

II-198

開水路浮遊砂流の解析

九州工業大学 大学院 学生員 中尾誠二、緒方仁伸

九州工業大学 工学部 正員 藤崎一裕

九州共立大学 工学部 正員 粟谷陽一

1. はじめに

開水路浮遊砂流については非常に多くの検討がなされているが、 $k-\varepsilon$ モデルによる検討^{1)~3)}はまだ十分にはなされていない。本報では、 $k-\varepsilon$ モデルを用いて得られた数値解を従来の実験結果と比較して、このモデルが浮遊砂流の解析に有効であることを確認した後、浮遊砂流における渦動粘性や混合距離について検討した。

2. 基礎方程式と境界条件

水路幅は十分に広く、流れは2次元等流とし、粘性の影響は無視できるものとする。また、懸濁粒子は平衡状態にあり、底部での粒子の沈積や浮上はないものとする。このとき図1のように座標をとると基礎方程式は無次元表示で次のように与えられる。

$$0 = (1 + D\overline{C}_s) + \frac{d}{dy}(\overline{v}_1 \frac{d\overline{u}}{dy}), D = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \langle C_s \rangle \quad (1) \quad 0 = \frac{d}{dy}(\frac{\overline{v}_1}{\sigma_1} \frac{d\overline{C}_s}{dy} + \overline{w}_0 \overline{C}_s) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dy}(\frac{\overline{v}_1}{\sigma_k} \frac{d\overline{k}}{dy}) + \overline{v}_1(\frac{d\overline{u}}{dy})^2 + \frac{1}{F_{dc}^2} \frac{\overline{v}_1}{\sigma_1} \frac{d\overline{C}_s}{dy} - \overline{\varepsilon} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dy}(\frac{\overline{v}_1}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\overline{\varepsilon}}{dy}) + C_{1\varepsilon} \frac{\overline{\varepsilon}}{k} \{ \overline{v}_1(\frac{d\overline{u}}{dy})^2 + (1 - C_{3\varepsilon}) \frac{1}{F_{dc}^2} \frac{\overline{v}_1}{\sigma_1} \frac{d\overline{C}_s}{dy} \} - C_{2\varepsilon} \frac{\overline{\varepsilon}^2}{k} = 0 \quad (4) \quad \overline{v}_1 = C_\mu \frac{\overline{k}^2}{\overline{\varepsilon}} \quad (5)$$

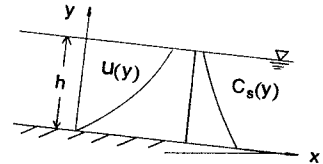


図1 座標系

$$F_{dc} = \frac{u_*}{\sqrt{Dgh}}, \quad \overline{k} = \frac{k}{u_*^2}, \quad \overline{\varepsilon} = \frac{\varepsilon h}{u_*^3}, \quad \langle C_s \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h C_s(y) dy, \quad \overline{C}_s = \frac{C_s}{\langle C_s \rangle}, \quad \overline{u} = \frac{u}{u_*}, \quad \overline{y} = \frac{y}{h}, \quad \overline{w}_0 = \frac{w_0}{u_*}, \quad \overline{v}_1 = \frac{v_1}{hu_*}$$

ここで u は流れ方向の平均流速、 u_* は摩擦速度、 C_s は浮遊砂の体積濃度、 k は乱れのエネルギー、 ε は乱れの逸散率で、 w_0 は浮遊砂の沈降速度、 ρ_s および ρ_0 はそれぞれ浮遊砂と清水の密度である。

(1)式は運動量方程式、(2)式は浮遊砂の保存の式で、渦動粘性係数 ν_t は(3)式の乱れエネルギー式と(4)式のエネルギー逸散率に関する式とから(5)式で与えられる。モデルの定数は $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{3\varepsilon} = 2.5$ とした。 $C_{3\varepsilon} = 2.5$ の値は筆者らの従来の解析結果⁴⁾に基づいている。

境界条件としては底面近傍においては壁関数法¹⁾によった。また、水面の境界条件は $y = h$ で

$$\frac{d\overline{u}}{dy} = 0, \quad \frac{d\overline{\varepsilon}}{dy} = 0, \quad \frac{\overline{v}_1}{\sigma_1} \frac{d\overline{C}_s}{dy} + \overline{w}_0 \overline{C}_s = 0, \quad (\frac{d\overline{k}}{dy} = 0) \quad (6)$$

とした。 k に関しては(6)式でまず全方程式を解いて水表面の k を求め、この値の α 倍 ($\alpha = 0.8$) を再び境界条件として再計算する手法⁵⁾を用いた。なお、濃度 C_s に関するもう1つの境界条件としては水路床から10~20%の高さの1点を選んで実測値の値を与えた。

3. 計算結果

Vanoniの実験結果と、九州工大で行った実験結果が図2~5に計算値と比較されている。計算に用いた流れの諸条件は表1にまとめられている。これらの図によると、 $k-\varepsilon$ モデルを用いると種々の条件での浮流砂の流速分布や濃度分布が、かなり精度よく再現できることがわかる。

4. 考察

図6、7はVanoniのRun3について、水深方向の k 、 ε 、 ν_t の分布を清水の場合の値と比較したものである。これらの図によると、流子懸濁により生じた鉛直方向の安定な密度勾配が乱れを抑制している様子を知ることが出来る。

