

II-18 流路内の泥流流速に関する実験的研究

北海道大学工学部 正 員 山 岡 勲
同 上 正 員 長谷川和義
同 上 学生員 ◎渡 辺 隆

1. はじめに

著者ら¹⁾は、有珠山の泥流災害を契機に、緊急な課題として浮かびあがった、流路工における泥流の流動特性を明確にするために、一昨年来、低粗度固定流路内の流動実験を進め、(1) 同一条件下の泥流でも、流れのタイプによって異なる流速値を取りうること、(2) 流路の粗度が流れに大きな影響を与える可能性があることなどを指摘してきた。

高橋ら²⁾は、発生土石流の流動がダイラタント流体として解析しうることを示し、多くの成果をあげてきたが、平野ら³⁾は、ベルトコンベア式水路による解析から、ビンガム流的な性質を指摘しており、また固定床水路内の泥流の挙動に関する研究は、始まったばかりの状態であって、解明すべき課題は多く残されている。

本論文は、流路の粗度条件を大きく変えた新たな実験を実施するとともに、昨年度の実験との比較を行なうことにより、粗度が流れに対していかなる影響を与え、また各条件下の泥流がいかなるモデル流速によって近似しうるかを明確にしようとするものである。

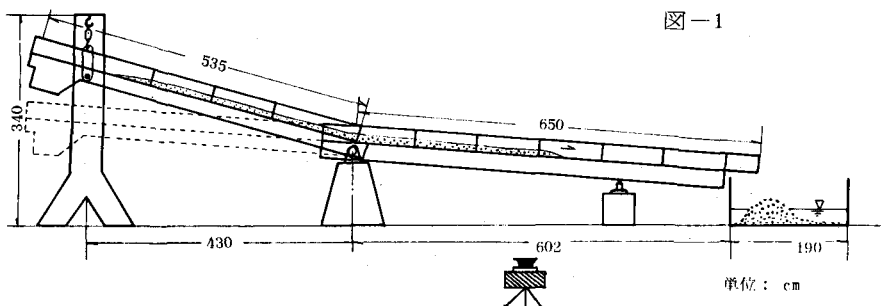
2. 実験装置と実験方法

2-1 本実験に使用した水路は、全長約12mの鋼鉄製水路で、図-1に示すように、上部泥流発生部と下部泥流流動部に分かれていて、それぞれ独立に勾配を変えることができる。上部水路は長5.5m、幅20cmで、この上に、厚8cmに火山灰を敷きならし、ある程度湿潤させた後に上流端から清水を給水することによって泥流を自然発生させるようになっている。発生泥流の濃度は、設定勾配によって種々に変えることができる。下部水路は、長6.5m、幅22cmで、側面がアクリルガラスから成っており、底面は、昨年度の実験が、鋼板・防錆ペイント塗(マニング粗度係数 $n \approx 0.01$ 、相当粗度 $k_s = 0.019\text{cm}$)であり、今年度実験は、10mm程度の碎石を一様に張りつけている($n \approx 0.02$ 、 $k_s = 1.22\text{cm}$)。以下、昨年度実施した低粗度のシリーズを実験A、今年度の高粗度のシリーズを実験Bと呼称することにする。流下泥流は、水路中央に設定された16mmシネカメラによって撮影され、平均流速、泥流深、ならびに泥流面勾配が測定され、また水路の上下流端における泥水のサンプリングによって、その容積濃度が測られる。

