>9)</sup>では、小浜温泉の沖合に存在する谷状の海底地形部において音響探査観測により海底からの噴気あるいは湧水と思われる柱状に立

- 
- \* 1 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科  
Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki University
  - \* 2 長崎大学水産学部  
Faculty of Fisheries, Nagasaki University
  - \* 3 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所  
National Research Institute of Fisheries Engineering

ちる影の存在を捉えている。ただし、その近傍には海底活断層は確認されていない。小浜温泉の源泉温度は105℃と熱量が高く、温泉水量も1日当たり約15000トンと豊富であることから、地先だけでなく、その沖合でも熱水が湧出している可能性は高いと考えられる。橋湾の中央部付近でも、浅海底熱水系に由来すると推測される気泡を漁業者が目視したとの情報がある。このように、橋湾には浅海底熱水系が複数存在している可能性は高いと考えられるが、橋湾の生態系に熱水がどのような影響をどの程度及ぼしているのかは不明であった。

そこで本研究では、まず音響探査により浅海底熱水系に係る噴気場所を調査し、その近傍における熱水の拡散状況

を把握するとともに、海底堆積物を採取して化学組成を分析することにより、熱水系に特徴的な富金属堆積物が存在するかどうかを明らかにすることを目的とした。

## 方 法

橋湾での観測は、長崎大学水産学部附属練習船鶴洋丸により2011年5月9日（第284次航海）と8月9日（第305次航海）に実施した。調査は橋湾の中央付近から東側の海域を中心とする広い範囲で行ったが、特に浅海底熱水系の存在が予想された小浜沖において詳細な観測を実施した。小浜沖の調査地点をFig.1に示す。

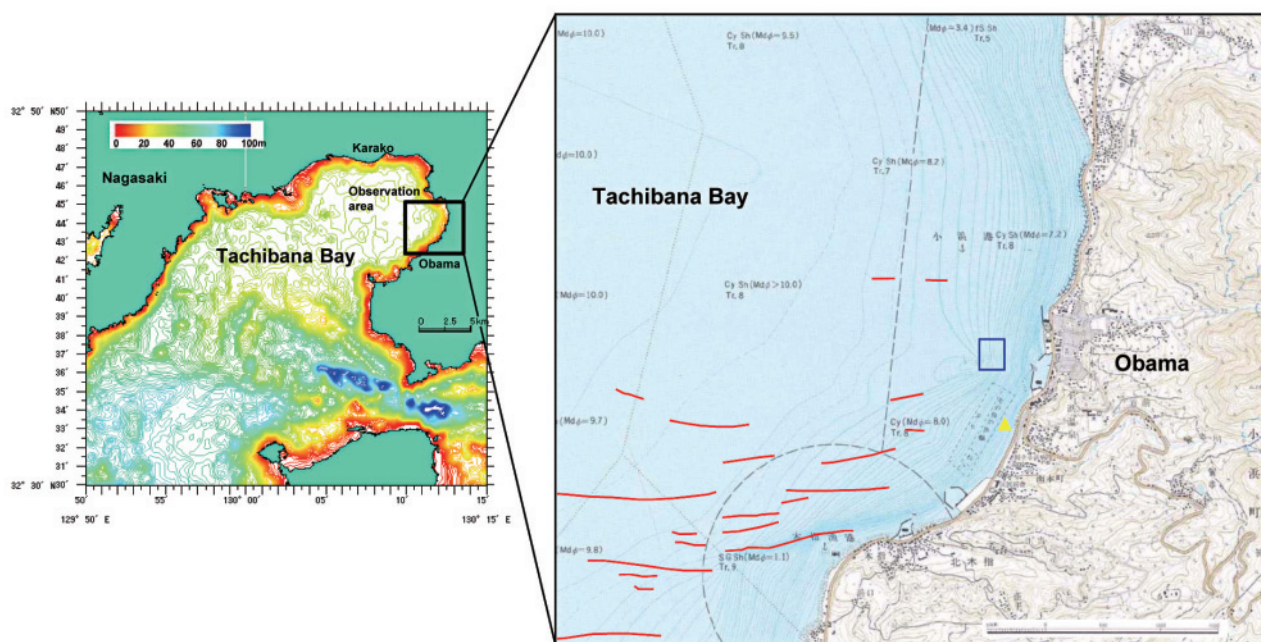


Fig. 1 Location of the main observation area of the hydrothermal activities in Tachibana Bay, Nagasaki, Japan. Map data used in the right panel is from Topographical Map of Coastal Areas (1/25000) "Hizen Obama" issued by Geospatial Information Authority of Japan. Blue rectangle is an area shown in Fig. 3. Yellow triangle indicates the position of a rock bed associated with geothermal water emanation.<sup>8)</sup> Red lines in the map indicate the location of submarine active faults.<sup>9,10)</sup>

