

II-159

浮遊砂を有する滑面上の開水路流れに関する一考察

京都大学大学院 学生員 坂井伸一

京都大学工学部 正 員 岩佐義朗

京都大学工学部 正 員 細田 尚

1. はじめに; 本研究は、浮遊砂を有する滑面上の流れの抵抗則に関して、乱流モデルを用いた検討を行ったものである。乱流モデルとして、乱れReynolds数の低い領域も考慮した $k-\varepsilon$ モデル(Jones・Launder¹⁾モデル)を用いる。浮遊砂を有する開水路流れの特性について標準型の $k-\varepsilon$ モデルを用いた検討もなされているが²⁾、Jones・Launderモデルを用いることにより、Karman定数を仮定することなく流れの特性を検討することができる。

2. 基礎式; 次のような無次元量を導入する。(記号の説明を図1に示す。)

$$U' = \frac{U}{u_*}, \quad u' = \frac{u}{u_*}, \quad k' = \frac{k}{u_*^2}, \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon h}{u_*^3}, \quad y' = \frac{y}{h}, \quad t' = \frac{tu_*}{h}$$

ここに、 U 、 u : 液相の平均流速、乱れ速度ベクトルの x 方向成分、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 h : 水深、 u_* : 摩擦速度($\sqrt{gh \sin \theta}$)、 (x, y) : 空間座標、 t : 時間 である。このとき基礎式は次のようになる³⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\overline{uv}) - \frac{\omega_0}{u_*} U \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{1-C} + \frac{1}{Re_*} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} = & -\overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{D}{\sigma_k} + \frac{1}{Re_*} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] - \varepsilon - 2 \frac{1}{Re_*} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \\ & - \overline{cv} \frac{1}{Fr_*^2} \frac{1}{(1-C)} \frac{p_p - p_f}{\rho_f} \end{aligned} \quad (2)$$

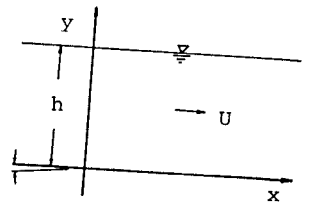


図1 座標系

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} D \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + 2 \frac{1}{Re_*} D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)^2 \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} + Re_* \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] - c_{\varepsilon 3} \frac{\overline{cv}}{(1-C)} \frac{1}{Fr_*^2} \frac{\varepsilon}{k} \frac{p_p - p_f}{\rho_f} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\omega_0}{u_*} \frac{\partial}{\partial y} [(C-1)C] = \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{cv}) \quad (4)$$

$$-\overline{uv} = D \frac{\partial U}{\partial y}, \quad -\overline{cv} = \alpha D \frac{\partial C}{\partial y} \quad (\alpha = 1.0 \text{ とする})$$

ここに、 C , c : 浮遊砂の平均、変動体積濃度、 ω_0 : 砂粒子の沈降速度。また、 Re_* , Fr_* は次のように定義されるパラメータである。

$$Re_* = \frac{u_* h}{\nu}, \quad Fr_* = \frac{u_*}{\sqrt{gh}}$$

上式では簡単のため無次元量を表す'を省略している。また、 c_{μ} , $c_{\varepsilon 2}$ の関数形はJones・Launderと同一である。さらに、 ω_0 としてStokes則を用いると、 ω_0/u_* は次のようになる。

$$\frac{\omega_0}{u_*} = \frac{1}{18} \frac{Re_*}{Fr_*^2} \frac{d}{h} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \quad (d: \text{砂の粒径}, \rho_p: \text{砂の密度}, \rho_f: \text{水の密度})$$

結局、4種類の無次元パラメータ Re_* , Fr_* , d/h , $(\rho_p - \rho_f)/\rho_f$ が現れる。

3. 解析方法; 数値解析は、(1)~(4)式を差分化し、適当に与えた初期条件より出発して時間発展を取り、定常状態が得られるまで繰り返した。境界条件は、路床 $y=0$ で $U=0$, $k=0$, $\varepsilon=0$ 。 C に関する(4)式につい

ては $y=0$ で $-c\bar{v} = \frac{W_0}{U_*} C(C-1)$ とした。また、水面 $y=0$ では $\partial U/\partial y=0$, $\partial k/\partial y=0$, $\partial \varepsilon/\partial y=0$ 。Cについては路床と同様に $-c\bar{v} = \frac{W_0}{U_*} C(C-1)$ である。この条件のもとに(4)式を水深にわたって積分すれば、浮遊砂の体積が時間に関して一定となることがわかる。計算の諸条件を表1に示す。 C_m は浮遊砂の断面平均濃度である。

