

# 土石流に関する基礎的研究（第一報）

矢野 勝正・大同 淳之

## FUNDAMENTAL STUDY ON MUD-FLOW (I)

by Dr. Eng. Katsumasa YANO and Atsuyuki DAIDO

### Synopsis

The purpose of this paper is to present briefly the results of experiment on the characteristics of mud-flow. In this experiment, the velocity distribution and friction coefficient are measured and the effect of the concentration on the stream flow is discussed.

### 1. ま え が き

一般に土石流とは水量よりも土石量の大きな流れを指し、その土石量は重量比にして 50~70%、その単位重量は 1.3~1.5t/m<sup>3</sup> であるといわれている<sup>1)</sup>。その成因については明らかではないが、異常降雨に見舞われた山間部では、往々にして土石流が発生し、下流河川の治水または利水施設を徹底的に破壊してしまうことが多い。災害が生ずるために土石流による被害が喧伝されるが、土石流そのものの定義すら十分でなく、土石流の発生および運動機構については全く不明であつて、したがつてこの被害を科学的に防ぐ対策はほとんど確立されていない。

流砂をとまらぬ流れについての研究は、今まで多くの人達によつてなされているが、そのほとんどは比較的緩勾配の流れを対象としたもので、流砂量はせいぜい水量に比して数%にすぎず、その解析もまだ十分であるとはいえない。まして土石流のような大量の土石をとまらぬ流れについても、いままでの流砂を取扱う考え方が適用できるかどうか、土石流の現象そのものが現在では明らかでないので不明である。二、三人<sup>2)</sup>がこれを把握せんとして実験を試みたが、多量の土石を長時間供給する必要があるために特別の施設を必要とし、十分な成果はまだ得られていないようである。

さいわい、防災研究所に土石流の流動の研究を目的として、実験施設が新設され、これらの研究が可能になつた。実験を始めたばかりで初期の目的が得られたわけではないが施設の概要の報告をかねて、今までに得られた実験結果についてのべる。

### 2. 実験装置と方法

実験に用いた装置は、Fig. 1 に示すように土石流を流動させる水路は幅 20 cm、深さ 24 cm、有効長 18 m である。底および側面は鋼製で、中央部 10.5 m 区間は側面から流動の模様を観察できるように両面ガラス張りである。水路は鋼桁の上に据えられ、鋼桁の一端を支えるリフトを上下させることによつて、水路の勾配を 0~1/5 まで変えることが可能である。

水および土砂を実験中常に一定に供給できるように、下流へ流出した流れは土砂とともにサンドポンプで上流に送り、循環させるようにした。実験に用いる砂の粒径は最大 2cm 程度まで可能である。ただしあとのべるような細かい粒径を用いる場合には、ポンプのグランドパッキングのところからかなりの土砂の流出がみられ、長時間には濃度の変化が生ずる恐れがある。この装置に用いたポンプは、ポンプの胴体の中で溝のある円板が回転して液体に運動を与える摩擦ポンプと呼ばれる型式に属するが、余分の砂を帰還管路内

に堆積せしめないようにできるだけ断面を少なく製作したため、水路内の液体容量は  $2.0 \text{ m}^3$  に満たず、実験中ポンプの余熱を受けて流水にはかなりの温度上昇がみられた。したがって、実験はまえもつてポンプを駆動して、温度変化の少なくなるのをまつて行なうことにした。

まず最初に行なつた実験は、Fig. 2 に示す砂を用

い、砂の濃度を種々変えて、流速分布と抵抗係数について調べた。実験の範囲は流量  $5 \text{ l/sec} \sim 20 \text{ l/sec}$ 、濃度は重量比で  $0 \sim 33\%$  程度、水路勾配は  $1/100$  である。流量の調節はポンプの出口のバルブを開閉して行

