

# 積雪底面におけるせん断強度への積雪性状の影響

佐藤 亮太\* 高橋 大介\* 河島 克久\*\* 松元 高峰\*\*

Effect of Snow Properties on Shear Strength at the Base of Snowpack

Ryota SATO Daisuke TAKAHASHI Katsuhisa KAWASHIMA Takane MATSUMOTO

In this study, we investigated the effect of snow properties on the shear strength at the base of snowpack. The measurements of the shear strengths in the field showed that they ranged from 0.3 to 3.8 kN/m<sup>2</sup> with an average value of 1.5 kN/m<sup>2</sup>. Despite the variation, it was confirmed that shear strength was positively correlated with dry snow density and snow hardness, and negatively correlated with liquid water content. In addition, in order to understand the shear strength of snowpack under rainfall or rapid melting of snow, we measured that of snowpack sprayed with water.

キーワード：せん断強度，積雪性状，全層雪崩

## 1. はじめに

鉄道の沿線斜面では雪崩が発生する場合がある。そのため、多雪地域に営業線区がある鉄道会社では、雪崩による脱線などの重大な運行障害が生じる可能性がある。このような運行障害を未然に防ぐ目的で、鉄道会社は線区ごとに定められた気温や降水量などを指標とした巡回警備を実施している。しかし、巡回警備の出動基準は経験則に基づいており、雪崩の発生危険度が小さい時期や箇所まで実施されている場合もあるため、多大な労力を要することがある。そこで、客観的指標に基づいた雪崩危険度の評価手法が確立できれば、雪崩の危険性が高くなる時期や箇所を適切に評価可能となり、効果的かつ効率的な巡回警備を実施することが期待できる。

雪崩は、積雪層内をすべり面とする表層雪崩と（図1左）、積雪底面をすべり面とする全層雪崩（図1右、図2）に分類できる。いずれも、滑動しようとする力（駆動力）がそれを妨げようとする力（支持力）を上回ったとき（積雪が不安定化したとき）に発生するものである<sup>1)</sup>。表層雪崩の場合には、積雪層の間（弱層）における駆動力と支持力との関係で、全層雪崩の場合には、積雪底面と地表面との関係で積雪の安定度が評価できる。駆動力の増加には、積雪期に降雪や、急激な気温上昇に伴う降雨が生じた場合に積雪に水分が追加されることによる上乗荷重の増加が寄与する。一方、支持力の低下には、雨水や融雪水が積雪層内や積雪底面に浸透し、すべり面に水が介在することに伴うせん断強度の低下が寄与する。

表層雪崩においては、既往研究<sup>2)</sup>で積雪層内のせん断強度と密度や含水率といった積雪性状との関係性が報告

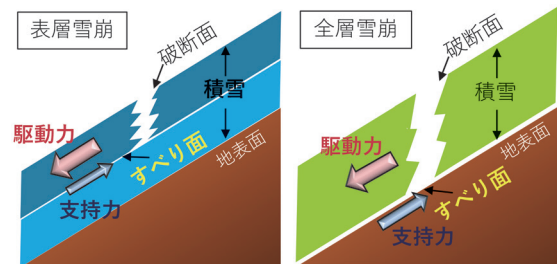


図1 表層雪崩（左）と全層雪崩（右）の概念図



図2 全層雪崩の発生例

されている。一方、全層雪崩において重要な積雪底面のせん断強度は、地表面の土質や微細な凹凸、植生の影響を受けることからその評価は難しい。そこで、本研究では全層雪崩に着目した。

積雪底面のせん断強度も、積雪層内のせん断強度と同様に、密度や含水率などの積雪性状の影響を受けると考えられる。既往研究では、上石<sup>3)</sup>や高橋<sup>4)</sup>が室内試験を実施し、含水率が高いほど積雪底面におけるせん断強度は低下する傾向があることを示している。しかしながら、屋外での観測結果はなく、また密度や硬度と

\* 防災技術研究部 気象防災研究室

\*\* 新潟大学 災害・復興科学研究所

いった他の積雪性状と積雪底面のせん断強度との関係は不明である。そこで、本研究では、積雪底面のせん断強度と積雪性状などとの関係を調べるために野外観測を実施した。さらに、春先の降雨や急激な気温上昇に伴う融雪水が積雪底面に到達したことを想定し、自然積雪に散水した場合の積雪底面のせん断強度の時間変化を調べた。

