

波浪による水圧変動を考慮した人工浅場表層土砂の 安定性に関する三次元数値解析

Three-Dimensional Numerical Analysis on Stability of Superficial Sediments of Artificial Shallows in Wave-Induced Pressure Field

中村友昭¹・篠田陽介²・水谷法美³

Tomoaki NAKAMURA, Yosuke SHINODA and Norimi MIZUTANI

The stability of superficial sediments of an actual artificial shallow constructed in a pilot project is investigated by using a three-dimensional coupled fluid-sediment interaction model in terms of the Shields parameter (SP) and a relative vertical effective stress ratio (RESR) in the surface layer of the shallow. The wave action causes the erosion at the seaward edge of the crown, the upper part of the seaward ridge, and the center of the landward slope, and the deposition at their adjacent areas. These topographic changes are related to large values of the averaged SP, while the values of RESR around the eroded areas are larger than those at the other areas, resulting in the acceleration of the sediment transport. The topographic change of the shallow is evaluated more reasonably by using a SP modified with RESR.

1. 緒言

浅場や干潟は豊富で多様な生物が息する高い生態系機能を有しており、生物多様性の保全と生物機能の回復を目的に多数の浅場や干潟が人工的に造成されてきた。2007年には国際海洋法条約に基づいて海洋基本法が制定され、沿岸域の総合的な管理が明文化されたことから、海域環境に配慮した沿岸域の利用法が模索されている。このような取り組みの中で、低環境負荷社会を実現するために浅場や干潟の重要性が高まっている。

現在までに人工浅場や人工干潟の造成事例は数多くあり、例えば広島県尾道糸崎港海老地区の人工干潟では、自然干潟と同程度の生物多様性を有する干潟が再生できたことが確認されている(春日井ら, 2003)。しかし、例えば広島県五日市地区の人工干潟では、造成後に多くの貝類の出現と鳥類の飛来が観測されるなど自然干潟に近い生息場が確認されていたものの、覆砂層に完成当初10%弱含まれていた細粒分の消失に伴う粒度分布の変化により水分が保持されにくくなり、干潟生物の息が困難になったことが報告されている(広島県, 2001)。この細粒分の消失については、干潟表面の水圧が低下する際にその表層に液状化が生じ、それに伴い細粒分が上昇することで起こったことが明らかになっている(土田ら, 2006, 2007)。古川ら(2000)は、自然干潟では短期的で小規模な地形変動を繰り返しながらも長期的には地形

が動的に安定していることを現地観測により明らかにしている。その一方で、人工浅場や人工干潟では、長期的な侵食あるいは堆積の地形変化の卓越に加えて液状化とそれに伴う締め固めが発生するなどして土砂の物理的な特性が変化するために、期待された生物相が得られない場合があると考えられる。したがって、生物の息に適した浅場や干潟を造成するためには、地形変化や液状化などの土砂の挙動の把握が不可欠と考えられる。

本研究では、現地海岸に試験的に造成された人工浅場とそれをモデル化した形状の単純な浅場を対象に三次元流体・地形変化連成数値計算モデル(中村・Yim, 2009b; Three-Dimensional Coupled Fluid-Sediment Interaction Model, 以下FSMと称する)を適用し、浅場に生じる地形変化の特性とそのメカニズムを考究する。具体的には、計算所要時間の観点から現時点では長期間を対象にした計算は現実的ではないことから、自然干潟で観測されている短期的な地形変化に焦点を絞り、浅場の表面に作用する底面せん断力に加えて人工干潟での発生が考えられる液状化に到る有効応力の減少を検討するために浅場の内部に生じる有効応力変動の観点から考察を行う。

2. 対象海域の波浪特性

対象とする海域全体に対してFSMを適用することは計算負荷の観点から現実的ではないことから、同海域の波浪場を平面2次元BoussinesqモデルNOWT-PARI Ver. 4.6c4(平山, 2002)により解析し、次章以降の検討で用いる浅場周辺の波浪特性を決定した。ここでは、上述したように短期的な現象を取り扱うことから、現地での波浪観測調査から計算された一年確率波(沖波波高1.3m,

1 正会員 博(工) 名古屋大学特任講師 高等研究院
2 正会員 修(工) JFE エンジニアリング株式会社 シビル
エンジニアリングセンター
3 正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会
基盤工学専攻

