

II-26 微細粒子に富む泥流の流速分布とモデル流体のあてはめ

北海道大学工学部 正員 藤田 睦博
同 上 正員 長谷川和義
同 上 正員 山岡 勲
同 上 学生員 ◎岡山 幹治

1. はじめに

著者^{1,2,3)}らは、1978年における有珠山麓の泥流災害を契機に緊急な課題として生じた泥流の発生条件および、その流路工内の挙動の解明にとり組んできたが、昨年までに次のような成果を得た。

一般に泥流と見なされる流れは、粗粒子を含む、比較的高濃度のものであり、流れの性質は路床粗度によって大きく異なるようになる。すなわち、粗度に関するレイノルズ数の形式をもった、

$$Re_d = \frac{U_* k_g}{\nu_d} \quad (1) \quad \begin{array}{ll} U_*: \text{流れのまさつ速度} & k_g: \text{路床の相当粗度} \\ \nu_d: \text{泥流の動粘性係数} & \end{array}$$

が、ある限界以上になると、流れはダイラタント性を帯び、逆に、これ以下の場合にはビンガム的になることが確かめられた。

一方、粒径と濃度の違いによっても泥流の性質が限界づけられることを考慮して、

$$D_* = \frac{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}}{\nu_w} \{ (C_*/C_d)^{\frac{1}{3}} - 1 \}^{-1} \quad (2) \quad \begin{array}{l} \sigma/\rho: \text{粒子の比重}, d: \text{代表粒径}, g: \text{重力の加速度} \\ \nu_w: \text{水の動粘性係数}, C_d: \text{泥流の容積濃度} \\ C_*: \text{泥流中の土粒子の最充てん容積濃度} \end{array}$$

なるパラメータを提案し、 $D_* - Re_d$ からなる区分図を作成した。しかし、資料数の不足、特に粒径の微細な場合の実験データが得られなかったために、 D_* が区分パラメータとして有効か否か不明のままであった。

本論文は、昨年よりも微細粒子分に富む試料に関しての実験を行ない、新たに、流速分布を測定することによって、流路工内の泥流の挙動をより明確にしようとするものである。この実験に使用した試料は、有珠山北斜面において崩壊の危険性が伝えられている、小有珠右の川源頭部の外輪山頂から採取したものであり、これを用いることによって流路工の設計ならびにその安全性の検討に資することをあわせて期している。

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の鋼製水路で、図-1に示すように、上・下水路がそれぞれ独立に勾配を変えることができる。本年度は、昨年までに行なわれてきた、泥流の自然発生方式をやめて、下流端に備え付けた水槽内にサンドポンプを設置し、火山灰と水とを混合した後に、サクシオンホースで上部水路に回流させる方式を採った。上部水路では、金網と布によって流れの減勢を行ない、等流状態になるように配慮した。下部水路は、長さ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、昨年度実験Bに使用した10mm程度の碎石を一樣に張りつけている(マニング粗度係数 $n \approx 0.02$, $k_g \approx 1.22\text{cm}$)。流下泥流は、下部水路中央に設定された動圧測定器によって泥流面より、0.5 cmの間隔で深さ方向の流速分布が測定され、同時に泥流深も測定された。動圧測定器は、外径8mm、内径6mmのL字型ガラス管をポイントゲージにとり付けたもので、動圧による泥水の上昇高 H を読みとるようになっている。流速はこの H を用いて $v = \sqrt{2gH}$ から求めるが、泥流中に鉛直方向の濃度分布があるときには静圧の大きさを泥流面にとる限り、静圧が過大の見積りになってしまうので、補正を行なった。しかし、最も大きく違ったデータでも、0.5% くらいの誤差にとどまっており、濃度分布は、流速測定に対して

