

# ダ-12 雪面における火砕流数値シミュレーションモデルについて

開発土木研究所河川研究室 ○ 三浦敦禎  
清水康行

## 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、山頂及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、火山灰等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日の火砕流では<sup>1)</sup>死者・行方不明者が上富良野町と美瑛町合で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全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無い。

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、砂利等)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。次に、高熱の物体が積雪斜面上を移動する時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全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、余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何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。

表-1 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)

## 2 実験概要

### 2-1 平面実験および結果

表-2 雪の条件

雪質	新雪			ざらめ雪		
	密	中	粗	密	中	粗
密度状態						
雪の密度 $\rho_w(g/cm^3)$	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

#### (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、玄武岩等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(0.6~1.0)J/g/K、安山岩、流紋岩で0.86(0.7~1.0)J/g/Kであった。また火砕流で運ばれる物質の比熱は0.85J/g/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(0.6~0.9)J/g/Kであった。

#### (2) 平面上のガス燃焼炎噴射による融雪機構

25cm×25cm×深さ30cm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。

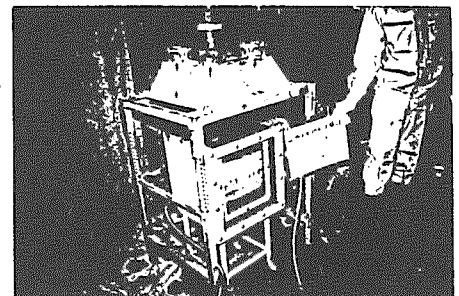


写真-1 実験状況

Atsuyosi MIURA, Yasuyuki SHIMIZU

第37回(平成5年度)北海道開発局技術研究発表会

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<sup>2)</sup>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行く。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分かった。融雪深度と時間の関係を図-1に示した。高温ガス噴射時間と融雪深度の関係は直線的となっており、融雪速度は新雪で0.036～0.27cm/sec、ざらめ雪で0.031～0.39cm/secと雪質の差は顕著に認められなかった。

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0.003～0.03J/sec/cm<sup>2</sup>/Kと推定された。そこで火砕流の温度を絶対温度1000Kと仮定し氷の潜熱を300J/gとするときの融雪水量の算定推定式は次式となる。

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

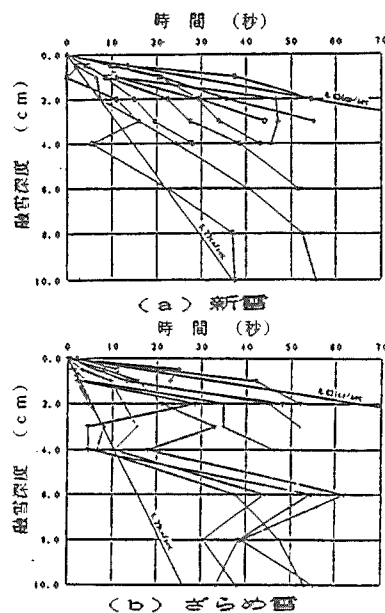


図-1 融雪深度と時間

ここに、 $W_s$ : 融雪水量 (t),  $A$ : 火砕流対象面積 (K<sup>2</sup>),  $T$ : 火砕流熱射時間 (sec),  $C$ : 定数 (t/sec/K<sup>2</sup>) であり実験結果からは  $c = 100 \sim 1000$  程度の値をとる。

### (3) 平面上の高熱物体による融雪機構

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5cm以下)を使用した。高熱物体の温度条件としては300℃、400℃、500℃、700℃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ものとなった。この時の、雪中深度0.5cmにおける温度の時間変化を図-2に示す。ここに、雪中深度0.5cmとは熱砂投入前(初期条件)における深度である。図-2より明かなように、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℃を保ち、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、この水蒸気により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。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、即ち約100℃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こ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まず次式を提案することとする。

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

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

実験結果を基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即ち雪面に伝達さ

れないためその全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全ての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 ( $J/g/K$ ),  $y$ ; 固体の堆積厚さ ( $cm$ ),  $a$ ; 係数 ( $1/cmJ/g/K$ ) であり推定値 0.7 とする。以上提案した (2) 式、(3) 式を基に高熱物質による熱量の式は次式で示すことができる。

