土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，536-540

LIQSEDFLOW: 水中堆積物重力流れに果たす二相系物理の役割

The LIQSEDFLOW: Role of two-phase physics in subaqueous sediment gravity flows

佐々真志[1]・関口秀雄[2]

Shinji SASSA and Hideo SEKIGUCHI

The paper describes an extension of the computational code LIQSEDFLOW proposed by the authors. The salient features of the code lie in the capabilities to describe the multi-phased physics of subaqueous sediment gravity flows. Specifically, it combines Navier-Stokes/continuity equations and equations for advection and hindered settling of grains for a liquefied soil domain, with a consolidation equation for the underlying, progressively solidifying soil domain, via a transition layer that is characterized by zero effective stress and a small yet discernable stiffness. Evolutions of the flow and solidification surfaces are traced as part of solution by using a volume-of-fluid (VOF) technique. The predicted features of gravity flows of initially fluidized sediments with different concentrations conform to the observed performances in two-dimensional flume tests. The present results demonstrate the crucial role of two-phase physics, particularly solidification, in reproducing the concurrent processes of flow stratification, deceleration, and redeposition in subaqueous sediment gravity flows.

1. はじめに

水中堆積物の重力流れは，河口・沿岸域の土砂地形動態に関わる重要課題の一つである．実際，海底地すべりや土砂流動は，その破壊力からパイプラインなどの沿岸・沖合施設に甚大な影響を及ぼすことがよく知られている（Hamptonら, 1996; UNESCO, 2009）．また，重力流れによる土砂の再堆積物は，石油資源の備蓄（UNESCO, 2009）や津波堆積物（Shikiら, 2008）の観点からも，近年特に注目を集めてきている．

流体-土砂の相互作用は，水中堆積物重力流を特徴づけるかぎとなるプロセスである．しかし，従来の流動モデルの多くは，断面積分型やレオロジーに基づいたものであるため，堆積物重力流内部で生じる間隙水の流動やこれにともなう土砂の再堆積・停止の一連の過程を扱うことができない．流体動力学と土質力学の一体化が，上述のような水中堆積物重力流の多相系物理を理解する上で重要不可欠である．

筆者らは，上述を背景として，動的環境外力により液状化／流体化した水中堆積物の高濃度重力流れのダイナミクスを記述しうる理論体系LIQSEDFLOW（Sassaら, 2003）を提案している．その主たるねらいは，堆積物重力流の多相系物理の記述である．とりわけ，本理論によると，流動土砂内部の間隙水のマイグレーションにともなう進行性凝固過程の発生を説明することができる．

本研究では，粒子群の移流や干渉沈降の効果を含めて，上述のLIQSEDFLOWを拡張し，同解析コードを用いた水中堆積物重力流の予測結果を，流れの層構造や減速過程ならびに再堆積特性に着目して考察している．そして，同予測結果とAmiruddinら（2006）による水槽実験における観測結果の比較を通じて，水中堆積物重力流れに果たす二相系物理の役割を明らかにしている．

1 正会員　博(工)　（独法）港湾空港技術研究所地盤・構造部主任研究官
2 フェロー　工博　京都大学教授防災研究所

2. 水中堆積物重力流の理論フレームワーク

(1) 理論的背景

地震，暴波浪や過剰浸透圧などの動的外力により液状化／流体化した水中の粒状体堆積物を対象としている．図-1において，液状化土（密度ρ_2）は，外部流体（密度ρ_1）に対して，重力作用下で流れていく．この際，外部

