

2000年鳥取県西部地震による液状化層のジオスライサー調査

Geoslicer survey of a liquefied layer due to the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake

下川浩一¹・横田修一郎²・石賀裕明²・原口 強³・高田圭太⁴

Koichi Shimokawa¹, Shuichiro Yokota²,
Hiroaki Ishiga², Tsuyosi Haraguchi³ and Keita Takada⁴

Abstract: We have been collecting liquefied sediment samples and observing them in detail not only to reveal the mechanism of liquefaction, but also to utilize the common features as index of past large earthquakes. We carried out geoslicer survey of liquefied layers due to the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake. The geoslicer survey has revealed that a 2m-thick artificial fill of dredged sand was liquefied and erupted on the surface through the 1m-thick capped reclaimed layer of decomposed granite and soil. Detailed observation and description of liquefied layers are the clue to know the liquefaction mechanism.

Key words: Tottori-ken Seibu earthquake, Daikon-shima island, liquefaction, fluidization, geoslicer

1. はじめに

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震(Mw6.6; FREESIA, Harvard)は,鳥取県西部~島根県東部の沿岸に液状化による被害をもたらした.液状化は埋立地を中心とする人工地盤で顕著に発生し,地表の亀裂,噴砂といった現象が観察された(写真1,2;島根大学山内教授撮影).島根大学を中心とする調査団は,地震直後から被害状況を調査・報告している(島根大学地震災害調査団,2000a,b;林ほか,2000;石賀ほか,2001;田崎ほか,2001など).

本調査では,噴砂が明瞭に認められた地点において,地層断面を採取し,供給源から噴砂に至る液状化層の流動過程を詳細に観察することを目的として,島根県八束郡八束町大根島地内(第1図)でジオスライサー(中田・島崎,1997;原口ほか,1998)による掘削調査を実施した(写真3).調査には,幅36cm,長さ4mの鋼矢板7本と,幅1.2m及び1.5m,長さ4mのサンプラーを使用し,平均採取コア長約3mの試料9本を採取した.

調査地点は中海と道路を隔てて近接し,約25年前に埋立てによって造成された.現地表面の標高は約0.8~1.2m(中海湖面より実測)である.液状化により形成された噴砂丘の分布,大きさ,地表面の形状を測量し,断面に現れた地層の変形構造をあわせて,本地点における液状化プロセスを検討した.

2. 噴砂丘の分布と地表面の変位

鳥取県西部地震により,調査地点には列状に分布する大小19の噴砂丘が形成された(第1図).ここでは,それぞれの噴砂丘を南東側からA~Sとした.調査地点内で最も大きな噴砂丘(E)は敷地の道路よりに位置し,長軸方向の長さ約35m,幅約2mである.それぞれの噴

¹活断層研究センター(Active Fault Research Center)

²島根大学(Shimane University)

³復建調査設計株式会社(Fukken Co., Ltd.)

⁴活断層研究センターNEDO養成技術者(NEDO fellow at AFRC)

7月3日受付,8月14日受理

砂丘は H を中心としてこれを取り囲むように分布し、その長軸方向は A~C がほぼ東西、D~K が道路と平行の北西-南東方向を示し、北西端付近に L~S の小規模な噴砂丘が点在する。全体としては南東方向へ触先を向けた船状の分布形態をなす。

調査地内の地形測量の結果、H・J・K 付近を中心とした地形的くぼみの存在が明らかとなり、液状化にともない本地点で地盤の沈下が生じたと推定される。地震以前に調査地点が平坦であったとすれば、沈下量はくぼみの中心付近で最大約 20cm と見積もられる。

3. 層相の記載

本地点の表層地質は、第四紀後期に噴出した玄武岩を基盤とし、木片・ビニール片を含むヘドロ状の有機質泥層、埋立砂層、花崗岩の風化土（マサ土）を主体とする埋立土層で構成される（第 2 図）。

玄武岩は、およそ 0.3-0.12Ma に噴出したと推定されており（鹿野ほか，1994），大根島および江島の基盤をなす。被覆土壌は薄く、島内では露岩する地点が多く認められる。調査地点では、地表面下深度約 3~3.5m でこの基盤に到達した。

有機質泥層は、本地点の埋立て以前に堆積したと推定される。有機質に富み、木片、ビニールの小片等を含み、全体としてヘドロ状を呈する。水平堆積構造が認められ、層厚は 10~20cm である。上部は有機分の少ない厚さ 10mm 程度のオリブ色のシルト~粘土に覆われている。

