浸透滲出流による層流・乱流抵抗の影響を考慮した漂砂モデルとその適用に関する研究

Sediment Transport Model Considering Laminar and Turbulent Resistance Force due to Infiltration/Exfiltration and its Application

中村友昭¹・水谷法美²

Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

A sediment transport model taking into account laminar and turbulent resistance force due to infiltration/exfiltration is proposed in this study. A three-dimensional two-way coupled fluid-structure-sediment interaction model (FSSM) combined with the proposed model is applied to sediment transport in a steady uniform flow and local scouring due to tsunami run-up. As a result, the laminar resistance force due to infiltration/exfiltration affects the sediment transport rate, and it is consequently essential to take into account the laminar resistance force in assessing sediment transport in the presence of infiltration/exfiltration. The results also show that the FSSM with the proposed model predicts experimental data reasonably well, and demonstrate the validity of the FSSM with the proposed model.

1. 緒言

底質表面を出入りする浸透滲出流は底質上の境界層厚と底質粒子の有効重量に影響を与え、例えば浸透流が生じると境界層厚が減少して漂砂量を増加させる一方で、底質粒子の有効重量が増加して漂砂量を逆に減少させることが知られている（例えばButtら，2001）。この相反する2つの効果のうち前者の境界層厚については、底質上の流動場が正確に把握できれば、境界層厚の増減に伴う摩擦速度、すなわち底面せん断力の変化も捉えられると考えられることから、漂砂量に与える効果は適切に評価できると言える。しかし、後者の有効重量については、底質表層に生じる間隙流を正確に把握した上で、それが有効重量に与える影響を評価する必要がある。そこで、Nielsen（1992）とTurner・Masselink（1998）は層流抵抗を考慮してShields数を修正することによって、浅野・米永（2000）は乱流抵抗を考慮して修正Shields数と掃流砂量を修正することによって浸透滲出流の効果を取り込んでいる。ただし、層流抵抗と乱流抵抗をともに考慮して浸透滲出流の影響を評価し、それを基に3次元漂砂モデルを構築した研究は限られている。また、それを3次元数値計算モデルに組み込み、地形変化を検討した事例は著者らの知る限り見受けられない。本研究では、浸透滲出流による層流抵抗と乱流抵抗をともに考慮した3次元漂砂モデルを提案するとともに、その基本的な特性を検討する。そして、提案した漂砂モデルを中村・水谷

（2010）の3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル（Three-Dimensional Two-Way Coupled Fluid-Structure-Sediment Interaction Model；以下、FSSMと略す）に組み込み、まず定常流による漂砂現象に適用することでFSSMに組み込んだ際の妥当性を確認するとともに、遡上津波による構造物周辺の洗掘現象（中村ら，2007）に適用し、提案した漂砂モデルを組み込んだFSSMの有用性を検証する。

2. 浸透滲出流を考慮した3次元漂砂モデル

本章では、3次元連成数値計算モデルFSSM（中村・水谷，2010）に組み込まれている底質輸送モジュール（Sediment Transport Module；以下、STMと略す）を基に3次元漂砂モデルを提案する。具体的には、浅野・米永（2000）と同様に限界Shields数 τ_{*c} と掃流砂量 q_b を修正対象とし、それらの量に対して浸透滲出流による層流抵抗と乱流抵抗の両者の影響を取り込む。ここで、底質粒子は非粘着性で均一の粒子径の球体とし、底面流速および浸透滲出流速 w （滲出を正とする）による慣性力は無視する。このとき、底質粒子に作用する外力は

- 1) 底質粒子の水中重量 W

$$W = \frac{1}{6}\pi(\rho_s - \rho_w)gd_{50}^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

- 2) 底面流速による乱流抵抗 F_D と揚力 F_L ；ただし、 F_D と F_L で遮蔽係数 ε が等しいとした。また、限界Shields数を上回る状況では比較的大きい底面流速が生じていると考えられることから、底面流速による層流抵抗の影響は十分小さいと仮定した。

$$F_D = \frac{1}{8}\pi\varepsilon C_D(\rho_w d_{50}^2 v_r^2 = C_{FD} v_r^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

1 正会員 博(工) 名古屋大学特任講師 高等研究院
2 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

$$F_L = \frac{1}{8} \pi \varepsilon C_L \rho_w d_{50}^2 v_r^2 = k_L C_{FD} v_r^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

