

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.55 No.2 June 2016

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 55 卷 第 2 号 (Vol. 55, No. 2) , 2016 年6月 (June 2016)

目 次 (CONTENTS)

1. 高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析手法
..... 富田孝史, 本多和彦, 千田優 3
(Numerical Simulation on Tsunami Inundation and Debris Damage STOC Model
.....Takashi TOMITA, Kazuhiko HONDA, Yu CHIDA)

2. 植生が浅海域の流動場にもたらす影響に関する現地調査と流動モデルによる数値解析
.....茂木博匡, 中川康之, 渡辺謙太, 所立樹, 門谷茂, 桑江朝比呂35
(Field Observations and Numerical Analyses on the Effect of Vegetation on the Hydrodynamics of a Shallow
Water Using a New Hydrodynamic Model
.....Hirotsada MOKI, Yasuyuki NAKAGAWA, Kenta WATANABE,
Tatsuki TOKORO, Shigeru MONTANI, Tomohiro KUWAE)

3. サンゴ礫混じり土の力学特性—人工配合による再構成試料を使ったパラメトリックスタディー
..... 渡部要一, 金子崇, 佐々真志 61
(Mechanical properties of coral-gravel soil –a parametric study using reconstituted samples–
.....Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA)

4. 海底液状化土砂流動のダイナミクスと解析法及び実験・現地検証
..... 佐々真志 75
(Submarine Liquefied Flow Dynamics and Their Analytical Framework with
Experimental and Field Validations
..... Shinji SASSA)

海底液状化土砂流動のダイナミクスと解析法及び実験・現地検証

佐々 真志*

要 旨

海底地盤は、地震や津波などの多様な外力を受けて、大きく流動しうる。近年のソナー探査や地質調査技術の進展に伴って、沿岸・沖合域双方において数多くの海底地盤流動イベントの報告がなされている。しかし、このような海底地盤流動のダイナミクスについては、現地観測がほぼ不可能なこともあり、未だ不明な点が多い。又、従来の研究は、海底斜面の安定性等の崩壊条件やイベント堆積物の調査・分析に集中しており、当該災害予測・対策に不可欠な「海底土砂流動ダイナミクス」に関して、欧米で未だほとんど進んでいない背景があった。本報告では、世界各地の大規模海底土砂流動イベントとその帰結をレビューすることにより、沿岸防災・減災上の海底液状化流動の重要性を浮き彫りにしている。その上で、筆者が世界に先駆けて開発した海底液状化土砂流動の理論及び解析フレームワークを提示し、実験及び現地挙動の分析を通じてその有効性を包括的に実証している。そして、海底液状化土砂流動の成層構造、減速・再堆積過程、ならびに、その後の斜面・テラスの形成に果たす二相系物理の本質的役割を明らかにしている。得られた知見と開発した理論・解析法は、沿岸域の大規模土砂流動過程の予測や地震・津波による沿岸・海底イベント過程評価への適用展開、及び、沿岸・海洋構造物ならびに海底地すべり津波に対して海底液状化土砂流動がもたらす影響・インパクトの合理的な評価・予測の基盤となるものであり、今後の幅広い活用が期待される。

キーワード：海底地すべり，液状化，津波，重力流，凝固，理論・数値解析

* 地盤研究領域動土質研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5054 Fax：0468-44-4577 e-mail：sassa@ipc.pari.go.jp

Submarine Liquefied Flow Dynamics and Their Analytical Framework with Experimental and Field Validations

Shinji SASSA*

Synopsis

Seabed ground can flow markedly owing to diverse external loading such as earthquake and tsunami. Recent sonar observations and geological surveys report a plenty of the field evidence on submarine mass movements in coastal and offshore areas. However, the dynamics of such submarine mass movements remain largely unclear since on-site observations are formidable if not impossible. Also, conventional studies have focused on the failure conditions of submarine slopes and/or the event deposits surveys, and therefore the submarine sediment flow dynamics that are essential for disaster mitigation and prediction, remain poorly understood. In this report, the author reviews some large-scale submarine mass movements and their consequences highlighting the importance of submarine liquefied flows, and present the theory and analytical framework of the submarine liquefied flow dynamics together with their experimental and field validations. It elucidates the crucial role of the two-phase physics in flow stratification, deceleration and re-deposition as well as in the formation of scarps and terrace in submarine liquefied flows. The developed analytical framework is widely applicable for predicting and assessing the large-scale sediment flows and evaluating their impact and influence on tsunami and the stability of coastal/offshore structures.

Key Words: Submarine Landslides, Liquefaction, Tsunami, Sediment Gravity Flow, Solidification, Theory/Numerical Analysis.

* Head, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-468-445054 Fax: +81-468-444577 e-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

目 次

| | |
|---|----|
| 要 旨 | 75 |
| 1. 序論 | 79 |
| 2. 世界各地の大規模海底土砂流動イベントとその帰結のレビュー：海底地すべり津波を主として·· | 80 |
| 3. 海底液状化土砂流動過程の幾つかの特徴 | 81 |
| 4. 海底液状化土砂流動のダイナミクス：理論及び数値解析法 | 83 |
| 4.1 理論の問題設定 | 83 |
| 4.2 液状化流動域の定式化 | 83 |
| 4.3 凝固域の定式化 | 84 |
| 4.4 数値解析法 | 85 |
| 5. 海底液状化土砂流動のダイナミクス：実験および現地挙動分析と検証 | 86 |
| 5.1 実験挙動の分析・検証 | 86 |
| 5.2 現地挙動の分析・検証 | 87 |
| 6. 結論 | 89 |
| 謝辞 | 89 |
| 参考文献 | 89 |
| 記号表 | 90 |

1. 序論

海底地すべり・重力流等の海底土砂流動に関する研究は、主に欧米で精力的に展開されており、近年の地震探査や地質調査技術の進展に伴って、沿岸・沖合域双方において数多くの海底土砂流動イベントの報告がなされている。大規模な海底土砂流動は、沿岸・沖合構造物に甚大な影響をもたらすと同時に、海底地すべり津波を引き起こすため、近年益々その重要性を増してきている。とりわけ、海底地すべり津波は、一般的な地震津波と異なり、卓越波長の違いから比較的水深の浅い沿岸域で崩壊が生じた場合に危険となることが知られている。実際、これまでに、2002年のストロンボリ島、1998年のパプアニューギニア、1964年のアラスカ・バルデス沿岸、2010年のハイチ沿岸の海底地すべり津波によって計2000名を超える人命が奪われたことが報告されている(ユネスコ, 2009, 2014)。又、パイプラインなどの沿岸構造物への海底土砂流動被害については、世界損失額にして年400億円と見積もられている。

このような甚大な被害をもたらす海底大規模土砂流動の特徴は、地震等の自然外力による海底地すべり発生後に高濃度堆積物重力流のかたちに移移することによって長距離流動・再堆積することである(図-1参照)。流体-土

砂の相互作用は、高濃度重力流を特徴づける鍵となるプロセスであるが、従来の理論・モデルは、断面積分型やレオロジー型のもが多く、これらの水と土の相互作用を十分に考慮することができない。すなわち、上述のような高濃度堆積物重力流の多相系物理を適切に理解し、合理的な評価予測を実現するには、流体動力学と土質力学の融合・一体化が重要不可欠である。

筆者は、海底地盤液状化にともなう移動境界問題としての流体-地盤系の一体解析(Sassa et al., 2001)を世界に先駆けて実現し、その発展によって、水中液状化堆積物重力流のダイナミクスを予測しうる理論解析フレームワーク:LIQSEDFLOWを開発した(Sassa et al., 2003)。そして、流動中の土砂内部の間隙水のマイグレーション(図-1(b))によって“波状”に生じる進行性凝固が海底土砂流動のダイナミクスに大きな影響を及ぼすことを明らかにした(Sassa et al., 2003)。その後、本予測結果を一連の重力流可視化実験を通じて証明するとともに(Amiruddin et al., 2006)、上記モデルを高度化し、水中地盤の液状化に伴う高濃度重力流れの発達から停止までの一連の過程とその内部機構を整合的に予測・再現することに成功している(Sassa and Sekiguchi, 2010, 2012)。

