液状化による噴砂量推定のための基礎的実験

飛田 哲男¹·内海 友里²

¹正会員 関西大学准教授 関西大学環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-3-35) E-mail: <u>tobita@kansai-u.ac.jp</u>

2関西大学 環境都市工学部都市システム工学科(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

えき噴砂量を定量的に評価する方法を検討するための基礎的データを得ることを目的に振動台を用いた 噴砂の再現実験を行った.実験装置は、回転台、メスシリンダー、アルミ円盤で構成され、加振により液 状化が発生すると、メスシリンダーの側壁とアルミ円盤との隙間から液状化した砂が噴き出すため、これ を測定して噴砂量を求める.この実験を加振波数や上載荷重、初期の相対密度を変えて全109ケース行い、 沈下量と噴砂量を求めた.その結果、地盤の初期相対密度が70%よりも40%の方が噴砂量が多いこと、 また沈下量や噴砂量は、加振波数を増やすと増加するが、上限があることが分かった.しかし、上載荷重 を増やしても噴砂量に大きな変化は見られなかった.実験から求めた沈下量や噴砂量の結果と観察結果か ら、噴砂の発生メカニズムを説明することができた.

Key Words: liquefaction, boiling sand, subsidence, shaking table, relative density

1. はじめに

液状化とは、地震により、飽和している砂の粒子間に存在する水が、砂が密に詰まろうとするのを妨 げるために、間隙水圧が上昇し、それに伴って有効 応力がゼロになり、せん断強さもゼロになることに よって砂が液状になる現象である¹⁾.この地震時の 液状化に伴って地表面に噴砂が現れることは、古く から知られており、それが液状化の発生を示す証拠 として報告されている.

液状化によって建物等に大きな被害が生じること が注目されるようになったのは 1964 年に発生した 新潟地震からであるが,古くは 863 年の地震で,越 中・越後で噴砂・噴水が発生していた記録がある. さらに,安政見聞録には,1854 年の東海地震で駿 河の国で地盤から泥水が噴出した様子が描かれてい る²⁾.1923 年の関東大震災では,関東平野の5都 県と山梨の甲府盆地の広範囲にわたり液状化が発生 し,住宅の基礎が地中にめり込んで床下から噴砂が 起こったり,噴砂で用水路が埋まったりする被害が あった³⁾.これらから,液状化現象と考えられる現 象は昔から観察されていたことが分かる.

また、1981 年の濃尾地震では、岐阜県、愛知県 を中心とした濃尾平野に集中して液状化が発生した. これは、濃尾平野が河川の運搬した土砂の堆積によ ってできた沖積平野で、地下に十分な水分を有し、 かつ震源に近いため揺れが大きかったことによるも のであった.濃尾平野のような沖積平野である軟弱 な地盤の液状化は、歴史時代から記録され、天正地 震(1586)、東南海地震(1944)、三河地震(1945)など による噴砂の痕跡が,遺跡の発掘現場において確認 されている^{4,5)}.

2011 年にニュージーランドのクライストチャー チ近郊で発生したマグニチュード 6.2 の地震では, クライストチャーチ市街を流れる Avon 川周辺で液 状化による大量の噴砂が発生した^{6,7)}.また当地で は,その前年のマグニチュード 7.2 の地震でも液状 化が発生しており,度重なる被害のため,一部地域 では住居の集団移転を余儀なくされた⁸⁾.

我が国においても、2011 年 3 月 11 日に発生した 東北地方太平洋沖地震で、千葉県浦安市の大規模埋 立地において液状化が発生し、建物の傾斜、路面の 沈下、埋設管の損傷、マンホールの浮上だけでなく、 大量の噴砂が発生し、復旧活動に影響を与えた⁹⁰. 浦安地区の液状化の被害は場所により大きく異なり、 旧海岸線より内側の自然地層では液状化がほとんど 見られず、埋立地においてみられたことが分かった. また、戸建て住宅地部分の噴砂の被害が激しかった 部分では、道路面と比較して両脇の戸建て部分が沈 下している部分が多く見られた¹⁰⁰.

