

浮遊砂の移流拡散現象を解析できる三次元連成 数値計算モデルの開発とその適用に関する研究

DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL COUPLED FLUID-SEDIMENT INTERACTION MODEL FOR SUSPENDED SEDIMENT ANALYSIS AND ITS APPLICATION

中村友昭¹・水谷法美²
Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 名古屋大学特任講師 高等研究院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

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 (〒464-8603 同上)

A three-dimensional two-way coupled fluid-sediment interaction model for suspended sediment analysis (FSM) is developed in this study. FSM is composed of a generalized Navier-Stokes solver with a volume of fluid module for air-water interface tracking and a sediment transport module (STM) for sediment surface tracking. STM is extended to analyze advection-diffusion problems of suspended sediment concentration. FSM is applied to predict vertical profiles of suspended sediment concentration in a steady uniform flow, and a model parameter involving suspended sediment is determined to minimize the root mean square error of the equilibrium concentration profiles. FSM is also applied to predict suspended sediment concentration due to plunging breaking waves, and the transport process of suspended sediment in the wave action is investigated in terms of three-dimensional vortex structures. The predictive capability of FSM is demonstrated against experimental data for both phenomena.

Key Words : *Three-dimensional coupled fluid-sediment interaction model, suspended sediment, numerical simulation, steady uniform flow, breaking wave, vortex structure*

1. 緒言

流体運動は底質輸送に伴う地形変化を生じさせると同時に、その地形変化は流動場に影響を与えることから、地形変化を検討する際には両者の相互作用の考慮が不可欠である。そこで、中村・Yim¹⁾は流動場と地形変化の相互作用を考慮した三次元流体・地形変化連成数値計算モデル (Three-Dimensional Two-Way Coupled Fluid-Sediment Interaction Model, 以下 FSM と称する) の開発を行い、孤立波による海浜断面の地形変化¹⁾やジェット水流による岸壁前面の局所洗掘²⁾への適用を通じて、その妥当性を確認している。しかし、FSM に組み込まれた地形変化を追跡する底質輸送モジュール (Sediment Transport Module, 以下 STM と称する) は掃流砂輸送による地形変化とそれに伴う流動場の変化は解析できるものの、Roulund ら³⁾に倣って浮遊砂の影響は無視できると仮定し、掃流砂のみしか考慮していないことから、浮遊砂が卓越する現象には適用できないなど問題点を残している。

浮遊砂を解析できる数値計算モデルに関して、榊山ら⁴⁾は捨石式傾斜堤の内部を含む全ての領域での

浮遊砂の挙動を検討するために、透過性材料の間隙内部にも適用できるように空隙率を考慮した浮遊砂の移流拡散方程式を提案し、ポーラスボディモデルに基づく断面二次元数値計算モデル PS-WAVE に組み込んでいる。また、中山ら⁵⁾は上述の榊山ら⁴⁾とは異なる空隙率を考慮した浮遊砂の移流拡散方程式を CADMAS-SURF に組み込み、土砂の侵入を抑制できる海水導入工の検討を行っている。いずれのモデルも空隙率を考慮していることから透過性材料の内部にも適用できる利点を有しているものの、二次元モデルであることから三次元性が卓越する砕波帯などへの適用に課題を残している。一方、鈴木ら⁶⁾は Smagorinsky モデルに基づく三次元 LES (Large-Eddy Simulation) に浮遊砂の移流方程式を組み込み、三次元性の強い特徴的な流動構造が現れる砕波帯での浮遊砂濃度分布に関する水理実験^{7),8)}に適用することでその妥当性を明らかにしている。ただし、浮遊砂の巻き上げ、移流、沈降の各輸送過程は考慮しているものの、拡散は考慮していないことから、その適用範囲は十分とは言えないのが実情である。

本研究では、掃流砂輸送だけではなく浮遊砂の巻き上げ、移流拡散、沈降を考慮した流動場と地形変

化の相互作用を解析できる三次元数値計算モデルの構築に向けて、上述した FSM で浮遊砂の解析が行えるように STM に改良を加える。そして、定常流による浮遊砂濃度分布に関する水理実験^{9),10)}と碎波帯での浮遊砂濃度分布に関する水理実験^{7),8)}の再現計算を行い、組み込んだ浮遊砂計算の妥当性と浮遊砂を考慮した本モデルの有用性を検証する。

