

京都大学大学院工学研究科 学生員 鶴田 修己
 京都大学大学院工学研究科 正会員 原田 英治
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

シートフロー漂砂は短時間に動的分級が生じることが知られており、海浜粒度分布に大きな変化を与える。このような非平衡状態の固液混相流動機構を数値流砂水理学的観点から検討するため、本研究では、原田ら¹⁾の手法に固相・液相相互作用力を考慮した3次元固液混相乱流モデルを構築し、混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の数値シミュレーションを実施した。また、既往の実験結果と比較し、シミュレーション結果の妥当性を示した後に、混合粒径シートフロー漂砂の流動機構について砂粒子スケールよりも細かい空間スケールに対する流れ場の観点から検討する。

2. 数値シミュレーション手法

2.1 基礎方程式

基礎方程式はグリッドスケール(GS)で平滑した非圧縮性流体に対する連続式および Navier-stokes 式である。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = & - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} \\ & + (\bar{p} - \rho)g \delta_{i2} + \rho U \Omega \cos(\Omega t) \delta_{i1} + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 x_i ：カーテシアン座標系 ($i=1,2,3$)、 u_i ：流速の*i*成分、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 ρ ：水の密度、 σ_{ij} ：粘性応力、 τ_{ij}^{SGS} ：サブグリッドスケール (SGS) 応力、 g ：重力加速度、 δ_j ：クロネッカーのデルタ、 U ：流速振幅、 Ω ：角周波数、 F_i ：固相・液相間相互作用力である。上付添字-は計算格子に代表される物理量を、上付添字~は、

$$\overline{\rho f(x_i, t)} = \bar{\rho} \tilde{f}(x_i, t) = \int_D \rho f(x_i, t) G(x_i - x') dx' \quad (3)$$

で定義される密度加重平均量を表す。ここに、 f ：変

数、 G ：フィルター関数である。また、流体密度は

$$\bar{\rho} = \rho(1 - \tilde{\phi}) + \rho_p \tilde{\phi} \quad (4)$$

より計算される。ここに、 ϕ ：各計算セルにおける粒子占有率、 ρ_p ：粒子の密度である。

2.2 数値解法

基礎方程式は部分段階法を用いて解く。なお、SGS 応力の算出には Smagorinsky モデルを用いた。粒子の並進および回転運動は粒子を含む計算セルにおける流体力を積分し、計算する。

$$m_p \alpha_i = \rho_p \sum \tilde{\phi} \Delta^3 \left(\frac{D \tilde{u}_i}{Dt} - \frac{F_i}{\rho} \right) + F_{pint_i} \quad (5)$$

$$I \omega_i = \rho_p \sum \tilde{\phi} \Delta^3 \varepsilon_{ijk} r_j \left(\frac{D \tilde{u}_k}{Dt} - \frac{F_k}{\rho} \right) + T_{pint_i} \quad (6)$$

ここに、 α_i ：粒子の加速度の*i*成分、 m_p ：粒子質量、 F_{pint_i} ：粒子間接触力の*i*成分、 I ：慣性モーメント、 ω_i ：粒子の角加速度の*i*成分、 ε_{ijk} ：エディントンイプシロン、 r_j ：粒子の重心座標に対する相対位置ベクトルの*j*成分、 T_{pint_i} ：粒子間接触力によるトルクの*i*成分である。粒子間接触力の計算には個別要素法を用いるが、流体計算の計算時間1ステップに対してこれと同等の時間進行となるよう複数回の陽解計算を実施する。(5)式および(6)式を数値積分することで新しく得られる粒子の重心における位置ベクトル x_{pi} 、速度ベクトル u_{pi} 、角速度ベクトル ω_{pi} を用いて(4)式から、流体の密度分布を $\bar{\rho}^{n+1}$ に更新し、

$$\tilde{u}_{i(p)}^{n+1} = \tilde{u}_i^{n+1} (1 - \tilde{\phi}) + (u_{pi} + \varepsilon_{ijk} \omega_j r_k) \tilde{\phi} \quad (7)$$

から更新流速を得る。(7)式より粒子を含む計算セルでは、流速が強制的に変えられるため、固相・液相間の相互作用力として

$$F_i^{n+1} = \left(\bar{\rho}^{n+1} \tilde{u}_{i(p)}^{n+1} - \bar{\rho}^n \tilde{u}_i^{n+1} \right) / \Delta t \quad (8)$$

