

CTC94-1-005

火砕流による泥流発生場に関する基礎的研究

三浦敦禎 (北海道開発局開発土木研究所)  
清水康行 (北海道大学工学部)

Basic Research on the Mud-flow caused by the Pyroclastic flow

A. Miura (Hokkaido Development Bureau)  
Y. Shimizu (Hokkaido University)

COLD  
REGION  
TECHNOLOGY  
CONFERENCE '94

1 はじめに

山体が積雪に覆われる冬期間に火砕流を伴った噴火が発生すれば、大正15年12月に死者・行方不明者144人を出した十勝岳での火山泥流のように甚大な被害となる<sup>1)</sup>。しかしながら、積雪斜面上の火砕流による融雪規模やその運動特性は明らかにはされていない。そこで本研究は積雪斜面上における火砕流の運動特性を明らかにしようとするものであり、この特性を反映した火砕流の運動速度、到達範囲などを予測するための基礎的研究を行ったものである。

2 実験方法

実験装置は幅30cm、深さ30cm、長さ3mの可傾斜斜路と落下筒及びホッパーから成る<sup>2)</sup>。全体像を図-1に示す。実験は斜面条件を雪、アイスバーン、氷、砂、土砂、鉄板と設定し、室温、300°C、500°C、700°Cと所要の温度とした落下物質(砂、砂利)をホッパー上にセットし斜面上へ落下させることにより火砕流を模擬することとした。なお、高温の落下物質が斜路内を通過した際の斜面状態を保つため、落下物質通過後直ちに液体窒素を吹きかけることにより斜面状態を保持することとした。斜面条件において雪、アイスバーン、氷の違いを述べる。雪とは斜路内に密度0.38g/cm<sup>3</sup>に雪を詰めたものである。アイスバーンとは雪の条件とした斜面に霧吹きで水を散布し液体窒素を用いてアイスバーンとしたものである。氷とは斜路内に氷を敷き詰めたものである。実験における測定項目は落下状況、落下速度、拡散面積、堆積高さとした。具体的な測定方法は高速ビデオカメ

ラとモータードライブ付きカメラを用いた撮影により落下状況を観測した。斜路内に20cm間隔で配置した熱電対の反応時刻を用いて落下速度を測定した。斜路を抜け実験室の床に拡散堆積した落下物質上に5cmメッシュを掛けることにより拡散面積を測定した。落下物質が拡散堆積した後、落下方向に沿って中央部の堆積厚さを測定した。なお、実験において高温落下物質が雪、アイスバーン、氷斜面上を融解させながら滑走したのであって、実際の現象(火山泥流)のような高温落下物質と融雪物質とが混合した流れとして再現することはできなかった。

