

積雪斜面における火砕流に関する基礎的研究

Basic Study of Pyroclastic Flow on a Snow-Covered Slope

三浦 敦禎* 清水 康行** 下倉 宏***

Atsuyoshi MIURA, Yasuyuki SHIMIZU and Hiroshi SHIMOKURA

本報告は積雪斜面上に火砕流が発生した場合を想定し、その基本的な特性の検討を行ったものである。研究は積雪斜面上の火砕流による融雪特性を検討するための基礎的実験と、積雪斜面上の火砕流の運動特性を検討するための数値計算とから構成される。実験は、高熱ガスや高熱物体（砂、砂利など）が雪面に接触した場合の融雪特性を把握するための平面実験および高熱の物体が積雪斜面上を移動するときの運動特性や融雪状況を把握するための斜面実験の2種類のものが行われた。平面実験の結果、加熱物質の量、温度、雪との接触時間と融雪水量の関係が明らかになった。また斜面実験の結果、斜面における積雪の滑落は融雪水が雪面底部に浸透し、ある一定量以上貯留されてから生じることや、高熱の砂は温度が高いほど高速に運動し、その到達距離も長いことなどの特性が明らかになった。さらに、積雪斜面上を運動する火砕流の数値シミュレーションモデルを作成し、積雪斜面実験に適用した。実験と数値計算結果を比較検討することにより、運動流体（熱砂）の内部摩擦係数と温度の関係が明らかになり、この関係を用いることにより、斜面角度、熱砂の温度などを変化させて行われたすべての実験結果をほぼ再現可能なことが示された。

《火砕流；火山泥流；積雪斜面；融雪特性；内部摩擦係数》

In this study, we investigated the basic properties of pyroclastic flow that we assumed to occur on a snow-covered slope. The study consisted of (1) basic experiments to investigate characteristics of snow melting due to pyroclastic flow on a snow-covered slope and (2) numerical calculation to investigate kinetic properties of the pyroclastic flow on a snow-covered slope. Two kinds of experiments were conducted: (1) an experiment conducted on a flat surface to find the characteristics of snow melting when high temperature gas or materials (sand, gravel, etc.) make contact with a snow surface: and (2) an experiment conducted on a slope to find the kinetic properties of high temperature materials and conditions of melting snow when these materials move on a snow-covered slope. The results of the experiment on a flat surface showed the relationship between the volume of melt water and quantity of heated materials, and their temperature and the contact time with snow. The results of the experiment on a slope made clear that (1) a snow slip on a slope occurs after melt water penetrates to the bottom of accumulated snow and is stored until it becomes more than certain amount, and (2) high temperature sand moves faster and reaches

*河川研究室員 **北海道大学工学部助教授 ***日本工営株式会社札幌支店

farther as its temperature becomes higher. Also, we made a numerical simulation model of pyroclastic flow that moves on a snow-covered slope and applied it to the experiment on a snow-covered slope. Comparing and examining the results of the experiments and numerical calculation, the relationship between the coefficient of internal friction of kinetic fluid (heated sand) and its temperature was understood. We showed that by using this relationship, it is possible to reproduce almost the same results of all the experiments conducted while changing the angle of a slope, the temperature of heated sand, etc.

Keywords: pyroclastic flow, volcanic mud flow, snow-covered slope, characteristics of melting snow, coefficient of internal friction.

1. はじめに

北海道における火山は現在活発な活動は行っていないが、道内には十勝岳、樽前山、有珠山、駒ヶ岳、雌阿寒岳など噴火の中でも特に恐ろしい雲仙普賢岳のような火砕流を伴った噴火の危険性を内包する火山が多く存在する。さらに、山頂および山腹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ると、火山灰などと積雪の融解による水が一気に流れ下り、その被害はさらに甚大なものとなる。十勝岳の積雪斜面に発生した（大正15年5月24日）火砕流では¹⁾、死者・行方不明者が上富良野町と美瑛町合わせて144人にも及んだ記録もあり、積雪斜面上の火砕流の恐ろしさは想像を絶するものである。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まったくと明らかにされておらず、これに関する研究もほとんどない。

