

II-260 サルテーション粒子と流れの相互作用を考慮した流速分布解析

京都大学大学院 学生員 米山 望 京都大学工学部 正 員 細田 尚
京都大学工学部 正 員 岩佐義朗 東京電力 正 員 河村直明

1. 緒言; 本研究は、サルテーション状態で運動する粒子を有する固定床（滑面）上の開水路流れについて、流れと粒子の相互作用を考慮した解析モデルを用いて、その流速分布特性を考察したものである。

2. 基礎式; 基礎式は粒子および流体の運動方程式から構成される。まず飛高 H の粒子の運動方程式を示せば次のようになる。（座標系を図1に示した。）

$$C_{H\pm}\rho_f v_{pyH\pm}(y, H) \frac{\partial v_{pxH\pm}(y, H)}{\partial y} = \rho_f C_D \frac{3}{4d} C_{H\pm}(y, H) (U_f(y) - v_{pxH\pm}(y, H)) |U_f(y) - v_{pxH\pm}(y, H)| \\ + C_{H\pm}(\rho_p - \rho_f)g \sin \theta - C_{H\pm}\chi\rho_f v_{pyH\pm}(y, H) \frac{\partial v_{pxH\pm}(y, H)}{\partial y} \quad (1)$$

$$C_{H\pm}\rho_f v_{pyH\pm}(y, H) \frac{dv_{pyH\pm}(y, H)}{dy} = -\rho_f C_D \frac{3}{4d} C_{H\pm} v_{pyH\pm}(y, H) |v_{pyH\pm}(y, H)| \\ - C_{H\pm}(\rho_p - \rho_f)g \cos \theta - C_{H\pm}\chi\rho_f v_{pyH\pm}(y, H) \frac{dv_{pyH\pm}(y, H)}{dy} \quad (2)$$

ここに、 U_f ; 平均流速の x 方向成分、 $v_{pxH}(y, H)$, $v_{pyH}(y, H)$; 飛高が H の粒子速度の x, y 方向成分、 $C_{H\pm}$; 飛高が H の粒子の体積濃度、 d ; 砂粒子の粒径、 $\pm$ 及び $-$ は上昇及び下降している粒子の水量であること示す。次に流体の運動に関する基礎式を示せば次のようになる。

$$\frac{\partial U_f}{\partial t} = \frac{\partial (-\overline{u'_f v'_f})}{\partial y} + \frac{g \sin \theta}{1 - C} - \frac{\overline{R_{dx}}}{\rho_f(1 - C)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\overline{u'_f v'_f} \frac{\partial U_f}{\partial y} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \frac{\overline{u'_f R'_{dx}}}{\rho_f(1 - C)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (-\overline{u'_f v'_f}) \frac{\partial U_f}{\partial y} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$-\overline{u'_f v'_f} = D \frac{\partial U_f}{\partial y}, \quad D = c_\mu f_{Ds}(y) \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C = C_+ + C_-, \quad C_\pm = \int_y^\infty C_{H\pm}(y, H) dH \quad (7)$$

$$C_{H+} \cdot v_{pyH+} = |C_{H-} \cdot v_{pyH-}| = G_0 \cdot f(H) \quad (G_0; \text{単位面積上から単位時間に跳び出す砂粒子体積}) \quad (8)$$

ここに、 k ; 流体の乱れエネルギー、 ε ; 流体の乱れエネルギー散逸率、 D ; 渦動粘性係数、 $f_{Ds}(y)$; 自由表面近くにおける y 方向の乱れの減衰効果を表す関数、 $\overline{R_{dx}}$; 単位体積中に存在する粒子群から流体に作用する力の x 成分で、(1) 式の右辺を y から H まで積分して得られ、次のようになる。¹⁾

$$\overline{R_{dx}} = \int_y^\infty \rho_f C_D \frac{3}{4d} \{ C_{H+}(y, H) (U_f(y) - v_{pxH+}(y, H)) \cdot |U_f(y) - v_{pxH+}(y, H)| \\ + C_{H-}(y, H) (U_f(y) - v_{pxH-}(y, H)) \cdot |U_f(y) - v_{pxH-}(y, H)| \} dH \\ - \int_y^\infty \chi \rho_f \left\{ C_{H+}(y, H) v_{pyH+}(y, H) \frac{\partial v_{pxH+}(y, H)}{\partial y} + C_{H-}(y, H) v_{pyH-}(y, H) \frac{\partial v_{pxH-}(y, H)}{\partial y} \right\} dH \\ + \int_y^\infty g \sin \theta (\rho_p - \rho_f) (C_{H+}(y, H) + C_{H-}(y, H)) dH \quad (9)$$

$\overline{u'_f R'_{dx}}$ は k -方程式中の相互作用項であり、次のようになる。

$$\overline{u'_f R'_{dx}} \approx \rho_f C_D \frac{3}{4d} c_K \cdot k \int_y^\infty \{ C_{H+} |U_f - v_{pxH+}| + C_{H-} |U_f - v_{pxH-}| \} dH \quad (10)$$

ここで、 $c_\mu, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ は 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3 を使い、 c_K は 2.0 とした。