古い文献記録等により,地震時の液状化に伴い噴 砂や噴水が発生し,多くの被害があったことは分か る.しかし,噴砂を定量的に評価することはむずか しくこれまでなされていない.噴砂は,地震動や液 状化地盤に関する多くの情報を持っているにもかか わらず,これまでのところ地盤の液状化の有無を判 定するために使われるに過ぎない^{例えば11)}.噴砂発生 を定量化できれば,地震動や地盤の特徴を知ること ができ,より効果的な液状化対策を講じることが可 能になると思われる.

既往の研究

既往の研究では、液状化による噴砂の再現実験や トレンチ調査が行われている.Wibawa ら¹²⁾は、弱 部があったり亀裂が生じたりする可能性のある薄い 粘土層が存在する砂地盤での、噴砂現象のメカニズ ムを明らかにするため、振動台実験を行った.砂層 の間に粘土層としてメンブレンを敷いた模型地盤に 水平振動を加えて液状化を起こした.また、土槽の 中に水圧計をいれ、上層や下層、亀裂部の水圧を計 測した.その結果、粘土層の存在が下層の水が上向 きに流れるのを妨げ、粘土層の下に水層が形成され た.そして、上層と水層の間に間隙水圧の差が生じ ることによって、粘土層の亀裂から水層の水が上層 内に貫入し、噴砂流が発生することが分かった.

大川13)は、液状化のメカニズムについて考察する ため,均一な緩詰め砂層地盤を作成し,砂層表面と 地下水面とを一致させ、振動実験を行った. その結 果、液状化によって砂層全体が均一に沈下し、表面 に水の層ができるが,水面の位置は液状化前と全く 同じであり、砂層が液状化すると上向きの流れが発 生すると思われがちであるが、ただ砂層が沈下した ためにそこに水が残っただけであると述べている. そして, 液状化とは, 何らかの原因で砂粒子間の接 触が失われ、砂粒子が水中を沈降している状態であ ると解釈している. さらに, 先ほど述べた Wibawa らの実験のように、不透水層があり上下二層に分か れた砂層では,上下それぞれの砂層内で液状化が発 生し砂粒子の沈降が起こり, それぞれの層の上面に 水の層ができたと考えている.しかし、水の層と上 層の水圧の差によって水が上層に貫入し、砂を巻き 込みながら地表まで達したものが噴砂であるという 考えは、Wibawa らと同じである. また、液状化は 砂粒子の沈降減少であるという大川の解釈で考える と,液状化した地盤は液状化前とあまり変わってい ないと言える.ゆるい地盤は土砂が水中沈降で堆積 して形成されたものであり、それが液状化して再び 堆積するので、地盤の粒子構造や性質は変化してい ないと考えられる.ただし、液状化によって地盤の 間隙水が絞り出されているため、地盤密度は大きく なっている.しかし大川は,密度が大きくなる部分 はたいした層厚ではないので、一度や二度の液状化 では強度の上昇にはつながらないと述べている.

沼田ら¹⁴⁾は、地震後の液状化地点のトレンチ調査 で、トレンチの断面観察と掘削壁面から採取した土 より、砂脈の物理的性質や形成メカニズム、砂脈や 噴砂と液状化層の関係について考察した.その結果、 砂脈内の粒度組成は、上部ほど細粒に下部ほど粗粒 になめらかに変化し堆積しており、砂脈と液状化層 の粒度組成は異なることが分かった.また、噴砂の 粒度組成も砂脈内の粒度組成とは関係ないことが分 かった.さらに、沼田・染谷¹⁵⁾は、推定した砂脈 形成メカニズムを検証するため、模型振動台実験を 行った.この実験では、模型地盤の上部に、幅 10mm の噴砂口を設けた板を載せていて、板の上に 噴砂した砂が溜まるようになっている.実験の結果、 次のように砂脈が形成されることが分かった.まず 加振を始めると、澄んだ水、泥水、土粒子の順に上 昇し、土粒子は泥水の中を舞うような状態になった. また、砂脈下部の板の直下に水層ができ、砂脈下部 につながって土粒子を押し出すように水が上昇した. その後、水層から砂脈、地表がつながり泥水が噴出 し、噴砂が堆積した.加振を停止すると、砂脈上部 では細かい粒子が舞い、下部では粗い粒子が堆積し た.このように、トレンチ調査から推定される砂脈 形成メカニズムを実験的に検証した.

