

特別寄稿

鳥取県西部地震の液状化における噴砂と噴水の特性について

Characterization of the boiling sand and water liquefied by the Western Tottori Earthquake, 2000

Abstract

An earthquake (M=7.3) hit the western part of Tottori Prefecture on the 6th October on 13:30, 2000. Liquefaction occurred on reclaimed lands in Tottori and Shimane Prefectures. A large amount of the boiling sands and water are found at Takenouchi industrial area and at Nishikihama. The character of the boiling sand and water were chemically, physically and mineralogically studied. High NaCl contents in the boiling sand and water correspond to pH 6-7 and high EC. The boiling sand consisting mainly of silicate minerals and feldspars, with grain size of approximately 30-40 μ m at Takenouchi and 130-178 μ m at Nishikihama were examined. After ethylene glycol treatment, swelling smectite and halloysite identified by XRD method. In the boiling sand crater, coccus and bacillus bacteria inhabited in yellowish-brown biofilms at Takenouchi. The microorganisms in the biofilms are capable of concentrating of heavy metals in the boiling sand crater.

Key words: boiling sand, boiling water, liquefaction, Western Tottori Earthquake 2000

田崎和江*¹ 石賀裕明*²
道前香緒里*³ 赤坂正秀*²
朝田隆二*⁴ 渡辺弘明*⁴
名倉俊樹*⁴
イスラム・ABM・ラフィクル*⁴
佐々木直哉*⁴ 佐藤大介*⁴
長谷川香織*⁴ 田中義太郎*⁴
永井香織*⁴ 縄谷奈緒子*⁴
脇元理恵*⁴ 池田頼正*¹
北川 陽*¹ 倉繁和也*¹
畠田敏行*⁴ 津谷宜和*⁴

*Kazue Tazaki**¹, *Hiroaki Ishiga**²,
*Kaori Dozen**³, *Masahide Akasaka**²,
*Ryuji Asada**⁴, *Hiroaki Watanabe**⁴,
*Toshiki Nagura**⁴, *Islam ABM Rafiqul**⁴,
*Naoya Sasaki**⁴, *Daisuke Sato**⁴,
*Kaori Hasegawa**⁴, *Yoshitaro Tanaka**⁴,
*Kaori Nagai**⁴, *Naoko Nawatani**⁴,
*Rie Wakimoto**⁴, *Yorimasa Ikeda**¹,
*Yo Kitagawa**¹, *Kazuya Kurashige**¹,
*Toshiyuki Shimada**⁴
and *Yoshikazu Tsuya**⁴

2000年10月27日受付.

2000年12月18日受理.

*¹ 金沢大学理学部地球学科
Department of Earth Sciences, Faculty of Science,
Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa 920-1192, Japan

*² 島根大学総合理工学部
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, 690-8504,
Japan

*³ 日本学術振興会特別研究員
Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Koji,
Chiyoda, Tokyo 102-8471, Japan

*⁴ 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa 920-1192, Japan

はじめに

2000年10月6日13時30分、鳥取県西部で震源の深さ約10km、マグニチュード7.3(暫定)の地震が発生し、最大震度6強を観測した。鳥取県西部地域では、マグニチュード6.0

以上の地震の発生は近年では知られていないが、今回の地震活動域付近では、1990年に今回と同様の方向に分布する地震活動があり、このときマグニチュード5クラスの地震が3回発生している(西山ほか, 1999)。幸い今回の地震による死者、不明者は出ていないが(平成12年10月15日現在、鳥取県庁調べ)、河川や港湾、交通機関に大きな被害を及ぼした。特に中海、弓ヶ浜などの埋め立て地周辺には液状化現象が広い範囲で起こり、道路、河川、建造物の被害を大きくした。

これまで地震に関する研究は、地震の震度、方向、周期などの観測や測定のほか、モニタリングやモデリング、シミュレーションを用いて地殻の構造や変動、火山性地震のメカニズムの解明などがなされてきた(気象庁, 1999, 2000)。特に、鳥取県東部・中部地域に発生した地震の発震機構については多くの研究がある(塩崎ほか, 1998; 西山ほか, 1999; 塩崎ほか, 1999; 住友ほか, 1999; 塩崎・大志万, 2000)。これら鳥取県内の地震と活断層に関連して、地下の破碎帯と地下水の挙動が注目されてきた。もともと活断層には水が付きものであり、その水が地下で断層面をすべりやすくするという考えもある(尾池, 1992)。また、地震時の激しい揺れによって生じる液状化や噴砂についての情報は震源地の方向の特定や間隔の検討にも利用されている(平川ほか, 2000)。さらに、液状化の跡の垂直断面と平面図によって、古地震の特定や噴砂をもたらした地層の沈降状態を知ることできる。一方、活断層調査の現場において、動的全応力解析を実施した同じブ

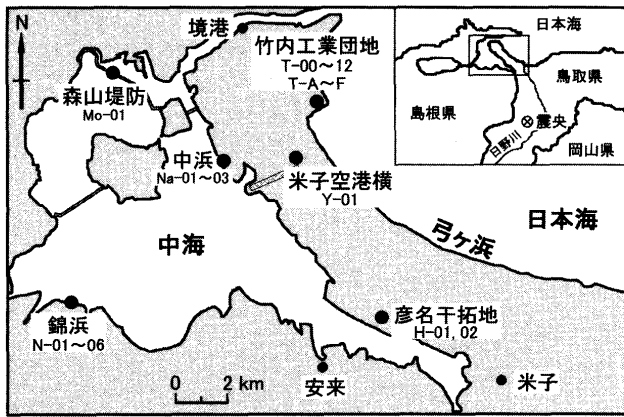


Fig. 1. Index map of Yumigahama Peninsula and the epicenter of the Western Tottori Earthquake 2000, showing sample locations. Numbers; correspond to those given in XRF analytical results of Table 3.

ロックで動的有効応力解析を行い、直接的に間隙水圧を求め、各深度の有効応力と間隙水圧の比から液状化の判定を行っている(池田ほか, 2000)。しかし、液状化現象は現象の実態が明らかにされつつあるが、液状化現象における水自体の性質や化学組成、さらに噴砂自体の化学的、鉱物学的検討はほとんど行われてこなかった。液状化した物質、特に土壌、噴砂、噴水の性質を調査・研究したデータとしてここに速報する。なお、本液状化物質の詳細および液状化現象自体の検討は別途報告することとする。

そこで、本報告では、鳥取県西部地震の折りに液状化現象が大規模に認められた鳥取県および島根県内における干拓地、特に錦浜、森山堤防、彦名、中浜、米子空港横、竹内工業団地、弓ヶ浜の合計7か所において、液状化現象が発生した直後(2000年10月7日、8日)の噴水、土壌、噴砂などを採取し、それらのサンプルについて、水質測定、粒度分析、鉱物組成、顕微鏡観察などにより水質と噴砂の両面から検討を行うとともに、NaCl濃度と粘土鉱物の相互作用の詳細な検討を行い、さらに、微生物学的な視点からも観察および分析を行った。

地理・地質概説

鳥取県西部地震による被害調査および液状化現象の調査は、鳥取県と島根県にまたがる中海と弓ヶ浜半島の8か所で行った(Fig. 1)。中海は1963年に始まった干拓事業による4つの干拓地をもつ汽水湖である。弓ヶ浜半島は中海と美保湾を分かち全長18km、幅4kmの砂州であるが、明治以前からの埋立てや、米子空港の整地、中海干拓事業などによって、その地形を変化させている(鹿野・吉田, 1985; 鹿野ほか, 1994)。また、弓ヶ浜半島には地下水が賦存し、飲用、灌漑用水として利用されてきたが、近年、その水質汚染が問題となっている(道前ほか, 2000)。当調査地域は第四紀の主に泥・砂・礫・泥炭層などの堆積層である弓ヶ浜層、安来層、境港層、中海層と基盤の大根島玄武岩から成る第四系が分布している(大西, 1988; 徳岡ほか, 1990)。中海層は中海から弓ヶ浜半島の湖底と地下に広く分布する。現在、鹿野ほか

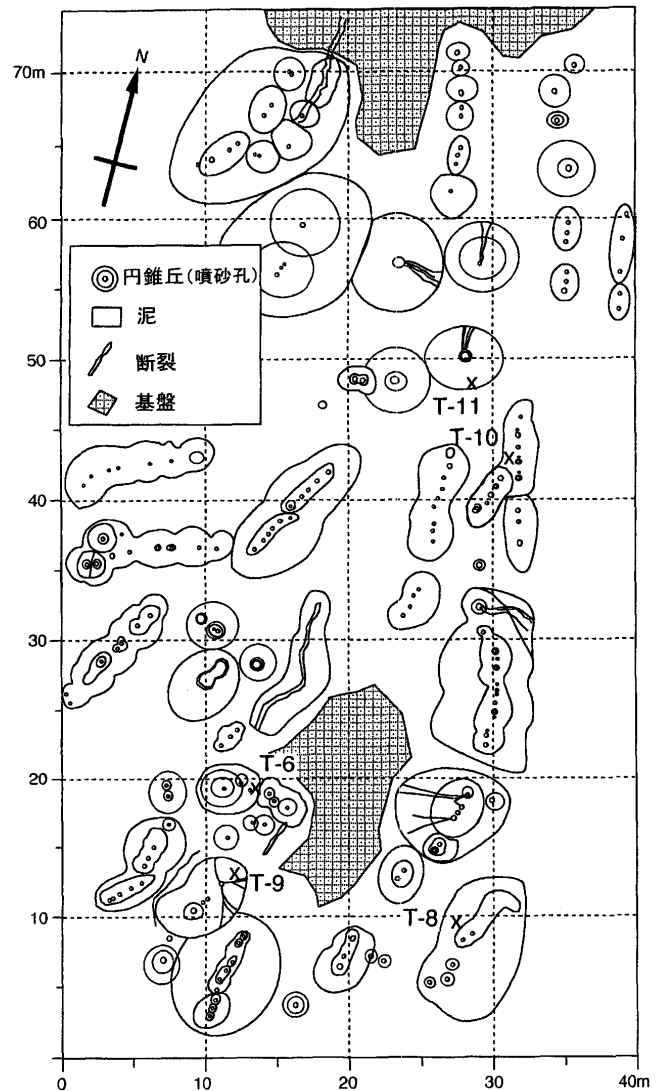


Fig. 2. Distribution of the boiling sands (pseudo-mud volcanoes) in Takenouchi reclamation in the northern Yumigahama Peninsula.

