

京都大学工学部 正 員 中川博次 京都大学工学部 正 員 後藤 志
鹿 島 建 設 正 員 渡辺 幹広 京都大学大学院 学生員 井上裕介

1. はじめに

粒子間衝突および河床面との不規則衝突を繰り返す粒子群の流動メカニズムの解明は、掃流層の流動機構の理解に不可欠であるが、高濃度の粒子流における個々の粒子の運動、特に粒子間衝突の実験的把握は、現在の計測技術をもってしても容易なことではなく、実験に代わる新たなアプローチが必要である。著者ら¹⁾は、このような観点から、個々の粒子運動の不規則性を辻本・中川²⁾の不規則継続跳躍モデルで表現し、粒子間衝突をCampbell³⁾型の粒状体モデルで記述した多数粒子同時追跡型のシミュレーションモデルを構築し、掃流層内の力学特性の包括的推定を試みたが、河床面極近傍での粒子挙動の表現には不完全な点が残されていた。ここでは、河床の粒子配列モデルを厳密化して、計算精度の向上を試みるものである。

2. シミュレーションモデルの構成

2.1 粒子系のモデル：saltation粒子の運動方程式は、

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_x}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_3 d^3 \sqrt{(U - u_x)^2 + (V - v_x)^2} (U - u_x) \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_3 d^3 \sqrt{(U - u_x)^2 + (V - v_x)^2} (V - v_x) - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g A_3 d^3 ; C_D = C_{Dw} + \frac{24}{R_s} \quad (2)$$

で与えられる。ここに、 u_x, v_x ：砂粒子の水平・鉛直方向の速度成分、 U, V ：平均流速水平・鉛直方向成分、 C_M ：付加質量係数(=0.5)、 d ：粒径、 σ ：砂の密度、 A_2, A_3 ：砂粒子の2次元、3次元の形状係数(=4, $\pi/6$)、 C_D ：抗力係数($C_{Dw}=0.4$)である。

2.2 粒子間干渉のモデル：均一粒径 d の2つの粒子（中心の座標 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) ）間の衝突の発生は、

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < d \quad (3)$$

によって、砂粒子の位置の更新が行われるたびに判定され、式(3)の条件が満足されたときには以下の様に衝突の影響が評価される。衝突時の砂粒子の速度などの特性量は、粒子の軌跡を直線近似した後、内分比 r_c を用いた線形補間により計算され(図-1参照)、衝突前後の砂粒子の速度の関係は、砂粒子の衝突時の共通接平面(反発面)の傾斜角を ϕ とし、反発面の垂直、水平方向に関して運動量保存則と反発の法則を適用すると、

$$\begin{bmatrix} u_1^{out} \\ v_1^{out} \\ u_2^{out} \\ v_2^{out} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \xi_1 & \lambda & \xi_2 & -\lambda \\ \lambda & \xi_1 & -\lambda & \xi_4 \\ \xi_2 & -\lambda & \xi_1 & \lambda \\ -\lambda & \xi_4 & \lambda & \xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{in} \\ v_1^{in} \\ u_2^{in} \\ v_2^{in} \end{bmatrix} ; \begin{aligned} \xi_1 &= (1 + e_r) \cos^2 \phi + (1 - f_r) \sin^2 \phi \\ \xi_2 &= (1 - e_r) \cos^2 \phi + (1 + f_r) \sin^2 \phi \\ \xi_3 &= (1 + e_r) \sin^2 \phi + (1 - f_r) \cos^2 \phi \\ \xi_4 &= (1 - e_r) \sin^2 \phi + (1 + f_r) \cos^2 \phi \\ \lambda &= (e_r + f_r) \cos \phi \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 e_r, f_r ：砂粒子間の反発数であり、添字in,outは衝突前、後を示している。具体的な計算の流れを図-2に、計算条件を表-1に示す。

2.3 逐次決定型河床モデルの改良：後藤ら¹⁾のシミュレーションでは従来型の逐次決定型の河床モデルが用いられたが、このモデルではsaltation粒子が平均河床面以下に落下するたびに乱数発生により衝突される河床構成粒子の位置が決定されるため、多数の粒子が同時に運動する場合には図-3に示すような実際にはあり得ない河床粒子の配列が生じる可能性がある。本研究ではこの点を改善するため、河床構成粒子の配列を

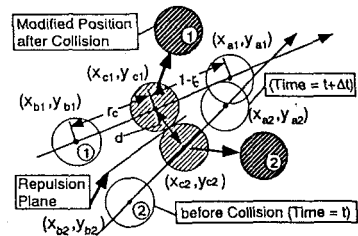


図-1 粒子間衝突

一括設定することとした。図4は砂粒子の鉛直方向存在確率密度について逐次設定型と一括設定型とを比較したものであるが、実験値の示す底面付近での存在確率の急減は、一括設定型を用いることにより良好に説明されている。