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

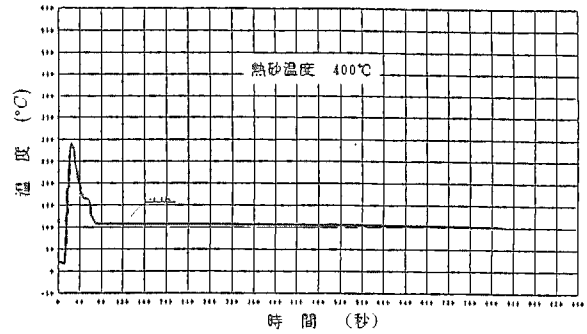


図-2 温度変化

さらに、(4) 式と雪の潜熱の積により融雪水量の算定値として推定される。

## 2-2 斜面実験および結果

実験装置は図-3に示すようなストッパー付き熱砂落下筒と長さ3m、幅30cm、深さ30cm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0.34mm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-3に示す通りとした。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付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定し到達距離とした。また、熱砂が斜面上を滑走後直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に示す通りとすることとした。実験状況を写真-2に示す。

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

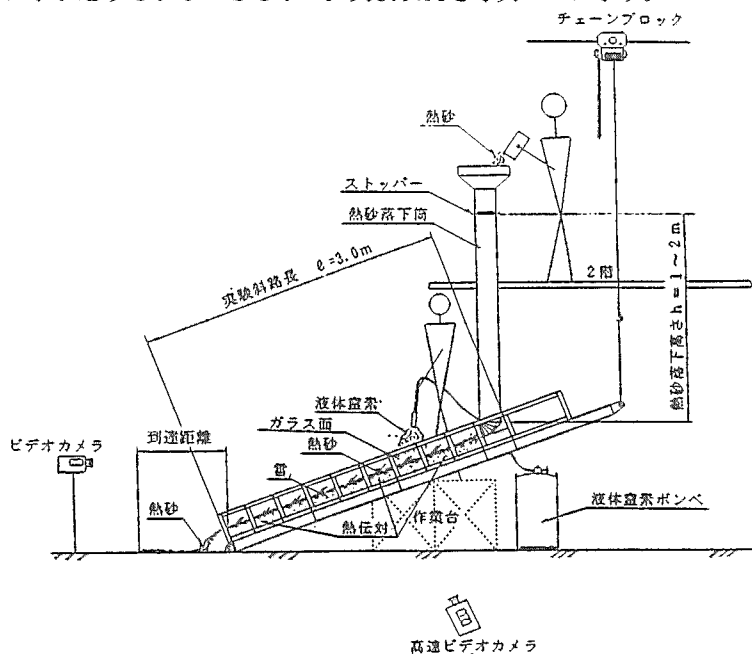


図-3 実験状態概念図

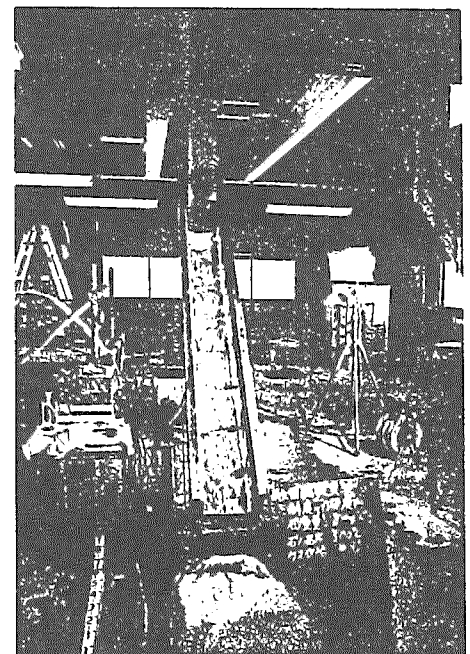


写真-2 実験状態

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 の時の 6.43 m/sec であった。図-4 に砂温度と落下速度の関係を示す。図中の波線等は傾斜角度別のデータ分布範囲を示すものである。

