

せん断速度制御装置による雪のせん断強度と動摩擦係数の特性解明

研究代表者氏名 上之 和人¹⁾
研究分担者氏名 秋山 一弥¹⁾
研究分担者氏名 河島 克久²⁾

1) 国立研究開発法人 土木研究所 雪崩・地すべり研究センター 2) 新潟大学災害・復興科学研究所

研究要旨

改良したせん断速度制御装置を用いて、ほぐした乾いたこしまり雪またはしまり雪を対象に、せん断強度を密度のおよそ3乗で規格化した量の、垂直応力、せん断速度、焼結時間依存性を調べ、それぞれの寄与度を明らかにした。また同装置を用いて、ほぐした乾いたこしまり雪またはしまり雪の動摩擦係数の速度依存性を調べた。

A. 研究目的

雪のせん断強度は、積雪の安定度を評価する上で不可欠なものである。既往研究では乾き雪のせん断強度は密度のおよそ3乗に比例することが知られている。例えば、山野井と遠藤は、円筒型せん断試験器を用いて自然積雪のせん断強度を測定した結果、乾いた新雪、こしまり雪およびしまり雪について、次のせん断強度 τ と密度 ρ_{dry} の関係をj

$$\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 9.4 \times 10^{-4} \quad (1)$$

せん断強度の密度以外の影響を調べるために、昨年度は、低温室内の温度を制御し、雪温、粒径がほぼ一定のほぐした乾きしまり雪を対象に、せん断強度と垂直応力、せん断速度、焼結時間との関係を実験的に検討した。しかし、雪試料毎に密度を測定しなかったため、せん断強度の密度依存性を十分に考慮していなかった可能性がある。したがって本年度は、雪温、粒径がほぼ一定のほぐした乾いたこしまり雪としまり雪を対象に、雪試料毎にせん断強度と同時に密度も測定する。式(1)に従いせん断強度を密度の2.91乗で規格化した量の垂直応力、せん断速度、焼結時間依存性を調べ、それぞれの寄与度を明らかにする。

雪崩の運動シミュレーションによる雪崩の到達距離は雪の動摩擦係数の値に大きく依存する。改良したせん断速度制御装置を用いて、雪が雪の

上を異なる速度で移動したときの動摩擦係数の値の変化を明らかにする。

B. 研究方法

図1は改良したせん断強度測定装置とその模式図を示す。内径90mm、厚さ5mmの透明の亚克力ルパイプの中に、内径83mm、厚さ3mmの塩ビパイプを挿入している。下のせん断箱に貼り付

