

土石流のレオロジー的性質について

塩野裕司・水原邦夫・小橋澄治・武居有恒

The rheological properties of debris flow

Yuji SHIONO, Kunio MIZUHARA, Sumiji KOBASHI
and Aritsune TAKEI

要 旨

土石流のような高濃度な固一液混相流のレオロジー的な性質を明らかなものとするために、流動化法を応用した回転粘度計、および開水路を用いて実験をおこなった。

実験材料としては、ほぼ均一粒径の砂、ガラスビーズ、および水を用いておこなった。

高濃度な流体は、ずり速度の変化に対してことなった性質を示し、ずり速度が大きくなるにつれ、ニュートン流体からダイラタント流体、もしくは、ビンガム流体からダイラタント流体へと特性が変化する流れ曲線を示した。また、流れ曲線は濃度によっても大きい影響を受け、砂の場合は容積濃度ではば43%前後で、ガラスビーズの場合は54%前後でその性質が大きくことなることが認められた。すなわち、それらの限界よりも濃度の高い場合は、降伏値をもつビンガム流体、濃度の低い場合は、セン断応力がずり速度の自乗に比例する、ずり速度粘稠化となるダイラタント流体とほぼみなせるものと思われる。

粘性係数としては、ダイラタント流体とみなせるものについては 10^0 (poise) ビンガム流体とみなせるものについては 10^1 (poise) のオーダーの値を得た。

I は じ め に

土石流体のような高濃度な固一液混相体は、その流動の力学的な機構が、土砂濃度(流体密度)・粒度分布・粒子形状・粒子比重など多くの因子に支配されているために非常に複雑なものとなっており、その流動現象の定量的な解析は遅れている。

従来、水力学や水理学で取扱ってきた流体は、セン断応力とずり速度との関係が直線で表わされる、いわゆるニュートン流体に限られていた。しかし、土石流のような多量の土砂を含んだ流れでは、現象的にも、また流体特性からみても、清水の流れに比較していろいろことなった特性、ある種の非ニュートン流体としての特性、を持つものと考えられる¹⁾。すなわち、図-1の流体の分類²⁾³⁾⁴⁾で

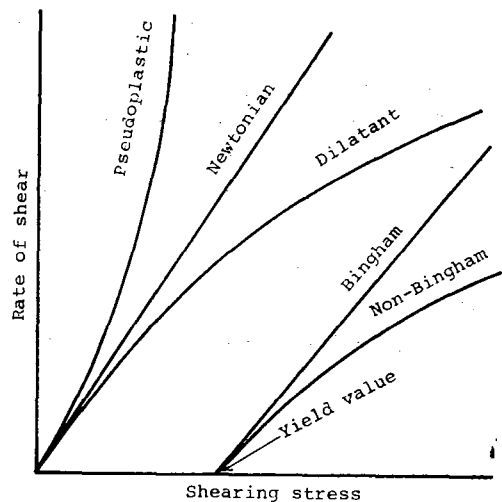


図-1 流体の分類

言うならば、粘性流体（ダイラタント流体・擬塑性流体）や、塑性流体（ビンガム流体・非ビンガム流体）などの特性をもつものと考えられる。しかしながら、このような分類も画然としたものでなく、現実の流体はいくつかの性質を共有している場合が多い⁵⁾。

ここでは、土石流のような高濃度土砂流体がどのようなレオロジー的性質をもつかを調べるため、またそれらを表わす物理定数を決定するため実験的に検討をおこなった。

II 既往の研究

土石流のレオロジー的な性質に着目し、理論的に考察を進めた研究はこれまでいくつかみられるが、土石流の流動現象が複雑多岐にわたるために、研究者によってその取扱いはまちまちであって、まだ統一的な解釈はされていない。

飯田⁶⁾, Sharp and Nobles⁷⁾ Curry⁸⁾ は現場における災害データーや実験から、土石流体をニュートン流体とみなして解析におこない、その粘性係数として $10^3 \sim 10^4$ (poise) という値をあたえている。

大同⁹⁾, Johonson¹⁰⁾, Hampton¹¹⁾, 駒村¹²⁾ はその非ニュートン的な特性に着目し、土石流体をビンガム流体とみなして解析をおこなっている。特に大同は、土砂が一体となって流れるためには構成材料中に粘土の存在が必要であるとして、粘土の役割を特に重視して解析を進め、粘土を含む流体はビンガム流体としての挙動を示し、流体の粘度とせん断降伏値は粘土の容積濃度（フロック濃度）によって定まるとしている。Johnson は降伏値にクーロン式を導入した、Coulomb-viscous model. を提案して、解析をおこなっている。また、平野・岩元ら¹³⁾ はベルトコンベアー式水路による実験から、その流れは、ビンガム的な層流であるとしている。

Bagnold¹⁴⁾, Dement'yev¹⁵⁾ 高橋¹⁶⁾ 河村¹⁷⁾ もその非ニュートン的な性質に着目し、高濃度な土砂流体においては、その粘性抵抗は粒子間の衝突によって生じ、せん断応力がずり速度の自乗に比例するという、Bagnold¹⁸⁾ の理論を展開し、ダイラタント流体のモデルを仮定し、解析をおこなっている。

III 実験および考察

1. 流動化回転粘度計

回転粘度計は¹⁹⁾ 毛管粘度計、落球粘度計とともに、最も古くから、しかも広く使用されてきた粘度計であって、ずり速度が比較的小さい場合の定常ずり粘度を測定する場合に適しており、従来より多くの測定に用いられている。今回実験に用いたものは、これらを改良したものである。