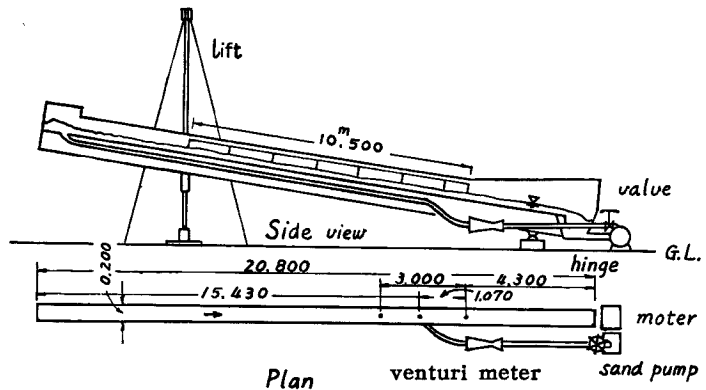


Fig. 1. Experimental apparatus

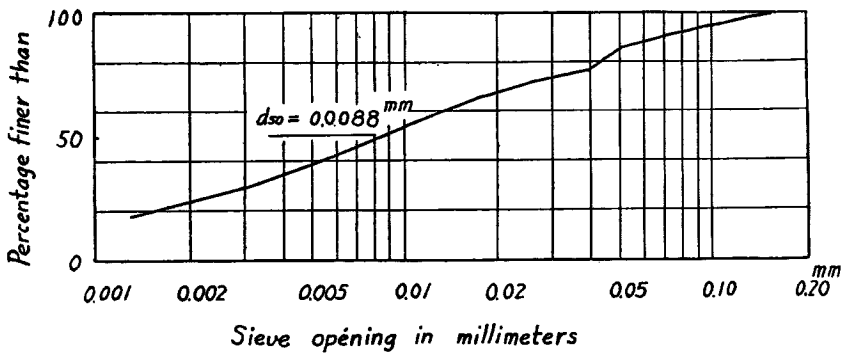


Fig. 2. Sieve analysis curve of used sand

ない、測定は Venturi meter で行なつた。流速分布の測定は外径  $3.2 \text{ mm}$  のピトー管で行ない、流砂でピトー管のつまる恐れのある場合は、岩垣博士考案の応用ピトー管<sup>3)</sup>法を用いた。実験結果の整理に用いた平均流速は、流量と流積から求めたもので、水深は point gauge で5回測定してその平均値をとり、水面勾配は静圧ピトー管によつて求めた。なお底面にだけ粒径が  $1.85 \text{ mm}$  の砂をはりつけて粗面としている。

流れの中の浮遊砂の分布は外径  $8 \text{ mm}$  の真鍮管でサイフォンによつて採集し、乾燥せしめて重量を測定した。流れの平均濃度  $\bar{c}$  は、水路末端の水槽内の十分攪拌されている部分から採集したものをを用いた。

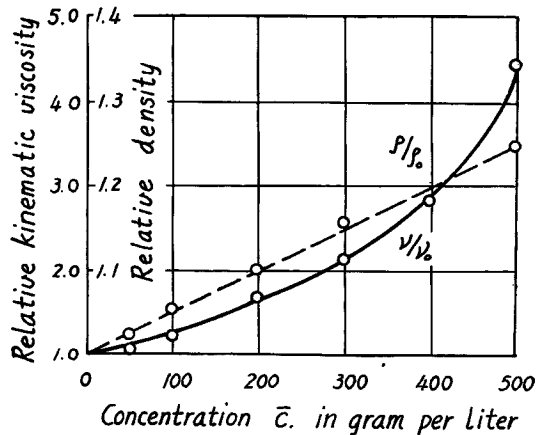


Fig. 3. Correlations between  $\nu/\nu_0$ ,  $\rho/\rho_0$  and concentration  $\bar{c}$

この砂を用いた実験の濃度分布は測定結果から断面一様とみなすことができ、この結果は Rouse の濃度分布式から首肯しえた。したがって流動中は水と砂が完全に混合した流体とみなすことができ、流体の単位重量、動粘性係数も断面内では一様とみなすことができた。単位重量、および動粘性係数の濃度変化による

