

II-219 二層モデルによる浮遊砂の基準面濃度に関する研究

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*
 鳥取大学・地域共同研究センター 正会員 宮本邦明** 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、そ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、測定位置の僅かなずれによって、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、流れは次のような二層構造⁸⁾をもつはずである。すなわち、下層では、粒子が層流運動し、この上層はレイノルズ応力が卓越するような領域が形成される。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物理的な解釈を行う。

2.二層モデル 流れの上層を乱流拡散が卓越する層、下層を粒子が層流運動する層として、図-1のように流れを模式化する。ここに、 c は粒子濃度、 c_* は静止堆積層濃度、 h_f は乱流層の厚さ、 h_t は全流动深、 θ は路床と水平とのなす角度、 τ はせん断応力である。簡単のために、定常・等流の流れ場を想定すれば、上層および下層の運動量保存則は、江頭らの構成則^{6), 7)}を適用して次式のように表される。

上層 ($z_a \leq z \leq h_t$) において、

$$\tau = \int_z^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz \quad (1), \quad p_w = \int_z^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz \quad (2)$$

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 は粒子が浮遊している時の静水圧である。

下層 ($0 \leq z \leq z_a$) において、

$$p_s \tan \phi_s + \tau_f + \tau_d = \int_z^{z_a} \rho \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} g \sin \theta dz \quad (3)$$

$$p_s + p_d = \int_z^{z_a} \rho (\sigma/\rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (4)$$

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である。なお、 τ_f には流体粘性による応力を加えている。式(3)、(4)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、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 $c(z_a)$

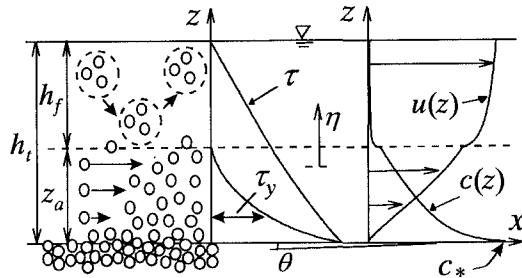


図-1 流れのモデル

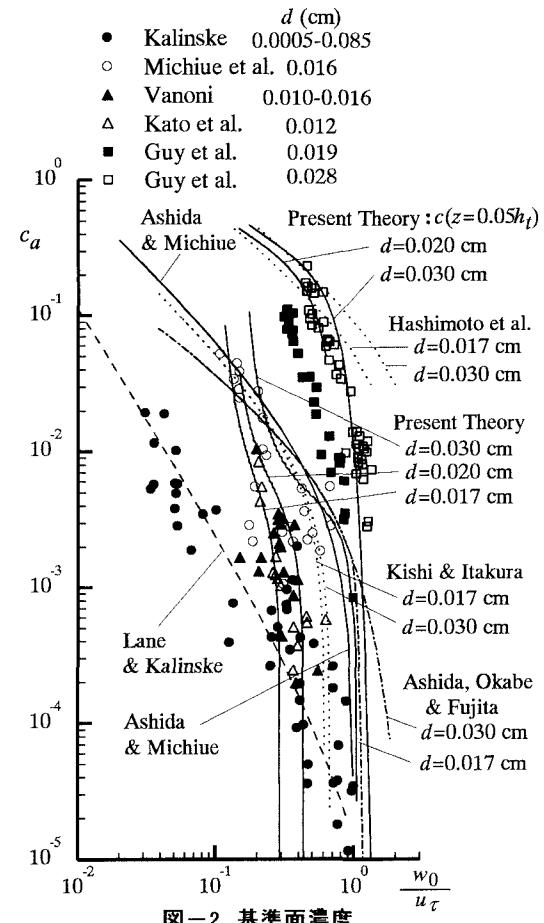


図-2 基準面濃度

Key words : reference sediment concentration, reference level, suspended load, constitutive equations

* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 TEL. 077-561-2732 FAX 077-561-2667

