

## II-241

## 掃流層における流速分布の特性

鹿 島 建 設 正 員 渡 辺 幹 広  
 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

**1. まえがき** 大粒径（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中では、流体・粒子間および粒子間相互の活発な干渉が生じている。ここでは、このような相互干渉が流れ場の構造にもたらす変化について、平均流速分布の面から検討する。まず、粒子混入状態での平均流速分布をピトー管で測定し、次に実験と同様の条件で、著者ら<sup>1)</sup>の修正PSI-Cellモデルによるシミュレーションを実施して比較・検討する。

表-1 実験条件

| $\tau_b$ | $h$ (cm) | $Q$ (cm <sup>3</sup> /s) | $U_m$ (cm/s) | $I_b$ | $Fr$ | $Re_\rho$ |
|----------|----------|--------------------------|--------------|-------|------|-----------|
| 0.11     | 3.91     | 425                      | 108.7        | 0.02  | 1.75 | 5435      |
| 0.16     | 6.05     | 825                      | 136.4        | 0.02  | 1.77 | 6818      |
| 0.23     | 8.29     | 1200                     | 144.8        | 0.02  | 1.81 | 7238      |

**2. 実験の概要** 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 $d=0.5$ 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、固定床と同様の粒子（粒径 $d=0.5$ cm、比重 $\sigma/\rho=2.6$ ）を用いた。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、流速は圧力変換器を取付けたピトー管により測定された。給砂量は、清水流の条件で測定した流速分布より推定した摩擦速度 $u_*$ を無次元掃流力 $\tau_b$ に換算して、スイス公式を用いて算出した。実験条件を表-1に示す。

**3. 実験結果と考察** 粒子混入がない場合（清水流）と粒子混入がある場合（混相流）の平均流速分布の実験結果を図-1に示す。各ケースとも粒子混入による速度欠損が顕著に表れており、混相流の流速分布では、速度勾配の変化点の存在が確認される。速度勾配の変化点より下側では混相流の速度勾配は清水流より小さいが、これは流体・粒子および粒子間相互の干渉による流れ場の運動量損失によるものと推察される。一方、速度勾配の変化点より上側では混相流の速度勾配は清水流より大きく、速度欠損は急速に回復する。速度勾配の変化点は掃流層厚に対応しているものと推察される。図-2は、速度勾配の変化点を関根・吉川<sup>2)</sup>による掃流層厚の実験値および著者ら<sup>3)</sup>による混相流と清水流のシミュレーション結果と比較したものである。速度勾配の変化点から求めた掃流層厚は、関根らの実験値および混相流のシミュレーション結果とほぼ良好に一致している。

**4. 修正PSI-Cellモデルの概要** 著者ら<sup>3)</sup>は、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-ε乱流モデルを流れ場のモデルとして採用し、粒子系の運動を不規則継続跳躍モデル<sup>4)</sup>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シミュレーションモデルを構築したが、その後更に、粒子間衝突についても近似的な評価を加えた修正PSI-Cellモデル<sup>5)</sup>を提案した。

ここでは、著者ら<sup>1)</sup>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、このモデルにおける砂粒子混入の影響を表す負の生成項（流下方向成分）は次のように表される。

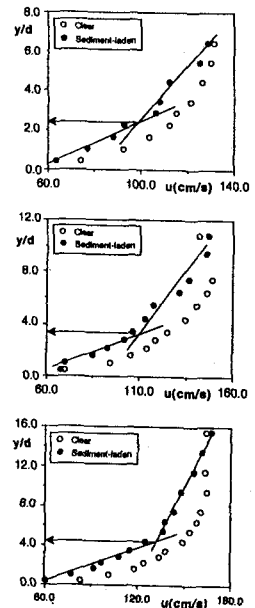


図-1 流速分布

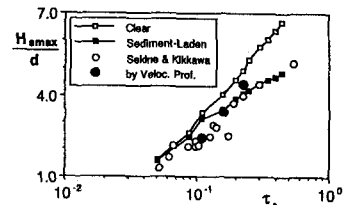


図-2 掃流層厚

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

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 $w_j R_j$ により考慮される。これらのパラメータの評価に際しては、粒子間干渉を図-3に示す手順で近似的に取り扱う。清水流中で単一粒子の不規則運動を模擬し（図-3[A]）、その重畳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-3[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し、その結果を用いて速度変化率 $R_j$ および重み係数 $w_j$ を、次式で評価する。