(1994)は弓ヶ浜層と安来層を差海層とし、中海層の地表にある層とその延長部を砂洲および海岸砂丘堆積物として記載している。本調査研究で、液状化による噴砂が見られたのは、島根県の錦浜(中海干拓揖屋工区)と森山堤防(中海干拓本庄工区)、鳥取県の彦名干拓地(中海干拓彦名工区)、中浜(中海干拓弓浜工区)、米子空港横、竹内工業団地(竹内埋立地)である(Fig. 1, 3)。なお、寺見・三梨(1983)は、中海・宍道湖周辺の沖積平野における液状化発生危険度を以前から予測しており、上記の4地点は“液状化の可能性が大きい”地域と推定されていた場所と一致する。今回の地震によりこれらの干拓・埋立地は、星野(1984)による1983年の日本海中部地震による八郎潟干拓堤防や水田での報告と同様に、液状化による噴砂や噴水のみならず、地割れ、陥没、建造物倒壊など、大きな被害を蒙った。

竹内工業団地では噴出した砂がほかの地域に比べて細粒(主にシルト)であるため、噴砂現象の保存状況がよい。Fig. 2に竹内工業団地南東部の液状化による噴砂のルートマップを示す。ルートマップは南北75m、東西40mの範囲について

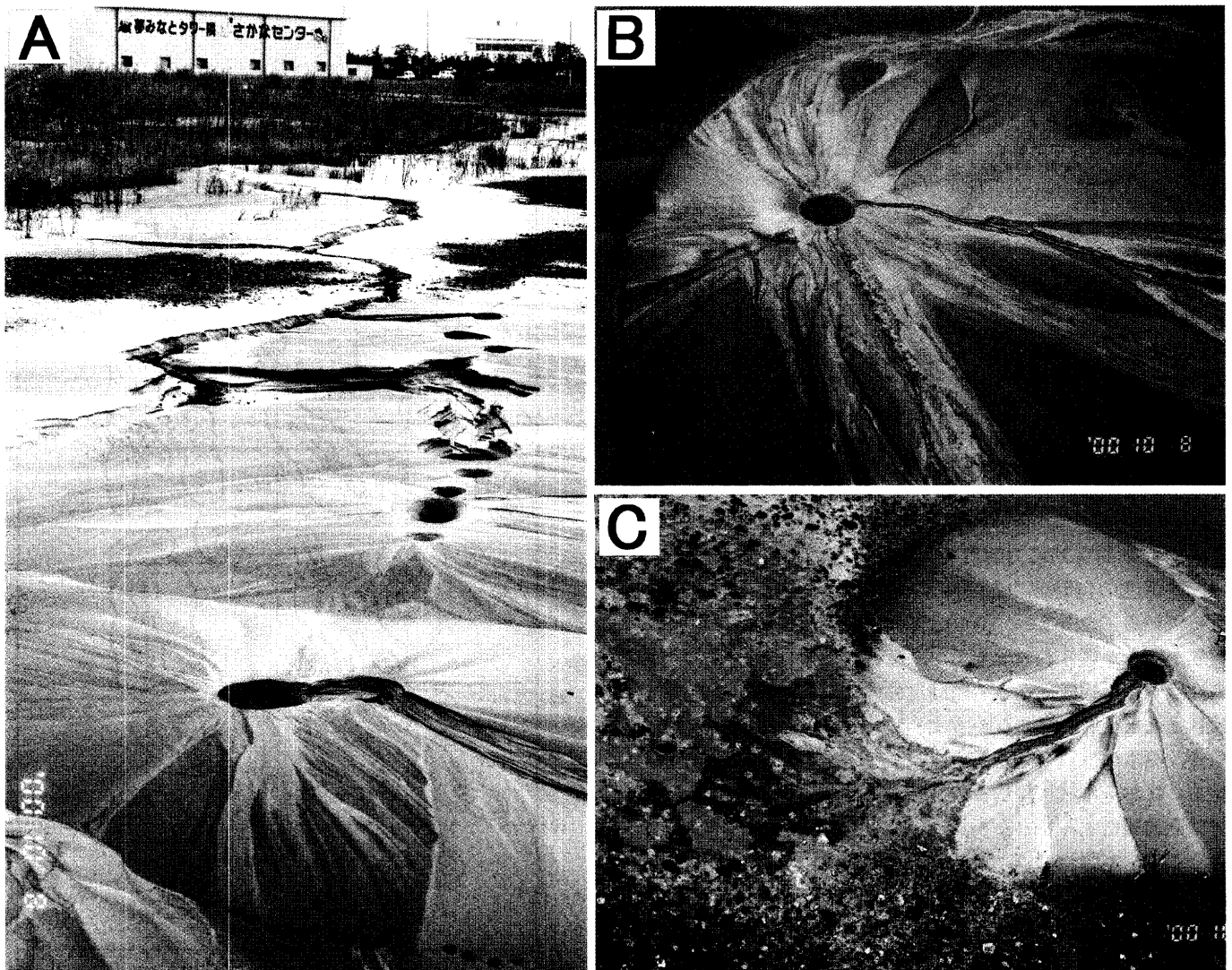


Fig. 3. General view of the boiling sands at Takenouchi industrial area. The boiling sand craters oriented in NE or NW directions (A); Formation of yellowish-brown biofilms in and around the crater of the boiling sands (B, C).

て作成したが、同様の噴砂はさらに西部、北部地域にも広がっている。噴砂は円錐丘を形成し、その半径は数10 cm から数 m まであり、変化に富む。噴砂孔は一般に、噴出面から10~20 cm 程度の高さであるが、大きな円錐丘では高さ30 cm 以上に達する。噴砂孔の直径は数 cm から20 cm 以上に達する。これらの円錐丘は単体で存在することはまれで、複数が連なって、規則的な配列を示す。ルートマップからは円錐丘は $N 30^{\circ} E$, $N 15^{\circ} E$, $N 10^{\circ} W$ の方向に配列する。大きな円錐丘では火口原のように複数の噴砂孔が形成されており、2回以上の噴砂が生じたことを示唆する。また、噴砂は小規模ながら継続しておこっており（10月7日午前）、噴砂孔および斜面を浸食して火口瀬状の谷を形成している。基盤のコンクリートが露出しているところでは $N 15^{\circ} E$ 方向の断裂が認められ、これに沿って噴砂が生じている。現地の写真を図3に示す。噴砂孔の形状と大きさはさまざまであるが、星野（1984）が報告しているように、クレーター（火口）状とクレバス（亀裂）状に大別できる（Fig. 3 A）。クレーター状噴砂孔は、直径数 cm~20 cm 程の円形で、クレバス状のものは3

~10 数 cm 幅のスリット状噴砂孔が並んでいるものと、数 m にわたる亀裂が認められた。両者とも定向配列するが、しばしば、それに垂直の異なる向きに配列するものも認められた（Fig. 3 A 手前）。また、本調査研究では噴砂孔内やそこから流れ出た水の表面に、黄褐色のバイオフィーム（Fig. 3 B, C）が形成しているものも認められた。

試 料

現地調査は地震が発生した翌日、翌々日である2000年10月7日、8日に行い、特に地震による液状化の影響が顕著にあらわれている地域の試料を採取した。試料として、島根県錦浜、森山堤防、鳥取県彦名干拓地、中浜、米子空港横、竹内工業団地にて液状化により噴出した砂および水を採取した。また、噴砂孔内外の黄褐色のバイオフィームも採取した。噴砂試料との比較のために鳥取県弓ヶ浜の砂の他にヒ素を濃集している可能性の高い泥炭層もあわせて採取した。これらの採取場所と試料番号を Table 1 にまとめた。

Table 1. Sampling points, number and materials for this report.