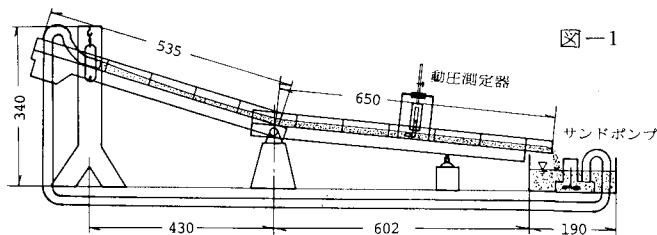


図-1

あまり大きな影響をもたない。

泥流面勾配 $\sin\theta$ は、流速測定点を挟んで上下流に 1.5m ずつ離れた位置で、ポイントゲージにより泥流深を測定することから求められた。

また、水路の下流端における泥流のサンプリングによって、その容積濃度が測られたが、後述のように本実験の Run No. 37~56 (表-1) においては、L 字型ガラス管をポイントゲージに取り付け、動圧測定器と同じ位置でサイフォン式のサンプリングを行ない、任意の深さの濃度を測定するようにした。

(2-2) 使用火山灰は、有珠山小有珠石の川源頭部の外輪山頂より採取したもので、比重 $\sigma/\rho = 2.71$, $d_{50} = 1.35\text{mm}$ 、粒度構成が 図-2 の性質をもつ試料である。本試料は、昨年までに使用した西山川流域の新規火山灰に富む試料に比して、比重がかなり大きく、また微細粒子分に富んでいて、粒度組成が良好である。実験は、図-1 の下部流路の勾配を変えながら表-1 のような範囲で合計 56 回行なっているが、このうち Run No. 37~56 は、前述した方法で濃度分布を測定している。

(2-3) 本年度の実験がポンプ回流方式を採用することになった理由は、第一に、試料の透水性が昨年比べてかなり低く、昨年のように泥流の自然発生が生じないこと、第二に、微細粒子に富むため、いったん水と混ざると沈澱しにくく、水との分離が生じないためである。この方式では、泥流の先端部の形や動きが見られないため、流れの観察は表面以外は難しく、平均流速を知るためにも流速分布の測定が不可欠である。

一連の実験のうち、高濃度の実験は、水路勾配が緩いと、激しい堆積を起こすので急勾配のもののみが実施された。これらの実験は、後に詳述するようにダイラタント流動の性質をもつものが多かったが、外観は、ソル状を呈し、時おり乱れによって表面にしわが寄るように流れる。一方、低・中濃度の実験は緩勾配においても実施されたが、濃度と勾配の対応がとれない場合にはかなりの堆積が生じた。

低濃度の流れは、清水の射流と似た様相を示し、水面はかなり激しく波立つ。

後にビンガム流として分類された中程度の濃度の流れでは水面の変動が弱まり、上述の高濃度の流れとほとんど区別がつかない流れ方を示す。ビンガム流に固有な表層固体状部分は、昨年度実験のビンガム流のようにそれと見て分る顕著な特徴を示さず、乱れも時おり現われる。

3. モデル流体のあてはめ

最も一般的な塑性流動を考えた場合、その流速分布は 図-3 の記号を用いて、

$$u = \frac{h\tau_0^m}{(m+1)\mu_d^m} \left\{ (1-\alpha)^{m+1} - \left(1-\alpha - \frac{y}{h}\right)^{m+1} \right\} \quad (3) \quad \text{ただし} \quad \frac{h-y_c}{h} = \frac{\tau_0}{\tau_0} \equiv \alpha \quad (4)$$

にて表わされる。したがって、これより導かれる流速分布式に対して実験値を照合し、適合モデルを探し出すことができる。ただし、 τ : 流体に働くせん断力, τ_0 : 流動性を生ずる限界の τ (せん断降伏値), τ_0 : 路床におけるせん断力値, y : 路床から垂直上向きにとつた距離, m : 流れの性質によって決まる指数, μ_d : 粘性に関する係数

($m = 1$ の場合は粘性係数そのもの), u : 任意点における流れの流速
降伏点の流速は、(3) 式において $y = y_c$ とおくことにより、

$$u_c = \frac{h\tau_0^m}{(m+1)\mu_d^m} (1-\alpha)^{m+1} \quad (5)$$

となる。

ニュートン流体の場合には、(3), (5) 式において、 $m = 1$, $\alpha = 0$ 、ビンガム流体に対しては、 $m =$

表-1

	Run No.	河床勾配	平均濃度
平均濃度のみ測定	1 ~ 36	1/9.14 ~ 1/25	11.0 (%) ~ 45.8 (%)
濃度分布測定	37 ~ 56	1/9.14 ~ 1/25	9.7 (%) ~ 40.1 (%)