## 2. 測定方法

### 2.1 積雪性状および積雪底面のせん断強度の測定方法

塩沢雪害防止実験所（新潟県南魚沼市：図3）の平地および大型盛土（南北斜面および北西斜面，傾斜35°）において，2014，2016，2020，2022年冬期に計47回の積雪断面観測を行った。積雪断面観測では，積雪底面（地上高）2cmの位置における積雪性状として，密度，含水率，硬度をそれぞれ，100cc角型サンプラー，誘電式含水率計，デジタル荷重計を用いて測定した。

積雪底面と地面との境界部分のせん断力（kN）は，シアフレームとデジタル荷重計を用いて測定した。図4に示すように，地表面から10cm程度の積雪を残して雪

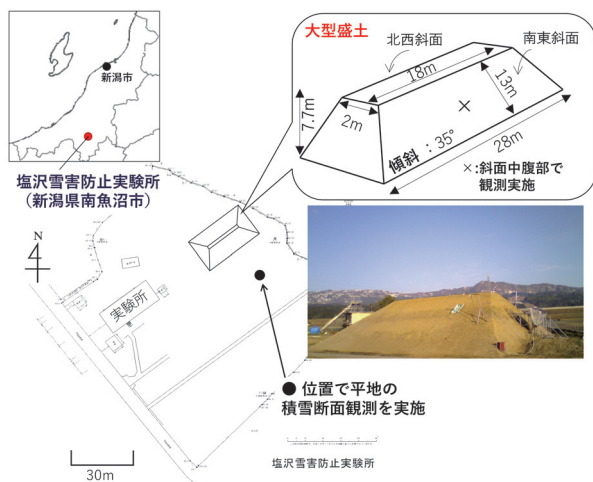


図3 塩沢雪害防止実験所構内図と観測場所

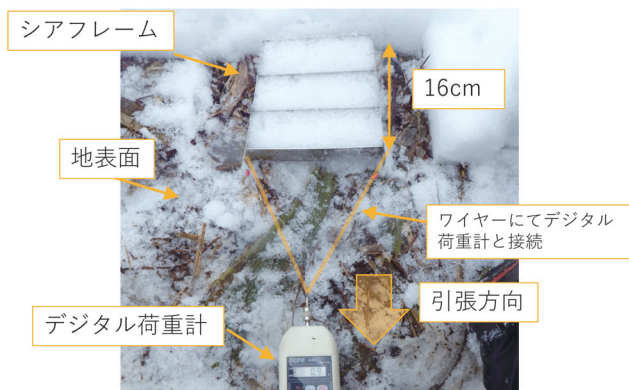


図4 野外におけるせん断強度測定の様相

を掘り，上からシアフレームを差し込む。周囲の雪を除去した上で，デジタル荷重計を引張り，地表面と積雪との境界部分を破断させる方法でせん断強度を測定した。なお，引張時間はおよそ1秒である。1回の断面観測につき測定を1～3回行い求めた平均値をシアフレームの有効断面積0.025m<sup>2</sup>で除した値を単位面積あたりのせん断強度（kN/m<sup>2</sup>）とした。なお，破断面の植生はいずれも裸地か草地であるが，測定後に破断面の大半がどちらであるか記録した（図5）。

### 2.2 散水試験の実施方法

塩沢雪害防止実験所の平地において，春先の降雨や急激な気温上昇に伴う融雪水が積雪底面に到達した場合を想定して，散水後の経過時間によるせん断強度の変化に着目した試験を行った（図6）。

以下に試験手順を示す。

- (1) 約150cm×170cmの面積で積雪底部の積雪を約10cm残し，シアフレームをセットできる状況にする。
- (2) 散水前のせん断強度，密度，含水率，硬度を測定する。
- (3) じょうろを使い，掘り出した範囲の積雪になるべく均等になるように約8Lの水道水（約3℃）を3分程度で散水する。散水量は単位面積当たりに換算すると3.1mmであり，降水強度としては62.6mm/hに相当する。



図5 裸地および草地の例  
(左：裸地，右：草地)

