

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

積雪表面への弾丸衝突に誘発される全層・表層雪崩の発生条件

研究代表者氏名 西森 拓¹⁾
研究分担者氏名 市原 美恵²⁾ 池田 航²⁾ 新屋 啓文³⁾

1) 広島大学 2) 東京大学 3) 新潟大学

研究要旨

本研究では、地震や噴石などに起因する雪崩災害、スキーやスノーボードなどによる雪崩事故の発生予測に資することを目的とし、物体衝突が誘発する積雪層の崩壊メカニズムに関する低温室実験を実施した。実験では、粒径 0.5-1, 1-2 mm に分級した雪をアクリル容器に積層させ、これを任意の傾斜角を再現できる実験台に設置した。その結果、積雪荷重による崩壊は発生せず、傾斜角 82° でも積雪層は安定化していた。そして、傾斜した積雪表面の中央にエアガンで BB 弾を衝突させたが、クレーターが形成されるのみで、積雪崩壊は弾丸衝突によって誘発されなかった。積雪安定度の計算から、高さ数 cm の積雪荷重では崩壊が発生しないと見積もられ、エアガンの撃力も不十分であったと考えられる。

A. 研究目的

日本海側の積雪山間地では、急斜面上に多量の積雪が局所的短時間の降雪や風による雪の再配分などで形成されるため、急変する気象条件に伴い雪崩の危険性が高まる。日本の雪崩分類は、雪崩の発生形（点・面）とすべり面の位置（表層・全層）、雪質（乾・湿）の三要素に基づいている。気温が氷点下を下回る厳冬期では、乾雪表層雪崩が発生し、気温が 0℃ を超える融雪期では、湿雪全層雪崩が見られる。

雪崩の発生は弱層でのせん断破壊によって始まるため、その実用的な危険度評価として積雪の安定度 (SI [-]) が用いられてきた。SI は、積雪密度から推定される積雪せん断強度 (SFI [N m^{-2}]) と弱層上のせん断応力 (τ [N m^{-2}]) から計算される。さらに、せん断応力は、単位水平面積当たりの積雪荷重 (W [N m^{-2}]) と斜面傾斜角 (θ [deg]) により書き換えられる。

$$SI = SFI/\tau = SFI/(W \sin \theta \cos \theta).$$

積雪荷重により自然発生する雪崩の危険度予測は、上記の積雪安定度と積雪変質モデルを組み合わせて行われている。一方、地震や火山噴火の噴石など複合災害として生じる雪崩やスキー等の雪崩事故の発生メカニズムは定性的な理解に留

まっている。そこで、本研究では、物体衝突が誘発する積雪層の崩壊メカニズムを解明し、雪崩発生予測に資することを目的とする。

B. 研究方法

雪崩が発生しやすいと経験的に知られているスラブ（雪の焼結作用により結合した積雪）として、ストームスラブやウィンドスラブ、持続型スラブなどが存在する。これらスラブの一部を実験室で模擬するため、低温室に保管されている天然雪を使用した。また、予備実験に基づき実験系の構築が行われた。実験方法の詳細を以下に記す。

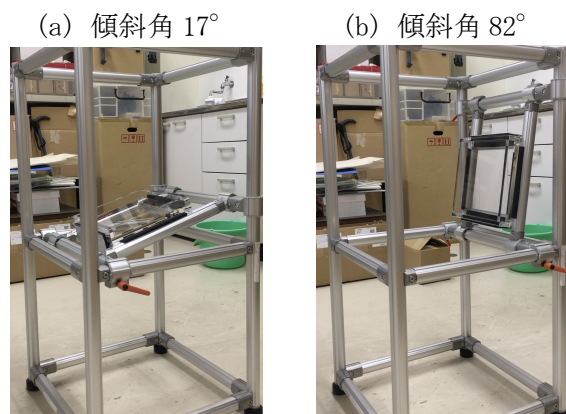


図 1 手動可動式の実験台

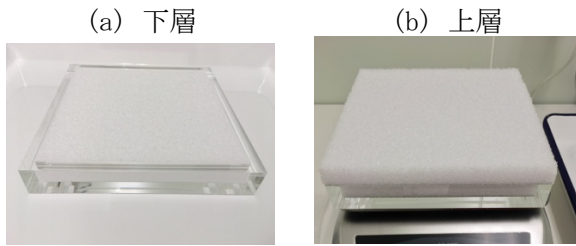


図 2 アクリル容器に積層させた雪

天然雪は、篩を用いて 0.5 mm 以下と 0.5-1 mm, 1-2 mm の三種類に分級され、それぞれ雪 S, M, L と以降で記述する。積雪表面への物体衝突として、エアハンドガン（東京マルイ M92F）と BB 弾（直径 6 mm, 質量 0.12 g）を用いた。弾丸の初速は 30 m/s 程となる。また、任意の傾斜角を再現できるように、アルミフレーム部材とスライダーなどを組み合わせた可動式の実験台を設計・構築した（図 1）。この実験台では、傾斜角を 17~82° の範囲で変化させることが可能である。

