

II-57 流れ系と粒子系の相互作用を考慮したSaltation層の数値シミュレーション

京都大学工学部 正 員 後藤仁志
 京都大学工学部 正 員 中川博次
 金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎
 京都大学大学院 学生員 井上裕介

1. はじめに 掃流過程の力学機構を理解するには、砂粒子の停止事象の理解が基本となるが、定常等流下における砂粒子の停止を説明するには、確率論の導入が必要不可欠である。一般に、確率論は特性量の分布を考慮するため決定論に比べて煩雑となるので、確率的構造を支配する要因以外はできるだけ簡単に扱うことが肝要である。このような理由で、従来型の確率モデルは、粒子系の確率論的構造に焦点を絞り、流れ系をできる限り簡素化して扱うために清水流近似を適用してきた。しかし、高濃度掃流層を扱う際には粒子混入の影響による流れ場の構造変化が無視できず、清水流近似が適用できない。本研究ではこの点に鑑み、不規則継続跳躍 (successive saltation) による掃流砂の確率論的シミュレーション¹⁾とk-ε乱流モデルによる流れ場の数値シミュレーションの融合によって、流れ場の構造変化を考慮した掃流砂のシミュレーションを実施し、清水流近似の適用性について検討を進める。

表-1 輸送方程式の各項の内容

ϕ	Γ	S_ϕ
U	$v + v_i$	$S_U = g(\sin\theta - \frac{\partial h}{\partial x} \cos\theta) - \frac{\partial}{\partial x}(\frac{P}{\rho}) + \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial V}{\partial x}) + S_{PU}$
V	$v + v_i$	$S_V = -\frac{\partial}{\partial y}(\frac{P}{\rho}) + \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial V}{\partial y}) + S_{PV}$
k	$v + \frac{v_i}{\sigma_k}$	$S_k = G - \epsilon$
ε	$v + \frac{v_i}{\sigma_\epsilon}$	$S_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon}G - C_{2\epsilon}\epsilon)$

2. シミュレーションの概要 流れ系は、①k-ε乱流モデルによる流れ場の数値シミュレーション（式(1)および表-1参照）により模擬され、粒子系は、②底面との不規則衝突事象を2次元反発モデル¹⁾により考慮したsuccessive saltationとして表現される。両者の相互作用については、①→②が、②の砂粒子の運動方程式中の流速を①の解で与えることにより考慮され、②→①については、①の運動量式に粒子混入による運動量欠損を表す負の生成項（式(2)参照）を導入することにより考慮される。なお、計算の流れを図-1に示す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(V\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S_\phi \quad (1)$$

$$S_{UPj} = -\frac{\sigma}{\rho} q_b \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} w_j (u_{pouti} - u_{pini})_j \frac{1}{Vol_j} \quad (2)$$

3. 結果と考察 本モデルの有効性を検証するため、④清水流近似を仮定し、①→②の作用のみ考慮した従来型のシミュレーション（以下、「清水流型」と呼ぶ）と⑥本シミュレーション（以下、「混相流型」と呼ぶ）の2種を実施して、ガラス・ビーズ（粒径d=0.5cm, 比重2.60）を用いた開水路における掃流層の実験結果と比

$$G = v_i [2\{(\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial y})^2\} + (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x})^2] \quad ; \quad v_i = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30$$

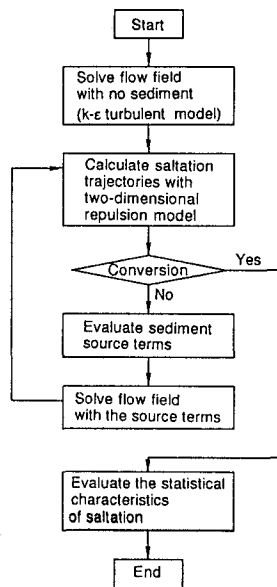


図-1 計算の流れ

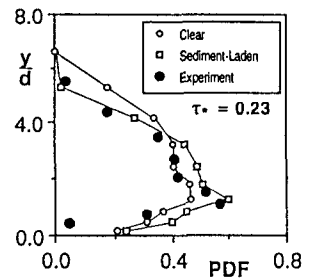


図-2 存在確率密度

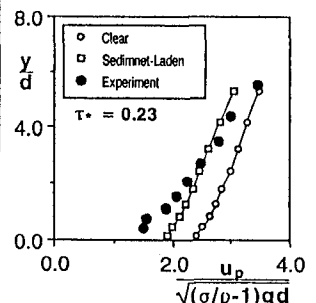


図-3 粒子速度分布

較した．図-2は，砂粒子の鉛直方向存在確率密度について示したものであるが，混相流型は清水流型に比べて重心が低く，清水流型と比べて下方で分布が厚く，上方で薄くなる傾向を示しており，実験結果を良好に説明している．次に，図-3は，砂粒子の移動速度の水平方向成分について示したものであるが，清水流型では過大評価される移動速度が混相流型で良好に説明されていることが理解できる．

