

九州大学 工学部 学生員 ○末次 忠司

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 中西 隆夫

1. 緒言 土石流の流動に関して、その流動機構はあまり明らかにされてきたけれども、流動性に大きな影響を及ぼす粒子の速度分布について提示されている分布形は、研究者によって様々である。本研究は前報で求めた粒子間応力の表示式を使った土石流の基礎方程式から粒子の濃度・速度分布を求め、更にこれを土石流段波に適用して実験値との比較を行い、前報(10)式を検証したものである。

2. 土石流の基礎方程式 土石流を固液二相流の連続体と見做すと、等流の場合の土石流の基礎方程式は、

$$x \text{ 方向 (粒子+水の部分)} \quad [(\sigma-p)c+p] g \sin \theta + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + (1-c) \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial [p(1-c)u_w w_w]}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$z \text{ 方向 (粒子の部分)} \quad -(\sigma-p)cg \cos \theta + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + I_z = 0 \quad (2)$$

従来、土石流では粒子間応力 σ_{xx} に比べて、水流による粘性応力 σ_{zz} 、水流の乱れによるレイノルズ応力 $-p u_w w_w$ の寄与は微小であるとして無視されてきたが、本研究においてもこの仮定を踏襲する。また、(2)式の I_z は衝突時の付加質量力や、粒子と流体との速度差に起因する抵抗力 τ を含む。後者は微小であると仮定して無視し、前者の付加質量力を考慮するために、前報(2)式における m の代りに $m(1+\frac{p}{\sigma})$ で置き換えればよい。従って(1)、(2)式を積分すると

$$\sigma_{xx} = \int_x [(\sigma-p)c+p] g \sin \theta dz \quad (3) \quad \sigma_{zz} = - \int_z (\sigma-p)cg \cos \theta dz \quad (4)$$

更に、粒子間応力は前報(10)式より

$$\sigma_{xx} = \tau_{xx} = K_H \sigma^d \left[\left(\frac{c}{c_0} \right)^* \left(1 - \frac{c}{c_0} \right) \right] \left(\frac{du}{dx} \right)^n \quad (5), \quad K_H = \frac{\pi}{6} (0.0762 + 0.102\mu) \beta^2 d_H$$

$$\sigma_{zz} = \tau_{zz} - p, \quad p = K_p \frac{c}{c_0} \frac{C - C_0}{C_0}$$

$$\frac{\tau_{zz}}{\tau_{xx}} = -\gamma / \left(1 + \frac{p}{\sigma} \right) = -d, \quad \gamma = (0.0762 + 0.102\mu) / (0.0898 - 0.067\mu)$$

と表わされるので、(3)、(4)式に代入すれば、粒子の速度 u と濃度 C の連立方程式となり、これを解くと

$$\frac{dc}{d\eta} = - \frac{\alpha - \tan \theta}{\alpha} \cdot c_0 \cdot \frac{C - C_0}{2C - C_0} \quad (6), \quad \alpha = 1, \quad \chi = K_p / [C_0(\sigma-p)g \cos \theta]$$

$c_0 = \frac{\tan \theta}{S(\alpha - \tan \theta)}$, $\eta = \frac{z}{h}$, $S = \frac{\sigma-p}{p}$, したがって、 χ は実験結果との比較により決められる定数である。

移動床における土石流の境界条件 $\eta=0$ で $C=C_0$ のもとに(6)式を解けば陰関数表示で

$$\eta = \left[\frac{2(C_0 - C)}{C_0} - \frac{2C_0 - C_0}{C_0} \ln \frac{C - C_0}{C_0 - C_0} \right] \chi / \psi \quad (7), \quad \psi = \frac{\alpha - \tan \theta}{\alpha}$$

従って、表面濃度 C_s は、(7)式で $\eta=1$ で $C=C_s$ とおいて

$$\frac{C_s - C_0}{C_0 - C_0} = \exp \left[\left\{ \frac{2(C_s - C_0)}{C_0} - \frac{\psi}{\chi} \right\} \cdot \frac{C_0}{2C_s - C_0} \right] \quad (8)$$