音響探査には鶴洋丸に搭載されている計量魚群探知機（フルノ、FQ-80）を周波数38kHzにて使用した。

航海中は、船底（2.5m）からポンプでくみ上げた海水の水温、塩分を表層環境モニタリングシステム（日本海洋、STNF-2）により連続測定した。

噴気が確認された地点においては、海底付近の状況について水中ビデオカメラを用いて観察記録するとともに、スミス・マッキンタイヤ型採泥器を用いて表層堆積物を採取し、-20℃で凍結保存して研究室に持ち帰った。

海底堆積物試料は、冷蔵庫内にて1晩放置して解凍したのち、遠心分離（3000rpm、20分）により間隙水を上澄み液として取り除き、残った堆積物を105℃で一晩乾燥した後、メノウ乳鉢を用いて粉碎してデシケーター内に保存した。調製した堆積物試料は、ポリプロピレンフィルム（5 μm厚）を底面に装着した粉体用プラスチック容器（7 ml容量）に入れ

て元素分析に供した。

元素分析にはエネルギー分散型蛍光X線分析装置（島津製作所、EDX-800HS、Rhターゲット）を用いた。X線照射のコリメータは直径10 mmとし、真空条件下にてNa~Scは加速電圧15 kV；取り込みエネルギー範囲0~20 keVで、Ti~Uは50kV；0~40 keVで各元素の蛍光X線強度を積分時間100秒でカウントした。得られたデータに基づき、Na~Uの各元素の重量%をファンダメンタルパラメータ法<sup>11)</sup>により定性定量した。

## 結果および考察

### 浅海底熱水系の位置

小浜温泉沖合の水深33~34m付近の海底から、噴気と思われる複数の筋状に立ち上がる影が、計量魚群探知機の画像

に捉えられた (Fig. 2(1), (2))。図中に矢印で示したA地点とD地点は南北方向に隣接していて、小浜港から西側に伸びる谷状部の北側斜面に位置し、共に海底面に高さ0.6~1.5mの凹凸が見られる複雑な海底地形となっていたが、B、C地

点の海底の起伏は数十cm以下とほぼ平坦であった。従って、噴気場所と凹凸地形は直接関係していないと思われる。A、D地点では海面付近まで筋状の影が到達していたのに対して、B、C地点では、影が10~20m層付近で途絶えていた。これ