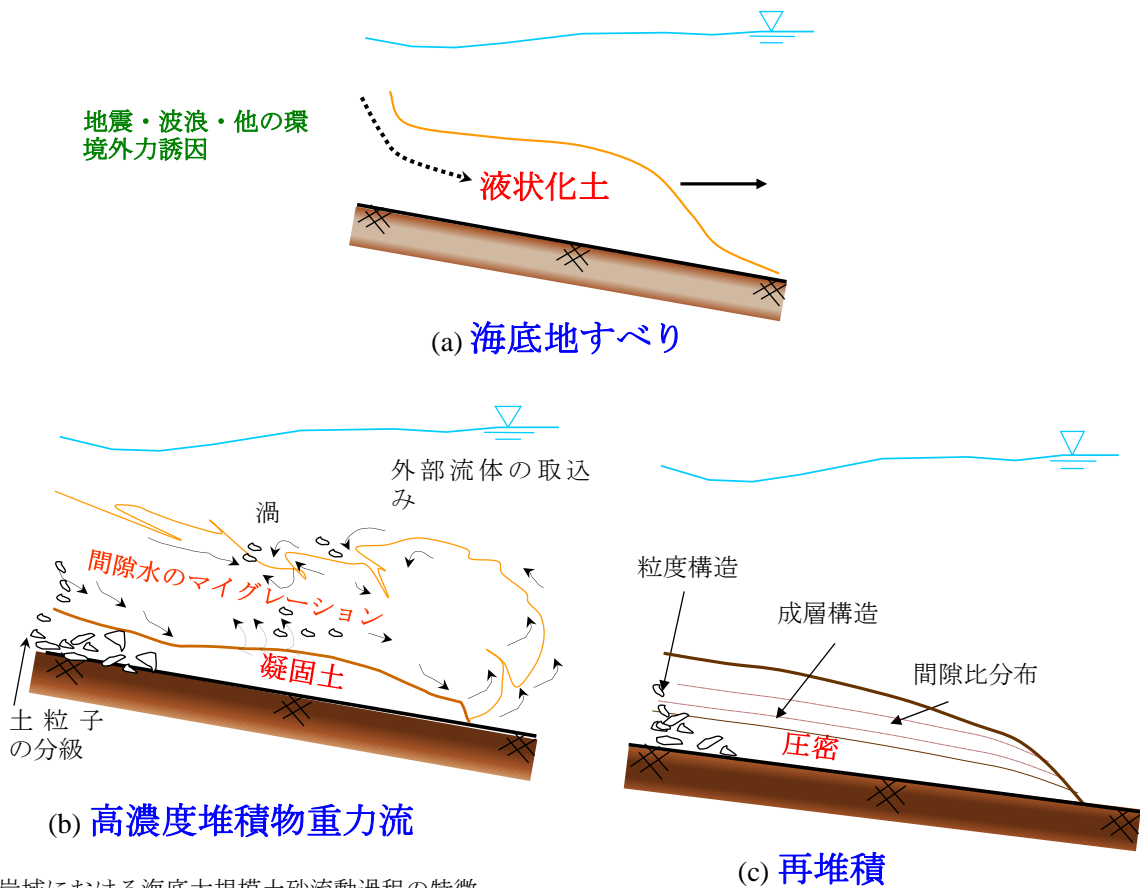


図-1 沿岸域における海底大規模土砂流動過程の特徴

本報告では、先ず、世界各地で生じた大規模海底土砂流動イベントとそのインパクト・帰結についてレビューし、海底液状化土砂流動の重要性を浮き彫りにしている。その上で、海底液状化土砂流動のダイナミクスを整合的に評価予測するために開発した理論と解析フレームワークを提示する。そして、海底液状化土砂流動に関する実験および現地挙動の分析を通じて同解析法の有効性を包括的に検証し、最後に結論を述べる。

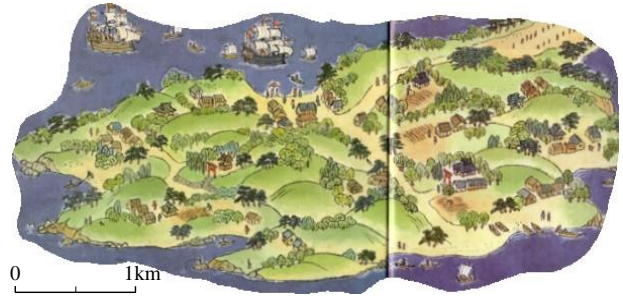
2. 世界各地の大規模海底土砂流動イベントとその帰結のレビュー：海底地すべり津波を主として

津波及び人的災害を引き起こした大規模な海底地すべりイベントはこれまでに数多く報告されている。本章では、その代表的な事例について記す。

イタリア・ストロンボリ島で 2002 年の火山活動に伴って、海底地すべり及び海底地すべり津波が発生し、家屋と社会基盤施設に多くの被害をもたらした (Tinti et al., 2005)。

パプアニューギニア沖で 1998 年に発生した海底地すべりは大規模な津波を引き起こし、同海底地すべり津波による死者は 2200 名に及んだ (Tappin et al., 2001)。

アラスカ・バルデス沿岸では 1964 年の M9.2 の巨大地震によって大規模な海底地すべり及び海底地すべり津波が発生し、人命・財産ともに甚大な被害をもたらした。同死者の 90% (106/122) が津波由来であり、その内 80% (85/106)



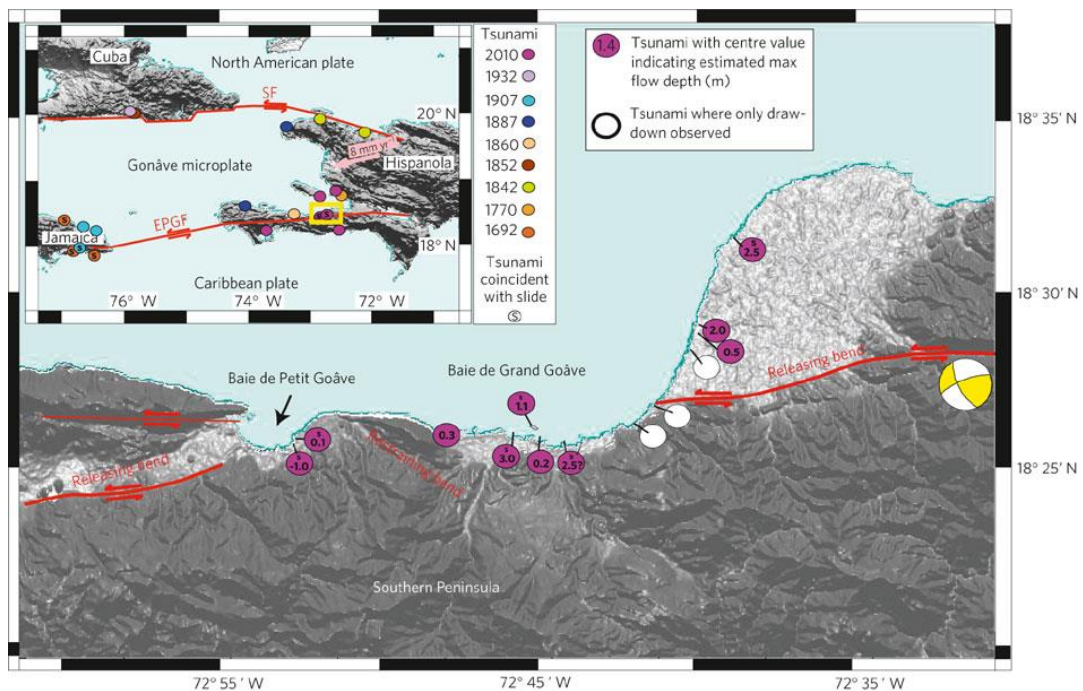
図—2 海底液状化土砂流動のインパクト：瓜生島の事例 (液状化海底地すべりによる島の崩壊と津波, 加藤, 1991)

が地震津波ではなく、海底地すべり津波によるものであったことが明らかとなっている (Haessler et al., 2008)。

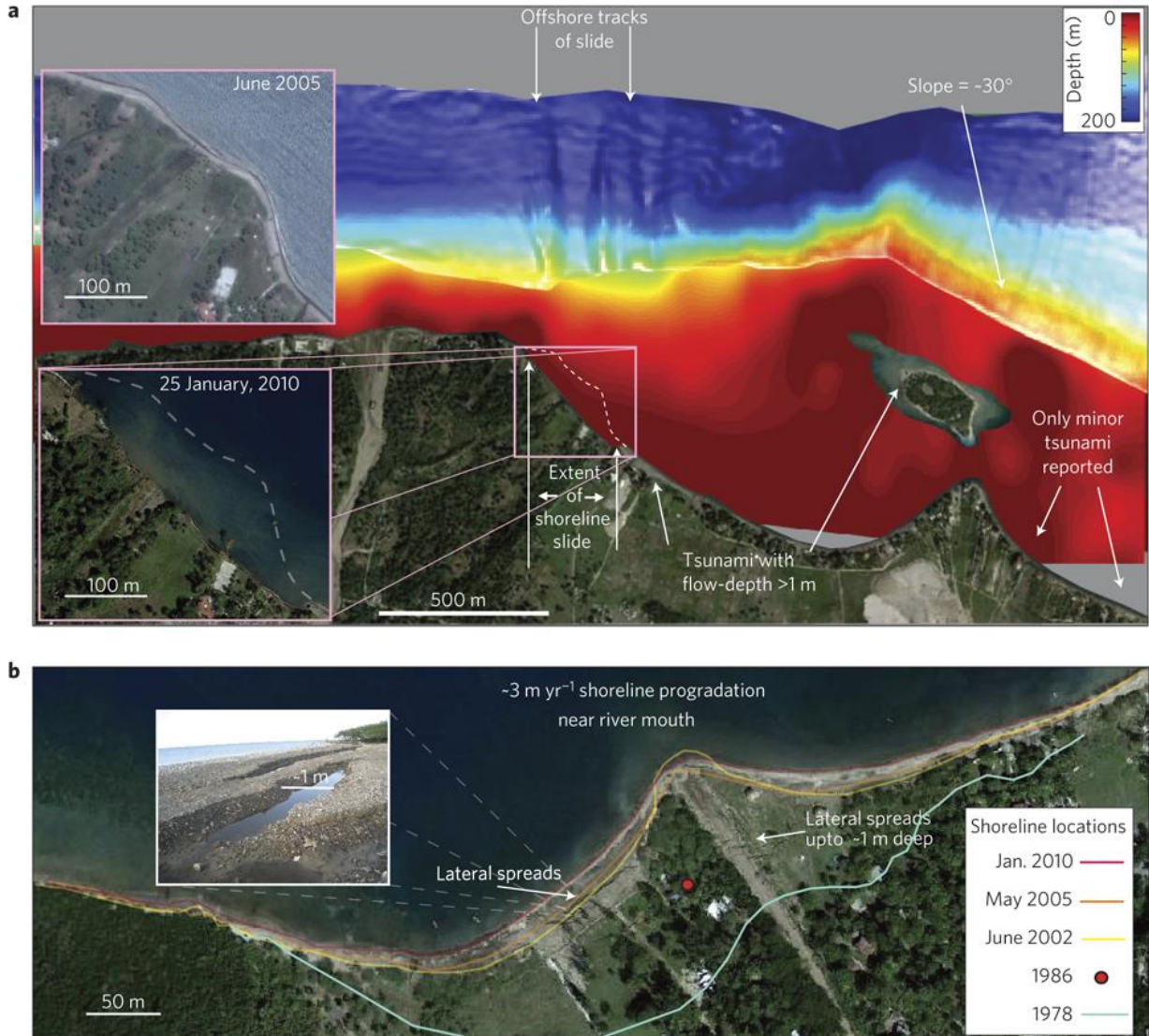
カナダ・グランドバンクスで 1929 年の M7.2 地震によって海底地すべり及び海底地すべり津波が発生した。同大規模海底土砂流動によって海底ケーブルが 1000km にわたって破断すると共に、同海底地すべり津波によりニューファンドランドの村に壊滅的な被害を与え、村民 27 名が犠牲となった (Heezen and Ewing, 1952; Whelan, 1994)。