** 〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南4-101 TEL. 0857-31-5686 FAX 0857-31-5687

が陽には求められない。そこで, d'Alembert および Raabe 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^⑥を用いて絶対値のみを連続させて計算している。なお, $z = z_a$ の位置は上層の乱流応力と下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に関する解釈 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_t は摩擦速度で、 $u_t = \sqrt{gh_t \sin\theta}$ である。 w_0 は粒子の沈降速度である。図には、実験値^{2), 3), 9), 10), 11)}と代表的な表示式^{2)-5), 12)}も載せている。計算においては、相対水深 $h_t/d = 80$ 、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。計算値においては、 $c(z_a)$ 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 $c(z_a)$ は小さくなっている。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。図には、慣用的な 5% 水深における濃度も示している。 $c(z_a)$ の結果と比較すれば、5% 水深の位置を基準面位置とすると、 c_a が過大に見積もられることが分かる。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、 $\tau_* = u_t^2 / [(\sigma/\rho - 1)gd]$ である。比較のため、慣用的な値も示すとともに、上層が清水であるときの z_a/h_t の値も示している。図には、 z_a/h_t に対する粒子径の影響が現れているため、その影響を検討する。簡単のために上層および下層における濃度を一様として、それぞれ c_w および c_s とおくと z_a/h_t は、河床における応力の釣り合いから次式のように求められる。

$$\frac{z_a}{h_t} = \frac{\tan\theta / (\tan\phi_s - \tan\theta) \{ (\sigma/\rho - 1)c_w + 1 \}}{(\sigma/\rho - 1) \{ \tan\theta / (\tan\phi_s - \tan\theta) c_w + c_s \}} \quad (5)$$

式(5)と $c(z_a)$ の結果を考慮すれば、粒子径が小さくなると z_a/h_t が大きくなる。図-4 は、本モデルによって求められる浮遊砂量 $q_s = \int_{z_a}^{h_t} c u dz$ と掃流砂量 $q_b = \int_0^{z_a} c u dz$ の比である。図には、比較のため、芦田・道上らの式^{3), 13)}を用いて形式的に得られた結果も示している。これによれば、粒子径の減少とともに掃流砂量に対する浮遊砂量の比が減少しており、従来の成果より求められる結果と逆の結果が得られている。これは、粒子径の減少に伴って z_a/h_t が増加して、層流流動する流砂量が増加するためであると推察される。

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および流砂量比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。流砂量比については、従来の成果より得られる結果と逆の結果が得られた。これについては更に検討する必要がある。

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, 12)平野・橋本ら:水工学論文集,
 42, 1069-1074, 1998, 13)芦田・道上:土木学会論文報告集, 206, 59-69, 1972.

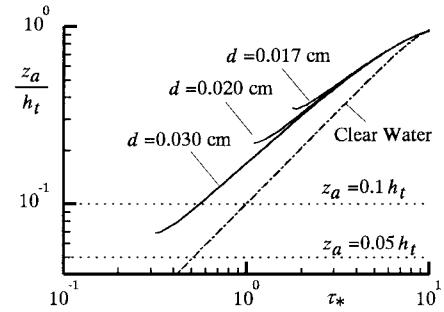


図-3 基準面位置

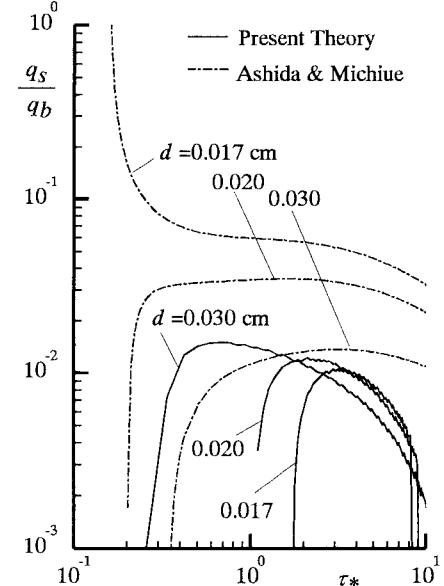


図-4 浮遊砂量と掃流砂量の比