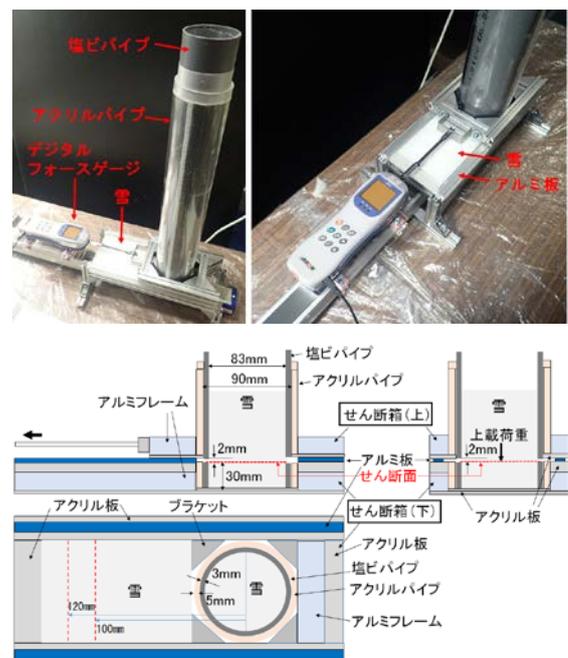


図1 せん断強度測定装置（上）とその模式図（下）

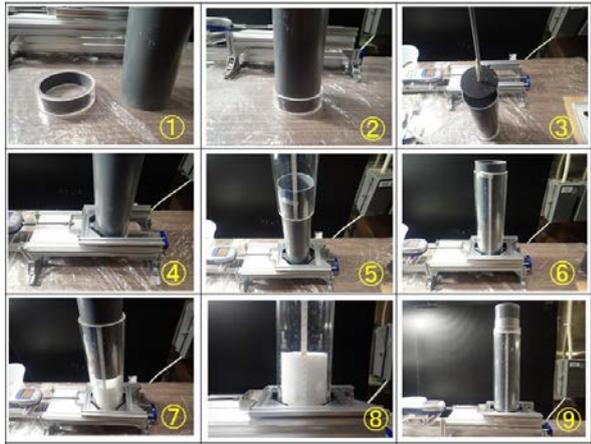


図2 雪試料をせん断装置へセットする手順

けた厚さ 2 mm のアルミ板上をデジタルフォースゲージに連結した上のせん断箱が移動することによって塩ビパイプの中の雪をせん断破壊する。

上の塩ビパイプの口から直接ほぐした雪を詰め、しばらく待機してからせん断破壊する方法に加えて、今年度は、あらかじめ塩ビパイプの中にほぐした雪をつめ長時間放置した後にせん断装置へセットし、塩ビパイプの中の雪をせん断破壊する方法を考案した(図2)。以下にその手順を示す。

①の塩ビパイプの中にもほぐした雪が詰められている。これを下のアクリルパイプに入った塩ビパイプに重ねる(②)。ほぐした雪は長時間放置すると塩ビパイプの内壁に固着したため、③のような棒付き円盤状のものを上から挿入し雪面を軽く押すと雪と塩ビパイプ内壁との固着は容易に切れ、雪柱は①の下のパイプの中へ押し出される。この雪の入った上下のパイプをせん断装置へセットしパイプを固定した後に(④)、上からアクリルパイプを挿入し上のパイプを固定する(⑤、⑥)。アクリルパイプの中の塩ビパイプを引き抜いて(⑦)、アクリルパイプに付けた目盛から雪柱の高さを計測する(⑧)。アクリルパイプと雪柱の間には隙間ができるため、図1のように2 mmの隙間ができるような長さの塩ビパイプを上から挿入する(⑨)。せん断破壊終了後、せん断面より上のアクリルパイプと雪の入った塩ビパイプの質量をまとめて計測し、アクリルパイプと塩ビパイプの質量を差し引くことによってせん断面より上の雪の質量を求める。この雪の質量を⑧で計測した雪柱の高さと塩ビパイプの断面積

($\pi \times 4.15\text{cm}^2$) で除することによって雪の密度が求まる。

実験にはこしまり雪としまり雪を用い、実験条件は以下の通りである。

- (1) 雪温はおよそ -7°C である。
- (2) 低温室に保存しておいた雪をメッシュ 2 mm の金網でほぐす。
- (3) 塩ビパイプに詰めるほぐした雪の質量は 0.1 から 0.6 kg まで 0.1 kg 毎に変える。
- (4) せん断速度 V_s は 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2}ms^{-1} とする。
- (5) ほぐした雪を塩ビパイプに詰めてから 3 分, 20 分, 40 分, 1 時間, 2 時間, 3 時間, 5 時間, 24 時間待機した後にせん断破壊する。この待機時間を焼結時間と呼ぶことにする。20 分以上に対しては、あらかじめ塩ビパイプの中に雪を詰めた試料を何本も作製し、指定した時間前になったとき図2に示す手順に従ってせん断装置へセットする。