本研究の目的は、この積雪斜面上における火砕流の熱力学、運動力学的特性を明らかにし、これらの特性を反映した火砕流による融雪水量や運動速度、到達範囲などを予測する手法の提案である。初めに、積雪斜面上の火砕流による融雪水量を検討するために平面水槽を用いた基礎実験を行い、この結果、高熱ガスや高熱物体（砂、砂利など）が雪面に接触した場合の融雪水量の算定推定式の提案が行われる。次に、高熱の物体が積雪斜面上を移動するときの運動特性や融雪状況を把握するための斜面実験を行い、斜面における火砕流の運動特性、到達範囲、積雪の滑落状況などの特性を明らかにする。さら

に、積雪斜面上を運動する火砕流の数値シミュレーションモデルを作成し、実験と数値計算結果を比較検討することにより、運動流体（熱砂）の内部摩擦係数と温度の関係を明らかにし、この関係を用いることにより、斜面角度、熱砂の量などを変化させて行われたすべての実験結果をほぼ再現可能なことを示す。

火砕流、特に積雪斜面上の火砕流についてはあまりにも不確定要素が多いため、その定量的な解析は非常に難しい。しかしながら、防災上の観点からはなんらかの被害範囲や規模を予測することが急務となっており、本研究で得られた結果や手法はその第一歩となるものである。

2. 実験概要

2-1 平面実験および結果

(1) 火山噴出物の比熱

実験に用いた砂（珪砂）、火砕流堆積物である火山灰、火山岩である安山岩、玄武岩などの高温場における比熱を測定した。

比熱測定における代表的な結果は、火山灰で $0.81 \times 10^{-3} (0.6 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}) \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、安山岩、流紋岩で $0.86 \times 10^{-3} (0.7 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}) \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ であった。また、火砕流で運ばれる物質の比熱は $0.85 \times 10^{-3} \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 程度と推定された。なお、実験に用いた珪砂の比熱は $0.75 \times 10^{-3} (0.6 \times 10^{-3} \sim 0.9 \times 10^{-3}) \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ であった。

(2) 平面上のガス燃焼炎噴射による融雪機構

25 cm × 25 cm × 深さ 30 cm の容器に雪を詰め、容器上方よりプロパンガスを用いたガス

表-1 燃焼ガス噴射条件

ガス噴射口の温度	500(°C), 800(°C)
ガス噴射口と雪面の距離	5(cm), 10(cm), 15(cm)

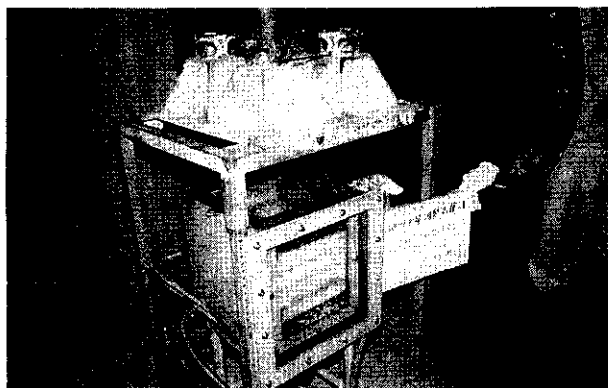


写真-1 実験状況

バーナーで燃焼炎を作り、雪面にガス燃焼炎を噴射させることで融雪状況を観測した。融雪状況は、雪中に設置した熱電対の温度変化と容器前面に設置したガラス面からの融雪状況観測により行われた。燃焼ガス噴射条件を表-1に示し、実験状況を写真-1に示す。なお、雪の条件として表-2に示すが、雪に関する標準的な密度設定が定められていないため、ここでは土質工学会基準²⁾の締固め試験の標準エネルギーを用いて雪の密度設定をすることとした。

高温ガスによる融雪には水蒸気の発生は見られず、融けた雪は水として浸透していく。また、雪質による融解特性の違いは顕著に認められず、融雪水量は雪に与えられる温度と時間に比例して増加することがわかった。融雪速度は新雪で0.036~0.27 cm/sec、ざらめ雪で0.031~0.39 cm/secであった。

融雪熱量を、ガス噴射時間とガス噴射面積とガス噴射温度で除した値を単位温度・時間・面積当たり融雪熱量とすることとし、火砕流（高熱ガス）が雪面に接触した場合における融雪水

量の算定推定式の提案を行う。実験において、単位温度・時間・面積当たり融雪熱量は0.003~0.03 J/sec・cm²・Kと推定された。そこで、火砕流の温度を絶対温度1,000 Kと仮定し、氷の潜熱を0.3 J/kgとするときの融雪水量の算定推定式は次式として推定される。

$$W_s = CAT \quad (1)$$

ここに、 W_s : 融雪水量 (t), A : 火砕流対象面積 (km²), T : 火砕流熱射時間 (sec), C : 定数 (t/sec・km²) であり、実験結果からは $C = 100 \sim 1,000$ (t/sec・km²) 程度の値をとる。