埋立砂層は層厚が 2m ほどあり、本地点の造成に際して弓ヶ浜周辺でサンドポンプを使って浚渫採取され運び込まれた海砂からなる。中粒砂を主体とするが、細粒砂・粗粒砂を含み、全体として不均質である。所々にアサリ等の貝殻片、5~10mm 程度の海浜礫を多量に含む粗粒砂層がレンズ状に挟在する。本層下部は厚さ 1~2mm の貝殻片まじり粗粒砂及び有機質中粒砂の薄層をシート状に複数枚挟み、平行葉理を形成している。これらの葉理に顕著な変形構造は認められない。一方で、本層の上部数 10cm では、無層理の砂層や葉理の凸状変形が認められる。これらが上位層に貫入する砂脈に連続することから、液状化およびこれに伴う堆積物の流動によって形成された変形であると考えられる。中部に認められるラミナの凹状の撓みと凸の変形は、液状化に伴う間隙水の移動（脱水）の痕跡を示すものと考えられる。

最上部及び現地地表を構成するのは、花崗岩の風化土（マサ土）を主体とする比較的締まった埋立土層である。花崗岩の角礫、粘土化した風化花崗岩、有機質に富む角礫まじり砂層のブロックを不均質に含む。下位の埋立砂層との境界は非常に不規則であり、これは主として埋立て時の不同沈下により形成されたと考えられる。この境界部には有機質に富む黒色シルト~粘土が部分的に薄く挟在する。下位より貫入した埋立砂は、幅 10~30mm 程度の砂脈（ダイク）や、そこから分岐して水平方向へ広がったことを示唆するレンズ状及びパッチ状の砂層（シル）として認められる。地表に噴出した砂（噴砂）は 3~5cm の厚さで堆積し、埋立砂層と同じ中粒砂を主体とし、一部に貝殻の小片を含み、全体として淘汰は良い。

本地点の地下水面は中海の湖水面にほぼ対応しており、調査地点では地表面下約 1m、埋立砂層-埋立土層境界付近に位置する。

4. 液状化による変形構造

コア断面には、埋立砂が砂脈として埋立土層に貫入し、地表の噴砂に連続する様子が明瞭に観察された（写真 4）。砂脈はほぼ垂直に上昇するが、途中で不明瞭となるものも多い。砂脈の幅は狭く、噴砂丘の長軸に直交する向きで掘削したコアでは、明瞭な部分でも 30mm 以下であった。砂脈を充填する堆積物は、埋立砂層に含まれるものと同じ細~中粒砂からなり、色調もほぼ同じである。

埋立砂層の上部ではラミナの波状変形が認められ、埋立土層に直接接する部分では無層理、塊状となることから、液状化による間隙水圧の上昇と物質の流動が推定される。中部以下の

砂層は弱い変形を受けており、液状化による脱水を受けている可能性がある。しかし、皿状構造やパイプ構造といった局所的な間隙水圧の高まりや堆積物の流動を示す直接的な証拠は認められない。

噴砂丘の分布に沿って地表の噴砂を取り除くと、幅 5～10mm 程度の亀裂が連続的に認められる。地震直後の噴砂丘は複数の噴出孔およびそこから噴出した堆積物の連なりからなる(写真 1, 2) ことから、噴砂はこの亀裂の一部を利用して噴出していると考えられる。亀裂は若干傾斜しながら下方に連続しており、細～中粒砂に充填されることから、コア断面に現れた砂脈と一致すると考えられる。

最も道路側(中海側)に位置する噴砂丘 E では、地表に幅 10～30mm の亀裂が連続的に認められた(写真 5, 6)。亀裂は噴砂と同じく道路にほぼ平行に発達しており、亀裂を挟んで陸側(南)がわずかに低下し、2～3cm の段差を生じている。この段差の向きは測量結果による地形的なくぼみと調和的であることから、液状化および噴砂による地盤の沈下現象を反映すると推定される。

調査地点が非常に新しく造成された人工地盤であることから、一連の構造を形成するような激しい地震動を受けるのは今回が最初であり、観察された変形構造は鳥取県西部地震により形成されたものと考えられる。

5. 考察 - 液状化メカニズム -

調査地点は海側を道路に、陸側を民家に限られている(第 1 図)。基盤までの深度及び地下水位が浅いことから、埋立砂層に地震動が直接伝わり、この結果、同砂層内で液状化が生じたと推定される。埋立砂層と埋立土層の境界部の黒色シルト～粘土は、液状化に伴う分級作用で分離・集積し、間隙水圧をより高める働きをした可能性がある。

