

立命館大学理工学部 学生員 〇衛藤祐介  
立命館大学大学院 学生員 内海敦郎  
立命館大学理工学部 正会員 伊藤隆郎

立命館大学理工学部 正会員 江頭進治  
立命館大学大学院 学生員 黒田尚吾

**1.はじめに** 江頭らの研究によれば、土石流から掃流砂流にまたがる広い流れの領域に対して、流れの特性値を合理的に説明できる段階にきている<sup>1)</sup>。ところが、現地の土石流の観測データや微細粒子を伴う流れの水路実験において得られるデータによると、流れは全流動層 $h_t$ と砂粒子径 $d$ の比である相対水深 $h_t/d$ が $10^0 \sim 10^3$ のオーダーにまたがる広い領域にあり、特に流れの規模が大きい流れにおいては、上述の流れとは異なる構造をもつことが示唆されている<sup>2), 3)</sup>。そこで、江頭らの土石流の構成則を用いて、幅広い流れの領域まで統一して説明することを目的として、本研究においては、平衡勾配に及ぼす砂粒子径の影響について検討する。

**2.水路実験** 実験には長さ12m、幅5cmの可変勾配式矩形断面水路を用いている。上流端より定期的に給水および給砂を行い、定常状態の移動床上の土石流を形成させている。相対水深（流れの規模）を $10^0 \sim 10^2$ のオーダーの範囲で変化させられるように粒子径 $d = 0.029$  (cm)の微細砂を用い、混合物の流量を変化させて実験を行なっている。

図-1は平衡勾配と輸送濃度の関係である。同図には、本研究で得られたデータと、過去に江頭らによって得られたデータ<sup>4), 5)</sup>を載せてある。粗粒子( $d = 0.218$  (cm))のデータにおいては、砂粒子がほぼ層流的に運動するため、単位幅流量が $q_m = 50 \sim 300$  (cm<sup>2</sup>/s)の範囲において、輸送濃度は平衡勾配に対して、一意的な関係にある。これに対して、 $d = 0.029$  (cm)のデータにおいては、 $q_m \approx 10$  (cm<sup>2</sup>/s)のケースは、粗粒子のデータのものと同様の傾向を見せるが、単位幅流量を $q_m \approx 30$  (cm<sup>2</sup>/s)、 $50$  (cm<sup>2</sup>/s)と増加させていくにつれて輸送濃度が大きくなっている。図には粗粒子の流れに対して流速・粒子濃度を数値的に解くことによって得られる解（厳密解）<sup>1)</sup>を示している。この結果と、 $d = 0.029$  (cm)のデータを比較すると、流量の増加に伴い、江頭らの構成則を適用した計算値と大きいズレが生じている。粒子が層流運動すると仮定して求められた構成則では、これらの流れの説明が困難であることがわかる。図-2、図-3、および図-4は平衡勾配 $10^\circ$ 程度のときの $d = 0.029$  (cm)の流速分布を示している。これによると、流量の小さいときは、比較的流速の変動が小さいが、流量が増加すると、水面近傍における流速の変動が大きい。

