

立命館大学理工学部

学生員○ 黒田尚吾

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 平山清志

立命館大学大学院

学生員 内海敦郎

1. はじめに 現在, 比較的粒径の大きい砂礫と清水の混合物の流れについては, 土石流の構成則を用いて, ほぼ説明できる段階にある¹⁾。しかし, 粒子径が減少すると, 流れの上層において粒子が浮遊して乱流拡散層が形成される²⁾。そのため, 液相の密度が大きくなり, 平衡勾配が小さくなる。本研究は, 掃流砂および浮遊砂を伴う流れと土石流における共通の力学を確立することを目的とするものであり, ここでは流れの構造に及ぼす砂粒子径の影響について検討する。

2. 流れのモデル 定常等流状態の流れを対象として, 流れ方向に x 軸をとり, 垂直方向に z 軸をとれば, 運動量保存則は次式で表される。

$$\tau_y + \tau_f + \tau_d = \int_z^{h_i} \rho_m g \sin \theta dz \quad (1) \quad p_s + p_d = \int_z^{h_i} \rho(\sigma/\rho - 1) g \cos \theta dz \quad (2)$$

ここに, τ_y : 降伏応力, ϕ_s : 粒子の内部摩擦角, τ_d : 粒子の非弾性衝突による応力, τ_f : 間隙流体のせん断による応力, p_s : 静的圧力, p_d : 粒子の衝突の前後において保存される応力, および h_i : 水深である。また, 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, $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ で表される。式(1), 式(2)を連立して解くと, 流速および粒子濃度分布が求まる。ここで, 式(1)の間隙流体のせん断力 τ_f は次式で表され, 流体粘性による応力を加えている。 $\tau_f = \rho(1-c)\nu_f(\partial u/\partial z) + \rho(1-c)l^2 d^2 |\partial u/\partial z|(\partial u/\partial z)$ (3)

ここに, l : 粒子間隙流体の運動輸送の混合距離で $l = \sqrt{k_f} \{ (1-c)/c \}^{1/3} d$ である。図-1 は, 式(3)で示される間隙流体のせん断力に伴う応力を, 無次元ひずみ速度

$$N_s = \frac{d}{u} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u^+}{\partial z^+}, \quad \text{と無次元応力 } T_s = \frac{(\tau - \tau_y)}{\rho u^2}$$

示したものである。計算においては, 代表流速 $u = 100$ (cm/s), 固体粒子の比重 $\sigma/\rho = 2.65$, 固体粒子の反発係数 $e = 0.85$ および, 粒子濃度 $c = 0.30$ のような値を用いている。図によれば, 1 乗に比例する層流粘性領域, 2 乗に比例する乱流領域, およびその間の遷移領域の3つに分けられる。砂粒子径の減少にともない, 無次元ひずみ速度が無次元応力の1乗に比例する領域が増大している。これは, 砂粒子径の減少により粒子間の間隙スケールも減少し, 間隙流体の層流粘性によるせん断応力の影響が大きくなったためであると考えられる。このことは構成則が乱流拡散の卓越する領域から層流粘性の卓越する領域を統一的に表せることを示唆している。

3. 実験データの解析 実験には長さ 12m, 幅 10cm の可変勾配式矩形断面水路を用いている。上流端より定常的に給水および給砂を行い, 定常状態の土石流を形成させている。砂粒子径の影響を見るために使用材料は粒度分布がほぼ一様の珪砂を2種類用いている。各々の材料特性は次のようである。材料1(砂): $d_{50} = 0.218$ (cm), $\phi_s = 38.7^\circ$, $c_s = 0.512$, $\sigma/\rho = 2.62$, 材料2(砂): $d_{50} = 0.075$ (cm), $\phi_s = 36.1^\circ$, $c_s = 0.534$, $\sigma/\rho = 2.63$ 。ここに, d_{50} : 中央粒径, ϕ_s : 内部摩擦角の実測平均値, c_s : 静止堆積層の土砂濃度, σ/ρ : 固体粒子の比重である。

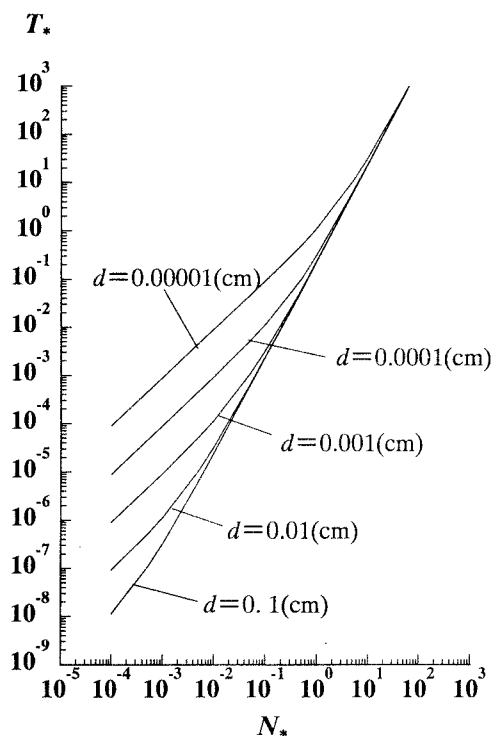


図-1 無次元ひずみ速度と無次元応力の関係

図-2 および図-3 は勾配および輸送濃度がほぼ同じ場合における粒子径別の砂粒子を含む流れの流速分布である。両図には実験値と計算値³⁾を載せている。粒子径の大きいケースにおいては、実験値と計算値はほぼ一致している。粒子径の小さい図-3の結果においても実験値と計算値がほぼ一致しているように見える。ところが、実験において水面近傍における粒子運動が乱れ、粒子スケールよりもかなり大きいスケールの乱れが形成されていた。一方、構成則は前述のように粒子は層流運動をするものとして導かれている。そのため、流れの抵抗は実際よりも小さく算定されることになる。このことを考慮して再び図-3の結果を見ると、やはり水深は実験値よりも小さく算定されていることが分かる。これは、水面近傍に乱流拡散層が形成されていることに起因するものと思われる。

