

傾斜底面上での浮泥流の挙動に関する研究 (その8)

—浮泥の流動過程のシミュレーションについて—

九州大学大学院 学生員 ○ 渡辺亮一
九州大学工学部 正 員 楠田哲也

1. 緒言

粘土・シルト等の微細な粒子から構成されている底質が、広範囲にわたって多量に沈積している水域では、水の流れが停滞する時や波浪が治まった直後に、上層懸濁液層よりも高濃度の浮泥層が水底面上に形成される。この浮泥層は、波や流れによる外力を受けて、あるいは底面が傾斜していることによって水平方向へ流動し始める。本研究では、このようにして発生する浮泥の水平方向への流動を、上層懸濁液層と浮泥層との密度差に起因する密度流と考えて、現象を表す基礎式を導き、得られた式をもとに数値解析を試み、若干の知見を得たので報告する。

2. 現象を表す基礎式

図1のように座標軸をとり、紙面に垂直な方向には事象は一樣として、現象を二次元的に考察する。重力加速度を g 、傾斜底面が水平軸となす角を θ 、 x, z 方向の流速を u, w (粒子系の成分を表す場合は u_s 、流体系の成分を表す場合は u_f)、浮泥層内での分散係数を K (粒子系の成分を表す場合は K_s 、流体系の成分を表す場合は K_f)、浮泥層底面での濃度、せん断応力を C_b, τ_b 、浮泥層と上層懸濁液層の界面での濃度、せん断応力を C_i, τ_i 、上層懸濁液層の濃度 (初期濃度) を C_a とすると、流体の基礎方程式は式 (1) ~ (4) で表される。

[連続の式]

$$\text{粒子系: } \frac{\partial}{\partial x} (1 - \varepsilon) u_s + \frac{\partial}{\partial z} (1 - \varepsilon) w_s = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial (1 - \varepsilon)}{\partial z} \right) \quad (1) \quad \text{流体系: } \frac{\partial \varepsilon u_f}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon w_f}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (2)$$

<粒子系+流体系>の運動方程式

$$(X \text{ 方向}) \quad \frac{\partial}{\partial z} u \{ \rho_s (1 - \varepsilon) w_s + \rho_f \varepsilon w_f \} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{H(x)} R (C - C_a) g dz + R (C - C_a) g \sin \theta + \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3)$$

$$(Z \text{ 方向}) \quad 0 = - \frac{\partial p}{\partial z} + R (C - C_a) g \cos \theta \quad (4)$$

ただし、 $R = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}$ としている。

3. 浮泥層内での沈降速度・分散係数について

図2は、浮泥層底面での無次元化した沈降速度とずり速度の関係を示している。この図から、沈降速度とずり速度の関係は、式 (5) および (6) として表されることが分かる。

$$\frac{W_d}{W_s} = 1 - \frac{D}{D_{cd}} \quad D < (1 - \alpha) D_{cd} \quad (5) \quad \frac{W_d}{W_s} = \alpha \left(\frac{D}{D_{cd}} \right)^{1.2} \quad D_{cd} > D \geq (1 - \alpha) D_{cd} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha = 0.1$ 、 D_{cd} は巻上げに関する限界ずり速度、 $D_{cd} = 0.4 (s^{-1})$ である。厳密に言えば、このようにして得られる沈降速度は、浮泥層内の沈降速度とは異なるが、ここではこの沈降速度を浮泥層内の粒子の沈降速度と見なして計算を行っている。

一般的に、壁面乱流中での分散係数は $z^2 D$ の関数として表現される (ここで、 z は底泥層表面からの距離)。この

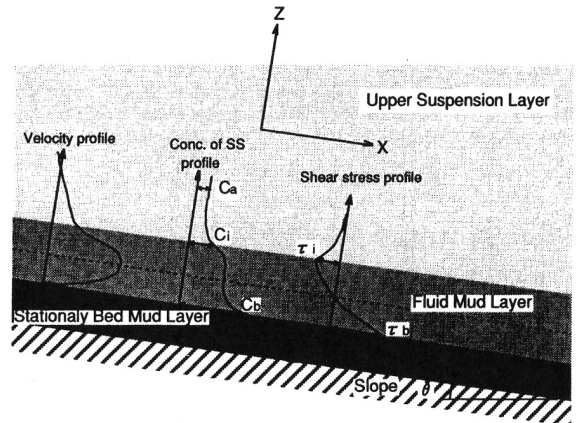


図1 シミュレーションモデルの概念図

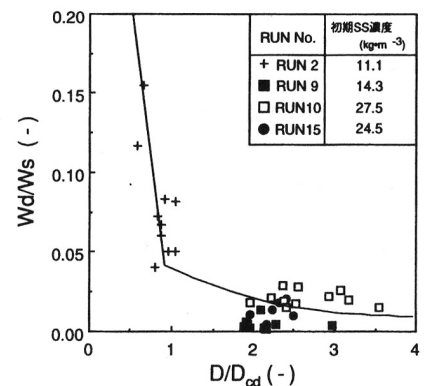


図2 沈降速度とずり速度の関係

表現方法にしたがい、かつ浮泥層内の懸濁物質濃度を考慮に入れば、浮泥層内の分散係数は図3(a)に表すようになり、式(7)の形で表される。

$$K_s = 4.6z^2 D \left(\frac{C_0}{C} \right)^{1.2} \quad (7)$$

ここで、 C_0 は有効応力発生濃度 ($31.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) としている。