2. 数値計算モデル

本論で改良を行う STM が組み込まれた FSM のメインソルバーは、透過性材料の間隙内部を含む非圧縮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た連続式と Navier-Stokes (NS) 方程式を支配方程式とする DTM (Dynamic Two-Parameter Mixed Model)¹¹⁾による LES 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)¹²⁾に基づくモジュール (Volume of Fluid Module, 以下 VOF と称する) が組み込まれており、さらに上述した STM が流動場との相互作用を考慮できるように Two-Way カップリング手法により組み込まれている。図-1 に FSM の計算領域を示す。ここでは、同図に示すように浮遊砂輸送を解析できるように STM の改良を行ったことから、本章では STM に追加した浮遊砂の計算手法を述べる。

なお、GNS の一般化 NS 方程式で考慮している透過性材料による線形抵抗力について、その時間方向の離散化に 2 次精度 Crank-Nicolson 法に代えてさらなる安定化のために 1 次精度 Euler 陰解法を適用した。また、一般化 NS 方程式の対流項の離散化に 3 次精度 TVD (Total Variation Diminishing) スキームに代えて 5 次精度 MUSCL (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws)¹³⁾を用いた。GNS の詳細は中村ら¹⁴⁾を、STM の掃流砂輸送に関しては中村・Yim¹⁾を参照されたい。

(1) 浮遊砂濃度の支配方程式

本モデルでは、榊山ら⁴⁾や中山ら⁵⁾を参考に、透過性材料の間隙内部にも適用できるように一般化した浮遊砂の質量保存式

$$m \partial C / \partial t + \partial (q_j^C + q_j^D + q_j^S) / \partial x_j = 0 \quad (1)$$

を支配方程式として用いた。ここで、 C は浮遊砂

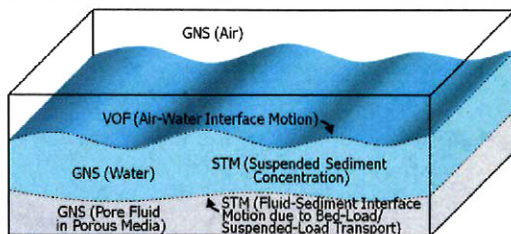


図-1 FSM の計算領域

濃度、 q_j^C 、 q_j^D 、 q_j^S はそれぞれ移流、拡散、沈降による浮遊砂輸送フラックス、 m は空隙率 ($0 \leq m \leq 1$)、 x_j は位置ベクトル、 t は時間であり、 q_j^C 、 q_j^D 、 q_j^S はそれぞれ

$$q_j^C = mv_j C \quad (2)$$

$$q_j^D = -m\epsilon_s \partial C / \partial x_j \quad (3)$$

$$q_j^S = -mw_s C \delta_{ij} \quad (4)$$

と表される。ただし、 v_i は実流速ベクトル、 ϵ_s は浮遊砂の拡散係数、 w_s は砂粒子の沈降速度、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。なお、ここでは透過性材料として内部への浮遊砂の侵入が考えられる捨石や消波ブロックを想定している。

(2) 底質表面での浮遊砂濃度の境界条件

底質の表面に対して、拡散による底質輸送フラックス q_i^D が底質の巻き上げ関数 p_N に等しいとする境界条件¹⁵⁾を課し、その p_N として

$$p_N = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_* < \tau_{*c} \\ C_p \left(\frac{\tau_* - \tau_{*c}}{\tau_{*c}} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{v_w^{0.2}} & \text{if } \tau_* \geq \tau_{*c} \end{cases} \quad (5)$$

を用いた¹⁶⁾。ここで、 C_p は底質の巻き上げに関する無次元パラメータ、 g は重力加速度、 v_w は水の動粘性係数、 s は砂粒子の比重、 d は砂粒子の中央粒径、 τ_* は Shields 数、 τ_{*c} は斜面での限界 Shields 数であり、 τ_* は次式で定義される。

$$\tau_* = v_f^2 / \{(s-1)gd\} \quad (6)$$

ここでは、STM の掃流砂輸送における τ_* の算出¹⁾や Zhao・Cheng¹⁷⁾と同様に、摩擦速度 v_f の計算に粗面乱流に対する対数則

$$\frac{v_{surf}}{v_f} = \frac{1}{\kappa'} \ln \frac{z_{surf}}{k_s/30} \quad (7)$$