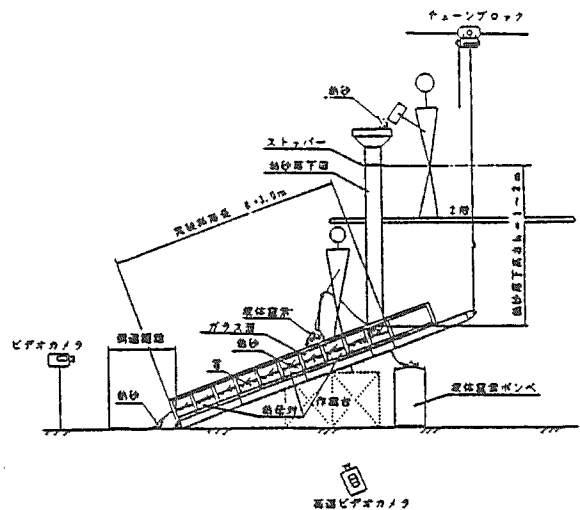


図-1 実験装置概要

3 実験結果及び考察

落下物質が砂、その質量 8kg、斜面傾斜角 30 度の実験条件における結果について考察を加えることとする。

3-1 落下速度

落下速度の実験結果を示したものが図-2である。若干の乱れはあるものの斜面条件と物質温度により落下速度に違いが見られる。

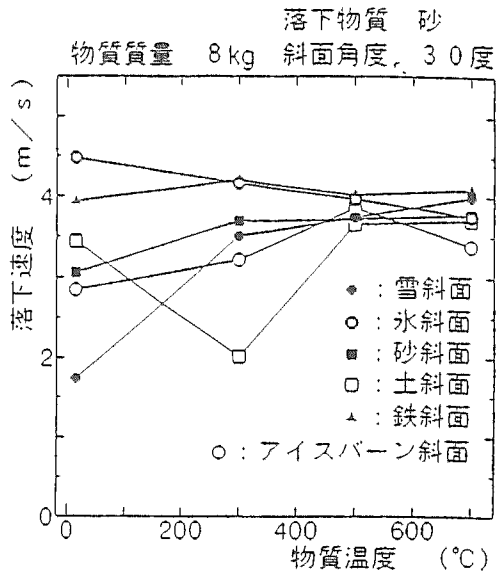


図-2 斜面条件と落下速度

そこで斜面条件の雪、氷、アイスバーンに着目してみる。雪、アイスバーンは砂の温度が高くなるほど落下速度も増加する傾向を示す。氷については砂の温度が高くなるに従い落下速度が低下する傾向を示す。氷斜面に高温落下物質（以下熱砂と呼ぶ）が落下する時、熱砂の持つ熱が斜面に働き水蒸気・水滴を発生させる。この水蒸気・水滴の行き場がなくなり熱砂中に内包されながら落下することにより落下速度が低下するのではないかと現段階では考えられる。従って熱砂の温度が高くなるほど斜面への熱の影響が大きくなり、より多くの水蒸気・水滴を発生させ落下速度を低下させるものと推測される。また、斜面側面からの観測より氷斜面の時だけ斜面落下中に熱砂の先端部の膨らみが確認されたことから水蒸気・水滴を内包する際に落下の抵抗となり速度が低下するものと見られる。写真-1に熱砂滑走状態を示す。写真の実験条件は氷斜面、傾斜角 30°、500°Cの砂、8kgである。一方、雪、アイスバーン斜面において斜路側面からの観察より熱砂が斜路を通過すると斜面に水が浸透しながら沈み込む様子が確認された。これより雪、アイスバーン斜面においては熱砂が水蒸気・水滴を発生させても斜面内の間隙

に入り込んでしまい、熱砂の落下を妨げることがないため熱砂の温度が高くなるに従い熱砂の持つエネルギーが大きくなり落下速度も速くなるのではないかと考えられる。また、雪とアイスバーンの違いはアイスバーン斜面の融雪が若干遅れる程度であった。

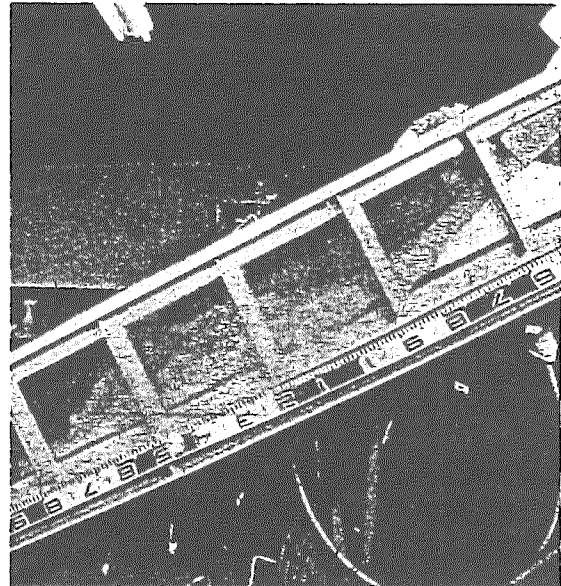


写真-1 熱砂の滑走

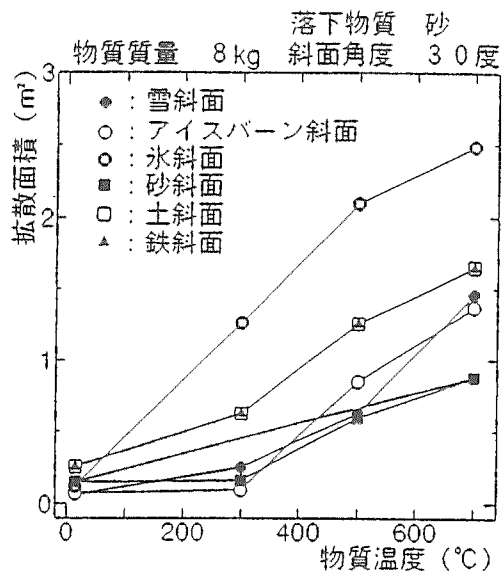


図-3 斜面条件と拡散面積

3-2 拡散面積

図-3は拡散面積の実験結果を示したものである。3-1と同様に斜面条件の雪、氷、アイスバーンに着目してみると氷斜面と雪、アイスバーン斜面の傾向に違いが見られる。これより拡散面積の広がりについても落下速度で述べたと同様に水蒸