浮泥層内においてせん断応力が0となる面(層内中央部付近)から上側の領域では、分散係数は図3(b)に示すようになり、式(8)の形で表現される。この式から、せん断応力が0となる点から $1.2H$ 離れたところに仮想壁面が存在することがわかる。

$$K_s = 4.6(2.2H - z)^2 D \left(\frac{C_0}{C} \right)^{1.2} \quad (8)$$

4. シミュレーションの結果について

数値解析には、式(1)、(3)、(4)を差分化した式と、浮泥層内の粒子の沈降速度として式(5)、(6)を、粒子の分散係数として式(7)、(8)を用いている。また、浮泥の流動開始点近傍の仮想的な初期条件として図4(流速分布と懸濁物質濃度分布)を与えている。図5は、斜面勾配 θ を 0.196 (rad) 、上層懸濁液層のSS濃度(初期濃度 C_0)を $27.5 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3})$ とし、境界条件として各地点における浮泥層底面でのずり速度(D_b)を与え、数値解析を行った結果である。この図から、実験結果(●)および計算結果(—)は比較的良好に一致していると考えられ、斜面流下方向に向かって浮泥層厚さが厚くなっていく様子が表現できていることが分かる。

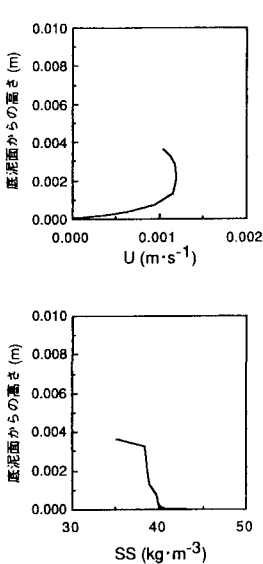


図4 仮想起点(0cm近傍)での流速・懸濁物質濃度分布

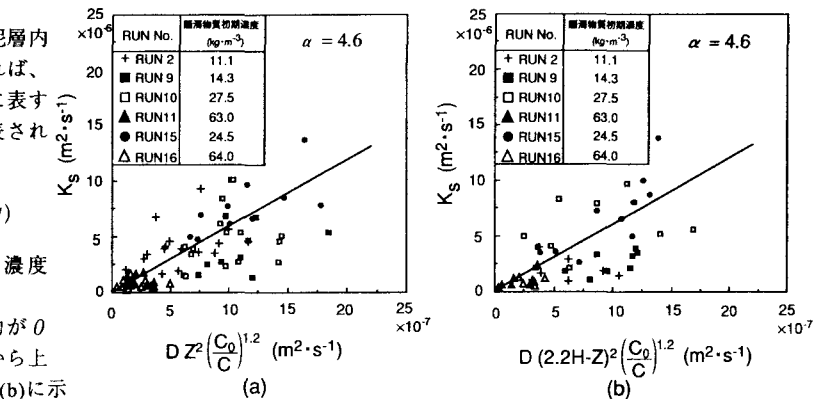


図3 浮泥層内での分散係数 K_s について

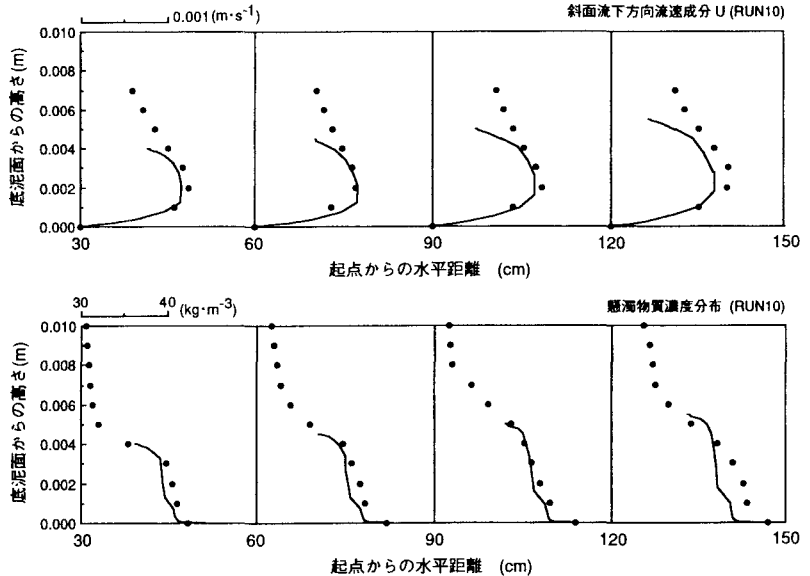


図5 数値解析の結果(斜面勾配 $\theta = 0.196 \text{ rad}$, 初期濃度 $C_0 = 27.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

[参考文献]

- 1) Kusuda, T., Watanabe, R., Futawata, T., and Yamanishi, H. Fluid mud movement on an inclined bed, in Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, A.J. Metha, Editor, Coastal and Estuarine Studies, No. 42, American Geophysical Union, Washington D.C., 281-294, 1993
- 2) Fukushima, Y., and Watanabe, M. Numerical Simulation of Density Underflow by the $k-\epsilon$ Turbulence Model, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 8, No. 1, 31-40, October, 1990
- 3) Roberts, G.O., Computational Meshes for Boundary Layer Problems, Proc. Second Int. Conf. Num. Methods Fluid Dyn., LECTURE NOTES IN PHYSICS, vol. 8, Springer-Verlag, New York, 171-177, 1971
- 4) Dale A. Anderson, Joh C. Tannehill, Richard H. Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 249-251, 1984