採取場所	サンプル No.	試料
錦浜 (鳥取県八東郡東出雲市)	N-01~05 N-06	噴砂・噴砂孔内の水 泥炭層
森山堤防 (鳥取県八東町)	Mo-01	噴砂
彦名干拓地 (鳥取県彦名町米子市)	H-01~02	噴砂・噴砂孔内の水
中浜 (鳥取県境港市)	Na01~03	噴砂
米子空港横 (鳥取県境港市)	Y-01	噴砂・噴砂孔内の水
竹内工業団地 (鳥取県境港市)	T-00・03・04・06・09~12 T-A T-B~T-F	噴砂・噴砂孔内の水 噴砂孔内の黄褐色のバイオフィーム 黄褐色のバイオフィームと周辺の噴砂・水
弓ヶ浜 (境港~米子周辺)	Yu-01~06	弓ヶ浜の砂

Table 2. Physical properties of the water in the boiling sand crater.

サンプルNo.	測定日	場所	pH	Eh(mV)	EC(mS/cm)	DO(mg/l)
N-03	2000年10月7日	錦浜噴砂孔付近	6.5	79	19	2.0
H-02		彦名干拓地噴砂孔付近	7.0	80	28	4.6
T-B		竹内工業団地噴砂孔の5ヶ所	6.2	110	—	—
T-C			6.2	87	—	—
T-D			6.2	101	—	—
T-E			6.2	108	—	—
T-F	6.2		102	—	—	
T-00	2000年10月8日	竹内工業団地噴砂孔付近の3ヶ所	6.7	15	64	3.0
T-04			6.7	36	90	3.4
T-06			7.1	40	65	3.2

— ; 測定値なし.

実験方法

1. 水質測定

各地の噴砂および噴水試料の pH, 酸化還元電位 (Eh), 電気伝導度 (EC), 溶存酸素量 (DO) の測定を行った. それぞれの測定には HORIBA カスタニー-LAB pH メーター F-24, HORIBA カスタニー ACT pH メーター D-13, HORIBA カスタニー ACT 導電率メーター ES-12, HORIBA ハンディ溶存酸素メーター OM-12 を用いた.

2. 光学顕微鏡観察

竹内工業団地の灰色を呈した噴砂および噴砂孔に存在した黄褐色のバイオフィームを落射蛍光・微分干渉顕微鏡 (Nikon 製, OPTIPHOTO-2/LABOPHO-2; 落射蛍光装置 EFD-3 および透過型微分干渉装置 NTF-2 A) により観察した. 落射蛍光顕微鏡で観察の際には, DAPI (4', 6-diamidino-phenylindole dihydrochloride) 染色を施し, フィルター (UV-1 A) を通して観察を行った. DAPI は生物の DNA を染色し, 蛍光顕微鏡下では青色, 粘土鉱物は黄色を呈する.

3. X線粉末回折分析 (XRD)

各地の噴砂試料の鉱物組成を, X線粉末回折分析により同定した. 分析には理学電機製 RINT 1200 型 X線回折装置を使用し, CuK α 線を用いて電圧 40 kV, 電流 30 mA で測定を行った. 不定方位試料 (全岩試料) の分析には, 噴砂試料を自然乾燥させ鉢鉢で粉末にし, ガラス板に詰めたものを使用した. 定方位試料の分析には, コクサン製卓上遠心機 H-26 F を用いて 2 μ m 以下の粒度を分離・濃縮したものをスライドガラスに塗布し, 乾燥させたものを使用した. また, 粘土鉱物の同定のため, 未処理のもの他にエチレングリコール処理を施したものについても測定を行った. エチレングリコール処理試料は, 関東化学製 1 級エチレングリコールを使用し噴霧法で作成した.

4. 蛍光 X線分析 (XRF および ED-XRF)

各地の噴砂試料の化学組成の定量分析は鳥根大学総合理工学部において理学電機製蛍光 X線分析 (XRF) 装置 RIX 2000 を用いて行った. 分析は粉末プレス法 (小笠原, 1987) により主元素の一部 (Fe₂O₃*, TiO₂, CaO および P₂O₅), 全イオウ (TS) と微量元素 (As, Pb, Zn, Cu, Mo, Ni, Cr, V, U, Sr, Y, Nb, Zr, Th) を測定した. Fe₂O₃* は全鉄を示す.

また, 噴砂にあわせて噴水の化学組成の定性分析は金沢大学理学部において, Rh 管球を装着した ED-XRF 装置 (ELEMENT ANALYZER JEOL-JSX 3201) を用い, 管電圧 30 kV でファンダメンタルパラメータ法 (FP 法) により半定量

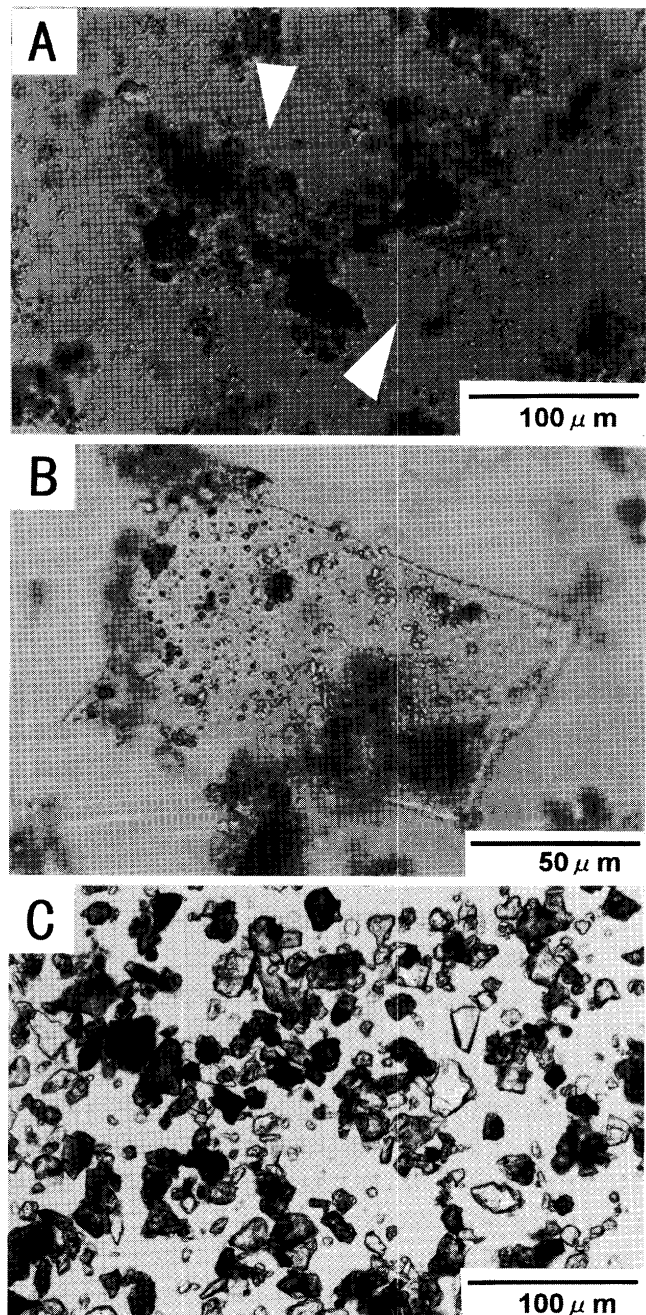


Fig. 4. Optical microscopic images of yellowish-brown biofilms (A, B) and gray boiling sands (C) at Takenouchi industrial area. Coccus and bacillus shaped bacteria are found in the biofilms (A, B). Gray boiling sands consist of rock forming minerals with a uniform grain size (C). Arrows; Coccus or bacillus shaped bacteria.