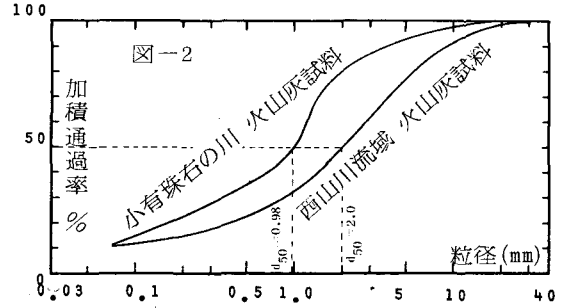
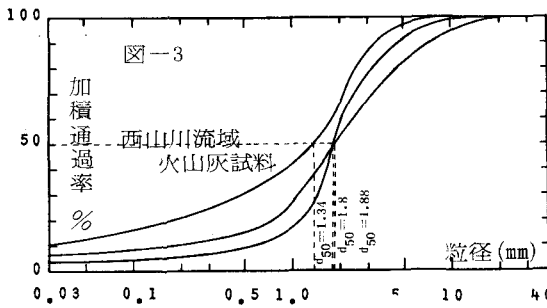
2-2 使用火山灰は、有珠山麓のものであり、実験Aは西山川のスリットダム直上流右岸斜面の表面から深さ約1mまでの灰(比重 $\sigma/\rho = 2.18 \sim 2.33$ 、 $d_{50} = 2.0\text{mm}$)と、小有珠右の川スリットダム上流斜面の表面から数cmまでの灰($\sigma/\rho = 2.51$ 、 $d_{50} = 0.98\text{mm}$)の二種を使用している。これらの粒度構成は、図-2のようである。また実験Bは同じく西山川のスリットダム直上流右岸斜面の灰($\sigma/\rho = 2.36 \sim 2.42$ 、 $d_{50} = 1.34 \sim 1.88$

mm)を用いており、粒度構成は、図-3のごとくである。

2-3 実験は、表-1に示す組合せによって、それぞれ実験Aについては46回、実験Bについては45回行なわれた。



粒徑加積曲線



3. 泥流の流動性状に関する研究

3-1 現在、流体におけるせん断力とせん断速度との関係は、粘性挙動の最も単純なニュートン流の他にも多種多様な非線形の関係式が考えられている。泥流がどのような種類の流体に属するかは、泥流の流動特性を解析する上で非常に有効であり、平均流速を考える上でも重要である。本研究においては、泥流に対する

表-1 実験条件

水路底の粗度係数	火山灰の種類	上部勾配	下部勾配
$n \approx 0.01$	a. 西山川火山灰	5mm 通過	1 : 3
		10mm 通過	1 : 4
		20mm 通過	1 : 5
	b. 小舟珠右の川火山灰	1 : 3	0.04
		1 : 4	0.08
		1 : 5	0.111
			0.146
$n \approx 0.02$	c. 西山川火山灰	5mm 通過	1 : 3
		10mm 通過	1 : 4
		20mm 通過	1 : 5
			0.08
			0.095
			0.111
			0.12

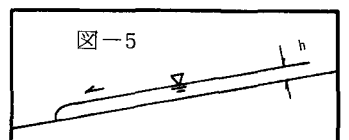
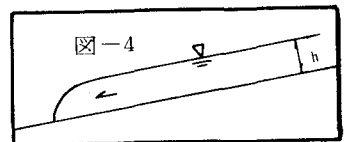
固定床の粗度の影響をみるために、マンニングの粗度係数が0.01の場合(A)と、0.02の場合(B)の2通りのケースの観察を行なっているが、これらの泥流はニュートン流体の流れに比べて、それぞれかなり異なった挙動を示す。

まず、実験Aについては、流れの表面に近い部分が、固体状に全く変形しないまま流下する現象が多くみられる。これは泥流がある値以下のせん断力では、流体としての性質を失うことを示すもので、一般にビンガム、あるいは非ビンガム流体として知られる性質を有することを示唆している。管路内の流れでは、この固体部分を栓部(plug)と称しており、以下本実験に関しても、この部分を栓部と呼称することにする。

実験Bについては、先端部が明瞭な段波形状を呈するものが多く、表面粒子が底面に運びこまれる「巻き込み」が顕著で、全体がふくれあがるように流下する。これらの現象は、泥流内における粒子間の接触の強さを暗示するものであり、ダイラタント流体としての性質を示唆しているようである。

3-2 上述の大まかな流れの性質の違いの他に、発生した流れの形状に着目して詳細な観察を行なうと、これらの間にも相当の違いがみられる。これを次の様な5つのタイプに分類する。こうしたタイプの発生要因は、今のところ必ずしも明らかではないが、後に述べるように、平均流速に対して異なるまとまり方をすることが多く、解析上重要である。