3) 浸透滲出流速 w による作用力 F_w :ただし, 式(4)右辺第1項は乱流抵抗力, 右辺第2項は層流抵抗力であり, 両者が遮蔽係数 ε_w が等しいとした.

$$F_w = \frac{1}{8} \pi \varepsilon_w C_{D1} \rho_w d_{50}^2 w |w| + 3 \pi \varepsilon_w C_{D2} \rho_w v_w d_{50} w \quad \dots\dots\dots (4)$$

から構成される. ここで, g は重力加速度, ρ_w と ρ_s はそれぞれ水と底質粒子の密度, v_w は水の動粘性係数, d_{50} は底質粒子の中央粒径, v_r は底質粒子の位置での v_b に対する相対底面流速 (v_b : 底質粒子の平均輸送速度), C_{D1} は乱流抵抗力係数, C_{D2} は層流抵抗力係数, C_L は揚力係数, k_L は C_L と C_{D1} の比 ($= C_L / C_{D1}$) である. 以下では, 浸透滲出流の影響を考慮した τ_{*c} と q_i をそれぞれ導出する.

(1) 限界Shields数

浸透滲出流速による作用力 F_w が底質粒子の水中重量 W を下回っているとき, 移動限界時の底質粒子には図-1に示す外力が作用している. ここで, 摩擦速度を v_f , その係数を C_{vf} , 斜面下向きに対する v_f の方向を α , v_b に対する v_f の方向を Ψ , v_b に対する v_r の方向を Ψ_1 としたとき, 同図中の F_{Dc} , F_{Lc} , v_{fc} , v_{bc} , v_{rc} , α_c , Ψ_c , Ψ_{1c} は移動限界時の F_D , F_L , v_f , v_b , v_r , α , Ψ , Ψ_1 を表す. また, β は斜面の傾斜角, μ_s は底質粒子の静止摩擦係数である. このとき, 移動限界時より $v_{bc} = 0$ つまり $v_{rc} = C_{vf} v_{fc}$, $\Psi_c = \Psi_{1c}$ であり, v_{bc} と同方向および直交方向の力のつり合いより

$$v_{rc}^2 = \frac{\{\mu_s \cos \beta - \sin \beta \cos(\alpha_c - \Psi_c)\}}{(\cos \Psi_c + \mu_s k_L) C_{FD}} (W - F_w) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Psi_c = \arctan \left\{ \frac{(W - F_w) \sin \beta \sin \alpha_c}{C_{FD} v_{rc}^2 + (W - F_w) \sin \beta \cos \alpha_c} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(Ψ_c は α_c と同符号かつ $|\Psi_c| \leq |\alpha_c|$)

が得られる. ここで, 未知数は v_{rc}^2 と Ψ_c である v ことから, 繰り返し計算により v_{rc}^2 と Ψ_c が求められる. したがって, 浸透滲出流を考慮しないとき ($w = 0$) の水平面 ($\beta = 0$) での限界Shields数を τ_{*c0} とすると, τ_{*c} は次式で表される.

$$\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = \frac{v_{rc}^2 / \{(s-1)gd_{50}\}}{v_{rc0}^2 / \{(s-1)gd_{50}\}} = \frac{v_{rc}^2 / \{C_{vf}^2 (s-1)gd_{50}\}}{v_{rc0}^2 / \{C_{vf}^2 (s-1)gd_{50}\}} = \frac{v_{rc}^2}{v_{rc0}^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-1 移動限界時の底質粒子に作用する力のつり合い ($F_w \leq W$)

ただし, v_{rc0} は $w = 0$ かつ $\beta = 0$ での v_{rc}^2 であり, 式(5)に $F_w = \beta = \Psi_c = \Psi_{1c} = 0$ を代入した次式から求められる.

$$v_{rc0}^2 = \frac{\mu_s W}{(1 + \mu_s k_L) C_{FD}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

一方, F_w が W を上回っているとき, 静止摩擦力が作用しなくなることから, 次式が得られる.

$$\tau_{*c} / \tau_{*c0} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上より, τ_{*c} は $F_w \leq W$ のとき式(5)~(8)より, $F_w > W$ のとき式(9)より求められる. また, 断面2次元現象のときは $\alpha = \Psi_c = \Psi_{1c} = 0$ であるので, 次式でまとめられる.