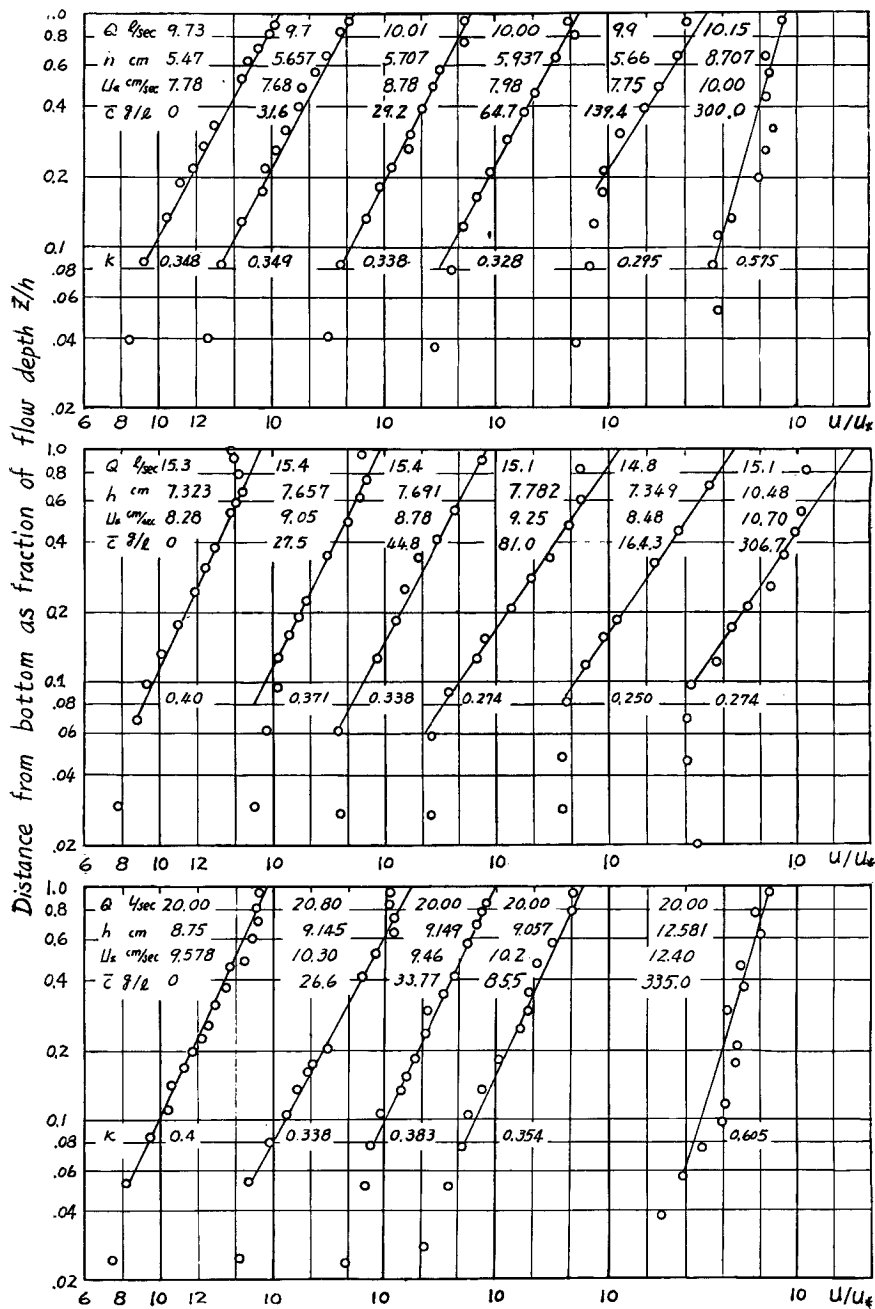


Fig. 4. Dimensionless velocity profiles at center of flume

変化は、測定によれば Fig. 3 のようである。動粘性係数はオストワルド粘度計で測定した。動粘性係数の温度による変化の挙動は、水の動粘性係数の温度による変化に等しく、濁水の清水に対する相対動粘性係数  $\nu/\nu_0$  はどの温度でも等しい結果を得た。したがって濁水の動粘性係数の温度による変化は、媒質である水の温度による変化に支配されることを示している。