ノルウェー沖で 8000 年前に生じたストレッガ海底地すべり・大規模海底土砂流動は、グリーンランド海からノルウェー海にかけて全沿岸域に大規模な津波をもたらしたことが報告されている (Solheim, 2005)。

日本の海底地すべり津波の事例では、別府湾沿岸で 1596 年の M7.1 地震によって広範囲の海底地すべりが発生し、同沿岸に位置していた瓜生島 (図-2 参照) の完全崩壊と沈



図—3 海底液状化土砂流動のインパクト：ハイチ沿岸の事例 (Hornbach et al., 2010)



図—3 海底液状化土砂流動のインパクト：ハイチ沿岸の事例
 (図左上の沿岸部が広範囲に液状化流動し、津波を引き起こした, Hornbach et al., 2010)

没を引き起こした。この海底地すべりは大規模な津波を引き起こし多くの人命が失われた。事例記録によると同死者は708名に及んだ。この際、同イベントの重要な特徴として、液状化による海底地すべり・土砂流動が大規模な津波を引き起こしたことが報告されている(加藤, 1991)。

その他の日本の海底地すべり津波の記録・報告事例としては、1771年の八重山海底地すべり津波(平石ら, 2001)や2009年の駿河湾海底地すべり津波が挙げられる。特に、後者においては、地震断層が起こした津波に比べて2倍以上の高い津波が海底地すべりによってもたらされたことが明らかとなっている(読売新聞, 2010)。

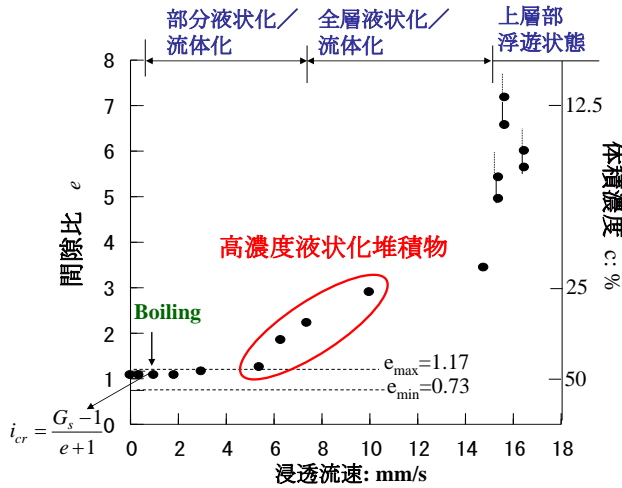
近年では、ハイチで2010年のM7地震の際に、河口デルタの沿岸域が大規模に液状化・流動し津波が発生した(図-3参照)。特筆すべきことは、当該地震が横ずれ断層型

であったため、地震断層による津波ではなく、沿岸域の液状化によってもたらされた液状化重力流津波が、現地の最も厳しい津波を引き起こしたことである(Hornbach et al., 2010)。

3. 海底液状化土砂流動過程の幾つかの特徴

本章では、海底液状化土砂流動の幾つかの重要な特徴について、Amiruddinら(2006)の液状化重力流に関する水槽実験の観測結果に基づき記述する。

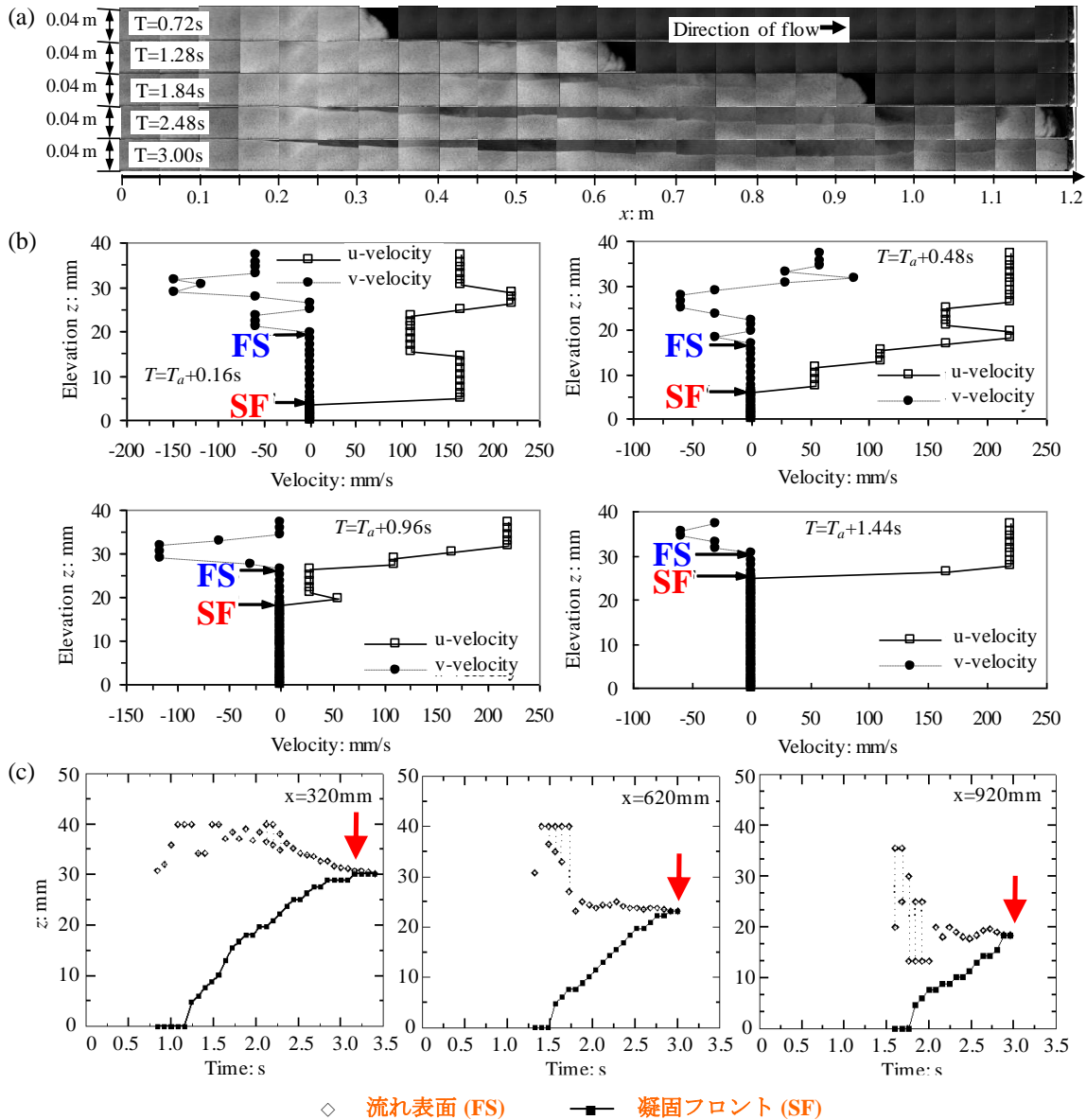
当該実験は、細砂地盤に上向き浸透流を負荷することによって液状化を誘起し、水平水路上を流動させたものである。図-4は液状化に伴う土砂状態の遷移を示している。浸透流速の増加によって、部分液状化/流体化の状態から