を次ステップの計算に与える。

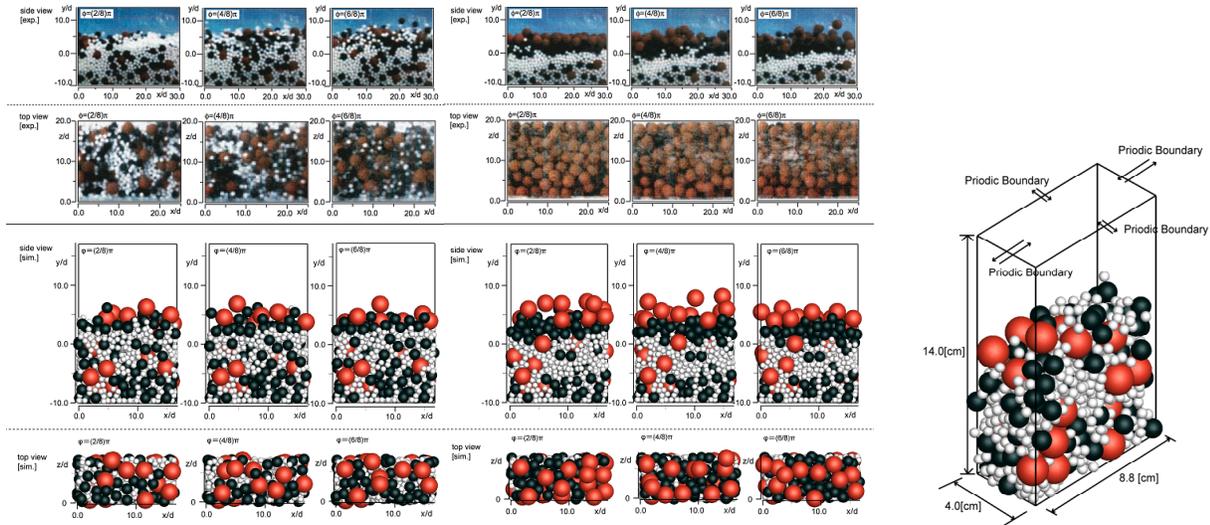


図-1 鉛直分級過程のスナップショットおよび計算領域

3. 鉛直分級過程のシミュレーション

原田ら²⁾の水理実験を参考に、比重 $\sigma=1.318$ 、3 粒径混合粒子 ($d_1=0.5\text{cm}$, $d_2=1.0\text{cm}$, $d_3=1.5\text{cm}$) 計 900 個 ($d_1:770$ 個, $d_2:103$ 個, $d_3:27$ 個) を用いて形成した 3 粒径混合状態の数値移動床に平均粒径に対するシールズ数 $\phi=0.27$ となる振動流 (振動周期 $T=5.0\text{s}$) を作用し、鉛直分級過程を追跡した。図-1 に、計算領域と分級の発達過程および完全発達過程における実験のビデオ画像と数値シミュレーションの瞬間像を、図-2 に、粒径別濃度重心分布を示す。概ね実験と類似した分級の完全発達状態が再現されている。図-3 には、粗視化された Navier-Stokes 式に与えられる付加応力項 τ_{ij} の分布図を示す。全位相で付加応力項 τ_{ij} は正負入り乱れた構造を取っている。

4. おわりに

改良した 3 次元固液混相乱流モデルを用いてシートフロー漂砂の鉛直分級過程を対象とした数値シミュレーションを実施し、実験との比較からモデルの再現性を検討した。また、シートフロー層の内部機構についても検討した。今後、計算領域を拡張し、実験とのより詳細な比較・検討を実施したい。

参考文献

1) 原田英治, 後藤仁志, 鶴田修己: 3次元固液混相乱流モデルによるシートフロー漂砂の鉛直分級過程の解析, 土木学会論文集B2 Vol.66, No.1, pp.411-415, 2010.

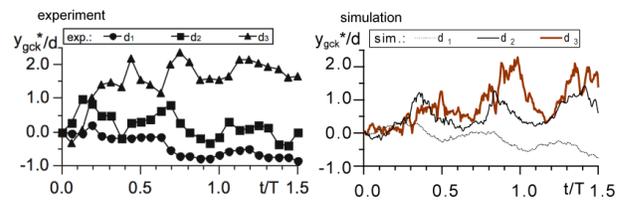


図-2 粒径別濃度重心分布の時系列 (Exp. vs Sim.)

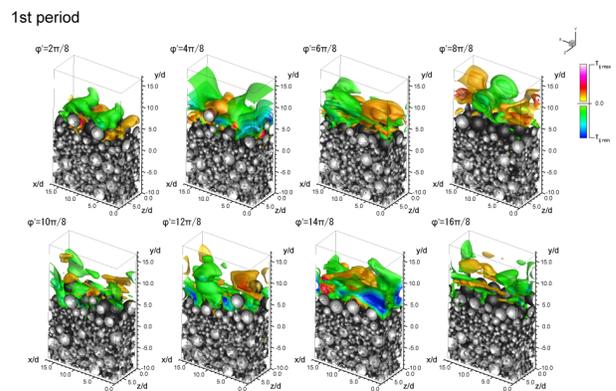


図-3 付加応力項分布図 (分級発達過程)

2) 原田英治, 後藤仁志: 三次元数値移動床による混合粒径シートフロー漂砂の分級過程の解析, 土木学会論文集B, Vol.62 No.1, pp.128-138, 2006.