(3) ガス状火砕流による融雪水量の想定

ガス状火砕流による融雪水量推定モデル計算を行う。ガス状火砕流の到達距離は火口(山頂)より5 kmとし、その影響による融雪範囲は火口を中心とした半径5 kmの円の1/10と仮定する。山体面積を80 km²とすると、仮定より融雪範囲は1/10の8 km²である。また、火砕流の速度を50 m/sと仮定するとき、到達端5,000 mまでの到達時間は100秒である。以上をもとに、(1)式よりガス状火砕流による融雪水量は800,000 tと推定される。

(4) 平面上の高熱物体による融雪過程

実験容器は上記(2)と同様なものを使用し、高熱物質を容器上方より雪面に落下させて融雪状況を観測した。観測方法は(2)と同様であるが、熱電対については雪中のみではなく高熱物質中の温度分布も観測可能とした。高熱物体としては、珪砂と砂利（粒径5 cm以下）を使用した。高熱物体の温度条件としては300°C, 400°C, 500°C, 700°Cとした。高熱物体の設定においてはコークスを用いて加熱し、攪拌させながら熱電対で温度測定を行い所要の温度とすることとした。また、雪の条件は(2)と同様とした。

熱砂が雪面に接触した直後は急激に雪が融解されるが、その後の融解は比較的緩やかなもの

表-2 雪の条件

雪 質	新 雪			ざらめ雪		
密度状態	密	中	粗	密	中	粗
雪の密度 ρ_w (g/cm ³)	0.523	0.380	0.253	0.571	0.457	0.357
締固め度 D_c (%)	109	80	53	102	82	64
相対密度 D_r (%)	100	70	15	100	60	5

となった。そこで、雪中深度 0.5 cm において時間の経過に伴う温度変化をまとめたものが図-1 である。ここに、雪中深度 0.5 cm とは熱砂投入前(初期条件)における深度である。図-1 より明らかなように、熱砂と雪面が接触した直後は温度が急激に上昇するが、その後温度は約 100°C を保つ。この温度は水の沸点に一致する。これより類推されることは、熱砂が雪面と接触することにより水蒸気が発生し、この水蒸気が熱砂および雪の隙間に入込むことにより水滴(約 100°C)となり、隙間を満たし一種の境界層が形成されたのではないかとということである。なお、概念図として図-2 を示す。またさらに、実験の観測結果として先にも述べたように、急激な融解が生じた後の融解は比較的緩やかであったのは、この境界層、すなわち約 100°C の層を介して融解が進んだためではないかと考えられる。また、熱砂投入後ガス噴射を行っても融雪水量の増加はあまり進行しないことも確認された。次に、砂利のように粒径が大きい場合は熱砂利投入直後に熱砂利が雪に楔状に刺さり融雪が急激に生じる。雪面に接する熱砂利が冷却すると融雪速度は減衰され、徐々に熱砂利が積雪中に沈み込むようにして融雪が進行する。また、砂利の場合には砂の場合のような境界層は観察されなかった。

火砕流堆積物(高熱物質)が雪面に接触した場合の融雪水量の算定推定式の提案を行う。高熱物質による融雪はその全熱量が融雪に寄与しないと考えられ、固体物質の比熱のみで融雪量を推定することは困難である。そこで、融雪水量は個体の温度と量に関係すると考え、次式で表す。

$$K_w = \frac{Q_w}{W_m T_m} \quad (2)$$

ここに、 K_w ：融雪相当比熱(J/kg・K)、 Q_w ：融雪熱量(J)、 W_m ：固体の重量(kg)、 T_m ：固体の温度(K)である。

実験結果をもととして、融雪量は高熱物質の堆積厚さが厚くなってもその上部の温度がそのまま下部、すなわち雪面に伝達されないため、そのすべてが融雪に寄与しないと考えられる。また、砂の厚さが限りなく薄くなるとすべての