液状化過程における水の移動は 2 つの段階が考えられる。第 1 は、液状化の結果として砂粒子間隙が小さくなるために生じる相対的な脱水現象であり、液状化層上部に水の層が形成される(Owen, 1987; 大川, 1997)。この過程では、堆積物の構造は若干の変形を受けるが顕著な流動は生じない。第 2 に、液状化層が不透水層により封圧される場合、流体(水もしくは砂粒子と水の混合流体)が上位層の重さで被圧し、これを解放するために被圧流体が移動する現象であり、この過程では周囲の堆積物を取り込み、顕著な流動痕跡を残す(Lowe, 1975; Owen, 1987; 大川, 1997)。流動に伴い形成される痕跡については、多くの露頭観察や水槽実験による検証がなされている(辻・宮田, 1987; 姉川・宮田, 1996 など)。未固結堆積物の変形を扱った研究の多くで、前者を液状化(liquefaction)およびそれに伴う作用、後者を堆積物の流動現象(fluidization)として定義している(Owen, 1987; 大川, 1997 など)。特に地震による液状化について論じる場合、堆積物の流動現象も液状化に伴う現象として含め、広い意味で液状化(liquefaction)を使うことが多い。本調査で得たコア断面の変形構造のうち、埋立砂層中の凹状変形をはじめとするラミナの変形は、液状化に伴う脱水により形成されたと考えられる。また、噴砂に連続する無層理砂層は堆積物の流動によって形成されたと推定される。したがって、噴砂の供給源となったのは埋立砂層の上部に限定され、地表に生じたくぼみは、噴砂および脱水層の圧密による埋立砂層の体積減少を反映すると推定される。

噴砂の発生過程としては、埋立砂の液状化により上位の埋立土層が浮遊状態となり、不安定化したため、亀裂を生じ、そこから下位の砂が水とともに噴出したと推定される(第 3 図)。地表に認められる亀裂の向きが道路・石垣などの構造物にほぼ平行することから、地表面の変形・剪断において、構造物およびこの基礎がアンカー的役割をしたものと考えられる。また、埋立時の不同沈下による地層境界の凹凸は、亀裂形成の際に弱線として作用した可能性がある。1964 年の新潟地震では、旧河道や砂丘といった線状の地形境界に平行する亀裂が卓越し、道路等の建造物境界が同様の役割を果たすことが報告されている(藤田, 1986; 今村・足立, 1986) ことから、本調査地ではこの小規模な例がみられたと考えられる。

6. まとめ

本研究では、鳥取県西部地震時に噴砂が発生した地点で噴砂丘の分布を明らかにし、液状化した地層の垂直断面をジオスライサ - で採取し、詳細に観察した。その結果、以下の各点が明らかとなった。

- ・地表に認められる亀裂は若干傾斜しながら下方に連続し、地層断面では幅 10～30mm の砂脈として観察される。
- ・液状化は、ラミナの変形が認められる層厚約 2m の埋立砂層のほぼ全体で生じた可能性があり、このうち噴砂の供給源として確認できるのは、堆積構造が著しく乱れている上部の数 10cm のみである。
- ・噴砂と液状化による埋立層の圧密の結果、調査地点の中心に向かう地形的なくぼみが形成された。地表の亀裂にはこれを支持する向きの数 cm 程度の段差が認められる。地震以前の調査地点がほぼ一様な標高にあったとすれば、その沈下量は最大で約 20cm と見積もられる。
- ・液状化により、ふたの役割をする埋立土層は浮遊状態となり、不安定化したため、亀裂を生じ、そこから下位の砂が水とともに噴出した。亀裂形成に際しては地層境界の凹凸が弱線として作用した可能性がある。
- ・噴砂丘の分布は地表に生じた亀裂に沿っており、亀裂の向きは湖岸線に平行な向きが卓越する。亀裂の形成においては、構造物およびこの基礎がアンカー的役割をしたと推定される。

今後、液状化層の内部構造を詳細に解析し、粒度分析等を行って粒子の移動について検討することにより、液状化および物質の流動プロセスをより詳細に明らかにする必要がある。

