

# 火砕泥流発生時における 雪氷の融解に関する実験的研究

北見工業大学工学部 ○中尾隆志  
北海道開発局 許士達広  
日本工管㈱ 下倉 宏  
北海道大学工学部 藤田睦博

## 1. はじめに

雲仙岳の火山噴火の例に見られるように大規模な火砕流は甚大な被害を与える。北海道の中央部に位置する十勝岳も火山噴火時には火砕流を伴うと言われており、最近の火山活動の活発化に伴い、地元では泥流工、砂防ダム等の防災施設の整備が急務となっている。特に、積雪時における火砕流の発生は急激な雪氷融解による泥流災害を引き起こし、かなりの被害を与えることが考えられるが、現状では火砕流現象を伴うような高温時における雪氷融解機構は殆ど明らかになっていない。本研究は火砕流発生時の雪氷融解機構を明らかにすることを目的に、室内でプロパンガスと熱砂を用いて、人工的に高温状態を作り出し、雪が急激に融解する実験を行い、火砕流の熱源となる温度、規模などの条件により雪氷の融解状況がどのように変化するかについて考察を行った。

## 2. 実験方法及び結果

本研究では火砕流の熱源としてプロパンガスの火炎を用いた方法と高温に熱した砂を用いた方法の2種類を用いて実験を行った(以下、前者をガス噴射法、後者を熱砂法と呼ぶ)。実際に雪を融かす実験に先立ち、実験で用いる熱源と雪の物理特性を明かにし、融解実験の諸条件を詳細に検討するため、予備実験を行った。以下に、その概要について述べる。

### (1) 予備実験

実験に用いた積雪試料は予め春先に採取しておいた雪を使用した。雪質は固くザラメ化していたため実験開始時に5mmふるいでふるい分けを行い、試料がほぼ均一になるようにした。表-1は実験で用いた積雪試料の透水係数を示している。試験方法は10cmモールドを用いた定水位法により、雪の密度を3種類に変化させ各々3回、全9ケース行った。通水に用いた水は予め氷を入れ0℃に保った水を使用している。3つの密度による透水係数には大きな差がないが、密度が増えると、次第に透水係数は小さくなっており、通常言われている土壌の透水係数に比べ、極めて大きな値となっている。若浜は<sup>1)</sup>野外において融水量が非常に大きな時の雪の浸透試験を行い、雪の浸透速度として密度が0.45g/cm<sup>3</sup>程度のこしまり雪で1.2~1.5cm/sec、ざらめ雪で2~3cm/secの値を得ている。本実験の値はこれらの結果とほぼ一致している。

雪の融解実験の諸条件を決定するため、ガス噴射法ではガスバーナーのバルブ開度を種々に変化させ、予め用意しておいた容器内の水に火炎を放射し、火炎放射前後の水温上昇量から単位時間当りのガスの熱カロリー量を求めた。また同様な方法により、容器内の水の減少量から蒸発量の算定も行っている。一方、熱砂法においても使用する砂(珪

表-1 雪の透水係数

雪の密度 g/cm <sup>3</sup>	透水係数 cm/sec
0.534	1.55×10 <sup>0</sup>
0.474	1.94×10 <sup>0</sup>
0.414	2.30×10 <sup>0</sup>

表-2 実験条件

ガス噴射法	ガスの温度(℃)	800, 500
	ガス噴射距離(cm)	5, 10, 15
	ガス噴射時間	全距経時, 1分間噴射
	雪の密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.53, 0.47, 0.42
熱砂法	砂の温度(℃)	700, 500, 300
	砂の厚さ(mm)	5, 10, 15
	雪の密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.53, 0.47, 0.42

