

立命館大学大学院 学生員 ○伊藤隆郭
立命館大学理工学部 正会員 江頭進治
立命館大学理工学部 曹 志先

1. はじめに 浮遊砂の基準面濃度に関する研究は、数多く行われている^{1)~5)}。しかし、次のような問題を抱えている。一つは、基準面位置の定義である。研究者により定義が曖昧で、例えば、慣用的に水深の数%程度とするか、若しくは何らかの運動学的条件を用いて議論されており、それらの値の物理的な解釈は難しい。もう一つは、基準面濃度の実験データに関する問題である。一般に、基準面位置は濃度勾配が非常に大きい領域にあるため、測定位置が僅かに、例えば、粒子径程度にずれたとしても濃度はかなり異なる。以上のような問題点のために、浮遊砂の基準面濃度に対する理解を深めるには非常に困難な状況にある。著者ら^{6), 7)}は、土石流から掃流砂流にまたがる流れを力学的に統一的な立場から議論してきた。浮遊砂流の現象を掃流砂流の現象から拡張して捉えることができるならば、流れは次のような構造をもつはずである。すなわち、下層では、粒子が層流流動し、この上層はレイノルズ応力が卓越するような領域になるはずである⁸⁾。本研究においては、このような観点から浮遊砂の基準面濃度に関する解釈を行う。

2. 二層モデル 流れの上層を乱流拡散が卓越する層、下層を粒子が層流流動する層として、図-1 のように流れを模式化する。ここに、 c は粒子濃度、 c_s は静止堆積層濃度、 h_f は乱流層の厚さ、 h_t は全流動深、 θ は路床と水平とのなす角度、 τ はせん断応力である。図-1 を参照して、粒子が層流的な流動をするものを土石流とすると、 $z_a \rightarrow h_t$ は土石流に対応し、 $h_f \rightarrow h_t$ は一般の浮遊砂流に対応する。議論を単純化するために、定常・等流の流れ場を想定すれば、上層 ($z_a \leq z \leq h_t$) および下層 ($0 \leq z \leq z_a$) の運動量保存則は、江頭らの構成則^{6), 7)}を適用して次式のように表される。

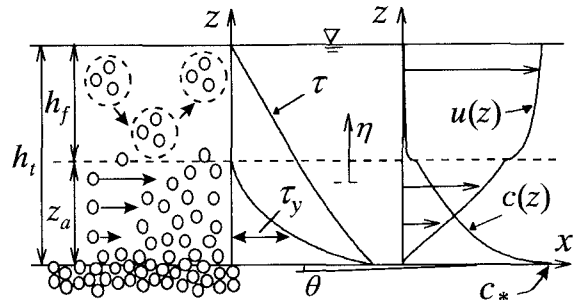


図-1 流れのモデル

$$z_a \leq z \leq h_t \text{ において, } \tau(z) = \int_z^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz \quad (1), \quad p_w(z) = \int_z^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz \quad (2)$$

ここに、 ρ_m は混合物の密度で、 σ を粒子の密度、 ρ を流体の密度とすれば、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ 、 g は重力加速度、 $p_w(z)$ は粒子が浮遊している時の静水圧である。

$$0 \leq z \leq z_a \text{ において, } \tau_y(z) + \tau_f(z) + \tau_d(z) = \int_{z_a}^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz + \int_z^{z_a} \rho_m g \sin \theta dz \quad (3)$$

$$p_s(z) + p_w(z) + p_d(z) = \int_{z_a}^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz + \int_z^{z_a} \rho_m g \cos \theta dz \quad (4)$$

ここに、 τ_y は降伏応力 ($= p_s \tan \phi_s$)、 ϕ_s は粒子の内部摩擦角、 τ_d は粒子の非弾性衝突による応力、 τ_f は間隙流体のせん断による応力、 p_s は静的圧力、 p_d は粒子の非弾性衝突の前後において保存されるエネルギー、 p_w は間隙水圧で、 $p_w(z) = \int_{z_a}^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz + \int_z^{z_a} \rho g \cos \theta dz$ である。式(3)において、 τ_f に流体粘性による応力を加えると次式のように表される。

$$\tau_f = \rho(1-c)l_0^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z) + \rho(1-c)\nu_f (\partial u / \partial z), \quad l_0 = \sqrt{k_f} \{(1-c)/c\}^{1/3} d \quad (5)$$

右辺第一項、第二項はそれぞれ粒子間の間隙の乱れによるレイノルズ応力、粘性応力である。ここに、 l_0 は間隙流体の運動量輸送の混合距離であって、粒子径あるいは粒子間隙のスケールである。 ν_f は流体の粘性係数、 k_f は形状係数比 ($= 0.16$)、 d は粒子径である。式(1)、(2)および(5)を考慮して、式(3)、(4)を変形すると、下層に対して次式が得られる。

$$p_s(z) \tan \phi_s + \tau_f(z) + \tau_d(z) = \int_z^{h_t} \rho \{ (\sigma / \rho - 1)c + 1 \} g \sin \theta dz \quad (6)$$

$$p_s(z) + p_d(z) = \int_z^{z_a} \rho(\sigma/\rho - 1)cg \cos\theta dz \quad (7)$$

式(6), (7)を連立して解くと, 下層における流速および粒子濃度分布が求められる。上層においては, 議論を簡単にするために, 流速分布には対数型のもの⁹⁾を用い, 濃度分布には, Rouse 型のものを用いるものとする。以上より, 全層にわたる流速および粒子濃度分布が求められるが, 層流層厚 z_a および z_a における粒子濃度 $c(z_a)$ が未知数となる。そこで, d'Alembert の収束判定法のもとで Relaxation 法による収束計算を行い, 解を求める。なお, $z = z_a$ において流速および濃度は, 仮想原点⁹⁾を用いて絶対値のみを連続させて計算している。なお, $z = z_a$ の位置は乱流拡散の卓越する層の乱流応力と粒子が層流流動する層の流動応力とが連続する位置であり, 物理的意味が明瞭である。