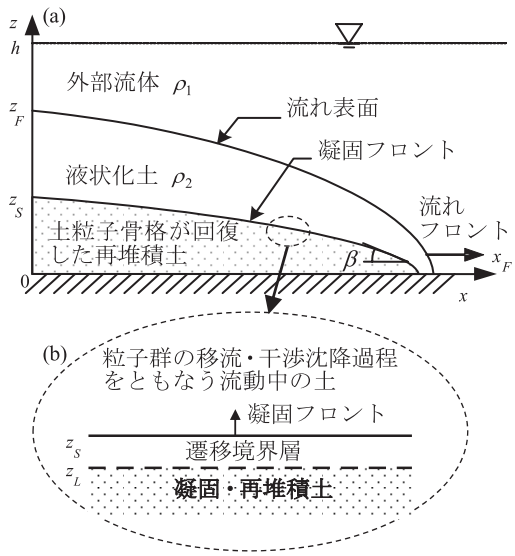

図-1 (a) 進行性凝固をともなう水中堆積物重力流れ
(b) 液状化土と凝固・再堆積土の間に導入した遷移境界層

流体の深さは，重力流過程において一定と仮定している．液状化流れは，粒子群の移流や干渉沈降をともなう一方，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，連続的な外力作用下で液状化／流体化した粒状体堆積物が土粒子骨格を回復していく相変化過程を表し，これまでに重力流（Sassaら, 2003; Amiruddinら, 2006）や波浪作用下（Miyamotoら, 2004）で理論・実験の両面から実証されている．

堆積物中の任意地点での間隙水圧は，2つの成分に分けることができる．すなわち，

$$p = p_e + p_S \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，$p_S = \rho_1 g(h\text{-}z)$ で表現される静水圧，p_eは粒状体土砂のコントラクタンシーによる過剰水圧である．

（2）液状化流れ領域の定式化

ここでは，無次元表記での定式化のために，代表長さをa，代表速度を$U_r = \sqrt{ga}$と記す．これにより，無次元時間$T = U_r t/a$，無次元過剰間隙水圧$P_e = p_e/(\rho_2 - \rho_1)U_r^2$と表される．この際，流れ表面（図-1参照）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，水中液状化流れ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ら, 2003）．

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

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

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

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．

液状化流れ過程における粒子群の移流と干渉沈降は，堆積物濃度Cに関する次式によって記述される．

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

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、液状化堆積物の高濃度移流過程における干渉沈降を対象としているため、拡散は考慮していない．粒子群の沈降速度は堆積物濃度Cに依存する．ここでは，Richardson & Zaki（1954）により提案された次式を用いる．

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

ここに，$W_0 = w_0/$ Ur は無次元Stokes沈降速度である．

（3）凝固・再堆積領域の定式化

液状化流れ過程における凝固プロセスは，2次元圧密式によって記述することができる．ダルシー透水係数K_wをU_rにより，土骨格の拘束剛性Mを（ρ_2-ρ_1）U_r^2により無次元化すると，次式のかたちとなる．

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

ここに，σ_mは凝固過程にある粒状体土砂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ら（2001）を参考に，次のシンプルな関係を用いる．

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

ここに，M_rは1の無次元厚さを有する堆積物に対応したMの参照値である．

3. 数値解析コードの開発

以下では，上述の定式化に対する数値解析手順について記述する．この際，図-1を参照して，流れ表面と凝固フロント位置の双方とも，重力流過程において解かれるべき未知変量であることに留意する．

上述の場の支配式（2）～（8）は，スタッガード格子上でSMAC法（Amsden & Harlow, 1970）を用いて離散化した．流れ表面の追跡には，VOF法（Hirt & Nichols, 1981）を適用し，流れ過程における質量保存を満足する上で効果的な体積移流スキーム（Hamzah, 2001）を用いた．液状化土と凝固・再堆積土の間の境界面である凝固フロントの進展についても，VOF法を援用し追跡・同定した．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．凝固・再堆積土は，液状化土よりもはるかに高い剛性と摩擦抵抗力を有することから，本仮定は妥当なことと考えられる．