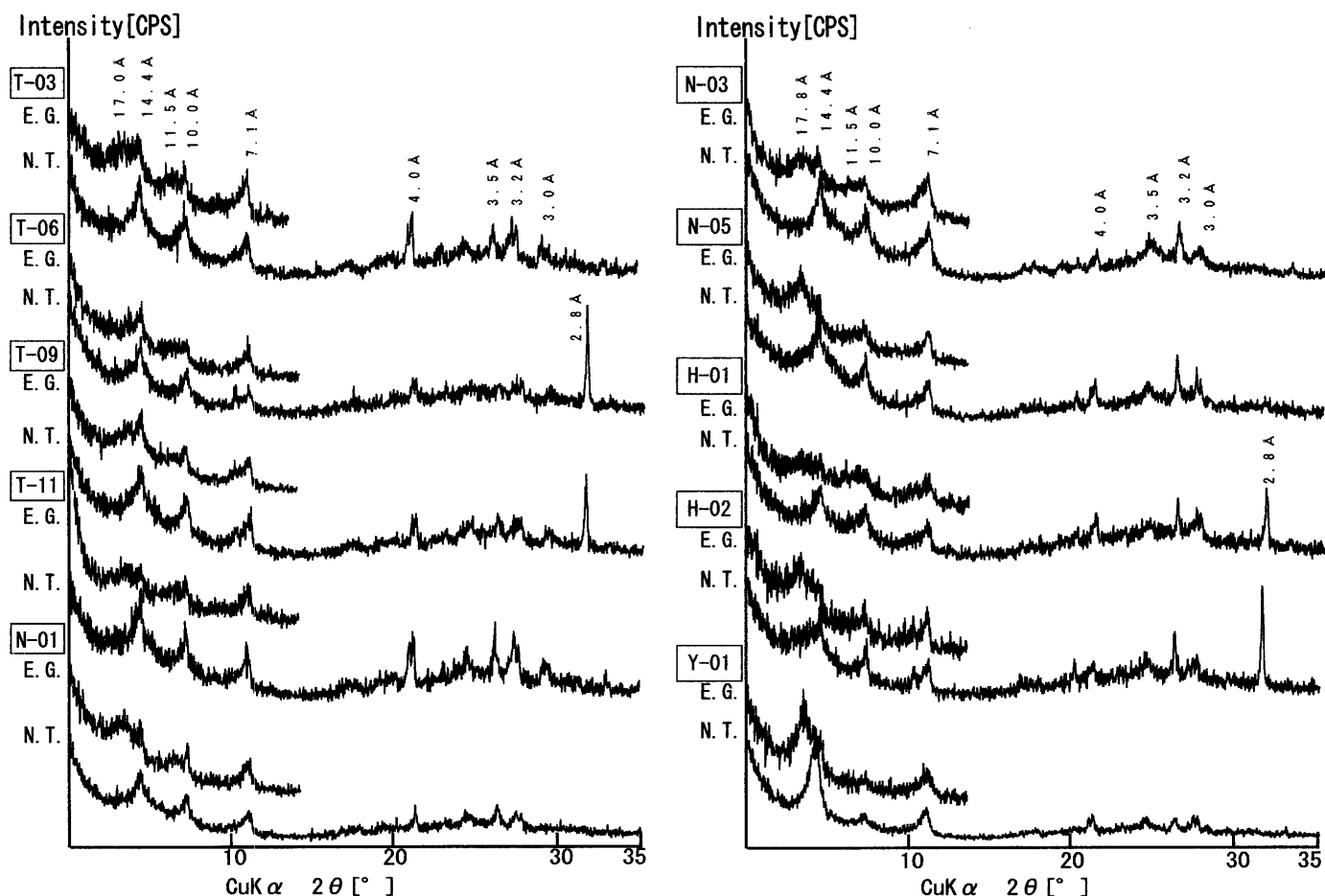


Fig. 5. XRD analyses of each boiling sands (<2 μ m) from Takenouchi industrial area (T-), Nishikihama (N-), Hikona (H-) and Yonago Airport (Y-).

分析を行った。噴砂試料は 50℃ の電気炉で乾燥後、乳鉢で粉末にし、ペレットを作成した後分析を行った。また、噴水については、孔径 0.45 μ m のフィルターでろ過した後、50 μ l をマイラーフィルム (MYLAR X-RAY FILM; Chemplex, Cat. No.107) 上に滴下し、水分を蒸発させた後に析出した物質について分析を行った。

5. 走査型電子顕微鏡観察 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析 (EDX)

竹内工業団地の灰色を呈した噴砂および噴砂孔に存在した黄褐色のバイオフィルムをカーボンの両面テープで試料台に接着した後、炭素蒸着を施し観察を行った。走査型電子顕微鏡は日本電子製 JSM-5200 LV 型を用い、加速電圧 15 kV で観察を行い、エネルギー分散分析は走査型電子顕微鏡に取り付けられたフィリップス製 EDAX PV-9800 を用い、加速電圧 15 kV で定性分析を行った。

6. 粒度分析

各々の噴砂試料は、0.2 wt.% ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を用い、5 分間超音波洗浄器により粒子を分散させた後、レーザー回折式粒度分布測定装置 SALD-2000 J (SHIMADZU) で粒度分析を行った。また、同様の試料について、メッシュ 64 μ m のふるいを用いて水篩を行い、含砂率を求めた。

結 果

1. 水質測定

各噴砂地点の水質を Table 2 に示す。pH はいずれも 6~7 の中性から弱酸性を示した。竹内工業団地の噴砂孔の 5 か所はいずれも pH 6.2 を示し、一定している。一方、錦浜や彦名干拓地では pH 6.5 や 7.0 を示し、竹内工業団地より高い値を示している。さらに、竹内工業団地の噴砂孔付近の水は、pH 6.7~7.1 と、さらに高い値を示している。Eh は、竹内工業団地の噴砂孔では 100 mV 台と高い値を示したのに対し、その周辺の砂に含まれる水は 15~40 mV と非常に低く、還元的な値を示した。また、EC については、錦浜や彦名干拓地では 19, 28 mS/cm と低いのに対し、竹内工業団地の噴砂孔付近では 64~90 mS/cm と比較的高い値を示した。これらの値は、いずれも一般の河川水より高く、海水よりも少し低い値である。なお、DO は全体的に低い値を示し、2.0~4.6 mg/l と貧酸素状態であることを示した。

2. 光学顕微鏡観察

竹内工業団地の噴砂孔に認められた黄褐色のバイオフィルム (Fig. 3B) およびその周辺の灰色の噴砂を光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 4 に示す。黄褐色のバイオフィルムには、約 80 μ m の褐色のコロニーや、その周辺に約 10 μ m 以下の球菌および桿菌が多数認められた (Fig. 4A, 矢印)。また、

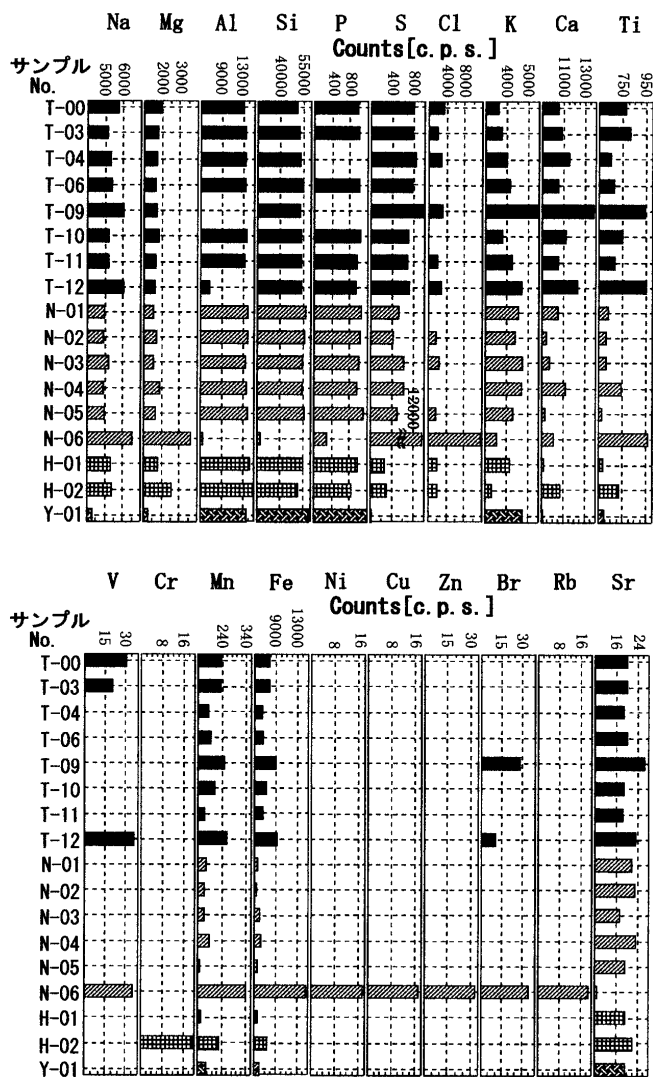


Fig. 6. ED-XRF analyses of the boiling sands from Takenouchi industrial area (T-), Nishikihama (N-), Hikona (H-) and Yonago Airport (Y-).

微生物の集合体である約 $100\mu\text{m}$ の方形のバイオフィームも認められた (Fig. 4B)。これらを DAPI 染色し蛍光顕微鏡下で観察した結果、青色の蛍光色を示したことから、多数の微生物の生息を確認した。また、灰色の噴砂の粒径は全体的に均一で、直径 $10\sim 50\mu\text{m}$ の石英、長石類などの無色鉱物および角閃石類や黒雲母などの有色鉱物が多数認められた (Fig. 4C)。灰色の噴砂を DAPI 染色し蛍光顕微鏡下で観察した結果、黄色の蛍光色を示したことから、粘土鉱物の存在を確認した。

3. XRD 分析

噴砂試料の全岩分析結果は、それぞれの試料が多量の石英、長石類、角閃石類、輝石類などの造岩鉱物から成ることを示し、特に長石類が顕著である。一方、 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子の分析結果 (Fig. 5) から、未処理の試料ではいずれの試料にも粘土鉱物の存在を示すピークが 14\AA 、 10.0\AA 、 7.1\AA 、 3.5\AA 、 3.2\AA および 3.0\AA 付近に認められた。これらの試料にエチレングリコール処理を施した結果、 14\AA のピークの一部が約 17\AA へとシフトし、膨潤性の粘土鉱物であるスメクタイトの存在

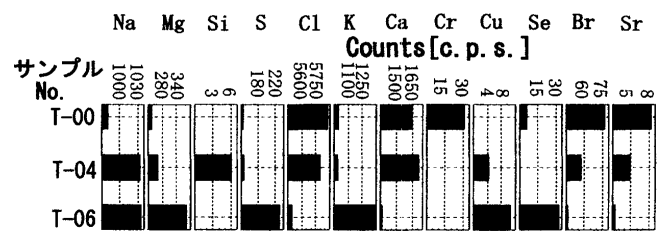


Fig. 7. Chemical composition of water from the boiling sand craters at Takenouchi industrial area, using ED-XRF method.