$$\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = \begin{cases} \left(\cos \beta - \frac{\sin \beta}{\mu_s} \right) \left[1 - \frac{3\varepsilon_w}{4(s-1)gd_{50}} \right] \times \left\{ C_{D1} w |w| + 24 \frac{C_{D2} v_w}{d_{50}} w \right\} & \text{if } F_w \leq W \\ 0 & \text{if } F_w > W \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(2) 掃流砂量

FSSMでは, 単位幅, 単位時間当たりの i 方向の掃流砂量 q_i として, Engelund・Fredsoe (1976) による

$$q_i = \frac{1}{6} \pi d_{50} P_{EF} v_{bi} \quad \dots\dots\dots (11)$$

が採用されている. ここで, v_{bi} は v_b の i 方向成分であり, τ_{*} をShields数, μ_d を動摩擦係数とすると, 掃流形態で移動する底質粒子の割合 P_{EF} は次式で与えられる.

$$P_{EF} = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_{*} \leq \tau_{*c} \\ \frac{6}{\pi \mu_d} (\tau_{*} - \tau_{*c}) & \text{if } \tau_{*} > \tau_{*c} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

図-2に示す掃流形態で移動する底質粒子を考える. まず図-2(a)に示した F_w が W を下回っているとき, v_b と同方向および直交方向の力のつり合いより

$$F_D \cos \Psi_1 + (W - F_w) \sin \beta \cos(\alpha - \Psi) = \mu_d \{(W - F_w) \cos \beta - F_L\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$F_D \sin \Psi_1 = (W - F_w) \sin \beta \sin(\alpha - \Psi) \quad \dots\dots\dots (14)$$

が得られる. また, 図-2(a)より

$$v_r \sin \Psi_1 = C_{vf} v_f \sin \Psi \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$v_r \cos \Psi_1 + v_b = C_{vf} v_f \cos \Psi \quad \dots\dots\dots (16)$$

(a) $F_w \leq W$

(b) $F_w > W$

図-2 掃流形態で移動する底質粒子に作用する力の釣り合い

となる．ここで，未知数は v_b , v_r , Ψ , Ψ_1 の4つであることから，繰り返し計算により v_b とその方向 Ψ ，すなわち v_{bi} が求められる．したがって，前節で求めた $F_w \leq W$ での τ_c とあわせて，式 (11), (12)より q_i が求められる．

一方， F_w が W を上回っているとき，動摩擦力が作用しなくなることから，図-2 (b) に示すように底質粒子に作用する力は F_D と $(F_w - W) \sin \beta$ となり，次式が成立する．

$$\Psi_1 = \Psi - \alpha \quad \dots\dots\dots (17)$$

このとき，底面接線方向の力のつり合いより

$$v_r = \sqrt{\frac{(F_w - W) \sin \beta}{C_{FD}}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

が得られる．また，図-2 (b) より

$$v_b = C_{vf} v_f \cos \Psi - v_r \cos \Psi_1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\Psi = \pm \frac{1}{2} \arccos \left\{ \frac{2(v_r \cos \alpha - C_{vf} v_f)^2}{v_r^2 \sin^2 \alpha + (v_r \cos \alpha - C_{vf} v_f)^2} - 1 \right\} \quad \dots\dots (20)$$

(Ψ は α と逆符号)

となる．したがって，上式より v_b とその方向 Ψ が求められることから，前節で求めた $F_w > W$ での τ_c とあわせて，式 (11), (12)から q_i が求められる．

以上より， q_i は v_{bi} と前章で求めた τ_c から求められ，その v_{bi} は $F_w \leq W$ のとき式 (13)～(16)より， $F_w > W$ のとき式 (17)～(20)より求められる．また，断面2次元現象のときは， $\alpha = \Psi = \Psi_1 = 0$ より次式のようにまとめられる．

$$v_b = C_{vf} v_f - v_r \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$v_r = \begin{cases} \left[\frac{\mu_d \cos \beta - \sin \beta}{\varepsilon C_{D1} (1 + \mu_d k_L)} \left\{ \frac{4}{3} (s-1) g d_{50} - \varepsilon_w C_{D1} w |w| - 24 \frac{\varepsilon_w C_{D2} v_w}{d_{50}} \right\} \right]^{1/2} & \text{if } F_w \leq W \\ \left[\frac{\sin \beta}{\varepsilon C_{D1}} \left\{ \varepsilon_w C_{D1} w |w| + 24 \frac{\varepsilon_w C_{D2} v_w}{d_{50}} \right\} - \frac{4}{3} (s-1) g d_{50} \right]^{1/2} & \text{if } F_w > W \end{cases} \quad \dots\dots (22)$$