本シミュレーションを掃流力を変化させて繰り返し実行することにより，saltation 特性量と掃流力の関係を推定することができる．図-4は，入射角，反射角（saltation 粒子が衝突直前・直後に平均河床面となす角度）について示したものであるが，清水流型の入射角，反射角は混相流型に比べて小さく，清水流型のsaltation は混相流型に比べて裾の広い形状を有することが推察される．次に，図-5，-6 は，saltation 長および平均飛高について示したものであるが，混相流型は清水流型に比べて飛距離，飛高とも小さく，両者の相違は掃流力の増大とともに増加する．図-6には，関根・吉川²⁾による実験値も併せて示しているが，混相流型は広範囲にわたり実験値と良好に一致しており，掃流層厚の変化を全領域で良好に予測している．図-4，-5，-6 の結果を総合すると，混相流型の individual saltation は，清水流型に比べて偏平な形状を有していることが示唆される．図-7は，step length が successive saltation 長として定義されることに基づき，step length と掃流力の関係を求めて既存の実験値と比較したものであるが，清水流型と混相流型の相違は図-5に比べて一層顕著となっている．すなわち，図-5によると， $\tau_* > 0.3$ 程度では清水流型のsaltation 長は混相流型の2倍程度であったが，清水流型のstep length は混相流型の3倍以上にも達している．掃流力の大きい領域に注目すると，混相流型は，清水流型と異なりstep length を過大に評価することがなく，実験値の示すような掃流力の $1/2$ 乗に比例した増加傾向をも良好に説明している．

4. おわりに 流体系・粒子系の相互作用を考慮した確率過程型のシミュレーションによると，清水流近似を用いた従来型の確率モデルでは説明できなかった掃流力の大きい領域を含む広範囲において，掃流層の特性を良好に説明することが可能である．

参考文献 1) 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，1984． 2) 関根・吉川：掃流砂の停止機構に関する研究，土木学会論文集第399号，1988．

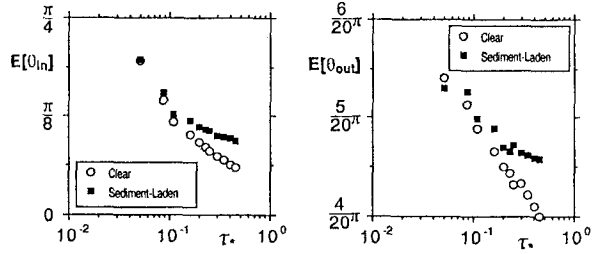


図-4 掃流砂の入射角，反射角

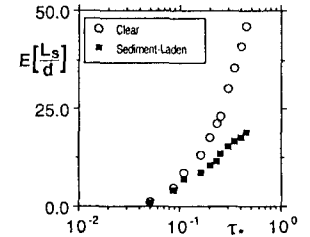


図-5 saltation 長

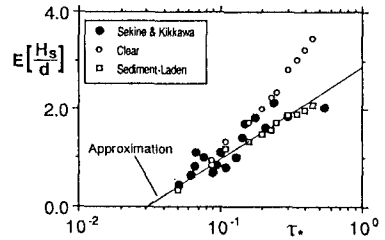


図-6 saltation 高さ

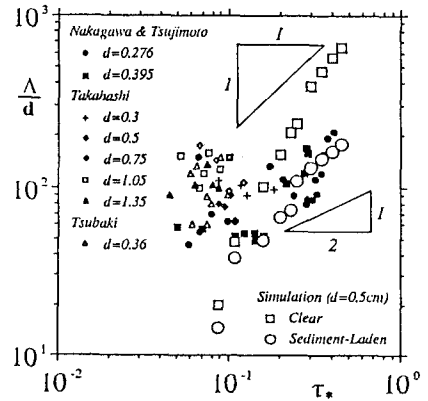


図-7 step length

[記号] x, y : 流下方向と鉛直方向の座標軸， $U, V = x, y$ 方向の平均流速， P : 静水圧からの偏差圧力， ρ, σ : 水および砂の密度， ν : 動粘性係数， g : 重力加速度， h : 水深， θ : 水路床勾配， k : 乱れエネルギー， ϵ : エネルギー逸散率， ν_t : 渦動粘性係数， q_n : 掃流砂量， N : saltation 粒子のサンプル数， w_j : セル j の重み係数（存在確率密度）， u_{pout}, u_{pin} : セル j から脱出する際とセル j に突入する際の砂粒子の速度， vol_j : セル j の体積