

京都大学工学部 正 員 中川博次 京都大学工学部 正 員 後藤仁志
鹿 島 建 設 正 員 渡辺幹広 京都大学工学部○学生員 井上裕介

1. はじめに：粒子混入を伴う流れの計測は、これまで主として数 μm 程度の微細粒子を含む流れについて行なわれており、粒径数 mm 程度の粒子が河床と衝突・反発を繰り返しながら流送される掃流層内の流れ場については、平均流ですらあまり計測例がない。ここでは、粒子混入による平均流速分布の変化をピトー管を用いて測定し、平均流速の実験的把握を試みるとともに、実験結果を中川・辻本・後藤・渡辺¹⁾の修正PSI-Cellモデルによる流れ場の解と比較して掃流層の内部構造について検討する。

2. 実験水路と実験方法：実験に用いた水路は、長さ9m、高さ32cm、幅33cm、最急勾配1/27の長方形断面水路であり、流速・水深が十分確保できるように木製の仕切り板を設置して幅を12cmにまで狭め、粒径 $d=0.5\text{cm}$ のガラスビーズを敷き詰めた粗面固定床を上流端から7.2mにわたり設置した。実験には、固定床作成に用いたのと同じ粒子(粒径 $d=0.5\text{cm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.6$ のガラスビーズ)を用いた。流量の調節は、パソコンにより制御された電磁バルブによって行われており、安定して定常流を流すことができる。給砂については水路上流端で単位時間あたり一定の粒子を供給することとした。給砂量は、清水流の条件で測定した流速分布より摩擦速度 u_* を推定し、無次元掃流力 τ_* を算出して、スイス公式²⁾を用いて算出した。実験

表-1 実験/計算条件

τ_*	$h(\text{cm})$	$q(\text{cm}^3/\text{s})$	$U_m(\text{cm/s})$	I_b	Fr	Re_*
0.11	3.91	425	108.7	0.02	1.75	5435
0.16	6.05	825	136.36	0.02	1.77	6818
0.23	8.29	1200	144.75	0.02	1.61	7237.5

3. 実験結果と考察：平均流速の鉛直分布の実測値を図-1に示した。粒子混入が無い場合(清水流)と粒子混入がある場合(混相流)について概形を比べてみると、どのケースも粒子混入による速度欠損が顕著に表れている。混相流の流速分布では、掃流層内の欠損を表す変曲点が明確に確認できる。また、掃流力が大きくなり水深が高くなるほど変曲点が上昇していることから、掃流層厚が増加していることが分かる。掃流力別に見ると、欠損幅の絶対値は $\tau_*=0.23, \tau_*=0.16, \tau_*=0.11$ の順に増加し、掃流力が大きい場合の方が粒子混入が流れ場に与える影響は大きくなっている。一方、清水流の流速値に対する欠損幅の相対値を見ると、その割合はほぼ一定となっている。

4. 修正PSI-Cellモデルの概要：ここでは、中川・辻本・後藤・渡辺¹⁾の修正PSI-Cellモデルを用いて流れ場の構造変化の再現を試みるが、まず中川らの修正PSIモデルについて簡単に説明する。流れ場のモデルに、平均流の運動方程式に砂粒子系からのフィードバックを表す負の生成項を有する $k-\epsilon$ 乱流モデルを用い、粒子系の運動を、不規則継続跳躍モデル³⁾で表して、粒子系と流れ系をPSI-Cellモデルによりカップリングした後藤・辻本・中川⁴⁾のシミュレーションを拡張し、粒子間衝突の効果を近似的に考慮したのが中川らのモデルである。具体的には砂粒子混入の影響を表す負の生成項が以下のように表される。

$$S_{PU_j} = -\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{\sigma}{\rho} q_{Bj} w_j \left\{ \left(1 + \frac{\alpha_p}{R_j} \right) u_{\text{pout}_i} - u_{\text{pin}_i} \right\} \frac{1}{\Delta V_j} \quad (1)$$

他の粒子との衝突により減速された砂粒子は流れに再度加速されて速度を回復するため、流体に付加的な運動量欠損をもたらすが、このような効果はパラメーター w_j, R_j により考慮される。粒子間干渉の取り扱い手順は次のようにモデル化する。清水流中で単一粒子の不規則運動を模擬し(図-2[A])、その重畳

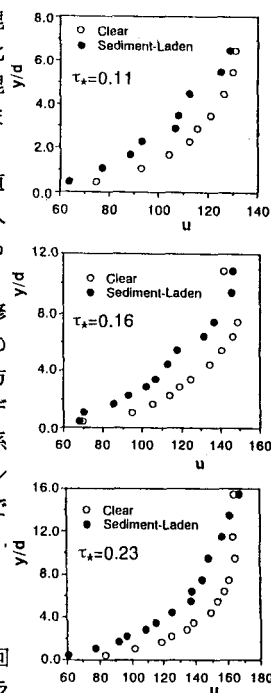


図-1 流速分布

から砂粒子の存在確率密度と移動速度を求め、それによって流れ場に粒子を配置する。配置された粒子群の各粒子が位置を変化させることなくその高さでの平均粒子速度で流下するものと仮定すると、砂粒子の平均移動速度と同一速度で移動する座標系から見てこの砂粒子群は固定され、相対的位置に変化がなくなる(図-2[B])。そこで、粒子間衝突の影響は追跡対象とする saltation 粒子の運動にのみ限定し、衝突が生じても粒子群の位置や速度には変化は生じないものと仮定して単一粒子の運動を追跡する。速度変化率 R_j および重み係数 w_j については、次式で評価することとする。