次に、火砕流の到達範囲に関して検討を試みるため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 8kg 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-5 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<sup>3)</sup>。

連続の式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

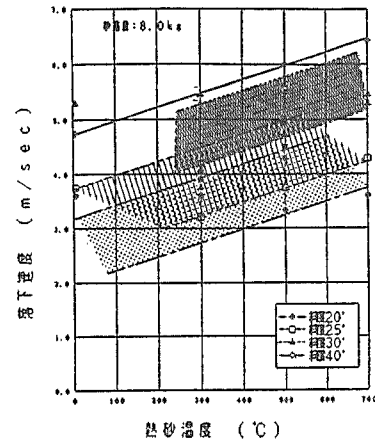


図-4 砂温度と落下速度

粒子の保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}(ch) + c_s \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cM) = 0 \tag{6}$$

x 方向の運動方程式

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

$$F = \frac{3}{32\sqrt{10}} \frac{c^{4/3}}{1 - (c/c_s)^{1/3}} T_c \mu \delta \left( \frac{D}{h} \right)^2 \tag{8}$$

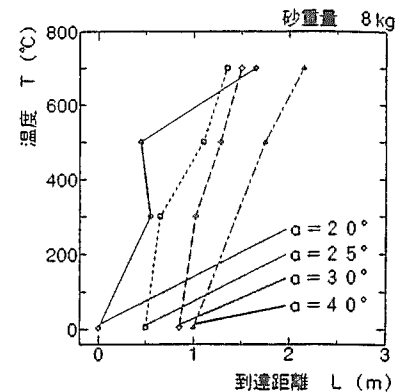


図-5 実験結果

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、 $T_c$ ; 流れの状態を表す定数、 $\mu$ ; 粒子間摩擦係数、 $\epsilon$ ; 渦動粘性係数、 $g$ ; 重力加速度、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

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

### 3-2 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-4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。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  $\frac{\partial M}{\partial x} = 0$ ,  $\frac{\partial c}{\partial x} = 0$ ,  $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$  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法は隣合う計算点の置き換えを行

