

## 鳥取県西部地震による液状化に伴う噴砂について

石賀裕明\*・道前香緒里\*・鳥根大学地震災害調査団\*\*

### The boiling sands liquefied by the Western Tottori Earthquake 2000, San'in district, Japan

Hiroaki Ishiga\*, Kaori Dozen\* and Earthquake Disaster Research Group of Shimane University\*\*

#### Abstract

The boiling sands occurred by liquefaction by the Western Tottori Earthquake, 2000 are described from the areas surrounding Lake Nakaumi, especially Takenouchi reclaimed lands at northern part of the Yumigahama Peninsula, San'in district, Japan. The boiling sands formed analogous volcanic cones and caldera, suggesting eruption of sands and water, and intermittent eruptions before ceasing. The sands are well sorted, ranging from 30–40  $\mu\text{m}$  in Takenouchi reclamation showing dredged derivation of marine sands from the Bay of Miho. Other sand samples from Yumigahama Peninsula are relatively larger in grain size than this ranging from 130–200  $\mu\text{m}$ , but still are well sorted, which may be capable of liquefaction by hitting of an earthquake.

**Key words:** boiling sands, liquefaction, Western Tottori Earthquake 2000

#### はじめに

2000 年 10 月 6 日の鳥取県西部地震により中海周辺では地盤の液状化に伴う噴砂が生じた。特に弓ヶ浜の埋め立て地においては集中した噴砂現象が認められた。弓ヶ浜は完新統の中海層の上部に発達する砂層中に宙水が形成され水頭が高く液状化が生じやすいといえる。また、埋め立てによって生まれた地盤には浚渫によって形成された淘汰の良い海浜砂が堆積しており液状化を生じやすいといえる。ここでは地震災害の記録として噴砂を記述する。

#### 噴砂について

弓ヶ浜砂州には米川から豊富な地下水が灌養され、地下水の水頭は地表下 1 m 以浅である地点が多い。1960 年代に調査された結果では弓ヶ浜の地下水は現在よりも水頭は低く(3~4 m)、塩水の侵入も認められていた。しかし、灌漑用水の計画的、効率的な利用の普及に伴って、地下水位は回復してきた可能性がある。また、砂州の堆積物は透水係数が高く、雨水が容易に浸透して宙水を形成している。そのため砂州を構成する土は地下水で飽和状態にあり、液状化をおこしやす

い傾向がある。

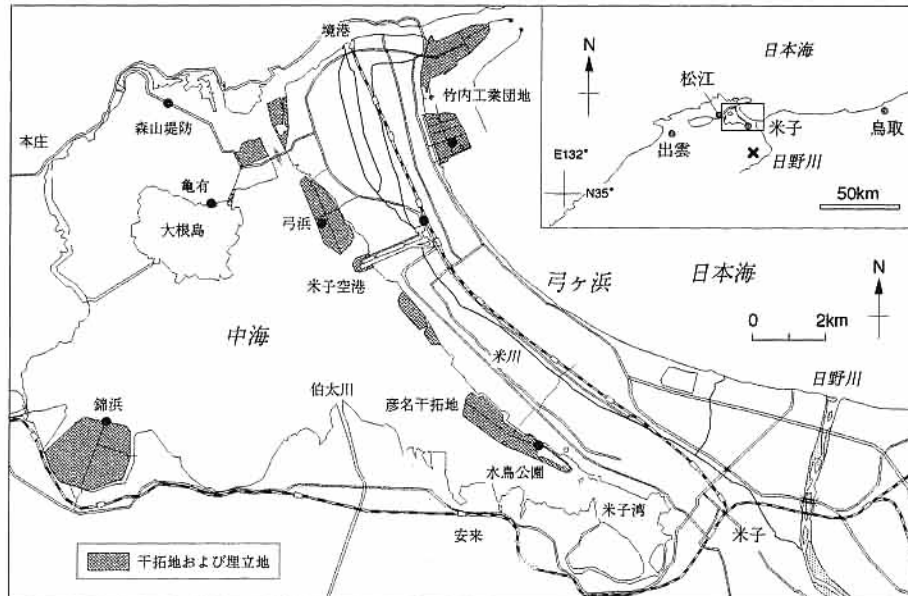
今回の地震によって弓ヶ浜に限らず中海を中心とした広い地域で地盤の液状化による噴砂が生じた。弓ヶ浜では彦名干拓地、米子空港周辺、中浜、竹内工業団地などの埋め立て地において顕著であった(第 1 図)。これららの地域では家屋の不同沈下、構造物の抜け上がり、地盤の陥没等が生じた。中海周辺の他の地域としては、錦浜干拓地、森山堤防等で構造物の変形が生じた。弓ヶ浜の埋め立て地では噴砂にともない地下のピートや客土として用いられた海成粘土が噴出している。また、錦浜では噴砂によって植物の茎が鋭利に切断されており、噴砂の噴出の速さを物語る。噴砂の様々な検討結果は田崎ほか(2001)を参照されたい。