1) 理論²⁰⁾²¹⁾²²⁾

2つの円心円筒の間隙に入れる液体が、非圧縮性で、その円筒間の流れが定常であることのほかに、流れが層流で、その速度は半径だけの関数であること、円筒表面と液体との間に相対的な運動、すなわちすべりの起こらないこと、流れは2次元的で系は等温である等の仮定をおこない、図-2のような内径 a 、外径 b 、高さ h 、なる同心円筒を考える。

円筒における回転角速度を ω とすれば、任意の半径 r における速度は、

$$v = r\omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって速度勾配はこれを微分して

$$\frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega}{dr} + \omega \quad \dots\dots\dots (2)$$

右辺第2項は単なる回転であって、ずりを生じないものとして無視すると、ずり速度は

$$\frac{du}{dy} = r \frac{d\omega}{dr} \quad \dots\dots\dots (3)$$

任意の半径 r における回転トルク T は

$$T = \mu r \frac{d\omega}{dr} \cdot 2\pi r h \cdot r \quad \dots\dots\dots (4)$$

であたえられる。しかるに定常状態にあることから、 T は r に無関係であるから

$$\omega = \frac{A}{r^2} + B \quad \dots\dots\dots (5)$$

A, B : 定数

である。図-2 のように内円筒の半径 a の角速度を ω_0 とすると、

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{a^2}{r^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ゆえに式(4)は

$$T = -4\pi\mu a^2 h \omega_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

外円筒が静止している場合には式(5)を用いて

$$\omega = \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{b^2 - r^2}{b^2 - a^2} \omega_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

であるから式(7)は

$$T = -4\pi\mu \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} h \omega_0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$= -4\pi\mu R^2 \omega_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ただし } R^2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2}$$

つまり、回転粘度の回転速度は $T = 4\pi\mu R^2 h \omega$ なる関係式のもとで平衡状態となり、速度一定となる。ゆえに粘性係数 μ は

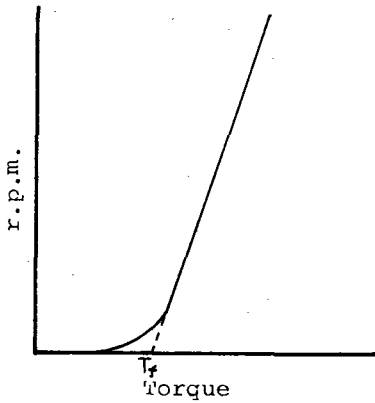


図-3 f を与える流れ曲線

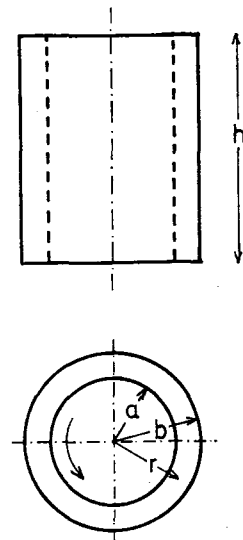


図-2 同心円筒流動

$$\mu = \frac{T}{4\pi R^2 h \omega} \quad \dots\dots\dots (11)$$

であたえられる。

ここで、実験で用いるスローマー型の粘度計²³⁾について考えると、回転トルク T は、 Wgl なる形であたえられ、(W : 荷重, g : 重力加速度, l : 荷重の作用する有効半径) 角速度 ω を 1 分間当りの回転数 (r. p. m.) になおすと式 (11) は

$$\mu = \frac{60gl}{8\pi^2} \times \frac{1}{R^2 h} \times \frac{W}{\text{r. p. m.}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$= K_v \times \frac{W}{\text{r. p. m.}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{ただし } K_v = \frac{60gl}{8\pi^2} \times \frac{1}{R^2 h}$$

となり、スローマー型の粘度計においては、荷重 W と回転数 r. p. m. を測定すれば粘度が求められる。

ビンガム流体の場合その流動方程式は

$$\tau = \tau_y - \mu_b (du/dy) \quad \dots\dots\dots (14)$$

τ : セン断応力, τ_y : 降伏値, μ_b : 塑性粘度, du/dy : ずり速度

で表わされるから、同様に

$$\mu_b = \frac{T}{4\pi R^2 h \omega} - \frac{f}{\omega \ln \frac{b}{a}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$= \frac{60}{2\pi \times \text{r. p. m.}} \left\{ \frac{Wgl}{4\pi R^2 h} - f \ln \frac{b}{a} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

であたえられ $f=0$ のときは式 (13) となる。

f は図-3 のように、流れ曲線 (flow curve) から得られる T_f によって求められる値であって、

$$f = \frac{T_f}{4\pi R^2 h \ln \frac{b}{a}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

であたえられる。

ダイラタント流体、擬塑性流体の場合はその流動方程式が

$$\tau = \mu_a \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad \dots\dots\dots (18)$$

μ_a : みかけ粘度, n : 構造粘性指数

ただし、ダイラタント流体: $n > 1$

擬塑流体: $n < 1$

で表わされるように、粘度は、セン断力とずり速度によって変化する。つまり、みかけ粘度 μ_a は、セン断応力とずり速度との関係を示す流れ曲線において、ある点において定められるもので、次のように表わされる。

$$\mu_a = K \frac{d\tau}{d \left(\frac{du}{dy} \right)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

