

立命館大学理工学部

学生員○藤崎隆弘

立命館大学大学院

学生員 黒田尚吾

立命館大学理工学部

正会員 伊藤隆郭

立命館大学理工学部

正会員 江頭進治

立命館大学大学院

学生員 衛藤祐介

1. はじめに 均一粒径からなる土石流においては、粒子が層流的に運動し、土石流から掃流砂流にまたがる広い流れの形態に対して、流れの特性値を合理的に説明できる段階にある¹⁾。しかし、現地の土石流の観測データや微細粒子を伴う流れに関する水路実験データによると、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^{2), 3)}。本研究においては、江頭らの土石流の構成則を用いて、高濃度流れの構造に及ぼす流れの規模の影響について、実験データを用いて検討する。

2. 水路実験 実験には長さ12m、幅5cmの可変勾配式矩形状断面水路を用いている。水路下流端より約8mの地点に設置したホッパー型の給砂装置より給砂を行い、混合用タンクにおいて定常的に供給される水と十分に混合させた後に、混合物を水路に供給し、移動床土の土石流を形成させている。本研究においては、粒子径 $d = 0.029$ (cm) の一様な微細砂を用い、混合物の流量を変化させて、流れの規模の影響を調べることに着目した実験を行っている。なお、流れが平衡状態に達した時に、平衡勾配 θ_e 、流動深 h_f 、流速分布 $u(z)$ 、全流量 q_m 、流砂量 q_s を測定している。

3. 実験データの解析 図-1 は本研究で得られた平衡勾配と輸送濃度の関係である。同図には、比較のために、粒子が層流的に挙動する場合の土石流の構成則を用いて得られた計算値（以下、厳密解¹⁾とよぶ）を載せている。

図-2、図-3、図-4、図-5 はそれぞれ、平衡勾配が 10° 程度ときの混合物の単位幅流量 q_m が、それぞれ10, 30, 50, 100 (cm²/s)における流速分布の実験データである。これらの図には、図-1と同様に、流速分布に関する厳密解を載せている。図-1と図-2を見ると、単位幅流量 $q_m \approx 10$ (cm²/s)のケースにおいては、流速分布と輸送濃度に関する厳密解が実験データとよく一致しており、粒子の運動は層流的であることを示している。これに対して、図-2から図-5および、図-1を参照すると、粒子の層流運動を想定した厳密解は、実験データと大きなズレを生じ、そのズレは流量の増加に伴い大きくなっている。これらの結果から、流れの規模の増加に伴って、粒子の運動が層流的な状態から異なる流れに変化していることが推察される。

4. 流れのレイノルズ数 図-1 から図-5 の平衡勾配と輸送濃度の関係および流速分布から、 $q_m \approx 10$ (cm²/s)のケースにおいては、粒子は層流流動することが示された。さらに、流量が増加すると、粒子の運動が層流的なものとは異なることが明らかになった。そこで、ここでは、

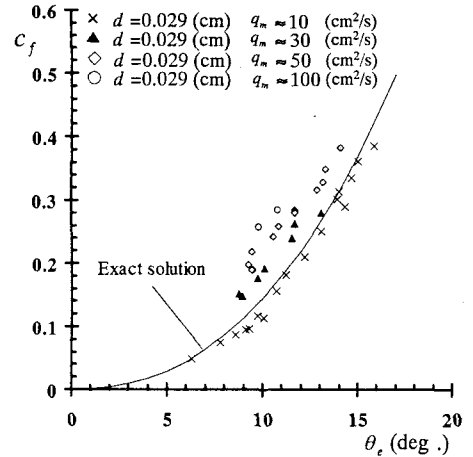
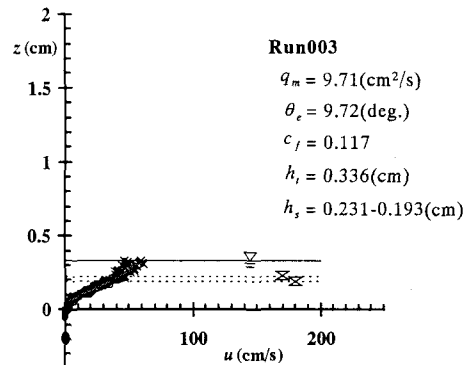
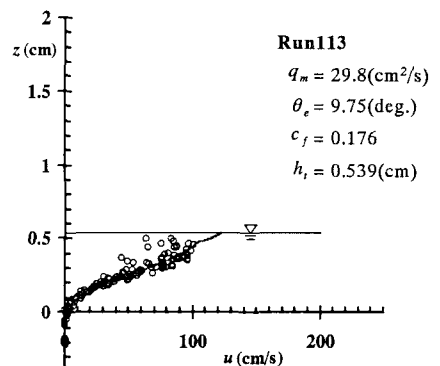


図-1 平衡勾配と輸送濃度の関係

図-2 流速分布 ($q_m \approx 10$ cm²/s)図-3 流速分布 ($q_m \approx 30$ cm²/s)