実験は-10℃の低温室で行われ、その手順は次のとおりである。20 cm 四方・高さ 3 cm・厚さ 1 cm のアクリル容器の質量を計測し、アクリル容器に雪を敷き詰めて積雪表面を定規で平らに均す（図 2(a)）。積雪の見かけ体積は、18×18×2 cm³ となる。アクリル容器と雪の質量を計測し、アクリル容器の質量を引くことで積雪の質量を求める。見かけ体積と雪の密度（0.91 g cm³）を用いて、積雪の密度と充填率を計算する。次に、高さ 5 cm のアクリル枠を用いて、積雪の上部に新たに高さ 2 cm の雪を敷き詰め、定規で平らに均す（図 2(b)）。これらの質量を測定することで、前述と同様に上部積雪の密度と充填率を求める。ただし、積雪の見かけ体積が、20×20×2 cm³ となることに留意する。

雪を積層させたアクリル容器を実験台に設置し、傾斜角を初期の 17° から緩やかに傾けていく（約 1 分間で最大傾斜 82° に到達）。積雪荷重により崩落した場合、その角度を記録する。一方、崩落しなかった場合、積雪表面の中央にエアガンで弾丸を垂直に衝突させる。

C. 研究結果

雪を三種類に篩い分けしたが、粒径 0.5 mm 以下の雪 S はほとんど確保できなかった。そこで、粒径 0.5-1 mm の雪 M と粒径 1-2 mm の雪 L を、下

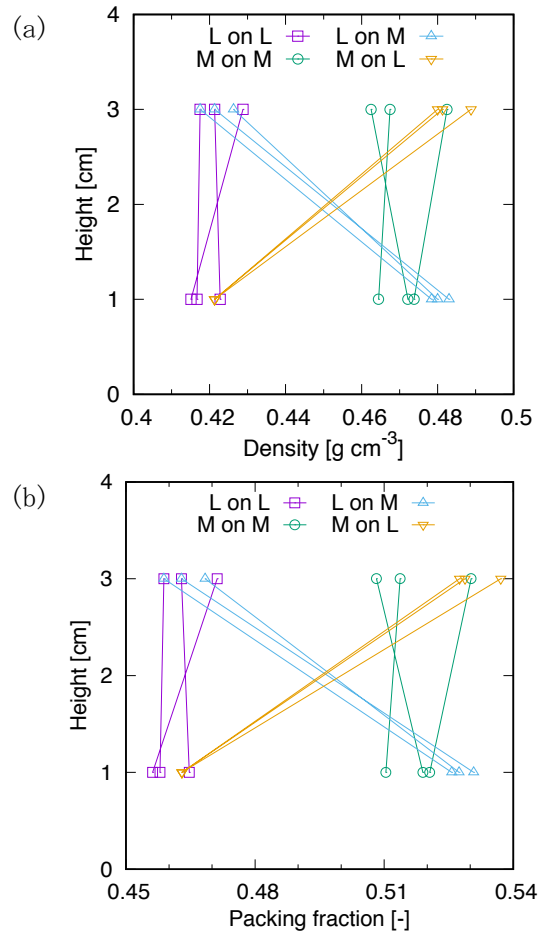


図 3 積雪の密度と充填率の高さ分布
(M : 粒径 0.5-1 mm, L : 粒径 1-2 mm)

層と上層の積雪に用いた。図 3 は、積層させた積雪の密度と充填率を示している。雪の組み合わせは四種類あり、下層に雪 M, 上層に雪 L を用いた場合は「L on M」と表記される。雪の組み合わせ毎に 3 回の実験を実施した。

篩い分けした雪の特徴は、次のとおりであった。雪 M は密度 0.46-0.49 g cm³ と充填率 0.5-0.54 の範囲を示すのに対し、雪 L は密度 0.41-0.43 g cm³ と充填率 0.45-0.47 の範囲となった。つまり、雪粒子が細かいほど、密に詰まっていることを意味している。今回使用した天然雪は 2019 年 3 月に採取されたため、その大部分がざらめ化していた。従って、図 3 に示される積雪密度と充填率の粒径依存性は、丸みを帯びた雪の影響であると考えられる。

