

II-242

掃流砂の流動過程における粒子間衝突の役割

京都大学工学部 正 員 後藤仁志

金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎

京都大学工学部 正 員 中川博次

1.はじめに 掃流砂は、粒子間衝突および河床面との不規則衝突を繰り返しながら河床面付近の掃流層内を流送される。特に高濃度の粒子流においては、粒子間衝突が支配的であるが、そ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い。著者ら¹⁾は、このような状況に鑑み、粒子間衝突のメカニズム解明の手段として、辻本・中川²⁾の不規則継続跳躍モデルとCampbell³⁾型の粒状体モデルを融合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、掃流層内の砂粒子の運動特性の推定を試みたが、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改良して、計算精度の向上を図り、シミュレーションを通じて掃流層中での粒子間衝突の役割について考察する。

2.シミュレーションモデルの概要 saltation粒子の運動方程式は、

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 |U - u_p| (U - u_p) - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g A_3 d^3 \quad (1)$$

$$C_D = C_{D\infty} + \frac{24}{Re} \quad ; \quad Re = \frac{|U - u_p| d}{\nu} \quad (2)$$

で与えられる。ここに、 u_p ：砂粒子の速度ベクトル、 U ：平均流速ベクトル、 C_M ：付加質量係数(=0.5)、 d ：粒径、 σ ：砂の密度、 ρ ：水の密度、 A_2, A_3 ：砂粒子の2次元、3次元の形状係数(=π/4, π/6)、 g ：重力加速度ベクトル、 C_D ：抗力係数($C_{D\infty}=0.4$)である。

均一粒径 d の2つの粒子（中心の座標 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ ）が、

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

を満足したとき、 Δt 時間内の粒子の軌跡を直線近似して衝突位置

を表す内分比 r_c を求め、衝突時の砂粒子の速度を線形補間により計算する(図-1参照)。衝突前後の砂粒子速度の関係は、砂粒子の衝突時の共通接平面（反発面）の傾斜角 ϕ を求めて、反発面の法線、接線方向に関して運動量保存則と反発の法則を適用すると、

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

で与えられる。ここに、 e_p, f_p ：砂粒子間の反発定数であり、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に示す。なお、本シミュレーションでは流速分布に清水流を仮定し、流体・粒子間の干渉は考慮していないこととする。

3.河床モデルの改良 著者ら¹⁾のシミュレーションでは、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を決定する手法（逐次決定型の河床モデル²⁾）が用いられたが、この方法では多数の粒子が同時に運動する場合に、図-3に示すような実際にはあり得ない河床

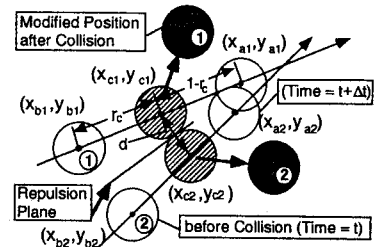


図-1 粒子間衝突

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、河床構成粒子をシミュレーション開始以前に一括して設定する方法を採った。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の計算結果をガラスビーズ($d=0.5\text{cm}$, $\sigma/\rho=2.60$)を用いた開水路での実験と比較したものである。計算条件・実験条件を表-1に示す。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、分布が $y/d=5.0$ 付近までに限定されるのに対して、複数型では上層部まで広がり、実験結果と良好に一致している。これは、上層部を運動する粒子が掃流層の中間部で生じた粒子間衝突により上向きの運動量を獲得し、高く跳ね上げられたことを示しているものと考えられる。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粒子速度の欠損が複数型ではかなり顕著に表れており、粒子間衝突の果たす役割の重要性が示されている。

4. おわりに 複数の粒子を同時に追跡できる本研究のシミュレーションは、単一粒子追跡型のシミュレーションでは表現できなかった集合流動に固有の特性を良好にするものであり、粒子間衝突が掃流層内の運動量輸送に果たす役割の重要性の一端を示すものである。なお、シミュレーションコードの作成にあたって、京都大学大学院・渡辺幹広氏（現、鹿島建設）の協力を得たことを記して、謝意を表する。

参考文献：1)後藤・辻本・中川：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，水工学論文集第37巻，pp.611-616，1992。2)辻本・中川：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：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

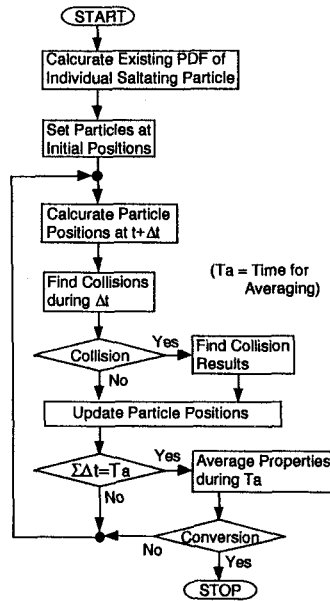


図-2 計算の流れ

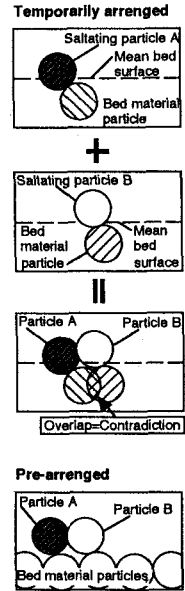


図-3 河床モデル

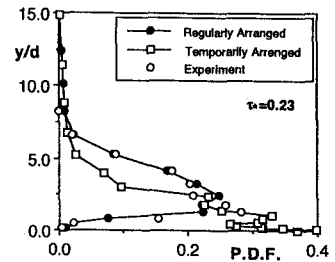


図-4 逐次決定型と一括設定型

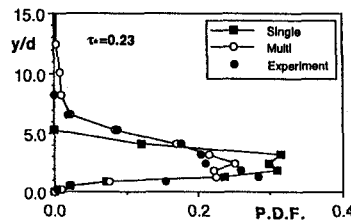


図-5 砂粒子の鉛直方向分布

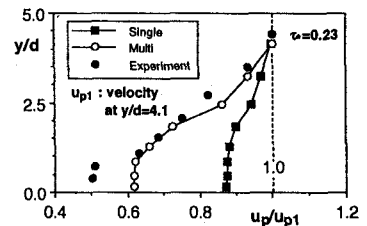


図-6 砂粒子の移動速度