3. 実験結果と考察

開水路の流れの流速分布は対数法則にしたがうが、Vanoni<sup>4)</sup>, Ismail<sup>5)</sup> は浮遊流砂をとまなう流れの流速分布は同じ形の式であらわすことができ、ただその中の常数 Karman's const,  $\kappa$  が濃度とともに、減少することを示した。これは浮遊流砂があると流れは速度勾配を増し、乱流交換現象を減少させ、さらに摩擦抵抗を減少させる傾向にあることを意味する。

しかしながら現在までに行なわれてきた実験は流砂量がせいぜい数%であつて、われわれの対象としている土石流ではない。したがって非常に多量の土石をとまなう流れでも対数分布則が成立するかどうか不明である。ことに水中に含まれる粒子が細かい流れ、たとえば粘土を水に分散させたような場合には、濃度が大きくなると乱流理論が成立しなくなり、たとえば擬塑性流的な性質を示すことも当然予想されるところである。

Fig. 4 はこれらを確認する意味でなされた流速分布の測定結果で、断面中央で測定したものである。図に示すようにとりあえず流速分布をつぎのようにあらわした。

$$\frac{u}{u_*} = A + \frac{1}{\kappa} \log \frac{z}{h}$$

ここに、 $u$  はその点の流速、 $u^*$  は摩擦速度、 $A$  は壁面の粗さを示す係数、 $\kappa$  は Karman の常数、 $z$  は底から測つた距離、 $h$  は水深である。図は流量が一定で濃度が異なつた場合を列記した。図からわかるように濃度が15%程度までは対数法則で表示することができ、 $\kappa$  の値は濃度の増加とともに減少するようである。ただ濃度が30%程度の流れでは対数分布で表示することが困難になり、しいて  $\kappa$  を求めると  $\kappa$  の値は逆に大きくなる。濃度と  $\kappa$  の関係を示すと Fig. 5 のようである。Fig. 4 に示した数値からも明らか

ように、濃度が15%までは水深の変化はさほど明確でないが、30%では著しい増加を示している。以上の実験の結果から、この実験に使用している砂の粒径では、濃度が30%近くでは対数分布が成立しなくなるものとみるほうが妥当であろう。この領域では厚い層流底層の上を mass がずり落ちるような様相を示すようになる。土石流の現象としてはむしろ

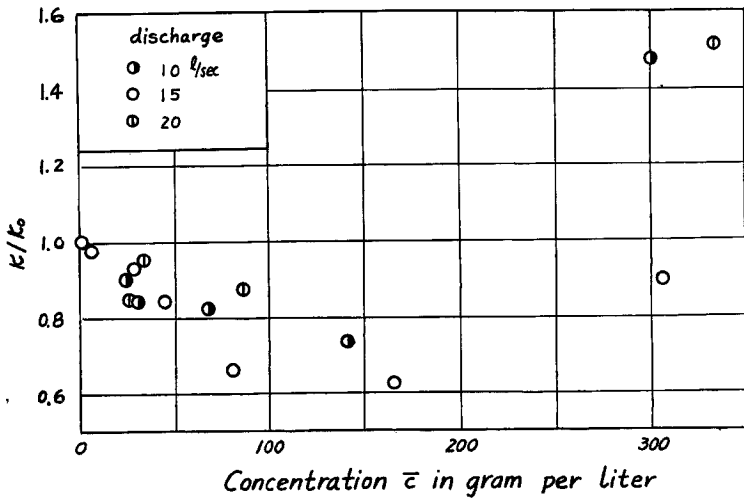


Fig. 5. Correlation between  $\kappa/\kappa_0$  and concentration  $\bar{c}$

こうした様相を示す範囲であらう。こうした現象が生じ始める限界がどこにあるかについては、実験資料がまだ十分でないので不明である。

ただ今までの流速分布の測定結果から注目されるのは、清澄な水に比較して砂の濃度が増すにしたがつて流速が減少することである。Vanoni らの実験では砂を含むことによつて明らかに流速の増大を示してい