文 献

- 姉川学利・宮田雄一郎 (1996) 水槽実験による砂層の液状化・流動化変形の観察。応用地質, 37, 43-47.
- 藤田至則 (1986) 傾斜する地下水面に起因する亀裂・噴砂・崩壊などの地震現象。地質学論集, no. 27, 95-108.
- 原口 強・島崎邦彦・小島圭二・中田 高 (1998) 地層抜き取り装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取法。地盤工学会誌, 46, 24-26.
- 今村遼平・足立勝治 (1986) 空中写真で見た液状化現象。地質学論集, no. 27, 71-94.
- 石賀裕明・道前香緒里・島根大学地震災害調査団・田崎和江 (2001) 鳥取県西部地震における弓ヶ浜の噴砂。日本地質学会西日本支部会報, no. 117, 5.
- 鹿野和彦・山内靖喜・高安克巳・松浦浩久・豊 遥秋 (1994) 松江地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 126p.
- 林 愛明・狩野謙一・丸山 正 (2000) 2000 年鳥取県西部地震による液状化と災害, 2000 年鳥取県西部地震による液状化と被害。構造地質, no. 44, 1-4.
- Lowe, D. (1975) Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22, 157-204.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) 活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer)。地学雑誌, 106, 59-69.
- 大川秀雄 (1997) 液状化発生メカニズムを考える。土木学会論文集, no. 568, 13-20.
- Owen, G. (1987) Deformation processes in unconsolidated sands. *Deformation of sediments and sedimentary rocks*, edited by M. Jones, and R. Preston, Geological Society special publication, no. 29, Blackwell, Oxford, 11-24.
- 島根大学地震災害調査団 (2000a) 速報 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震。地質学雑誌, 106,

XIX-XX .

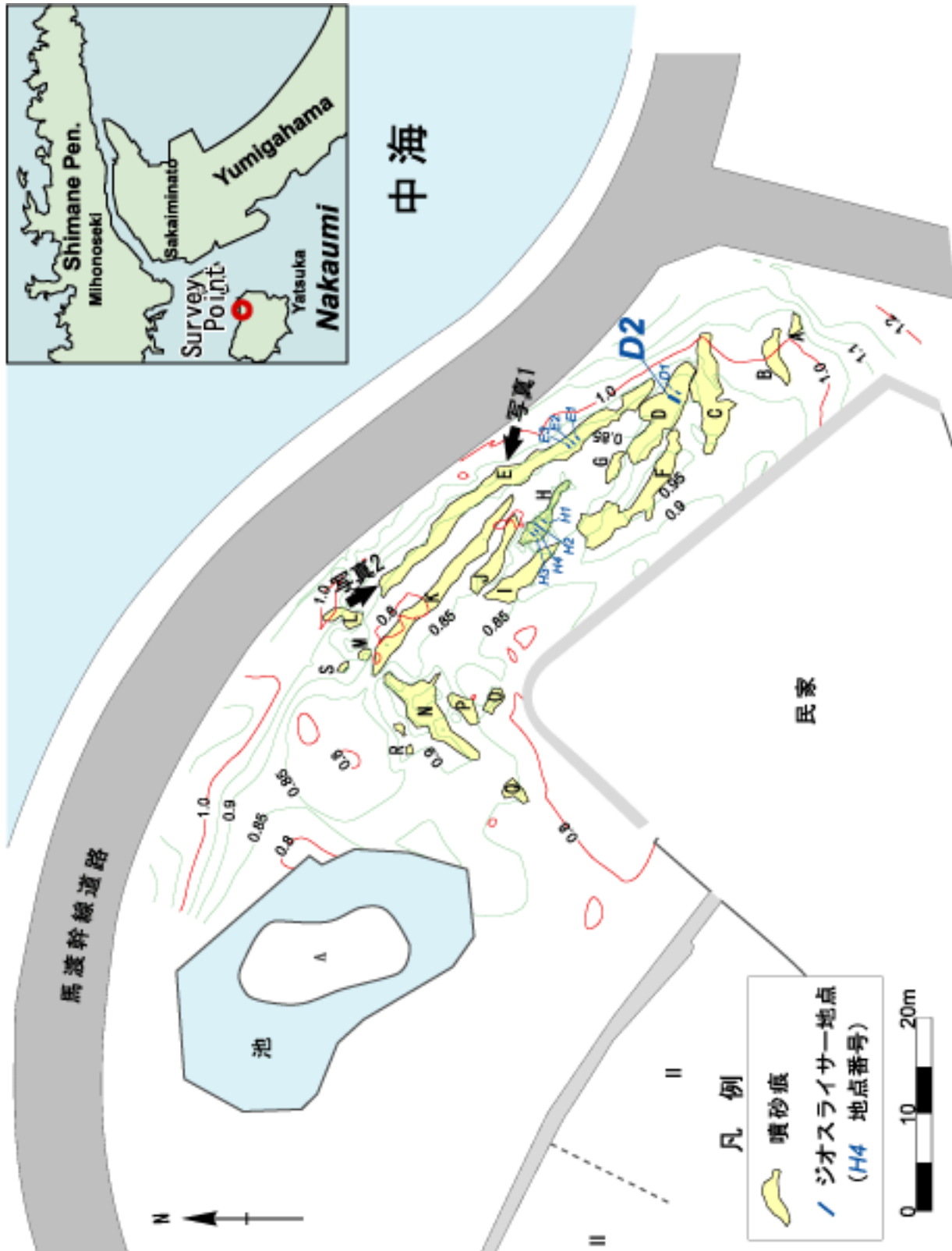
島根大学地震災害調査団 (2000b) 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震の被害状況について . 日本地質学会 News , 3 , no. 12 , 2-5 .