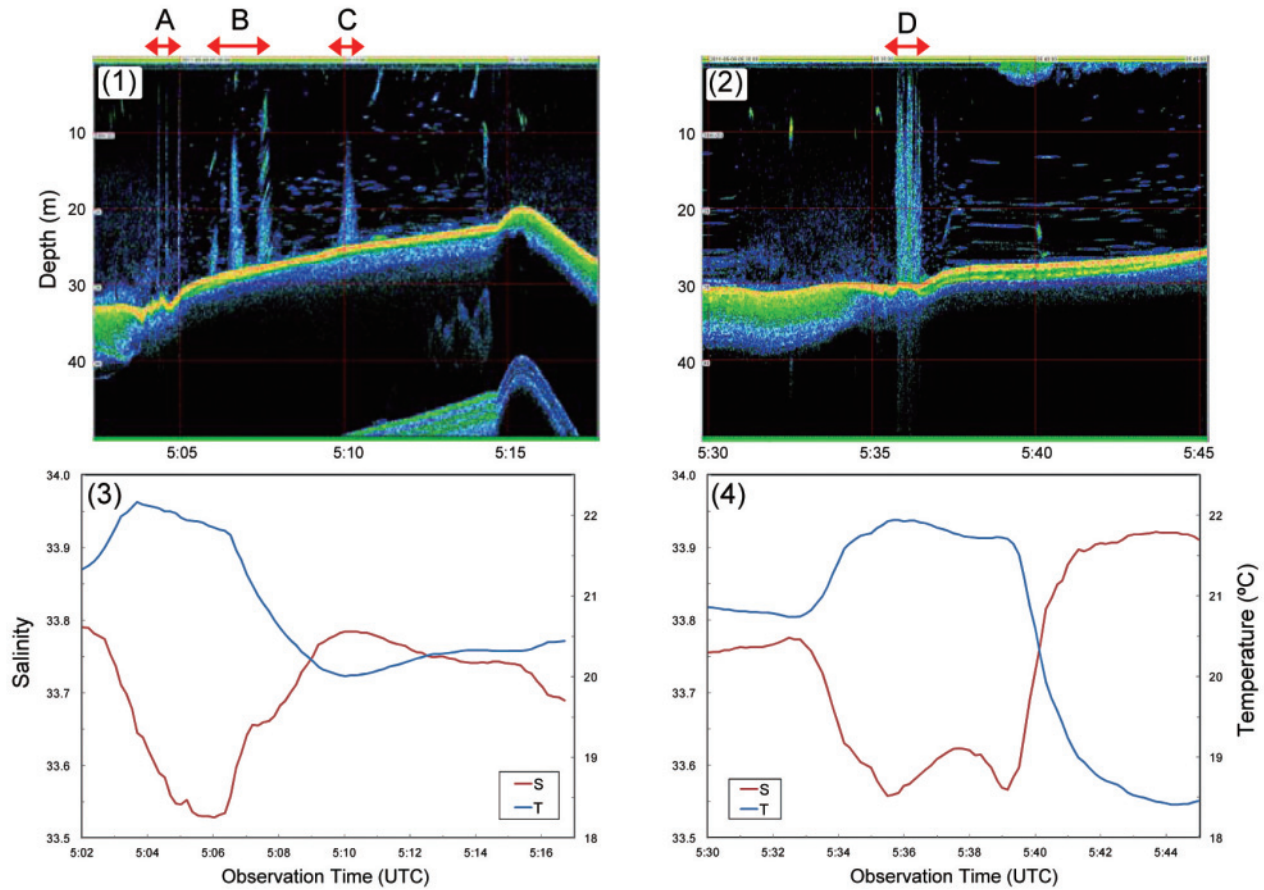


Fig. 2 Color images of the 38 kHz quantitative echosounder indicating fumarolic gas emissions as light blue streaks (1, 2) and changes in salinity (S) and temperature (T) of the surface water measured along the ship's cruise track in 9 May 2011. Red allows (A-D) correspond to Yellow grids in Fig.3 (1) and (2).

は観測中も船が動いていること、使用した計量魚群探知機の音響ビームが鋭く船底近くではサンプリング体積が小さいことから、水面近くまで気泡エコーが連続しなかったためと考えられる。B、C地点のエコーの形状を詳しく見ると、安定して上昇していて、きれいな斜線となっていることが分かる。気泡による散乱は、気泡が“肉眼やカメラで確認困難な微小サイズ”でも、かなり強く音響機器で観測できることが知られているが、C地点近傍でのCTD採水中やA~D地点周辺での観測時には、気泡が複数個ずつ断続的に海面に湧き上がってくる様子が船上から肉眼でしばしば観察された。A地点の筋状の影が細いのは、この時の船速が他の地点の観測時と比べて速かったことが関係している。筋状の影が観測された船位を基に、噴気地点の空間スケールを推定したところ、それぞれA：63m、B：7.2m、5.5m、8.3m、C：6.1m、D：48mと見積もられた (Fig. 3)。計量魚群探知機の画像に見られるエコー形状は、エコー表示レベルの閾値や位置関係が変わることから、今後は、エコー強度を気泡量の指標としてデータ

を整理する必要がある。

筋状の影がみられた地点の周囲では、同時に、表層水の塩分 (約0.2~0.25) の低下と水温 (約1.5℃) の上昇が認められた (Fig. 2(3), (4))。これは温泉水のような低塩分高温の水が噴気地点の近傍から噴出あるいは浸出していたことを示唆している。表層の塩分低下および水温上昇がみられた範囲を船位から推定したところA~B：279m、D：326mであった。