沖波周期5.1s, 波向-22.25度)を作用させた。

図-1に対象海域の地形と波高分布を示す。ここでは、同図で $x = 310\text{m}$, $y = 390\text{m}$ 付近に設置された人工浅場を対象とすることから、その浅場から約20m沖側での水位変動をゼロアップクロス法により整理した。その結果、有義波高0.46m, 有義波周期5.4sが得られたものの、以下で用いるFSMでは現在のところ不規則波の造波は行えないことから、波高 $H = 0.5\text{m}$, 周期 $T = 5.0\text{s}$ の規則波を基準ケースとして以下検討を進める。

3. 三次元流体・地形変化連成数値計算モデルの概要

三次元流体・地形変化連成数値計算モデルFSMはメインソルバーと二つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、透過性材料の間隙内部を含む全気液相に適用できるように一般化した連続式とNavier-Stokes (NS)方程式を支配方程式とするLES (Large-Eddy Simulation)に基づいており、GNS (Generalized NS Solver) と称されている。そのGNSには、気液界面を追跡するMARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver; 功刀, 1997)に基づくモジュールとRoulundら (2005)を参考に構築した掃流砂輸送に伴う地形変化を追跡するモジュールがTwo-Wayカップリング手法により組み込まれている。ここで、後者のモジュールではRoulundら (2005)に倣って浮遊砂の影響を無視できると仮定していることから、Roulundら (2005)と同様に掃流砂のみを考慮している。また、本モデルの妥当性は水理実験との比較により検証されている (中村・Yim, 2009b; 中村ら, 2009a)。

4. 人工浅場の地形変化特性

(1) 計算条件

図-1に示したように浅場周辺の現地地形は非常に複雑であることから、本章ではまず設計段階の浅場を単純化

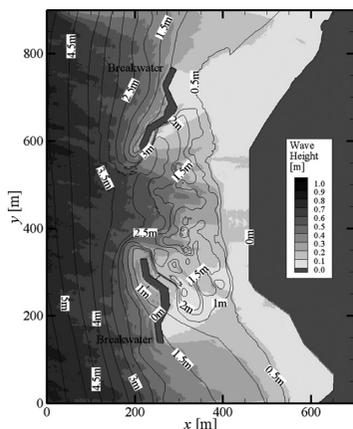


図-1 対象海域の地形と波高分布

した図-2に示す地形を対象に検討を行った。同図に示すように、計算負荷の軽減のために現象が $y = 0$ に対して対称と仮定し、 $y \geq 0$ の計算領域に高さ2.0m, 天端幅4.5m, 天端長4.5m, 法面勾配1/10の浅場 (土砂粒子の中央粒径0.1mm, 密度 $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)を設定し、その岸側と沖側にそれぞれ数メートルの一樣水深部と入射波の2波長分以上の減衰領域を確保した。静水深 h は2.5mとし、入射波は上述の基準ケース ($H = 0.5\text{m}$, $T = 5.0\text{s}$)に加えて $T = 3.0, 7.0\text{s}$ も対象とした。また、上述したように自然干潟では短期的で小規模な地形変動を繰り返していることが確認されていることから (古川ら, 2000), 三次元計算のために計算負荷が高いことによる計算所要時間の長さを考慮して、波の作用時間は波作用初期の短期間での地形変化に焦点を絞り60秒間とした。

計算格子として、減衰領域以外では $0.5 \times 0.5 \times 0.1\text{m}$ 角の等間隔格子を、減衰領域では x 軸方向に格子幅を5%ずつ広げた不等間隔格子を用いた。流速と圧力の境界条件として、沖側と岸側の境界にはSommerfeld放射条件、手前側の境界 ($y = 0.0\text{m}$)には勾配ゼロの条件、奥側の境界 ($y = 26.0\text{m}$)と下面 ($z = -2.5\text{m}$)にはSlip条件、上面には圧力一定条件を課した。また、VOF関数の境界条件には全境界で勾配ゼロの条件を用いた。一方、底質輸送の境界条件については、漂砂の供給がゼロの条件を課した。

パラメータとして、重力加速度 9.81m/s^2 , 水の密度 $9.97 \times 10^2 \text{kg/m}^3$, 空気密度 1.18kg/m^3 , 水の動粘性係数 $8.93 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, 空気の動粘性係数 $1.54 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, 表面張力係数 $7.20 \times 10^{-2} \text{N/m}$ を用い、Mizutaniら (1996)による水理実験の結果を基に透過性材料の慣性力係数は-0.04, 非線形抵抗力係数は0.45, 線形抵抗力係数は25.0とした。また、浅場を構成する土砂に関しては、空隙率 m を0.4, 水平面での限界Shields数を0.05, 静止摩擦角と動摩擦角を23.0度, 水中安息角を29.0度とした。