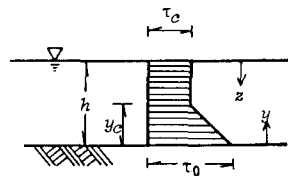
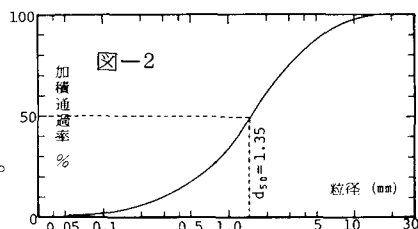


図-3

1, $a \neq 0$ さらに、ダイラタント流体では、 $m = 0.5$, $a = 0$ となることが知られているので、上式にこれらの値を代入することによって、各流体固有の流速分布式が決まり、これによって実験泥流がいかなる流れに従うかを分類することができる。 その場合、(3)式をそのまま用いたのでは、 u_d など、測定 of 難しい係数を含んでしまうので、これらを含めないように無次元流速分布式を導き、実測値との比較を行なう。

(3-1) ビンガム流動

(3)、(5)式において、 $m = 1$, $a \neq 0$ を代入した後、その比をとって整理すると、

$$\frac{u}{u_c} = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{1}{1-a} \right) \frac{y}{h} \right\}^2 \tag{6}$$

ただし $\frac{1}{1-a} = \frac{h}{y_c}$

なるビンガム流の流速分布式が得られる。 今、後述する方法によって a を決め、分布形を求めると、図-4,5,6 のようになる。 同図中には実験値もあわせてプロットしているが、図より明らかなように、理論曲線と非常によくあっており、これらの泥流がビンガム流体の性質を有していることを端的に示している。