図-1において，液状化領域の底部で凝固・再堆積領域の直上部に，有効応力はゼロであるが僅かに剛性を持つ遷移境界層を導入している．この取り扱いにより，液状化／流体土が土粒子骨格を回復していく相変化過程を記述することが可能になる．各計算ステップでは，遷移境界層における有効応力増分が正となるたびに，凝固フロントがその直上に境界層の厚さ分だけ進展し（液状化領域はその分だけ縮小し），新たな遷移境界面（凝固フロント）が形成されて，これにともなう凝固領域と流れ領域の動的相互作用を逐次解いた．また，凝固に及ぼす干渉沈降の効果を考慮するために，堆積物濃度が液状化した当初の濃度よりもある一定量（1%）上回った際も，同様に凝固フロントの進展を許容している．しかし，新たに形成された凝固フロントの傾斜角が，土砂の限界摩

表-1　水中堆積物重力流解析に用いたパラメタ

c : %	b/a	R_e	k_w : mm/s	M	$\tan\beta_{cr}$	w_0 : mm/s
30, 34, 38*, 42	0.7	100000	0.15	400	0.35, 0.4, 0.5*, 0.55	0, 20*, 40

*標準ケースの解析で用いたパラメタを表す

擦角を超える場合は，同凝固フロントの進展を許容しなかった．

4. 水中堆積物重力流解析

高速CCDカメラとPIV及びケイ砂6号（D_{50} = 0.32mm）を用いたAmiruddinら（2006）の2次元水槽実験，すなわち異なる液状化堆積物濃度の下での二次元ダムブレイク問題（図-2）を対象として，上記コードによる一連の水中堆積物重力流解析を行った．図-2の液状化堆積物の幅 a = 0.25mであり，水路長1.5m，高さ0.75mの計算領域を1,500要素で離散化し，時間増分0.00015sで計算を行った．

本解析で用いたパラメタを表-1にまとめる．この際，異なる4つの堆積物濃度c = 30%, 34%, 38%, 42%は高いものの，当該砂の最緩状態の濃度に対応する46%よりは低い．このことは，本解析が，水中重力流れ過程で粒子群の干渉沈降を許容しうるような高濃度堆積物流れを対象とすることを意味している．実際，表-1中の標準ケースで用いたStokes沈降速度w_0 = 20mm/sは，Amiruddin（2005）の一連の沈降実験結果から，上式（6）を介して，実験的に同定された速度を表している．また，土の限界摩擦角β_{cr}は，上記の堆積物濃度の増加に対応させて表-1に示すように設定した．

開発した数値コードは，流体のダムブレイク問題に対しては検証済み（Sassaら, 2003）のため，以下では，上述の高濃度堆積物重力流解析の結果について記述・考察する．

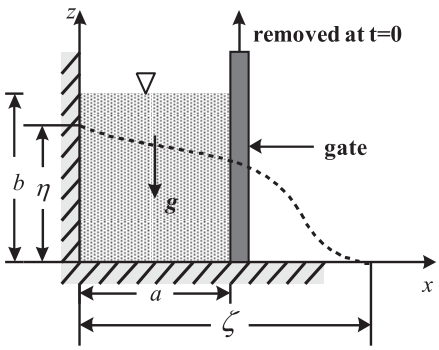

図-2　重力流解析の問題設定

(1) 再堆積に至る流れの層構造

堆積物濃度38%に対する異なる3時点での重力流れと進行性凝固過程の予測結果を図-3に示す．重力流開始時には液状化土塊の底部に一致する凝固フロントは，流れとともに上方及び側方に進展し波状に発達した（t = 0.8s）．この際，凝固した再堆積土と流動中の液状化土の相互作用の帰結として，顕著な減速過程が発現した．

