

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 学生員 鶴田 修己  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

砕波帯では、混合粒径底質の分級が海浜変形過程に与える影響の大きい現象が存在し、混合粒径砂で構成された移動床の流動機構を粒子スケールで記述できるモデルが有用である。本研究では、混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程を対象に、CIP-CUP法をベースとした混相乱流場の数値解析手法と、個別要素法によるブロック挙動の追跡をカップリングしたモデル<sup>1)</sup>を3次元に拡張した数値シミュレーションを実施し、数値移動床における再現性を検討した。

2. 混相乱流モデルの概要

(1) 粒子 - 流体混合系流れ

まず、CIP-CUP法を用いて、混相流場を求解する。基礎式は、粗視化された連続式および Navier-Stokes 式によって記述される。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \{2(\mathbf{v} + \mathbf{v}_i)\mathbf{S}\} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \phi_p \rho_p + (1 - \phi_p) \rho_l \\ \mu &= \phi_p \mu_p + (1 - \phi_p) \mu_l \\ \mathbf{u} &= \phi_p \mathbf{u}_p + (1 - \phi_p) \mathbf{u}_l \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{u}$  : 流速ベクトル,  $\rho$  : 密度,  $p$  : 圧力,  $\mathbf{g}$  : 重力加速度,  $\mu$  : 粘性係数,  $\mathbf{v}_i$  : SGS 乱流粘性係数,  $\mathbf{S}$  : 歪み速度テンソル,  $\phi$  : 各計算格子に含まれる各相の占有率であり、式中の下付添え字  $p, l$  はそれぞれ固体粒子及び流体を示す。なお、本研究では  $C_s=0.1$  としているが、ここでは LES を導入することで乱流現象を取り扱うことが可能な枠組みを示すことを第一の目的とし、Smagorinsky 定数  $C_s$  の値の妥当性

については今後の研究課題とする。

(2) 個別要素法

(1)で求めた混相流場から粒子に作用する流体力を計算し、個別要素法によって固体粒子運動を算定する。

$$\frac{dm_p \mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_{flow} + \mathbf{F}_{p\text{int}} + \mathbf{F}_g \quad (5)$$

$$\frac{d(I_p \cdot \boldsymbol{\omega}_p)}{dt} = \mathbf{T}_{flow} + \mathbf{T}_{p\text{int}} \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_p = \phi_p \Delta^2 \rho_p \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{flow} = \int_{V_p} \mathbf{f}_p dV \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_{flow} = \int_{V_p} \mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_p dV \quad (9)$$

ここに、 $m_p$  : 個々の要素質量,  $\mathbf{v}_p$  : 要素移動速度ベクトル,  $t$  : 時間,  $\mathbf{f}_p$  : 計算格子中の要素に作用する流体力,  $\mathbf{F}_{flow}$  : 要素に作用する流体力,  $\mathbf{F}_{pint}$  : 要素間相互作用力ベクトル,  $\mathbf{F}_g$  : 体積力,  $I_p$  : 慣性テンソル,  $\boldsymbol{\omega}_p$  : 要素の角速度ベクトル,  $\mathbf{T}_{flow}$  : 流体力に起因するトルク,  $\mathbf{T}_{pint}$  : 要素間力に起因するトルク,  $V_p$  : 混相領域,  $\mathbf{r}_c$  : 要素の回転中心から要素を含む計算格子への相対距離である。 $\mathbf{F}_{pint}$ の力学的モデルは、Voigt 物体(スプリングとダッシュポットの並列連結)をベースに構成されており、粒子間衝突の粘弾性挙動が表現される。なお、その際計算に必要となるスプリングおよびダッ

