

II-322 浮遊砂を含む流れにおける移流分散

九州工大 正員 藤崎一裕
九州工大 学生員 大木宏之N T T 正員 林 秀樹
九州共立大 正員 栗谷陽一

1. まえがき

浮遊砂のある開水路流れにおける移流分散現象について検討した。流れの中に粒子が懸濁されていると、粒子濃度の鉛直方向の分布に基づいて水深方向に安定な密度勾配が生じる。この密度勾配は乱れの強度を減少させる方向に作用し、流速分布や粒子濃度分布に影響を及ぼす。このような流れの場合における縦分散現象について調べた。流れは開水路2次元等流とし、渦動粘性係数のモデルとしては混合距離モデルと $k-\varepsilon$ モデルの場合について検討した。また、水路底部への粒子の沈積はない場合を対象にした。

2. 基礎式

図1の様に流下方向に x 軸、水路底部より鉛直上方に y 軸をとり、常用の記号を用いて運動方程式及び粒子の保存則が以下の(1)、(2)式で表わされる。

$$0 = (1 + D\bar{C}_s) + \frac{d}{dy} \left(\bar{v}_t \frac{d\bar{u}}{dy} \right), \quad D = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \langle C_s \rangle \quad (1)$$

$$0 = \frac{d}{dy} \left(\beta \bar{v}_t \frac{dC_s}{dy} + \bar{w}_0 \bar{C}_s \right), \quad \beta = 1, \quad \bar{C}_s = \frac{C_s}{\langle C_s \rangle} \quad (2)$$

$$\langle C_s \rangle \equiv \int_0^1 C_s(\bar{y}) d\bar{y}$$

ここに、

$$\bar{u} = u/u_*, \quad \bar{y} = y/h, \quad \bar{w}_0 = w_0/u_*, \quad \bar{v}_t = v_t/hu_*$$

w_0 : 粒子沈降速度, ρ_s : 粒子密度, ρ_0 : 流体密度である。

渦動粘性係数については以下の2つの場合について検討した。

1) 混合距離モデル

このモデルでは乱れに及ぼす密度勾配の影響として、Monin-Obukhovの理論を用いる。^{1) 2)}

このとき

$$\bar{v}_t = \kappa \bar{y} (1 - \bar{y}) (1 + \alpha \bar{y} / \bar{L})^{-1} \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{u_*^3}{\kappa g D w_0} \frac{1}{h}, \quad \kappa = 0.4, \quad \alpha = 6.0 \quad (4)$$

$\bar{L}$ は一般流と粒子懸濁によるエネルギーの比に対応する。

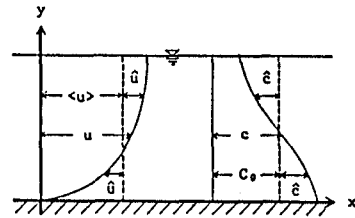


図1 座標系

2) $k-\varepsilon$ モデル

このモデルでは渦動粘性係数は次の様に与えられる。

$$\frac{d}{dy} \left(\bar{v}_t \frac{d\bar{k}}{dy} \right) + \bar{v}_t \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 + \frac{1}{F_{dc}^2} \bar{v}_t \frac{d\bar{C}_s}{dy} - \bar{\varepsilon} = 0 \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \left[\bar{v}_t \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 + (1 - C_{3\varepsilon}) \frac{1}{F_{dc}^2} \bar{v}_t \frac{d\bar{C}_s}{dy} \right] + \frac{d}{dy} \left(\bar{v}_t \frac{d\bar{\varepsilon}}{dy} \right) - C_{2\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{v}_t = C_\mu \frac{\bar{k}^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$F_{dc} = \frac{u_*}{\sqrt{Dgh}}, \quad \bar{k} = k/u_*^2, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon h/u_*^3$$

モデル定数はこの種の計算によく利用されている値を用いた($\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$)。³⁾ k の計算において、水面の境界条件の処理には衞津が提案した方法を用いた。また、 $C_{3\varepsilon} = 2.5$ とした。

分散係数はTaylorやElder⁴⁾による手法をそのまま用いて計算した。濃度分布を(8)式で仮定すると、分散係数 D_L は(9)式で与えられる。

$$C(\bar{y}) = C_0 (1 + k_1 \bar{x}_1) + \hat{C}(\bar{y}) \quad (8)$$

$$\bar{x}_1 = \bar{x} - \langle \bar{u} \rangle \bar{t}, \quad k_1: \text{const}$$

$$\hat{D}_L = D_L/hu_* = -\frac{1}{k_1} \int \hat{u} \hat{C} d\bar{y} = -\frac{1}{k_1 C_0} \int \hat{u} \int \frac{1}{\beta \bar{v}_t} \int \hat{u} d\bar{y}^3 \quad (9)$$