噴気がみられたC地点の近傍の深度26.8mにおけるCTD-ニスキン採水で得られた海水中からは、還元性の2価鉄イオンが518pMと高濃度で検出された<sup>12)</sup>。この採水時の水温と塩分は16.02℃および34.14であったこと、計量魚群探知機の画像においても採水時のCTDの位置が噴気の立ち上がりが見られた場所からずれていたことから、この時の採水は噴気の直上水を捉えたものではないと考えられるが、海水中で速やかに酸化されて消失する2価鉄イオンが高濃度で検出されたことは、その近傍に浅海底熱水系が存在したことを強く示唆している。

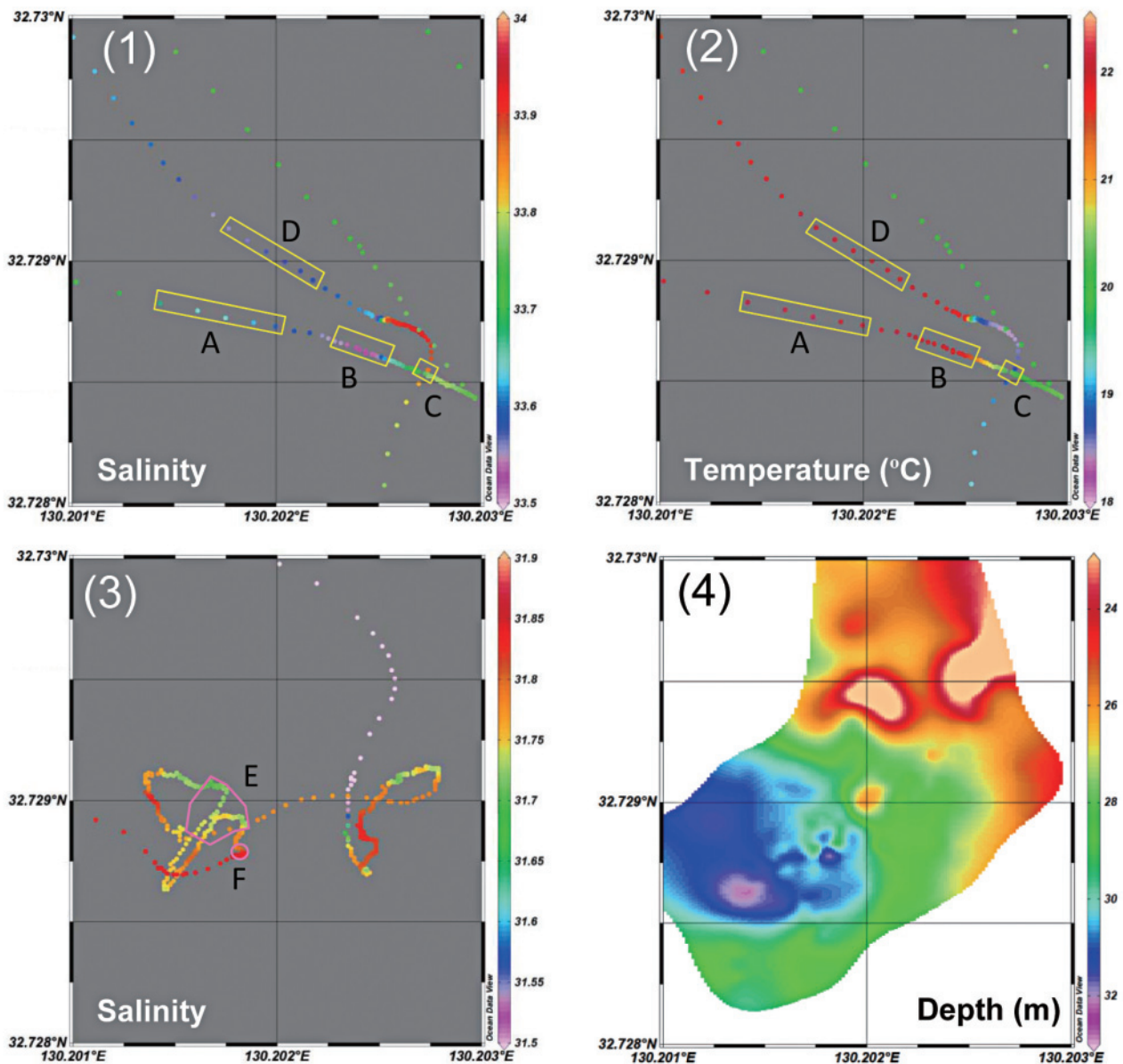


Fig. 3 Distributions of salinity (1, 3) and temperature (2) in the surface water measured along the ship's cruise track in 9 May 2011 (1, 2) and 9 August 2011 (3), and submarine topography (4). Yellow grids A-D in (1) and (2) show the areas where fumarolic gas emissions were indicated by the 38 kHz quantitative echosounder (Fig. 2). Pink grids in (3) show the area observed by an underwater video camera (E), and the sampling site of surface sediment by a Smith-McIntyre grab sampler (F).

2010年10月に実施した予備調査では、上記の小浜温泉沖合以外に、小浜温泉地先と橋湾北部の唐比温泉沖でも、計量魚群探知機の画像で筋状に立ち上がる影が認められ、比較的高濃度の2価鉄イオンが海水中から検出されている。<sup>12)</sup>しかし、2011年の唐比温泉沖の音響探査では、筋状に立ち上がる影は確認できなかった。

#### 噴気地点周辺の海底の状況

計量魚群探知機で筋状に立ち上がる影が見られた地点の周辺 (Fig. 3のEの範囲) において、水中ビデオカメラを用い

て海底付近の状況を観察したところ、計量魚群探知機の画像で見られたのと同様の凹凸地形が確認され (Fig. 4 (1))、海底面に白色の礫が多数散在しているのが特徴的であった。橋湾奥部で通常見られる海底堆積物の表面は浮泥が積もった黒色軟泥であったのに対して、噴気地点周辺の堆積物表面は比較的硬くて茶色であった。海底面に水中ビデオカメラを近づけてさらに詳しく観察したところ、堆積物表面に直径2~6 mmの多数の孔が存在していた (Fig. 4 (2), (3))。しかし、水中ビデオカメラの映像からは、それらの孔の周辺に気泡をはっきりと確認できなかった。