Type I: 図-4の様に、先端が明瞭な段波形状を呈し、粒径の粗い粒子が集まっているタイプであるが、これは以下のように、さらに異なるタイプに細分される。その一は、実験Bに見られ、先端の表面近傍にある礫が、下方のものよりも速く移動するため、弧を描いて下流に運ばれ河床付近に落下するとともに流速を失い、後方に取り残されるというように、「巻き込み」が顕著なタイプ。その二は、実験Aに見られ、Bのようにはっきりした「巻き込み」が、認められないタイプである。両者とも水面勾配は、水路勾配とほぼ平行であり、流動層厚は大きい。



Type II : 図-5の様に、先端はType-Iと同じ様な運動がみられ
段波形状を呈するが流動層厚は薄い。後続段波を伴うものが多い。

Type III : 図-6の様に先端に顕著な段波が形成されず河床勾配に
比して水面勾配が大きいのが特徴である。また流動層厚が大きく、
濃度の高いものが多い。

Type IV : 図-7の様にType-IIとType-IIIの丁度中間の様な流れ
である。先端には顕著な段波は形成されず、大きめの水面勾配をも
つ。流動層厚は薄く、後続段波を伴うものが多い。

Type V : 図-8の様な後続型の段波である。一括して一つのType
に分類するが、先行する流れの深さがごく小さい場合には流れの性
質が強く、逆に先行する流れの深さが大きい場合には、段波の性格
をもつようで本来区別するべきものかもしれない。

これまでの観測によると、実験AではType-III, IVが多く、実験Bでは
Type-Iが多く、Type-IVが少ない傾向があり、Type-Vの後続段波はどちらの場合にも同程度見られ
た。

4. 泥流の平均流速式

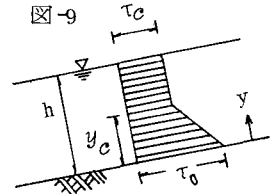
前章の観察をより定量的にとらえるために、せん断力とひずみ速度の関係に関して一般的な塑性流動
モデルを考え、その関係式から平均流速式を導き、実験値との照合によって泥流がどのモデルに属する
かを考える事にする。

図-9の様な流れに対

して、最も一般的な塑性
流動の関係式を表わすと
(1) 式になる。

$$(\tau - \tau_c)^m = \mu^m (\partial u / \partial y) \quad (1)$$

τ : 流体に働くせん断力 μ : 粘性係数
 τ_0 : その路床における値 u : 流れの流速
 τ_c : 流動性を生ずる限界の τ
 y : 路床から垂直上向きにとった距離
 m : 流体の性質によって決まる指数



式(1)をyに関して積分

し整理すると

$$u = \frac{h}{\mu^m \tau_0^{m+1}} \{ (\tau_0 - \tau_c)^{m+1} - (\tau_0 - \tau_c - (y/h) \cdot \tau_0)^{m+1} \} \quad (2)$$

$$\text{ここで } \frac{h - y_c}{h} = \frac{\tau_c}{\tau} \equiv a \quad (3)$$

$$u = \frac{h \tau_0^m (1-a)^{m+1} \cdot (m+1+a)}{(m+1) \cdot (m+2) \mu^m} \quad (4)$$

と置き換えると 平均流速は (4) 式の様計算される

4-1 (4)式において $m=1$ $y_c/h=1$ のとき

となって ニュートン流体の平均流速を表わす。

また、(4)式において $m=1$ $0 < y_c/h < 1$ のとき

$$\bar{u} = \frac{h \tau_0 (1-a)^2 (2+a)}{2.3 \mu} = \frac{h \tau_0}{3 \mu} = \frac{\rho g h^2 \sin \theta}{3} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{h \cdot \tau_0 (1-a)^2 (2+a)}{2.3 \mu} \\ &= \frac{S_d \cdot g h^2 \sin \theta}{6} \cdot \frac{(1-a)^2 (2+a)}{\mu / \rho_w} \quad (6) \end{aligned}$$

これは ビンガム流体として知られる流れの
平均流速を表わす。

ここで、未知数 a, μ を含む部分をまとめて

$$\chi = \frac{(1-a)^2 (2+a)}{\mu / \rho_w} \quad (7)$$

と置き、実験Aの資料について検討を行なう。

実測の $u, S_d, h, \sin \theta$ から χ を求め、これ
を縦軸に、泥流の体積濃度 C_d を横軸にして、
両対数に表わすと、図-10の様になる。