を適用した。ただし、 v_{surf} は底質の表面から微小距離 z_{surf} だけ上方での接線方向流速、 κ' は Kármán 定数 ($=0.4$)、 k_s は等価砂粗度 ($=2.5d$) である。

3. 定常流による浮遊砂濃度の再現計算

本章では、van Rijn^{9),10)}が行った定常流による浮遊砂濃度分布に関する水理実験を取り上げ、水理実験結果との比較により浮遊砂に関するモデルパラメータを決定するとともに、定常流における本モデルの浮遊砂計算の再現性を検証する。

(1) 計算条件

図-2 に計算領域の概略図を示す。上述したように FSM は三次元モデルであるが、三次元性があまり卓越しないと考えられる定常流を対象に計算を行うことから、ここでは単位奥行きでの断面二次元計算を行った。図-2 に示すように、計算領域の左

端の流入境界から長さ 10.00m の固定床を助走区間として設定し、その下流に長さ 11.00m、高さ 0.05m の砂地盤（中央粒径 0.23mm）を、さらにその下流に長さ 4.00m の固定床を設定して流出境界と接続した。また、静水深 h は 0.25m で一定とした。座標軸は、van Rijn^{9),10)}と同様に、砂地盤の上流端を原点とする下流方向を x 軸、砂地盤の表面を原点とする鉛直上方向を z 軸とした。

流動場の計算を行う GNS・VOF では、 x 、 z 軸方向の格子幅がそれぞれ 50mm、5mm の等間隔格子を用いた。流速と圧力の境界条件として、固定床の表面に No Slip 条件を、流出境界に勾配ゼロの条件を、上面に圧力一定の条件を用いた。また、流入境界には流速指定の条件を課した。すなわち、van Rijn の実験条件^{9),10)}に基づいて、静水面より下側（ $z \leq 0.25$ m）からは断面平均流速 $U = 0.67$ m/s の対数則分布の一定流速を流入させ、それより上側（ $z > 0.25$ m）は流入出ゼロとした。一方、VOF 関数 F の境界条件として、流入境界の静水面より下側は $F = 1.0$ 、それより上側は $F = 0.0$ とし、その他の境界には勾配ゼロの条件を課した。なお、GNS と VOF では上述したように砂地盤の間隙内部の流体運動も解析できることから、砂地盤の表面に対する境界条件は必要ないことに注意されたい。

一方、浮遊砂の計算を行う STM では、上述したように砂地盤の内部は浮遊砂計算の対象としないことから、砂地盤の表面より上側（ $z \geq 0.0$ m）に上述の GNS・VOF と同じ大きさの格子を適用した。境界条件として、砂地盤の表面に第 2.2 節で説明した式(5)を、固定床の表面に不透過条件を、流入境界に浮遊砂の供給がゼロの条件を、その他の面に勾配ゼロの条件を課した。また、式(7)の摩擦速度 v_f の計算には、GNS で得られた流速を補間して求めた砂地盤の表面から $z_{surf} = 7.5$ mm 上方での流速 v_{surf} を用いた。なお、水理実験における浮遊砂濃度の計測は砂地盤の上流端に形成される局所洗掘を最小限に抑えた条件で行っている¹⁰⁾ことから、ここでは浮遊砂濃度の再現性に焦点を絞って検討を行うために流砂に伴う地形変化の計算は行わなかった。

パラメータとして、重力加速度を 9.81 m/s²、水の密度を 9.97×10^2 kg/m³、空気密度を 1.18 kg/m³、水の動粘性係数を 8.93×10^{-7} m²/s、空気の動粘性係数を 1.54×10^{-5} m²/s、表面張力係数を 7.20×10^{-2} N/m、付加質量係数を -0.04 、非線形抵抗力係数を 0.45 、