る。砂の濃度が異なるので比較はできないが、これは粒径および粘性の差によるものと思われる。これについては引きつづき粒径の異なる砂に対して実験を行なう予定である。

$\kappa$  の減少は、摩擦速度の等しい流れを考えると、速度勾配が増し、渦動粘性係数は減少するとみることができる。しかしながらこの実験で用いた粒径では、清澄な水に比較して粘性が大きいために、速度勾配の増大とともに粘性による剪断応力の増大を考える必要がある。また抵抗係数を考える場合は、濃度によって壁面の粗さがどのように変化するかということも問題になる。

さきの流速分布式を変形して

$$u/u_* = (1/\kappa) \ln Mz$$

とあらわすと、 $M$  は層流底層あるいは壁面の粗さの影響を示すもので、滑面であれば  $u_*/m_s\nu$ 、粗面のときは  $1/m_r k_s$  である。ここに、 $k_s$  は壁面の粗さ、 $m_s$  および  $m_r$  は滑面および粗面を示す定数で、Nikuradse に従えば  $m_s=1/9$ 、 $m_r=1/30$  である。

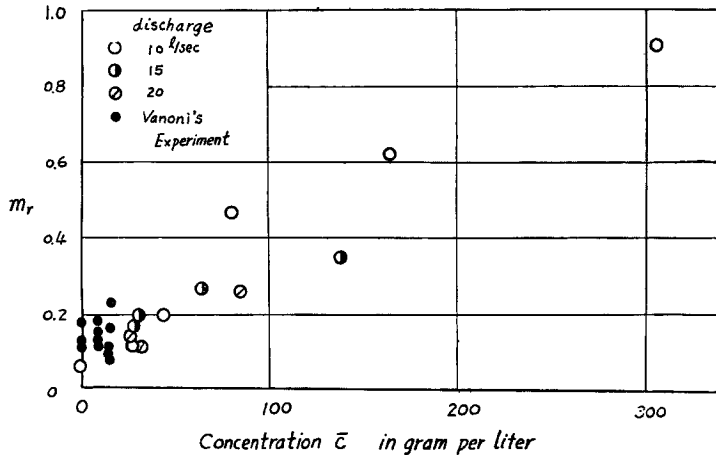


Fig. 6. Correlation between  $m_r$  and concentration  $\bar{c}$

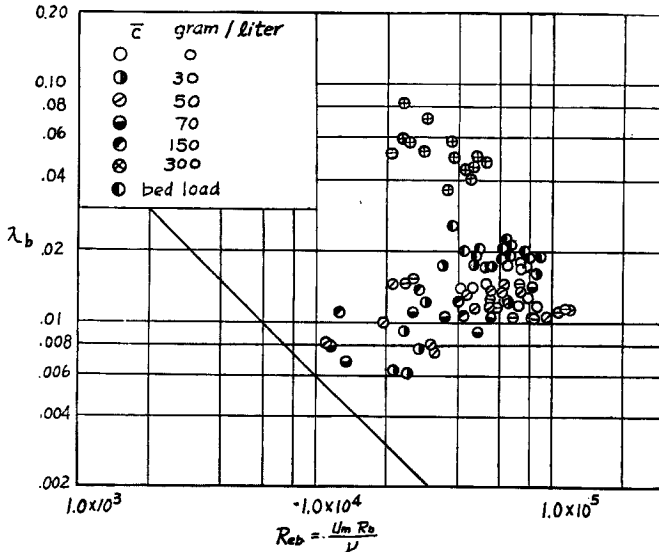
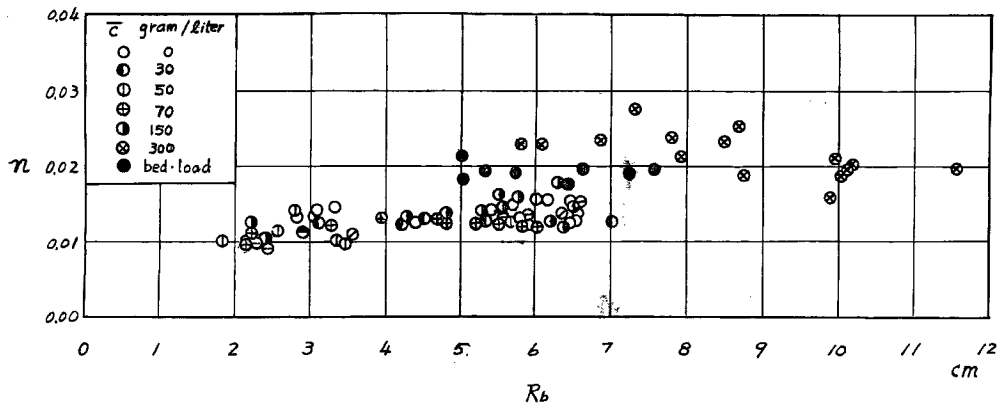