図-4 は、上述のことを確かめるため、砂粒子径をパラメータとして粒子輸送濃度と平衡勾配の関係を調べたものである。粒子輸送濃度は、今回行った実験データおよび過去に江頭らの研究で行われた実験データを載せている。なお、図の点線は浮遊砂を考慮した粒子平衡濃度の計算値であり、次式で算定されている。

$$\bar{c} = \frac{1}{h_t} \int_0^{h_t} c dz = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)}$$

図の点線は上式による値であり、これと輸送濃度 c_f がほぼ一致する領域について示されている。粒子輸送濃度と粒子平衡濃度は、平衡勾配が約 12° より大きい領域において概ね一致することが知られている。これらを考慮して図を見てみる。同一平衡勾配での粒子輸送濃度は、比較的粒径の大きい方においてほとんど変化しないが、砂粒子径の減少にともない、同一平衡勾配での粒子輸送濃度は増加しているのが分かる。これは、流れの中で粒子が浮遊して、乱流拡散の卓越した層を形成していることを示唆している。また、粒子濃度と勾配の関係においては、粒子の内部摩擦角も重要なパラメータであるが、内部摩擦角の影響を考慮しても、粒子浮遊に伴う流体相の密度の増加が分かる。

4. おわりに 砂粒子を高濃度に含む流れの構造に砂粒子径が及ぼす影響を検討した。砂粒子径の影響により、水面近傍において乱流拡散が形成され、流れの抵抗が変化した。これは、層流流動層と乱流拡散層の粒子間隙スケールの差に起因している。そのため、乱流拡散層における応力構造について検討する必要がある。

参考文献 1) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，41 巻，789-794，1997，2) 江頭進治・佐藤隆宏・千代啓三：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響，京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，3) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明：土石流の流れに及ぼす固相・液相の材料特性の影響，水工学論文集，44 巻，677-682，2000。

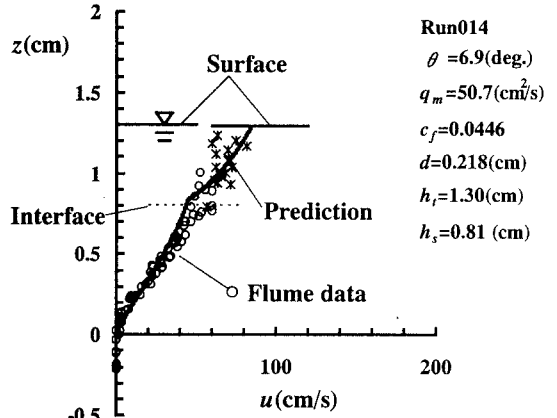


図-2 流速分布 ($d=0.218(\text{cm})$)

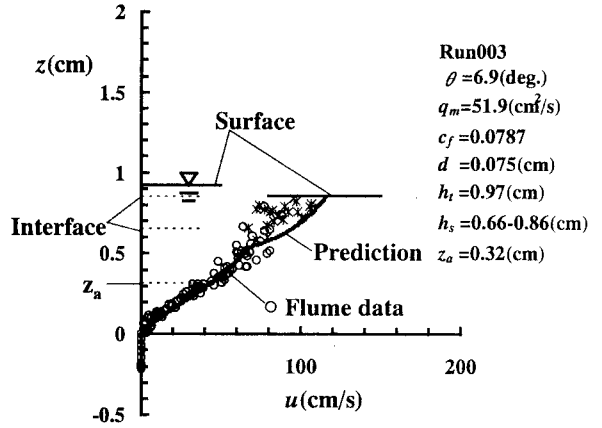


図-3 流速分布 ($d=0.075(\text{cm})$)

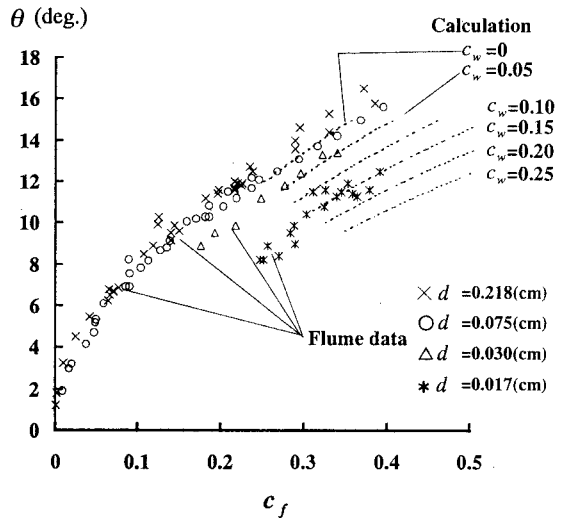


図-4 輸送濃度と勾配の関係