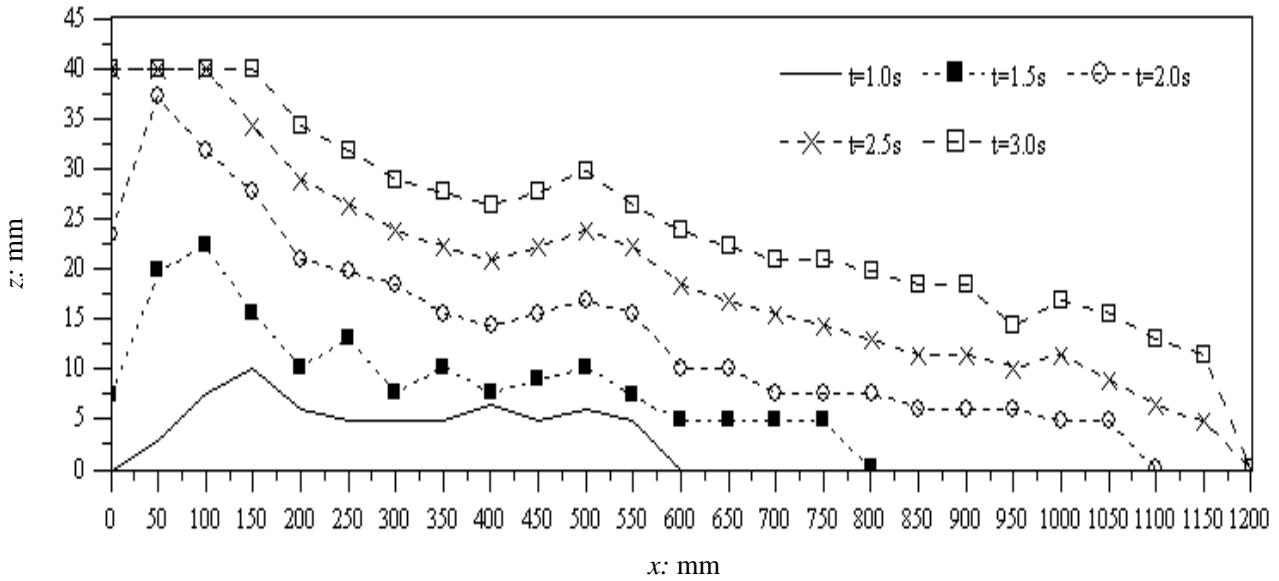
図—4 液状化にともなう土砂状態の遷移

全層液状化/流体化, 上層部浮遊状態へと遷移していることがわかる. 同図中の赤線で囲んだ高濃度液状化領域が本実験の対象である.

高濃度液状化重力流 (体積濃度 $c = 38\%$) の観測結果を図-5 に示す. 同図(a)は流況, (b)は水平及び鉛直流速の深さ分布, (c)は異なる3地点における流れ表面と凝固フロント (流動過程の土砂内部で水平・鉛直流速ともゼロとなった”凝固”領域の上面) の発達を示している. 同図から, 高濃度液状化重力流の先端ならびに流れ表面 FS と内部凝固フロント SF の時間発達が確認できる. 実際, 同図(b)の流速分布に特徴づけられるように, 液状化重力流は次の3つの領域で構成される. すなわち, 基盤と凝固フロントの間の領域 ($0 < z < SF$) は, 土砂内部に形成された流速ゼロの



図—5 液状化重力流の特徴を示す水槽実験の観測結果 : (a) 流況, (b) 流速深さ分布, T_a は液状化重力流の先端部が当該地点に到着した時間を表す. (c) 異なる3つの地点における流れ表面と凝固フロントの発達



図—6 液状化重力流過程における内部凝固領域の時空間発達を示す観測結果のまとめ

凝固域であり、流動過程で土粒子骨格を回復させた領域を表している。凝固フロントと流れ表面の間の領域 ($SF < z < FS$) は、高濃度の液状化土砂が流下方向に非定常に流動している領域を表している。同図(b)から、凝固フロント SF は、時間とともに鉛直上方に発達し流れ表面 FS に漸近していく様子がわかる。これは、液状化重力流過程で生じる進行性凝固の発達を示している。一方、流れ表面の上部領域 ($FS < z$) は、浮遊状態の希釈化したきわめて低濃度の土砂のみを含み、鉛直流速の発達にみられるように乱流と外部流体の取り込みによって特徴づけられる。

異なる3地点での流れ表面および凝固フロントの時間発達を示した同図(c)から、重力流の先端が所定の地点を通過すると、凝固が基盤より発達し始め、次第に流れ表面に到達している様子がみとれる。この際、特筆すべきことは、上述の全地点を通じて、凝固フロントが実質的に同時 ($t \approx 3s$) に流れ表面に到達し、流れが停止したことである。これは、液状化重力流の“Freezing”現象を示している。

液状化重力流過程における内部凝固領域の時空間発達特性を示す観測結果のまとめを図-6 に示す。流動土砂内部で凝固フロントが波状に発達していることがわかる。このような凝固領域の波状の時空間発達は、液状化重力流のダイナミクスに大きく影響することが明らかとなっている (Sassa ら, 2003; Sassa and Sekiguchi, 2010, 2012)。

関連する液状化重力流の特性については、以下に示す開発理論・数値解析法に照らして後に詳しく記述する。

4. 海底液状化土砂流動のダイナミクス：理論及び数値解析法

4.1 理論の問題設定

本節では、開発理論の問題設定と定義について記述する。地震、高波、又は、過剰な浸透作用等の動的外力により液状化/流体化した水中地盤を図-7に示している。液状化土砂 (密度 ρ_2) は、重力作用下で崩壊し、外部流体 (密度 ρ_1) に向けて流動を開始する。外部流体の深さ h は、重力流過程において一定と仮定している。液状化重力流は、粒子群の移流や干渉沈降をとともなう一方、その内部で進行性凝固過程を経験し再堆積する。ここに、進行性凝固とは、流体化した粒状土が、連続した擾乱下で土粒子骨格を再生していく相変化過程を表しており、これまでに重力流 (Sassa et al., 2003; Amiruddin et al., 2006)、ならびに、波浪作用下 (Miyamoto et al., 2004; Sumer et al., 2004, 2006) で理論・実験両面から実証されてきている。

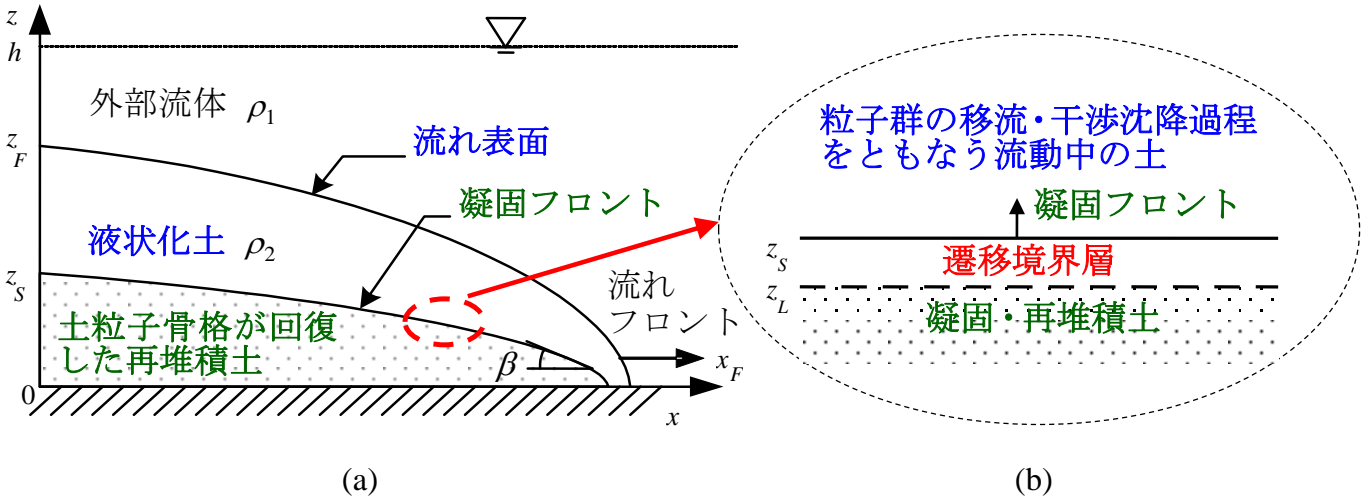
土砂内部の任意地点での間隙水圧 p は、2つの成分により構成される。すなわち、

$$p = p_e + p_s \tag{1}$$

ここに、 p_s は $p_s = \rho_1 g (h-z)$ で定義される静水圧 (g は重力加速度) であり、 p_e は土砂のコンラクタンシー (せん断に伴う塑性収縮特性) による過剰間隙水圧を表している。

4.2 液状化流動域の定式化

理論の汎用性を考慮し、無次元での定式化のために、代表長を a 、代表速度を $U_r = \sqrt{ga}$ と記す。これにより、無次元時間 $T = U_r t/a$ 、及び、無次元過剰間隙水圧 $P_e = p_e / (\rho_2 - \rho_1) U_r^2$