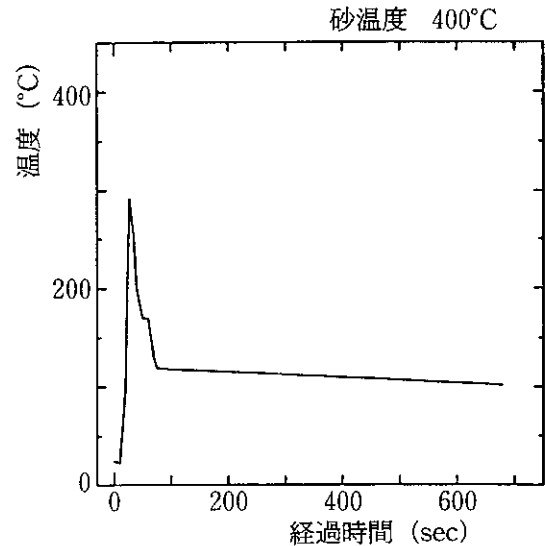


図-1 温度変化

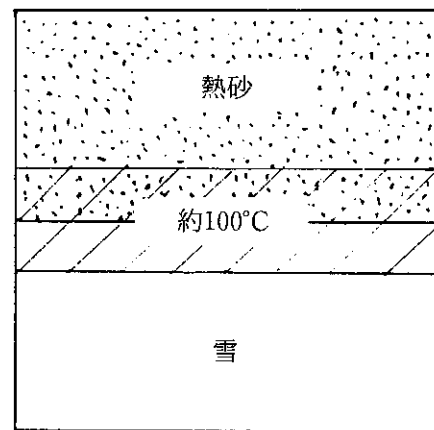


図-2 概念図

高熱物質が融雪に寄与すると考え、さらに次式を提案することとする。

$$K_w = \frac{1}{1/K_s + ay} \quad (3)$$

ここに、 K_s ：固体の比熱(J/kg・K)、 y ：固体の堆積厚さ(m)、 a ：係数(kg・K/J・m)であり、推定値 0.07(kg・K/J・m)とする。以上提案した(2)式、(3)式をもとに、高熱物質による熱量の式は次式で示すことができる。

$$Q_w = \frac{W_m T_m}{1/K_s + ay} \quad (4)$$

さらに、(4)式と雪の潜熱の商により融雪水量の算定値として推定される。

(5) 火砕流堆積物による融雪水量の想定

1988年12月25日の十勝岳の噴火³⁾(火砕流)における融雪水量推定モデル計算を行う。ただ

し、融雪要因は火砕流堆積物のみと仮定する。火砕流は火口の北斜面を流下し、約 700 m で停止した。また、その幅約 400 m であった。以下に 12 月 25 日の火砕流に関して仮定することとする。火砕流の体積を $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、堆積密度を 0.6 t/m^3 、一般に火砕流の温度¹⁾は $100 \sim 1,000^\circ\text{C}$ といわれることより火砕流の温度を $1,000 \text{ K}$ とし、火砕流噴出物の比熱を $0.85 \times 10^{-3} \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ とする。また、氷の潜熱を 0.3 J/kg とすることとする。以上をもとに、融雪水量は(4)式と氷の潜熱の商により 7,800 t と推定される。次に、推定した融雪水量の雪への換算を行う。融雪された積雪がしまり雪⁴⁾であったと仮定するとき、積雪密度は 0.35 t/m^3 である。よって、融雪された雪の体積は推定融雪水量と仮定積雪密度より $20,000 \text{ m}^3$ と推定される。この結果より、仮定融雪範囲の融雪深は積雪表面より 7 cm と推定される。なお、12 月 25 日の火砕流による火山泥流の発生は確認されなかった。

2-2 斜面実験および結果

実験に用いた装置は、図-3 に示す可傾斜斜路（長さ 3 m、幅 25 cm、深さ 30 cm）である。なお、斜路傾斜角度を 30° と 35° において実験を行った。また、雪の条件は新雪の中密度とした。