K : 定数

スローマー型の粘度計の場合は、流動式を次のように考え

$$W = A(\text{r. p. m.})^n \quad \dots\dots\dots (20)$$

式 (19) より、みかけ粘度 μ_a は

$$\mu_a = K_v \frac{dW}{d(r. p. m.)} \dots\dots\dots (21)$$

$$= K_v \cdot A \cdot n(r. p. m.)^{n-1}$$

$$= K_v \cdot \frac{nW}{(r. p. m.)} \dots\dots\dots (22)$$

であたえられる。

2) 実験

回転粘度計を用いて、現実の土石流体のような流体²⁴⁾²⁵⁾を測定するためには、固体と液体が均一に混合している状態を作り出さねばならない。すなわち、静的な状態では固体と液体の比重の差のために固体の沈降が起こり、定常的な状態を作り出ることが困難である。このために化学工学の方面で用いられて来た流動化法の技術²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾を応用した。

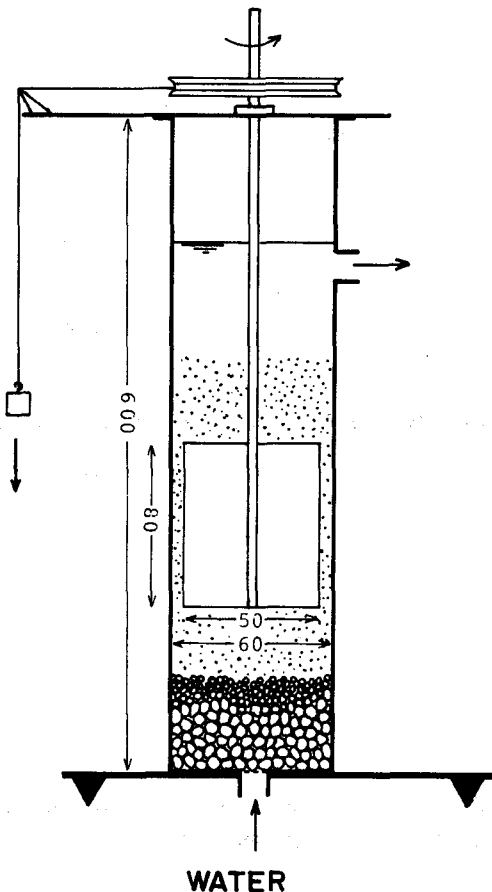


図-4 流動化回転粘度計

の場合、容積濃度で約43%、ガラスビーズの場合、約54%を境としてそれらの流体特性が大きくことなっていることが認められる。

すなわち、流体はずり速度の増加により、その境より容積濃度の低い場合、ニュートン流体からダイラタント流体、容積濃度の高い場合、ビンガム流体からダイラタントな非ビンガム流体へとその性質が変化するものと思われる。これらは、Metzner ら³¹⁾、古川ら³²⁾の実験結果ともほ

図-4はこの技術を応用した改良型の回転粘度計であって、これはストーマー型の粘度計をモデルとして、bob型のローターのかわりに、6枚羽根のローターを作り、試料を入れる外筒として、内径60mm、高さ600mm、の透明なプラスチック製の円筒を用いた。円筒の下部からは、試料を動的な浮遊状態とするために水の注入をおこない、その注入流量により、種々の濃度を作り粘度の測定をおこなった。なお円筒下部には、注入された水の整流のためにガラス球を充填した。

実験に用いた試料は、ほぼ均一にふるい分けされた砂(d_m : 0.2 mm, 0.6 mm, 1.0 mm)およびガラス球(d_m : 0.25 mm, 0.65 mm, 1.20 mm)であって、砂の $d_m=0.2$ mmのものは、筆者らが降雨による土石流実験³⁰⁾をおこなった時に用いた豊浦標準砂である。

この粘度計が流れ曲線をあたえる性能については、ニュートン流体であって粘度について確認のできるグリセリン($\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})=92.10$)を用いて検討し校正をおこなった。