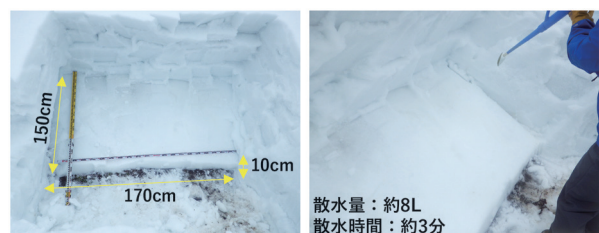


図6 散水状況

- (4) 散水から、30分後、1時間後、3時間後、5時間後にせん断力、密度、含水率、硬度の測定を行う。なお、せん断強度の測定は各経過時間において2~4回行い、その平均値を求めた。

### 3. 測定結果と考察

#### 3.1 野外における積雪底面のせん断強度の測定結果

4冬期の積雪状況（平地）およびせん断強度の測定日を図7に示す。4冬期の積雪状況を見ると、2016年冬期は積雪期間が他の冬期と比べるとやや短く最深積雪深もやや小さかったものの、4冬期とも概ね平年並みの積雪状況であった。せん断強度の測定は厳冬期から融雪期にかけて概ね10~30日間隔で実施した（図中の点線で示した日）。なお、測定時の積雪底面の雪質はすべての測定でざらめ雪（水を含んで粗大化した丸い氷の粒や、水を含んだ雪が再凍結した大きな丸い粒が連なったもの<sup>5)</sup>であった。

図8に平地、南東斜面、北西斜面におけるせん断強度の各冬期の測定結果を示す。その結果、箇所ごとのせん断強度に明瞭な時間変化傾向はなく、ばらつきながら推移することがわかった。一方、平地と斜面とで測定結果

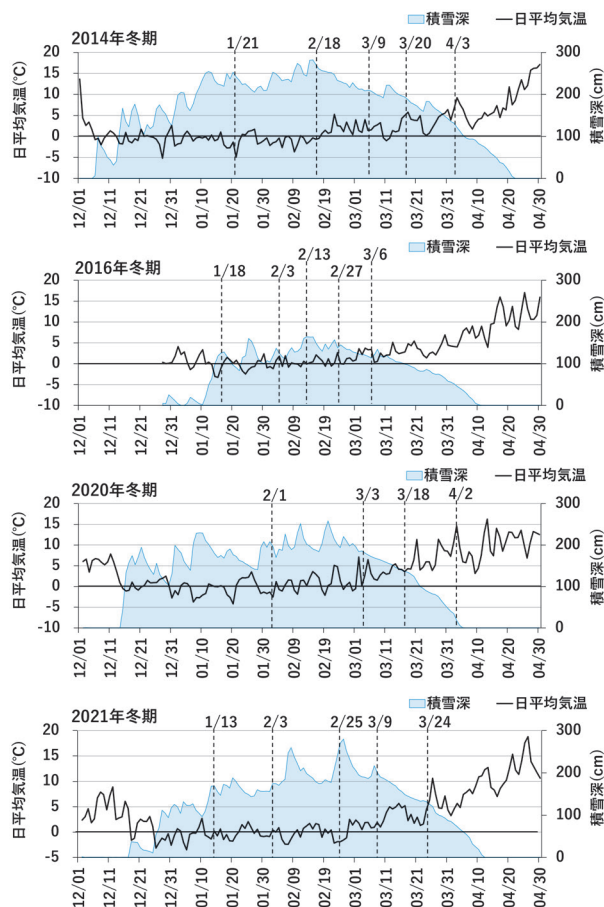


図7 各冬期の積雪状況とせん断強度測定実施日

を比較すると、平地は2.0kN/m<sup>2</sup>程度で推移することが多いのに対し、南東斜面では1.0kN/m<sup>2</sup>程度で推移することが多く、平地よりも値が小さかった。北西斜面では、平地と南東斜面の中間の値であった（1.5kN/m<sup>2</sup>）。したがって、同時期の平地と斜面におけるせん断強度を比較すると、平地の方が大きい傾向にあることがわかった。

せん断強度の測定値（計47回測定）は0.3~3.8kN/m<sup>2</sup>の範囲であり、平均値は1.5kN/m<sup>2</sup>であった（図9）。また、測定値を0.5kN/m<sup>2</sup>毎に階級分けしてみると、出現度数が最も多かったのは、0.5~1.0kN/m<sup>2</sup>および1.5~2.0kN/m<sup>2</sup>であり、次いで1.0~1.5kN/m<sup>2</sup>であった。したがって、今回の測定結果では多くが0.5~2.0kN/m<sup>2</sup>の