図—7 液状化土砂流動理論の問題設定：(a) 進行性凝固を経験する液状化重力流 (b) 流動中の液状化土と凝固・再堆積土の間に導入された遷移境界層

と表される。この際、流れ表面 (図-7参照) での境界条件は、上式(1)より、 $P_e = 0$ となる。

以上の定義により、液状化重力流のダイナミクスを記述するための、過剰間隙水圧の効果を考慮した2次元 ナビエ-ストークス式系は次のように表現することができる (Sassa et al., 2003) :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial T} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{\partial P_e}{\partial X} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{\partial P_e}{\partial Z} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) - \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (4)$$

ここに、 $U = u/U_r$ はx方向の無次元速度、 $V = v/U_r$ はz方向の無次元速度、 $R_e = HU_r/\nu$ はレイノルズ数を表す。この際、 ν は流動中の液状化土の動粘性係数である。

液状化重力流過程における粒子群の移流と干渉沈降は、土砂の体積濃度Cに関する次式によって記述される。

$$-\frac{\partial(C \cdot U)}{\partial X} - \frac{\partial(C \cdot V)}{\partial Z} + \frac{\partial(C \cdot W_s)}{\partial Z} = \frac{\partial C}{\partial T} \quad (5)$$

ここに、 $W_s = w_s/U_r$ は粒子群の無次元沈降速度である。この際、液状化土砂の高濃度重力流に着目しているため、上式

(5)は拡散項を含んでいないことに留意する。粒子群の沈降速度は土砂濃度Cに依存する。ここでは、Richardson and Zaki (1954)により提案された次式を用いる。

$$W_s = W_0 (1 - C)^n \quad \text{with } n = 4.65 \quad (6)$$

ここに、 $W_0 = w_0/U_r$ は無次元 Stokes 沈降速度である。上式(6)の液状化土砂への適用性は、これまでに実験的に検証され、その有効性が確かめられている (Sassa and Sekiguchi, 2010)。

4.3 凝固域の定式化

液状化重力流過程における凝固過程は、2次元圧密式により記述することができる。ダルシー透水系数 k_w を上述の代表速度 U_r により、土骨格の拘束剛性 m を $(\rho_2 - \rho_1)U_r^2$ により無次元化し、それぞれ、 K_w, M と表記すると次式のかたちとなる。

$$\frac{\partial(\sigma_m - P_e)}{\partial T} = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} M \cdot K_w \left(\frac{\partial^2 P_e}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 P_e}{\partial Z^2} \right) \quad (7)$$

ここに、 σ_m は凝固過程にある粒状土の無次元平均全応力である。この際、拘束剛性Mの値は、有効拘束圧の上昇とともに増加する。ここでは、Sassa et al. (2001)を参照し、次式の簡明な関係を用いる。

$$M = (Z_s - Z) \cdot M_r \quad \text{for } 0 \leq Z \leq Z_s \quad (8)$$

表—1 液状化重力流解析に用いた材料パラメタ

| $c : \%$ | R_e | $k_w : \text{mm/s}$ | M_r | $\tan \beta_{cr}$ | $w_0 : \text{mm/s}$ |
|---------------------|--------|---------------------|-------|----------------------------|---------------------|
| 30, 34, 38, 42, 50* | 100000 | 0.15 | 400 | 0.35, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6* | 20 |

*現地挙動分析に用いた値を表す

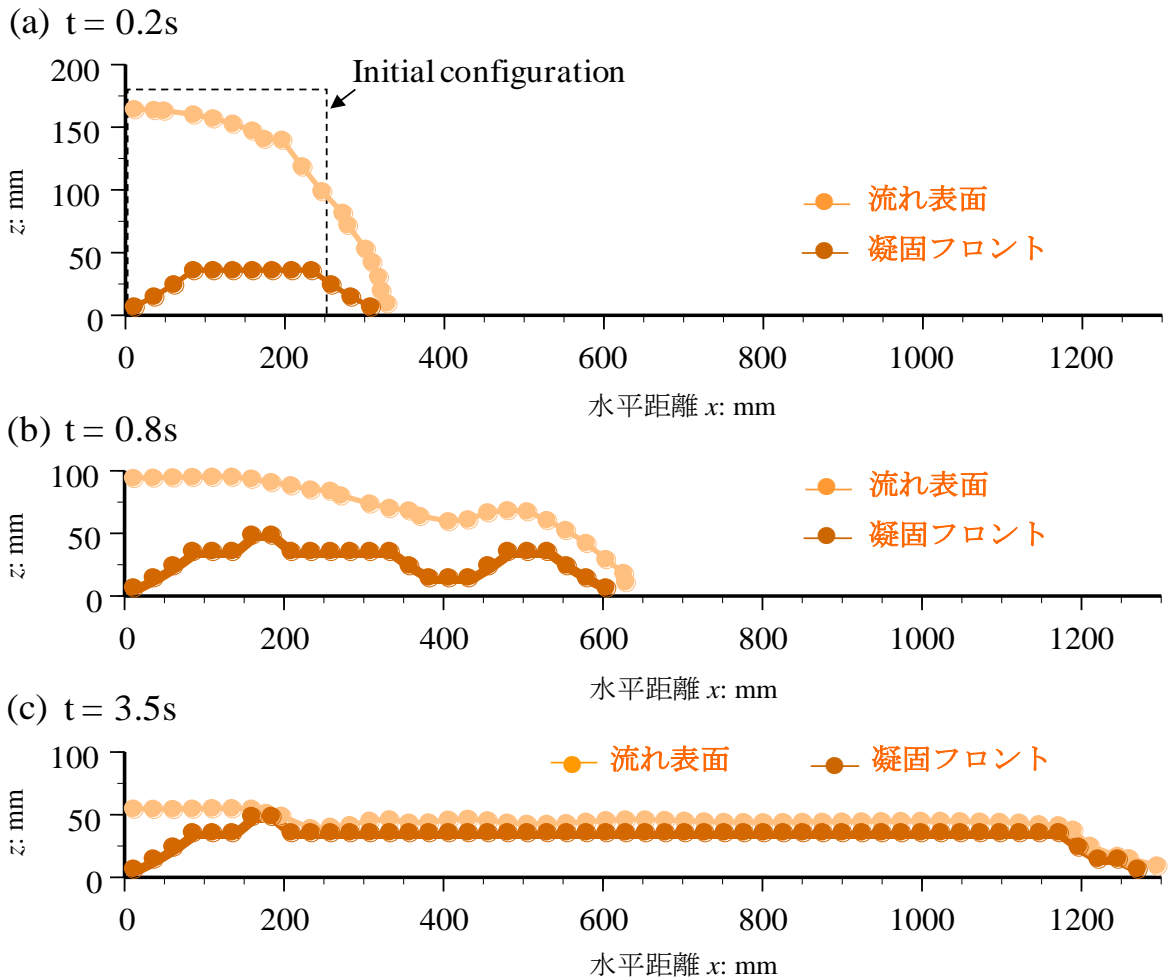
ここに、 M_r は1の無次元厚さを有する土砂に対応する M の参照値である。

4.4 数値解析法

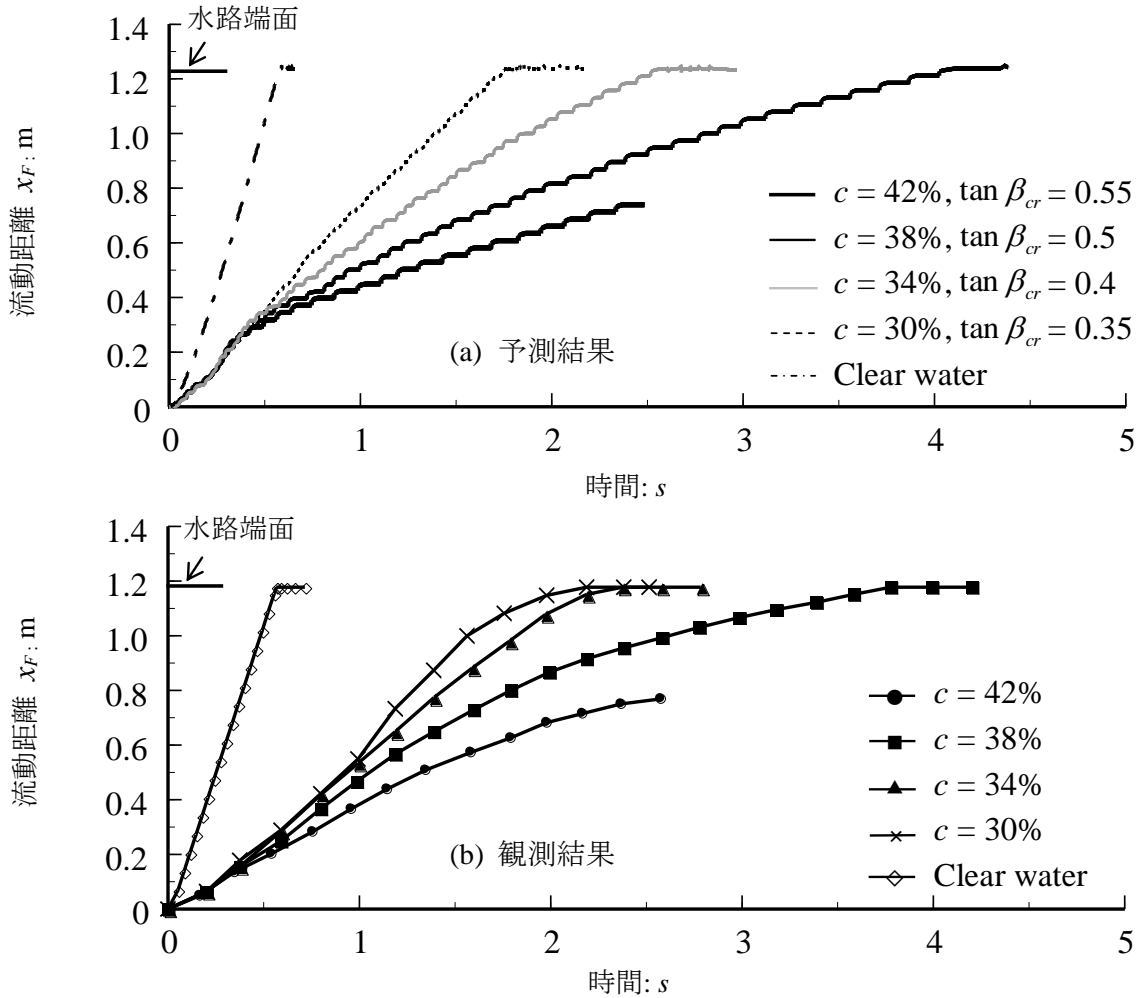
以下では、上述の定式化に対する数値解析法について記述する。その重要な特徴は、移動境界問題としての枠組みを通じて液状化域におけるナビエ-ストークス式・連続式系と粒子群の移流・干渉沈降式ならびに凝固・再堆積域における圧密式を図—7に示すような遷移境界層を介して有機的に融合していることである。すなわち、液状化領域