(2) 浅場周辺の波浪場と地形変化

図-3に基準ケースにおける計算終了時 (時刻 $t = 60.0\text{s}$)の波浪場と地形変化の様子を例示する。ここで、同図では鉛直方向を5倍に拡大していることから、浅場表面の等高線に沿う段差は鉛直方向の拡大のために初期地形でも見られる形状である。図-3より、計算終了時でも浅場

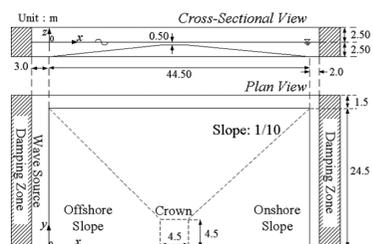


図-2 単純化した浅場に対する計算領域の概略図

の形状に大きな変化は認められず、その表面に若干の凹凸が確認できる程度であることが分かる。そこで、同時刻での初期状態からの地形変化量 Δz_s （堆積を正とする）を図-4に示す。ここで、実線は初期状態の浅場の等高線を表す。同図より、浅場の天端沖側端と沖側稜線で侵食が、そのすぐ沖側で堆積が生じることが分かる。また、天端の岸側隅角部で侵食が、その岸側で堆積が生じる傾向も認められる。浅場の沖側法面では、侵食と堆積が y 軸と平行に交互に生じており、図示しないが、その間隔は T の増加とともに広がることを確認している。一方、浅場の岸側法面では $x = 36.0\text{m}$, $y = 0.0\text{m}$ 付近で侵食、その稜線寄りの岸側で堆積が生じることが分かる。

浅場の表面に作用する底面せん断力との関係を検討するために、図-5に計算終了直前の一周期間（ $t = 55.0 \sim 60.0\text{s}$ ）での平均Shields数 $\bar{\tau}_s$ の分布を示す。同図より、沖側稜線の上部を中心とする浅場の沖側部分、天端の岸側隅角部、岸側法面の $y = 0.0\text{m}$ 付近で $\bar{\tau}_s$ が大きいことが分かる。ここで、岸側法面の $y = 0.0\text{m}$ 付近での $\bar{\tau}_s$ の増加は、図示しないが、天端上を通過した波と側面を回り込んだ波がその付近で重なったために生じたと考えられる。この $\bar{\tau}_s$ が大きい位置は図-4に示した地形変化の発生位置との相関が認められるものの、 $\bar{\tau}_s$ だけではその地形変化が侵食か堆積かは判断できず、また地形変化の大きさとの関係は確認できないことが分かる。

(3) 浅場内部の有効応力変動と地形変化

土砂の移動はShields数だけではなくその表層に作用する有効応力変動の影響も受けることが確認されていることから（中村・水谷，2008），本論では有効応力変動を評価するために浅場の内部での相対鉛直有効応力比（Relative Vertical Effective Stress Ratio, 以下RESRと略す）

$$RESR = 1 - \sigma'_z / \sigma'_{z0} \dots\dots\dots (1)$$

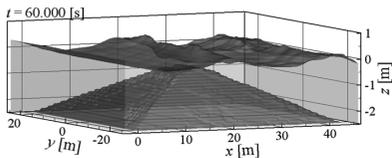


図-3 計算終了時の波浪場と地形変化の様子（基準ケース（ $T = 5.0\text{s}$ ）；鉛直方向を5倍に拡大して表示）

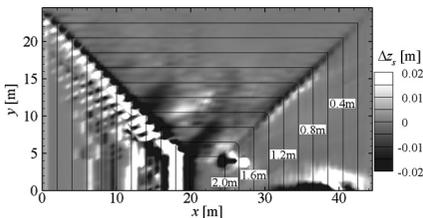


図-4 計算終了時の地形変化量 Δz_s （基準ケース（ $T = 5.0\text{s}$ ）； Δz_s ：堆積を正）

に着目し、RESRと地形変化の関係を明らかにする。ここで、 σ'_z は浅場の内部での鉛直有効応力、 σ'_{z0} はその初期値であり、 σ'_z は善ら（1987）に倣って浅場の表面での水圧と浅場の内部での間隙水圧の差から求め、 σ'_{z0} は

$$\sigma'_{z0} = -(1-m)(\rho_s - \rho_w)gz' \dots\dots\dots (2)$$

から求めた。ただし、 m は空隙率、 ρ_s は土砂粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 z' は浅場の表面を原点とする上向き座標である。