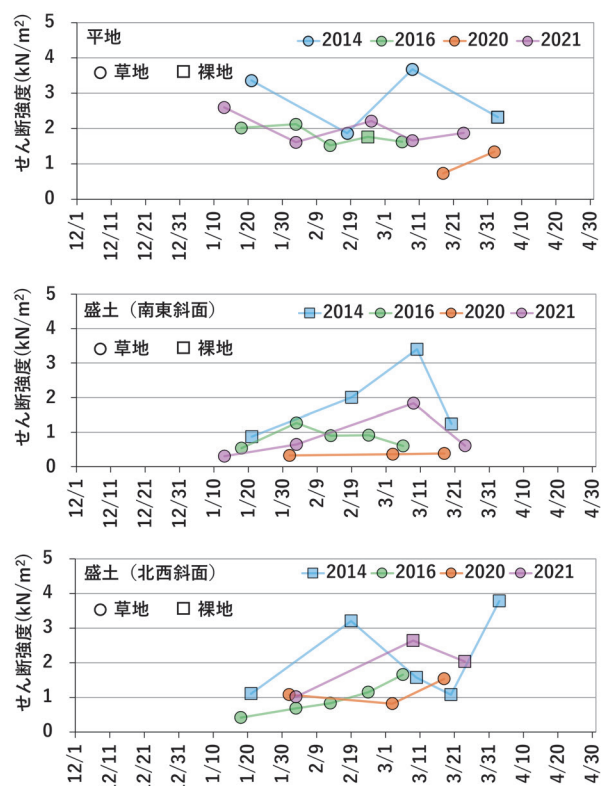


図8 観測位置毎のせん断強度の測定結果

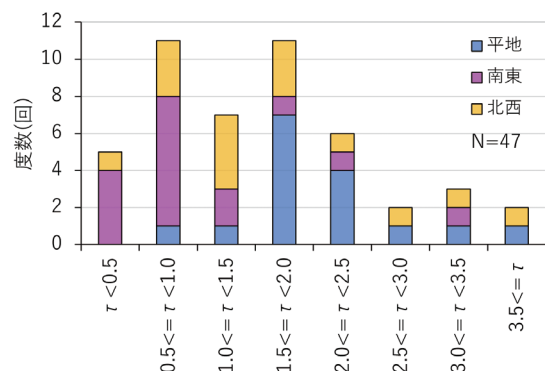


図9 せん断強度の測定結果のヒストグラム  
( $\tau$ :せん断強度, 0.5kN/m<sup>2</sup>毎の階級分け)

圈内であり、上石ら<sup>3)</sup>や高橋ら<sup>4)</sup>の室内試験の値と同程度であった。また、今回の測定は積雪底面と地面との境界部におけるせん断強度であるので単純に比較することはできないが、前野ら<sup>6)</sup>の表層雪崩が起きた際の積雪層内のすべり面におけるせん断強度の測定結果 (0.1kN/m<sup>2</sup>

～10kN/m<sup>2</sup> (平均 1.0kN/m<sup>2</sup>)と同程度のオーダーだった。

次に、測定場所毎に整理したせん断強度と乾き密度、含水率、硬度との関係を示す (図 10)。

せん断強度と乾き密度との関係について見てみると、測定位置によらず正の相関関係が確認できる (平地：0.43、南東斜面：0.60、北西斜面：0.50)。相関係数を比べると平地よりも斜面の方が相関は強いことがわかる。また、南東斜面および北西斜面では、せん断強度が1kN/m<sup>2</sup>以下の場合には乾き密度も特に低いことがなかった。

次に、せん断強度と含水率との関係について見てみると、平地および南東斜面では相関係数は小さいものの、負の相関が確認でき (平地：-0.38、南東斜面：-0.41)、せん断強度が小さいほど、含水率は大きい傾向にあった。北西斜面においては、測定値全体での相関はほとんどないが、せん断強度が3.0kN/m<sup>2</sup>以下に着目するとせん断強度が高いほど含水率が小さい傾向が確認できる。しかし、含水率が10%程度と高い値であるにも関わらず、せん断強度も3.0kN/m<sup>2</sup>以上と高い値である場合もあった。なお、南東斜面でも同様の値があるが、1データのみであることに加えて、せん断強度2.0kN/m<sup>2</sup>以下のときのばらつきが比較的小さいため全データに対する影響が小さいものと考えられる。3.0kN/m<sup>2</sup>より大きい場合はデータ数が少ないため、今後も測定データを蓄積し、含水率の影響を定量的に評価する必要がある。