の底部に有効応力はゼロであるも僅かな剛性を持つ遷移境界層を導入することによって、流体化した粒状土が流動過程で有効応力を伴って土粒子骨格を回復していく相変化(凝固)過程の記述・解析を可能としている。

上述の場の支配式(2)~(8)は、非一様 Euler メッシュであるスタッガード格子上で流動域には SMAC 法 (Amsden and Harlow, 1970), 凝固域には陰解法による有限差分法を用いて離散化している。流れ表面ならびに凝固面の追跡には、VOF 法 (Hirt and Nichols, 1981) を適用し、流れの質量保存を満足する為に効果的な体積移流スキーム (Hamzah,



図—8 再堆積に至る液状化重力流の流況および流れの層構造の予測結果 ($c = 38\%$)



図—9 異なる4つの土砂濃度に対する液状化重力流の流動距離の時刻歴に関する (a) 予測結果および(b) 観測結果

2001) を合せて用いている. この際, 凝固した土の速度場はゼロであり, 流動中の液状化土には, 固定境界として作用する. 関連する数値解析スキームの詳細については, Sassa and Sekiguchi (2010) に詳しい.

各計算ステップでは, 図—7 参照の下, 液状化流動域の底部に位置し凝固域直上の遷移境界層で有効応力増分が正になると, 当該層が凝固域となるため, 上記定義により, 凝固域の直上に新たな遷移境界面が形成される. これに伴う凝固域と流動域の動的相互作用が上述の場の支配式に基づき逐次解かれる. 又, 凝固に及ぼす干渉沈降の効果を考慮するために, 土砂濃度が液状化した当初の濃度をある一定量 (1%) 上回った際も, 同様に凝固フロントの進展が許容される. 但し, この際, 凝固面の傾斜角 β は, 土の摩擦抵抗に照らした限界角 β_{cr} を超えないように逐次判定・更新している.

5. 海底液状化土砂流動のダイナミクス：実験および現地挙動分析と検証

5.1 実験挙動の分析・検証

本節では, 上述の開発した解析法: LIQSEDFLOW により, Amiruddin et al. (2006) の水槽実験を対象とし実施した一連の液状化重力流の分析・検証結果について記述する. 用いた材料パラメータを表—1 にまとめている. 水中の液状化土の見かけの粘性は液状化状態に依存しうる (Sumer and Fredsoe, 2002). ここでは, 表面的な粘性の影響を避け, 相変化 (凝固) をともなう二相系物理の役割を明確にするために, 流体化した土砂のレイノルズ数は水と実質同等に設定している.

土砂濃度 $c = 38\%$ の下での液状化重力流の流況の予測結果を, 異なる3時点で, 図—8 に示している. 重力流開始時点 ($t = 0$) では, 凝固フロントは液状化土砂底部に一致

している。t = 0.2s 時点で、液状化土砂は、崩壊し始めており、凝固フロントが鉛直上方に進展していることがわかる。その後、t = 0.8s 時点で、液状化土砂は著しい流動変形を示している。凝固域フロントは、流れとともに上方及び側方に進展し波状に発達した。この段階では、流動中の液状化／流体土と土粒子骨格を回復させた凝固土の間の相互作用により、顕著な減速過程が発現する。この流れの減速特性については後に記述する。次第に、液状化重力流は、流動距離を大きく伸ばし、凝固フロントが流動土砂内部の各地点でほぼ同時に流れ表面に到達した結果、停止した (t = 3.5s)。これは、液状化重力流の“Freezing”現象の発生を示している。

上述のような液状化重力流の流況、流れ内部の層構造ならびに停止機構・過程の予測結果は、上述の Amiruddin et al. (2006) の水槽実験での観測事実とも良く整合している。

液状化重力流過程では、土砂濃度は進行性凝固と共に、粒子群の移流・干渉沈降過程によって変化する。しかし、このような干渉沈降が流れの減速過程に及ぼす影響は微々たるものであり、上述の進行性凝固の発生が、再堆積に至る流れの顕著な減速過程をもたらしていることが明らかとなっている (Sassa and Sekiguchi, 2010)。

異なる4つの土砂濃度に対する液状化重力流の流動距離の予測・観測結果を、水の重力流の結果とともに図-9に示している。いずれも顕著な流動を示している一方、水

の重力流と異なり、全ての液状化重力流で、流れの減速域が発現していることがわかる。実際、液状化重力流の流動ポテンシャルは、土砂濃度の増加とこれに伴う凝固・再堆積土の摩擦抵抗角の上昇と共に顕著に低下している。これらの流動距離の予測結果は、観測された流動距離の特性とも定量的に良く整合していることがわかる。

まとめると、以上に述べた全ての結果は、開発した理論及び数値解析法が、液状化重力流のダイナミクスを現実的にシミュレートし、液状化流れ内部で発生・発達する進行性凝固とこれによる流れの成層構造、減速ならびに再堆積／停止の一連の全過程を整合的に予測再現しうることを実証している。このことは、同時に、液状化重力流の“Freezing”に至る流れの顕著な減速過程が、物理的意味が不明瞭なレオロジーを導入することなく、流体動力学と土質力学アプローチの融合・一体化を通じた、相変化(凝固)を伴う実際の二相系物理に基づき予測可能であることを裏付けている。

5.2 現地挙動の分析・検証

本章では、上述の実験挙動の分析・検証を通じて得られた海底液状化土砂流動のダイナミクスに関する特徴・知見を現地イベントに照らして分析・検証することによりさらに深める。対象とする現地挙動は、カリフォルニア州クラマス川河口沿岸域の緩斜面 (0.25 度) 上で 1980 年のマグニ