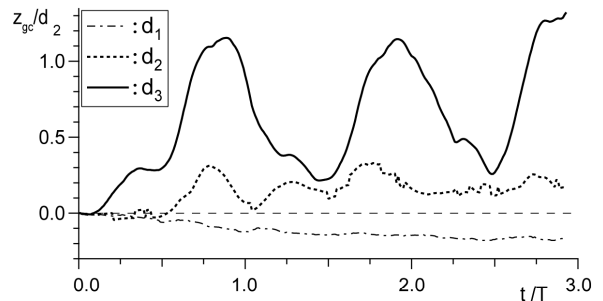


図-1 粒径別濃度重心  $z_{gc}$  の時系列

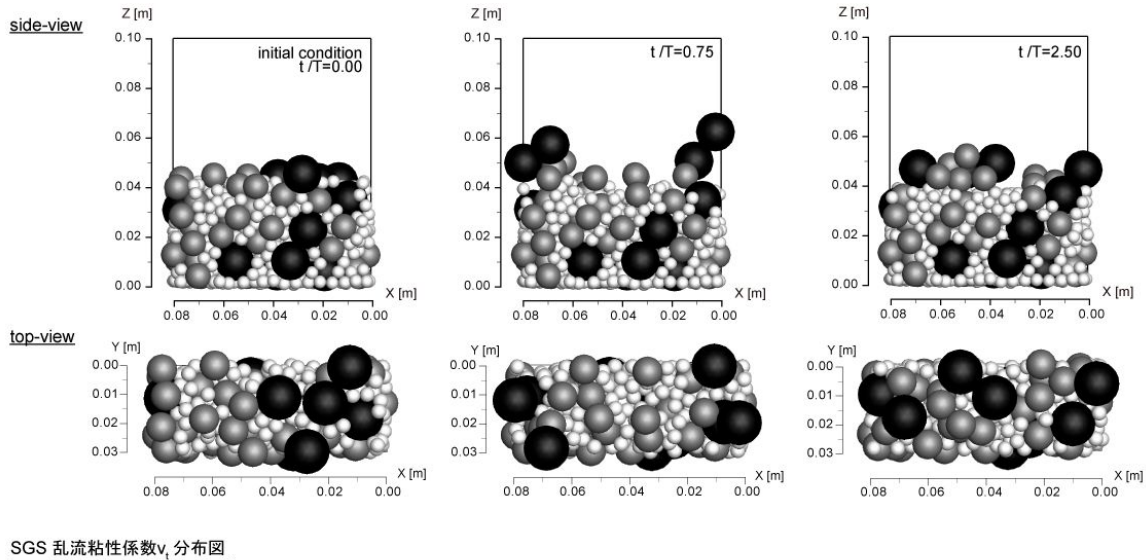


図-2 鉛直分級過程のスナップショットおよび  $\nu_t$  の分布

シュポットに関するモデル係数は、ヘルツの弾性接触理論を準用して設定した。個別要素法の安定した計算には計算時間刻みを小さくする必要があり、固液混合系流れの計算刻み1ステップに対して、複数回数の個別要素法計算のループを実施することになる。この過程で、流体力  $f_p$  は計算効率に考慮して一定値を与えている。上記計算後は、新しく移動した要素の位置および速度ベクトルに応じて、各計算格子での要素占有率と要素を含む計算格子における流れ場を、次式の

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_c \quad (10)$$

によって修正し、次ステップに進む。

### 3. 鉛直分級過程のシミュレーション

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 443 個 ( $d_1:382$  個,  $d_2:47$  個,  $d_3:14$  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  $\phi=0.7$  となる振動流 (振動周期  $T=1.0\text{s}$ ) を作用し、鉛直分級過程を追跡した。図-1 に数値移動床表層 ( $z/d_2>3.0$ ) に存在する各

粒径階の鉛直方向の濃度重心  $z_{gc}$  の時系列を示す。特に最小粒子の濃度重心の減少から、鉛直分級過程の発達を理解される。また、図-2 に代表的なスナップショットおよび SGS 乱流粘性係数  $\nu_t$  の分布を併示する。初期の粒子配列と比較して、2.5 周期後の数値移動床表層には、大・中粒子の高い占有状況が示されており、明瞭に鉛直分級の発達が確認できる。 $\nu_t$  の分布からはこの種の数値シミュレーションの枠組みがシートフロー層の内部構造の理解に有効であることがうかがえる。

### 4. おわりに

開発した 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た。今後、実験との比較からモデルの再現性を詳細に検討したい。

### 参考文献

- 1) 原田英治, 後藤仁志, 鶴田修己: 固液混相流モデルの捨石群の沈降・堆積過程計算への適用例, 土木学会論文集B, Vol.66, No.1 pp.25-34,2010.