その後，液状化流れの流動距離は大きく伸びて，凝固フロントが堆積物内部の各地点でほぼ同時に流れ表面に

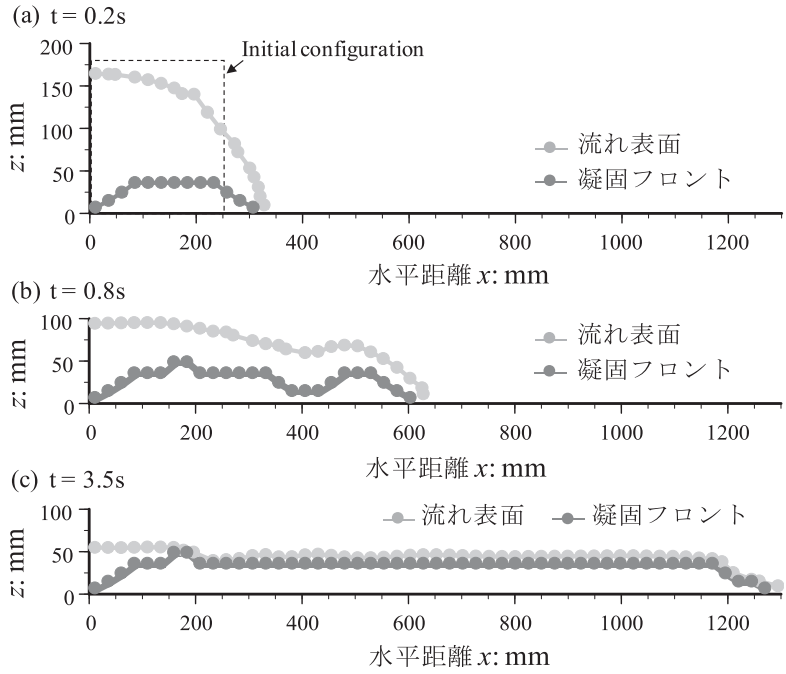

図-3　再堆積に至る堆積物重力流内部の流れの層構造の予測結果（c = 38%）

到達すると（freezingの発生），重力流が停止した．

上述のような重力流の内部機構すなわち再堆積に至る流れの層構造に関する予測結果は，Amiruddinら （2006）により報告された水中堆積物重力流に関する水槽実験の観測事実ともよく整合している．

（2）堆積物重力流に及ぼす凝固・干渉沈降の影響

重力流過程において，堆積物濃度は，粒子群の移流・干渉沈降ならびに進行性凝固の発生により大きく変化した．その一例として，上記重力流のt = 0.8s時点での異なる3地点の堆積物濃度の分布を図-4に示す．本図より，任意の深度で，堆積物濃度は，流れ方向 （xの増加方向）には減少する一方，鉛直下方には増加していることがわかる．また，再堆積土の落ち込み部（x = 360mm）ではクロックワイズな流体運動が生じており，当該凝固フロント直上でその影響がみてとれる．

堆積物重力流に及ぼす凝固と干渉沈降の影響は図-5のかたちでより詳しくみることができる．本図は，堆積物濃度38%に対して，進行性凝固及び粒子群の移流・干渉沈降の影響が有る場合と無い場合の流動距離の予測結果を示したものである．同図より，凝固なしの場合には，シンプルな加速流が形成されて流れフロントが水路の下流側端面に到達することがわかる．これとは対照的に，凝固をともなう液状化流れでは，流れの初期段階のみ加速流が生じて，その後は顕著な減速過程に特徴づけられて流れが次第に停止していることがわかる．この際，粒子群の干渉沈降の影響は,流れの終局段階においてわずかに現れている．しかし，同図中に示すようにStokes沈降速度を実際の2倍に増加させても，その流れの減速過程に及ぼす影響は相対的に小さいことがわかる．すなわち，上述のような再堆積に至る顕著な流れの減速過程の発現は，進行性凝固の発生によってもたらされていることが明らかとなった．

