

働 砂防・地すべり技術センター

○宮本邦明、鈴木宏、山下伸太郎

鹿児島県土木部砂防課

矢沢昭夫

建設省土木研究所

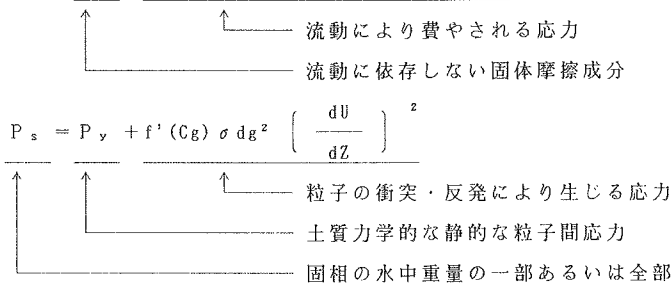
水山高久

1. はじめに 1985年ネバドデルルイス火山の噴火に伴う大規模な泥流災害以来、火山の多い我国においても、同様の泥流災害に対して関心が高まっている。本文はこのような大規模な泥流の流動機構について考察し、そのモデル化の手法について検討したものである。

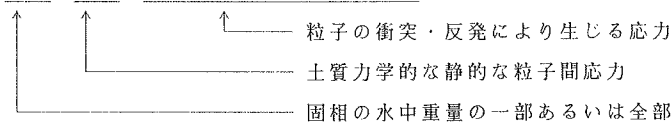
2. 火山泥流の流動機構 集合流動の流動機構に関する従来の成果は、流れが固液混相流として取り扱われ流れ、応力が固相に受け持たれる応力と液相に受け持たれる応力の和で表されることを示している。

・固相の受け持つ応力 τ_s

$$\tau_s = \tau_0 + f(C_g) \sigma dg^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right| \cdot \frac{dU}{dZ} \quad (1)$$



$$P_s = P_y + f'(C_g) \sigma dg^2 \left(\frac{dU}{dZ} \right)^2 \quad (2)$$



C_g : 固相を構成する粒子の体積濃度、 $f(C_g), f'(C_g)$: C_g の関数、 σ : 粒子密度、

dg : 固相を構成する粒子の代表粒径

・液相の受け持つ応力 τ_w

$$\tau_w = C_0 + \mu \left(\frac{dU}{dZ} \right) \quad (3)$$



μ : みかけの粘性係数

ここでいう固相・液相とは、具体的には次のようである。

固液混相流 { 固相 —— ダイラタント応力を生じる粒径が大きい粒子
液相 —— 水と粘土、シルト等、流れに取り込まれて浮遊している粒子

式(1)～式(3)で表される応力は、真の応力であり、内部のエネルギー消費に等価な応力であるから式(1)～式(3)で表現される流れは層流である。¹⁾ 流れの規模が大きくなると層流から乱流へと遷移してゆき、

$$\tau_r = \rho \overline{u^1 w^1} \quad (4)、 \quad p_r = \rho \overline{w^1 w^1} \quad (5)$$

なるレイノルズ応力が生じる。結局、流れの応力は式(1)～式(5)より次のように表される。

$$\tau = C_0 + \tau_y + \mu \left[\frac{dU}{dZ} \right] + f(C_g) \sigma dg^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right| \left[\frac{dU}{dZ} \right] + \rho \overline{u^3 w^3} \quad (6)$$

$$p = p_g + f'(C_g) \sigma dg^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right| \left[\frac{dU}{dZ} \right] + \rho \overline{w^3 w^3} \quad (7)$$

流れの特性は、式(6)、(7)のいずれかの項が卓越するかによって表現されるが、その考察を複雑なものにしているのは、式(6)、(7)の間に、

$$\tau_y = \tan \phi_s p_s \quad (8)、 \quad f(C_g) = \tan \phi_d p_s \quad (9)、 \quad \rho \overline{u^3 w^3} = \alpha \rho \overline{w^3 w^3} \quad (10)$$

なる関係があり、粒子の水中重量の支えられ方が流れの特性に大きく関係しているからである。

3. 火山泥流の流動機構の領域区分 流動式、式(6)、(7)から流動の形態とその領域区分が次のように行える。

① 層流と乱流

$$\text{層流} \quad \tau_t = C_0 + \tau_y + \left\{ \mu + f(C_g) \sigma dg^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right| \right\} \left[\frac{dU}{dZ} \right] \quad (11)$$

$$\text{乱流} \quad \tau_t = C_0 + \rho \overline{u^3 w^3} \quad (12)$$

$$R_e \equiv \frac{\tau_t}{\tau_t} \quad \begin{cases} R_e \geq 1 & \longrightarrow \text{乱流} \\ R_e < 1 & \longrightarrow \text{層流} \end{cases} \quad (13)$$