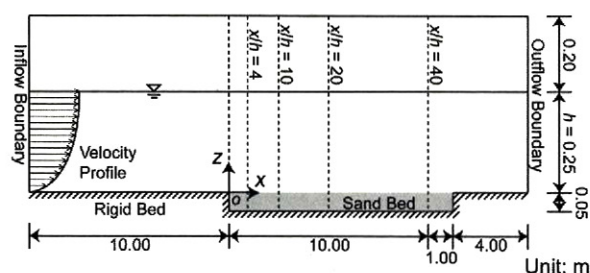


図-2 定常流による浮遊砂の再現計算で用いた計算領域

線形抵抗力係数を 25.0、砂粒子の比重を 2.65、砂地盤の空隙率を 0.4、限界 Shields 数を 0.05 とした。また、Zedler・Street¹⁸⁾などに倣って乱流 Schmidt 数を 1.0、すなわち ε_s は水の渦動粘性係数 ν_t と等しいとし、その ν_t の算出には Liang ら¹⁹⁾に倣って対数則の流速分布に対応した次式を用いた²⁰⁾。

$$\nu_t = \kappa' v_f z (1 - z/h) \quad (8)$$

LES に関しては、グリッドフィルタとテストフィルタにボックスフィルタを採用し、グリッドスケールのフィルタ幅は格子幅と同じとした。また、両スケール間のフィルタ幅の比は 2.0 とした。

(2) 定常流における再現性の検証

本節では、浮遊砂濃度分布が平衡状態に達していると確認できた計算開始 90 秒後から 100 秒後の 10 秒間の時間平均値を用いて以下検討を進める。

浮遊砂の巻き上げに関するモデルパラメータ C_p に関して、 $x/h = 4, 10, 20, 40$ の鉛直断面（図-2 参照）での浮遊砂濃度分布の RMSE（Root Mean Square Error）が最小になるように 0.09 と決定した。ここで、van Rijn²¹⁾は定常流に対する水理実験より $C_p = 0.00033$ と推定し、Nielsen¹⁶⁾はそれを $C_p = 0.00033$ のまま非定常流に拡張しているが、STM の掃流砂輸送の場合¹⁾と同様に摩擦速度 v_f の算定方法やその際に用いる k_s や z_{surf} に依存するだけでなく、上述した ε_s の影響も受けることから、本モデルでは $C_p = 0.09$ で RMSE が最小となった。

図-3 に浮遊砂濃度の鉛直分布の比較を示す。同図より、 $z = 0.10$ m で実験値を若干過小評価する傾向が認められるものの、 x/h に関わらず実験値を再現できていることが分かる。以上より、定常流における浮遊砂計算の再現性が確認できた。

4. 砕波帯での浮遊砂濃度の再現計算

本章では、佐藤ら^{7),8)}による砕波帯での浮遊砂濃度分布に関する水理実験を対象に再現計算を行い、三次元的な流動構造が現れる砕波帯に対する本モデルの浮遊砂計算の適用性を検証する。また、砕波に伴う渦構造の観点から浮遊砂濃度分布に対する検討を行い、本モデルの有用性を確認する。

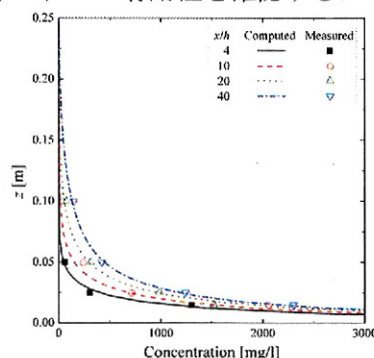


図-3 定常流による時間平均浮遊砂濃度分布の比較

(1) 計算条件

図-4 に計算領域の概略図を示す。同図に示すように、計算領域の奥行きは佐藤ら^{7),8)}の実験装置と同様に 0.60m とし、勾配 1/20 の不透過斜面の一部に長さ 1.00m、高さ 0.02m の砂地盤を設定した。座標軸に関しても、佐藤ら^{7),8)}を参考に、 x 軸は汀線を原点とする沖向き座標、 y 軸は計算領域の中央断面を原点とする手前向き座標、 z 軸は砂地盤の表面の沖側端を原点とする上向き座標とした。

GNS・VOF において、減衰領域以外では $0.02 \times 0.04 \times 0.01$ m 角の等間隔格子を、減衰領域では上記の等間隔格子を基準に格子幅を 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には、底面、側面、斜面の表面に Slip 条件を、沖側境界と岸側境界に Sommerfeld 放射条件を、上面に圧力一定の条件を課した。また、VOF 関数の境界条件には、全境界に勾配ゼロの条件を用いた。