#### 噴砂の形状

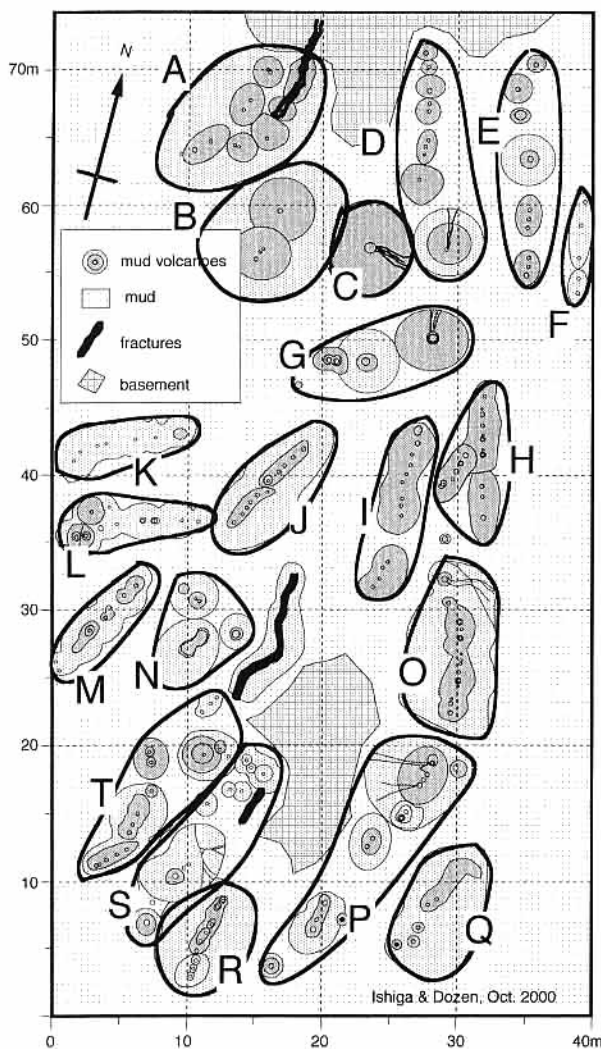
ここでは最も詳しい調査を行った竹内工業団地の南東部について報告する。竹内工業団地には多数の噴砂がみられ、その形状がよく保存されている。これは他地域に比べてより細粒な堆積物(シルト)が噴出したためである。噴砂の多くは円錐丘を形成している。その半径は数 10 cm から数 m まで変化に富む。噴出口(“火口”)は噴出面から様々な高さをなすが、大きな円錐丘では高さ 40 cm 以上に達する。火口の直径は数 cm から 20 cm 以上に達する。これらの“火口丘”は単体で存在することはまれで、複数が連なって、規則的な配列を示す。ここではおおむね 19 のまとまりをもったクラスター(噴砂群 A~S, 第 2 図)が識別される。また、地盤の烈やかにそって噴砂が生じて、地溝状の構造を形成したものもある。また、円錐丘のグループが雁行配列をなすこともある。竹内工業団地では大きな円錐丘では“火口原”が形成さ

\* 鳥根大学総合理工学部地球資源環境学科  
〒690-8504 松江市西川津町 1060  
Department of Geoscience, Shimane University