あるいは、

$$R_e \equiv \frac{U_{*e} h_e}{\nu} \quad \begin{cases} R_e > R_{ec} & \longrightarrow \text{乱流} \\ R_e < R_{ec} & \longrightarrow \text{層流} \end{cases} \quad (14)$$

ただし、

$$U_{*e} = \left[\frac{\tau_t - C_0 - \tau_y}{\rho} \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$h_e = h - \frac{C_0}{\rho g (1 - \tan \phi_s)} \quad (16)$$

$$\nu = \frac{\mu + f(C_g) \sigma dg^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right|}{\rho} \quad (17)$$

清水との相似性を期待すれば、Recは100程度の値をとるが固液混相流では、攪乱を吸収するのに必要な空間として清水のそれより大きなものを要求するため、粘性底層が厚くなりRecは大きくなる。²⁾

② ビンガム流動とダイラタント流動

$$\text{ビンガム流動} \quad \tau_B = C_0 + \tau_y + \mu \left[\frac{dU}{dZ} \right] \quad (18)$$

$$\text{ダイラタント流動} \quad \tau_D = C_0 + \tau_y + f(C_g) \sigma dy^2 \left| \frac{dU}{dZ} \right| \left[\frac{dU}{dZ} \right] \quad (19)$$

$$G \equiv \frac{\tau_D}{\tau_B} \quad \begin{cases} G > 1 & \longrightarrow \text{ダイラタント流動} \\ G < 1 & \longrightarrow \text{ビンガム流動} \end{cases} \quad (20)$$

4. 火山泥流のモデル化 以上の領域区分をもとに、大規模な泥流の発生から流下、氾濫、停止までのプロセスを模式的に表すと、図-1 のようになろう。これら流動特性の変化は、モデルの上では運動方程式上の抵抗の項の評価としてあらわれる。すなわち、火山泥流のモデル化は、固相の連続式、液相の連続式、固液混相流の運動方程式を連立して解くことにより行われるが、その運動方程式(式(21))中の右辺の最後の項の評価として、領域区分(式(13)あるいは式(20))及び、各流動式(式(12)、式(18)、式(19))が用いられる。そのアルゴリズムを図-2に示す。

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \text{grad}) \bar{u} = \rho \bar{g} - \text{grad } p + \text{div } \bar{\tau} \quad (21)$$

ここに、 \bar{u} は流速ベクトル、 \bar{g} は重力加速度ベクトル、 $\bar{\tau}$ は応力テンソルのうち、せん断力成分で、それぞれのベクトル、テンソル、及び微分作用素は水深方向に積分したものをを用いる。式(21)を連続式と連立して解くことを考えると必然的に不定流計算を行うことになる。

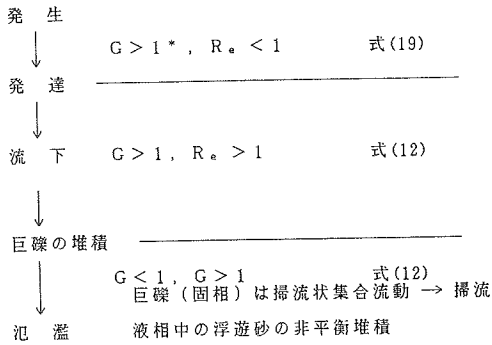
5. モデルの適用 以上のモデルを大正15年十勝岳の噴火に伴い発生した泥流に適用する。上富良野町の氾濫域に上記のモデルを適用した結果を図-4に示す。計算に用いた泥流のハイドログラフはセントヘレンズ、ネバドデルルスでの調査結果^{3) 4)}を参考に、継続時間を2時間、ピークの位置を24分とする三角形で与え、総流量が推定値⁵⁾ 1.33×10^7 m³に等しくなるように与えている(図-3)。差分の方法は、従来から2次元氾濫シミュレーションで用いられている手法をとっている。⁶⁾