一方、STM では砂地盤の外側領域を浮遊砂の計算対象とし、格子の大きさは GNS・VOF と同じとした。境界条件として、砂地盤の表面に式(5)を、底面、側面、斜面の表面に不透過条件を、その他の面に勾配ゼロの条件を課した。また、式(7)による摩擦速度 v_f の計算には $z_{surf} = 0.015$ m の接線方向流速 v_{surf} を用いた。なお、水理実験において浮遊砂濃度の計測時に砂漣などの有意な地形変化は確認されていない^{7),8)}ことから、前章と同様に漂砂に伴う地形変化の計算は行わなかった。

佐藤ら^{7),8)}は合計 14 ケースの実験を行っているが、ここでは巻き波砕波が生じる波高 0.068m、周期 3.45s、静水深 0.385m の規則波を取り扱い、砂粒子の中央粒径が 0.18mm の砂地盤に作用させた。浮遊砂の拡散係数 ε_s については、水理実験における実測値が示されていない^{7),8)}ことから、簡単のために水の動粘性係数 ν_w と等しいと仮定し、その他のパラメータは前章と同じ値を用いた。

(2) 砕波帯に対する適用性の検証

図-5 に時間平均浮遊砂濃度分布 C の比較を示す。ここで、計算結果は造波開始 8 波目から 10 波目までの 3 周期平均の値であり、時間平均流速分布と

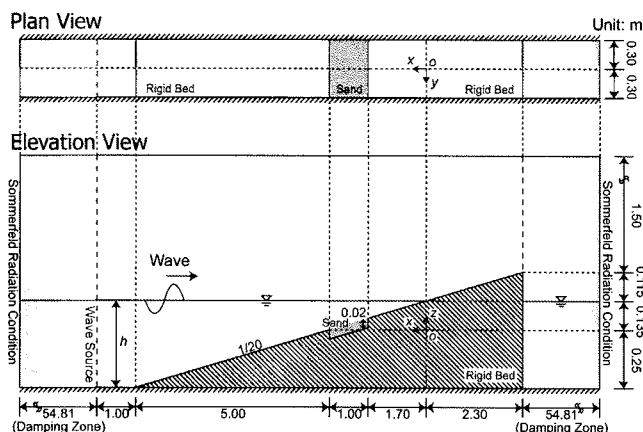


図-4 砕波帯での浮遊砂の再現計算で用いた計算領域

ともに図示した。 $y = 0.0$ m 断面と $y = -0.24$ m 断面をそれぞれ示した図-5(a), (b)より、流動構造の三次元性の影響から C の分布が奥行き方向に一様ではないことが分かる。また、図-5(a), (b)と全 y 断面平均を示した図-5(c)より、 $x = 2.1$ m 以浅で $C = 2.0 \text{ kg/m}^3$ の高濃度の浮遊砂が $z = 0.06$ m 程度まで巻き上がっていることが確認でき、同図(d)に示す水理実験結果との相関が認められる。ただし、 $x = 2.1$ m 以深では底面付近の浮遊砂濃度を過大評価する傾向も確認できる。これは、式(5)から求めた底質の巻き上げを底面直上の計算格子に入れ、その格子を境界条件に浮遊砂の計算を行っていることから、底面付近で C を過大評価したと考えられる。

図-6 に砕波時の浮遊砂濃度分布 C の計算結果を示す。同図より、岸向きの底面流速が卓越する波峰の通過時に浮遊砂が巻き上げられる様子が確認できる。そして、造波開始 27.8 秒後には巻き波砕波が $x = 2.0$ m 付近に突っ込んでおり、図-5(d)の水理実験結果で P.P.と書かれた位置との一致が認められる。その後、浮遊砂が突っ込み点近傍で上方に一気に巻き上げられ、最終的にその巻き上げられた浮遊砂が岸側に流される様子が確認できる。

以上より、水理実験結果との比較を通じて砕波帯における浮遊砂計算の再現性が確認できた。

(3) 浮遊砂濃度分布と渦構造

図-7 に砕波直後の浮遊砂濃度 C と渦度の x 軸方向成分 ω_x の分布を示す。ここで、 ω_x は x 軸正方向から見て反時計回りを正とし、 $y = -0.24, 0.24$ m 断面の図で太線は気液界面を、細線は C を、濃淡は ω_x を表す。同図(a)より、 ω_x の増加または減少で表される渦が認められる位置 ($x = 1.68$ m, $z = 0.10$ m) の若干上側から $C = 0.2 \text{ kg/m}^3$ の浮遊砂が岸側に運ばれ始め、その後それと同符号の ω_x を有する渦