山口ら¹⁶⁾は, 噴砂の分布から液状化層厚を算定す る方法を模型実験から求めた,液状化層の上部に低 透水層が存在する地盤を振動台で加振し, 噴砂状況 と液状化層厚の関係を求めた. 噴砂が発生する場所 が決められていない点が、これまでの Wibawa らや 沼田・染谷の実験とは異なる.また,噴砂の様子を 側方からと上方からの2種類の方法で観察している. まず,低透水層の層厚や加振回数などの条件を変え て実験を行い、側方からの観察を行った.その結果、 間隙水が低透水層の下部に一時貯蓄されて水層とな ることと、この水層の上部の砂が水層の底面に堆積 することにより,水層の水が上方に移動するように 見えるということが分かった.また、加振回数が多 いほど、全体的に水と砂が噴き上がり、その後に等 間隔の噴砂が現れることが明らかになった.次に, 噴砂を上方から観察したところ, 層厚比(低透水層 厚/液状化層厚)と単位面たりの噴砂個数,噴砂面 積には相関が見られるということが分かった. さら に,実際に液状化が発生した地域の噴砂から液状化 層厚を推定したところ,実際の層厚とほぼ一致する 値が得られた.

これらの既往の研究で実施された噴砂の再現実験 やトレンチ調査から, 亀裂の生じた地盤での噴砂の 発生メカニズムや, 液状化層の上に低透水層が存在 する時の噴砂面積, 噴砂個数と液状化層厚の関係は 推定できることが分かった. しかし, 著者らの知る 限り定量的に噴砂量を評価した研究は存在しない.

2. 実験方法

(1) 実験装置の詳細

図1,図2に本実験で用いた実験装置の全景と概略図を示す.装置は、空圧式振動台(天板寸法: 27cm×40cm)の水平振動を、連結板により回転台に伝え、回転台上のメスシリンダー内に作成した模型地盤に回転振動を与えるものである.回転台上には、図3に示す模型地盤を入れた1000mlのメスシリンダー(内径 64 mm)を固定する.地盤上には、上載荷重を与えるために、図4のアルミ円盤(外径 63 mm,厚さ9 mm,質量 56.5g)を静かに置いた.上載荷重を増加させた実験では、同図のように、円盤の中央に取り付けたアルミ棒におもりを巻き付けた. このおもりは、1球あたり約1gの鉄の球を袋に入れたものであり、重さが偏らないように注意して巻 き付けた.また,加振による液状化で円盤が傾斜し ないように,アルミ棒の上端部の水平移動は拘束した.



図1 実験装置



図2 実験装置の概略図



図3 実験初期状態

図4 アルミ円盤とおもり

表1	珪砂7号の諸元	
Gs		2.55
ρ_{dmin}	g/cm ³	1.23
ρ_{dmax}	g/cm ³	1.55



(2) 噴砂実験に用いた砂の諸元

模型地盤には珪砂7号を用いた. 珪砂7号につい て,最小密度・最大密度試験と土粒子の密度試験, ふるい分け試験を行った. 密度の試験結果を表1に, ふるい分け試験の結果をもとに作った粒径加積曲線 を図5に示す.