3. 解析方法; 路床での反発に起因する不規則性を考慮した粒子運動の解析は土屋²⁾、中川・辻本³⁾の研究を参考にし、次のようにして行った。

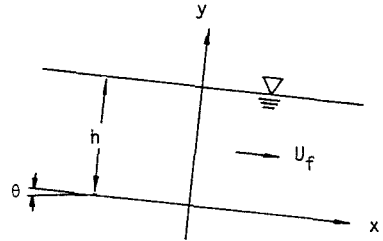


図1 座標系

(i) 初回の粒子群のサルテーションの平均飛高 H_m を仮定する。また、飛高 H の確立密度関数 $f(H)$ として、土屋の提案する関数を用いる。

(ii) 飛高 H の粒子の y 方向の飛び出し速度 v_{pyH+} を (2) 式から求める。 x 方向の飛び出し速度 v_{pxH+} は初回は適当に仮定し、2 回目からは v_{pyH+} と粒子群の平均反射角を用いて求めた。

(iii) v_{pxH+} , v_{pyH+} を (1), (2) 式を用いて求める。さらに、 $C_{H\pm}$ を質量保存則から計算する。

(iv) 得られた $v_{pxH\pm}$, $v_{pyH\pm}$, $C_{H\pm}$ を用いて平均粒子速度 $v_{px\pm}$, $v_{py\pm}$ を求め、粒子群の平均入射角を計算する。これらの値に対して、土屋が用いている反発の関係を適用し、粒子群の平均的な反射速度を求めた。

(v) y 方向の平均反射速度 v_{py+} に対する飛高を次のサルテーションの平均高さ H_m とし、(ii) に戻る。

(i)~(v) の手順を数回繰り返すことにより、ある時刻 $t = (n+1)\Delta t$ における既知の流速分布に対する粒子の速度および濃度を求める。これらを (3)~(5) 式に代入して、 $t = (n+1)\Delta t$ における U_f , k 及び e を求めた。このように時間発展を取って、定常状態が得られるまで計算を行った。

4. 結果の考察； 計算結果と本研究及び土木研究所⁴⁾で行われた実験結果を比較し、解析法の適用性を検討した。まず本研究の実験条件（表1のRun1-1,1-2）のもとで、計算結果と実験結果を比較したものが図2である。（反発係数 $e = 0.8$, 仮想反発面の垂線と路床面の角度 $\tan \gamma = 4.0$ ）図3にはRun1-2の流速分布と粒子の速度分布を同時に示した。この図から流れと粒子の速度差の影響により流速が減少することがうかがわれる。また土木研究所の実験条件Run2-1,2-2,2-3で計算した結果が図4である。（ $e = 0.7$, $\tan \gamma = 4.0$ ）図2、4とも、計算結果と実験結果はほぼ適合している。両図とも、以下の特性が再現されている。1) 清水流と比較して流砂が存在するときの流速は、全体に減少する。2) 自由表面に比べて路床付近の方が流速が大きく減少し、路床付近のある点を境にして流速分布の勾配が変化する。3) 流砂量の増加にともなって流速の減少量が大きいの。

表1 計算条件

	水深 (cm)	slope	粒径 (mm)	q_B (cm^3/s)
Run 1-1	1.75	1/110	0.10	0.130
1-2	1.75	1/110	0.10	0.200
Run 2-1	4.50	1/200	0.12	0.084
2-2	4.50	1/200	0.12	0.176
2-3	4.50	1/200	0.12	0.276

（計算は流砂量に対応する G_0 を選んで行った。）
材質；Run1 ガラス球、Run2 砂流

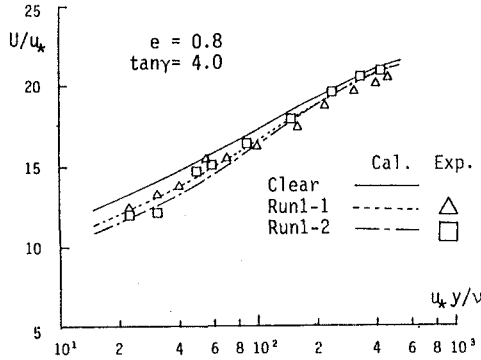


図2 計算結果と実験結果との比較

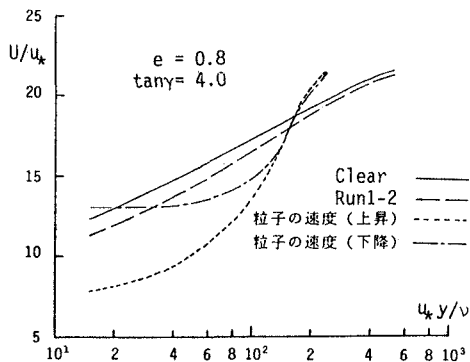


図3 砂粒子の速度分布と流速分布の比較

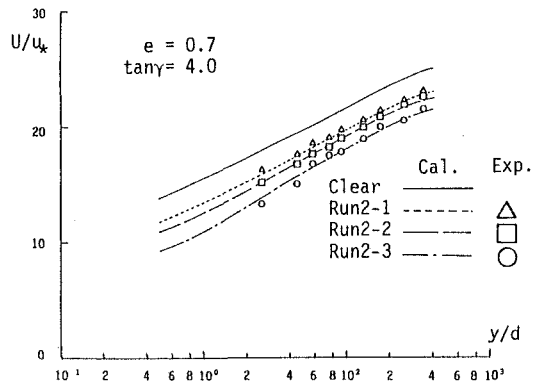


図4 土木研究所の実験結果との比較

謝辞； 最後に、本研究を遂行するにあたって協力いただいた大阪府・川上卓氏に深く感謝いたします。

参考文献； 1) 河村直明；京都大学修士論文，1991， 2) 土屋・青山；京大防災研究所年報第13号B-2，1970，

3) 中川・辻本・赤尾；第27回水理講演会論文集，1983， 4) 柏井・外崎・川口；土木技術資料31-5，1989。