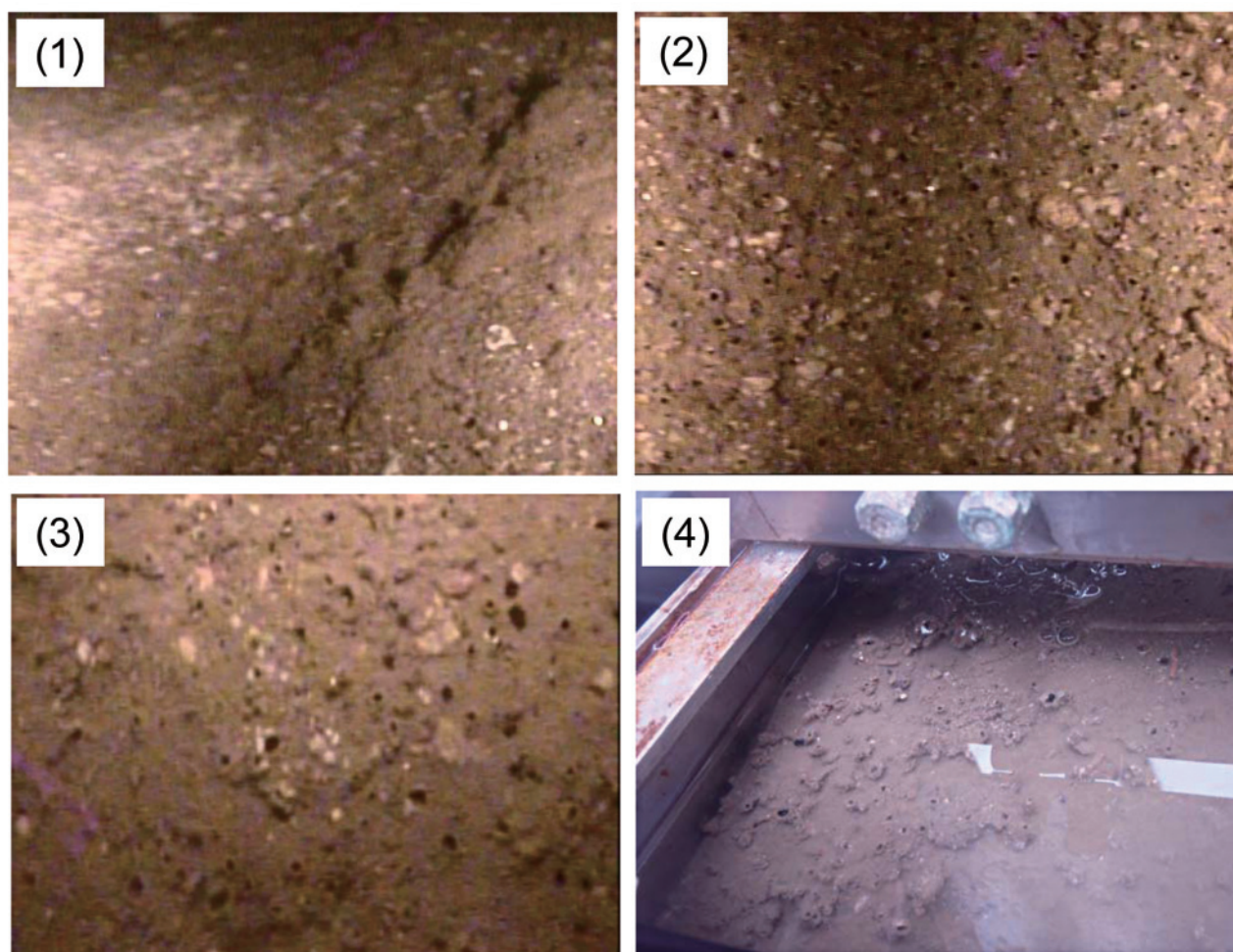


Fig. 4 The seabed at the Hydrothermal area (E in Fig.3(3)) observed by an underwater video camera (1-3), and the surface sediment collected at the Hydrothermal area (F in Fig.3(3)) by a Smith-McIntyre grab sampler (4). Many holes of 2~6 mm in diameter can be seen at the surface of the sediments (2-4).

水中ビデオカメラ観察を行った場所の近傍 (Fig. 3 の F 点) で採泥を行ったところ、ビデオカメラで捉えられた多数の孔が存在する表層堆積物が採取された (Fig. 4 (4))。この堆積物の表面下には黒色でやや砂質の高温部と灰茶色の低温部があり、黒色高温部の温度は、最大78℃に達した。これは過去に小浜温泉沖で採取された熱水噴出孔付近の表層1~10cmの堆積物温度25~75℃<sup>6,7)</sup>と同程度の値である。採取した堆積物の表面の孔の一部からは、採泥器を船上に回収した後しばらくの間、気泡の発生が認められた。堆積物からは強い硫化水素臭は感知されなかった。また、堆積物表面に存在する孔の周囲には盛り上がりが見られた。これは下層の高温砂質層での減圧沸騰で発泡した二酸化炭素を主成分とする気泡などが表層の粘土層が薄いところから海水に吹き出し、周囲の粘土層が持ち上げられたためと推察される。