(1) 斜面上の融雪機構

実験斜路に雪を詰め、積雪斜面上端より 1 m の区間にわたりガス燃焼炎を往復させ、融雪状況を観測した。なお、ガス燃焼炎の温度は 700°C

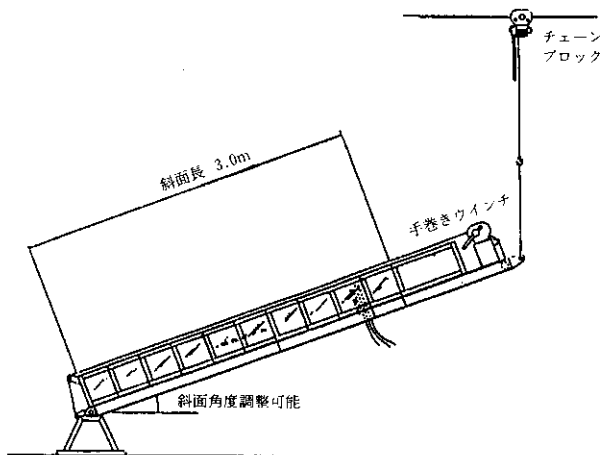


図-3 可傾斜実験斜路

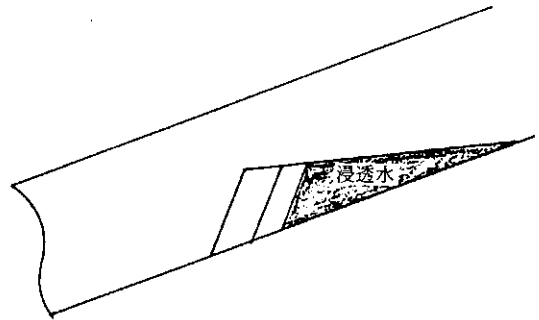


図-4 浸透状態

とし、雪面との噴射距離は 5 cm とすることとした。

高熱ガスにより融雪した水は積雪斜面上を流れることなく、平面実験と同様に積雪中にただちに浸透し後に積雪が滑落した。

(2) 斜面上の融雪水による滑落

図-3 の実験装置を用いて融雪が多量に生じた場合を想定し、積雪斜面上端低部より水を流し積雪の滑落までの状況を観測した。斜路傾斜角度は、 30° と 35° に加え 25° についても行った。

斜面上端低部に水を流すと水は一部底面を流れるが、床面とほぼ水平になるように溜りながら徐々に下流に浸透していく。その様子を示したものが図-4 である。さらに、ある水量になったとき一気に滑落する。以上より、融雪水による積雪斜面の滑落の原因は融雪水が底部の強度を低下させて発生するのではなく、現段階においては融雪水量の増加に伴い間隙水圧が高まることなどにより滑落が発生するものと考えられる。また、実験において斜面上の積雪が滑落する際には、融雪要因が高熱ガス・熱砂・融雪水といかなる場合であっても、またどの設定傾斜角度においても突如として発生することが確認された。この結果は、火山泥流発生時に顕著な前兆がないということがらときわめて近いものとなった。

(3) 積雪斜面上の高熱砂の滑走状態

実験装置は図-5 に示すようなストッパー付き熱砂落下筒と長さ 3 m、幅 30 cm、深さ 30 cm の可傾斜斜路に雪を充填したものを使用した。なお、雪の条件は新雪の中密度とした。ストッパー上に熱砂を入れ、ストッパーを解除することにより積雪斜面上における火砕流を模擬する

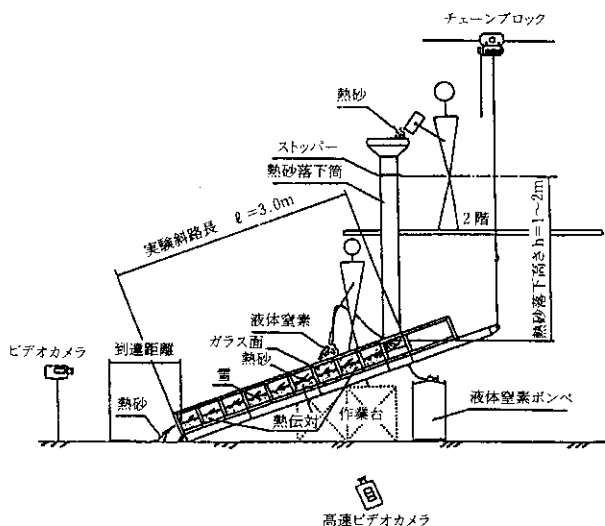


図-5 実験概要

表-3 実験条件

斜面角度(°)	20, 25, 30, 40
砂の温度(°C)	室温, 300, 500, 700
砂の量(kg)	4, 8, 12
砂の比重	2.66
砂の平均粒径(mm)	0.34