図-10

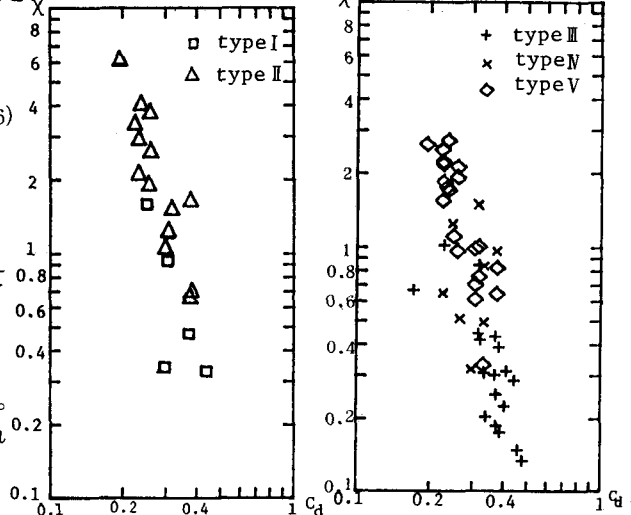


図 - 11

図 - 10から明らかな様に、 χ はTypeごとに C_d の関数としてまとまって表わされ、流れがビンガム性であることがわかる。式(7)における μ/ρ_w は、泥流のみかけの動粘性係数であるが 森⁴ 乙竹⁴によるスラリー輸送の研究では、固体・液体懸濁液における粘性係数 μ が

$$\mu/\mu_w = \left\{ 1 + \frac{3}{C_d} - \frac{1}{0.52} \right\} \quad (8)$$

によってよく表現できることが報じられている。但し同式は、固体粒子の形状を球とみなしたものである。いま、(8)式によって(7)式中の $(1-a)^2(2+a) = \alpha$ を求め、再び C_d に関して両者の関係を見ると図-11のようになる。やや散らばりは大きいが、 α はType I, IIに関して C_d の減少関数、Type III, IVに関しては C_d によらず一定値をとるようである。Type Vは、かなり散らばりが大きい。定義より明かなように α が小のとき a が大、すなわち、流れに対して栓部の占める割合が大きいことを示すのであるから、Type III, IVの流れは栓部によって占められているものと考えられ、また、Type I, IIは栓部の割合が濃度によって規定されることを示している。しかし、実験Aの流れは、濃度のわずかな違いによって流速が著しく異なるので、定式化を行なうためには濃度の測定の精度を向上させることが必要のように思われる。

4-2 次に(4)式において $m=0.5$, $y_c/h=1$ とくと

$$\bar{u} = \frac{h\tau_0^{0.5} \cdot (3/2)}{(3/2) \cdot (5/2)\mu^{0.5}} = \frac{4(S_d \sin \theta)^{1/2} \cdot h^{3/2}}{15} \cdot \frac{(3/2)}{(\mu/\rho_w)^{0.5}} \quad (9)$$

これは、せん断力とひずみ速度の間に指数法則が成立する場合、すなわち、ダイラタント流体の最も簡単な場合を表わしている。ここで、4-1と全く同様に未知数を含む部分をまとめて $\chi = (3/2) / (\mu/\rho_w)^{0.5}$ (10) とおき、実験BのうちType I, IIの資料について χ を縦軸に C_d を横軸にとって資料別に表わすと、図-12のように両者に明かな関係が認められる。