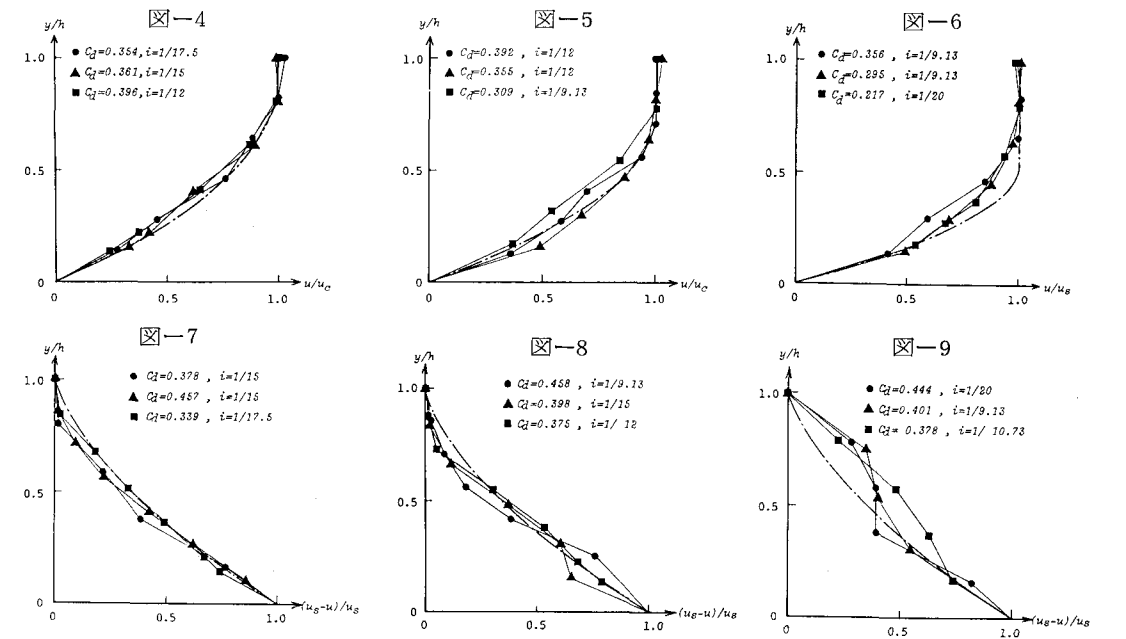
(3-2) ダイラタント流動

(3)、(5)式において、 $m = 0.5$, $a = 0$ を代入し、それぞれの差商をとって整理すると、

$$\frac{u_g - u}{u_g} = \left\{ 1 - y/h \right\}^{\frac{3}{2}} \tag{7}$$

なる欠速度表現が可能となり、その分布の様子は 図-7,8,9 のとおりである。

この曲線に比較的あう例は、高濃度の実験であって、図中のプロットのように、典型的とは見なし難いケースもあるが、これらの泥流をダイラタント流動と考えてまず、間違いはないであろう。



(3-3) 対数則に従う流れ

濃度が 15%以下の低濃度の実験においては、上述のいずれの理論曲線にもあわない分布が生ずるようになる。 いろいろな検討をおこなった結果、これらは、以下のような対数分布式に最もよくあてはまることが明らかになった。

$$\frac{u}{u_*} = A_s + \frac{1}{k} \ln \frac{y'}{k_s} \tag{8}$$

ただし $u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$, $\sin \theta$: 泥流面勾配
 h : 泥流深 , k : カルマン定数 , $y' = y + k_s$

図-10,11 は、この分布の一例を示すものであるが、カルマン定数を小さ目にとることによって実測値とのよい一致が得られる。これらの事実

は、濃度が 15% 以下になると、流体の乱れが流れを支配し、運動量の輸送によってせん断抵抗を生ぜしめるに至ることを示している。カルマン定数が、清水時の 0.4 に比して低下することは、良く知られた事実であるが、測定精度の関係で、ここではこれ以上の解析は行なわないことにする。

4. モデル流体の平均流速式

3では実験泥流を、ビンガム流、ダイラタント流、対数則の 3 つに分類することができたが、さらに、 μ_d など諸係数の評価に注目して、モデル流体の平均流速式を導く。

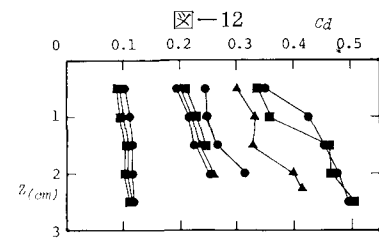
(4-1) ビンガム流体の平均流速式

(3), (5) 式を用いて、 $\tau_0 = S_d g h \sin \theta$ なる関係を代入し (ただし、 $S_d = (\sigma/\rho - 1) C_d + 1$, σ : 粒子の密度, ρ : 水の密度, g : 重力の加速度, $\sin \theta$: 泥流面勾配)、さらに、 $m = 1$, $0 < a < 1$, $S_d > 1$ なる条件のもとに平均流速 U を導くと、

$$U = \frac{S_d g h^2 \sin \theta}{6} \cdot \frac{(1-a)^2 (2+a)}{\mu_d / \rho} = \frac{S_d g h^2 \sin \theta}{6} \cdot x_1 \quad (9)$$

$$x_1 = \frac{(1-a)^2 (2+a)}{\mu_d / \rho} \quad (10)$$

となり、ビンガム流動の平均流速式となる。昨年までの研究で、 x_1 は濃度 C_d の関数として表わされることが知られており、ここでも同様な調査をおこなうことにする。まず、 C_d についてであるが、Run No.1~36 でサンプリングした濃度は、図-1 の下流端において容器を流れと同一の向きにむけてすくっているため、特に高濃度の実験では、実際よりもかなり大きめの値を μ_d / ρ



くなるほど底面での堆積が増し、分布形状の傾きが著しくなる。

一方 a の算定は、まず、式(9)と式(5)から $a = \frac{3U}{u_c} - 2$ (11) を求め、これを式(9)に代入することによって、

$$\mu_d / \rho = \frac{g h^2 \sin \theta (1-a)^2 (2+a)}{6U} \cdot \{(\sigma/\rho - 1) C_d + 1\} \quad (12)$$