を示した。スメクタイトは、特に、試料 N-01, N-05, H-02 および Y-01 において顕著に認められた。また、各試料とも 10.0\AA の一部が約 11\AA へとシフトすることが認められ、ハロイサイトの存在を示した。エチレングリコール処理によりピークがシフトせずに 14\AA に残った部分は緑泥石、 10.0\AA と 3.2\AA はイライト、 7.1\AA と 3.5\AA はカオリナイトと同定できる。さらに、 3.0\AA はカルサイト、 4.0\AA はクリストバライト、 2.8\AA はロードクロサイトまたはシデライトの存在を示す。

4. ED-XRF 分析および XRF 分析

各地点で採取した噴砂の ED-XRF による半定量分析結果を Fig. 6 に示す。各地の噴砂は、主に Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe を多く含み、XRD 分析による粘土鉱物や造岩鉱物の存在と一致する。なお、Na と Cl の高い含有量は、噴砂孔内の水が高い EC 値を示し、かつ、後述する SEM-EDX 結果から、ハライトの粒子が観察されたことと一致する。また、T-12 を除く全ての試料において Si/Al 比はほぼ一定である。さらに、いくつかの試料は P, S, Ti, Mn, Sr を少量含有し、一部の試料に V, Cr, Ni, Cu, Zn, Br, Rb も微量存在する。なお、P と S は光学顕微鏡や SEM 観察から、有機物の存在も示唆している。竹内工業団地 (T-) では、錦浜 (N-) に比べ、Na, S, Ca, Ti, Mn, Fe の含有量が高い傾向がある。特に竹内工業団地の T-09, T-12 では Al に乏しく K, Ca, Ti, Mn, Fe, Br, Sr に富む特徴がある。さらに泥炭層である N-06 は、Al, Si に乏しく、Mg, S に加えて、Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb といった重金属元素を含むのが特徴である。噴砂孔内の水の溶存成分を ED-XRF 分析した結果を Fig. 7 に示す。竹内工業団地の T-00 と T-04 は主に Na, Mg, Cl, Ca, Br, Sr を含むのに対し、T-06 (泥炭層) にはそれらの成分は微量にしか認められず、むしろ Na, Mg, S, K, Cu, Se に富むことが特徴である。

XRF による噴砂の定量分析結果を Table 3 および Fig. 8 に示す。分析に用いた試料の元素組成は比較的均一である。このような特徴は Fe_2O_3^* ($2.73\sim 3.69\text{ wt. \%}$, 平均値 $\text{av.} = 3.02$) および TiO_2 ($0.26\sim 0.44\text{ wt. \%}$, $\text{av.} = 0.31$) の含有量に表される。また、 CaO ($=3.80\sim 5.23\text{ wt. \%}$, $\text{av.} = 4.41$) や P_2O_5 はやや変化に富むがこれは、有孔虫、貝形虫や貝殻片などの生物遺骸の含有を示している。さらに、TS ($0.10\sim 0.38\text{ wt. \%}$, $\text{av.} = 0.22$) は 1 試料を除いてほとんどの試料に検出される。微量元素では As ($2.6\sim 5.8\text{ ppm}$, $\text{av.} = 4.2$)、Pb ($10.2\sim 13.0\text{ ppm}$, $\text{av.} = 11.7$)、Zn ($36.1\sim 48.4\text{ ppm}$, $\text{av.} = 41.8$)、Cu ($7.4\sim 23.1\text{ ppm}$, $\text{av.} = 10.8$)、V ($23.7\sim 54.2\text{ ppm}$, $\text{av.} = 34.1$) などは美保湾の底質の試料 (中尾, 1969) や中海の底質

Table 3. XRF analyses of the boiling sands from the Yumigahama Peninsula. Sample numbers correspond to those given in Fig. 1 and Table 1.

サンプル No.	water c.	wt%					ppm													
		Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	TS	As	Pb	Zn	Cu	Mo	Ni	Cr	V	U	Sr	Y	Nb	Zr	Th
錦浜																				
N-01	33.0	2.75	0.29	4.09	0.09	0.20	4.4	11.2	38	10.6	2.1	8.1	24	33	2.0	788	10.7	4.8	22	4.6
N-02	30.3	2.78	0.29	4.02	0.09	0.17	3.8	11.9	36	9.2	2.0	8.9	23	35	2.0	790	10.9	4.8	21	4.5
N-03	31.9	2.75	0.30	4.11	0.09	0.24	4.4	12.2	38	8.4	2.1	6.7	23	27	2.2	757	11.6	4.9	30	5.4
N-04	14.8	3.00	0.33	4.23	0.09	0.17	4.1	11.7	40	10.1	2.1	9.3	23	34	1.9	792	10.9	5.4	21	5.5
N-05	19.4	2.76	0.28	4.30	0.08	0.23	5.3	10.6	45	23.1	2.1	15.5	21	32	2.0	785	10.9	4.9	23	4.2
彦名干拓地																				
H-07	29.0	3.69	0.44	4.20	0.10	0.17	2.9	10.2	43	10.4	2.0	12.9	37	54	1.8	825	12.4	5.5	12	4.9
H-08	29.4	2.94	0.32	3.90	0.09	0.14	2.6	12.4	38	8.4	2.1	9.0	30	37	2.1	786	11.6	5.2	22	4.7
米子空港横																				
Y-9	13.1	3.18	0.29	3.80	0.12	0.06	3.6	12.0	43	10.3	2.0	6.1	19	33	2.1	742	11.3	5.1	33	4.4
竹内工業団地																				
T-03	26.7	3.58	0.34	4.61	0.13	0.30	3.1	12.0	48	10.7	2.1	7.1	35	43	1.9	699	12.3	6.3	49	5.2
T-04	29.5	2.85	0.26	5.23	0.09	0.38	5.8	12.0	44	9.6	2.1	6.1	25	28	2.3	649	12.4	5.4	53	5.6
T-06	33.0	3.14	0.31	4.56	0.11	0.27	3.6	12.2	45	8.2	2.1	7.2	37	29	2.0	693	12.2	5.4	48	6.2
T-08	29.1	2.86	0.27	4.52	0.09	0.28	5.1	10.6	42	8.9	2.1	7.6	25	24	2.2	670	12.2	5.5	50	5.2
T-09	28.7	2.88	0.27	4.53	0.10	0.30	4.5	12.5	44	9.3	2.1	8.7	29	28	2.1	662	12.4	5.3	52	4.5
T-10	26.6	3.43	0.34	4.79	0.12	0.26	3.5	11.6	45	8.8	2.1	7.5	38	36	2.0	719	12.4	5.8	43	5.2
T-11	26.6	3.20	0.31	4.60	0.11	0.25	3.8	10.9	44	8.6	2.1	6.1	42	34	1.9	724	11.9	5.6	40	5.6
T-12	26.9	3.45	0.34	4.40	0.12	0.24	3.2	11.3	47	9.4	2.1	7.5	39	43	2.0	685	3.8	6.1	54	5.9
中浜																				
Na-01	17.7	2.73	0.28	4.80	0.09	-	5.2	10.7	39	7.4	2.1	8.2	18	27	2.1	779	11.0	5.2	24	5.0
Na-02	21.8	2.77	0.29	4.81	0.09	0.37	5.5	12.9	40	9.8	2.1	7.6	20	34	2.1	746	11.2	5.5	32	5.9
Na-03	23.8	2.93	0.28	4.50	0.09	0.33	4.9	11.9	41	9.2	2.1	8.5	22	35	2.0	764	11.4	5.4	29	4.7
森山堤防																				
Mo-1	6.6	2.78	0.28	4.11	0.08	0.10	4.2	13.0	36	11.1	2.0	7.5	24	37	2.4	717	12.7	5.1	39	5.0

(石質, 未公表) に比べ低い。しかし, 濃縮率は変化が少なく Zn-Fe₂O₃ 図に示されるようにまとまった領域にプロットされる (Fig. 8)。Zr や Cr は重鉱物として細粒の堆積物に濃縮するため, 粒度組成との関係が示唆される。そのため Zr-Th 図や, Cr-Th 図では, Zr (12.0~53.5 ppm, av.=34.8), Cr (18.3~42.2 ppm, av.=27.6) とともにやや分散する。U (1.9~2.3 ppm, av.=2.0), Nb (4.8~6.3 ppm, av.=5.3), Th (4.2~6.2 ppm, av.=5.1) はそれぞれ濃縮率に変化が少ない。なお, 弓ヶ浜の形成については日野川上流のたたら製鉄が大きく影響しており, 上流域から運搬された大量の土砂が砂州を形成していったと考えられており (徳岡ほか, 1990), そのため砂州の砂には磁鉄鉱をはじめとする重鉱物が濃縮されることが予想された。そこで, 本調査研究の U の濃縮率について, 水野・望月 (1969) による美保湾の底質の濃度 (U=1.2~3.2 ppm, av.=1.8) と比較検討した結果, いずれも大きな相異は認められなかった。