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・鳶田敏行・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 . 地質学雑誌 , 107 , 68-78 .

辻 隆司・宮田雄一郎 (1987) 砂岩層中にみられる流動化・液状化による変形構造 - 宮崎県
日南層群の例と実験的研究 - . 地質学雑誌 , 93 , 791-808 .

成果の公表

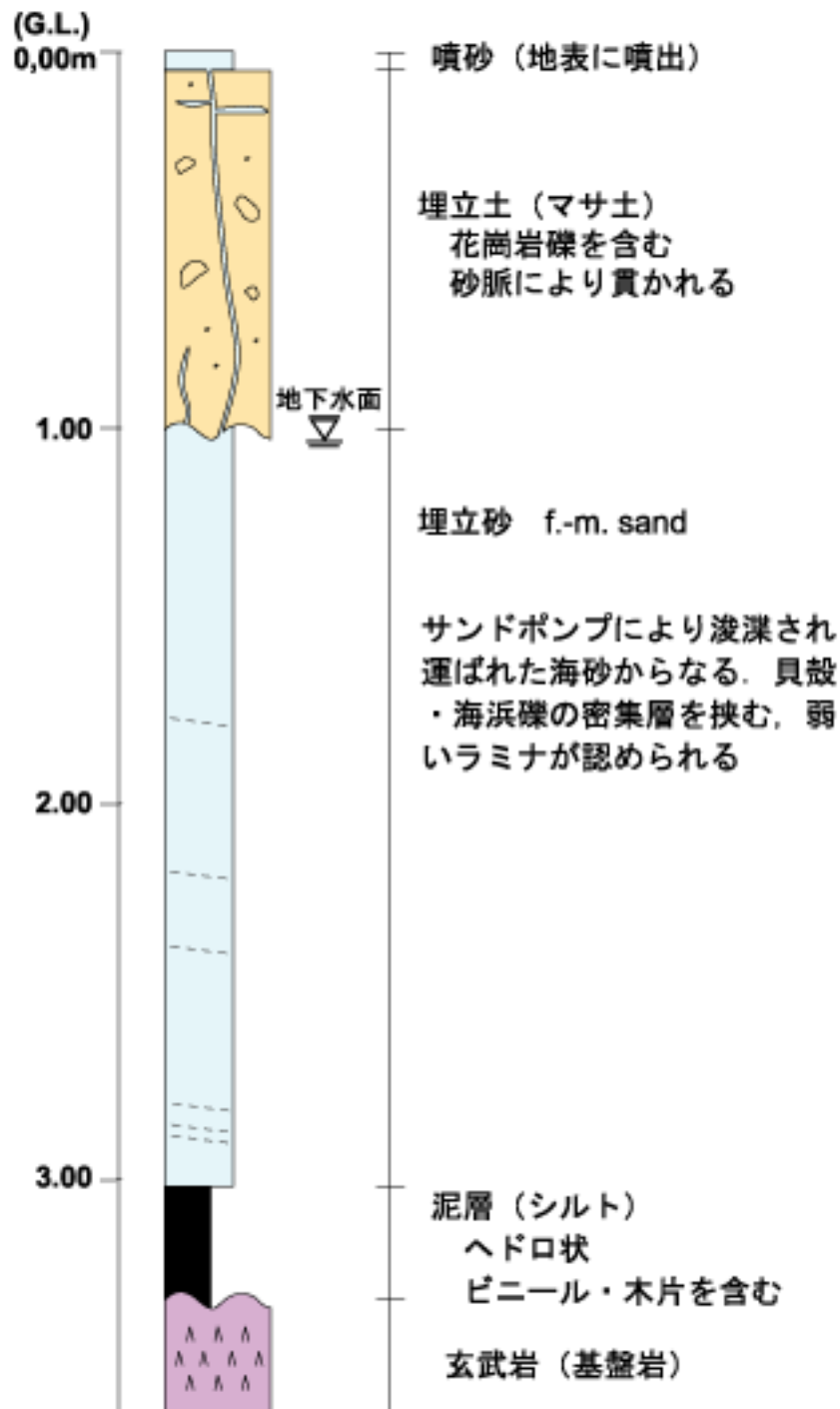
下川浩一・横田修一郎・石賀裕明・原口 強・高田圭太 (2001) 鳥取県西部地震による液状
化層のジオスライサー調査 . 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集 , S3-P017 .