せん断強度と硬度との関係について見てみると、平地では相関係数が0.06であり、両者に相関関係は確認できなかった。しかしながら、南東斜面および北西斜面では相関係数は小さいながらも正の相関が確認できた (南東斜面：0.40、北西斜面：0.36)。また、せん断強度が2.0kN/m<sup>2</sup>以下で硬度が80kN/m<sup>2</sup>以上の領域は回帰直線から大きく外れた領域であるが、測定データを蓄積の上、地面の状況などとの比較などさらなる検証が必要であると考えられる。

以上の結果を整理すると、ばらつきはあるものの、乾き密度、硬度が高いほどせん断強度は高くなる傾向にあること、含水率が高いほどせん断強度は低くなる傾向にあることがわかった。

地面の植生状態によるせん断強度の差異を確認するため、図8のせん断強度のヒストグラムを裸地と草地とに分類して整理した (図11)。その結果、物性値に依らずせん断強度が1.0kN/m<sup>2</sup>未満となったのは1事例を除いてすべて草地における測定結果であり、せん断強度は草地の方が小さい階級の出現頻度が高い結果であった。これは、草の種類によるが、今回測定したようなある程度背があり柔らかい種類の場合 (図5)、積雪に草が巻き込まれることがなく積雪と地表面との間に介在することとなる。このような場合には、草本が積雪の滑りを助長

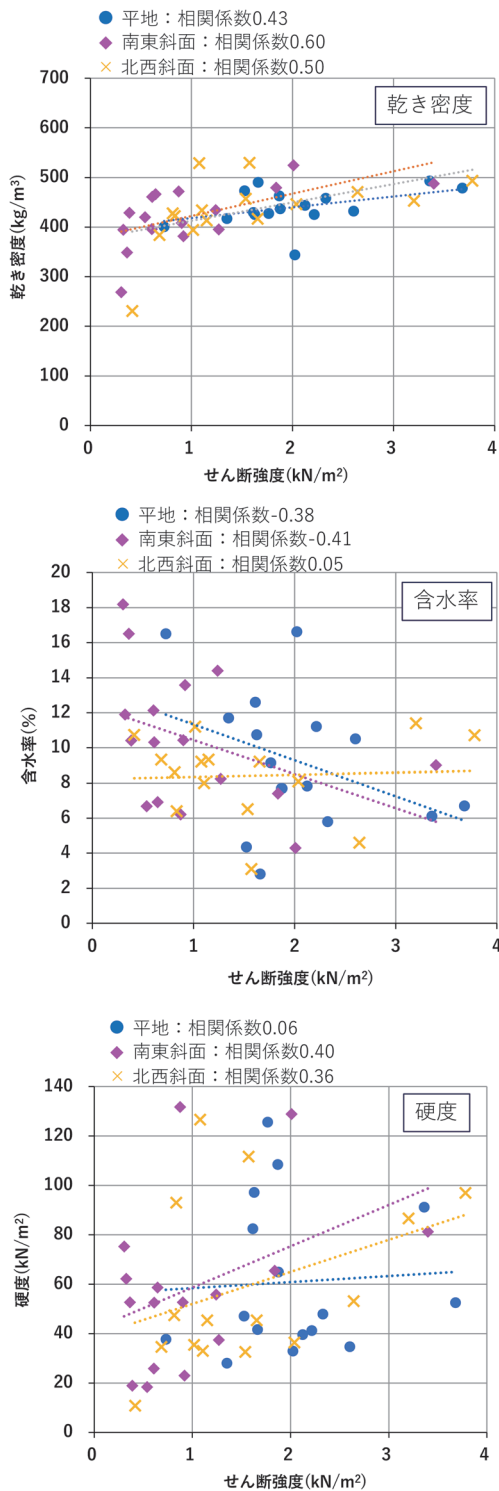


図 10 測定位置毎のせん断強度と乾き密度、含水率、硬度との関係

(上：乾き密度、中：含水率、下：硬度)