6. むすび 固液混相流の流動特性とその領域区分に関する考察をもとに、泥流の流動モデルを作成した。大正15年の十勝岳の噴火に伴い発生した泥流に本モデルを適用し、氾濫域について数値計算を行い実績と比較すると良い一致を得た。

以上、火山泥流の流動機構と、そのモデル化について一応の成果は得られたが、さらに精度を上げてゆく場合、各流動特性を区分する条件に及ぼす境界条件の影響、固相と液相の合理的な分離法、これらの問題と密接な関係をもっているが、固体粒子の水中重量の分配則の解明、等の問題が残されている。

参考文献

- 1) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、立命館大学学位論文、1986
- 2) 芦田和男、山野(宮本)邦明、神田昌幸：高密度流れに関する研究(Ⅱ)、京都大学防災研究所年報29号B-2, pp.361-375
- 3) 高橋 保：セント・ヘレンズ火山の噴火に伴う災害現象と対応、京都大学防災研究所年報24号A, pp.361-375
- 4) 勝井義雄、他：南米コロンビア国ネバド・デルルス火山の1985年噴火と災害に関する調査研究、文部省自然災害特別研究、突発災害研究成果 No.b-60-7, 1986
- 5) 村野義郎：十勝岳の土石流について、新砂防、No.59, 1965, pp.14-23
- 6) 岩佐義郎、井上和夫、水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法、京都大学防災研究所年報23号B-2 1980, pp.305-317



* 巨礫が少ないと $G < 1$ となり式(18)の流動形態をとる。

図-1 火山泥流の流動機構

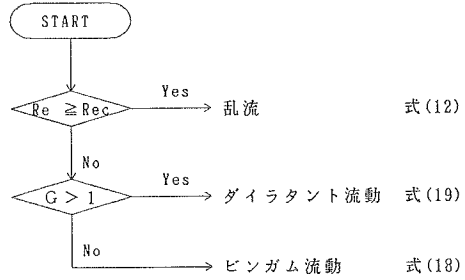


図-2 流動特性の領域区分と対応する流動式

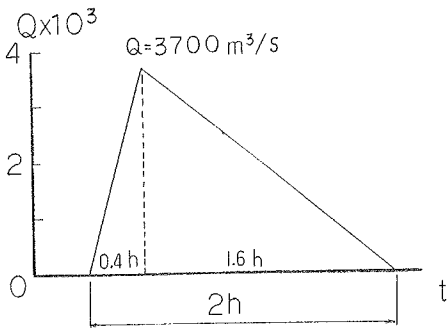


図-3 泥流ハイドログラフ

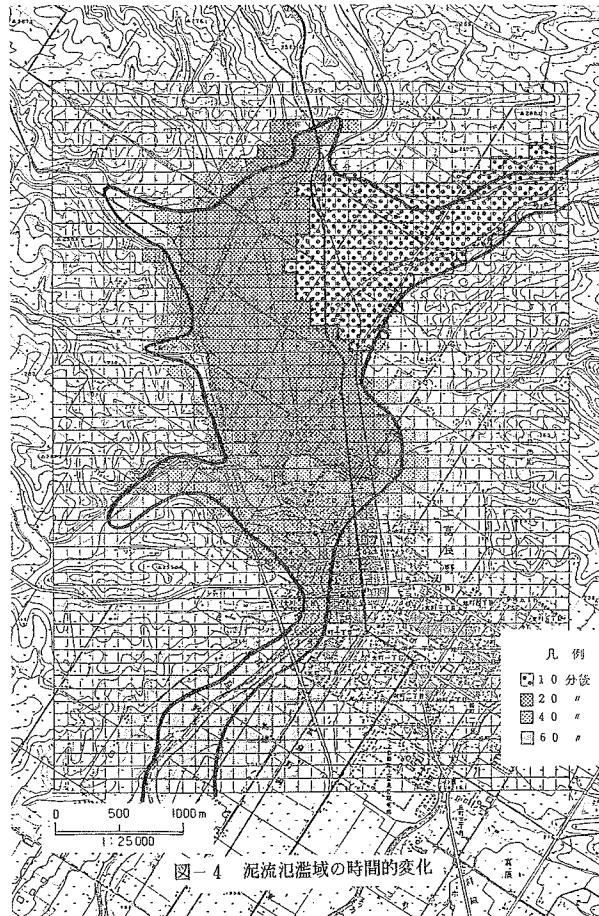


図-4 泥流汎濫域の時間的変化