第1図. 調査地点の詳細測量図.

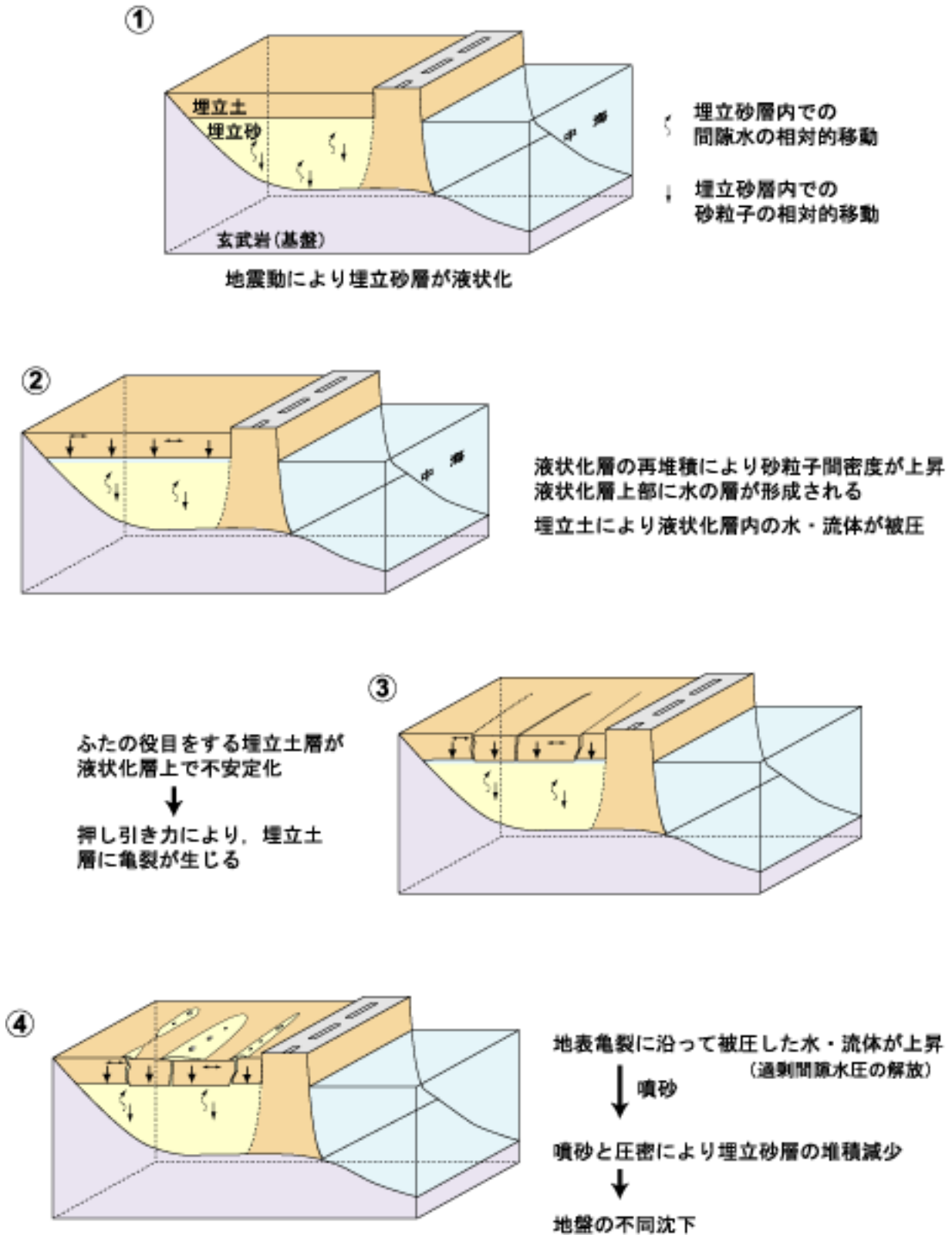
Fig. 1. Detailed topographic map of the survey area. Yellow patches show sand boils.