気・水滴が原因となっていると推測される。氷斜面の場合熱砂が床に拡散堆積するとほぼ同時に斜路より水が流れ出る現象が顕著に見られた。この現象からも氷斜面の場合斜路内で発生した水蒸気・水滴の行き場所がなかったと考えることができる。氷斜面において斜路内を落下する熱砂が水蒸気・水滴を内包することによって、斜路を抜け床上での拡散の際のエネルギーを蓄積することとなったと考えることができ、ほかの斜面条件よりも広い拡散面積となったのではないかと推測される。また、氷斜面の場合堆積厚さがほかの斜面条件よりも薄く堆積することが確認された。

以上のように高温物質（熱砂）に水蒸気・水滴が内包されることによってその運動特性が大きく変化することが確認された。

4 数値計算

ここでは実験結果を数値計算で再現し、その特性を表現可能かどうかを検討する。

4-1 基礎方程式

宮本らの研究によれば、火砕流は粒子流として扱われ、堆積深方向に平均化した流れとして表現することが可能となる。このときの基礎方程式は次の各式で表される<sup>3)</sup>。

連続の式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

粒子の保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}(ch) + c_s \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cM) = 0 \quad (2)$$

x 方向の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F}{\rho_t} u \sqrt{u^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$F = \frac{3}{32\sqrt{10}} \frac{c^{4/3}}{1 - (c/c_s)^{1/3}} T_e \mu \delta \left( \frac{D}{h} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 $x$ ; 水平軸,  $u$ ;  $x$  方向の流速,  $h$ ; 流動深,  $z_b$ ; 標高,  $H$ ; 流体上部標高,  $\rho_t$ ; 流体の密度,  $\delta$ ; 粒子密度,  $D$ ; 粒径,  $c_s$ ; 堆積時の粒子濃度,  $\beta$ ; 運動量補正係数,  $T_e$ ; 流れの状態を表す定数,  $\mu$ ; 粒子間摩擦係数,  $\varepsilon$ ; 渦動粘性係数,  $g$ ; 重力加速度,  $t$ ; せん断力,  $t$ ; 時間,  $M$ ;  $x$  方向の流量フラックス (単位幅流量) であり  $M = uh$  である。また  $c$ ; 粒子濃度でありエ

ネルギー勾配に対して求められるが、宮本ら<sup>3)</sup>と同様にエネルギー勾配を路床勾配 ( $i_b$ ) で近似し、次式で表すこととした。

粒子濃度の式

$$c = \left( \frac{\sqrt{10} i_b}{3 \mu} \right)^3 \quad (5)$$

4-2 計算上の仮定および計算結果

計算仮定および諸係数を表-1に示す。前記の諸式をもとに積雪斜面上の1次元数値シミュレーションモデルを作成した。数値計算の方法としては、スタッカードスキームを用いた差分法を使用し、運動方程式における慣性項の空間差分には風上差分をとることとした。計算時間間隔には C.F.L.条件を適用した。

表-1 諸係数および条件

砂の量	8.0(kg)
砂の平均粒径	0.34(mm)
斜面角度	20°, 25°, 30°, 40°
堆積時の粒子濃度	$c_s = 0.6$
運動量補正係数	$\beta = 2.3$
流れの状態を表す定数	$T_e = 1.0$

また、上流端には流量フラックス  $M(t)$  および流動深  $h$  を仮定することにより境界条件とし、下流端には  $\partial M / \partial x = 0$ ,  $\partial c / \partial x = 0$ ,  $\partial h / \partial x = 0$  とすることにより境界条件とした。計算結果は図-4に示す通りである。この計算における条件は砂温

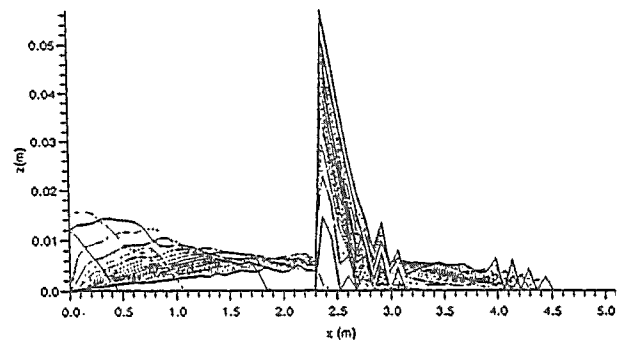


図-4 計算結果

度 7 0 0 °C、傾斜角度 40°、斜面条件雪、表示間隔は 0.05 秒ごとであり堆積深のみを表示したものである。ここで、宮本ら<sup>3)</sup>は火砕流は粒子流により構成され粒子間においてせん断応力がなす仕事と等価なエネルギー消費の支配パラメータは摩擦