5. SEM-EDX 分析

竹内工業団地の噴砂孔内の黄褐色バイオフィーム (試料 T-A) とその周辺の灰色の噴砂の SEM 観察結果を Fig. 9 に示す。同試料中には約 70 μm の不定形の板状鉱物が多数認められ, EDX による面分析の結果から Al, Si を主とし, Cl, K, Ca, Fe を少量含むため, 粘土鉱物および珪酸塩鉱物の存在を示唆している (Fig. 9A)。一方, 黄褐色のバイオフィームからは鉱物粒子間を埋めるように, 光学顕微鏡観察でも確認された球菌 (約 0.5 μm) および桿菌 (約 1.5 μm) が多数認められた。桿菌周辺の点分析は Al, Si を主とし, Cl, K, Ca, Fe の

ほかに P, S といった生体特有の元素を含むことから微生物と粘土鉱物が共存していることを示唆している (Fig. 9B 矢印)。なお, Al と Si の比はほぼ 1:1 であることから, ハロイサイトなどの粘土鉱物の存在の可能性を示しており, XRD 分析結果と一致する。

6. 粒度分析

弓ヶ浜および中海周辺地域で認められた噴砂の粒度組成を検討した。一般に粒度組成は地質学系 (フェイスケールで表示) と土質工学系 (mm 単位) で異なり, 粒度区分も若干異なっている。土 (堆積物) の粒状化を評価するときには粒径の累積頻度曲線を用いて検討される。一方, 堆積環境を評価する時には平均粒径, 淘汰度-歪み度などを指標に用いる。

竹内工業団地から採取した 8 つの噴砂試料 (T-) と, 錦浜 (N-), 彦名干拓地 (H-), 米子空港横 (Y-) から採取した 9 つの試料の粒度分析結果を Fig. 10 に示す。竹内工業団地と錦浜とは粒径の大きさとその分布パターンが異なる。すなわち, 竹内工業団地の試料は主にシルト質であり, 平均粒径は 27.9~40.3 μm と幅広い値を示す。つまり, 分布パターンの左右の広がりやショルダーから, この噴砂は淘汰が悪いことを示している。また, しばしば粒径 1 μm 以下の微粒子のピークもわずかに認められる。一方, 錦浜, 彦名干拓地, 米子空港横の試料は細粒砂であり, その平均粒径は N-06 を除き, 134.2~177.4 μm となり, 狭い範囲に存在し淘汰が良いことを示している。なお, N-06 は泥炭層であり, 平均粒径は 17.8 μm で幅広い粒径分布を示し, 淘汰が悪い。噴砂の平均粒径の Vol % は, 竹内工業団地が 5 前後, 錦浜は 13~15 前後を

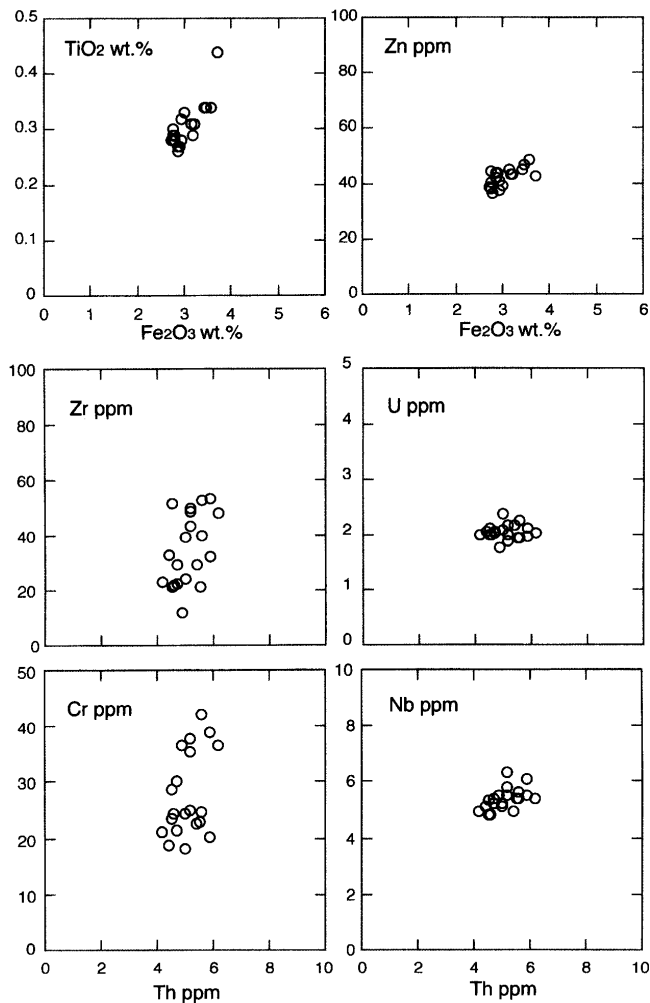


Fig. 8. Major versus trace elements relations of the boiling sands from the Yumigahama Peninsula, based on the results of the XRF method. Results indicate similar trends of the Fe_2O_3 versus TiO_2 and Zn, along with the Th versus U and Nb diagrams. On the Th versus Zr and Cr spaces, Zr and Cr show variations related to sorting effect.

示している。

また、メッシュ $64\mu\text{m}$ のふるいをを用いた水篩による含砂率を、Table 4 に示した。砂と泥の量比の定量分析結果は、竹内工業団地では泥が多く、錦浜は砂が多いことを示し、前述の光学顕微鏡観察、SEM-EDX 分析、XRD 分析の結果と一致している。

さらに、先の試料に加え弓ヶ浜、森山堤防および中浜の試料についての累積頻度曲線を Fig. 11 に示す。試料のうち錦浜、森山堤防、米子空港横の試料では中央粒径は $0.13\sim 0.18\text{mm}$ であり、淘汰度 ($0.36\sim 0.54$) も類似して良い。中浜で採集した試料は、これらの試料よりもやや細粒で中央粒径は $0.11\sim 0.18\text{mm}$ であり、淘汰度 ($0.47\sim 0.55$) は同様に良い。竹内工業団地の試料はこれらに比べはるかに細粒で中央粒径は $0.03\sim 0.04\text{mm}$ である。土木地質学系では粒径や粒度の累積頻度曲線を用いて土の粒状化抵抗を評価する(吉見, 1991)が、平均粒径 (D_{50}) 0.1mm 前後の砂が最も小さい液状化抵抗を示すとされており(吉見, 1991)、弓ヶ浜の試料は竹内工業

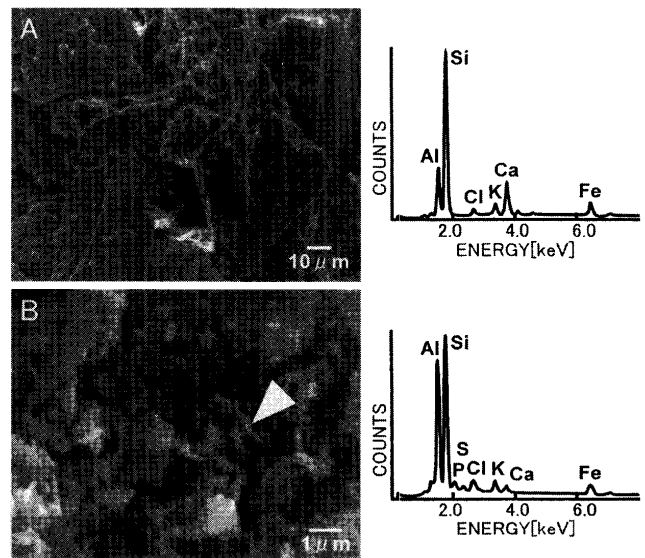


Fig. 9. SEM images and EDX spectrum of the boiling sands (A) and yellowish-brown biofilms (B) showing presence of rock forming minerals, clay minerals and microorganisms. Arrows represent the points of analyses of the bacteria.

Table 4. The mean grain size and sand/mud ratios of the boiling sands from Takenouchi (T-), Nishikihama (N-), Hikona (H-) and Yonago Airport (Y-).