表-4 計算仮定および諸係数

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	$T_e = 1.0$

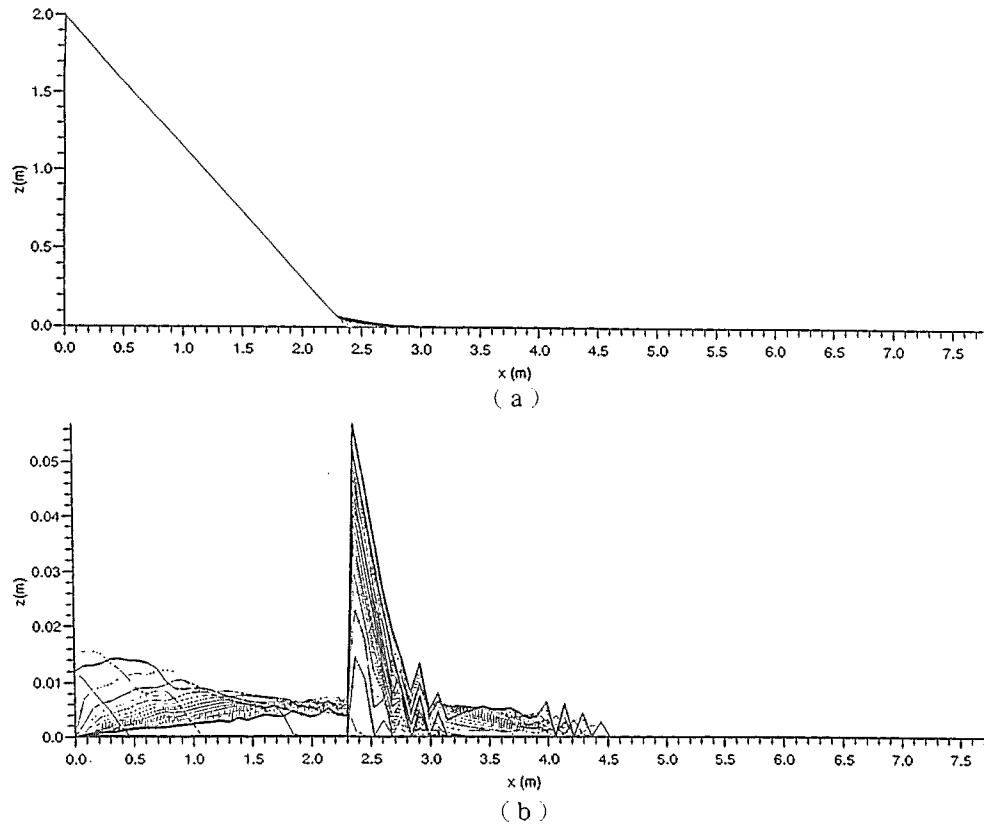


図-6 計算結果

うこととした。計算結果は図-6に示す通りである。この計算における条件は砂温度700℃、傾斜角度40°であり表示間隔は0.05秒ごとである。また、図-6(a)は床面から堆積上端までの距離を示したものであり、図-6(b)は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粒子重量8kg、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-7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

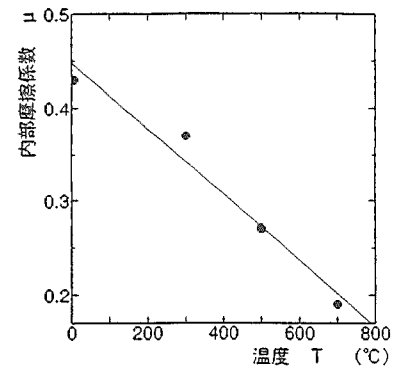


図-7 砂温度と内部摩擦係数

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

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  $8kg$  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-8である。なお図-8(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-8(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-9である。

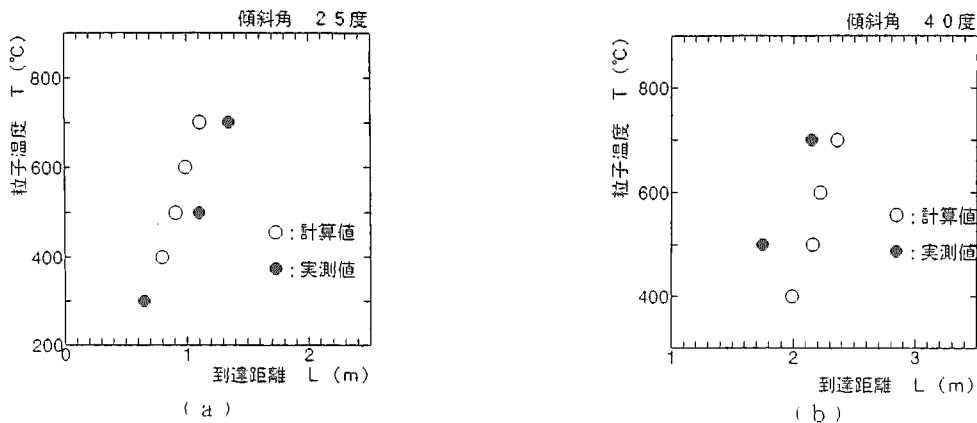


図-8 計算値と実測値

#### 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分かった。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分かった。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生じることが分かった。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、熱砂の量などを変化させて行われた全ての実験結果をほぼ再現可能とすることが分かった。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及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。

#### 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) 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) 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3巻，pp.211-216,1992.

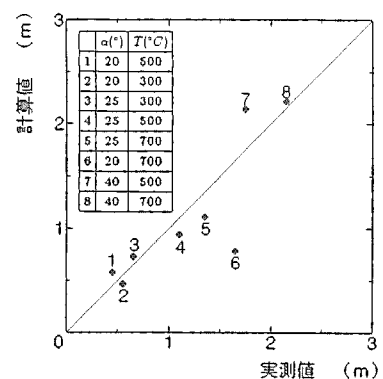


図-9 到達距離の整合性