更に、(7)式を積分すれば、断面平均濃度 $\bar{C}$ は

$$\bar{C} = C_0 + (C_s - C_0) \chi / \psi$$

速度分布は、摩擦速度 $u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$ とすると、若干の計算後

$$\frac{du}{d\eta} = \frac{h}{d} \left(K_H \frac{\sigma}{p} \frac{\psi}{\chi} C_0 \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{(1 - \frac{C}{C_0})^{\frac{1}{n}}}{\frac{C}{C_0}} \cdot \left[(C - C_0) \left\{ S(C + 2C_0) + 2 \right\} + (1 + SC_0)(2C_0 - C_0) \cdot \ln \frac{C - C_0}{C_0 - C_0} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

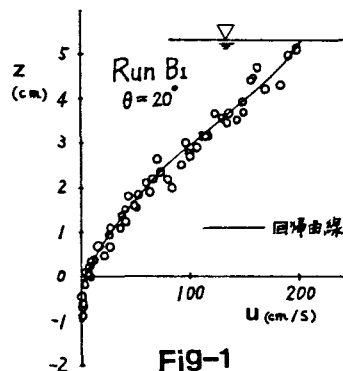


Fig-1

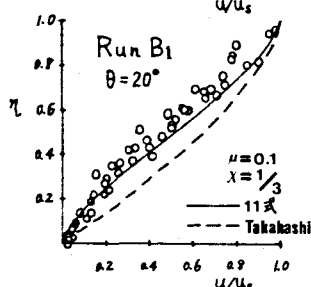
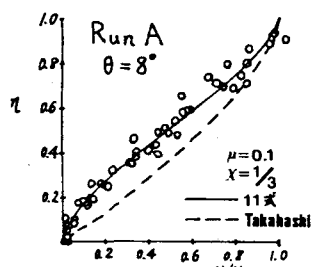


Fig-2

(9)式を底面 $z=0$ で $u=0$ の境界条件下で積分すると

$$\frac{u}{u_s} = \frac{h}{d} \left[\frac{\sigma}{\rho} k_n \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \int_c^0 F(c) dc \dots (10) \quad \therefore$$

$$\therefore F(c) = \frac{2c - c_s}{c - c_s} \left(\frac{1 - \frac{c}{c_s}}{\frac{c}{c_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(c - c_s) \left\{ 5(c + 2c_s) + 2 \right\} + (1 + 5c_s)(2c_s - c_s) \cdot \ln \frac{c - c_s}{c_s - c_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

表面速度 u_s は、(10)式で $c=c_s$ といたし u だから、

$$\frac{u}{u_s} = \int_c^0 F(c) dc / \int_{c_s}^0 F(c) dc \dots (11)$$

更に、(10)式を積分すると、流速係数が求まる。

$$\varphi = \frac{u}{u_s} = \frac{h}{d} \left[\frac{\sigma}{\rho} k_n \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \int_{c_s}^0 \frac{2c - c_s}{c - c_s} \left(\int_c^0 F(c) dc \right) dc \dots (12)$$

$\therefore$ に、 $\bar{u}$ は断面平均粒子速度である。また、輸送濃度 C_{TP} は、

$$C_{TP} = \frac{\int_c^0 C u d\gamma}{\int_c^0 [C u + (1-c) u_s] d\gamma} \sim \frac{\int_c^0 C u d\gamma}{\int_c^0 u d\gamma} = \frac{\int_{c_s}^0 \frac{C(2c - c_s)}{c - c_s} \left(\int_c^0 F(c) dc \right) dc}{\int_{c_s}^0 \frac{2c - c_s}{c - c_s} \left(\int_c^0 F(c) dc \right) dc} \dots (13)$$