ここでは、前節で特徴的な Δz_s や $\bar{\tau}_s$ が見られた位置を中心に、図-6に示すC1からC6を対象とした。図-7にC1からC6でのRESRの最大値および最小値の鉛直分布を示す。同図では、ゼロダウンクロス法により整理した各点上での無次元水位変動 η/H とともに、 η の時間変化を無次元化した η'/\sqrt{gh} も示した。ここで、 η' は η をフーリエ級数展開して求めた。図-7より、 $T = 7.0\text{s}$ での天端の岸側隅角部C2を除いて、最大RESRは浅場のすぐ表層ではなく若干内部に入った点で最大値をとることが分かる。また、それぞれの点で T が大きいほど最大RESRの最大値も大きいことが確認できる。すなわち、同図より T が大きいほど η'/\sqrt{gh} の最大値も大きい傾向が認められることから、水位が最も低下した状態からの水面の上昇速度が大きいほど浅場の内部に大きな圧力勾配が生じ、結果として最大RESRの最大値も大きくなったと考えられる。また、 T に関わらず、最も大きく侵食されたC1での最大RESRの最大値が他の位置よりも大きいことが分かる。これは、C1の表層での鉛直有効応力 σ'_z が初期状態よりも大きく低下していることを表していることから、この周辺での土砂粒子間の拘束力が弱まり、侵食がさらに助長される可能性があると考えられる。