3. 浸透滲出流を考慮した漂砂モデルの特性

前章で提案した漂砂モデルに関して，繰り返し計算を必要としない断面2次元現象に対する式(10), (21), (22)を対象に，その基本的な特性を検討する．ここでは， $d_{50} = 0.25 \text{ mm}$ ， $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ， $\beta = 0^\circ$ とし，中川・辻本 (1986)より $\varepsilon = 0.4$ ， $k_L = 0.85$ とした．また，浸透滲出流の有無による差を明確に示すために，本章では $\varepsilon_w = 1.0$ とした．なお，その他のパラメータは中村・水谷 (2010)を参照されたい．

図-3に無次元掃流砂量 q_s とShields数 τ_* の関係を示す．なお，同図にはMeyer-Peter・Müller式，Engelund・Fredsoe式，芦田・道上式も同時に示した．図-3より，浸

透滲出流を考慮しなかったとき ($w = 0$) は，本漂砂モデルのベースであるEngelund・Fredsoe式と一致することが確認できる．また， $w = 0$ の場合と比較して，滲出流のとき ($w > 0$) には q_s が増加し，逆に浸透流のとき ($w < 0$) には減少する傾向が認められる．そこで， $w = 0$ の場合の q_s を q_{*0} としたとき， q_{*0} に対する q_s の増減率 q_s / q_{*0} を図-4に示す．同図より，限界Shields数の付近では浸透滲出流は q_s に大きな影響を与える一方で，Shields数の増加に伴いその影響は小さくなることが分かる．このうち滲出流時 ($w > 0$) の傾向は，図示しないが，底質内部に上向きの圧力勾配を生じさせたときに生じる現象 (酒井ら，2001) との類似を確認している．また，層流抵抗を考慮しなかった場合 ($C_{D2} = 0.0$) には q_s / q_{*0} の増減がほとんど認められないことから，浸透滲出流の影響を検討する上で層流抵抗を考慮することの重要性が指摘できる．

4. 3次元連成数値計算モデルの概要

3次元連成数値計算モデルFSSM (中村・水谷，2010) は，メインソルバーと3つのモジュールから構成されている．メインソルバーは，底質の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相に適用できるように一般化し，さらに可動構造物や地形変化を取り扱えるように拡張した連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLES (Large-Eddy Simulation) である．そのメインソルバーには，気液界面を追跡するMARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver) に基づくモジュール，巻き上げ，移流拡散，沈降の各輸送過程を考慮して浮遊砂の解析を行い，掃流砂と浮遊砂の輸送に伴う地形変化を計算する前述の底質輸送モジュールSTM，可動構造物を取り扱う体積力型埋め込み境界法に基づくモジュールが組み込まれている．ここでは，流体・構造・地形変化の相互作用を浸透滲出流の影響を考慮して解析できるように，本論で新たに提案した漂砂モデルをSTMに導入した．ただし，以下では可動構造物は取り扱わないことから，最後のモジュールは使用しなかった．なお，FSSMの詳細は中村・水谷 (2010)を参照されたい．

5. 浸透滲出流を考慮した連成モデルの適用

(1) 定常流による漂砂現象への適用

定常流による漂砂現象を対象に，提案した漂砂モデルをFSSMに組み込んだ際の妥当性を確認する．なお，FSSMは上述のように3次元モデルであるが，繰り返し計算を必要としない断面2次元現象に対する式(10), (21), (22)から求めた解析解との比較を行うために，また3次元性が卓越しないと考えられる定常流を対象にするために，ここでは単位奥行きの断面2次元計算を行う．