3) 考察

実験の結果えられた、せん断応力とずり速度との関係を示す流れ曲線は図-5のとうりであって、粒径により多少はことなるが、砂

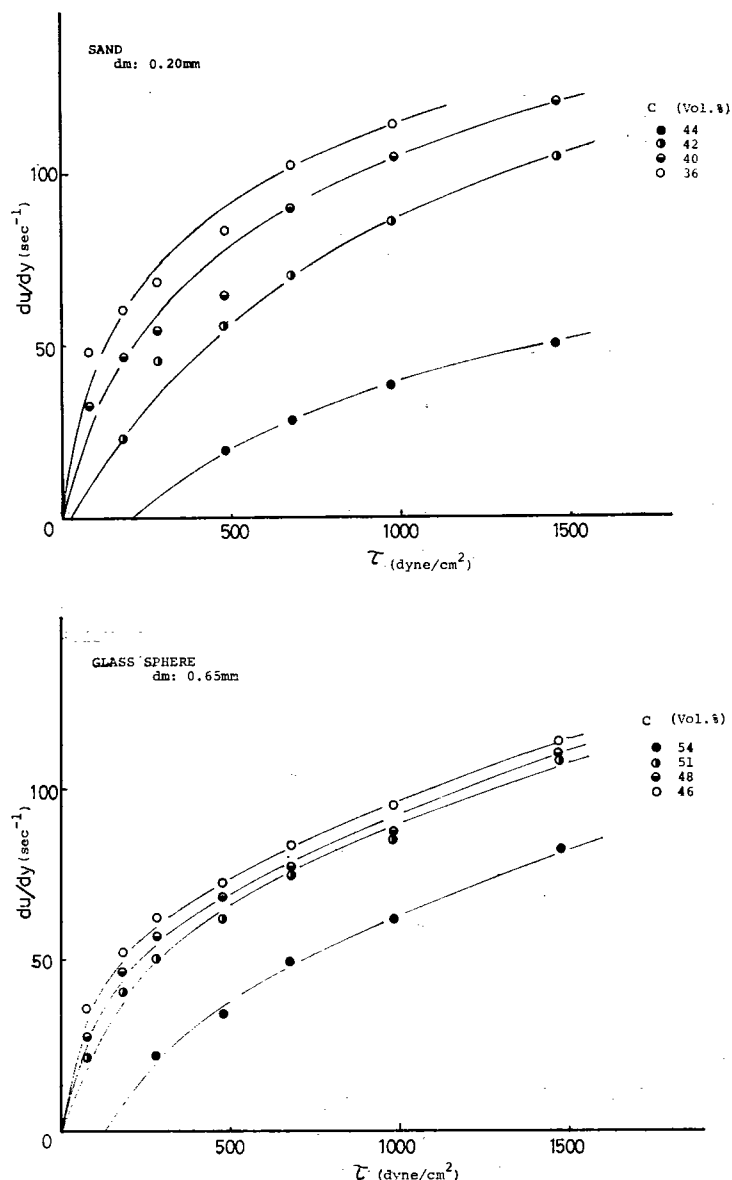


図-5 流れ曲線

ば一致するものである。

図-6はそれらの関係を両対数紙にプロットしたものであって、実線はせん断応力がずり速度の自乗に比例するダイラタント流体を示し、破線は降伏値をもち、せん断応力とずり速度が1:1に比例するとビンガム流体を示すものである。ゆえに、実験範囲内で大胆な分類をおこなうとすれば、限界濃度(砂の場合43%, ガラスビーズの場合54%)より低い場合はダイラタント流体、高い場合はビンガム流体としての性質を持つものとは見なせるものと思われる。

また、図-5のグラフの各点における接線勾配は粘性係数を示し、それらは実験範囲内においては、ビンガム流体と見なしたものについては 10^1 (poise) オーダー、ダイラタント流体と見なしたものについては 10^0 (poise) オーダーの値が得られた。ダイラタント流体と見なした流体にお

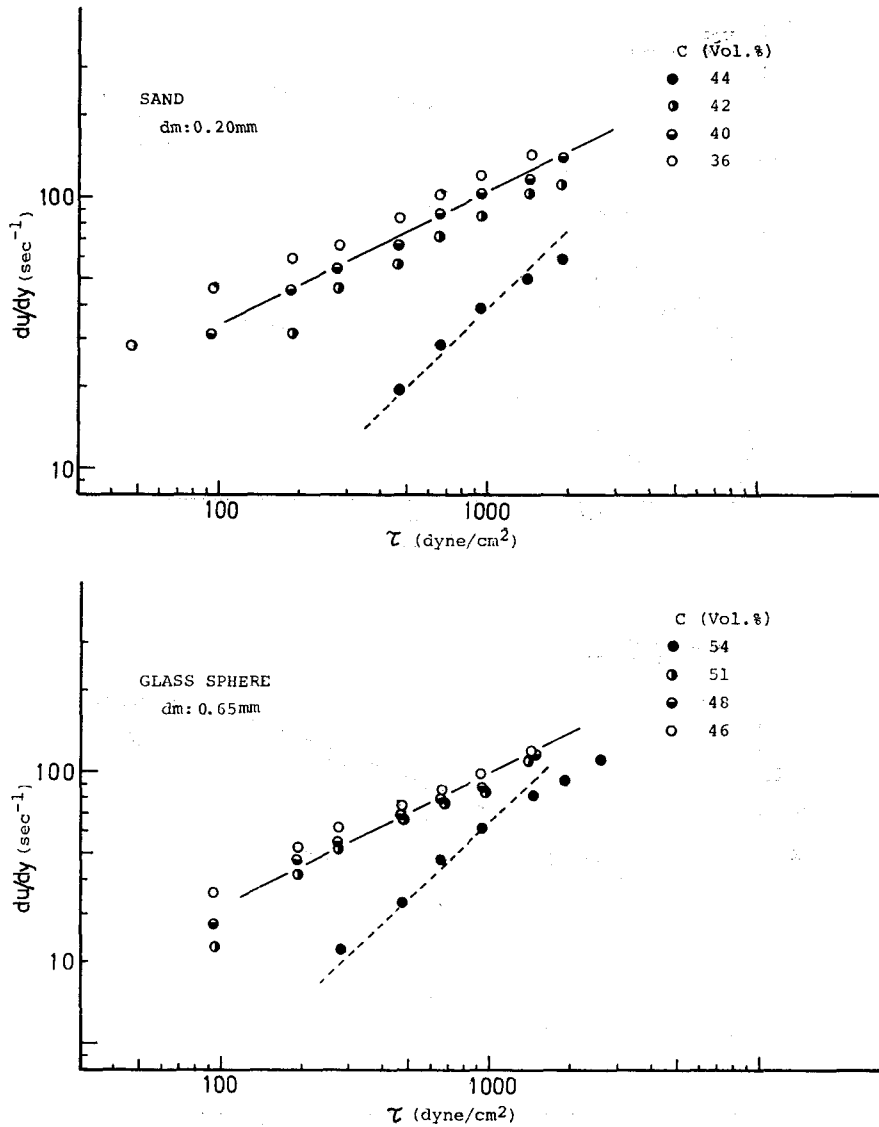
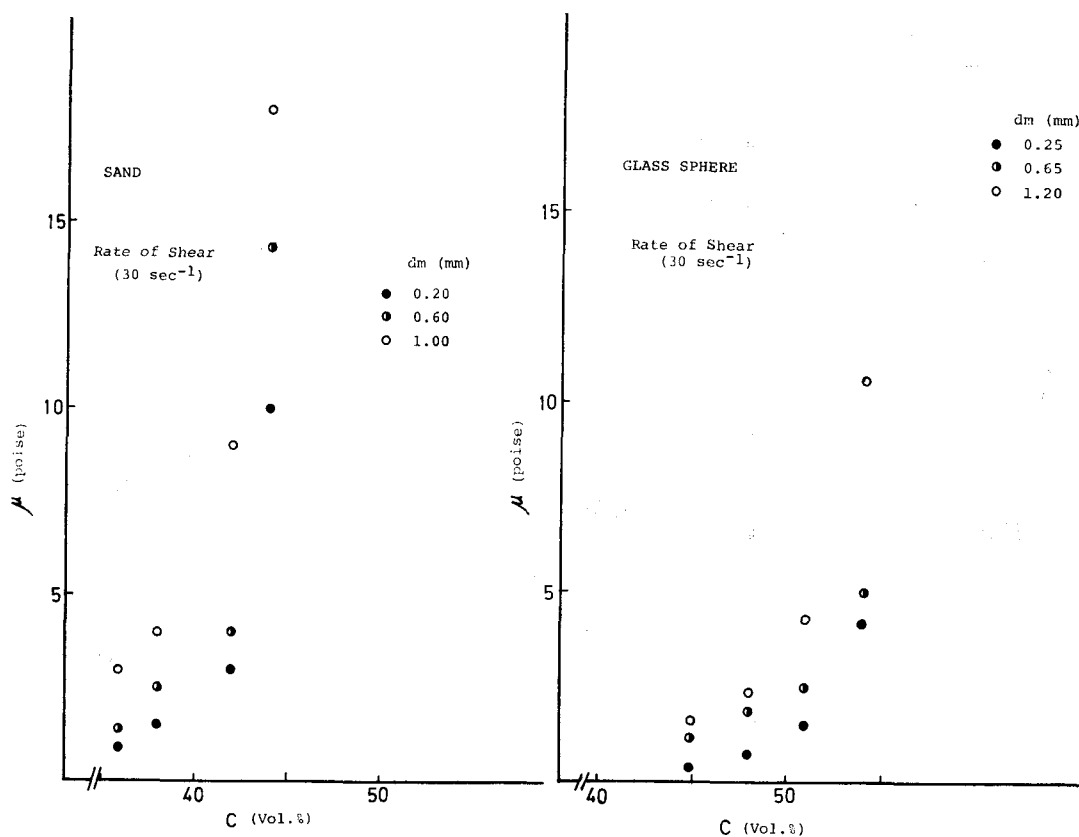