図 3 の構造を示す積雪を実験台に置き傾斜させたが、全ての実験において、積雪は荷重により崩壊しなかった。そこで、最大傾斜角 82° で固定した積雪表面に弾丸を衝突させた。しかしながら、

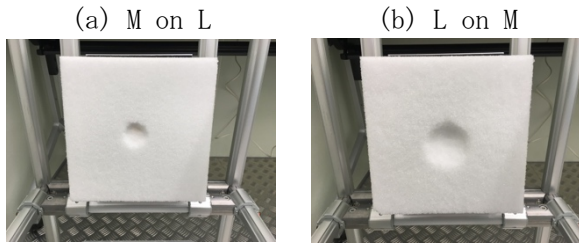


図 4 弾丸衝突によるクレーター形成

弾丸衝突による積雪の崩壊は発生せず、積雪に穴（クレーター）が形成されるに留まった（図 4）。

積雪表面に形成されたクレーターについて、ノギスを用いて深さと幅（傾斜方向に対して直交）を測定した。図 5 は、弾丸衝突により形成されたクレーターの深さと幅の散布図であり、いずれの実験においても弾丸は積雪底面に到達していなかった（積雪深 4 cm）。クレーターの形状に関して、上部積雪が雪 M の場合は幅 3.5 cm・深さ 2.2 cm 程であるのに対し、雪 L の場合は幅 5.3 cm・深さ 2.65 cm 程であった。つまり、雪粒径が小さいほど、小さなクレーターが形成された。

D. 考察

本実験では、弾丸衝突により積雪層の崩壊を誘発することができなかった。その原因について幾つかの考察を行う。今回、 -10°C の室温で雪を積層させ即座に傾斜を開始したが、この時点で雪の焼結作用が十分に働いていた。そのため、高さ 2 cm の上部積雪層の荷重は、積雪のせん断強度を破壊するのに十分でなかったと考えられる。以下、積雪安定度 SI に基づいて積雪のせん断破壊に必要な荷重を推定した。

積雪密度 $0.4\text{--}0.5\text{ g cm}^3$ から推定される積雪せん断強度は、 $10^4\text{--}10^5\text{ N m}^{-2}$ のオーダーである。ここで、積雪安定度が傾斜角 82° で $\text{SI} = 1$ を満たすためには、単位水平面積当たりの積雪荷重が $W = 1400\text{--}14000\text{ N m}^{-2}$ となる。本実験における上部積雪の質量は 20 cm 四方で 320–380 g であり、 $W = 80\text{--}95\text{ N m}^{-2}$ となる。従って、積雪荷重での崩落は起こり得ず、不足分を弾丸衝突で補う必要があったと言える。

今後の方針として、積層させる積雪の高さを上げ、積雪荷重を増やした実験を行うべきである。そして、低温室に保管した雪は丸みを帯びたざらめ雪となるため、降雪装置等を用いた樹枝状の雪

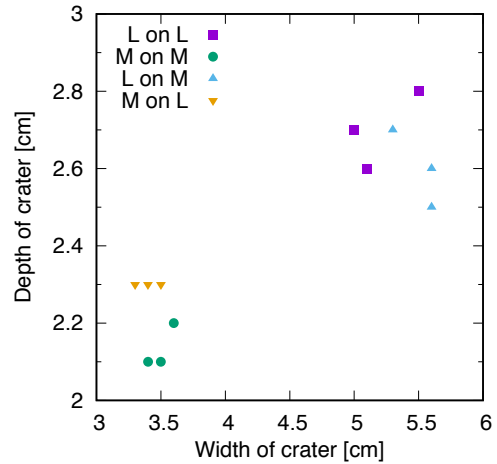


図 5 衝突クレーターの深さと幅の関係

（新雪に近い）や表面霜など人工的に弱層を導入する必要がある。その他、物体衝突の撃力を増加させるなどで、積雪層の崩壊を誘発することが考えられる。

E. 結論

本研究では、物体衝突が誘発する積雪層の崩壊メカニズムを解明するため、傾斜した積雪層の表面に弾丸を衝突させる低温室実験を実施した。その結果、高さ 2 cm の積雪は、雪の焼結作用のため、傾斜角 82° においても荷重によって崩壊しなかった。これは積雪安定度に基づく考察と整合的であった。また、雪面の中央に弾丸を衝突させたとしても、クレーターが形成されるのみで、積雪の崩壊は誘発されなかった。そのため、物体衝突により積雪を崩壊させるためには、積雪量の増加や弱層となる雪質の使用など実験系の改善が必要であると考えられる。

F. 研究発表

無し

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

無し