流れの規模の増加に伴う平衡勾配の変化について着目することにより、粒子が層流的な運動を示さなくなる現象について解析を行う。まず、平衡勾配比 $\tan \theta'_e / \tan \theta_e$ を定義する。ここに、 θ_e は粒子が層流流動する $q_m \approx 10(\text{cm}^2/\text{s})$ の場合における平衡勾配であり、 θ'_e は図-1 において、ほぼ輸送濃度が等しい時の各流量における平衡勾配である。次に、流れの規模を表すパラメータとして、レイノルズ数を次のように定義する。江頭ら¹⁾の構成則によると、せん断応力は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \tau &= p_s \tan \phi_s + k_d \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &\quad + k_f \rho (1 - c)^{5/3} c^{-2/3} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &= p_s \tan \phi_s + \rho (f_d + f_f) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $f_d = k_d (\sigma / \rho) (1 - e^2) c^{1/3}$ 、 $f_f = k_f (1 - c)^{5/3} / c^{2/3}$ である。式(2)の右辺第1項は降伏応力、第2項は粒子の非弾性衝突に伴うせん断応力、第3項は粒子間隙流体の乱れによる応力、 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)において、流動に伴う応力に着目すると、土石流の見かけの粘性係数 μ_d は次式のように定義できる。

$$\tau - p_s \tan \phi_s = \mu_d \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho (f_d + f_f) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

流れのレイノルズ数 Re_D は、慣性力と式(3)で示される粘性力との比で定義されるので、 $Re_D = \rho_m u^2 / \{ \mu_d (\partial u / \partial z) \}$ と表される。ここに $\rho_m = (\sigma - \rho) c + \rho$ である。ここで、 $u \sim \bar{u}$ 、 $c \sim \bar{c}$ 、 $\partial u / \partial z \sim \bar{u} / h$ のように流速や粒子濃度に断面平均値を用いると、土石流の流れのレイノルズ数 Re_D は $Re_D = (h/d)^2 G / (f_d + f_f)$ 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 Re_D と平衡勾配比の関係である。同図には、本研究により得られたデータのうちほぼ同一濃度における実験値を載せている。さらに、比較のために粒子が層流運動する粗粒子からなる流れにおける実験データ ($d = 0.218 \text{ cm}$) も載せている。これによると、 Re_D がほぼ2000~3000を越えると平衡勾配比が減少し、流れが層流的な挙動を示さないことが示唆される。

5. おわりに 流れの構造に及ぼす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、流速分布およびレイノルズ数と平衡勾配比の関係により、流れの規模が小さい場合には、粒子の運動が層流的であることが確認された。しかしながら、流れの規模が大きくなると、粒子の運動が層流流動とは異なることが示され、その限界は $Re_D = 2000 \sim 3000$ 程度であることが示された。今後は、大きい規模の流れにおける、濃度や圧力の鉛直分布といった流れの特性値を測定し、他の研究者のデータも収集して、流れの構造を把握する予定である。

参考文献 1) 江頭ら：水工学論文集，44，677-682，2000，2) 橋本ら：土木学会論文集，No.545，33-42，1996，3) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，4) 伊藤：立命館大学学位論文，2000

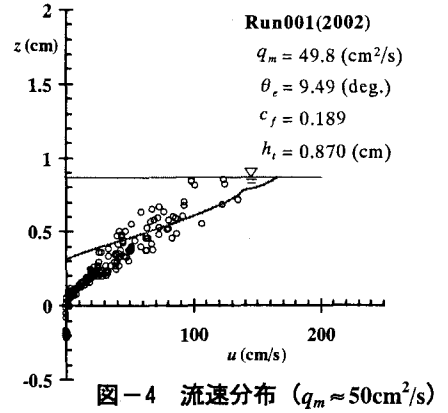


図-4 流速分布 ($q_m \approx 50 \text{ cm}^2/\text{s}$)

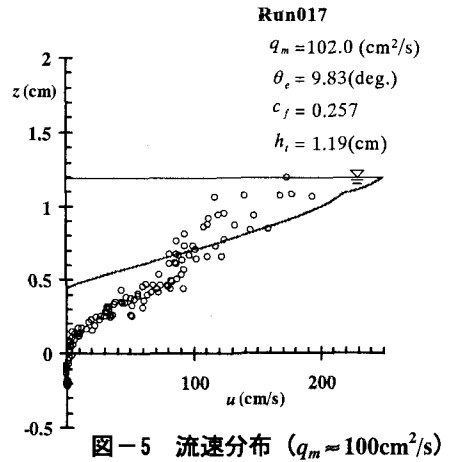


図-5 流速分布 ($q_m \approx 100 \text{ cm}^2/\text{s}$)

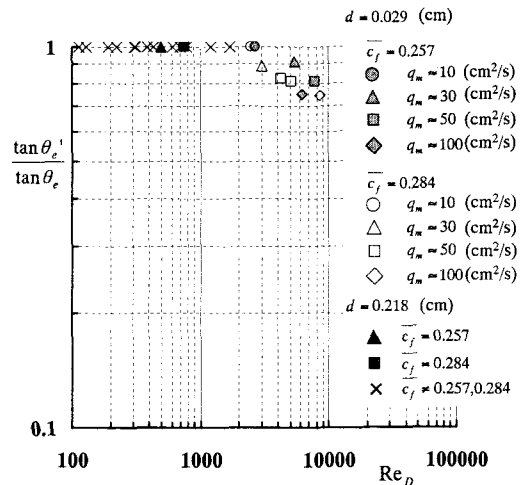


図-6 レイノルズ数と平衡勾配比の関係