高橋によればダイラタント流体の平均流速式は

$$U = \frac{2}{5d} \left[\frac{gI}{a_i \sin \phi_r} \{ C_d + (1-C_d) \frac{\rho_w}{\sigma} \} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (11)$$

d : 粒径

C_* : 最充てん容積濃度

ρ_w : 水の密度

a_i : 定数

ϕ_r : 粒子の内部摩擦角に近い値

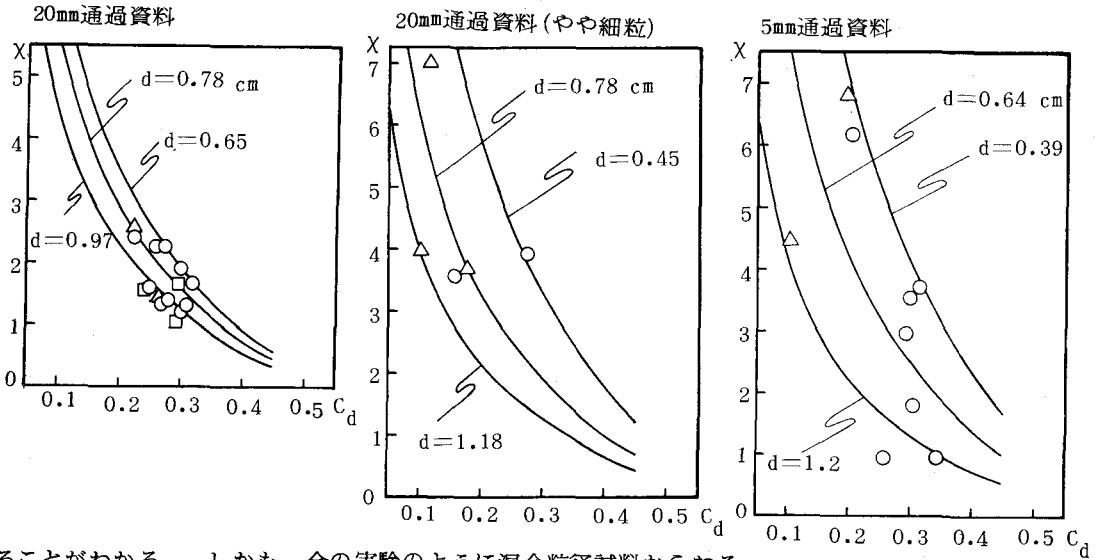
σ : 火山灰の密度

にて表わされる。いま、(9), (11)式を等置すると

$$\chi = \frac{3}{2d} \cdot \frac{\{ (C_*/C_d)^{1/3} - 1 \} (\rho_w/\sigma)^{1/2}}{(a_i \sin \phi_r)^{1/2}} \quad (12)$$

となるので、粒径 d を適宜選び、同式を図中に示すと実線のようなになる。資料数の多少や資料の種類による多少のばらつきがあるにしても、実験Bの泥流は、式(12)とよく一致しダイラタント性の流動であ

図 - 12



ることがわかる。しかも、今の実験のように混合粒径試料からなる流れが、一つの代表粒径によって表現しうることが、極めて重要な事であり興味深い。先に示した粒径加積曲線と、ここでの代表粒径の関係を調べると $d = 2.6 \cdot d_{50} + 3.2 \text{ (mm)}$ (13) が得られる。試料が三種類のみなので、これらの関係は、もちろん一般的なものではないが、今後の検討材料とすることができよう。

5. その他の検討

Type-V の泥流に対しては前述の形状分類のところでも少しふれたが、これが段波性のものであるか流れの性質をもつものであるかは、必ずしも明らかではない。泥流の濃度が場所的に一様なものとみなすと、段波の理論流速は

$$w = v_0 + \sqrt{\frac{g}{2} \cdot \frac{h_1}{h_0} (h_1 + h_0)} \quad (14)$$

w : 段波の理論流速

v_0 : 先行する流れの理論流速

h_1 : 段波の深さ

h_0 : 先行する流れの深さ

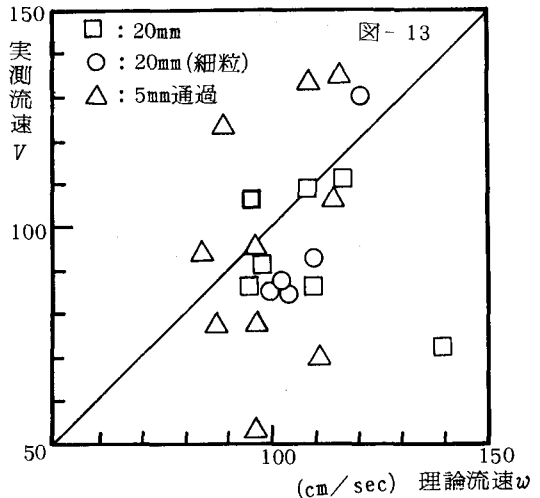
で表わすことができる。いま v_0 として先の (11) 式による値を用い、実験 B のダイラタント性の泥流について、Type-V の形状の資料に関して (14) 式の成立性を検討する。図 - 13 は理論流速 w を横軸に、実測流速 v を縦軸にとって両者の関係を示したものであるが、これによると、資料によらずほぼ両者が一致していることが認められる。したがって、後続波が、段波そのものであることがわかる。