\*\* 弓ヶ浜半島・中海周辺の調査参加者  
鳥根大学：石賀裕明・亀井健史・三瓶良和・増本 清・大平寛人・志比利秀・中村 学・明石美和・井上卓彦・大本和樹・北島涼子・久保真大・杉山光正・竹内幸恵・筒井夏実・永吉雄大・坂東陽介・堀切保則・松尾和俊・三好弘展  
金沢大学：田崎和江、 静岡大学：釘宮康郎



第1図 中海を中心とした地域、および噴砂の位置(黒丸)を示す。



第2図 竹内工業団地における噴砂の分布図。

れており、2回以上の噴砂が断続的に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)、火口および斜面を浸食して“火口瀬”を形成している。

竹内工業団地では噴出した砂(実はほとんどがシルトである)は次に述べるようにほかの地域に比べて細粒であるため、噴砂現象の微細な構造が保存されている。複数の噴砂の発生で円錐丘の中心が陥没し、“カルデラ”状の陥没地形を形成しているものもある。そして、引き続き噴砂や噴水により、火口原の中心に再び小規模ながら“火口丘”を形成している。噴砂といってもさながら火山噴出によるカルデラの形成を見るようである。

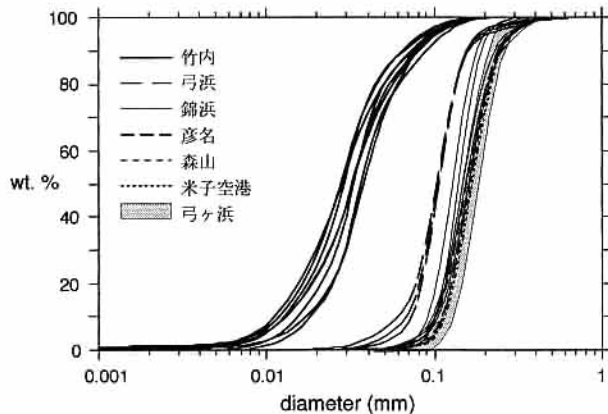
#### 噴砂の粒度組成

噴出した砂の物性を検討するために粒度組成を検討した。一般に粒度組成は地質学系(ファースケールで表示)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。

試料のうち錦浜、森山堤防、米子空港付近の試料では中央粒径は0.13~0.18mmであり、淘汰度も類似して良い(0.36~0.54)。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0.11~0.18mmであり、淘汰度はやはり良い(0.47~0.55)。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0.03~0.04mmである。

土質工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される。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団地のもの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



第3図 弓ヶ浜の噴砂の粒度分布。

するため、均等係数 ( $U_c = D_{60}/D_{10}$ ) が用いられる。累積頻度曲線 (第3図) から錦浜、森山堤防、米子空港付近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。弓浜の試料はこれらよりもやや細粒であるものの、 $U_c = 1.6 \sim 1.8$  である。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) 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。これらは  $U_c = 1.6$  であり、錦浜、森山堤防、米子空港付近のそれに類似する。

次にファイスケールを用いて平均粒径、淘汰度、歪み度などの指標をもとに堆積環境を推定する。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。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る。淘汰度—歪み度のグラフからは河川成の砂と海浜砂を区分するのに有効である。噴砂試料の多くが海浜砂である。比較に用いた弓ヶ浜の試料はこれらと同様である。

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は細粒である。比較に用いた弓ヶ浜の試料はやや粒度が粗い。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 (水野ほか, 1969) に起源する。

### 噴砂の噴出量

噴砂現象により地盤から堆積物や間隙水が排出されると地盤には空隙が生じ陥没や沈下が生じる。竹内工業団地の上述の地域における噴砂量を推定し、沈下量を推定した。

噴砂の形状を記録した  $40 \text{ m} \times 70 \text{ m}$  の範囲には合計 180 個の噴砂が有り半径は平均  $3.5 \text{ m}$  ( $1.5 \sim 7.0 \text{ m}$ )、高さは平均  $17.6 \text{ cm}$  ( $5 \sim 45 \text{ cm}$ ) である (第2図)。噴砂丘の分布する面積は  $1530 \text{ m}^2$  であり、噴差で覆われた面積は  $1030 \text{ m}^2$  である。噴砂の総体積は  $144 \text{ m}^3$  と見積もられ、 $2800 \text{ m}^2$  あたりの平均沈下量は  $5.1 \text{ cm}$  となる。

