

九州大学大学院 学生員 ○渡辺亮一

九州大学工学部 正会員 楠田哲也

1. はじめに 粘土・シルト等の微細な粒子からな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、底面上に非常に高濃度の浮泥層が形成される。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。この浮泥の流動によって、底質が輸送されることにより、港湾内の航路や泊地の埋没といった問題が引き起こされる。

現在に至るまでに、浮泥の物的特性やその挙動を解明することを目的とした研究は、広範囲な領域にわたって行なわれている。室内での実験による研究としては楠田らの研究¹⁾、感潮域を対象とした研究としては楠田・二渡の研究²⁾、また沿岸域を対象としたものとしてはSmith and Kirbyの研究³⁾の他多数見受けられる。しかしながら、浮泥の挙動は極めて複雑な非線形現象であるために、何れの研究においても、浮泥による微細粒子群の輸送過程や浮泥層の形成機構および保持機能等を完全に説明しえていないのが実情である。また、浮泥の流動状態を的確に表現できるモデル³⁾も数少ない。そこで本報では、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浮泥層内の流動現象に関して考察を加え、若干の知見を得たので報告する。

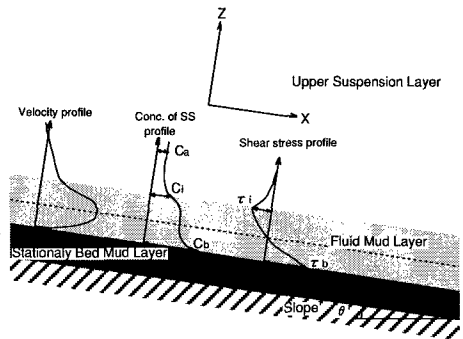


図1 浮泥流の概念図

2. 基礎式 図1のように座標軸をとり、まず紙面に垂直な方向には事象は一様として、現象を2次元的に考察する。浮泥層厚は上層懸濁液層の水深に較べて十分に薄いものと考え、層内には境界層近似およびブーシネスク近似が適用可能であると仮定する。このとき、浮泥層内の流動に関する基礎式は式(1)～(4)で表される。

$$\text{連続の式} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$x \text{ 方向の運動方程式} \quad \frac{\partial \rho_m u}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_m u w}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{H(x)} R g C dz + R (C - C_a) g \sin \theta + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$z \text{ 方向の運動方程式} \quad \frac{\partial \rho_m w}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho_m w^2}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} + R g \cos \theta + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\text{懸濁物質の保存式} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial (w' - w_s) C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (4)$$

ここで、 u, w は x, z 方向の流速成分、 C は浮泥層内の懸濁物質濃度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、 C_a は上層懸濁液層の濃度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、 $R = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}$ 、 ρ_s は粒子の密度、 ρ_f は流体の密度、 $\rho_m = (1 - \epsilon)\rho_s + \epsilon\rho_f$ 、 ϵ は空隙率、見掛けの沈降速度 w は $w = \epsilon w' + (1 - \epsilon)w_s$ であり、 w', w_s はそれぞれ液相および固相の鉛直方向流速成分、 θ は斜面勾配、 g は重力加速度を表している。ただし、浮泥層中では $\epsilon \gg (1 - \epsilon)$ とみなせるので $w \approx w'$ としている。式(2)、(4)を $b \leq z \leq H(x)$ の範囲で積分し、層平均方程式を求めると、式(5)、(6)となる(水表面で $\tau_{xz} = 0$ 、浮泥層底面で $|\rho_m u w|_{z=b} \neq 0$ と仮定している)。ただし、 $z=b$ は浮泥層底面を、 $z=H(x)$ は水表面を表している。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z=b}^{z=H(x)} \rho_m u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z=b}^{z=H(x)} \rho_m u^2 dz = - \frac{\partial}{\partial x} Rg \int_{z=b}^{z=H(x)} dz + Rg \sin \theta \int_{z=b}^{z=H(x)} (C - C_b) dz - \tau_b + \rho_m u w_{z=b} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z=b}^{z=H(x)} C dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z=b}^{z=H(x)} u C dz = - w_s C_b - K \frac{\partial C}{\partial z} \bigg|_{z=b} \quad (6)$$