しかし、実験 A の Type-V に関しては、散らばりが大きく今のところ、確定的なことは言えない。(実験 A の整理にとっては、濃度の測定精度がやはり問題となる。)

6. 考察とまとめ

6-1 これまでに明らかにされたように、泥流に対する粗度の影響は極めて重要であり、流体のみかけの性質をも規定するにいたる。

粗度の違いにともなう流れの性質の異なる現われは、一般に、次のように説明されよう。すなわち、路床粗度が小さく、また流下力の小さな条件下におかれている泥流は、路床から伝達されるせん断力の大部分を、泥漿の粘性抵抗で受けもつ。その場合、泥流中の粗粒子は、泥漿の流動とともに位置を変え



るのみで、路床においても滑動が生じ、粗粒子が直接、せん断力に抵抗することはない。したがって、このような流れは、ニュートンあるいはビンガム流的性質をもち、また、粗粒子の粒径には関係がなくなる。一方、路床粗度が大きく、また、流下力の大きな条件下におかれている泥流は、せん断力の大部分を、粗粒子の衝突や摩擦によって受けもつようになる。すなわち、路床に接する粒子は、大きな路床粗度によっておしとどめられ、この上を通過する粒子は、下層の流子の上を乗りあげたり、これに衝突したりするようになる。ダイラタント（膨張性）なる現象は、このような過程を通じて生じ、流れは当然、粗粒子の粒径や比重の影響を直接受けるようになる。

$$6-2 \text{ 以上の考察によれば、泥流の流動性状は、} R_{ed} = U_* k_s / v_d \quad (15)$$

によって区分できるものと期待される。ただし、 $U_* = \sqrt{gh \sin \theta}$ 、 $v_d = \mu / (\theta_d \rho_w)$ である。

これまでに、粗度を違えておこなった実験は、二通りのみなので、明確な結論は下せないが、本実験に関する限り、

(1) $R_{ed} > 800$ の場合には、泥流はダイラタント流とみなすことができ、高橋らの (11) 式によってその流速を推定することができる。

(2) $R_{ed} < 20$ の場合には、泥流はビンガム流的性質を示し、(6) 式によってその流速を推定することができる。

(3) しかし、流れはその形状によって様々なTypeに分類することができ、流速も、そのTypeによって異なる値をとる。このことは、 $R_{ed} < 20$ の実験にとりわけ多くみられる。

(4) 泥流中に、明らかに段波と見られる波が発生する。これは、 $R_{ed} > 800$ の実験に多くみられ、平均流より速く、また波高も大きいことがあるので、流路工の設計上は無視しえないものと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、火山灰試料の運搬や、実験の補助に精力的に協力いただいた防災工学研究室の諸氏に、深謝の意を表する。また、この研究は、文部省科学研究費補助金（試験研究(2)、課題番号485135、代表者山岡勲）の助成を受けてとりおこなわれたものである。記して、ここに謝意にかえる次第である。

参 考 文 献

- 1) 山岡 勲・長谷川和義・氏家清彦：有珠山泥流の流速に関する水路実験、土木学会第35回年次学術講演会、概要集Ⅱ-180、1980
- 2) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研究所年報第20号、B-2、1977
- 3) 平野宗夫・岩本 賢他：土石流先端部の挙動について、土木学会第33回年次学術講演会、概要集Ⅱ-299、1978
- 4) 森・乙竹：化学工学20、1956
- 5) 伊藤四郎：化学技術者のための流体力学、科学技術社、化学工学シリーズⅨ