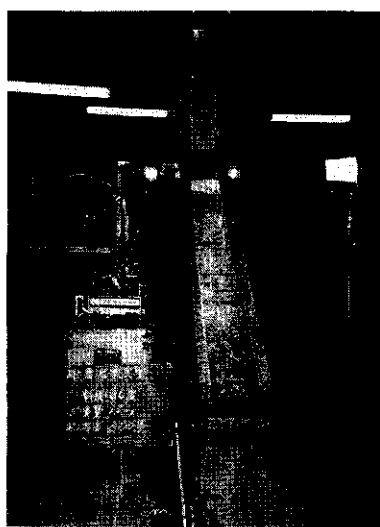


写真-2 実験状況

こととした。ここに、熱砂とは電気炉において加熱した砂粒子である。なお、砂粒子は平均粒径 0.34 mm の珪砂を用いた。測定項目は、熱砂の滑走状況、熱砂の到達距離および融雪状況とした。到達距離とは、図-5 に示すとおりとした。具体的な測定方法として、高速ビデオカメラとモータードライブつきカメラにより滑走状況を撮影した。熱砂が床面に拡散した範囲を測

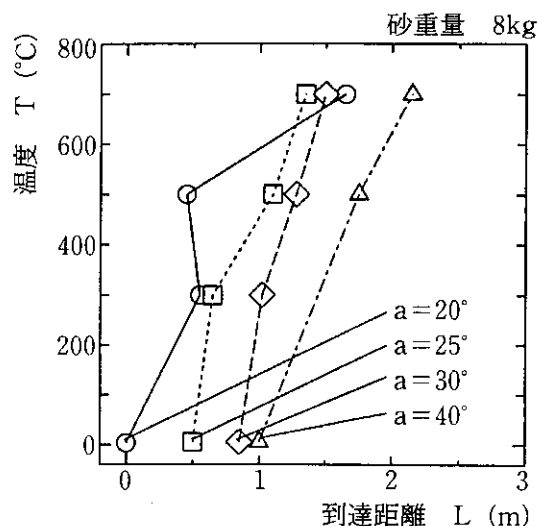


図-6 実験結果

定し、到達距離とした。また、熱砂が斜面上を滑走後ただちに液体窒素で融雪を停止させ融雪状況を観測した。なお、実験条件は表-3 に示すとおりとすることとした。実験状況を写真-2 に示す。

砂の落下速度は傾斜角度が急になるほど、また砂重量が増すほど速くなり、さらに砂の温度が高くなるほどその落下速度が速くなるという結果が得られた。なお、最大落下速度は傾斜角度 40° 砂の温度 700°C のとき 6.43 m/sec であった。次に、火砕流の到達範囲に関して検討を試みるために熱砂の到達距離に着目して実験結果をまとめる。実験ケースの内、最も多くデータが存在する砂重量 8 kg について斜路の傾斜角度別に砂の温度と到達距離の関係を示したものが図-6 である。斜路傾斜角度 20° において若干の乱れがあるものの、同傾斜角度のもとでは砂の温度が高くなるに従い到達距離も延びることが確認できた。またさらに、同温度の砂においては斜路の傾斜角度が上がるほど到達距離も延びることが確認された。

3. 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。

3-1 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⁵⁾。

連続の式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

粒子の保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}(ch) + c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cM) = 0 \quad (6)$$

x 方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uM) \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F}{\rho_t} u \sqrt{u^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$F = \frac{3}{32\sqrt{10}} \frac{c^{4/3}}{1 - (c/c_*)^{1/3}} T_e \mu \delta \left(\frac{D}{h} \right)^2 \quad (8)$$

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、 ρ ；流体の密度、 δ ；粒子密度、 D ；粒径、 c_* ；堆積時の粒子濃度、 β ；運動量補正係数、 T_e ；流れの状態を表す定数、 μ ；粒子間摩擦係数、 ϵ ；渦動粘性係数、 g ；重力加速度、 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¹⁾と同様に i_b ；路床勾配で近似し、次式で表すこととした。

粒子濃度の式

$$c = \left(\frac{\sqrt{10}}{3} \frac{i_b}{\mu} \right)^3 \quad (9)$$

3-2 計算仮定および計算結果

計算仮定および諸係数を表-4に示す。3-1で示した基礎方程式と表-4をもととし、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

表-4 計算仮定および条件

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	$c_* = 0.6$
運動量補正係数	$\beta = 2.3$
流れの状態を表す定数	$T_e = 1.0$