Fig. 7. Correlation between  $\lambda_b$  and  $R_e$

Fig 6 は Fig. 4 の流速分布から  $m_r$  を求めた結果である。これによると濃度の増加とともに  $m_r$  は増加し、壁面の抵抗の増大を示している。図中の黒点は Vanoni の実験資料を同様な方法で整理した結果である。Vanoni は彼の実験で抵抗係数が減少したことから、浮遊砂が粗面の間を埋めて滑面化するのではないかと示唆しているが、この図からは必ずしも断定し得ないようである。

Fig. 7 は抵抗係数の測定結果を示したもので、側面と底面の粗さが異なるため、ここでは Einstein<sup>9)</sup> の方法により側壁の影響を除外した  $R_0$  を用いて表わした。ただし、ガラス面上での濃度による抵抗係数の変化は不明なので、清澄な水の値を用いて側壁の抵抗を除外した。この点や Einstein の方法自体にも問題があるが、結果は図に示す通りである。傾向として濃度が増しても抵抗係数の増加は顕著でなく、むしろ低目にていられるようで、ただ濃度30%では明らかに大きくなっている。した

Fig. 8. Correlation between  $n$  and  $R_b$ 

がつて、普通工学的に取扱われる Manning 係数  $n$  で表した場合には、Fig. 8 に示すように濃度による粗度の増加はさほど明らかでない。図中に bed load と記載してあるものは、底にはりつけた砂と同じ粒径の  $d_{50}=1.85\text{mm}$  の砂を、底に堆積しない程度に流した場合で、掃流型式で砂が移動したものである。この場合には全流砂量は平均濃度と比較すれば、浮遊で流れている他の実験の場合より少ないにもかかわらず、 $n$  の値は大きくなっている。したがって土砂をともなう流れの抵抗係数を考える場合、抵抗係数は浮遊型式で移動しているものの影響は小さく、掃流型式で移動するものに支配されるようである。

#### 4. む す び

以上、施設の概要と今までに得られた若干の実験結果についてのべた。得られた資料の解析も不十分で、今後の問題点を指摘したにすぎないが、今後ひきつづき実験を行ない、次第に土石流そのものの実験に移る段階として、一応ここに報告した次第である。

実験に協力された苗村茲克、矢木昭雄、内田興一の諸氏に感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 遠藤隆一：砂防工学，昭.33，P.21.
- 2) 例えば 柿徳一：土石流の実験的研究（第一報），新砂防 19，昭.30，pp. 1-4.
- 3) 石原藤次郎，岩垣雄一，末石富太郎：流砂ある場合の流速測定について，京都大学工学研究所集報，第5輯，昭.29.3，pp. 31-34.
- 4) Vitto A. Vanoni：Transportation of Suspended Sediment by Water, Proc. A.S.C.E., June, 1944, pp. 793-828.
- 5) Hassan M. Ismail：Turbulent Transfer Mechanism and Suspended Sediment in Closed Channels, Trans. A.S.C.E., Vol. 117, 1952, pp. 409-446.
- 6) H. A. Einstein：Formulas for the Transportation of Bed Load, Trans. A.S.C.E., Vol. 107, 1942, pp. 561-577.