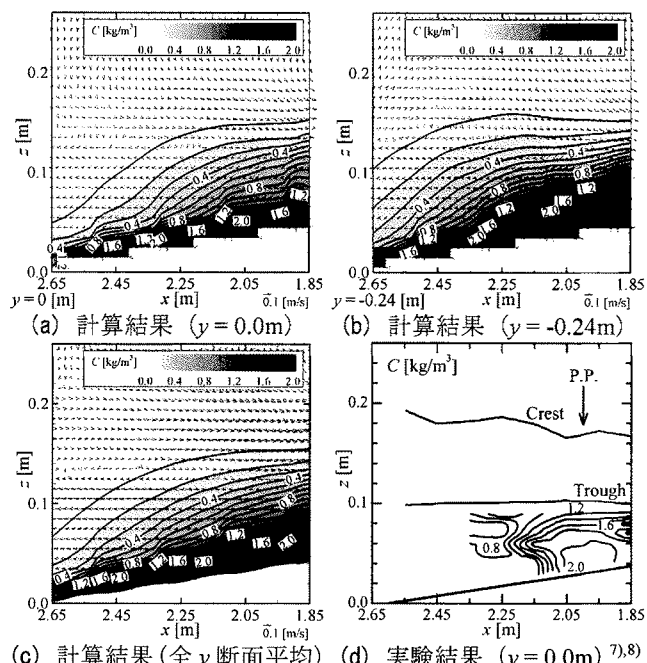


図-5 砕波帯での時間平均浮遊砂濃度 C の比較

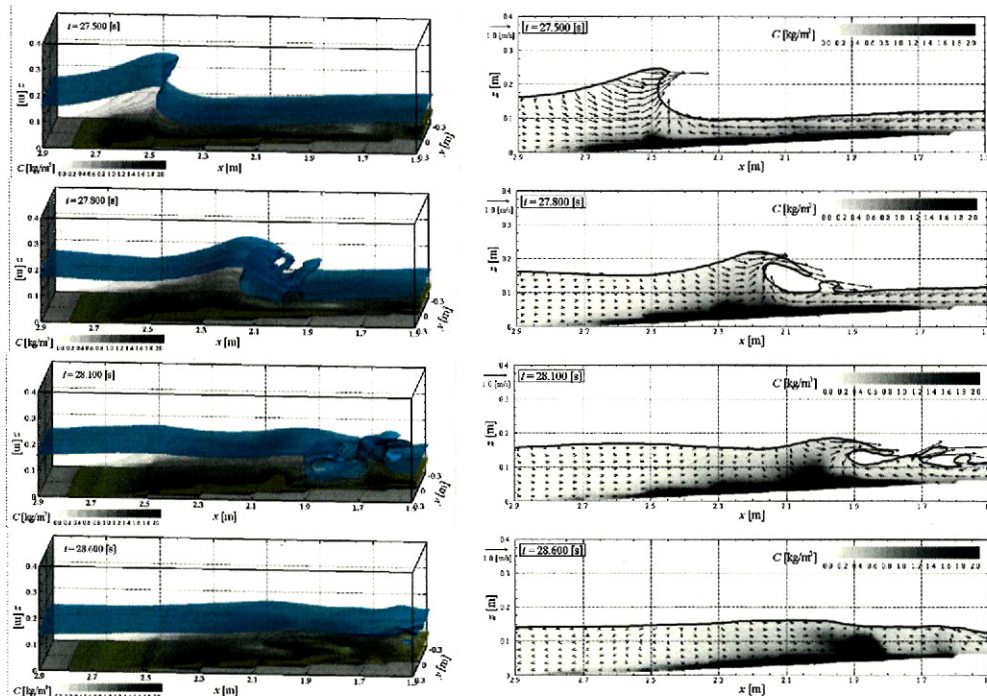


図-6 碎波状況と浮遊砂濃度分布 C (左図：全 y 断面；右図： $y=0.0\text{m}$ 断面)