3. 基準面濃度および基準面位置 図-2 は, 二層モデルを用いて得られた $c(z_a)$ の結果を示したものである。ここに, c_a は基準面濃度, u_τ は摩擦速度で, $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin\theta}$ である。 w_0 は粒子の沈降速度である。図には, 基準面濃度に関する実験値^{2), 3), 9), 10), 11)}と従来より提案されている代表的な基準面濃度の表示式²⁾⁻⁵⁾も載せている。計算においては, 相対水深 $h_t/d = 80$ とし, 式(6), (7)に含まれるパラメータは既往のものと同じ値を用いている。上層においては, カルマン定数 $\kappa = 0.2$, 拡散係数と渦動粘性係数との比 $\beta = 1.2$, 粒子の沈降速度式は Rubey の式を用いている。計算値は, 実験値の範囲のほぼ中央を通過している。また, $c(z_a)$ に対する粒子径の効果が明瞭に現れ, 粒子径が小さくなると $c(z_a)$ は小さくなっていく。これは, 粒子径が小さくなると, 上層の濃度が一様化して, 下層の層厚が増加し, その結果, $z = z_a$ における応力が減少して $c(z_a)$ が小さくなるためである。図-3 は, 図-2 に示した計算値と等しい条件で求めた z_a/h_t の計算結果である。ここに, $\tau_* = u_\tau^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}$ である。比較のため, 慣用的に用いられてきた値である $0.05h_t$, $0.10h_t$ も示している。これによれば, 粒子径が小さくなると z_a の値は増加し, 慣用的な値よりも大きい値をとる。

4. おわりに 浮遊砂流の基準面濃度と基準面位置の決定法を二層モデルを用いることによって検討した。乱流拡散が卓越する上層と粒子が層流で流動する下層との境界面に着目し, その位置を基準面高さと見なし, 境界面における粒子濃度を基準面濃度として, 従来より蓄積された実験データおよび過去の代表的な研究成果と比較した。その結果, 本モデルによって概ね浮遊砂流の基準面濃度と基準面高さを同時に評価できることが示唆された。これは, 土石流から掃流砂流にまたがる領域から浮遊砂を含む流れの領域までを一つの力学機構によって説明できるという可能性を示唆するものである。

本研究は, 文部省科研費基盤研究 B(代表 江頭進治)の補助を受けている。ここに記して感謝します。

参考文献 1)Einstein, H. A.: Soil Conservation Service, Tech. Bull. 1025, 1-71, 1950, 2)Lane, E. W. and A. A. Kalinske: Trans., A. G. U., 637-640, 1939, 3)芦田・道上: 京大防災研年報, 13B-2, 233-242, 1970, 4)Kishi, T. and T. Itakura: Proc., ASCE, HY8, 1332-1333, 1980, 5)芦田ら: 京大防災研年報, 25B-2, 401-416, 1982, 6)江頭ら: 水工学論文集, 41, 789-794, 1997, 7)Egashira, S. et al.: 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazard Mitigation, ASCE, 340-349, 1997, 8)江頭ら: 京大防災研年報, 37B-2, 359-369, 1994, 9)Vanoni, V. A.: Trans., ASCE, 2267, 67-133, 1944, 10)加藤ら: 第 24 回年次学術講演会講演集, 2, 223-226, 1969, 11)Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson: Professional Paper 462-I, U. S. G. S., 1966.

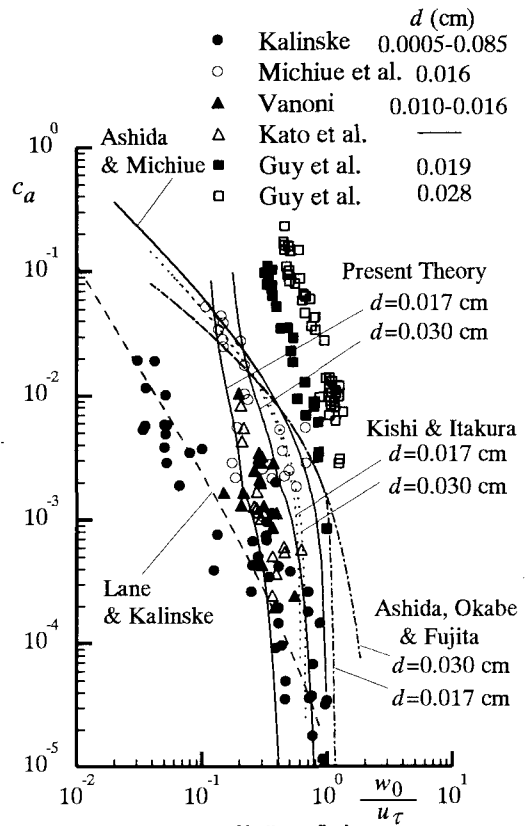


図-2 基準面濃度

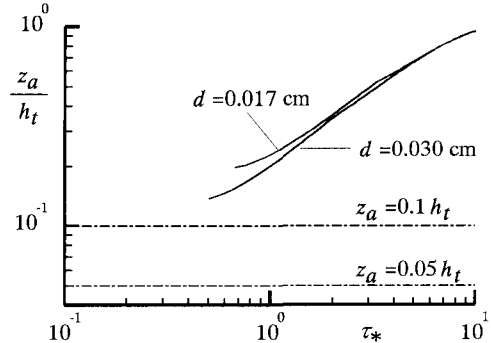


図-3 基準面位置