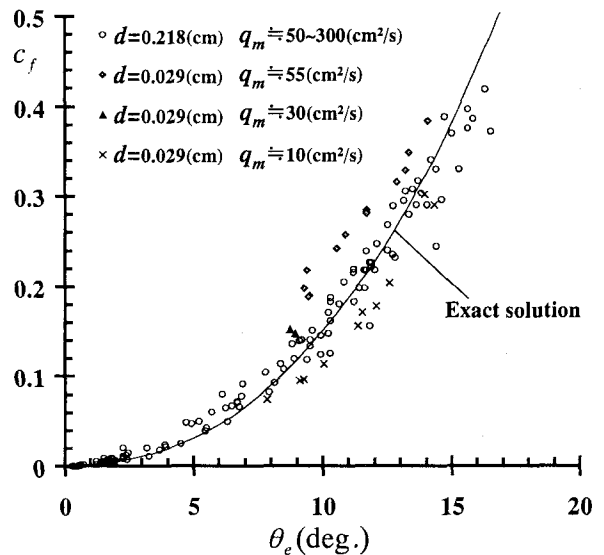


図-1 平衡勾配と輸送濃度の関係

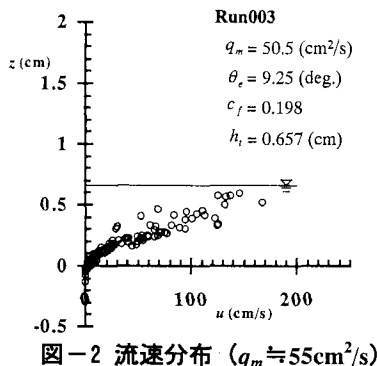


図-2 流速分布 ( $q_m \approx 55$  cm<sup>2</sup>/s)

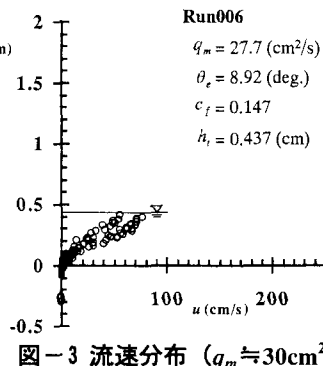


図-3 流速分布 ( $q_m \approx 30$  cm<sup>2</sup>/s)

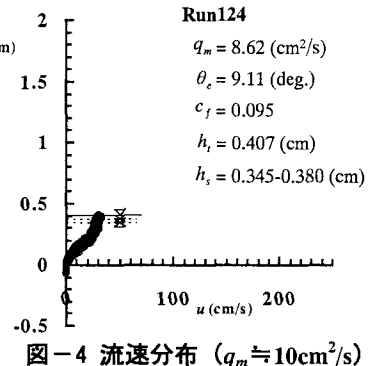


図-4 流速分布 ( $q_m \approx 10$  cm<sup>2</sup>/s)

**3. 実験データの解析** 2.で見られるように、 $d = 0.029(\text{cm})$ の実験データにおいては、流量の増加とともに、輸送濃度が増加し、粗粒子を伴う流れとは異なることが明らかになった。これに対して、江頭ら<sup>4)</sup>は、流れを2層に分け、上層においては乱流拡散が卓越し、下層においては、粒子が層流運動するものとして、2層モデルを提案し、平衡勾配を次のように導いている。

$$\tan \theta'_e = (h_s/h_t) \cdot (\sigma/\rho - 1) \bar{c} \tan \phi_s / \{(\sigma/\rho - 1) \bar{c} + 1\} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma$ は固体粒子の密度、 $\rho$ は水の密度、 $\phi_s$ は粒子間の摩擦角、 $\bar{c}$ は $\int_0^h c dz/h_t$ である。この平衡勾配( $\theta'_e$ )と粗粒子の流れにおける平衡勾配( $\theta_e$ )の比を平衡勾配比と定義すると、式(1)より、 $\tan \theta'_e / \tan \theta$ は図-5を参照すると、粒子が層流運動する層の全水深に対する比(層流流動層厚比)に対応している。次に流れの規模を表すパラメータとして、次のようなレイノルズ数を定義する。江頭らの構成則<sup>1)</sup>によると、せん断応力は次式のように表される。

$\tau = p_s \tan \phi_s + k_d \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z) + k_f \rho \{ (1 - c)^{5/3} / c^{2/3} \} d^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z)$

$= p_s \tan \phi_s + \rho (f_d + f_f) d^2 |\partial u / \partial z| (\partial u / \partial z)$ ,  $f_d = k_d (\sigma / \rho) (1 - e^2) c^{1/3}$ ,  $f_f = k_f (1 - c)^{5/3} / c^{2/3}$

ここに、式(2)の右辺第一項は降伏応力、第二項は粒子間隙流体の乱れによる応力、第三項は粒子の非弾性衝突に伴うせん断応力、 $p_s$ は静的な骨格圧力、 $d$ は粒子径、 $c$ は混合物中の粒子の体積濃度、 $e$ は反発係数、 $k_f = 0.16$ ,  $k_d = 0.0828$ である。式(2)より、土石流の粘性係数 $\mu_d$ は、次のように定義することができる。

$$\tau - p_s \tan \phi_s = \mu_d (\partial u / \partial z) = \rho \{ (f_d + f_f) d^2 |\partial u / \partial z| \} (\partial u / \partial z) \quad (2)$$