サンプル No.	平均粒径 (μm)	含砂率 (wt%)
T-00	27.9	2.5
T-03	29.6	2.5
T-04	38.7	12.7
T-06	34.6	6.1
T-09	32.5	6.6
T-10	40.3	12.4
T-11	33.4	11.7
T-12	28.8	7.0
N-01	163.8	95.3
N-02	168.9	94.2
N-03	145.0	94.1
N-04	154.5	92.5
N-05	134.2	94.8
N-06	17.8	54.9
H-07	170.5	95.7
H-08	164.0	92.0
Y-09	177.4	92.3

団地を除いてこの値に近い。

また、累積頻度曲線により土の物理的・力学的性質を評価するため、均等係数 ($U_c = D_{60}/D_{10}$) が用いられるが、累積頻度曲線からは錦浜、森山堤防、米子空港横の試料は多少の変化は見られるものの(均等係数 $U_c = 1.5\sim 1.8$)、極めて類似した曲線で特徴づけられる(Table 5)。また、中浜の試料はこれよりもやや細粒であるものの、 $U_c = 1.6\sim 1.8$ を示している。一方、竹内工業団地の試料はより細粒で、やや緩やかなカーブを示す ($U_c = 2.5\sim 3.0$)。比較のために示した弓ヶ浜中央部(主に地形的に中浜と呼ばれる砂体(境港市, 1986))の境港から米子周辺までの6地点の試料もあわせて検討したところ、これらは $U_c = 1.6$ であり、錦浜、森山堤防、米子空港横のそれに類似する。次に、ファースケールを用いて平均粒

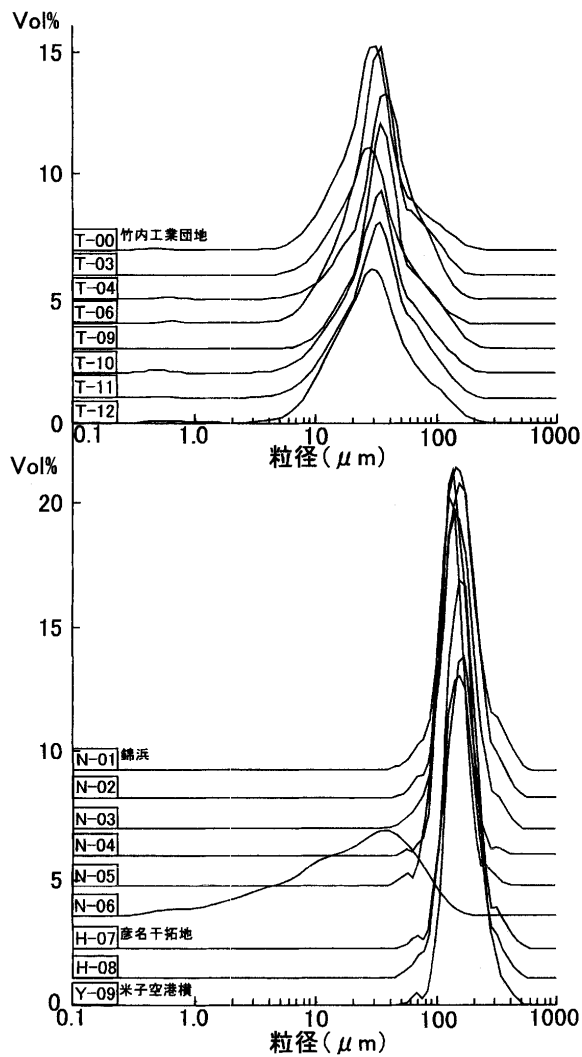


Fig. 10. Grain size frequency curves exhibit various distribution trends at Takenouchi industrial area (T-), Nishikihama (N-), Hikona (H-) and Yonago Airport (Y-).

径、淘汰度-歪み度などの指標をもとに堆積環境を推定した。竹内工業団地の試料はシルトサイズであり、これらの指標による評価には適さないで除外した。しかし、その他の試料については淘汰度-歪み度、平均粒径-淘汰度のグラフは堆積環境の推定に有効であり (Folk and Ward, 1957; Friedman, 1961), ここで検討した。

また、淘汰度-歪み度のグラフにおいては河川成の砂と海浜砂を区分するのに有効である。本調査研究において、噴砂試料の多くが海浜砂の領域にプロットされ、1試料のみが河川成の砂のそれに含まれる。平均粒径-歪み度では、試料は海浜砂と砂丘砂の境界付近からより粒度の細かな部分にプロットされる (Fig. 12)。また、比較に用いた弓ヶ浜の試料はこれらのプロットの粒度の粗い部分に重なってプロットされる。なお、竹内工業団地の噴砂試料は埋め立て地の浚渫のために採取された沖合いの堆積物に起因する (水野ほか, 1969)。

ま と め

噴砂の粒度分析結果からは、竹内工業団地の噴砂を除いて、他の場所では粒度が0.1 mm前後で淘汰の極めてよいも

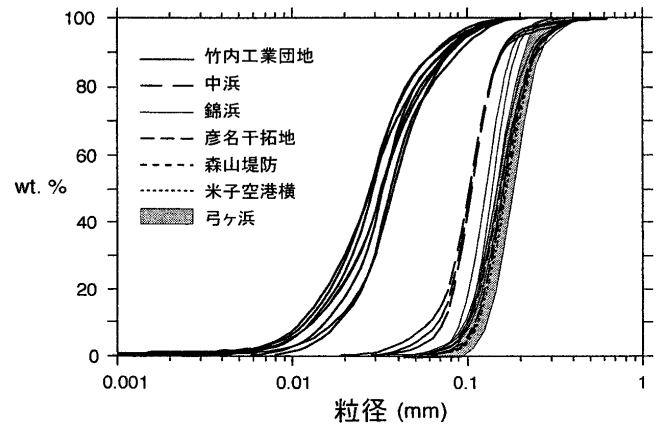


Fig. 11. Size composition of the boiling sands from the Yumigahama Peninsula, represented by cumulative curves. Samples show steep curves having lower values of coefficient of uniformity ($U_c = 1.5-1.8$) except Takenouchi reclamation. Nakahama sand, composed mainly of silt, have slightly gentle curves with higher values of U_c (2.5-3.0). Six sand samples from the Yumigahama have steep curves and lower U_c (1.6).

Table 5. Parameters of size frequency distributions based on both mm and phi-scales.

サンプル No.	mm-scale		ϕ -scale		
	U_c	Median	Mean	Sorting	Skewness
錦浜					
Ni-01	1.7	0.160	2.71	0.54	-0.09
Ni-02	1.6	0.168	2.65	0.50	-0.05
Ni-03	1.5	0.145	2.85	0.36	0.00
Ni-04	1.6	0.154	2.77	0.49	-0.04
Ni-05	1.5	0.135	2.97	0.38	0.00
彦名干拓地					
H-07	1.5	0.168	2.65	0.44	-0.10
H-08	1.6	0.163	2.69	0.50	-0.05
米子空港横					
Y-09	1.6	0.176	2.58	0.45	-0.04
竹内工業団地					
T-00	2.7	0.029			
T-03	2.6	0.030			
T-04	2.5	0.040			
T-06	2.4	0.035			
T-09	2.9	0.034			
T-10	2.3	0.038			
T-11	2.9	0.034			
T-12	3.0	0.029			
中浜					
Na-01	1.6	0.118	3.16	0.47	-0.03
Na-02	1.7	0.116	3.18	0.50	0.07
Na-03	1.8	0.114	3.20	0.55	0.16
森山堤防					
Mo-01	1.6	0.181	2.54	0.46	-0.05
弓ヶ浜					
1019-2	1.6	0.185	2.49	0.44	-0.04
1019-3	1.6	0.164	2.68	0.44	-0.06
1019-6	1.6	0.202	2.38	0.40	0.00
1019-7	1.5	0.173	2.60	0.34	0.00
1019-8	1.6	0.198	2.39	0.38	0.00
1019-9	1.6	0.200	2.39	0.39	0.01

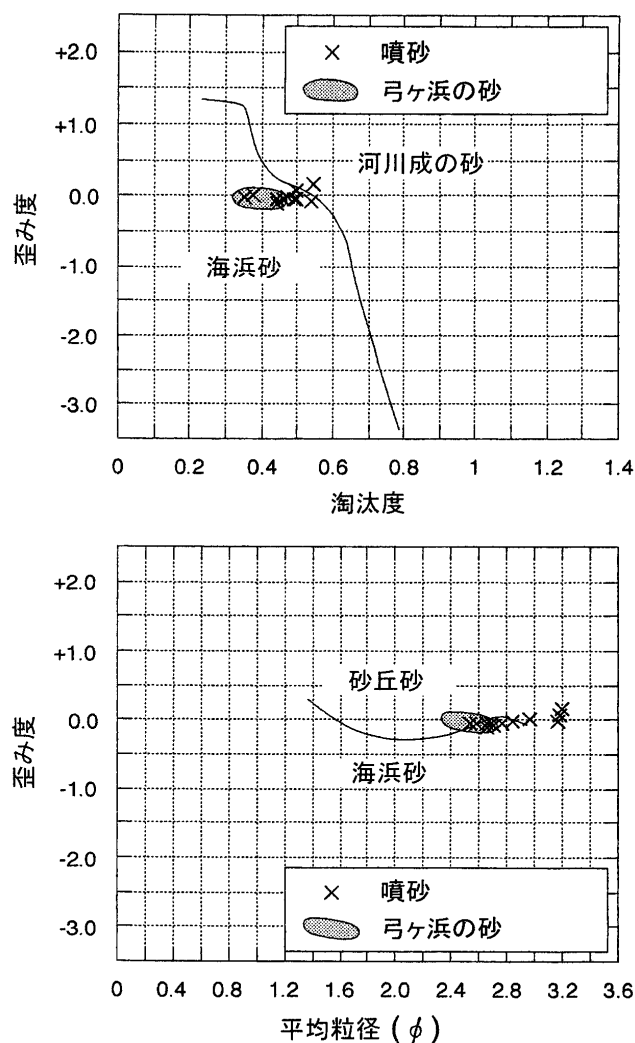


Fig. 12. Plot of skewness and sorting (upper) after Folk and Ward (1957) and skewness and mean (lower) using phi-scale for the boiling sands and beach sand samples from Yumigahama Peninsula. Solid lines indicate boundary between fluvial and beach sands and between dune and beach sands boundaries (Friedman, 1961), respectively.