(3) 実験手順

本実験では相対密度が 40%と 70%の模型地盤を 以下の要領で作成した. はじめに,相対密度 40% の地盤では質量 1,202.4g,70%の地盤では質量 1,289.7gの常温乾燥した状態の珪砂 7号をメスシリ ンダーに投入する.この時の砂の質量は,砂をメス シリンダーの 900ml まで投入したときに,相対密度 がそれぞれ 40%と 70%になるように,あらかじめ 計算したものである.砂の投入後,水道ホースを模 型砂地盤に挿入し,ボイリングにより目標の相対密 度の地盤を作る.次に,水面と地表面を一致させる ため,地表面上部にある水を紙タオルで吸い取る. 地表面と水面を一致させた状態を図 6,図8に示す.

以下,アルミ円盤による上載荷重を与えた場合と 与えない場合にわけて手順を説明する.

1)上載荷重なしで加振する場合

アルミ円盤を載せずに加振を行うときは、図6の 状態で加振を行う.加振後、図7のように地盤が沈 下するので、その沈下量を計測する.

2) 上載荷重を与える場合

図 8 のように,地表面と水面を一致させた地盤の 上にアルミ円盤を置く.加振によって液状化が発生 すると,メスシリンダー(内径 64 mm)の側壁とアルミ 円盤(外径 63 mm)の隙間から噴砂が起こり,図9,図 10 のように円盤上に砂が溜まる.加振後,アルミ円 盤底面の沈下量を計測する.計測後,地盤の上の水 を吸い取り,アルミ円盤を取り出したものが図 11 である.この砂の炉乾燥質量を求め噴砂量を求める. 模型地盤には,図 12 に示すように,卓越振動数約 7 Hz,メスシリンダー側壁の回転方向に取り付けた 加速度計で記録した最大加速度振幅約 15.0 から 20.0m/s²の振動を与えた.本実験では,この振動数 は変えず,初期相対密度,上載荷重,加振波数を変 えて 65 ケース 109 回の実験を行い,沈下量と噴砂 量を求めた.



加振前(円盤なし) 図 6



図 8 加振前(円盤あり) 図9 加振後(円盤あり)

1000

900



アルミ円盤上の噴砂 図 10



図11 アルミ円盤状に溜まった噴砂



図 12 メスシリンダー側壁で計測した入力加速度の回転 方向成分の時刻歴

実験結果 3.

(1) 加振波数と沈下量, 噴砂量の関係

アルミ円盤を載せて上載荷重を与えた場合と与え ない場合それぞれについて、初期相対密度が 40% と 70%の地盤を作成し、計4ケースの模型地盤に対 し、加振波数を変えて実験を行った.このときの沈 下量の推移について考察する. ここで沈下量は, 上 載荷重がない場合には加振前後の地表面の変位量, 上載荷重がある場合にアルミ円盤の底面の変位量か ら求めたものである.

初期相対密度が 40%と 70%の地盤の加振波数と 沈下量の関係を図 13, 図 14 に示す. 図より, 初期 相対密度や上載荷重の有無によらず、加振波数を増 やすと沈下量も増加するが、250 波以上加振したケ ースでは,加振波数を変えても沈下量に変化がない ことが分かる.目視では、加振が 250 波以下のケー スでは,加振停止後も沈下が続いたり,加振停止と ともに沈下も止まったりしていたが、300 波以上の ケースでは、加振波数の多さに関わらず、途中で沈 下が止まっていた.また,加振波数と初期相対密度 が同じ場合は、上載荷重を与えた方が沈下量が大き いことが分かる. さらに、加振波数とアルミ円盤の 有無の条件が同じであるときは、初期相対密度が 40%の方が 70%の場合よりも沈下量が大きいこと が分かる.しかし、沈下量の大きさは違っても増加 傾向は似ていて, 近似曲線の形が似たものとなって いる.