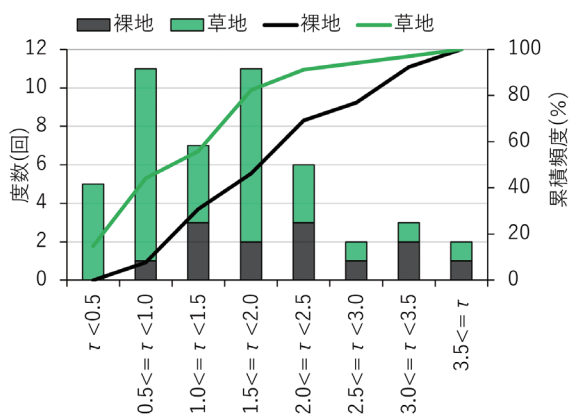


図 11 草地と裸地におけるせん断強度のヒストグラム ( $\tau$  : せん断強度,  $0.5\text{kN/m}^2$  毎の階級分け)

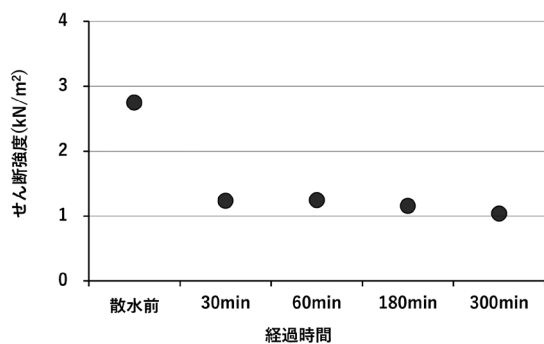


図 12 散水試験におけるせん断強度測定結果

することとなり、せん断強度が小さい傾向となったものと考えられる。

### 3.2 散水試験の測定結果

図 12 に散水後のせん断強度の時間変化、図 13 に散水後の積雪の乾き密度、含水率、硬度の時間変化を示す。散水前のせん断強度の測定値は  $2.8\text{kN/m}^2$  であり、乾き密度、含水率、硬度はそれぞれ、 $442\text{kg/m}^3$ 、 $13.5\%$ 、 $93.4\text{kN/m}^2$  であった。これに対し、散水 30 分後にはせん断強度は約 60% 低下し、その後は概ね一定の値であった。また、硬度は、せん断強度と同様に散水後に約 30% 低下し、その後は若干のばらつきはあるものの、同程度の値で推移した。乾き密度と含水率は、多少の変化はあるものの、散水直後からほぼ一定の値で推移した。

和泉<sup>7)</sup>によれば、濡れ雪を水浸させることで雪組織変化が起こり積雪の硬度は急激に低下する。これは、浸透した水が氷粒子同士の焼結部の結合を弱めるためと考えられる。散水後の硬度が減少したのもこの影響によるものと考えられる。野外観測におけるせん断強度測定の結果、せん断強度と硬度との間には、ばらつきがあるものの、正の相関関係が確認された。したがって、散水により硬度が低下したことが、積雪底面のせん断強度が低下

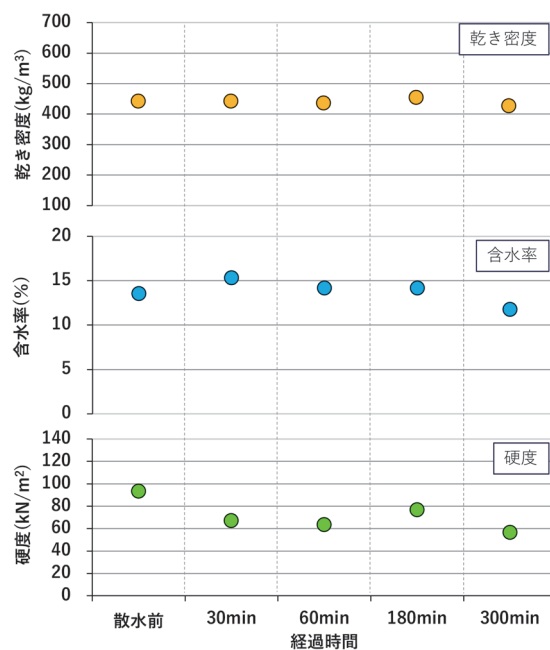


図 13 散水試験における乾き密度、含水率、硬度の測定結果

した要因の 1 つであると考えられる。また、通常は積雪に散水することで含水率は上昇することが想定されるが、今回は急速に散水したことにより、積雪が保持できる水の量を上回り、積雪層内の排水が迅速に起こったことが含水率の変化が小さい要因として考えられる。この結果、乾き密度もほぼ一定となったが、積雪底面と地表面との間に水が介在し、これがせん断強度低下の一因となっている可能性も考えられる。