#### 噴気地点近傍の海底堆積物の化学組成

小浜温泉沖の噴気地点近傍 (Fig. 3 の F 点) から採取した表層堆積物の主要元素組成については、橘湾中央部寄りの浅海底熱水系の影響をあまり受けていないと考えられる堆積

物と比較して、Alの存在比が高く、Caが少なくなる傾向がみられた (Table 1)。表面の茶褐色泥と比べて、亜表層5~20cmの黒色高温部では、Feの含有率がやや高くなっていたが、Fe/Al比は橘湾中央部の堆積物より低い値となっていた。また、黒色高温部にはSが3.2%と他の堆積物の2倍近く含まれており、他の堆積物には検出されないAsが0.2%程度存在した。小浜温泉水には0.4ppm程度の亜ヒ酸が含まれていることから (Table 2)、橘湾の浅海底熱水が小浜温泉水と類似の化学組成をもつと仮定すると、熱水中のAsが難溶性硫化物となって沈着していたものと推察される。その他にも、Baが多く、BrとClが少ないなど、噴気地点近傍の亜表層堆積物は、橘湾中央部の堆積物とは異なる特徴的な元素組成をもつことが明らかになった。鹿児島湾奥部の桜島北東海底に広がる水深約200mの若草カルデラでは、「たぎり」と呼ばれる噴気活動が活発で、熱水活動と密接に関連した黄鉄鉱や輝安鉱、黒鉱様の硫化鉄物の存在が報告されている<sup>9)</sup>。しかし、橘湾小浜温泉沖の堆積物からは、そのような富金属堆積物は検出されなかった。ただし、噴気地点近傍の堆積物中には、しばしばEuなどの希土類元素が極微量ではあるが