### 噴砂の地球化学的検討

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 (徳岡ほか, 1990)、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いる。そのため砂州の砂には磁鉄鉱をはじめとする重鉱物の濃縮が予想される。しかし、噴砂として移動した堆積物には目立って重鉱物、特に磁鉄鉱が濃縮していない。砂粒は主に石英からなり、長石が多少含まれる。粒度はよくそろっているが、あまり円磨されていない。有色鉱物はほとんど含まれず、炭質物や頁岩の岩片が認められる。

試料は淘汰の良い砂であるため、全岩の元素組成も比較的均一である。このような特徴は  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  ( $2.73 \sim 3.69 \text{ wt}\%$ , 平均値  $av. = 3.02$ ) および  $\text{TiO}_2$  の ( $0.26 \sim 0.44 \text{ wt}\%$ ,  $av. = 0.31$ ) の含有量に表される。  $\text{CaO}$  ( $= 3.80 \sim 5.23 \text{ wt}\%$ ,  $av. = 4.41$ ) や  $\text{P}_2\text{O}_5$  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による。1 試料を除いて TS ( $0.10 \sim 0.38 \text{ wt}\%$ ,  $av. = 0.22$ ) が検出される。

微量元素では As ( $2.6 \sim 5.8 \text{ ppm}$ ,  $av. = 4.2$ )、Pb ( $10.2 \sim 13.0 \text{ ppm}$ ,  $av. = 11.7$ )、Zn ( $36.1 \sim 48.4 \text{ ppm}$ ,  $av. = 41.8$ )、Cu ( $7.4 \sim 23.1 \text{ ppm}$ ,  $av. = 10.8$ )、V ( $23.7 \sim 54.2 \text{ ppm}$ ,  $av. = 34.1$ ) などは美保湾の底質の試料や地中海の底質に比べ低い。しかし、濃縮率は変化が少ない。Zr や Cr は重鉱物として細粒の堆積物に濃縮するため、粒度組成と関係を持つ。元素の濃縮率では、Zr ( $12.0 \sim 53.5 \text{ ppm}$ ,  $av. = 34.8$ )、Cr ( $18.3 \sim 42.2 \text{ ppm}$ ,  $av. = 27.6$ ) ともにやや分散する。U ( $1.9 \sim 2.3 \text{ ppm}$ ,  $av. = 2.0$ )、Nb ( $4.8 \sim 6.3 \text{ ppm}$ ,  $av. = 5.3$ )、Th ( $4.2 \sim 6.2 \text{ ppm}$ ,  $av. = 5.1$ ) はそれぞれ変化が少ない。

### 終わりに

以上のように砂州を構成する土は竹内工業団地の噴砂を除いて、粒度が  $0.1 \text{ mm}$  前後で淘汰も極めてよく、液状化抵抗が低い。そして砂粒子の粒径、淘汰度と間隙水の豊富さなど、弓ヶ浜では液状化が生じやすい条件がそろっているといえる。そのため今回のような地震の発生により地下水の間隙水圧は容易に上昇して砂粒の有効応力が減少し液状化を生じたものと思われる。竹内工業団地の試料はシルトを主とし、他の試料に比べれば淘汰度は幾分低くなっている。しかし、均等係数は低い ( $U_c < 3.0$ )。埋め立て地の浚渫時に海浜砂を利用する場合、十分な突き堅めによって地盤の強度を高める必要があり、今後構造物の設計には弓ヶ浜の堆積物の物性について十分な理解と配慮が必要といえる。なお、噴砂の粒度組成は金沢大学にて測定をお願いした、XRF 元素組成は島根大学にて測定した。金沢大学田崎和江教授、島根大学澤田順弘教授に感謝する。

### 文 献

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。

田崎和江・石賀裕明・道前香緒里・赤坂正秀ほか 16 名, 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.

徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・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 pp.