3. 浮泥層に相似仮説を適用する。 図2は、RUN2,9,10,15に関して、流速 U をその断面内での最大流速 U_{max} で除して無次元化した値と、底面からの高さを最大流速点での高さ h で除して無次元化した値との関係を示している。この図から、上流端から30cm、60cm、90cm、120cmの各測定地点における流速分布は、どのRUNについてもほぼ同じ形状を示していることがわかる。このことから、浮泥層内の流速分布は斜面流下方向に沿って相似形であると近似しても差し支えない。また、図3は、RUN2,9,10,15に関して、層内の懸濁物質濃度 C を浮泥層底面上での懸濁物質濃度 C_b で除して無次元化した値と、底面からの高さを最大流速点の高さ h で除して無次元化した値との関係を示している。この図より、濃度分布も流速分布と同様に斜面流下方向に向かって相似形であることがわかる。以上の結果より、浮泥層内においては流れの方向に形状係数が変わらないことが解る。今後この結果を用いて層内の形状係数を求めていく予定である。

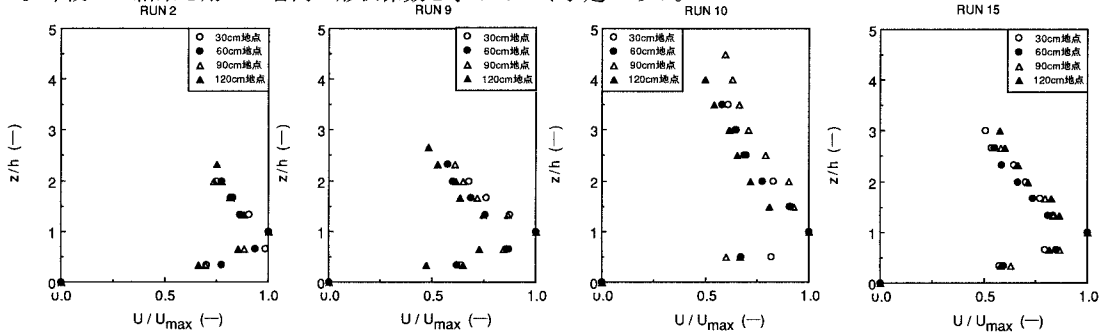


図2 層内の流速分布（無次元表示）

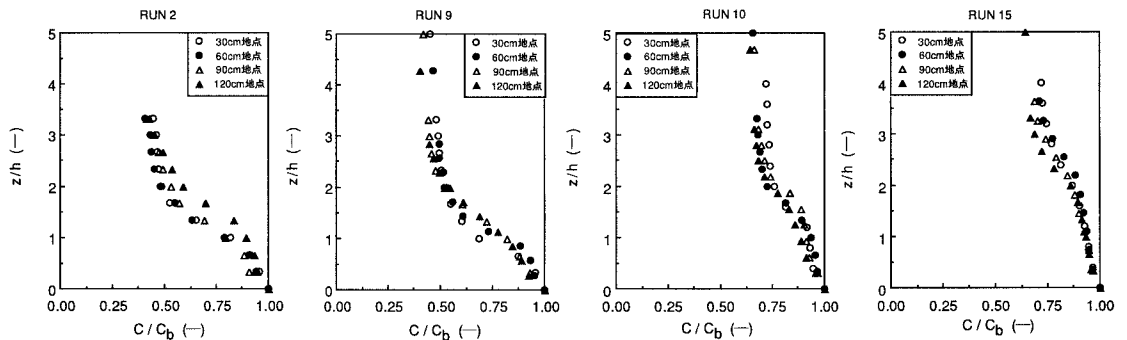


図3 層内の濃度分布（無次元表示）

【参考文献】

- 1) Kusuda, T., Watanabe, R., Futawatari, T., and Yamanishi, H.: Fluid mud movement on an inclined bed, in Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, A. Metha, Editor, Coastal and Estuarine Studies, No.42, American Geophysical Union, Washington D.C., 281-294, 1993.
- 2) Kusuda, T. and Futawatari, T.: Modeling of suspended sediment transport in a tidal river, *ibid*, 504-519, 1993.
- 3) Odd, N.V.M., Bentley, M.A., and Waters, C.B.: Observations and analysis of the movement of fluid mud in an estuary, *ibid*, 430-446, 1993.
- 4) Smith, T.J. and Kirby, R.: Generation, stabilization and dissipation of layered fine sediment suspension. *Journal of Coastal Research*, SI(5), 63-73, 1989.
- 5) 堀嶋祐介・Gary Parker: 自己加速する泥水流に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp253-257, 1985.
- 6) Pantin, H.M.: Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: phase-plane analysis, with criteria for autosuspension, *Marine Geology*, Vol.31, pp59-99, 1979.