のように得ることができる。

さて、森・乙竹⁴⁾によると、単粒子系の分散溶液における粘性係数は、

$$\mu_d / \rho = \mu_w / \rho \left\{ 1 + \frac{3}{1/C_d - 1/0.52} \right\} \quad (13) \quad \text{ただし、} \mu_w: \text{水の粘性係数}$$

C_d : 粒子の容積濃度

にて表わされるものとされている。しかし、Run No.37~56 のうちのビンガム性のデータから μ_d を求めてプロットすると、図-13 のようになり実験値は 1 オーダーほど高い位置にくる。そこで、式(13)の式形を残して実験値を満たすように修正する

$$\mu_d / \rho = \mu_w / \rho \cdot \left\{ 1 + \frac{135}{1/C_d - 1/0.52} \right\} \quad (14)$$

ことにすると、

図-10

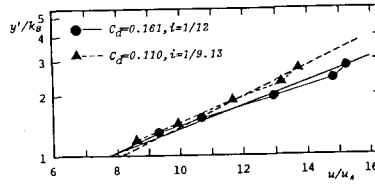
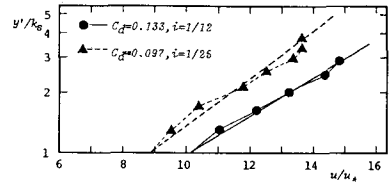


図-11



とることになった。これらの濃度の補正を行なうべく、Run No.37~56 の実験では前述の方法で濃度の鉛直分布を求め、正しい平均濃度と μ_d の関係をまず確立させることにした。図-12 はこれらの濃度分布の測定結果を示すものであるが、平均濃度が高

図-13

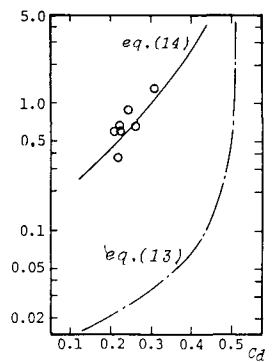
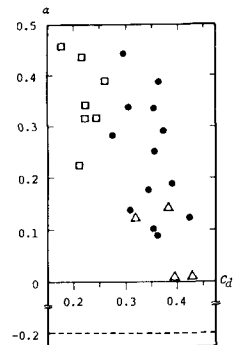


図-14



のようになる。定数の 3 から 135 への変化は混合粒径の比表面積の増大を表わすものと一応解釈することができるが、詳細は不明であり、実験式とみなすことにする。

さて、以上の関係を用いると Run No.1~36 中のビンガム流のデータに対して濃度補正をおこなうことができる。すなわち、式(11)から α を求めた上で式(12)に代入し、式(14)と連立させることから C_d を求める。

このようにして得られた C_d を用いて α との関係調べると 図-14 のような関係がみられる。(ここで、図のシンボルのうちわけは、●: 代表的なビンガム流, Δ : 比較的ダイラタントに近いビンガム流, $\square$: 比較的对数則に近いビンガム流である。) 図によると、 α は濃度に関してはかなりばらつくが、特に高濃度の付近ではしだいに小さくなり、0 に近づいている。ちなみに、(11)式に対して後述するダイラタント流の理論式を代入すると、 $\alpha = -0.2$ となる。これは、高濃度になるにつれて泥流中の粒子間の接触の機会が大きくなり、路床からのせん断力の大部分がこれらの粒子間の摩擦、衝突によって受けもたれるようになるため、表層の固体的な性質がしだいに壊されていくためと考えられる。逆に低濃度においては、 α は全体的に大きな値をとるようになる。しかし、前述のように低濃度の場合には本来流れが対数則に従うようになり、 α は 0 となるはずであるが、これらの点はまだ不明であって、 α の性質に関してはさらに詳しく調べる必要があるように思われる。ここでは、昨年にならって(9)式より $\hat{\alpha}_1$ を逆算する。つまり、

