

沈降性粒子を含む開水路流れについて

九州工業大学(正) 藤崎 一裕

九州工業大学(学) 〇高原 幸之助

九州共立大学(正) 粟谷 陽一

1. まえがき

本研究の目的は、沈降性粒子の懸濁によって生じる鉛直方向の安定な密度勾配が、流れに及ぼす影響について調べることである。室内実験により開水路内の浮遊砂流れについて、鉛直方向の流速分布や濃度分布などを測定した。また、この実験の結果をk-ε modelによる計算結果と比較した。

2. 実験

幅40cm、長さ10mの亚克力製水路を勾配 $I=1/500$ に調節し、水路上流端から7.5mの位置の水路中央部で水深方向の流速、濃度の分布を測定した。実験の諸条件は表1に示される。流速の測定には手製のピトー管(管の直径:2mm)を用い、濃度の測定はサイフォンによる採取によって行った。使用した粒子は標準珪砂をボールミルにより粉砕したもので、粒度分布を図1に示す。平均径は約 $33\mu\text{m}$ 、沈降速度は約 0.1cm/s である。

表1 実験条件

	h (cm)	u_m (cm/s)	$\langle C_s \rangle$ ($\times 10^{-3}$)	F_{sc}	R_s	u_* (cm/s)
清水	4.0	55.60	-----	-----	22240	2.172
A	4.0	56.38	0.884	0.966	22552	2.309
B	4.0	56.18	2.251	0.673	22472	2.569

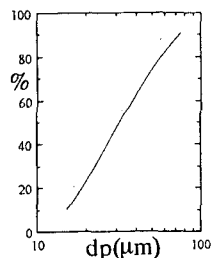


図1 粒径過積曲線

実験結果を図2、3に示す(図中の実線は計算値である)。図2には粒子懸濁により生じた密度勾配のために、粒子が存在しない場合に比べて、速度勾配が増加している様子が示されている。

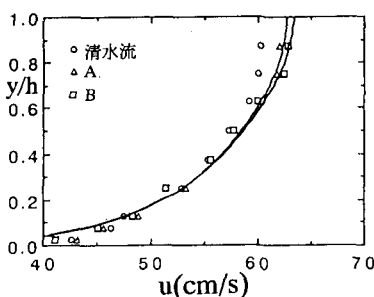


図2 流速分布

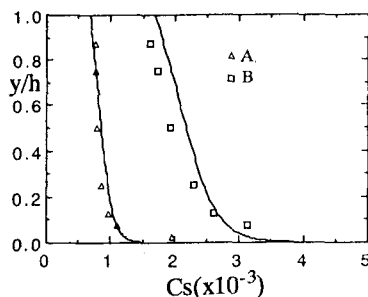


図3 濃度分布

3. 理論解析

図4のように流下方向にx軸、水路底部より鉛直上方にy軸をとり、常用の記号を用いると、運動方程式及び粒子の保存則が無次元表示で次のように表される⁴⁾。

$$0 = (1 + D \overline{C_s}) + \frac{d}{dy} \left(\overline{\nu_t} \frac{d\overline{u}}{dy} \right), \quad D = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \langle C_s \rangle \quad (1)$$

$$0 = \frac{d}{dy} \left(\beta \overline{\nu_t} \frac{d\overline{C_s}}{dy} + \overline{w_0} \overline{C_s} \right), \quad \beta = 1 \quad (2)$$

$$\langle C_s \rangle = \int_0^1 \overline{C_s(y)} dy, \quad \overline{C_s} = \frac{C_s}{\langle C_s \rangle}$$

$$\overline{u} = u/u_*, \quad \overline{y} = y/h, \quad \overline{w_0} = w_0/u_*, \quad \overline{\nu_t} = \nu_t/h u_*$$

また、k-ε modelでは渦動粘性係数 ν_t は次のように与えられる。

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{\overline{\nu_t}}{\sigma_k} \frac{d\overline{k}}{dy} \right) + \overline{\nu_t} \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2 + \frac{1}{F_{sc}^2} \frac{\overline{\nu_t}}{\sigma_\epsilon} \frac{d\overline{C_s}}{dy} - \overline{\epsilon} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{\overline{\nu_t}}{\sigma_\epsilon} \frac{d\overline{\epsilon}}{dy} \right) + C_{\epsilon 1} \overline{\epsilon} \left[\overline{\nu_t} \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2 + (1 - C_{3\epsilon}) \frac{1}{F_{sc}^2} \frac{\overline{\nu_t}}{\sigma_\epsilon} \frac{d\overline{C_s}}{dy} \right] - C_{2\epsilon} \frac{\overline{\epsilon}}{k} = 0 \quad (4)$$

$$\overline{\nu_t} = C_\mu \frac{\overline{k}^2}{\overline{\epsilon}} \quad (5)$$