の移動とともに浮遊砂が岸側へ運ばれる様子 (図-7(b), (c)) が確認できる。そして、渦がさらに岸側に移動するのと同時に、 $C = 0.2\text{kg/m}^3$ の浮遊砂が沖側と岸側で切り離される様子が図-7(d) より確認できる。また、以上の現象は奥行き方向に一様ではないことも全 y 断面を示した図-7 上図から判断できる。以上、浮遊砂の輸送に与える三次元的な渦構造の影響を明らかにするとともに、浮遊砂計算を組み込んだ本モデルの有用性を検証できた。

5. 結論

浮遊砂の移流拡散現象を解析できる三次元流体・地形変化連成数値計算モデルの開発を行い、定常流と碎波による浮遊砂濃度分布に関する水理実験を対象に再現計算を行った。その結果、本モデルに組み込んだ浮遊砂計算の再現性を明らかにするとともに、浮遊砂に与える渦構造の影響を示すことで本モデルの有用性を確認した。ただし、碎波による浮遊砂濃度分布を沖側の底面付近で過大評価する傾向が認められたことから、本モデルに組み込んだ浮遊砂計算の改良をさらに進める計画である。

参考文献

- 1) 中村友昭, Solomon C. Yim : 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, 2009.
- 2) 中村友昭, 水谷法美, 篠田陽介, 小山裕文 : 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, 2009.
- 3) Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J.:

Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401, 2005.

- 4) 神山 勉, 伊藤 裕, 小林正典, 板井雅之, 小林英次 : 傾斜堤を透過する浮遊砂の濃度評価への数値計算モデルの適用, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 456-460, 2004.
- 5) 中山哲殿, 牧野弘幸, 新井雅之, 小林 学, 佐藤勝弘 : 導入水に含まれる浮遊砂量を低減するための海水導入工の構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 661-615, 2007.
- 6) 鈴木崇之, 岡安章夫, 柴山知也 : 碎波による時空間的浮遊砂濃度変動の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 381-385, 2004.
- 7) 佐藤慎司, 本間基一, 柴山知也 : 碎波による底質の巻き上げ量の評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 279-283, 1989.
- 8) Sato, S., Homma, K., and Shibayama, T.: Laboratory study on sand suspension due to breaking waves, *Coastal Eng. Japan*, JSCE, Vol. 33, No. 2, pp. 219-231, 1990.
- 9) Van Rijn, L. C.: The development of concentration profiles in a steady, uniform flow without initial sediment load, *LAHR Workshop on Particle Motion and Sediment Transport*, Rapperswil, Switzerland, pp. 1-7, 1981.
- 10) Van Rijn, L. C.: Mathematical modeling of suspended sediment in nonuniform flows, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 6, pp. 433-455, 1986.
- 11) Salvetti, M. V. and Banerjee, S.: A priori tests of a new dynamic subgrid-scale model for finite difference large-eddy simulations, *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 11, pp. 2831-2847, 1995.
- 12) 功刀資彰 : 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, 1997.
- 13) Yamamoto, S. and Daiguji, H.: Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier-Stokes equations, *Computers Fluids*, Vol. 22, No. 2-3, pp. 259-270, 1993.
- 14) 中村友昭, 水谷法美, 藤間功司 : 遡上津波の変形と