係数のみであるとしている。そこで運動流体（熱砂）の内部摩擦係数により熱砂の挙動特性を表現することができるか検討することとした。実験結果をもとにモデルによる試算を行った。この試算における条件は実験ケース中最も多かった砂質量 8kg、傾斜角度 30°とし各砂の温度において行うこととした。また、試算の内容は到達距離に着目することとし内部摩擦係数を変化させることにより実験結果の到達距離をシミュレーションすることとした。図-5が試算の結果である。砂の温度

として表現できる。(6)式より砂の温度別内部摩擦係数を計算した。さらに得られた値を用いて砂質量 8kgにおける各到達距離を計算した。そこで、計算結果と実験結果を比較したものが図-6である。この図より内部摩擦係数と温度の関係をを用いることにより、斜面傾斜角度、砂の温度を変化させて行った実験結果をほぼ再現可能としたことが確認できる。

4 おわりに

火山泥流の鍵となる火砕流には火山灰のみではなく火山ガス、水蒸気といった気体を多く内包している。従って本実験において斜面条件氷の際に観察された現象がよりダイナミックに起きているものと考えられる。数値シミュレーションモデルにおいては実験結果との比較検討より実験結果をほぼ再現可能とした。今後は実験における熱砂の熱収支を測定するとともに実験の結果得られた高温物質の運動特性をより考慮した数値シミュレーションモデルの開発を進める必要がある。最後に、本研究は科学技術振興調整費の補助を受けて行われたものであり、関係各位に謝意を表すものである。

5 参考文献

- 1) 松林正義編著；火山と砂防，鹿島出版，pp.1-209,1991.
- 2) 下倉 宏，三浦敦禎，清水康行；積雪斜面上の火砕流の運動・融雪機構に関する実験研究（その2），土木学会第49回年次学術講演会概要集第2部（A），pp272-273,1994.
- 3) 宮本邦明，鈴木宏，山下伸太郎；火砕流の流動モデルと流下・堆積範囲の予測に関する研究，水工学論文集第36巻，pp.211-216,1992.

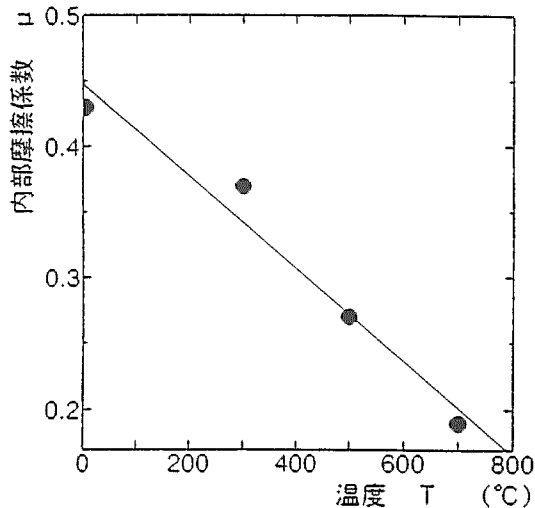


図-5 砂温度と内部摩擦係数

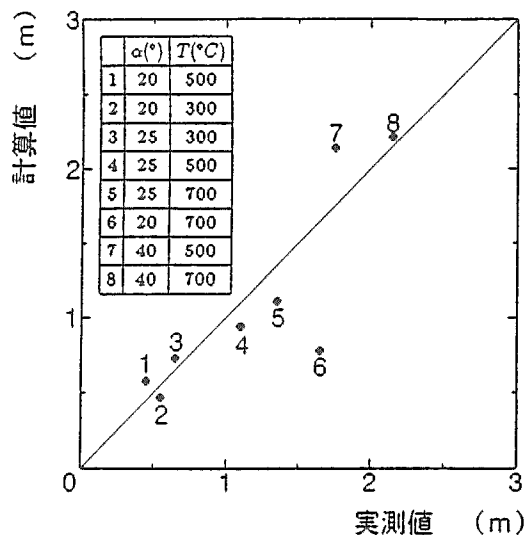


図-6 計算値と実測値の比較

が高くなるに従い内部摩擦係数が低くなる傾向を確認することができる。なお、直線の式は

$$\mu = -3.52T \times 10^{-4} + 4.48 \times 10^{-1} \quad (6)$$