砂15号)の量及び砂の温度を変えて、各温度における蒸発量及び砂の比熱を求め、これらの結果より雪の融解実験条件を表-2のように決定した。

(2) 雪の融解実験

図-1は本実験で用いた実験容器を示している。実験容器は50cm×50cm、深さ30cmの容積を有する鋼板製(厚さ2.5mm)で正面は浸透の様子が観察できるように1cm間隔に目盛りが入った耐熱ガラスがはめ込まれている。積雪試料は5cm毎に所定の密度になるように詰め、試料厚をガス噴射法は20cm、熱砂法は15cmになるようにし、耐熱ガラスを通して浸透の様子が観察しやすいように5cm毎に染料を散布し、融雪時に着色水の様子をビデオ撮影した。容器中央部には実験中の試料の温度変化を調べるためガス噴射法では雪面から0.0、0.5、1、2、3、4、6、8、10cmの位置に、熱砂法では-0.5、0.0、0.5、1、1.5、2、3、4、5cmの位置に各々熱電対を設置し、20msec毎にデータロガーで温度記録を行っている。実験終了後は5cm間隔で20cmまで雪の密度を

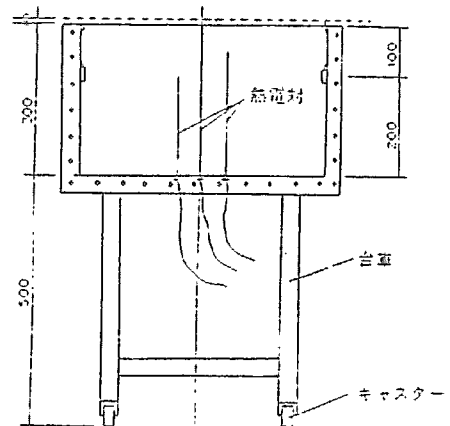


図-1 実験容器の概要

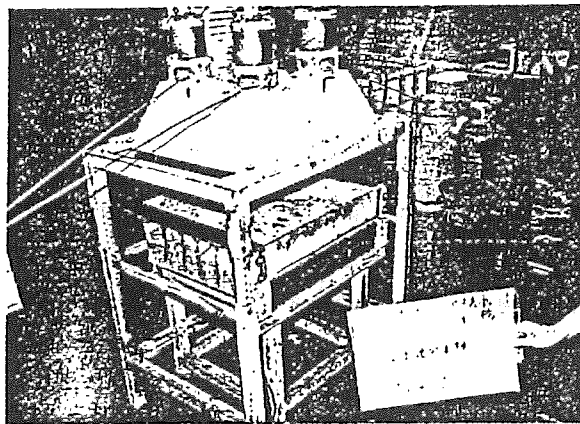


写真1 雪の融解実験(ガス噴射法)

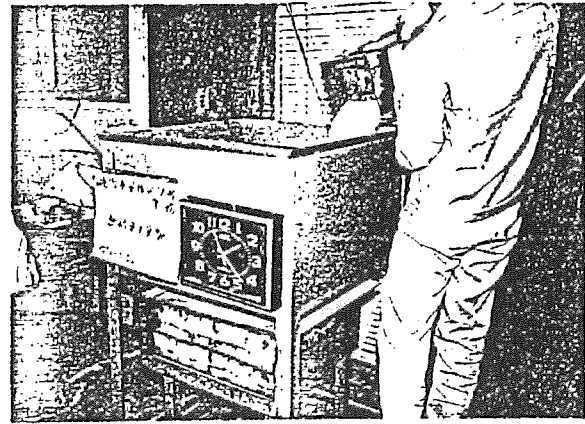


写真2 雪の融解実験(熱砂法)

測定し、同時に雪の含水率も測定した。雪の最終的な融解量の測定は発砲ビーズ(比重0.1、粒径2mm程度)を用いて、砂置換の要領で融解体積の実測を行った。写真1、2にガス噴射法、熱砂法の実験の様子を示す。