図-6 流れ曲線 (両対数)

いても、容積濃度の高いものの方がずり速度粘稠化 (shear-rate thickening) の傾向が強く認められた。

流体の性質が大きく変化する限界となる容積濃度が、砂とガラスビーズによって11%もことなっているのは、主として粒子の形状によるものと思われる。

また、粒径の相異による差異について検討してみると図-7, 8に示すように粘性係数、降伏値ともに粒径の大きな流体の方が高い値を示す傾向があり、図-7は種々の粒径における粘性係数と濃度との関係を整理したものである。この問題に関して、古川ら³³⁾はTelang³⁴⁾の、粘度は分子容の2/3乗に比例するという論文を引用し、流動層内の粒子を分子、液体分子流動のための活性化エネルギーを粒子を流動させるための流速とみなしてこの結果について説明をおこなっている。



図一七 粘性係数に対する粒径の影響

以上のように、高濃度な混相物においては、その粘度係数および降伏値は容積濃度と粒径との間に相関関係が認められ、これらの要因が流体の性質を大きく支配しているものと考えられる。また各条件においても性質が変化する限界ずり速度についてもさらに検討を加えねばならないものと思われる。

2. 開水路型粘度計

ここでは、土石流体と認められるような流体³⁵⁾の流れを再現し、これを開水路に流下させその流速分布特性を調べることにより降伏値、粘度を求めその流体特性について検討をおこなう。Hampton³⁶⁾はこのような開水路を Channel-Viscometer と呼んでいる。

1) 理論

ここでは実験に用いるような高濃度な流体が、どのような特性を持つものかは未知なものとして、次のような一般式を仮定する。ただし、流れは均一なものであって定常等流であるとする。

$$(\tau - \tau_y)^n = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad \dots\dots\dots (23)$$