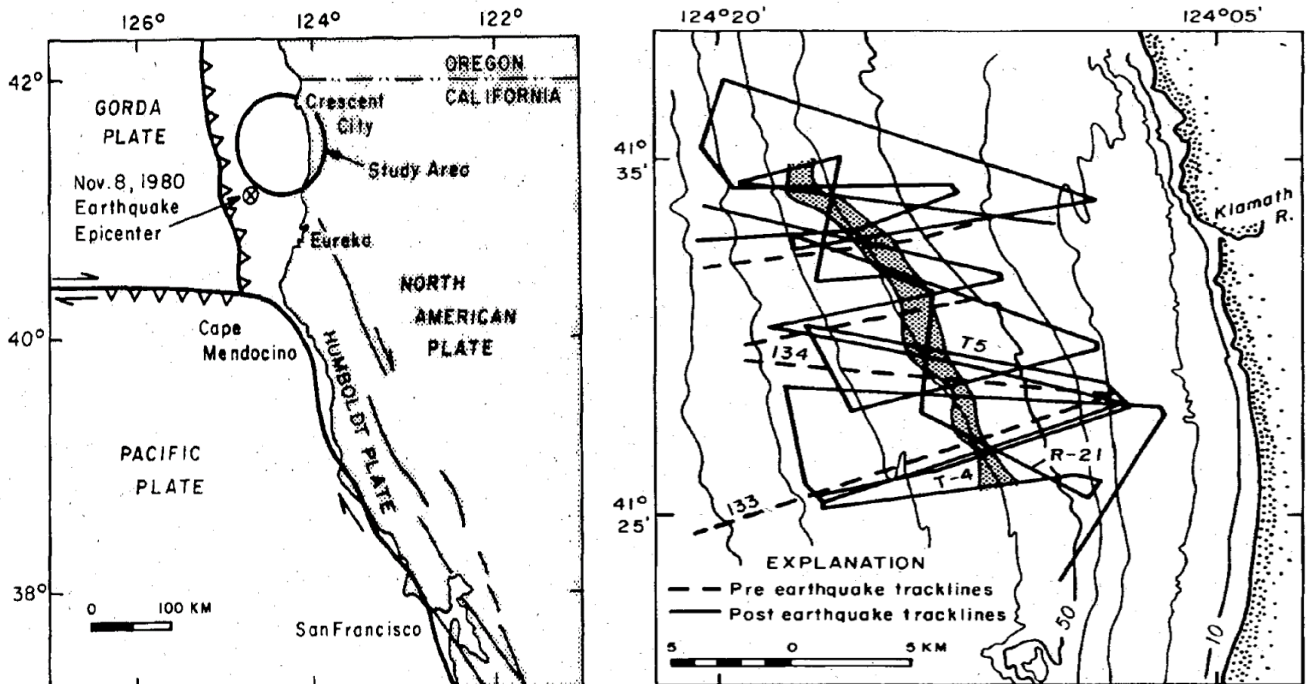
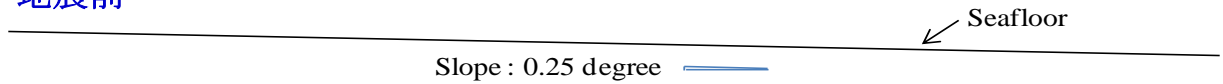
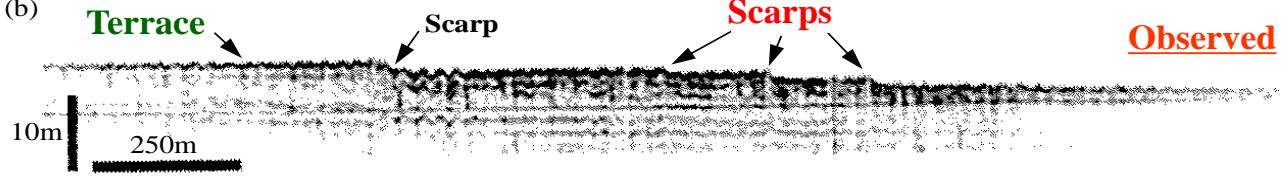


図-10 カリフォルニア沿岸域の緩斜面上の地震による海底液状化土砂流動事例 (Field et al., 1982): 現地挙動分析の対象

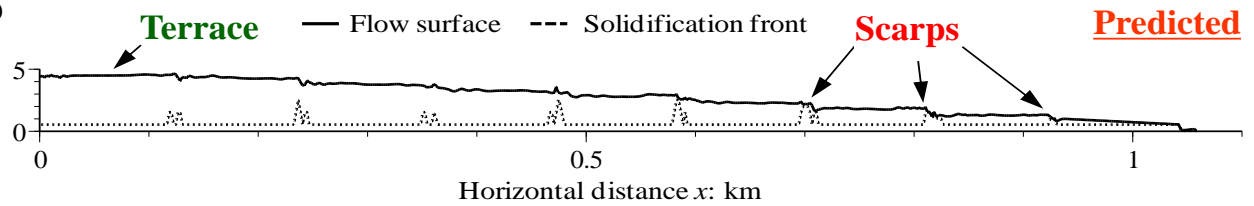
(a) 地震前



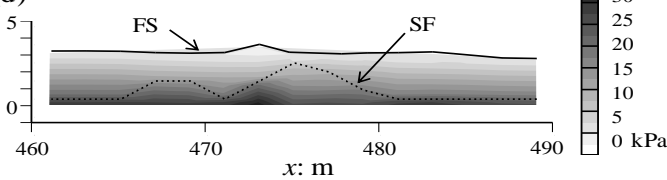
(b) 地震後



(c)



(d) 過剰間隙水圧



(e) 速度場

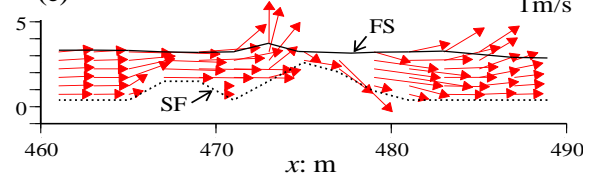


図-11 海底液状化土砂流動の現地挙動分析結果：(a),(b) Field et al.(1982)により報告された地震前後の岸沖海底形状、(c) 凝固フロントを伴う流況の予測結果、(d),(e) 凝固フロント近傍域における過剰間隙水圧分布および速度場の予測結果

チュード7.2地震によって岸沖1km沿岸20kmに及ぶ広範囲領域において海底液状化土砂流動が発生したイベントである(図-10, Field et al., 1982). 海底地盤は、細砂であり、噴砂やクレーター状の崩壊土など、広範囲にわたる液状化の痕跡が報告されている。高解像度の音波探査記録に基づく地震前後の岸沖海底地盤形状を図-11(a), (b)に示す。本図から、流動地形は、実質的に平坦なテラス領域(Terrace)と複数の急傾斜面(Scarps)で構成され、後者は流頭部の近傍で各2m弱の高低差を含んでいることがわかる。

開発した解析法: LIQSEDFLOWによる上記現地挙動の分析・検証を行った。同解析においては、Field et al. (1982)の報告に基づき、上記0.25度の緩斜面上で1km長の緩詰め細砂地盤が最大5m層厚にわたって地震により液状化に至ったと設定した。同現地挙動分析に用いた材料パラメータは表-1の通りである。

液状化発生1分後の海底液状化土砂流動の凝固フロントを伴う流況の予測結果を図-11(c)に示している。複数の急傾斜面(Scarps)とテラス領域(Terrace)の形成が予測され、流動地形に現れていることがわかる。この際、特筆

すべきことは、急傾斜面の形成領域が、凝固フロントが他の場所よりも早く流れ表面に達した場所に対応し、その帰結として、当該急斜面の間にテラスの形成を生み出していたことである。当該流動機構をより詳しくみるために、凝固フロントの近傍域(x = 460~490m)での流動過程の土砂内部の過剰間隙水圧分布および速度ベクトル場の予測結果を図-11(d), (e)に示している。同図では、流動中の液状化土と凝固フロントの間の相互作用の結果として液状化砂の噴出が生じており、興味深い。

以上をまとめると、開発した解析法: LIQSEDFLOWによる、カリフォルニア州沿岸の1980海底地すべりイベントにおける海底液状化土砂流動のダイナミクスとこれに伴う流動地形の予測結果は、Field et al. (1982)によって報告された現地観測事実と良く整合することが見出された。

また、現地および実験挙動の分析・検証結果は、海底液状化土砂流動が進行性凝固を伴って発達する形態が、斜面、液状化土砂の容量、流れ方向の地点・場所、ならびに、海底地盤の材料物性等の多くの要因に依存することを示している。これらの海底土砂流動の重要な側面については今

後、引き続き研究していく価値がある。

本報告では、液状化土砂流動のダイナミクスに焦点を当てているため、粘性土の流動は対象外であった。一方、液状化重力流は、様々な粘土分を含有する海底土砂崩壊を通じて発達しうることがわかっており (Breien et al., 2010), ここで記述した液状化流動のダイナミクスは、そのような海底土砂流動においても本質的に適用できるものである。

6. 結論

本報告では、沿岸・海洋構造物ならびに海底地すべり津波などに対して甚大な影響を及ぼす一方、従来は予測困難であった海底液状化土砂流動のダイナミクスの一連の過程を予測再現しうる新たな理論・数値解析法を構築し、実験及び現地挙動の分析を通じてその有効性を包括的に実証すると共に、同イベントを体系的に評価・予測するための基盤を提示した。主な結論は以下のようにまとめられる。

世界各地の大規模海底土砂流動イベントとその帰結・インパクトをレビューすることにより、沿岸・海洋域の防災・減災を図る上での海底液状化土砂流動の重要性を浮き彫りにした。

開発した理論・数値解析法 LIQSEDFLOW は、海底液状化土砂流動のダイナミクス、特に、再堆積に至る発達から停止までの一連の過程とその内部機構を整合的に予測しうることを実証した。そして、その予測結果は、実験及び現地での観測事実と良く整合、説明することを示した。

海底液状化土砂流動の成層構造、減速・再堆積過程、ならびに、その後の斜面・テラスの形成に果たす二相系物理の本質的役割を明らかにした。

得られた知見と開発した理論及び数値解析法は、沿岸域の大規模土砂流動過程の予測や地震・津波による沿岸・海底イベント過程評価への適用展開、及び、沿岸・海洋構造物ならびに海底地すべり津波に対する海底液状化土砂流動のインパクト・影響の合理的な評価・予測に大きく寄与しうるものであり、今後の適用・展開が期待される。

(2016年1月25日受付)

謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所の研究実施項目「海底地盤流動のダイナミクスと防波堤・護岸の安定性評価に関する研究」、ならびに、海底地すべり・土砂流動に関するユネスコ地球科学プログラム (IGCP-511, 585) に関連して実施したものであり、過去に日本学術振興会の科学研究費補助金 (課題番号 23686068) を受けた。又、本報告に記述した実験の実施においては、京都大学関口秀雄名誉教授な