のであった。竹内工業団地の試料はシルトを主とし、粘土鉱物含有し、他の試料に比べ淘汰度は幾分低くなっている。Table 4 に示したように、竹内工業団地の干拓地では平均粒径が 28-40 μm と細粒であり、含砂率は 2.5-12.7 wt.% と非常に低い値を示し、かつ、粒径分布曲線も幅広いパターンを示した。これらのデータは、噴砂中に粘土鉱物が多量に存在していたことを裏づけている。この粘土鉱物はエチレンジリコール処理した試料の XRD 分析結果から、スメクタイトやハロサイトの膨潤性の粘土鉱物であることが判明した。

一方、噴砂孔内の水を現地にて体感したところ、塩気があり、かつ金属的な臭気があった。実験室で噴砂孔中の水を分析した結果、pH は海水の 8 よりも低いが、7 前後を示した。また、Eh は噴砂孔内で少し高いとはいえ、全体的に還元的であり、DO 値が 2-3 mg/l と低く、貧酸素状態であることと一致している。さらに、EC は mS/cm のオーダーを示し、噴砂孔内外ともに高い。これは、地下水中の塩分濃度（電解質濃

度)、すなわち NaCl 濃度が高いことと相関しており、 Na^+ や Cl^- イオンの濃度が高く、したがって、高い EC 値を示した。すなわち、本調査研究における噴砂孔内の水の ED-XRF 分析や SEM-EDX による観察・分析で Na と Cl の存在が確認された他、ハライトも認められたことと一致する。さらに、前述の淘汰度-歪み度のグラフによる河川成の砂と海浜砂の区分図からも、本調査研究の噴砂試料の多くが海浜砂に由来することも一致している。

液状化現象が起きて、翌日には噴砂孔の水面に黄褐色のバイオフィームが生成しているのが認められた。その化学組成は S, Fe, P をはじめ生体を構成する元素の他、粘土鉱物の構成主元素である Al, Si が多量に含まれることが明らかとなった。また、噴砂孔内の水の Eh は外部の水より少し高い値を示したが、これは生息している細菌が酸化状態で光合成をし、オイルスリックを形成したためと考えられる。一般に、噴砂孔内は、全体に還元的で、かつ、貧酸素状態であることから、光学顕微鏡観察で確認された球菌や桿菌は鉄細菌やイオウ細菌であると考えられる。なお、XRF 分析結果によれば噴砂中には約 3 wt.% の Fe_2O_3 が、また、0.3 wt.% 前後の TS が含まれている。この黄褐色のバイオフィームの形成は地下水を汲み上げる井戸管の周囲に一般的に生成するバイオマット（高橋ほか、印刷中）と同様な生成過程であると考えられる。一方、Al, Si をもつ膨潤性粘土鉱物と共存する微生物は、As, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, V, Sr などの重金属（Table 3）を濃集する働きがあり、地下水汚染や有害物質の拡散を考える上でも重要である。今回の鳥取県西部地震ともなう液状化現象が顕著にみられた干拓地の噴砂や噴水中に含まれる重金属イオン濃度は噴砂の処理方法にも考慮が必要であることを示唆している。

文 献

- 道前香緒里・石賀裕明・伊藤イザベル静・山田周作, 2000, 鳥取県西部弓ヶ浜の地下水汚染の現状. 日本地質学会第 107 年学術大会演旨, 190.
- Folk, R.L. and Ward, W., 1957, Brazos river bar, a study in the significance of grain size parameter. *Jour. Sediment. Petrol.*, 27, 3-26.
- Friedman, G.M., 1961, Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *Jour. Sediment. Petrol.*, 31, 514-529.
- 平川一臣・上屋真一・中村有吾・伏島祐一郎, 2000, 石狩低地帯の液状化跡に関する資料. 活断層研究, 19, 55-58.
- 星野 務, 1984, 日本海中部地震がもたらした被害状況を見る—第一報, 主として秋田県地方について. 応用地質研究会連絡法, 1, 11-16.
- 池田俊雄・岡田勝也・池田研一・長谷川達也, 2000, 活断層調査から耐震設計まで. 鹿島出版会, 東京, 178-180.
- 鹿野和彦・山内靖喜・高安克己・松浦浩久・豊 遙秋, 1994, 松江地域の地質. 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅岡山 (12), 17, 126p, 1 sheet.
- 鹿野和彦・吉田史郎, 1985, 境港地域の地質. 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅岡山 (12), 7, 地質調査所, 57p, 1 sheet.
- 気象庁, 1999, 火山予知連絡会会報. 74, 145p.
- 気象庁, 2000, 火山予知連絡会会報. 75, 137p.
- 水野篤行・丸山修司・藤井紀之・安田俊一・野口寧世・都留信也・望月常一・大嶋和雄・横田節哉・中尾征三・小野美代子, 1969, 山陰美保湾・隠岐諸島周辺海域の堆積学的研究. 地調月報, 21, 219-236.

- 水野篤行・望月常一, 1969, 山陰沖の低質・柱状試料中のウラン分布. 地調月報, **21**, 287-292.
- 中尾征三, 1969, 日本海隠岐諸島周辺泥質堆積物中の微量元素. 地調月報, **21**, 293-300.
- 西山浩史・西田良平・中尾節郎, 1999, 鳥取東部・中部地域の発震機構の研究. 地震, **51**, 271-281.
- 小笠原正継, 1987, Rh 管球を用いた蛍光 X 線分析による岩石中の微量元素成分の定量. 地調月報, **38**, 57-68.
- 尾池和夫, 1992, 日本地震列島. 朝日文庫, 139-145.
- 大西郁夫, 1988, 中国地方の第四紀層. 地質学論集, no. 30, 127-144.
- 境港市, 1986, 第1章 地形. 境港市史, 境港市, 鳥取県, 109-140.
- 塩崎一郎・西垣俊宏・山口高広・村上英記・大志万直人・上嶋誠・山口 覚・歌田久司・西田良平・住友則彦, 1998, 中国地方におけるネットワーク MT 法観測. 地震研究所彙報, **73**, 319-344.
- 塩崎一郎・大志万直人, 2000, 山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の意義. 月刊地球, **22**, 22-28.
- 塩崎一郎・大志万直人・藤原茂樹・福本隆史・西垣俊宏・矢部征・住友則彦, 1999, MT 法を用いた山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の概要. 京都大防災研年報, **42**, 189-201.
- 住友則彦・渡辺邦彦・松村一男・竹内文朗・澁谷拓郎・中尾節郎・今田幸史, 1999, 山陰地方における地震活動の時間的空間的変動の特徴. 京都大防災研年報, **42**, 61-70.
- 高橋直人・榎本真嗣・名倉俊樹・稗田佳彦・田崎和江・片桐憲一, 2000, 微生物がコントロールする井戸障害と水質. 地下水学会誌. (印刷中)
- 寺見保正・三梨 昂, 1983, 宍道湖・中海低地帯周辺の地震動災害の予測に関する研究. 島根大地質学研報, **2**, 49-54.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克巳・三梨 昂, 1990, 中海・宍道湖の地史と環境変化. 地質学論集, no. 36, 15-34.
- 吉見吉昭, 1991, 砂地盤の液状化. 第2版. 技報堂出版, 182 p.

(要 旨)

田崎和江・石賀裕明・道前香緒里・赤坂正秀・朝田隆二・渡辺弘明・名倉俊樹・イスラム・ABM・ラフィクル・佐々木直哉・佐藤大介・長谷川香織・田中義太郎・永井香織・縄谷奈緒子・脇元理恵・池田頼正・北川 陽・倉繁和也・嵩田敏行・津谷宜和, 2001, 鳥取県西部地震の液状化における噴砂と噴水の特性について. 地質雑, **107**, 68-78. (Tazaki, K., Ishiga, H., Dozen, K., Akasaka, M., Asada, R., Watanabe, H., Nagura, T., Rafiqul, I. ABM., Sasaki, N., Sato, D., Hasegawa, K., Tanaka, Y., Nagai, K., Nawatani, N., Wakimoto, R., Ikeda, Y., Kitagawa, Y., Kurashige, K., Shimada, T. and Tsuya, Y., 2001, Characterization of the boiling sand and water liquefied by the Western Tottori Earthquake, 2000. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **107**, 68-78.)

2000年10月6日, 13:30にM7.3の地震が鳥取県西部を襲った. 鳥取県・島根県の干拓地では液状化現象が広範囲に起こり, 特に竹内工業団地と錦浜では大量の噴砂と噴水が認められた. 本報告では, 噴砂と噴水の化学的, 物理的, 鉱物学的特徴について緊急調査を行った結果を詳細速報する. 噴砂や噴水には多量のNaClが含まれており, これはpH 6-7や高いEC値と相関する. 噴砂の鉱物組成は, 珪酸塩鉱物, 長石類が主であり, 粒度分析結果は, 竹内工業団地では粒径約30-40 μm , 錦浜では130-170 μm を示した. また, 竹内工業団地の噴砂には多量の粘土鉱物が含まれており, エチレングリコール処理後のXRD分析により, 膨潤性のスメクタイトとハロサイトが同定された. 噴砂孔中に発見されたバイオフィーム中の微生物は, 噴砂孔の水に溶存する重金属を濃集する可能性があり, 噴砂の処理方法にも考慮が必要であると考えられる.