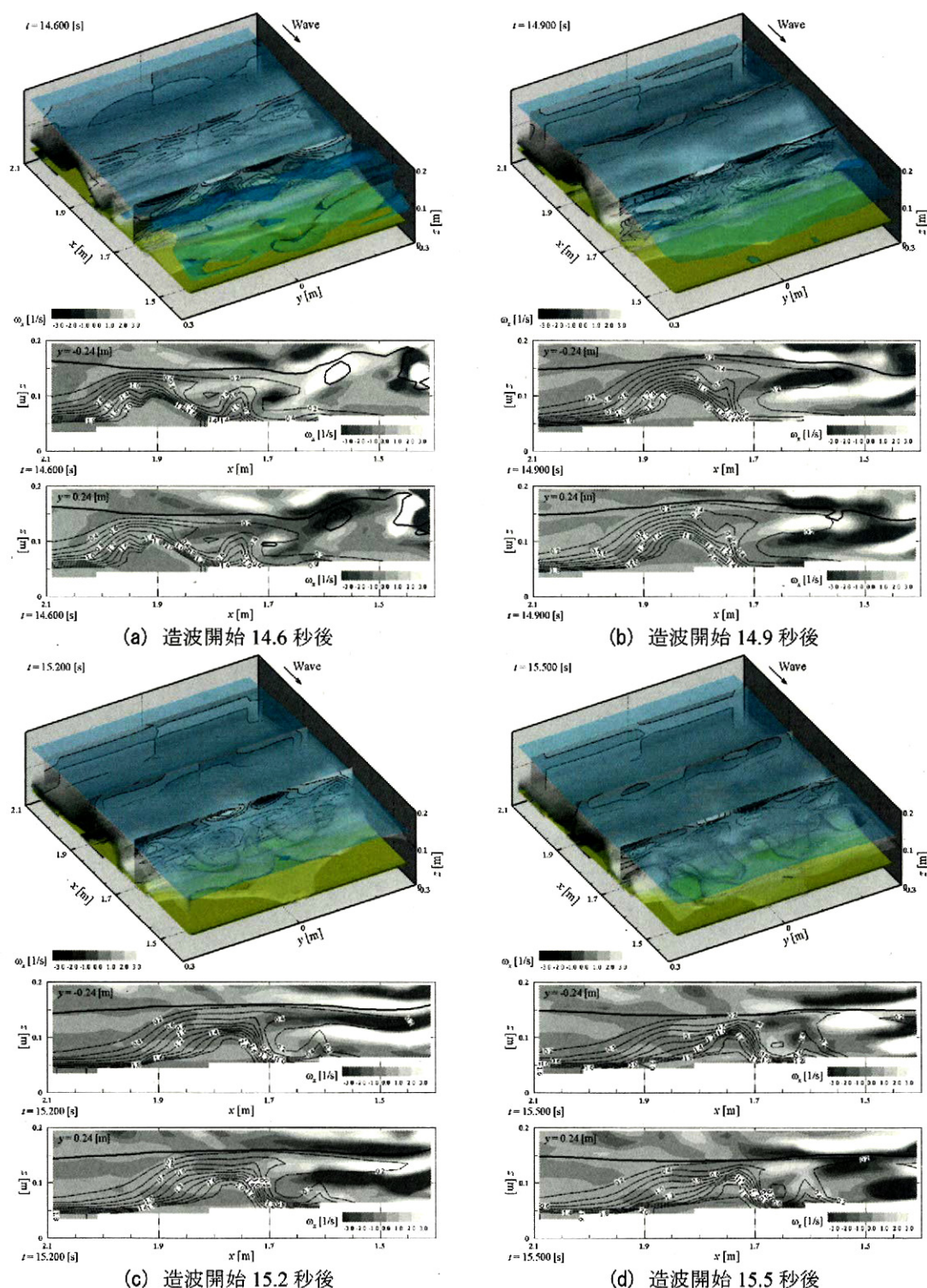


図-7 碎波時の浮遊砂濃度 C と渦度の x 軸方向成分 ω_x の分布 (上図: 全 y 断面 (手前が岸) ; 中図: $y = -0.24$ m 断面; 下図: $y = 0.24$ m 断面; ω_x : x 軸正方向から見て反時計回りを正)

陸上構造物に作用する津波力に関する 3 次元数値シミュレーション, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, G7-3, 7 p., 2009.

- 15) Nielsen, P., Svendsen, I. A., and Staub, C.: Onshore-offshore sediment movement on a beach, *Proc., Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp. 1475–1492, 1978.
- 16) Nielsen, P.: *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, Advanced Series on Ocean Eng. Vol. 4, World Scientific, Singapore, 340 p., 1992.
- 17) Zhao, M. and Cheng, L.: Numerical modeling of local scour below a piggyback pipeline in currents, *J. Hydraulic*

Eng., ASCE, Vol. 134, No. 10, pp. 1452–1463, 2008.

- 18) Zedler, E. A. and Street, R. L.: Sediment transport over ripples in oscillatory flow, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 180–2193, 2006.
- 19) Liang, D., Cheng, L., and Li, F.: Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part II. Scour simulation, *Coastal Eng.*, Vol. 52, pp. 43–62, 2005.
- 20) Nielsen, P.: *Coastal and Estuarine Processes*, Advanced Series on Ocean Eng. Vol. 29, World Scientific, Singapore, 360 p., 2009.
- 21) Van Rijn, L. C.: Sediment pick-up function, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 1494–1502, 1984.