3. 結果と考察

図5は砂粒子の鉛直方向存在確率密度、図6は砂粒子の移動速度の水平成分について、単一粒子追跡型（単一型）と複数粒子同時追跡型（複数型）のシミュレーション結果を実験値とともにプロットしたものである。図-5を見ると、単一型では見られなかった上層部の膨らみが複数型では見られる。これは、掃流層の中間部で生じた粒子間衝突で上向きの運動量を獲得した粒子が高くはね上げられたことによるものである。また、図-6を見ると、単一型ではうまく表現できなかった底層部での速度欠損が複数型ではかなり顕著に表れている。これも粒子間衝突による運動量の損失によるものと考えられる。なお、本シミュレーションは流速分布に清水流を仮定し、粒子と流体の干渉効果は考慮していないので、移動速度の絶対値がやや過大に見積もられているが、流体系との干渉を考慮すればさらに解が改善されるものと期待される。

4. おわりに

本研究では、粒子間干渉のみに着目して、複数粒子を同時に追跡するシミュレーションを実施し、単一粒子のみの追跡では表現できなかった集合流動に特有の統計特性が表現できることを示した。今後は、粒子・流体間の干渉も取り入れた掃流層の内部構造の把握を目指したい。

参考文献

- 1) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：粒状体モデルによる掃流粒子群の挙動に関する数値解析, 水工学論文集, 1992 (印刷中)。
- 2) 辻本哲郎・中川博次：掃流粒子のSaltationの確率過程論的解析, 土木学会論文集, 第345号, pp.83-90, 1984.
- 3) Campbell C.S.: Shear flow of granular materials, Ph.D.Thesis, California Institute of Technology, 282p., 1982.

表-1 計算条件/実験条件

τ_*	l_0	$h(\text{cm})$	$U_m(\text{cm/s})$	$U_* (\text{cm/s})$	$\Delta t(\text{s})$	$T(\text{s})$
0.23	0.02	8.29	144.75	13.64	0.002	5.0

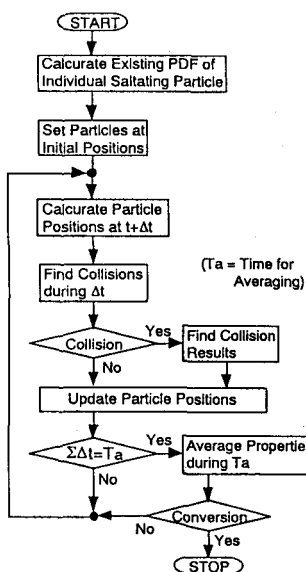


図-2 計算の流れ

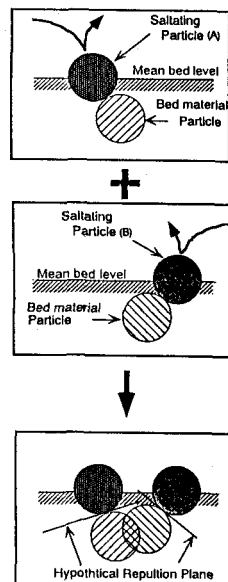


図-3 逐次決定型の問題点

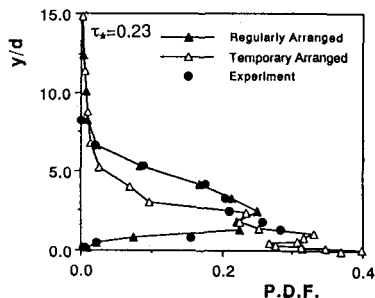


図-4 逐次決定型と一括設定型の比較

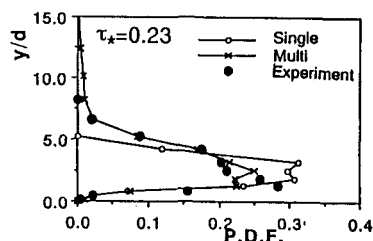


図-5 砂粒子の鉛直方向存在確率密度

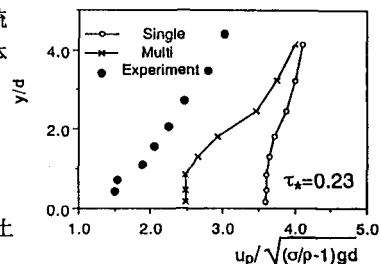


図-6 砂粒子の移動速度の水平成分