(a) ガス噴射法による実験結果

表-3はガス噴射温度を低温実験(500℃)、高温実験(800℃)とした時の最終融解深さ(cm)をガス噴射距離と雪密度別に示している。表から明らかなように低温実験に比べ、高温実験は融解深さは大となっているが、雪密度変化による融解量の違いの傾向はみられない。一方、ガス噴射距離と融解深さの関係は高温実験については、噴射距離が大となると融解深さは小となっているが、低温実験ではこの関係は見られない。この原因の1つとして高温時のガスバーナーのバルブ開度は最大時の約80%程度と考えられ、他方、低温時のバルブ開度は約50%程度であったためバーナーからのガス噴射速度が高温時ではかなり大きく、この結果ガス噴射速度はガス噴射距離と強い相関があると思われるが、低温時には噴射量が弱く噴射速度は噴射距離にほとんど無関係であったためであると思われる。

表-3 ガス噴射法による最終融解深さ

ガス噴射距離(cm)	雪の密度 (g/cm <sup>3</sup> )		
	0.42	0.47	0.53
低			
5	1.95(499)	1.57(499)	1.95(568)
10	1.85(500)	—	1.73(514)
15	2.19(480)	—	1.89(456)
高			
5	5.35(708)	5.13(742)	6.59(768)
10	4.35(746)	—	5.93(729)
15	4.34(776)	—	4.39(751)

(1) 内の数値は実験中のガス噴射の平均温度(℃)

(b) 熱砂法による実験結果

図-2は雪密度 $0.53\text{g/cm}^3$ 、砂層厚 $15\text{mm}$ の融解実験における融解深さの時間変化を熱砂の温度をパラメータとして示している(括弧内の数値は最終融解深さ $\text{cm}$ を表す)。図から明らかなように雪密度、砂の初期温度に拘らず雪面から $1.5\sim 2.0\text{cm}$ 付近までは熱砂投入後数秒以内に融解が生じ、その後時間の経過と共に徐々に融解が進行している。また、図-3は雪密度 $0.53\text{g/cm}^3$ 、砂層厚 $5\text{mm}$ 、熱砂温度 $500^\circ\text{C}$ の融解実験の雪面上 $0.5\text{cm}$ の砂層中の温度変化を示している。熱砂の初期温度が $500^\circ\text{C}$ にも拘らず、砂投入後の砂温度の最大値は約 $100^\circ\text{C}$ までしか上昇していない。この傾向は熱砂の初期温度、砂層厚に関係なくほぼ全てのケースについて見られた。この現象をより詳細に検討するため以下に示す実験により、熱砂中の温度分布について検討を行った。実験容器内に雪試料を詰め雪面上部のほぼ中央に直径 $10\text{cm}$ 、深さ $12.7\text{cm}$ のモールドをおき、この中に $200, 300, 400^\circ\text{C}$ の熱砂を投入しモールド内の温度分布を熱電対で測定した。図-4は時間間隔を $20$ 秒とした時の $200^\circ\text{C}$ の熱砂の温度分布を表している。熱砂投入直後 $1\text{cm}$ の熱電対はすぐに約 $60^\circ\text{C}$ に低下し、その後もこの温度を維持し続ける。これより上面の砂層の温度分布は投入直前の初期温度とほぼ同じであった。この実験の終了時の融解深さは $4.5\text{cm}$ であり、融解の進行と共に砂層も低下していくと考えると約 $60^\circ\text{C}$ の温度を維持し続ける不易層の厚さはおよそ $5.5\text{cm}$ であると推定される。図-5は熱砂の投入温度をパラメータとし、各ケース各々3回実験を行ったときの砂層中の $100$ 秒後の温度分布を表している。先に述べた $200^\circ\text{C}$ の不易層温度が約 $60^\circ\text{C}$ であるのに比べ高温時の $300, 400^\circ\text{C}$ の熱砂を投入した場合不易層温度は $100^\circ\text{C}$ に上昇している。この不易層の生成の要因は熱砂投入直後の融水の一部が飽和水として砂層中に残ったためと考えられる。その不易層の厚さは砂層の温度分布及び最終融解深さから考えると約 $4\sim 6\text{cm}$ に達すると思われる。