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{w_j}{w_j^*} &= f_B(y_j) \Delta y_j / f_B^*(y_j) \Delta y_j = \frac{1 - \beta_p}{R_{pdf}} + \beta_p \\ R_{pdf} &\equiv f_B^*(y_j) \Delta y_j / f_B^m(y_j) \Delta y_j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なお、式(3)は、粒子間衝突を考慮した場合の存在確率密度 $f_B$ は、粒子間衝突を全く考慮しない場合（図-3[A]）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

に評価した場合（図-3[B]）の存在確率密度 $f_B^m$ の間にあることを示すものである。計算条件は、表-1と同様である。また、式中の経験定数 $\alpha_p, \beta_p$ については、砂粒子の存在確率密度の実験値との適合性を考慮して著者ら<sup>1)</sup>が定めた $\alpha_p=0.03, \beta_p=0.9$ を用いてシミュレーションを実施した。

**5. シミュレーション結果と考察** 砂粒子の移動速度の水平成分を示したのが図-4、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 $\tau_c=0.23$ 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。砂粒子の移動速度については、何れの結果も実験値の示す急な速度勾配を正確に再現することはできないものの、砂粒子の存在確率が高いsaltation層の下部においては、修正PSI-Cellモデルが最も良好に実験値と一致している。平均流速についても、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。

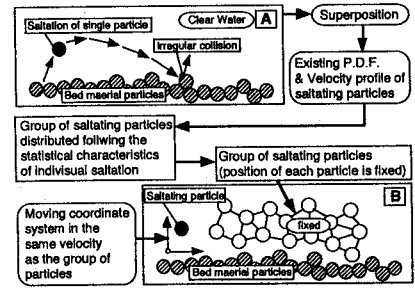


図-3 修正PSI-Cellモデル

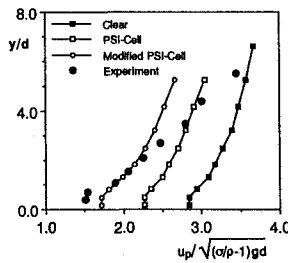


図-4 砂粒子速度

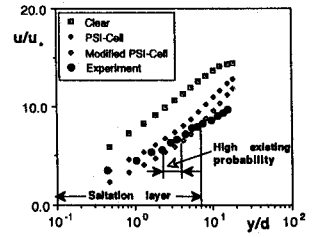


図-5 流速分布

記号  $\rho$ : 水の密度,  $\sigma$ : 砂粒子の密度,  $g$ : 重力加速度,  $\tau_c$ : 無次元境界掃流力,  $I$ : エネルギー勾配,  $h$ : 水深,  $q$ : 単位幅流量,  $U$ : 平均流速,  $u, v$ : 砂粒子移動速度の水平成分, 鉛直成分,  $F$ : フルード数,  $R_j$ : 砂粒レイノルズ数,  $q_B$ : 掃流砂量,  $\Delta y_j$ : 層の番号,  $\Delta y_{in, out}$ : 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,  $\Delta V_j$ : 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,  $N_j^m$ : 第 $j$ 層中の衝突回数,  $\mu$ : 砂粒子の速度ベクトル,  $u_{bf}, u_{af}$ : 衝突前後,  $a_p, b_p$ : 粒子間衝突が流体の運動量損失に与える影響を大きく規定する経験定数 ( $b_p=0.9$ )

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, pp.605-610, 1992. 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309号, pp.105-112, 1988. 3) 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. 4) 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.