Table 1 Elemental composition of Tachibana Bay sediments collected in August 2011.

Element	Hydrothermal area sediment <sup>a)</sup>		Non-hydrothermally influenced sediment <sup>b)</sup>
	Surface brown sediment	Subsurface black sediment	
Si (%)	50.865 ± 0.086 <sup>c)</sup>	47.197 ± 0.092	46.711 ± 0.083
Al (%)	22.658 ± 0.082	26.451 ± 0.097	15.603 ± 0.075
Fe (%)	8.576 ± 0.024	13.647 ± 0.030	9.177 ± 0.022
Ca (%)	5.509 ± 0.022	3.953 ± 0.020	11.422 ± 0.034
Cl (%)	4.227 ± 0.057	N.D. <sup>d)</sup>	6.764 ± 0.055
K (%)	2.526 ± 0.019	2.356 ± 0.020	3.221 ± 0.022
Na (%)	2.123 ± 0.098	N.D.	2.34 ± 0.117
Ti (%)	1.426 ± 0.019	1.634 ± 0.020	0.938 ± 0.014
Mg (%)	1.065 ± 0.040	N.D.	1.912 ± 0.049
S (%)	0.731 ± 0.008	3.604 ± 0.017	1.519 ± 0.011
Ba (%)	N.D.	0.619 ± 0.056	N.D.
Sr (%)	0.148 ± 0.002	0.122 ± 0.002	0.104 ± 0.001
Mn (%)	0.126 ± 0.005	0.157 ± 0.006	0.118 ± 0.005
As (%)	N.D.	0.259 ± 0.010	N.D.
Rb (ppm)	220 ± 10	N.D.	220 ± 10
Br (ppm)	N.D.	N.D.	880 ± 10
Zn (ppm)	N.D.	N.D.	300 ± 20
Zr (ppm)	N.D.	N.D.	320 ± 10

<sup>a)</sup> 32°43.726'N; 130°12.109'E, 34.0 m depth.

<sup>b)</sup> 32°43.730'N; 130°10.026'E, 37.5 m depth.

<sup>c)</sup> Standard deviation.

<sup>d)</sup> Not detected.

Table 2 Chemical composition of Obama hot spring water. <sup>a)</sup>

Component	Concentration (mg/kg)	Component	Concentration (mg/kg)
<b>Cations</b>		<b>Anions</b>	
Li <sup>+</sup>	6.9	F <sup>-</sup>	0.4
Na <sup>+</sup>	2704	Cl <sup>-</sup>	4888
K <sup>+</sup>	283.5	Br <sup>-</sup>	6.6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.4	I <sup>-</sup>	0.2
Mg <sup>2+</sup>	148.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	331.8
Ca <sup>2+</sup>	143.2	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	114.0
Sr <sup>2+</sup>	2.0	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	35.8
Mn <sup>2+</sup>	0.6	<b>Non-dissociative species</b>	
Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	0.6	HAsO <sub>2</sub>	0.4
<b>Trace elements</b>		H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	144.5
Ba	0.042	HBO <sub>2</sub>	63.2
Al	0.034	<b>Dissolved gases</b>	
Zn	0.049	CO <sub>2</sub>	0
		H <sub>2</sub> S	0

<sup>a)</sup> Obama Marine Park hot spring water (101°C, pH 8.1) analyzed by Seibu Environmental Research Co., LTD in August 2009.