$$\hat{u} = \bar{u} - \langle \bar{u} \rangle$$

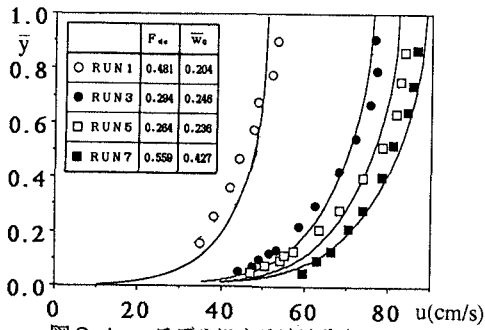


図2 k-εモデルによる流速分布

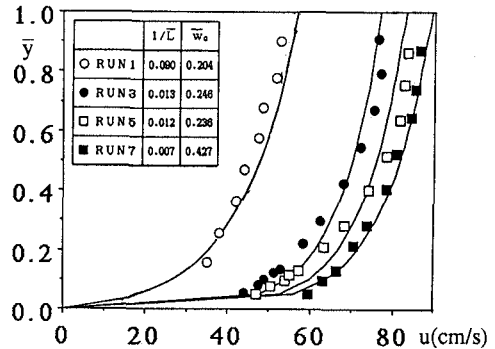


図3 混合距離モデルによる流速分布

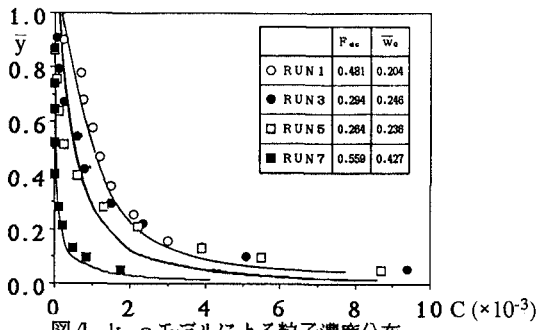


図4 k-εモデルによる粒子濃度分布

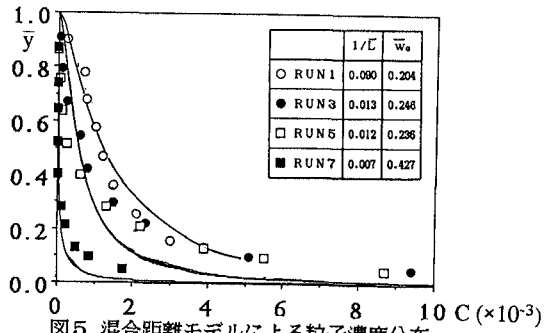


図5 混合距離モデルによる粒子濃度分布

3. 結果及び考察

それぞれのモデルを用いた浮流砂流れの計算値をVanoniの実験結果⁵⁾と比較した。図2～図5によると2つのモデルとも計算値は実測値をほぼ再現している。図6、7には(9)式で求められた分散係数を示す。図6、7には粒子懸濁による安定な密度勾配のために分散係数が増大していく様子が表われている。また、 $\bar{L}=F_{dc}^2/\bar{W}_0/\kappa$ の関係をを用いると、これら2つの結果は相互に関係づけられるが、図2～図5からも予想されるように両者の計算結果の差は小さい。

図7中にプロットした点は分散実験の実験値である。実験には長さ10m、幅40cmの水路に63～105μmの標準砂を0.0165～0.0735重量%に懸濁させて塩水をトレーサとして行なった。(水深3.6～4.2cm, 平均流速38～45cm/sec, 水路床勾配1/650～1/850)実験値には懸濁粒子径が均一でないための誤差が含まれているが計算値は実験値にほぼ近いといえる。終わりに本研究に協力された本学学生の上田 宏君、下木 哲君に感謝する。

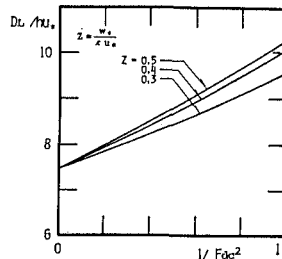


図6 D_L/hu_* と $1/F_{dc}^2$ との関係

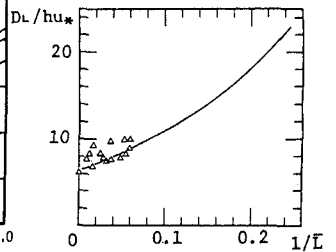


図7 D_L/hu_* と $1/L$ との関係

4. 参考文献

- 1) Itakura and Kishi: P. ASCE, Vol. 106, No. HY8, 1980, pp. 1325-1343
- 2) Hino and Hung: J. Hydrosci and Hydro. Eng Vol. 1, No. 1, 1983, pp. 9-36
- 3) 福嶋: 第30回水理講演会論文集, 1986, 2, pp. 631-636
- 4) Elder, J. W.: J. Fluid Mech. 1959, 5 pp. 544-560
- 5) Vanoni and Nomicos: Trans. ASCE, Vol. 125, 1960