$$R_j \equiv \prod_{i=1}^{N_j} r_{ij} ; r_{ij} = |u_{af}|/|u_{bf}| \quad (2)$$

$$\frac{w_j}{w_j^*} = f_B(y_j) \Delta y_j / f_B^*(y_j) \Delta y_j = \frac{1-\beta_p}{R_{pdf}} + \beta_p \quad (3)$$

$$R_{pdf} \equiv f_B^*(y_j) \Delta y_j / f_B^m(y_j) \Delta y_j$$

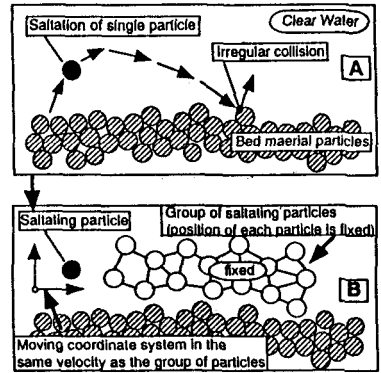


図-2 粒子間衝突の取り扱い

なお、粒子間衝突を考慮した場合の存在確率密度 f_B については、粒子間衝突を全く考慮しない[A]の場合の存在確率密度 f_B^* と粒子間衝突による saltation 粒子への影響を過大に評価した[B]の場合の存在確率密度 f_B^m の中間にあるものと考え、式(3)のように重み係数を評価している。計算条件は表-1と同じである。

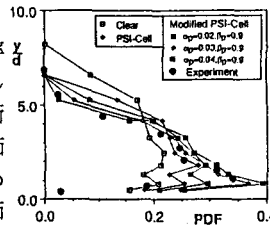


図-3 存在確率密度

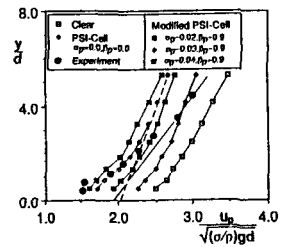


図-4 移動速度

5. シミュレーション結果と考察：砂粒子

の鉛直方向存在確率密度を示したのが図-3、砂粒子の移動速度の水平成分を示したのが図-4である。これらの図より $\alpha_p=0.03$ のときが欠損傾向を最も良く表していることから、 $\alpha_p=0.03$ を用いたときの平均流速分布について示したのが図-5である。ここでは粒子間衝突が最も顕著な $\tau_*=0.23$ の場合について(1)清水流近似を用いた従来型、(2)流体・粒子間干渉のみ取り入れたPSI-Cell型、(3)粒子間干渉も取り入れた修正PSI-Cell型の3者を実験値と比較している。粒子混入時の saltation 層内の値に注目すると、PSI-Cellモデルよりも修正PSI-Cellモデルの方が流速の欠損傾向をよく表しており、saltationの活発な領域における粒子間衝突の評価の重要性が流れ場の構造の面からも示唆されたものと考えられる。

参考文献

- 1) 中川・辻本・後藤・渡辺：粒子間干渉を考慮した掃流層の数値シミュレーション，水工学論文集，第37巻，1992(印刷中)。
- 2) Meyer-Peter, E. and Muller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp. 39-64, 1948.
- 3) 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.
- 4) 後藤・辻本・中川：PSI-セルモデルによる Saltation 層の解析，海岸工学論文集，第39巻，pp. 266-270, 1992.

記号

ρ : 水の密度, σ : 砂粒子の密度, g : 重力加速度, τ_* : 無次元限界掃流力, J_s : エネルギー勾配, h : 水深, q : 単位幅流量, U_m : 平均流速, u_x, v_x : 砂粒子移動速度の水平成分, 鉛直成分, Fr : フルード数, Re_s : 砂粒レイノルズ数, q_B : 掃流砂量, 添字 i, j : 層の番号, 添字 in, out: 各層への突入と脱出, N_j : 第 j 層を通過する砂粒子の総数, ΔV_j : セル j の体積, R_j : 第 j 層内の粒子間衝突による速度変化率, w_j : 存在確率による第 j 層の重み, N_{colj} : 第 j 層中の衝突回数, u : 砂粒子の速度ベクトル, 添字 bf, af: 衝突前後, α_p, β_p : 粒子間衝突が流体の運動量損失に与える影響を大きさを規定する経験定数 ($\beta_p=0.9$)。

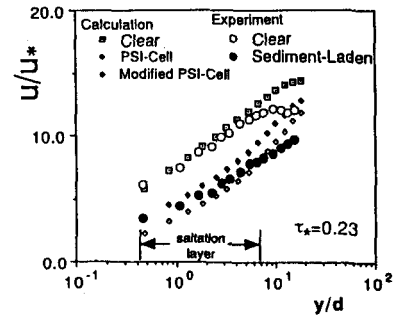


図-5 流れ場の流速分布