図8、9は計算結果の中から ν_t と局所リチャードソン数 R_t 、混合距離 l と R_t との関係を取り出してプロットしたもので、図によると ν_t と R_t については従来得られているものと類似の関係であるが、

表1 水理条件

Run	Ⅲ	Ⅳ	I	Ⅱ	1	3	5	18	19	20	21	22
$h(\text{cm})$	4.0	4.5	4.0	4.5	8.7	7.4	7.8	14.0	7.2	14.0	7.2	9.0
$U_s(\text{cm/s})$	2.48	2.80	2.80	2.97	4.00	3.82	3.50	4.14	2.77	5.88	4.20	4.87
$U_m(\text{cm/s})$	48.4	51.7	58.2	59.7	44.1	87.2	89.0	78.9	57.8	103.3	70.7	71.2
$W_0(\text{cm/s})$	0.01	0.18	0.15	0.15	0.838	0.838	0.838	0.898	0.898	0.898	0.898	1.520
$C_m(\times 10^{-3})$	1.283	1.882	2.251	3.283	1.853	1.844	1.748	0.807	0.128	0.700	0.482	0.683
Z	0.01	0.18	0.14	0.18	0.53	0.97	1.13	0.84	0.79	0.42	0.51	0.85
Fdc	0.854	0.748	0.734	0.808	0.829	0.813	0.745	1.117	2.287	1.472	1.817	1.503

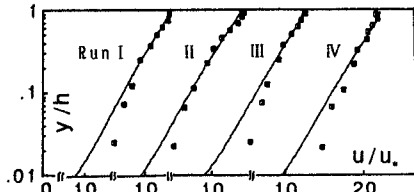


図2 流速分布(Run I ~ IV)

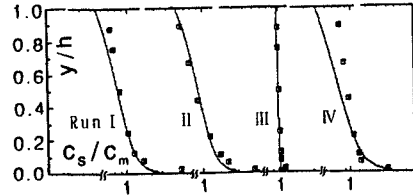


図3 粒子濃度分布((Run I ~ IV)

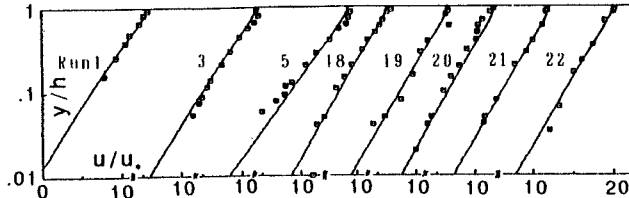


図4 流速分布(Vanoni Run 1 ~ 22)

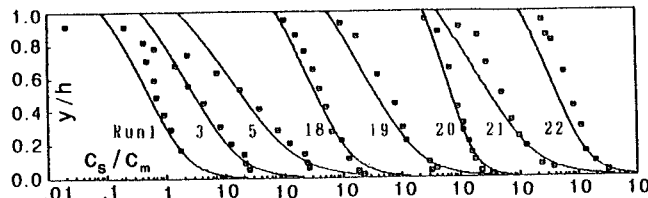


図5 粒子濃度分布(Vanoni Run 1 ~ 22)

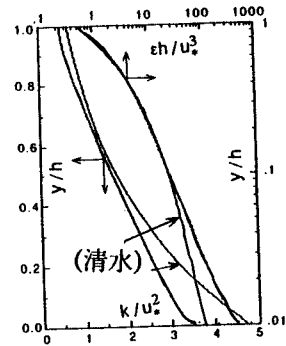


図6 k と ε の分布
(濁水と清水の比較例
Vanoni Run 3)

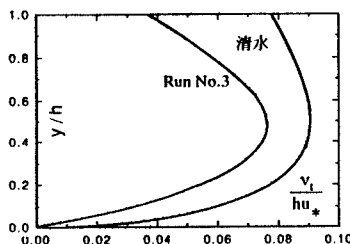


図7 ν_t の分布

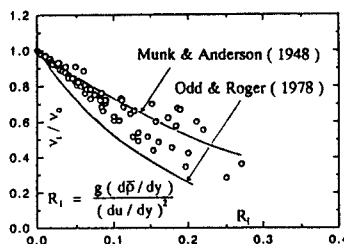


図8 ν_t と Ri との関係

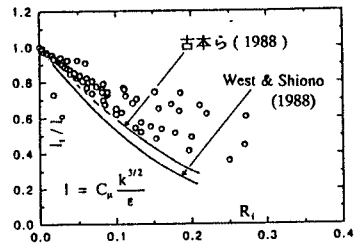


図9 l と Ri との関係

1に関しては R_i の影響が少し小さめにでている。

終わりに、本研究に関連する実験に協力された平成6年度九州工大卒業生の中村祐一君に感謝する。

参考文献

- 1) 福嶋, 第30回水理講演会論文集, 1987, PP.631~636
- 2) 福田, 福嶋, 第31回水理講演会論文集, 1987, PP.587~591
- 3) 岩佐他, 第33回水理講演会論文集, 1989, PP.595~600
- 4) Fujisaki et al, JHHE Vol.10 No.2 1992, PP27~37
- 5) 称津, 中川, 京大防災研年報, 第29号, B-2, 1986, PP.647~673