検出された。

以上のように、橘湾奥部の小浜温泉沖では、水深30m付近の海底の複数箇所から噴気が起きており、海底表面には多数の小孔が存在することが確認され、そこには周囲と異なる特徴的な化学組成をもつ堆積物が存在していることが明らかになった。噴気地点近傍の亜表層堆積物にはAsが比較的高濃度で存在することから、堆積物が攪乱された場合、そこから溶出するAsのベントス群集への毒性作用が懸念される。噴気地点近傍の底層水中における高濃度の2価鉄イオンの存在は、その周辺に浅海底熱水系が存在することを示唆しており、今後は熱水を直接採取してその化学的特性を明らかにするとともに、そこに含まれている還元性化学物質や堆積物からの溶出物質が、プランクトンやベントス、魚類などを通して沿岸生態系内にどの程度の拡がりをもって転送、濃縮されているのかを調べていく必要がある。

### 要 旨

長崎県橘湾において、浅海底熱水活動域とその分布状況の把握を試みるとともに、熱水噴出孔付近の堆積物を採取して、その化学組成を明らかにした。この研究は、浅海底熱水が沿岸生態系に及ぼす影響を評価するための最初のステップとして位置付けられる。音響探査により、小浜温泉沖合の水深33~34m付近で海底からの噴気が起きていることを確認した。噴気地点周辺の海底面には、直径2~6mmの多数の小孔が見られ、噴気は6~63mの水平スケールで起きていたと推定される。噴気地点近傍の海底には78℃と高温で黒色の亜表層堆積物が存在し、通常の沿岸堆積物と比較して、Al, S, Asが多く、Ca, Cl, Brが少ないという特徴的な元素組成を示した。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、海水中2価鉄濃度データの提供と調査航海におけるご協力を頂いた東京大学大気海洋研究所小畑元准教授と同大学院理学系研究科大学院生脇山真氏に深謝する。水中ビデオカメラの使用に便宜を図って頂いた長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科藤田伸二准教授に厚く御礼申し上げます。同研究科玉置昭夫教授には本研究計画の立案・実行に多大なるご支援を頂き、調査観測では長崎大学

水産学部附属練習船「鶴洋丸」の乗組員の皆様にご協力を頂いた。また、2名の査読者からは有益かつ貴重なコメントを頂いた。心より感謝の意を表する。本研究は、環境省の環境研究総合推進費(D-1104)により実施された。

### 文 献

- 1) V.M.V. Vidal, F.V. Vidal and J.D. Isaacs: *J. Geophysical Res.*, **83**, 1757-1774 (1978).
- 2) S.P. Varnavas and D.S. Cronan: *Chem. Geol.*, **67**, 295-305 (1988).
- 3) P.R. Dando, D. Stuben and S.P. Varnavas: *Prog. Oceanogr.*, **44**, 333-367 (1999).
- 4) R.E. Price and T. Pichler: *Chem. Geol.*, **224**, 122-135 (2005).
- 5) R.E. Price: Biogeochemical cycling of arsenic in the shallow marine hydrothermal system of Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea, Theses and Dissertations, Paper 460, University of South Florida, pp.145 (2008).
- 6) Y. Sako, K. Takai, Y. Ishida, A. Uchida and Y. Katayama: *Int. J. Syst. Bacteriol.*, **46**, 1099-1104 (1996).
- 7) K. Takai and Y. Sako: *FEMS Microbiol. Ecol.*, **28**, 177-188 (1999).
- 8) 財団法人海中公園センター(1972): 小浜海中公園学術調査及び利用計画, 海中公園センター調査報告, 28頁, 長崎県小浜町
- 9) 長崎県(2003): 雲仙活断層群に関する調査, 平成14年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 242頁, 長崎県
- 10) 本田美智子, 岡村真, 松岡裕美, 松岡数充, 原口強, 中村俊夫: 月刊地球, **17**, 506-514 (1995).
- 11) K.K. Nielson and R.W. Sanders: *Adv. X-ray Anal.*, **26**, 385-390 (1983).
- 12) 脇山真, 小畑元, 蒲生俊敬, 武田重信, 兼原壽生: 2011年度日本地球化学会年会講演要旨集, (2011).
- 13) J. Ishibashi, M. Nakaseama, M. Seguchi, T. Yamashita, S. Doi, T. Sakamoto, K. Shimada, N. Shimada, T. Noguchi, T. Oomori, M. Kusakabe and T. Yamanaka: *J. Volcanol. Geothermal Res.*, **173**, 84-98 (2008).