たとえば $n=1$ のときは

$$\tau - \tau_y = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)$$

となりビンガム流体を表わすことになり、 $n=1$, $\tau_y=0$ のときは

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

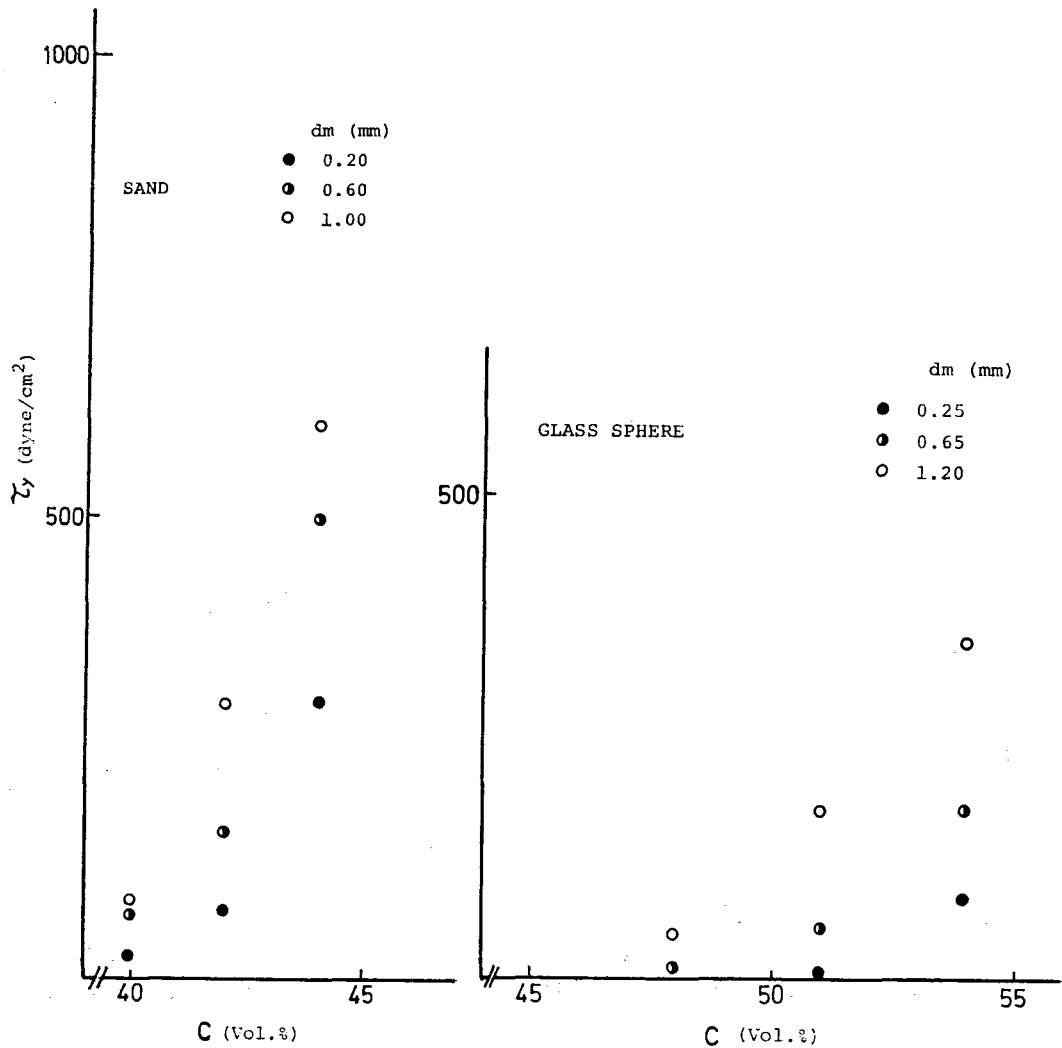


図-8 降伏値に対する粒径の影響

となりニュートン流体の流動特性を表わすことになる。

図-9のような開水路においても降伏値 τ_y を持つ未知の流れを考えると、開水路等流の条件においては

$$1 - \left(\frac{r}{r_w} \right) = \frac{\tau}{\tau_0} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\tau_0 = \rho_s g r_w I_e \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\tau_y = \rho_s g (r_w - r_y) I_e \quad \dots\dots\dots (26)$$

ρ_s : 流体密度 g : 重力加速度 I_e : エネルギー勾配

r_w : 水路床から表面までの深さ r_y : 水路床から降伏値までの深さ

となり、これらを式(24)に代入し変形すると

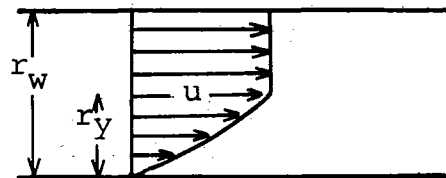


図-9 開水路における流れ

$$\begin{aligned}
 \frac{du}{dr} &= \frac{\tau_y}{\mu} (\tau/\tau_y - 1)^n \\
 &= \frac{\tau_y}{\mu} \left\{ \frac{\rho_s g r_w I_e \left(1 - \frac{r}{r_w}\right)}{\rho_s g (r_w - r_y) I_e} - 1 \right\}^n \\
 &= \frac{\tau_y^n}{\mu} \left(\frac{r_y - r}{r_w - r_y} \right)^n \\
 &= \frac{\tau_y^n}{\mu} \left(\frac{\frac{r_y}{r_w} - \frac{r}{r_w}}{1 - \frac{r_y}{r_w}} \right)^n \dots\dots\dots (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{r_y}{r_w} &= a \quad \frac{r}{r_w} = x \quad \text{とすると,} \\
 \frac{du}{r_w dx} &= \frac{\tau_y^n}{\mu (1-a)^n} (a-x)^n \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

これを積分すると

$$U = \frac{-\tau_y^n r_w}{\mu (1-a)^n (n+1)} (a-x)^{n+1} + C \dots\dots\dots (29)$$

境界条件 $r=0$ のとき $u=0$ として積分定数 C を求めると、一般式の流速分布は次式で示される。

$$U = \frac{\tau_y^n r_w}{\mu} \left\{ \frac{a^{n+1} - (a-x)^{n+1}}{(1-a)^n (n+1)} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

すなわち、式 (31) において $n=1$ とすればビンガム流体の流速分布式は、

$$U = \frac{\tau_y}{2\mu} \left\{ \frac{x(x-2a)}{1-a} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