地形面の標高は中海からの実測値をもとにT.P.に換算。道路と民家の中間（噴砂丘H, J, K周辺）で低く、凹地を形成している。



第2図. ジオスライサー断面の模式柱状図.

Fig. 2. Generalized log of the geoslicer survey sites.



第3図. 液状化過程の模式的解釈.

Fig. 3 Process of the liquefaction and fluidization.



写真1. 地震直後の噴砂状況（その1）. 2000年10月6日.

Photo 1. Sand boils after the earthquake (1). Photo by Seiki Yamauchi, Shimane Univ.

複数の噴出孔・噴砂が列状に分布して噴砂丘を形成する.

撮影：鳥根大学総合理工学部 山内靖喜教授.



写真2. 地震直後の噴砂状況（その2）. 2000年10月6日.

Photo 2. Sand boils after the earthquake (2). Photo by Seiki Yamauchi, Shimane Univ.

噴砂丘Eを西から撮影. 幅約2m, 長さは約35m.

撮影：鳥根大学総合理工学部 山内靖喜教授.



写真3. ジオスライサー本体の打込み.

Photo 3. Driving the Geoslicer.

写真のサンプラーを使用することで幅約1.5m、深さ4mの垂直地層断面を観察することができる.

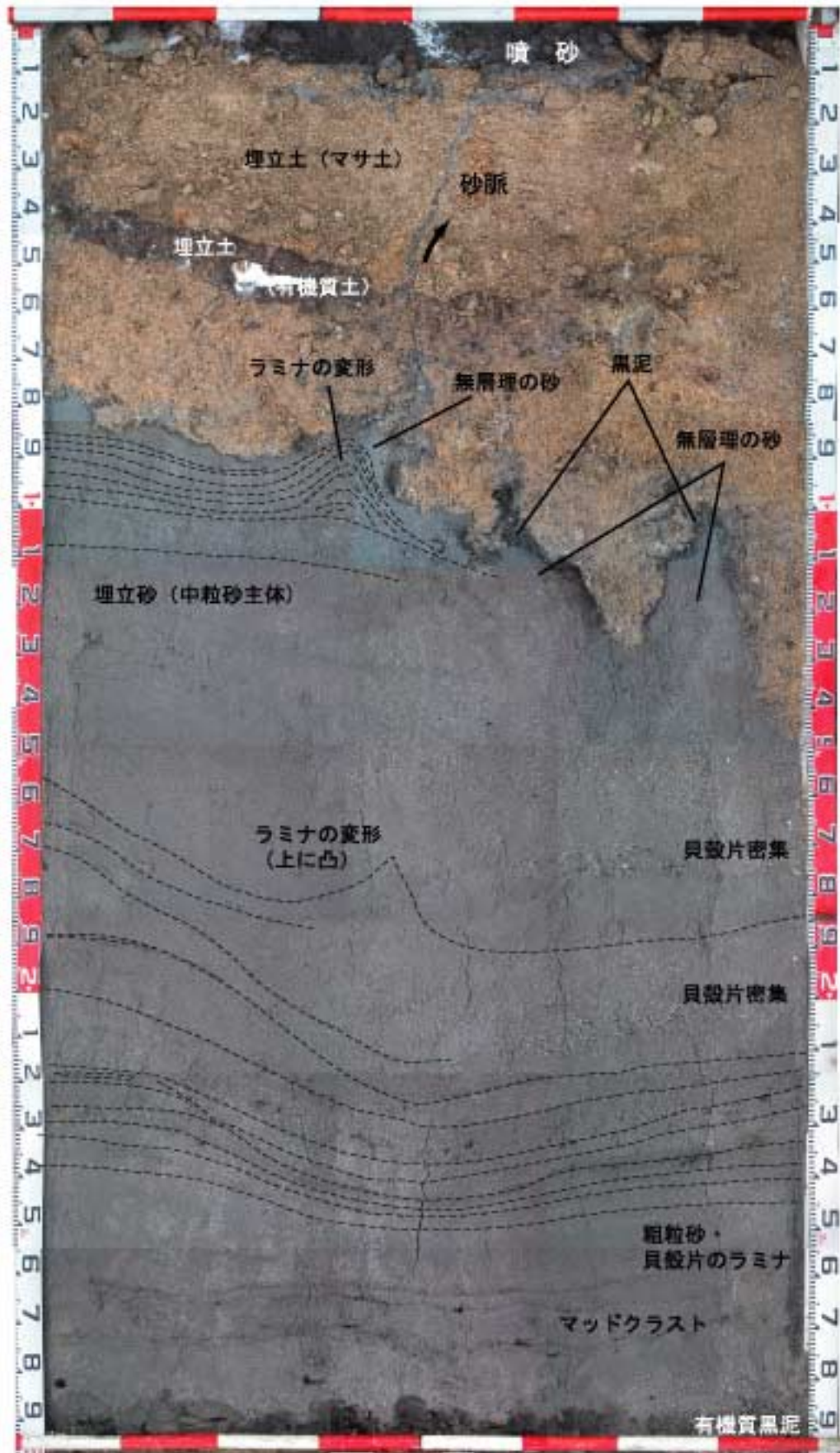


写真4. ジオスライサーにより採取した地層断面のモザイク写真 (D-2).
Photo 4. Photo mosaic of the Geoslicer core (D-2).



写真5. 噴砂丘E地点の地表亀裂。
Photo 5. Surface fracture under the sand boil (E).
噴砂を取り除いた状態。

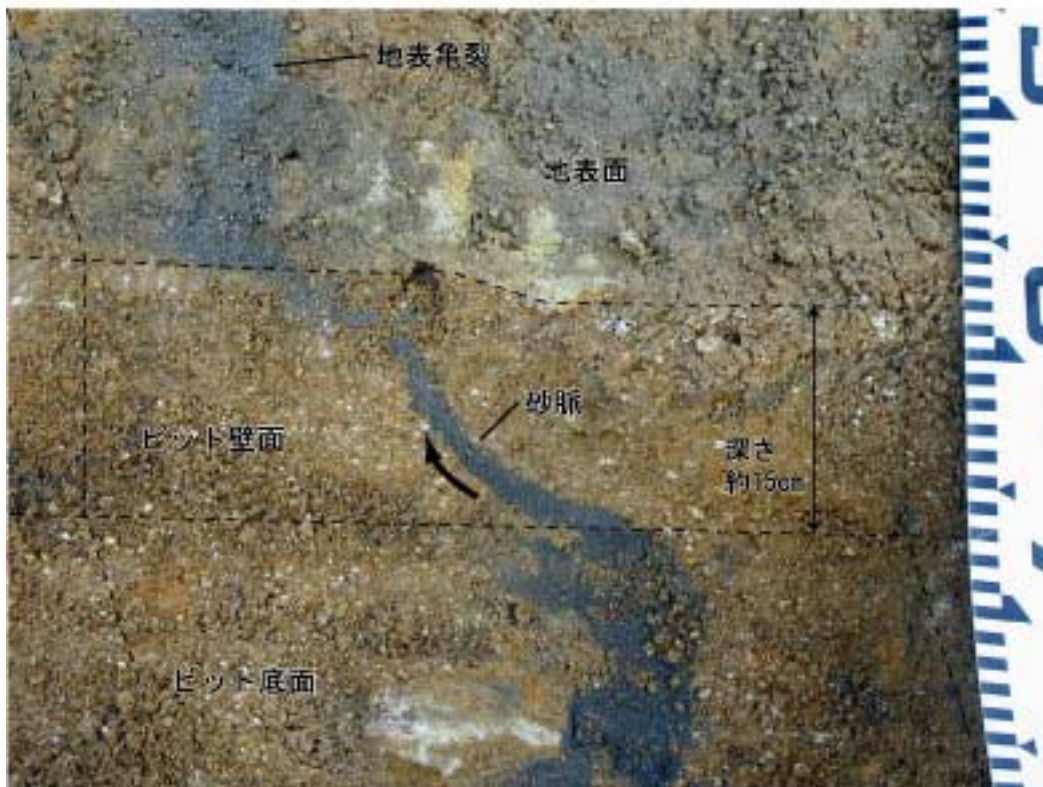


写真6. 地表亀裂の拡大写真。
Photo 6. Horizontal and vertical sections of the surface fracture.
15cmほど掘り下げた状態。地下への連続状態は地層断面に観察されたものと同じ。