以上の結果より、急激な降雨や融雪による水の浸透が積雪底面のせん断強度に与える影響が大きい可能性があることがわかった。このような水の浸透の履歴の有無が、野外観測における測定値のばらつきにも影響している可能性も考えられる。今後は、降雨や融雪量の履歴もせん断強度の評価指標として有効かどうかの検証を行うと同時に、地表面の透水係数などの条件を変化させた測定データを蓄積することで現象の理解が進むことが期待される。

## 4. まとめと今後の課題

本研究では全層雪崩の発生危険度評価に重要である積雪底面におけるせん断強度と積雪性状との関係について、野外観測（平地と盛土における裸地と草地）および野外における散水試験の結果を整理した。その結果、以下のことがわかった。

- ・積雪底面のせん断強度の測定値の範囲は  $0.3 \sim 3.8\text{kN/m}^2$  であった。平地、南東斜面、北西斜面における平均値は、

それぞれ、 $2.0\text{kN/m}^2$ 、 $1.0\text{kN/m}^2$ 、 $1.5\text{kN/m}^2$ であった。

- ・せん断強度の時間変化は明瞭ではなく、一冬期を通じてばらつきながら推移することがわかった。
- ・平地と斜面の同時期におけるせん断強度を比較すると、平地よりも斜面の方が小さい傾向にあった。
- ・せん断強度と乾き密度にはいずれの測定箇所においても正の相関が確認できた。
- ・せん断強度と含水率には、平地および南東斜面において、相関係数は小さいが、負の相関が確認できた。ただし、北西斜面においては、高含水率にも関わらず高いせん断強度であった事例の影響もあり、その関係が確認できなかった。
- ・せん断強度と硬度には、平地においては相関関係が確認できなかった。一方、斜面においては、相関係数は小さいが、正の相関が確認できた。
- ・草地と裸地で分けてせん断強度の測定値を整理すると、せん断強度が $1.0\text{kN/m}^2$ 以下の測定値は、1事例を除き草地における結果だった。
- ・散水試験の結果、急激な降雨や融雪の直後は、硬度が低下し、この影響を受けて積雪底面のせん断強度も低下する可能性があることがわかった。

今回の整理ではせん断強度測定時の積雪性状との関係に着目したが、積雪してからの上載荷重の変化や雪粒子の大きさ（粒径）などもせん断強度の変化に影響を与える可能性があると考えられる。これらの要素のせん断強度への影響、さらに、地面の条件（例えば植生の種類）

をより精緻に分類した測定・分析を実施する計画である。

本論文は、第38回寒地技術シンポジウムで発表された論文<sup>8)</sup>をもとに再構成している。

## 文 献

- 1) Tremper, B.,: Wet snow, Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, Seattle, WA, USA, pp.143-147, 2008.
- 2) 山野井克己, 遠藤八十一: 積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性, 雪氷, Vol.64, No.4, pp.443-451, 2002
- 3) 上石勲, 町田敬, 山口悟, 平島寛行, 佐藤篤史, 大宮哲: 法面雪崩の発生状況と予測のためのせん断剥離強度の測定結果, 2007年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 76, 2007
- 4) 高橋大介, 栗原靖, 飯倉茂弘, 宍戸真也, 鎌田慈: 積雪底面のせん断強度測定基礎試験, 2013年度雪氷学会全国大会講演稿集, 227, 2013
- 5) 日本雪氷学会: 積雪ガイドブック, 朝倉書店, 2010
- 6) 前野紀一, 福田正巳: 雪崩と吹雪, 基礎雪氷学講座Ⅲ, 古今書院, pp.13-81, 2000
- 7) 和泉薫: 濡れ雪の硬度Ⅲ: 浸水または日射による硬度減少, 低温科学, 物理篇, 44巻, pp.37-48, 1986
- 8) 佐藤亮太, 高橋大介, 河島克久, 松元高峰: 積雪底面におけるせん断強度と積雪性状との関係性, 第38回寒地技術シンポジウム報告・論文集, 2022