次に噴砂量の計測結果を示す. アルミ円盤を載せ て上載荷重を与えた場合について初期相対密度が 40%と 70%の場合の加振波数と噴砂量の関係を図 15, 16 に示す. 初期相対密度が 40%の地盤では, 加振が 200 波以上のケースでは、加振波数を増やし ても噴砂量に変化はない. 目視では、加振が 150 波 までのケースは加振停止後も噴砂が継続したが, 200 波のケースでは加振とともに噴砂も止まり、250 波以上では、加振中に沈下、噴砂ともに停止した. 初期相対密度 70%の地盤では、350 波までは、波数 が増えるとともに噴砂量も増加していることが読み 取れる.しかし,目視では,250 波以上のケースで は、加振途中で沈下、噴砂が停止し、250 波以上で は、沈下と噴砂は見られなかった.また、これらの 2つの噴砂量についてみてみると、加振波数が同じ とき、相対密度が 40%の場合のほうが 70%の場合 よりも噴砂量が多いことが分かる.

以上より,沈下量も噴砂量も,加振波数を増やす と増加するが,一定の波数を超えると増加が止まる ことが分かった.これは,加振によって地盤が密に なり,沈下が抑制されるためである.







(2) 噴砂量の相対密度に対する依存性

ここまでの実験で、加振波数やアルミ円盤の有無 など、初期相対密度以外の条件を同じにした場合、 初期相対密度 40%の地盤のほうが 70%の地盤より、 沈下量も噴砂量も多くなることが分かった.そこで、 加振後の相対密度と噴砂量の関係について考察する. 初期相対密度が 40%と 70%の模型地盤において、 加振波数と加振後の相対密度の関係を表したものが 図 17, 18 である.相対密度は、式(1)、(2)を用い て求めた.

$$\rho_{after} = \frac{M_0 - M_b}{V_0 - V_s} \tag{1}$$

 ρ_{after} :沈下後の地盤の密度 M_0 :投入した砂の炉乾燥質 量 M_b :噴砂の炉乾燥質量 V_0 :加振前の体積, V_s :沈下した体積

$$Dr = \frac{\rho_{d\max}\left(\rho_{after} - \rho_{d\min}\right)}{\rho_{after}\left(\rho_{d\max} - \rho_{d\min}\right)} \tag{2}$$

Dr:相対密度 $ho_{d \max}:$ 最大乾燥密度 $ho_{d \min}:$ 最小乾燥密度

図より,40%の地盤は加振により最大 80%程度まで,70%の地盤は 90%程度まで密実化されることがわかる.上載荷重がある場合とない場合では,沈下量には差があったが,加振後の相対密度で比較すると傾向は同じで,相対密度の差もほとんどないことが分かった.アルミ円盤を載せた場合の加振後の体積は,載せなかった場合よりも噴砂した分だけ小さくなるために,アルミ円盤を載せた場合のほうが沈下量は大きくなるが,加振後の相対密度で比較するとほぼ同じであり,沈下量は初期の相対密度に依存していると考えられる.

(3) 上載荷重に対する噴砂量の変化

次に、アルミ円盤から伸びるロッドに 50g, 100 g, 150g, 200gのおもりをまきつけ上載荷重を増

やした場合について,上載荷重と噴砂量の関係を調 べる.加振波数 20 波で加振した時の,上載荷重と 噴砂量の関係を図 19 に示す. この結果, 上載荷重 を増やしても、噴砂量に変化はあまり見られなかっ た. これを加振波数 20 波では液状化が足りないこ とが原因かもしれないと考えた. そこで加振を 200 波に増やして再度実験を行った.加振波数 200 波で 加振した場合について、上載荷重と噴砂量の関係を 図 20 に示す. このケースでも, 噴砂量に大きな変 化は見られなかった. これらのグラフから上載荷重 を50gから250gに増やしても、噴砂量は1倍から 2倍にしかならないのに対して、加振波数を 20 から 200 に増やすと噴砂量は4倍から5倍に増えている ことが分かる.以上より,沈下量や噴砂量は,加振 波数を増やすと大きく増加するが、上載荷重を増や しても小さい変化しか見られないことが分かった.