図-5に計算領域の概略図を示す．同図に示すように，

計算領域の左端の流入境界から長さ 10.0 m の固定床を、その下流に長さ 10.0 m、厚さ 0.05 m の移動床を、さらにその下流に長さ 5.0 m の固定床を設定して流出境界と接続した。移動床粒子の諸元やパラメータは第 3 章と同じとし、流入境界からの断面平均流速と移動床下面からの浸透滲出流速を変化させて計算を行った。

図-6 に $x = 5.0$ m での無次元掃流砂量 q_s と Shields 数 τ_s の関係を示す。同図より、浸透滲出流速 w による作用力 F_w が底質粒子の水中重量 W を上回っている条件 ($w = 4.0$ mm/s) も含めて、FSSM による計算結果は解析解とよく一致していることが確認できる。したがって、提案した漂砂モデルを FSSM に組み込んだ際の妥当性が確認できたことから、さらなる適用と検討を以下行う。

(2) 遡上津波による構造物周辺の洗掘現象への適用

遡上津波による構造物周辺の洗掘現象に関する水理実験 (中村ら, 2007) を対象に検討を行う。図-7 の計算領域の概略図を示す。同図に示すように、1/10 勾配の一樣斜面を有する高さ 0.33 m の固定床の上に、護岸 (天端幅 0.03 m、高さ 0.15 m、表法面勾配 1/0.2)、移動床 (長さ 1.0 m、厚さ 0.15 m、 $d_{50} = 0.2$ mm、 $\rho_s = 2.65 \times 10^3$ kg/m³)、固定床 (長さ 1.0 m、高さ 0.15 m) を沖側から順に設定した。また、構造物は幅 B の矩形とし、護岸背後から 0.28 m の位置に固定した。そして、津波をモデル化した沖波波高 H_o の押し波のみの長周期波 1 波 (静水深 $h_o = 0.455$ m、造波板を押し出す時間 $T = 6.0$ s) を入射させた。

計算格子は、構造物沖側隅角部かつ移動床表面の近傍に対して $4 \times 4 \times 2$ mm の等間隔格子を適用し、それ以外では計算負荷の軽減のために不等間隔格子とした。パラメータについては、中川・辻本 (1986) より $\varepsilon = 0.4$ 、 $k_L = 0.85$ とし、 ε_w については計測データが得られないことから、試行計算の結果より ε と等しいとした。その他のパラメータ、境界条件などについては中村・水谷 (2010) を参照されたい。なお、図示しないが、水位変動 (W1

～W5；図-7 参照) と間隙水圧変動 (P1～P8) は水理実験結果と良く一致していることを確認している。

図-8 と 9 に津波作用後の最終洗掘深 z_{sf} (侵食を正とする) の分布を示す。同図 (b), (c) より、護岸のすぐ岸側 ($0 < x < 0.15$ m) に侵食が生じており、同図 (a) に示した水理実験結果を 2 mm 程度過大評価しているものの、再現性が高いことが分かる。また、構造物から沿岸方向に離れた岸寄りの場所 ($x > 0.3$ m, $y > 0.15$ m) については、水理実験結果を若干過大評価しているものの、侵食が生じている点で傾向が一致していることが確認できる。一方、構造物の岸側では、水理実験結果、計算結果ともに堆積が生じていることが分かる。これらの侵食と堆積は、図-8 (b) と (c)、図-9 (b) と (c) の比較より、浸透滲出流の考慮の有無であまり変わらないことも確認できる。その一方で、最も大きな地形変化が生じている構造物の沖側隅角部から側面にかけての洗掘については、浸透滲出流を考慮することでより深く掘れる傾向が認められ、図-8 (a) と図-9 (a) に示す水理実験結果に近づくことが分かる。

そこで、構造物沖側隅角部周辺の洗掘に着目する。図-10 に最大洗掘深 $z_s^{\max}$ の時間変化を示す。同図より、7.7 s 付近までは浸透滲出流の影響の有無による差は小さいものの、その後は浸透滲出流を考慮した方が大きくなっており、再現性が向上したことが確認できる。特に、8.2 s 過ぎや 8.5 s 過ぎの急激な増加は浸透滲出流を考慮した場合のみに現れており、浸透滲出流を考慮することで $z_s^{\max} / B$ の増加傾向が適切に再現できていることが分かる。したがって、浸透滲出流を考慮した本漂砂モデルの有効性が確認できるとともに、漂砂モデルにおいて浸透滲出流を考慮することの重要性が明らかになった。

