

九州大学 大学院 学生員 ○小路 智  
 九州大学 工学部 正員 橋 東一郎  
 九州大学 工学部 正員 橋本 晴行  
 九州大学 工学部 学生員 溜池 博文

まえがき ; 従来, 土石流は, ビンガム流体かそれともダイラタント流体かという議論がなされてきたが, 最近では, ダイラタント流体であることが定着してきたようである。しかしながら, 実験的に, 報告されているように<sup>1)</sup> ビンガム流体的挙動の可能性を完全に否定することはできない。著者らは先に<sup>2)</sup>, 土石流の流動特性について明らかにしたが, その中で, 土石流中の粒子の大部分は, 相対的に, 下層の粒子に対して限られた領域で衝突し, 反発することなく乗り上げていく。そして, 粒子群は, 複雑な相互作用を及ぼしあう多体粒子系を構成しているという認識に達した。本研究は, このような基本的認識にもとづき, 土石流の流動がビンガム流体的な挙動を示す可能性があることを明らかにしたものである。

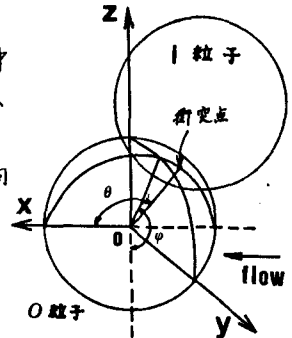
相対運動をする2粒子の乗り越え条件に関する理論; 上述のように, 土石流中の*i*粒子が, 図-1のように0粒子に衝突して, 反発することなく乗り越えていく場合を考える。衝突前後の*i*粒子の, 0粒子に対する相対速度を  $U_i$ ,  $U_i'$  とし, 摩擦係数を  $\mu$ , すべりの方向の単位ベクトルを  $S$ , 0粒子の中心から衝突点に向かう単位ベクトルを  $n$  とし, 次式が成立する。

$$U_i' = U_i - (U_i \cdot n)(n - \mu \cdot S) \quad (1)$$

$$\text{ここに,} \quad S = (\sin \theta, -\cos \theta \sin \varphi, \cos \theta \cos \varphi)$$

$$n = (\cos \theta, \sin \theta \sin \varphi, -\sin \theta \cos \varphi)$$

$$U_i = (-d \sin \theta \cos \varphi \, dy/dz, 0, 0)$$



〔図-1〕

である。衝突後, *i*粒子は, 衝突点から  $U_i'$  という初速度で0粒子に沿って動きはじめるものとする。乗り越えのための障壁の最大値は, 衝突点の座標を  $(d/2, \theta, \varphi)$  とし,  $-d \cos \varphi$  となる。従って, *i*粒子が衝突後, 0粒子を乗り越えるためには, 少なくとも次式を満たさなければならない。

$$\frac{m}{2} |U_i'|^2 - mgd \sin \theta \cos \varphi > -mgd \xi \cos \varphi \quad (2)$$

ここに,  $\xi$  は補正係数で,  $\xi \leq 1$  である。(2)式より

$$\frac{1}{2} |U_i'|^2 > gd \cos \varphi (\sin \theta - \xi) \quad (3)$$

となり, 乗り越え条件として, 土石流中イと(3)式が近似的に成立すると考えられる。0粒子の  $\theta \sim \theta + d\theta$ ,  $\varphi \sim \varphi + d\varphi$  の間の角に, *i*粒子が衝突する確率は, 単位体積当たりの粒子数を  $N$  とし

$$dn = -(d^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \, n \cdot U_i) N$$

であるから, 平均的乗り越え条件は

$$\int \frac{1}{2} |U_i'|^2 \, dn > \int gd \cos \varphi (\sin \theta - \xi) \, dn \quad (4)$$

となる。(4)式の積分を実行し, また, 前報<sup>2)</sup>より

$$\frac{d}{dn} \left( \frac{U}{U_*} \right) = \frac{h}{d} \left( K_n \frac{\sigma}{\rho} \frac{\varphi}{\chi} C_* \right)^{\frac{1}{2}} \frac{C - C_*}{2C - C_*} F(C) \quad (5)$$

$$\frac{h(g \sin \theta)^{0.2}}{(d q_{wo})^{0.4}} = \left[ \frac{C_*}{C - C_*} \left\{ \frac{\sigma}{\rho} K_n \left( \frac{\varphi}{\chi} C_* \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right] / \left[ \int_{C_*}^C \frac{2C - C_*}{C - C_*} \left( \int_{C_*}^C F(C) \, dC \right) dC \right]^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$F(C) = \frac{2C - C_*}{C - C_*} \frac{(1 - C/C_*)^{\frac{1}{2}}}{C/C_*} \left[ (C - C_*) \left\{ \frac{\sigma - \rho}{\rho} (C + 2C_*) + 2 \right\} + \left( 1 + \frac{\sigma - \rho}{\rho} C_* \right) (2C_* - C_*) \ln \frac{C - C_*}{C_* - C_*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$\eta = z/h$ ,  $q_{w0}$ ; 単位幅給水量,  $\theta$ ; 河床勾配,  $\mu = 0.1$ ,  $\chi = 1/3$ ,  $C_s$ ; 表面濃度であることを考慮して, (1)式を代入すれば, 輸送濃度を  $C_{TP}$  として

$$\frac{d \cdot g^{1/3}}{q_{w0}^{1/3}} < \left\{ \left[ \frac{4(1 + \frac{16}{3}\mu + \frac{2}{3}\mu^2)}{21\pi(\frac{1}{3} - \frac{1}{4})} \right]^5 (K_n \frac{\sigma}{\rho})^4 \sin^4 \theta_0 \left\{ \frac{C - C_s}{2C - C_s} F(c) \right\}^{10} F_1^2 \right\}^{1/3} \equiv [d] \quad (7)$$