図19 上載荷重と噴砂量の関係(加振20波)



4. 噴砂量推定のための考察

(1) 噴砂発生のメカニズム

ここでは、実験で求めた沈下量や噴砂量、相対密 度と、観察結果をもとに、噴砂発生のメカニズムを 考察する.まず、アルミ円盤を載せなかった場合の 観察結果から考えた噴砂のメカニズムを図 21 に示 す.加振前は同図(1)のように、水位は地表面と同じ である.加振が始まると同図(2)のように噴水し、同 図(3)の状態では.地盤の上方にゆるい砂が見られた. 加振が止まると、地盤は沈下し、(4)のように地盤上 に水が残った.

次に、アルミ円盤を載せた場合の噴砂のメカニズ ムを図 22 に示す. 同図(1)のように、アルミ円盤は 地表面に載せている.加振により地盤内の間隙水圧 が上昇し、同図(2)のように間隙水だけが噴き出す. その後、間隙水と一緒に砂も噴き出し、同図(3)のよ うに円盤上に噴砂が溜まる.加振が続くと、噴砂噴 水も続いているように見えるが、実際は砂層の中を 円盤が同図(4)のように沈下することで、円盤上に砂 が溜まった.また、地盤の上には水の層ができたが、 アルミ円盤直下には,既往の研究で見られたような 水だけの層は見られなかった. これは、メスシリン ダーと円盤の隙間が 0.5 mmと,砂の平均粒径約 0.2 mmの約 2.5 倍となっており噴砂のスピードが大きい ためであると推測される. 地盤上水位は, 砂層が沈 下しても,変化しなかった. さらに加振を続けると, 沈下も噴砂も止まった. これは、液状化によって地 盤内の間隙水が絞り出され、砂層は沈下し続けたこ とで地盤が密になり、これ以上沈下しなくなったと 考えられる.

これらより、円盤上に溜まった噴砂は、間隙水と 一緒に噴出して溜まった砂と、地盤が沈下したこと により溜まった砂の両方を含んでいて、沈下は噴砂 と圧密の複合によって起きるということが分かった. 実際の液状化でも、このような要因で噴砂が地盤上 に堆積していると考えられる.

また、両図には、アルミ円盤がある場合のほうが 沈下量は大きくなるが、加振後の相対密度は同じに なるという結果も表している.アルミ円盤を載せな かった場合は、噴砂したゆるい砂を含んで密になっ ているが、アルミ円盤を載せた場合は噴砂している ので、その差が沈下量の差であり、加振後の相対密 度で見ると変わらないと考えられる.

(2) 噴砂量推定のための考察

噴砂の発生を対象として液状化実験を行い,噴砂 発生のメカニズムを考察したその結果,沈下量(噴 砂量)には,相対密度が関係していると考えられる. そこで,初期の相対密度と沈下量の関係を示したも のが図 23,初期の相対密度と噴砂量の関係を示し たものが図 24 である.両図から,相対密度が大き くなるにつれて沈下量も噴砂量も小さくなることが 分かる.沈下量は,相対密度が 40%から 70%にな ると,40%時の3割の沈下量になっている.噴砂量 も,相対密度が 30%大きくなると,50g以上減っ ているものもある.また,これらより,沈下量(噴 砂量)と相対密度には高い相関関係があることが分 かった.また,加振波数の影響が大きいことも分か る.

本実験では、加振波数や上載荷重の変化に伴う噴 砂量の変化を、定量的に評価することはできた.し かし、噴砂量を推定するためには、相対密度から推 定するのが良いということが分かった.もっと相対 密度を変えた実験を行えば、加振波数ごとの噴砂量 の推定ができると考えられる.ただし、メスシリン ダーとアルミ円盤の隙間の大きさによって噴砂量が 変化する可能性があるので、そのことも検討する必 要がある.また、本実験から分かった噴砂のメカニ ズムは、実際のメカニズムと物理的には同じである とので、噴砂量予測式を作る上での基礎データとな ると考える.