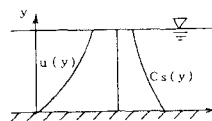


図4 座標軸

モデル定数は、 $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{3\epsilon} = 2.5$ とした。 $C_{3\epsilon}$ 以外は、この種の計算によく用いられている値である。

また、 u 、 ϵ の水面での境界条件としては対称条件を用いたが、 k の値については楠津の提案している方法¹⁾を用いた。 $C_{3\epsilon} = 2.5$ としたこと、 k 方程式の水面での境界条件に上記の方法を用いたことが本報の特徴である。

数値解は(1)～(5)式を連立させて求めた。このとき流速分布には底部に対数則を仮定し、粒子は底部への沈積がないものとした。分割数は $0 < y < 0.05$ で100、 $0.05 \leq y \leq 1.0$ で250とした。

数値計算結果は、流速分布及び濃度分布については図2、3中に実線で示されている。これらの図によると計算値は実験値を比較的よく表しているといえる。また、図5、6に乱れエネルギー k と散逸率 ϵ の計算結果を示す。図中の実線は、楠津の提案した清水時の半理論曲線である。これらの図によると、 k の方が F_{sc} の影響がより著しい。

図7、8はVanoniの実験結果³⁾を計算値と比較したもので、福嶋は本報と同様の検討を行っている²⁾が、 k - ϵ model

のパラメータを各々の実験結果に対して異なった値を用いている。しかし、本報で示した手法によると、いずれの場合に対しても同一のモデル定数で再現でき、このモデルの有効性が示されている。

4. おわりに

開水路浮遊砂流について、 k - ϵ modelの計算結果と実験値を比較した。 k 方程式の水面条件として楠津の方法を用い、パラメータ $C_{3\epsilon} = 2.5$ とすることにより、このモデルが室内実験の結果やVanoniの実験結果をよく再現することを示した。この種の現象に関しては、流速分布に対数則をあてはめたときのカルマン定数 κ の変化をはじめ、様々な観点から多くの検討がなされている。今後は、これらの検討結果に対して、ここで示した k - ϵ modelを用いて、より現象の内部に立ち入った考察を進める予定である。

最後に、本実験に協力された九州工業大学学生、中尾誠二君に感謝します。

<参考文献>

- 1). 楠津家久・中川博次：京大防災研究所年報，第29号B-2，pp.647～673，1986。
- 2). 福嶋祐介：水理講演会論文集，第30回，pp.631～636，1986。
- 3). Vanoni, V.A. and Nomicos, G.N.：Trans. of ASCE, Vol.125, 1960。
- 4). Fujisaki, K., Hayashi, H., Yoshitake, N. and Awaya, Y.：Environmental Hydraulics, pp.499～504, 1991。

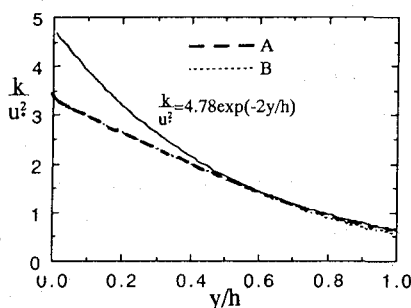


図5 乱れエネルギー k

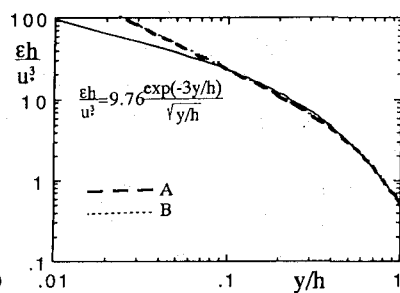


図6 乱れ散逸率 ϵ

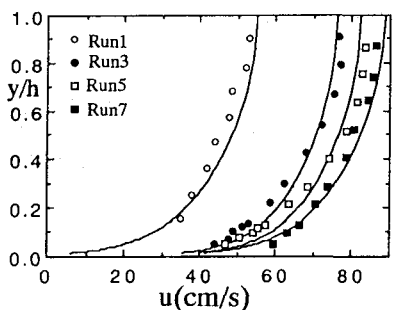


図7 流速分布

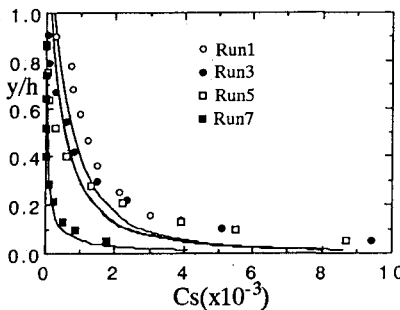


図8 濃度分布