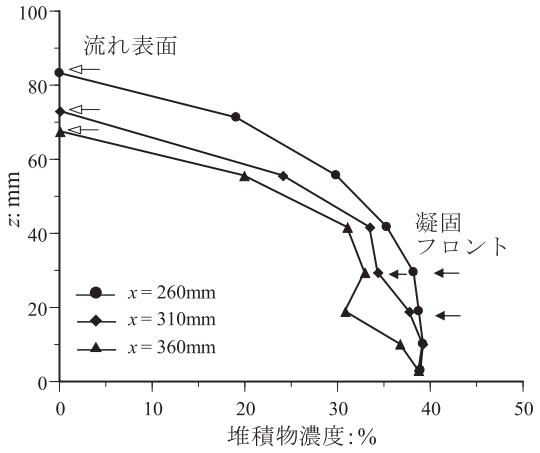

図-4　進行性凝固及び粒子群の移流・干渉沈降の影響を示す堆積物濃度深さ分布の予測結果（c = 38%）

（3）予測と観測結果の比較

異なる4つの堆積物濃度に対する流動距離の予測結果と観測結果の比較を図-6に示す．本図より，いずれの堆積物濃度においても，流体流とは顕著に異なり，流れの初期段階を除いて減速過程が現れていることがわかる．また，重力流の流動ポテンシャルは，堆積物濃度の増加による土の限界摩擦角の上昇とともに大きく低下した．そして，これらの流動距離に関する予測結果の特徴は，観測された流動特性とも良好に対応していることが確認できる．

以上の結果は，水中堆積物重力流のダイナミクスを現実的にシミュレートする上でのLIQSEDFLOWの予測能力を実証している．とりわけ，本解析がビンガム降伏値等の物理的意味が薄弱なフリーパラメタを用いない二相系物理に根ざした解析であることを考慮すると，上述のような観測事実と予測結果の間の整合性は特筆すべきことといえる．