3. 考察

(1) 積雪との熱交換率

ガス噴射法による実験で熱量が融雪に消費された量は、ガス噴射温度が $800^\circ\text{C}$ 付近の高温実験では $22\sim 48\text{kJ/sec}$ であり、 $500^\circ\text{C}$ 付近の低温実験では $9\sim 13\text{kJ/sec}$ 程度であった。一般にプロパンガスが持っている熱量は $100\text{MJ/m}^3 = 160\text{MJ/kg}$ と言われており、本実験で用いたプロパンガス用ガスバーナーのガス消費量はバルブ開度を全開とした時、 $9.6\text{kg/hr/本}$ であり、実験ではガスバーナー4本を使用しているため最大ガス熱量は $7\text{MJ/sec}$ となる。本実験のバルブ開度は高

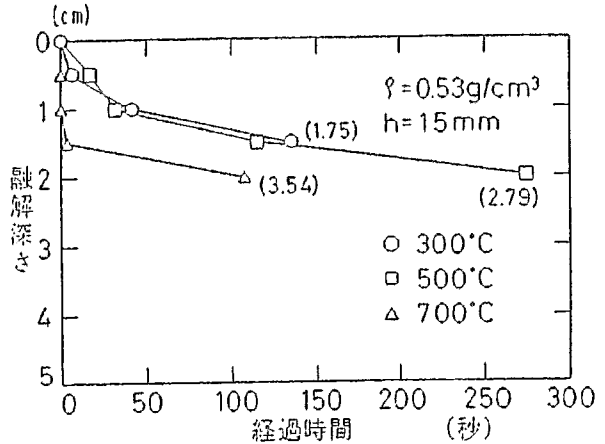


図-2 雪の融解深さの時間変化

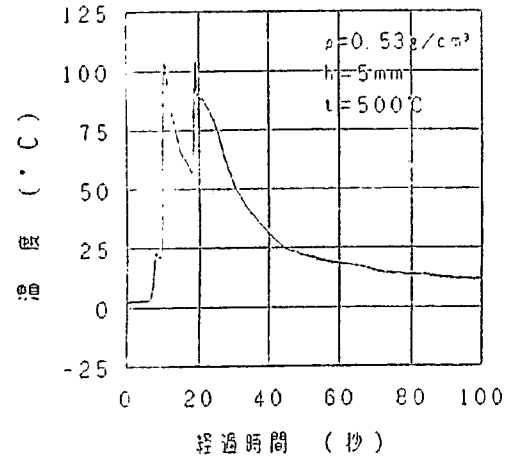


図-3 砂層の温度変化

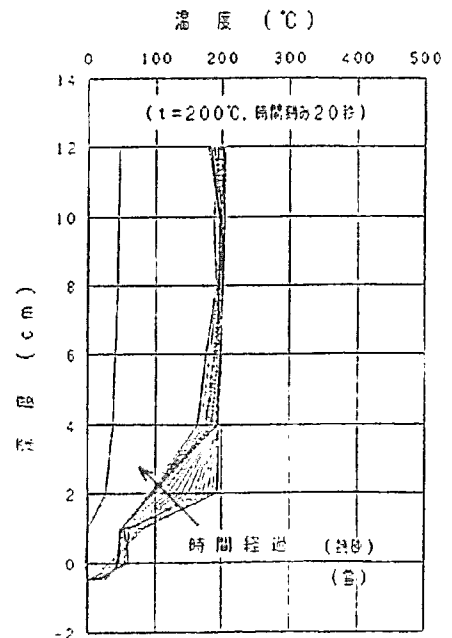


図-4 温度分布の時間変化

温実験では約80%、低温実験では約50%と推定され使用熱量は各々1.340KJ/sec、840KJ/secとなり、全熱量に対する雪の融解に使われた熱交換率は低温実験で0.3~0.4%、高温実験では1~2%になる。一方、熱砂の実験において予備実験で得られた砂の比熱 0.76J/g/Kを用いて、低温(300℃)、中温(500℃)、高温(700℃)の各実験ケースでの砂の熱量は各々435、587、739J/gとなる。熱砂実験による融雪量の実測値から融解に使われた熱量は低温、中温、高温実験で各々290~370J/g、530~560J/g、380~610J/gとなり、融雪に用いられた熱量は全熱量の35~74%程度であった。以上の結果より、融雪に使われる熱交換率はガス噴射法よりも熱砂法の場合が10倍以上となる。