一方、図-7に示した最小RESRより、最大RESRの場合と同様に浅場の表面から若干下の点で最も小さくなる事が分かる。ただし、浅場の側面のC4やC5では最小

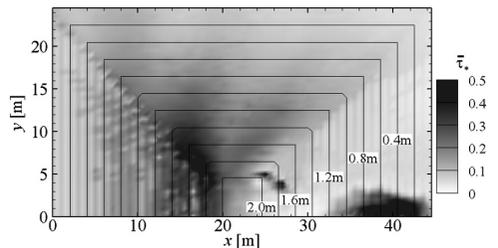


図-5 平均Shields数 $\bar{\tau}_s$ （基準ケース（ $T = 5.0\text{s}$ ））

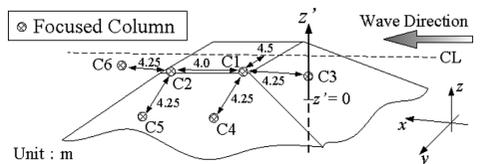


図-6 相対鉛直有効応力比RESRの検討対象位置

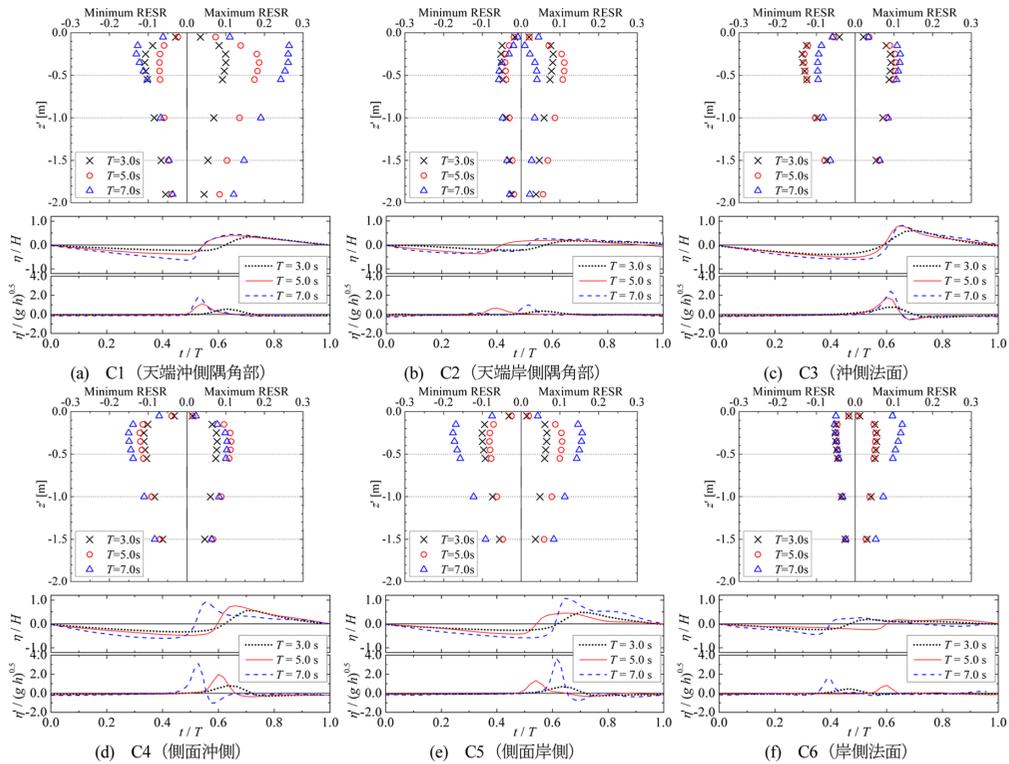


図-7 RESRの最大値および最小値の鉛直分布，無次元水位変動 η/H とその時間変化 η'/\sqrt{gh} の時系列変化

RESRの最小値は T ，すなわち η'/\sqrt{gh} の最小値との関係が確認できるものの，他の位置ではあまり相関が認められないことも分かる．また，地形変化が見られたC1からC3では，最小RESRの最小値の大きさは最大RESRの最大値よりも小さいか同程度であることから，最小RESRの低下とともに土砂粒子間の拘束力が強まり，地形変化が生じにくくなる効果は相対的に小さいと推測される．

(4) 有効応力変動を考慮した地形変化計算

前節でRESRの増加により侵食が助長される可能性が示唆されるとともに，中村・水谷(2008)はRESRを考慮してShields数を評価しないと水理実験で確認された遡上津波による侵食を再現できないことを明らかにしていることから，ここではFSMの底質輸送モジュールで用いているShields数 τ_* を中村・水谷(2008)と同様にRESRで評価し直した修正Shields数 τ'_* 。

$$\tau'_* = \tau_*/(1-\beta\lambda) \dots\dots\dots (3)$$

を用いて計算を行った．ここで， λ は浅場の表面から一格子下でのRESR， β は $0 \leq \beta < 1$ なる無次元パラメータであり，中村・水谷(2008)に倣って $\beta = 0.992$ とした．

RESRを考慮して得られた地形変化量は，図-4に示したRESRを考慮しなかった場合と違いが明確ではなかったことから，図-8に両者の差 Δz_s^{diff} (堆積を正とする)を示す．同図より，図-4で侵食が認められる天端の沖側端

や岸側隅角部で Δz_s^{diff} が負となっており，侵食深が大きくなっていることが分かる．その一方で，天端のすぐ沖側の堆積位置では Δz_s^{diff} が負，侵食位置では Δz_s^{diff} が正となり，地形変化がRESRの考慮により小さくなっていることも確認できる．したがって，RESRを考慮しなかった場合には侵食を過小評価する危険性があることから，中村・水谷(2008)と同様に地形変化を検討する際にはRESRを考慮することは重要であると考えられる．

5. 現地地形への適用

地形変化の傾向や有効応力変動の特性に関して，前章の単純化した地形と現地地形の差異を検討するために，図-1で $x = 310\text{m}$ ， $y = 390\text{m}$ 付近にある浅場とその周辺を対象に解析を行った．具体的には，図-9(a)に示す中央粒径 0.1mm の土砂からなる地形に第2章で得られた沖波高 $H = 0.46\text{m}$ ，沖波周期 $T = 5.4\text{s}$ の規則波を作用させた．ただし，図-1に示したように対象とした浅場の隣に若干低い別の浅場があったことから，ここでは図-9(a)に示したように二つの浅場をモデル化した．計算条件として，流速と圧力の境界条件には手前側と奥側の境界に勾配ゼロの条件を課し，他は前章と同じ設定を用いた．

図-9(b)に計算終了時($t = 60.0\text{s}$)の波浪場と地形変化の様子を，図-10に同時刻での地形変化量 Δz_s (堆積を

正とする)を示す。ここで、図-10の実線は初期状態での等高線を表す。図-10より、天端の沖側端で侵食が、そのすぐ沖側で堆積が生じており、前章との一致が認められる。また、対象領域に浅場が二つあることから、特に天端と天端の間で大きな堆積が生じることも確認できる。