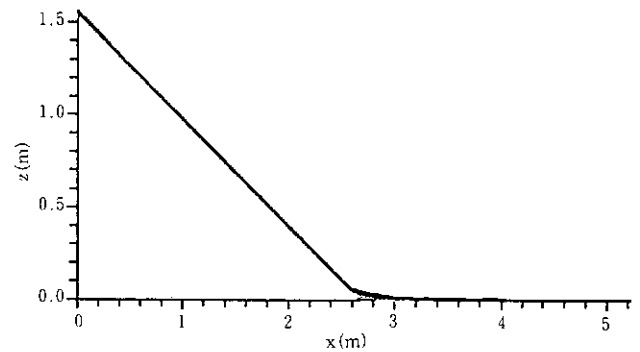


図-7(a) 計算結果

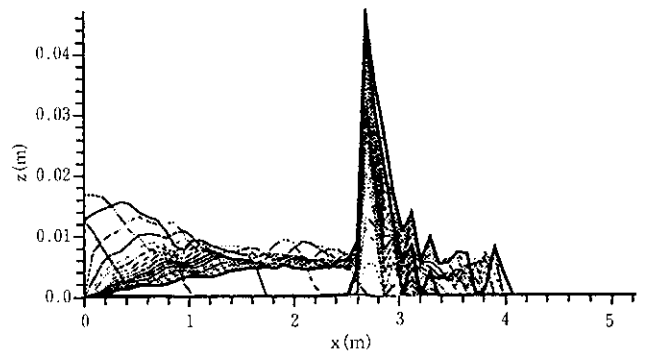


図-7(b) 計算結果

を適用した。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。下流端における具体的な操作方は、隣合う計算点の置き換えを行うこととした。計算結果は図-7に示すとおりである。この計算における条件は砂温度 700°C、傾斜角度 40°であり、表示間隔は 0.05 秒ごとである。図-7(a), (b)は同一なものを示し、(a)は床面から堆積上端までの距離を示したものであり、(b)は堆積深のみを表示したものである。ここで、宮本ら⁵⁾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粒子重量 8 kg、傾斜角度 30°とし、各砂粒子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

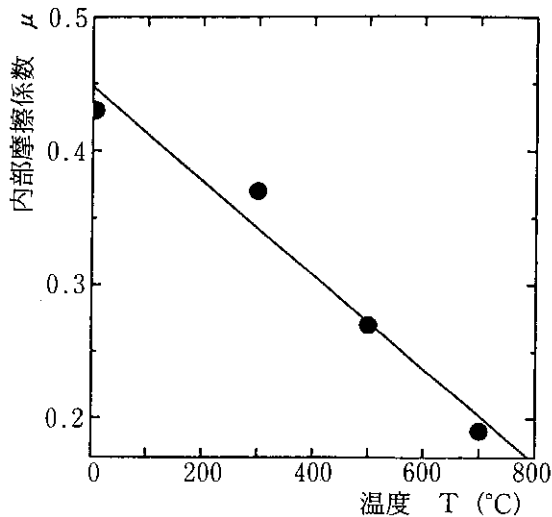


図-8 到達距離と内部摩擦係数

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-8が試算の結果である。砂粒子温度が高くなるに従い、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、

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

として表現できる。(10)式より砂粒子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粒子重量 8 kg における各温度別到達距離を数値シミュレーションした。数値計算と実験結果との関係を示したものが図-9(a), (b)である。なお、図-9(a)は斜路傾斜角 25 度において到達距離を示したものであり、図-9(b)は斜路傾斜角 40 度について示したものである。これらの結果より明らかなように、(10)式より得た内部摩擦係数を用いて数値シミュレーションした結果においても、実験結果と同様に砂粒子の温度が高くなるに従い到達距離も増加することが確認された。一方、斜路傾斜角 25 度の到達距離は実験結果よりも計算結果の値が抑えられており、斜路傾斜角 40 度においては実験結果よりも計算結果の値が大きくなっている。これらの原因としては現段階において粒子濃度 c を路床勾配で近似していることなど、数値計算上の仮定があるためだと考えられる。また、各温度別に(10)式より求めた内部摩擦係数を用いて計算した到達距離と実験による到達距離の関係を比較したものが図-10 である。この図を平面の直交座標 x, y を用いて説明すれば計算値を y 、実測