5. 結論

本研究では、定量的に噴砂量を評価するための実 験を行った.その結果を次に示す.

- 振動台を用いた模型実験において、回転台とメスシリンダー、アルミ円盤を用いて噴砂を再現することを工夫した。その結果、アルミ円盤上に砂が溜まり、定量的に噴砂量を計測することができた。
- 初期相対密度や加振波数,上載荷重を変えて全 109 ケースの噴砂の再現実験を行い,沈下量と 噴砂量を求めた.
- 3) 沈下量や噴砂量は、相対密度によらず、加振波 数を増やすと増加するが、ある加振波数を超え ると、一定になることが分かった.また、上載 荷重を増やしても噴砂量に変化は見られなかった。
- 加振波数や上載荷重の条件を同じにしたとき、 相対密度が 40%の地盤のほうが、70%の地盤 よりも、噴砂量が多くなることが分かった。
- 5) 実験から求めた沈下量や噴砂量の結果と実験の 観察結果から,噴砂の発生メカニズムを説明す ることができた.

本研究では, 噴砂量を定量的に評価できることが 示されたものの, 装置の制約から加速度や水圧の測 定はできなかった. これは今後の課題である.

参考文献

- 1) 吉見吉昭(1991):砂地盤の液状化,第二版.
- 2) 中央防災会議,災害教訓の継承に関する専門調 査会(2006):地盤の液状化被害,1923 関東大 震災報告書—第1編—,第3章第2節,pp.80-92.
- 3) 地質調查所(1925): 関東地震調查報告.
- 中央防災会議,災害教訓の継承に関する専門調 査会(2006):濃尾地震による災害,1891 濃尾 地震報告書,第1章2節, p.58.
- 5) 愛知県防災会議地震部会(1979):愛知県震災報告, 震災予防調査会報告第弐号, p.34.
- Cubrinovski, M. and Green, R.A. (2010): Geotechncial reconnaissance of the 2010 Darfield (Canterbury) earthquake, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 43, No. 4, December 2010, pp. 243-320.
- Bray, J.D., O'Rourke, T.D., Cubrinovski, M. Zupan, J.D., Jeon, S.-S., Taylor, M., Toprak, S., Hughes, M., van Ballegooy, S. and Bouziou, D. (2013): Liquefaction Impact on Critical Infrastructure in Christchurch, Final Technical Report, p51.
- Cubrinovski, M.(2013): Liquefaction-induced damage in the 2010-2011 Christchurch(New Zealand)Earthquakes, 18th Int. Conf. ISSMGE, Paris,

TC203 Workshop.

- 国土交通省(2001):東日本大震災における全面 的な液状化被害の事例報告,資料 No. 7.
- 10) 浦安地区の液状化-流動化被害の詳細調査結果, 千葉県ホームページ.
- 11) 国土交通省関東地方整備局,公益社団法人 地 盤工学会(2011):東北地方太平洋沖地震による 関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, pp.3-4.
- 12) Wibawa, B., Ohkawa, H. and Okuma, T. (1990): An experimental study of sand boiling due to liquefaction, Japan Society for Natural Disaster Science, 9-3, pp.42-59.
- 大川秀雄(1997):液状化の発生メカニズムを考える,土木学会論文集,No.568,III-39, pp.13-20.
- 沼田淳紀,森伸一郎,陶野郁雄,遠藤邦彦, (1999):液状化で生じた砂脈と噴砂に関する考察,土木学会論文集,No. 638/III-49, 311-324.
- 15) 沼田淳紀, 染谷昇. (2004): 液状化による砂脈 形成の簡易模型実験, 第 39 回地盤工学研究発 表会, D-07,980,pp.1957-1958.
- 16) 山口晶,吉田望,飛田善雄. (2008):液状化に 伴う噴砂と液状化層厚の関係,土木学会論文集 C, Vol.64 No.1,pp.79-89