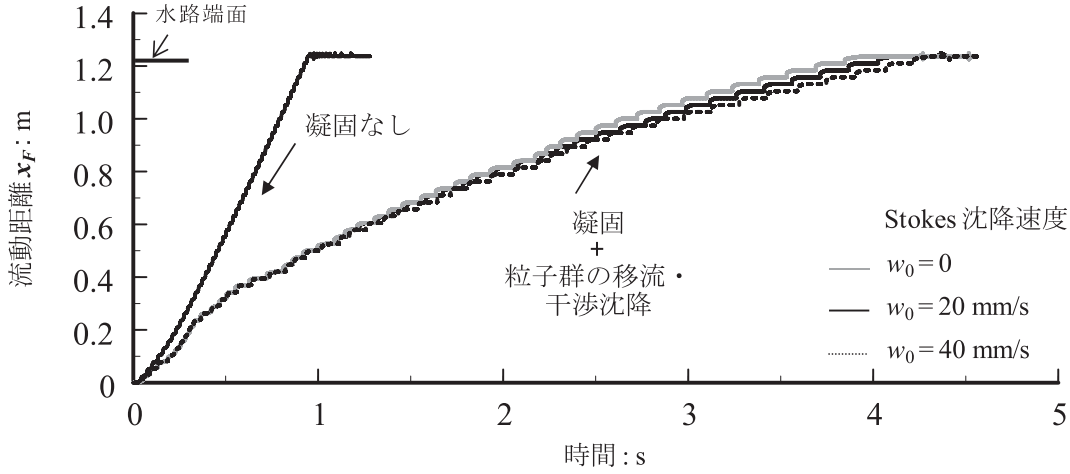

図-5　進行性凝固及び粒子群の移流・干渉沈降の有無による流動距離の予測結果（c = 38%）

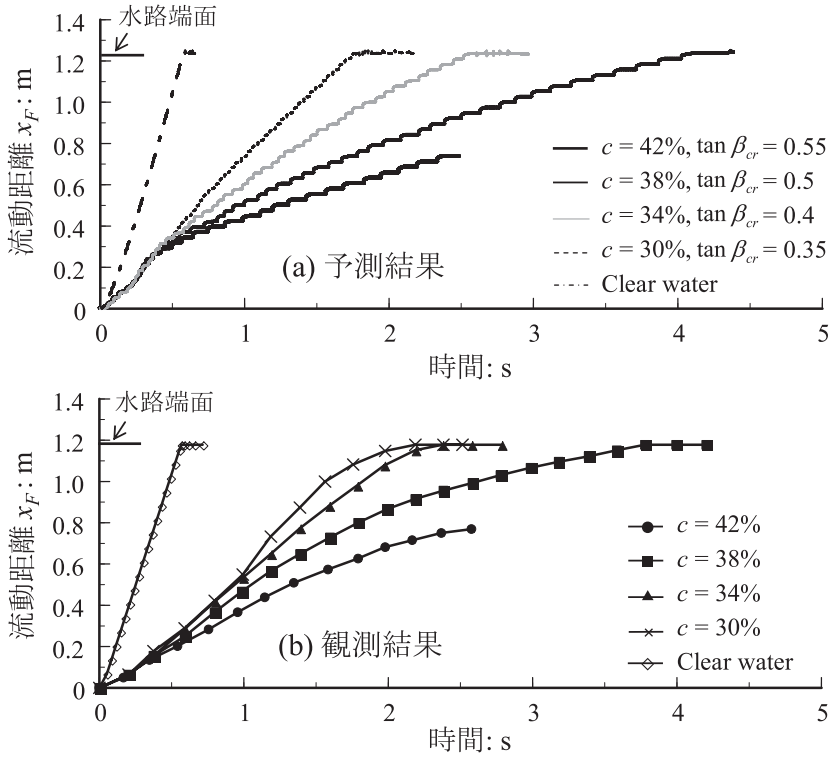

図-6　異なる4つの堆積物濃度に対する水中堆積物重力流れの流動距離の予測結果と観測結果の比較

5. まとめ

水中堆積物の液状化にともな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しうる解析フレームワーク：LIQSEDFLOWを開発・提示した．本解析法によると，重力流れ内部において発生・発達する堆積物の凝固の結果として流れは減速・停止し，物理的意味が不明瞭なレオロジーを導入することなく，世界で初めて，二相系物理に基づいて重力流れの再堆積過程が実現される．さらに，異なる濃度で液状化した堆積物重力流れの成層構造，減速・再堆積過程の予測結果は，対応するAmiruddinら（2006）の重力流実験の観測事実ともよく整合することがわかった．本結果は，一連の水中堆積物重力流の過程に果たす進行性凝固の本質的役割を浮き彫りにしており，流動停止距離の合理的な予測が不可欠な沿岸イベント過程の評価に対して幅広い適用が期待できる．

参 考 文 献

Amiruddin (2005): *The dynamics of subaqueous sediment gravity flows and redepositional processes.* Doctoral thesis, Kyoto University, 192p.

Amiruddin, H. Sekiguchi and S. Sassa (2006): Subaqueous sediment gravity flows undergoing progressive solidification, Norwegian Journal of Geology, Vol. 86, pp. 285-293.

Amsden, A.A. and F. H. Harlow (1970): A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations. J. Comput. Phys., Vol. 6, pp. 322-325.

Hampton, M.A., H. J. Lee and J. Locat (1996): Submarine landslides, Reviews of Geophysics, Vol. 34, pp. 33-60.

Hamzah, M.A. (2001): *Numerical simulations of tsunami pressure acting upon coastal barriers on wet and dry lands.* Doctoral thesis, Kyoto University.

Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys., Vol. 39, 201-225.

Miyamoto, J., S. Sassa and H. Sekiguchi (2004): Progressive solidification of a liquefied sand layer during continued wave loading, Geotechnique, Vol. 54, No. 10, pp. 617-629.

Richardson, J.F. and W.N. Zaki (1954): Sedimentation and fluidization: Part 1, Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 32, pp. 35-53.

Sassa, S., H. Sekiguchi and J. Miyamoto (2001): Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem, Geotechnique, Vol. 51, No. 10, pp. 847-857.

Sassa, S., J. Miyamoto and H. Sekiguchi (2003): The dynamics of liquefied sediment flow undergoing progressive solidification, In *Submarine Mass Movements and Their Consequences (eds. J. Locat and J. Mienert)*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 19, Kluwer Academic Publishers, pp. 95-102.

Shiki, T., Y. Tsuji, T. Yamazaki and K. Minoura (2008):Tsunamiites: Features and Implications, Elsevier, 411p.

UNESCO. (2009): International Geoscience Programme IGCP 511: Submarine Mass Movements and Their Consequences (2005-2009), http://www.geohazards.no /IGCP511.