浅場の天端や法面でのRESRと水位変動の解析を行ったところ、図示しないが、RESRの鉛直分布やRESRと水位変動の関係は単純化した地形の場合と変わらず、現地地形でも同様の傾向を示すことが確認できた。したがって、人工浅場の設計時など浅場の安定性を評価する際には、浅場周辺の流動場だけではなく浅場内部の有効応力状態の把握も不可欠であると考えられる。

6. 結論

本研究では、現地海岸の人工浅場とそれをモデル化した浅場を取り扱い、三次元流体・地形変化連成数値計算モデルを用いて浅場の地形変化特性とそのメカニズムを考究した。その結果、浅場の内部に生じる有効応力変動を無視して地形変化の計算を行った場合には侵食を過小評価する危険性があることから、地形変化の評価時には有効応力変動の考慮は不可欠であることを明らかにした。ただし、本モデルの適用性の検討は十分ではないことから、現地観測や水理実験との比較を通じて検証を行うとともに、現地を想定したより長期間を対象とした計

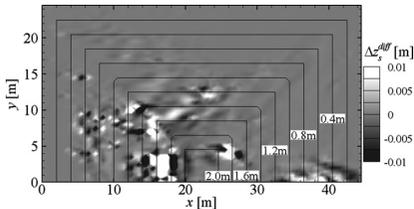


図-8 RESRの考慮の有無による計算終了時の地形変化量の差 Δz_s^{diff} (基準ケース ($T=5.0s$) ; Δz_s^{diff} : 堆積を正)

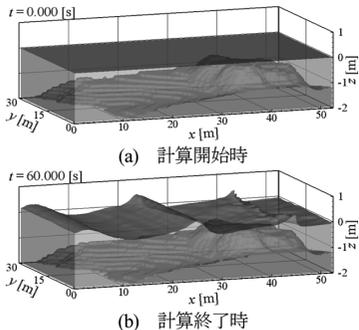


図-9 現地地形での波浪場と地形変化の様子 (鉛直方向を5倍に拡大して表示)

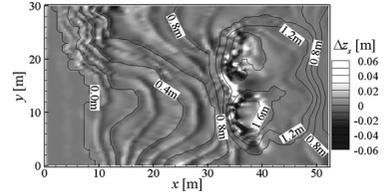


図-10 現地地形での計算終了時の地形変化量 Δz_s (堆積を正)

算を行い、地盤状態が底質輸送とそれに伴う地形変化に与える影響についてさらに検討していく所存である。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費若手研究者の自立的研究環境整備促進大高等研究院研究者育成特別プログラムおよび日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) (研究代表者：水谷法美；課題番号：22360194) から補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

春日井康夫・久本忠則・中山康二・松本英雄 (2003) : 広島県尾道糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 107-112.
 功刀資彰 (1997) : 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 機械学会論文集B編, 第63巻, 第609号, pp. 1576-1584.
 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987) : 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.
 土田 孝・吉牟田卓・浅海綾一 (2006) : 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 491-495.
 土田 孝・高橋祐子・浅海綾一 (2007) : 波浪による水圧変動を受ける砂質土地盤からの細粒分の流出に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1266-1270.
 中村友昭・水谷法美 (2008) : 地盤内部の応力変動の影響を考慮した漂砂量式を用いた遡上津波による地形変化シミュレーション, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 57-62.
 中村友昭・水谷法美・篠田陽介・小山裕文 (2009a) : 岸壁に作用する局所流による三次元洗掘予測手法の開発と対策工に関する研究, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 486-490.
 中村友昭・Solomon C. Yim (2009b) : 波浪場と地形変化の相互作用を考慮した3次元数値モデルの開発と侵食・洗掘現象への適用, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 1227-1232.
 平山克也 (2002) : 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港研資料, No. 1036, 162 p.
 広島県 (2001) : 広島港五日市地区人工干潟環境モニタリング記録, pp. 1-47.
 古川恵太・藤野智亮・三好英一・桑江朝比呂・野村宗弘・萩本幸将・細川恭史 (2000) : 干潟の地形変化に関する現地観測 - 盤洲干潟と西浦造成干潟 -, 港研資料, No. 965, 30p.
 Mizutani, N., W. D. McDougall and A. M. Mostafa (1996): BEM-FEM combined analysis of nonlinear interaction between wave and submerged breakwater, Proc., Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, Vol. 25, pp. 2377-2390.
 Roulund, A., B. M. Sumer, J. Fredsøe and J. Michelsen (2005) : Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, J. Fluid Mech., Vol. 534, pp. 351-401.