3. 実験方法 装置は、長さ7m・高さ30cmの片側アクリル張り可変勾配水路を用い、TABLE-1の材料を10cm厚で敷き、予め河床を飽和させて上流端から急激に給水して、土石流を発生させる。そして、上流端から $x=5m$ にセトした16mm高速度カメラにより、毎秒100コマから200コマのコマ送りスピードで土石流の流動層を撮影した。粒子速度は、粒子が10コマ区間で移動した距離をフルセージンアナライザーにより読み取り解析した。また、輸送濃度は下流端で土石流を採取することにより計測した。段波の進行速度は等速に T_f とみられる区間の段波の通過時間により求めた。

4. 考 察

a. 粒子の速度分布(Fig-1,2) (9)式において、底面で $c=c_s$ より $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ 水表面でも $c=c_s$ より $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ となり、従来の一様濃度のダイラタント流体モデルとは異なり、傾向を示す。速度分布を無次元化する場合、 u_s と h の決定が問題であるが、Fig-1の様に多数の実測値をもとに回帰曲線を引く表面との交点をもつて u_s とし、 u_s の1%程度の速度をもつ位置を境界面として h を求める。このようにして無次元化した結果がFig-2で、明らかに本研究の計算結果の方が、実験値と良く適合している。

b. 輸送濃度(Fig-3) 輸送濃度の式(13)は、係数 $\lambda = 1/3$ とすれば、従来の式(破線)よりも適合性が良い事が判る。

c. 濃度分布(Fig-4) 濃度分布の式(7)の理論値及び実験値は、水路勾配 θ の増加に伴い、一様化して濃度勾配は小さくなる。

d. 流速係数(Fig-5) (12)式を土石流段波に適用すれば、 $R=H_f$ 、 $\bar{u}=U_f$ と近似される。係数 $k_n=5$ とかけ、(12)式は実験値と適合する。なお、 k_n の値は前報の値と同程度である。

参考文献

- (1)橋本 椿、山本：西部支部研究発表会講演集(昭和55年度)
- (2)高橋 保：京都大学防災研年報(昭和52年)
- (3)Baginold, R.A.: Experiments on a Gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear

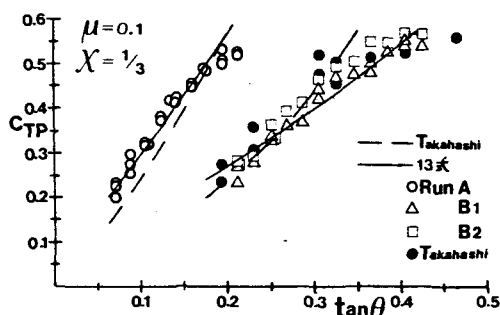


Fig-3

	幅幅 cm	$\eta_{0.02}$ cm/s	d_m mm	$\frac{dy}{dx}$ 1/dm	σ 1/cm	C_s	$\tan \theta$
RUN A	15	5.7	200	8.2	1.25	1.60	0.59
B1	15	5.7	200	4.6	1.18	2.59	0.58
B2	20						0.73

TABLE-1

* RUN A の材料は、メサライト
" B1, B2 " は、砂

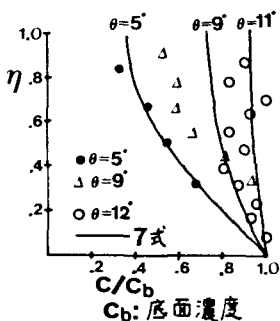


Fig-4

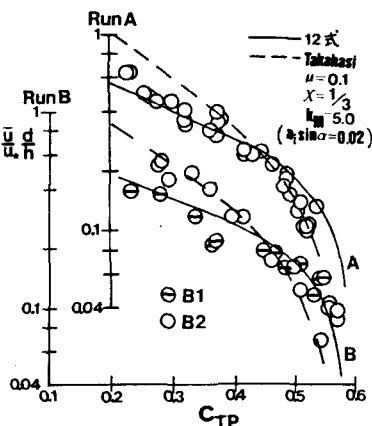


Fig-5