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{6\hat{U}}{\hat{s}_d g \hat{h}^2 \sin \hat{\theta}} \quad (15) \quad (\text{ただし } \hat{} \text{ は実測値を示す})$$

によって $\hat{\alpha}_1$ を求め、 C_d との関係プロットすると、図-15 のようになる。(この図におけるシンボル ●, Δ , $\square$ は前述のものと同じ)

U_d に関して(14)式を用い、 α が C_d のみの関数によって表わされるものとして昨年と同様な実験式を導くと、

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{6.2 \left\{ (0.52/C_d)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1}}{\mu_w/\rho \left\{ 1 + \frac{135}{1/C_d - 1/0.52} \right\}} \quad (16)$$

となる。図-15 における曲線は式(16)を示すが、昨年度実験 A から得られた実験式とほぼ同一な傾向を示している。

(4-2) ダイラタント流体の平均流速式

高橋⁵⁾による、Bagnold の粒子せん断モデル(ダイラタントモデル)の平均流速は(17)式で表わされる。

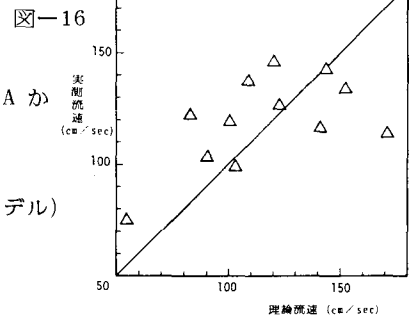
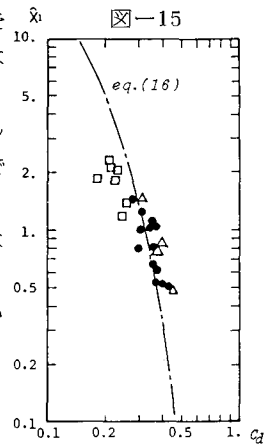
$$U = \frac{2}{5d} \cdot \frac{(C_d/C_d)^{\frac{1}{3}} - 1}{\sqrt{a_i \sin \phi_p} \cdot \sigma/\rho} \cdot \sqrt{s_d g \sin \theta} h^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

ϕ_p : 粒子の動摩擦角, a_i : Bagnold による実験で 0.042 とされる定数, d : 粒子の代表粒径
先に分類されたダイラタント性の流れの実験値を用い、式(17)との比較を行なうと図-16 のようになる。この場合、代表粒径は 1.35mm としているが、これは試料の 50% 粒径 d_{50} に相当する。昨年度の実験では最大粒径ないしは d_{90} が最適値であり、本年度との違いがみられるが、これは次のように解釈されよう。すなわち、ダイラタント流を規定する最も支配的な粒径は、互いに接触し得る程度の数(構成比率)を有する比較的大きな粒径粒子の径であると考えられる。昨年に比して粗粒分の比率の小さな今年度の試料は、主なる接触を d_{50} 程度の粒子で受けもっているものと考えられる。

5. 流れの性質と区分パラメータ

前章までの観測をもとに、異なる 3 種類の流れの内部機構について考察を試みる。

1 で述べたように、泥流の流下力、路床粗度、濃度、粒径に関するパラメータとして昨年度は Re_d



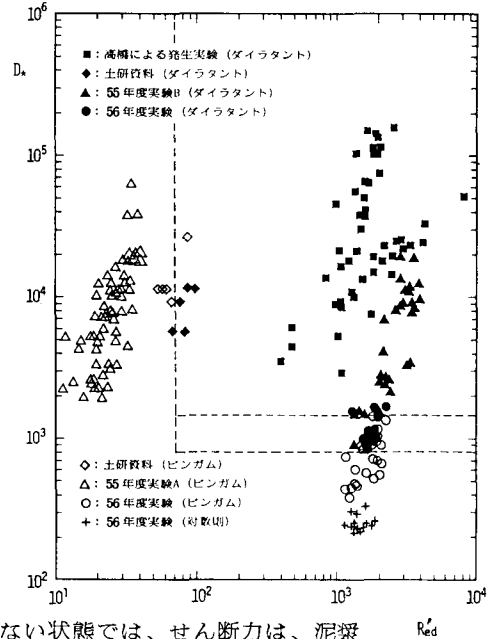
および D_* を使用したが、本年度は Re_d における分母を $v_d (=u_d/s_{dp})$ としていたものを $v_w = u_w/\rho$ に置きかえて、