4. 結果の考察: Run1について得られた流速分布を示したのが図2である。浮遊砂濃度の増加とともに流速分布の勾配が急になっている。すなわちKarman定数が減少して行く。次に、Run1, 2の抵抗係数 $C_f = 2(u_*'/U_m)^2$ と C_m の関係を示したのが図3(a),(b)である。 U_m は、液相のみの単位幅流量 $q_f = \int_0^h U(1-C)dy$ と混相の単位幅流量 $q_m = \int_0^h Udy$ の二種類を用いて $U_m = q_f/h$, q_m/h として求めた。液相のみの流量を用いたとき抵抗係数は今本・大年⁴⁾の結果と同様に、濃度の増加とともに増加するが、混相の流量を用いたときは逆に減少する。図4, 5には、Run1の k , ε の分布を示した。路床に近づくほど浮遊砂の影響が大きく、濃度が大きいほど、 k , ε の値も大きいことがわかる。

表1 計算条件

	$\frac{u_*'}{h}$	$\frac{u_*'}{\sqrt{gh}}$	$\frac{d}{h}$	$\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}$	C_m
Run 1	553.4	0.045	2×10^{-2}	1.65	0.001-0.15
Run 2	1237.4	0.100	8×10^{-4}	1.65	0.001-0.15

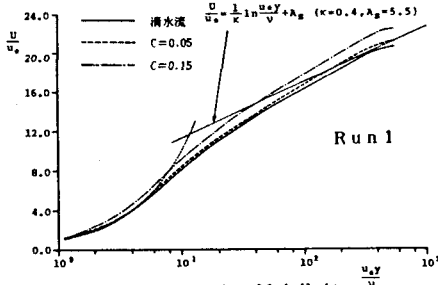
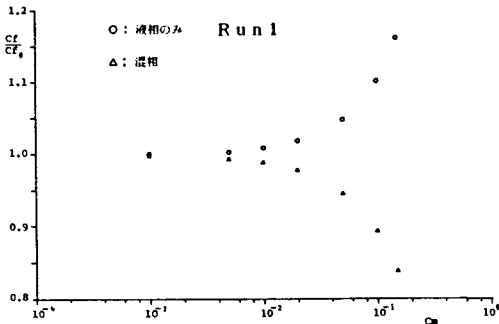
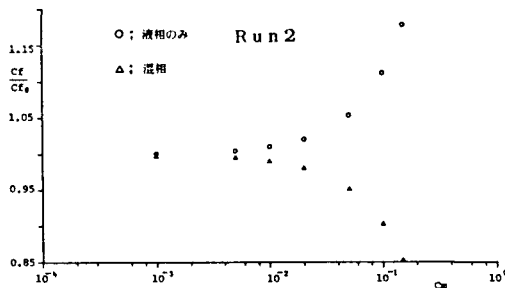


図2 流速の鉛直分布



(a)



(b) 図3 C_f と C_m の関係

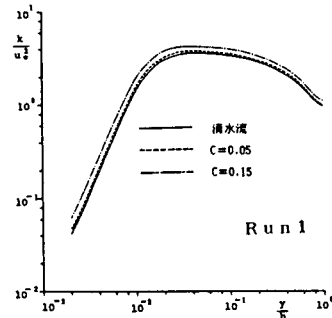


図4 k の鉛直分布

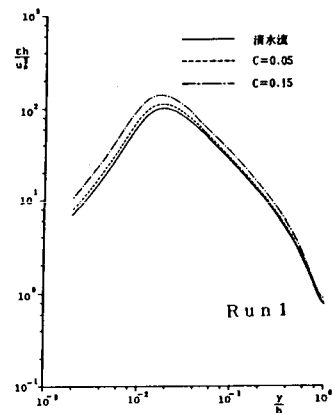


図5 ε の鉛直分布

参考文献 1) Jones・Lauder: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, 1972, 2) 福嶋祐介: 第30回, 31回水理講演会論文集, 1986, 1987, 3) 細田・余越: 第31回水理講演会論文集, 1987 4) 今本・大年: 京大防災年報第22号B-2, 1979