らびに Amiruddin 博士の連携・協力を得た。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- Amiruddin, Sekiguchi, H. and Sassa, S. (2006) : Subaqueous sediment gravity flows undergoing progressive solidification, *Nor. J. Geol.*, **86**, 285-293.
- Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970) : A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations. *J. Comput. Phys.*, **6**, 322-325.
- Breien, H., Blasio, F.V., Elverhøi, A., Nystuen, J.P. and Harbitz, C.B. (2010) : Transport mechanisms of sand in deep-marine environments-Insights based on laboratory experiments, *J. Sedimentary Res.*, **80**, 975-990.
- Field, M.E., Gardner, J.V., Jennings, A.E. and Edwards, E.D. (1982) : Earthquake-induced sediment failures on a 0.25° slope, Klamath River delta, California, *Geology* **10**, 542-546.
- Haeussler, P., Lee, H., Ryan, H. et al. (2008) : Submarine Landslides and Tsunamis at Seward and Valdez Triggered by the 1964 Magnitude 9.2 Alaska Earthquake. *Alaska Geology*, Newsletter of the Alaska Geological Society, **39**(2), 1-2.
- Hampton, M.A., Lee, H.J. and Locat, J. (1996) : Submarine landslides, *Rev. Geophys.* **34**, 33-60.
- Hamzah, M.A. (2001) : *Numerical simulations of tsunami pressure acting upon coastal barriers on wet and dry lands*. Doctoral thesis, Kyoto University.
- Heezen, B.C. and Ewing, M. (1952) : Turbidity currents and submarine slumps and the 1929 Grand Banks earthquake. *Am. J. Sci.*, **250**, 849-873.
- Hirt C.W. and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.* **39**, 201-225.
- Hornbach, M.J. et al. (2010) : High tsunami frequency as a result of combined strike-slip faulting and coastal landslides. *Nature Geoscience*, **3**, 783-788.
- Miyamoto, J., Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2004) : Progressive solidification of a liquefied sand layer during continued wave loading, *Géotechnique*, **54**(10), 617-629.
- Nittrouer, C.A., Austin, J.A., Field, M.E., Kravitz, J.H., Syvitski, J.P.M. and Wiberg, P.L. (2007) : Continental Margin Sedimentation: SP 37 Int Ass Sedimentol, Black.Publ. 549p.
- Richardson, J.F. and Zaki, W.N. (1954) : Sedimentation and fluidization: Part 1, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **32**, 35-53.

- Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J. (2001) : Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem, *Géotechnique*, **51**(10), 847-857.
- Sassa, S., Miyamoto, J. and Sekiguchi, H. (2003) : The dynamics of liquefied sediment flow undergoing progressive solidification, In *Submarine Mass Movements and Their Consequences* (eds. J. Locat and J. Mienert), *Adv. Nat. Tech. Hazards Res.*, **19**, 95-102.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2010) : LIQSEDFLOW: Role of two-phase physics in subaqueous sediment gravity flows, *Soils and Found.*, **50**(4), 495-504.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2012) : Dynamics of Submarine Liquefied Sediment Flows: Theory, Experiments and Analysis of Field Behavior, *Adv. Nat. Tech. Hazards Res.*, **31**, 405-416. doi:10.1007/978-94-007-2162-3_36.
- Solheim, A., Bryn, P., Sejrup, H.P. et al. (2005) : Ormen Lange-an integrated study for safe development of a deep-water gas field within the Storegga Slide Complex, NE Atlantic continental margin; executive summary. *Mar. Pet. Geol.*, **22**, 1-9.
- Sumer, B.M. and Fredsøe, J. (2002) : The mechanics of scour in the marine environment, *Advanced Series on Ocean Engineering*, **17**, World Scientific.
- Sumer, B.M., Hatipoglu, F. and Fredsøe, J. (2004) : The cycle of soil behaviour during wave liquefaction, *Proc. 29th Int. Conf Coast. Eng.*, 19- 24.
- Sumer, B.M., Hatipoglu, F., Fredsøe, J. and Sumer, S.K. (2006) : The sequence of sediment behaviour during wave-induced liquefaction, *Sedimentology*, **53**(3): 611-629.
- Tappin, D.R., Watts, P., McMurtry, G.M. et al. (2001) : The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998: Offshore evidence on the source mechanism. *Mar. Geol.*, **175**, 1-23.
- Tinti, S., Manucci, A., Pagoni, A. et al. (2005) : The 30 December 2002 landslide-induced tsunamis in Stromboli: sequence of the events reconstructed from the eyewitness accounts *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, **5**, 763-775.
- UNESCO. (2009, 2014, 2015): IGCP-511, IGCP-585, IGCP-640, <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/international-geoscience-programme/igcp-projects/geohazards/project-640-new-2015/>.
- Whelan, M. (1994) : The night the sea smashed Lord's Cove. *Canad. Geograph.*, **114**, 70-73 .
- 浜野一彦 (1986):地震のはなし, 32 瓜生島が別府湾の海底に消えた, 鹿島出版会.

- 加藤知弘 (1991): 瓜生島沈没: 日本のアトランティス伝説を解明する, ニュートン, 8月号, 88-97.
- 平石哲也, 柴木秀之, 原信彦 (2001): 円弧滑り法を利用した地滑り津波波源による明和八重山地震津波の再現, 海岸工学論文集, 48 巻, 351-355.
- 読売新聞 (2010): 海底地滑りが津波増幅: 静岡沖地震では6 倍に, 科学, YOMIURI ONLINE(読売新聞).

記号表

| | |
|------------|---------------------------------------|
| a | 無次元定式化のための代表長 |
| c | 土砂の体積濃度 |
| e | 土砂の間隙比 |
| e_{\max} | 土砂の最大間隙比 |
| e_{\min} | 土砂の最小間隙比 |
| FS | 液状化土砂流動の流れ表面 |
| g | 重力加速度 |
| G_s | 土粒子の比重 |
| h | 水深 |
| H | 無次元水深 h/a |
| k_w | 土砂のダルシー透水係数 |
| K_w | 無次元透水係数 k_w/U_r |
| m | 土骨格の拘束剛性 |
| M | 無次元拘束剛性 $m/(\rho_2-\rho_1)U_r^2$ |
| M_r | 1 の無次元厚さの土砂に対する参照 M 値 |
| p | 土砂の間隙水圧 |
| p_e | 土砂の過剰間隙水圧 |
| P_e | 無次元過剰間隙水圧 $p_e/(\rho_2-\rho_1) U_r^2$ |
| p_s | 土砂の静水圧 $\rho_1 g (h-z)$ |
| R_e | 流動中の液状化土のレイノルズ数 HU_r/ν |
| SF | 液状化土砂流動内部に形成される凝固フロント |
| t | 時間 |
| T | 無次元時間 $U_r t/a$ |
| T_a | 液状化土砂流動の到達時間 |
| u | 液状化土砂流動の水平速度 |
| U | x 方向の無次元速度 u/U_r |
| U_r | 無次元定式化のための代表速度 \sqrt{ga} |
| v | 液状化土砂流動の鉛直速度 |
| V | z 方向の無次元速度 v/U_r |
| w_0 | 粒子群の Stokes 沈降速度 |
| W_0 | 無次元 Stokes 沈降速度 w_0/U_r |
| w_s | 粒子群の沈降速度 |
| W_s | 無次元沈降速度 w_s/U_r |
| x | 液状化土砂流動の流下方向の水平距離 |

| | |
|--------------|---------------------------------------|
| x_F | 液状化土砂流動の流頭 (流れフロント) 位置, 流動距離を表す |
| X | 無次元水平距離 x/a |
| z | 液状化土砂流動の基盤からの鉛直上方距離 |
| Z | 無次元鉛直距離 z/a |
| z_L | 液状化領域の底面 (液状化フロント) 位置 |
| z_s | 液状化流動域底部/凝固域直上の遷移境界層の上面位置 |
| Z_s | 液状化流動域底部/凝固域直上の遷移境界層の上面の無次元位置 z_s/a |
| β | 液状化土砂流動過程で土粒子骨格を回復した凝固土の傾斜角 |
| β_{cr} | 土の摩擦抵抗に照らした β の限界角度 |
| γ_w | 水の単位体積重量 |
| ρ_1 | 外部流体(水)の密度 |
| ρ_2 | 液状化土砂の密度 |
| ν | 流動中の液状化土の動粘性係数 |
| σ_m | 凝固過程にある土の無次元平均全応力 |

港湾空港技術研究所報告 第55巻第2号

2016.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

| | | |
|---|---|----|
| 1. Numerical Simulation on Tsunami Inundation and Debris Damage STOC Model | Takashi TOMITA, Kazuhiko HONDA, Yu CHIDA | 3 |
| 2. Field Observations and Numerical Analyses on the Effect of Vegetation on the Hydrodynamics of a Shallow Water Using a New Hydrodynamic Model | Hirotsada MOKI, Yasuyuki NAKAGAWA, Kenta WATANABE, Tatsuki TOKORO, Shigeru MONTANI, Tomohiro KUWAE | 35 |
| 3. Mechanical properties of coral-gravel soil –a parametric study using reconstituted samples– | Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA | 61 |
| 4. Submarine Liquefied Flow Dynamics and Their Analytical Framework with Experimental and Field Validations | Shinji SASSA | 75 |