## (2) 積雪の融雪特性

自然積雪では春先の気温の上昇と共に雪面融雪が生じるが表面融雪量は最大でも5mm/hr程度であり、積雪内の浸透の仕方は融水が水の粒を皮膜状に包みながらゆっくり流下するいわゆる皮膜流下が大部分を占め、その流下速度は一般に0.5~2.0cm/min程度と言われている。一方、本実験のように大量の融水が積雪内を流下する場合、融水が積雪内の空隙をうめながらひとかたまりになって積雪内を流

下する水路流下が生じ、その流下速度はざらめ雪で2~3cm/secと言われている。本実験の予備実験から得られた雪の透水係数のオーダーは $10^6$ cm/secと極めて大きくガスもしくは熱砂で融解されると融水はすぐ真下に浸透していく。このことは実験時に5cm毎に雪試料を染料で着色した浸透水の観測から同様の結論が得られている。また、ガス噴射実験で雪試料を全て融解させた場合、雪が全部融解する前に融けた水が底部に溜り、雪は融水中に浮かんでしまう。以上の事から、斜面上の積雪では泥流の発生源となる融雪水は融解後直ちに地表面に到達し、地表面付近のせん断強度を低下させ、雪が全部融ける前に滑り出し、その後積雪の落下エネルギーが増大すると共に雪と土壌が入り交じって泥流になることが推定される。

熱砂法による融解実験から雪面下2cm程度までは砂散布後直ちに融解し、雪面上約4~6cmの範囲に融解水の一部が浸透し、60~100℃の含水を有する不易層を形成する。これより上部の砂層の温度は散布直前の初期砂の温度とほぼ等しい。このことより、雪面下2cm程度の積雪層は熱砂散布後直ちに融解を始め、その後雪の融解は砂層中に形成された60~100℃の様な不易層を介して砂層上部から供給される熱により熱伝導の形で徐々に融解を進行する。

## 4. あとがき

本研究は火砕泥流発生場に関する研究の中でも火砕流を伴う高温時における積雪融解機構について室内実験により人工的に火砕流を作り出し、そのメカニズムを明らかにした。今後は上記で得られた結果をもとに斜面積雪時における火砕流による泥流発生機構についても調べる予定である。

## 参 考 文 献

1) 若浜五郎: 積雪内における融雪水の移動Ⅲ、低温科学(物理篇)、第26輯、PP.77-85.、1968.

キーワード: 火砕流、泥流、融雪、浸透

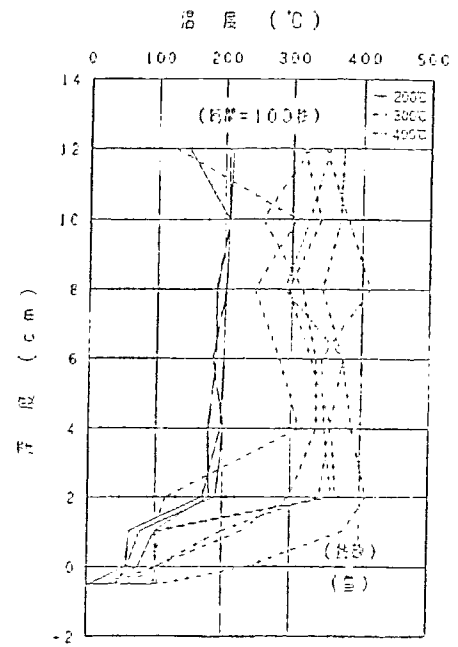


図-5 砂層の温度分布(100秒後)