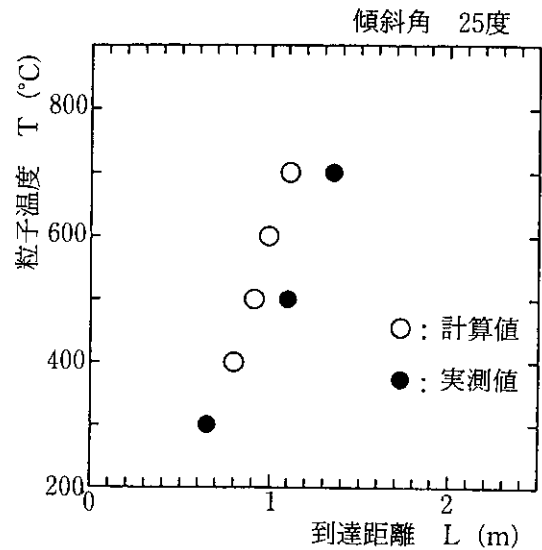


図-9(a) 計算値と実験値

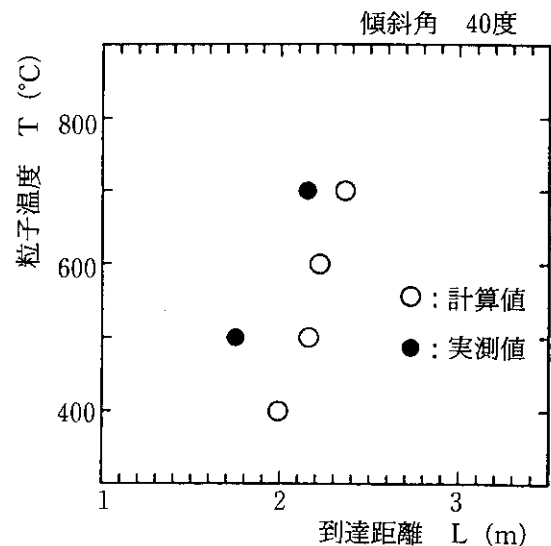


図-9(b) 計算値と実験値

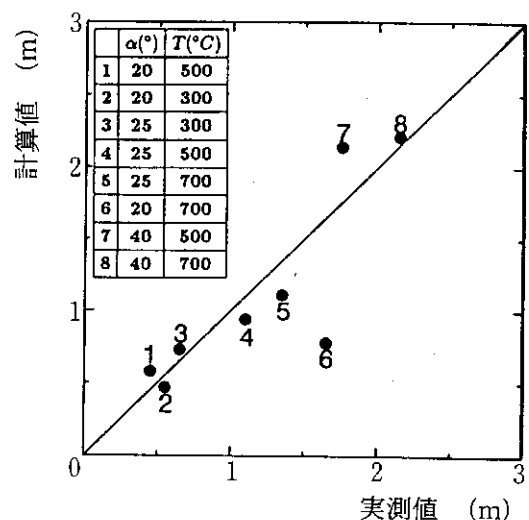


図-10 到達距離の整合性

値を x とおくと、計算結果と実測値の関係をプロットしたとき相関が高ければ高いほど直線 $y = x$ 付近にプロットされることとなる。したがって、図-10 より斜面角度、砂粒子温度など変化させて行われた実験結果をほぼ再現可能としていることが確認できる。

4. おわりに

本研究は、火山泥流発生の鍵となる積雪の融雪特性と火砕流の基礎的特性について検討したものである。ここに、現段階における主要な結果について述べることにする。平面実験の結果として、雪質による融解特性の違いは認められなかった。また、融雪水量は雪に与えられる温度と時間に比例して増加することがわかった。斜面実験の結果として、高熱の砂は温度が高いほど高速に運動し、その到達距離も長くなることがわかった。積雪の滑落は積雪底部に融雪水が浸透し、ある一定量以上貯留されると生じることがわかった。数値計算の結果についてまとめる。実験と数値計算結果を比較検討することにより、運動流体（熱砂）の内部摩擦係数と温度の関係が明らかになった。この関係を用いる

ことにより、斜面角度、熱砂の温度などを変化させて行われたすべての実験結果をほぼ再現可能とすることがわかった。今後は、数値計算モデルを2次元モデルに拡張するとともに、火砕流の特性をさらに把握し、火砕流による融雪機構およびこれに伴う火山泥流の発生機構を解明する必要がある。

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) 河上房義著：新編土質力学(改訂版)，森北出版株式会社，pp. 228-243 (1980)。
- 3) 勝井義雄：1988年十勝岳火山噴火の推移，発生機構および社会への影響に関する調査研究，第26回自然災害科学総合シンポジウム要旨集，pp. 95-106 (1989)。
- 4) 建設省河川局砂防部監修，雪崩対策研究会編著：雪崩とその対策，pp. 1-208 (1986)。
- 5) 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)。

*

*

*