ここには,  $F_1 = \frac{C_s}{C_s - C_{TP}} / \int_{C_s}^{\infty} \frac{2C - C_s}{C - C_s} \left( \int_C^{\infty} F(c) dc \right) dc$

結局, 土石流中の粒子の乗り越え条件は, (7)式となる。

ところで, 前報<sup>2)</sup>ですでに明らかにしているように,  $i$  粒子が, 衝突後, 乗り越えて (乗り上げて) 行くことが, 巨視的に見て, せん断流となる条件である。従って, (7)式を満たすならば, 土石流はせん断流となり, 満たさない領域が存在すれば, その領域はせん断流とは異なった流れとなることが予想される。

数値計算の結果と考察;  $\theta_0 = 16^\circ$ ,  $\xi = 1.0, 0.9, 0.8$  の3ケースについて  $[d]$  の分布を計算した結果を図-2に示す。

今,  $d = 0.46 \text{ cm}$ ,  $q_{w0} = 200 \text{ cm}^3/\text{s}$  としたとき

$$d \cdot g^{1/3} / q_{w0}^{1/3} = 0.1336 \quad \text{であり, (7)式を満足しない}$$

領域として, 表層部と底層部が存在することがわかる。

次に  $\xi = 0.9$  とし,  $\theta_0 = 14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ$  のそれぞれについて,  $[d]$  の分布を調べると図-3になる。 $\theta_0$  の増加に伴い, (7)式を満足しない領域が, とくに表層部において拡大することがわかる。

なお, 図-4に,  $d = 0.46 \text{ cm}$ ,  $q_{w0} = 200 \text{ cm}^3/\text{s}$  の場合の土石流実験の流速分布を示す。図-3の数値計算結果と対応して, 急勾配ほど, 表層部にせん断流とは異なった一様流速の部分があることがわかる。

また, 底層部では, 堆積層を引きずるような流速分布を示している。従って, (7)式を満たさない領域が表層部で, あらわれる場合は, ここでは一様流速を示すと, 解釈することが出来る。

さらに, 粒径が大きな土石流ほど(7)式を満足しない領域が増加してくる。この場合も, 図-4の急勾配のような流速分布とは異なった分布を示す可能性が予想される。

おわりに; 土石流の流動特性に関して, 粒子の乗り越え条件を考慮することにより, せん断流とは異なった流れが存在することと明らかにすることができた。

今後, より大きい粒径をもつ粒子の土石流の流動特性について実験を行う予定である。

参考文献;

1) 橋, 中山, 羽田野; 土木学会西部支部研究発表会議演集, (1977)

2) 橋, 橋本, 末次; 土木学会論文集 No. 317 (1982) 土石流における粒子間応力と流動特性

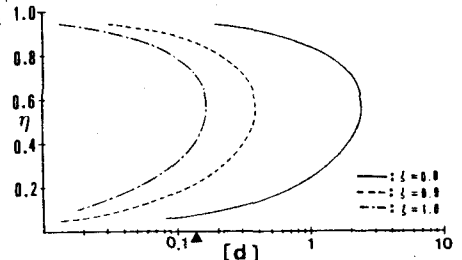


図-2

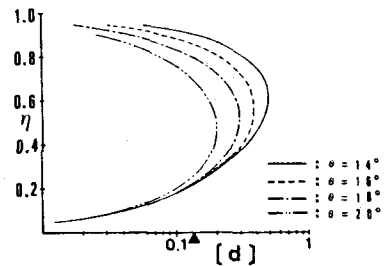


図-3

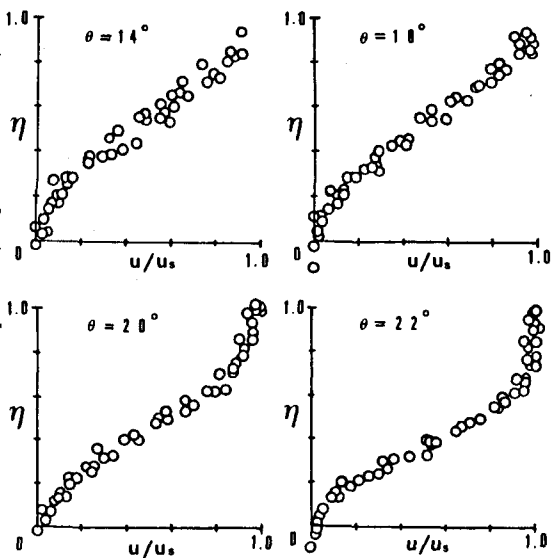


図-4