式(3)の応力と慣性力の比をとることで、流れのレイノルズ数 $Re$ は $Re = \rho_m u^2 / \{ \rho \mu_d (\partial u / \partial z) \}$ と表される。ここに $\rho_m = c\sigma + (1 - c)\rho$ である。式(3)

において、 $u \sim \bar{u}$ ,  $c \sim \bar{c}$ ,  $\partial u / \partial z \sim \bar{u} / h$ とすると、土石流の流れのレイノルズ数 $Re_D$ は $Re_D = (h/d)^2 \cdot G / (f_d + f_f)$ と表される。ここに、 $G = \bar{\rho}_m / \rho = (\sigma/\rho - 1) \bar{c} + 1$ である。図-6はレイノルズ数と平衡勾配比の関係を示した図である。これによると、図-1において、粗粒子のデータのものとはほぼ同一の傾向を見せていた $q_m \approx 10(\text{cm}^2/\text{s})$ のケースは、平衡勾配比が1付近であることから、粒子が層流運動していることを示唆している。一方、 $Re_D$ が大きくなると、平衡勾配比が小さくなっている。このことから、流れの規模が大きくなると層流流動層が小さくなっていることがわかる。図-1と図-6の結果から、レイノルズ数が大きくなると、水面近傍に乱流拡散が卓越するような層が形成されている可能性がある。

**4. おわりに** 平衡勾配に及ぼす砂粒子径の影響について検討した。平衡勾配と輸送濃度の関係、流速分布、レイノルズ数と平衡勾配比の関係から、流れの規模が大きくなると、粒子が層流運動する層だけでなく、流れの上層に層流運動とは異なる流れの構造をもつ層が形成される可能性が示された。今後は、濃度や圧力の鉛直分布といった流れの特性値を測定することにより、その構造を詳細に検討する必要がある。

**参考文献** 1) 江頭ら：水工学論文集，41，789-794，1997，2) 橋本ら：土木学会論文集，No.545，33-42，1996，3) 新井ら：土木学会論文集，No.375，69-77，1986，4) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，5) 伊藤：立命館大学学位論文，2000

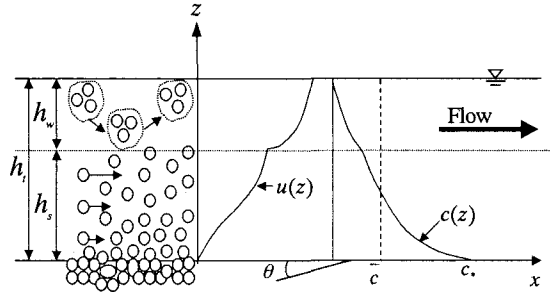


図-5 二層モデル

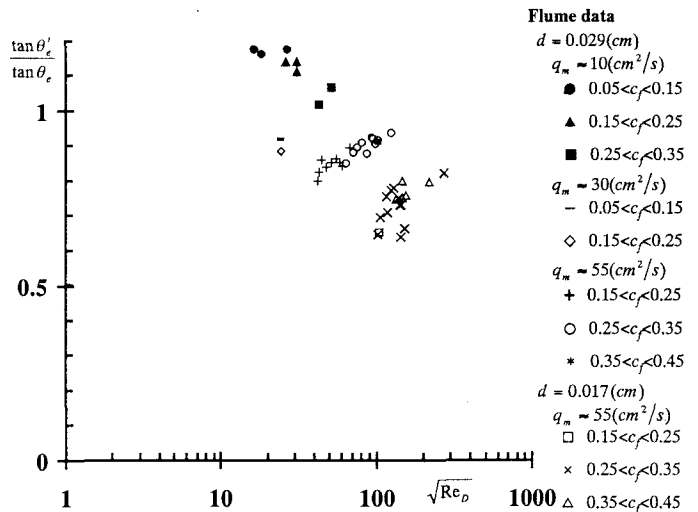


図-6 レイノルズ数と平衡勾配比の関係