で表わされ $n=1$, $a=0$ とおくとニュートン流体の流速分布式は

$$U = \frac{\tau_w r_w x^2}{\mu 2} \dots\dots\dots (32)$$

となり、また $n \neq 0, 1$ $a=0$ とすればダイラタント流体や擬塑性流体の流速分布式は、

$$U = \frac{\tau_w r_w x^{n+1}}{\mu n+1} \dots\dots\dots (33)$$

と表わされる。

2) 実験

高濃度な流体を開水路に流下させるために本実験ではコンクリート・ミキサーを用いて土石流体と認められるような濃度に固一液を混合攪拌し、開水路に流下させた。図-10は実験装置を示すものであって、開水路は幅 7 cm, 高さ 20 cm, 長さ 200 cm の透明アクリル樹脂板で製作されており、水路床には綿布を接着し粗度をあたえた。なお勾配としては、土石流体の流下勾配

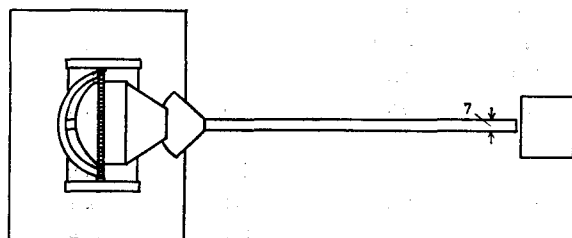
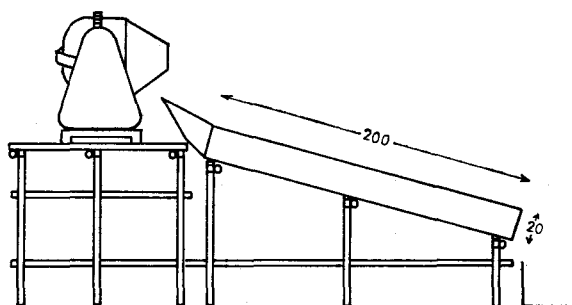


図-10 開水路型粘度計

とされている 20° および 15° とし、試料としては、ここでは豊浦標準砂 ($d_w=0.2\text{ mm}$) による実験である。

流速分布の測定は、ほぼ等流な状態としてみなしうる、水路下端より 80 cm の所に、流速分布をとるインデックスを水路側壁部において水路床に垂直方向に挿入し、その動きを水路側面よりモータードライブカメラで 0.25 秒間隔に撮影し、それらの連続写真よりインデックスの差を読みとり、流動速度、流動深、プラグ部分の深さの算出をおこない、流動分布形を求めて以下の解析に用いた。

なお、実験においてはインデックスの挿入がうまくいかなかったものや、分散してしまったものも数多く、明瞭に読みとれるものについてデーターの整理をおこなった。またインデックス挿入による流れの乱れは小さなもので無視しうるものであった。

水路下流端においては流速分布と容積濃度との関係を検討するために、流下試料の採取もおこなった。

3) 考察

求めた流速分布を図-11のような形に整理してみると明らかなように、容積濃度 43% 付近を境としてその性質は大きく変化しており、 43% 以上の試料はビンガム流体、また 43% 以下のものはダイラタント流体と思われる。これは筆者らがおこなった土石流の流下過程に関する実験³⁷⁾ において認められた現象を説明できるものと思われる。また、前記

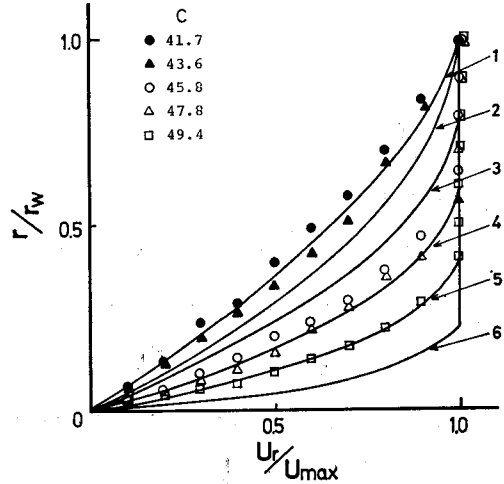


図-11 流速分布図

- 1 : ダイラタント流体 2 : ニュートン流体
3 : ビンガム流体 $a=0.8$ 4 : ビンガム流体 $a=0.6$
5 : ビンガム流体 $a=0.4$ 6 : ビンガム流体 $a=0.2$

表-1 開水路型粘度計による粘性係数

Exp. No.	C (Vol.%)	r_p (cm)	r_w (cm)	$U_{max.}$ (cm/s)	I (deg.)	μ (poise)
31	49.1	2.5	4.7	38	20	49.9
45	45.8	3.1	4.7	40	20	71.0
46	47.8	2.7	5.0	30	20	72.9
50	46.3	2.8	5.0	44	20	53.2
66	44.3		5.0	110	20	0.02
67	40.8		4.7	70	15	1.00
68	46.5	1.9	4.1	22	15	36.9
76	49.4	2.2	5.3	20	15	55.5
100	41.7		3.8	52	15	0.98
103	47.8	2.1	3.8	16	15	62.3
104	43.6		3.8	44	15	1.18
108	47.8	1.9	3.8	24	15	34.1
109	50.2	1.9	3.4	24	15	34.9
110	44.7	2.3	3.8	26	15	44.6
115	45.8	3.1	5.0	56	15	38.3

の流動化回転粘度計における結果とも一致するものである。

次に、これらのデーターを一般式 (24) より導いた (32) (34) に代入し粘性係数を求めたものが表-1 であって、流動化回転粘度計における結果といくぶんことなるが、オーダー的にはビンガム流体 10^0 (poise) ダイラタント流体 10^1 (poise) と同じ結果がえられた。