$$Re_d' = \frac{U_* k_s}{v_w} \quad (18)$$

とした。これは前者のように表わすと、 C_d に関するパラメータが区分図において縦横両軸に含まれることになり、特に本年度のように C_d の違いに着目した実験値を区分する上で不便が生ずるためである。以上のことから昨年は $Re_d=60$ を境に、これより小さな Re_d の範囲でビンガム流が、大きい範囲でダイラタント流が生じていることになっていたが、 v_w に改めることによって、 $Re_d=70$ が区分値となる。

さて、 Re_d' と D_* をパラメータとする区分図を描くと 図-17 のようになる。同図中には本実験の他に、

図-17



昨年の実験 A・B、建設省の土木研究所において行なわれた野尻川流路工水理模型実験⁶⁾の一部と、高橋による実験(発生実験)⁵⁾のデータも記入してある。

図によれば、ビンガム、ダイラタントの両性質が、 Re_d' のみならず、 D_* によっても分かれ得るものであることが明らかである。すなわち、路床粗度 k_s 、粒径 d が同じであっても、濃度の違いによって流れの性質が異なって表われ、高濃度から低濃度になるに従って、ダイラタント、ビンガム、さらに乱流へと変化している。これは、4でも述べたように、細粒子であっても高濃度においては粒子間の接触の機会が大きくなり、上層の粒子が次々に下層の粒子の上を乗り上げて流下する状態が生じ、せん断力が粒子間で伝達されるようになることを示す。一方、これほどの高濃度でない状態では、せん断力は、泥漿のもつ粘性そのものによって伝達され、粒子間の伝達は減少するものと考えられる。しかし粘性を生み出す粒子の粒径とダイラタント性と生み出す粒径の差はあまり大きくなく、両者の性質は、外観上あまり変わらない。これらの性質を生ずる限界の D_* の値は、本実験では、上限で 1500、下限で 800 程度であり、これらの間は、ダイラタント、ビンガム両者が発生し得る遷移領域である。さらに低濃度の流れでは、粘性の減少とともに乱れが発達し、せん断力はこれらが生み出すレイノルズストレスによって伝達されるようになる。しかし、浮遊する微細砂の影響は、カルマン定数の低下などで表わされるようになる。これらの性質を帯びるに至る限界の D_* は、本実験で 600 程度であるが、さらに多くのデータを積み重ねる必要があろう。

6. 結語

泥流に対する濃度の影響は極めて重要であり、5で示したパラメータにてモデル流体の分類がなされ、ダイラタント流は(17)式、ビンガム流は(9)式にてその流速を推定することができる。

最後に、本研究を進めるにあたり、火山灰試料の運搬や、実験の補助に協力いただいた防災工学研究の諸氏に、深謝の意を表す。また、この研究は、文部省科研費(自然災害特別研究(1) 00502002, 代表者門村浩)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 聡・長谷川和義・氏家清彦：有珠山泥流に関する水路実験、土木学会第 35 回年次学術講演会、概要集 II - 180、1980
- 2) 山岡 聡・長谷川和義・渡辺 隆：流路工内の泥流流速に関する実験的研究、土木学会北海道支部論文報告集第 37 号、1981、2
- 3) 山岡 聡・藤田睦博・長谷川和義・星 満：火山灰・軽石の集合流動(泥流)の発生領域と防災計画に関する研究、文部省科学研究費補助金試験研究 (2) 485135 研究成果報告書
- 4) 森・乙竹：化学工学 20、1956
- 5) 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
- 6) 池谷 浩・上原信司：桜島野尻川流路工水理模型実験報告書、土研試料 1442 号、建設省土木研究所隣崎試験所、1978、12