これに関連して、中村ら (2007) は構造物沖側隅角部周辺の移動床表層において液状化に到る有効応力の低下が生じる現象を確認しており、またそれに基づいて有効応力の低下により底質粒子間の拘束力が弱まったことで

図-3 無次元掃流砂量 q_s

図-4 浸透滲出流を考慮しないとき ($w = 0$) に対する無次元掃流砂量 q_s の増減率

図-5 計算領域の概略図(定常流による漂砂)

図-6 浸透滲出流を考慮しないとき ($w = 0$) に対する無次元掃流砂量 q_s の増減率

図-7 計算領域の概略図 (遡上津波による洗掘)

図-10 構造物沖側隅角部周辺の最大洗掘深 $z_s^{\max}$ の時間変化 ($B = 0.14\text{m}$, $H_o = 64\text{mm}$)

底質の移動が助長され、大規模な洗掘の発生に到った可能性を指摘している。ここで、有効応力の低下は底質内部の方が底質表面と比較して間隙水圧が高い状態 (善ら, 1987), すなわち滲出流の発生を表している。したがって、構造物沖側隅角部周辺に滲出流が生じ、それが洗掘の発生を助長する現象を浸透滲出流の考慮により適切に表現できたために、上述したように再現性が向上したと考えられるとともに、有効応力の低下に伴う洗掘の助長に関する先の指摘の妥当性が確認できた。

ただし、図示しないが、水理実験では安息角を越えるような急勾配の斜面が瞬間的に現れる様子が確認された一方で、FSSMでは移動床の崩壊計算を毎ステップ行うために (中村・水谷, 2010), 8.7~9.0 s での $z_s^{\max} / B$ の増加とその後の埋め戻しによる $z_s^{\max} / B$ の減少が表現できなかったと推測される。また、他の時刻においても水理実験結果を若干過小評価していることから、再現性のより一層の向上のために本漂砂モデルを組み込んだFSSMのさらなる改良が必要であると考えられる。

6. 結論

本研究では、浸透滲出流による層流抵抗と乱流抵抗とともに考慮した3次元漂砂モデルを提案するとともに、提案した漂砂モデルを3次元連成数値計算モデルに組み込み、定常流による漂砂現象と遡上津波による洗掘現象への適用を行った。その結果、浸透滲出流を考慮した本漂砂モデルとそれを組み込んだ連成モデルの有用性を明らかにするとともに、浸透滲出流の影響を検討する上で層流抵抗を考慮することの重要性を示した。ただし、底面流速による層流抵抗の影響や浸透滲出流の遮蔽係数に

図-8 最終洗掘深 z_s^f の分布 ($B = 0.14\text{m}$, $H_o = 64\text{mm}$) 図-9 最終洗掘深 z_s^f の分布 ($B = 0.10\text{m}$, $H_o = 67\text{mm}$)

については検討の余地が残されていることから、今後も継続して研究を進めていく所存である。

謝辞: 本研究の一部は、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

- 浅野敏之・米永敏之 (2000): 前浜砂層内の浸透流を考慮した波打ち帯の漂砂の解析, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 511-515.
- 酒井哲郎・後藤仁志・原田英治・羽間義晃・井元康文 (2001): 波浪による海底地盤の液状化が漂砂量に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 981-985.
- 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.
- 中川博次・辻本哲郎 (1986): 移動床流れの水理, 技報堂出版, 310 p.
- 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美 (2007): 遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 856-860.
- 中村友昭・水谷法美 (2010): 3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルに基づく遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘現象に関する数値シミュレーション, 第24回数値流体力学シンポジウム, E10-4, 9 p.
- Butt, T., P. Russell and I. L. Turner (2001): The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, Coastal Eng., Vol. 42, No. 1, pp. 35-52.
- Engelund, G. and J. Fredsøe (1976): A sediment transport model for straight alluvial channels, Nordic Hydrology, Vol. 7, pp. 293-306.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, Advanced Series on Ocean Eng. Vol. 4, World Scientific, 340 p.
- Turner, I. L. and G. Masselink (1998): Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, J. Geophys. Res., Vol. 103, No. C13, pp. 30,813-30,824.