IV お わ り に

今回、土石流体の性質を知るための基礎として、流動化回転粘度計および開水路型粘度計を用いて実験をおこなったのであるが、現実の土石流の規模と対応するものかどうか問題点も数多く含まれている。すなわち、ダイラタント流体であるためには、Middleton³⁸⁾ も示しているように、かなりのずり速度を必要とするために、現実の流速と、流動深を考えると成立しうるものかという点。またビンガム体とみなせる濃度の流れにおいても、ビンガム体として流れうる流速、つまり、乱流となる限界流速についての検討をおこなっていない点。均一な小さい粒径の試料において実験をおこなっているために、現実において認められるような大礫がどのような影響を与えるか、等今後さらに実験の範囲を広げ、これらについて検討を加える。

参考および引用文献

- 1) James W. D.: 粒子を懸濁した水の流れ, 土木学会誌, Vol. 49-6, pp. 42-46, 1964
- 2) 富田幸雄: レオロジー, コロナ社, 1975
- 3) Wilkinson W. L.: Non-Newtonian Fluids, Pergamon Press, 1960
- 4) 小野木重治: レオロジー要論, 槇書店, 1973
- 5) Metzner A.B., Whitlock M.: Flow behavior of concentrated suspension, Trans. Soc. Rheology; Vol. 2, pp 239-259, 1958
- 6) 飯田汲事: 昭和13年5月9日及び15日の磐梯山麓川上温泉付近における山津波, 並びに流下させる火山灰質土砂の2・3の物理的性質, 東京帝国大学地震研彙報, Vol. 16, pp 658-681, 1938
- 7) Sharp R.P., Nobles L.H.: Mudflow of 1941 at Wrightwood southern California, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 64, pp 547-560, 1953
- 8) Curry R.R.: Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range Central Colorado, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 77 pp 771-776, 1966
- 9) 大同淳之: 土石流に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1970
- 10) Johnson A.M.: A model for debris flow, Ph. D. dissertation Pennsylvania State Univ., 1965
- 11) Hampton M.: Subaqueous debris flow and generation of turbidity, Ph. D. dissertation Stanford Univ., 1970
- 12) 駒村富士弥: 治山・砂防工学, 森北出版, pp 127-133, 1978
- 13) 平野宗夫・岩元 賢: 土石流先端部の挙動について, 砂防学会概要集, pp. 112-113, 1978
- 14) Bagnold R.A.: The flow of cohesionless grain in fluid, Phil. Trans. Roy. Soc., Vol. 249, Ser.-B, pp 235-297, 1956
- 15) Dement'yev M.A.: Internal friction and lateral particle interaction in high density slurry flows, Fluid Mech. Soviet Research, Vol. 14-1, pp 17-28, 1975
- 16) 高橋 保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研年報, No. 20-B, pp. 405-435, 1977
- 17) 河村三郎他: 土石流の流下速度と流砂量について, 第14回自然災害科学シンポジウム論文集, pp. 125-128, 1977
- 18) Bagnold R.A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluids under shear, Pro. Roy. Soc. of London, 225 Ser.-A, pp 49-63, 1954
- 19) 高分子学会, レオロジー委員会: レオロジー測定法, 共立出版, 1965
- 20) Reiner M.: レオロジーの基礎理論, コロナ社, 1962
- 21) 伊藤四郎: 化学技術者のための流体力学, 科学技術社, 1962
- 22) Lamb H.: Hydrodynamics, Cambridge Univ. Press., pp. 587-588, 1932
- 23) Fisher E.K.: Colloidal Dispersions, John Wiley & Son. Inc., pp 147-233, 1950

- 24) 矢野勝正：水災害の科学，技報堂，1961
- 25) 遠藤隆一：砂防工学，共立出版，1958
- 26) 白井 隆：流動層，科学技術社，1968
- 27) 植松時雄他：流体固体輸送工学ハンドブック，朝倉書店，1966
- 28) 大前 昶，古川淳二：流動粉体のレオロジー的性質について，工業化学雑誌，Vol. 57, qq. 788-791, 1954
- 29) 大前 昶，古川淳二：流動粉体の性質，工業化学雑誌，Vol. 54, pp. 798-800, 1951
- 30) 塩野裕司他：土石流の土砂流出過程に関する研究，砂防学会研究発表会概要集，pp. 60-61, 1977
- 31) 5) に同じ
- 32) 28) に同じ
- 33) 28) に同じ
- 34) Telang M.S.: On the mechanism of viscosity of liquids, J. Chem. Phys., Vol. 17, 1949
- 35) 30) に同じ
- 36) 23) に同じ
- 37) 30) に同じ
- 38) Middleton G.V.: Small-scale models of turbidity currents and the criterion for anto suspension, J. Sed. Petrology, Vol. 36, pp 202-208, 1966

Résumé

The rheological properties of concentrated solid-liquid flow, such as debris flow, was investigated in this study.

Two instruments were used to measure the properties. One was the fluidized rotational-viscometer, the other was the channel-viscometer.

The mechanisms of such high concentrated fluid were postulated for the Newtonian-Dilatant, or the Bingham-Dilatant shape of the flow-curve when the fluid moved from low to high shear rates. The shape of these flow-curves differed with concentration less than and greater than about 43% (by Volume) for sand, and 54% for glass beads.; At higher concentration, the fluid had a yield value, and regarded as the Bingham fluid for the most part. At lower concentration, it behaved as a shear-rate thickening flow—shearing stress was in proportional to the square of shear rates—, and almost regarded as the Dilatant fluid.

The coefficients of viscosity of the fluid was of the order of 10^0 (poise) at the lower, and 10^1 at the higher.