また、図1の下のせん断箱のパイプの前にパイプと同じ高さにこしまり雪またはしまり雪を敷き詰めることにより、せん断破壊後、上の塩ビパイプ内のこしまり雪またはしまり雪が下の敷き詰めた雪の上を移動するときの摩擦力を測定する。上の塩ビパイプの口から直接決まった質量のほぐした雪を詰め移動させる方法と、0.2 kg のほぐした雪を塩ビパイプに詰め、図2の③の円盤状の上に 0.2 kg のおもりを置き塩ビパイプの中に挿入し载荷したまま移動させる方法をとった。後者に対しては同様の実験を 0.4, 0.6, 0.8 kg のおもりに対しても行う。 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1}ms^{-1} の移動速度に対して、図1の下の塩ビパイプの中心線からこしまり雪またはしまり雪が 100 mm から 120 mm の区間を移動するときの摩擦力を測定し、せん断面より上のこしまり雪またはしまり雪の荷重との比からそれぞれの雪質に対して動摩擦係数を求める。せん断強度または動摩擦係数の測定は同じ条件で3回または4回実施し、その平均値を採用する。

C. 研究結果

(1) $\tau/\rho_{\text{dry}}^{2.91}$ への垂直応力とせん断速度の影響

図3(a)と(b)は、それぞれ焼結時間3分後のこしまり雪としまり雪に対して、 $\tau/\rho_{\text{dry}}^{2.91}$ と垂直応力 σ の関係を、せん断速度 $V_s = 10^{-4}$, 10^{-3} , 10^{-2}ms^{-1} に対して示す。こしまり雪に対しては、 $\tau/\rho_{\text{dry}}^{2.91}$ は垂

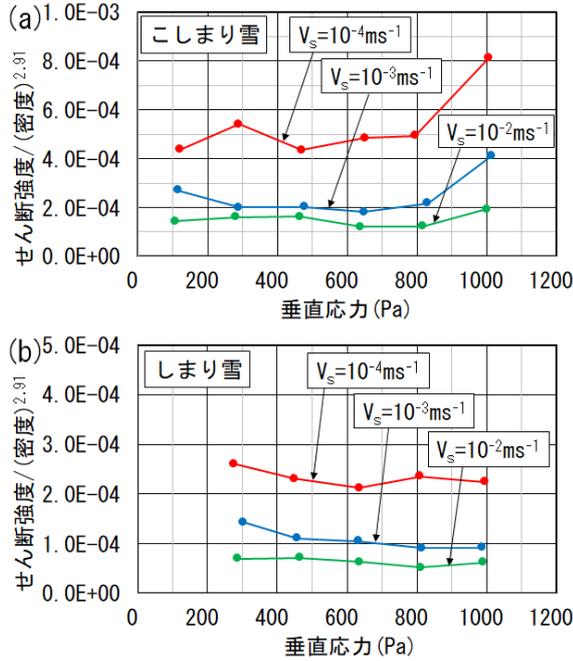


図3せん断強度/(密度)^{2.91}と垂直応力の関係,
(a)こしまり雪, (b)しまり雪

直応力が大きいときに増加傾向にあるが、しまり雪に対して垂直応力依存性はほとんどない。また、こしまり雪としまり雪に対して、せん断速度 V_s が小さいほど $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ は増加している。図3(a)と(b)のこしまり雪としまり雪に対して、それぞれ

$$\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 4.0 \times 10^{-5} V_s^{-0.28} \quad (2)$$

$$\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 2.0 \times 10^{-5} V_s^{-0.28} \quad (3)$$

の関係がある (図略)。

(2) $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ への焼結時間の影響

図4は、平均上載荷重が284Paのしまり雪に対して、 $V_s = 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ のとき、 $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ と焼結時間 t_s の関係を示す。図の近似曲線は

$$\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 4.6 \times 10^{-4} \log(t_s) - 7.0 \times 10^{-4} \quad (4)$$

となり、 $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ は焼結時間 t_s に対して対数的に増加する。雪をほぐしてから3分後は $\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 1.85 \times 10^{-4}$ であったが、3時間後には $\tau/\rho_{dry}^{2.91} = 8.89 \times 10^{-4}$ となり式(1)の山野井・遠藤の値に近づく。5時間後は $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ の変化が非常に小さい。

(3) 雪の動摩擦係数

図5はこしまり雪がこしまり雪の上を、しまり雪がしまり雪の上を移動したときの、動摩擦係数と移動速度の関係を示す。動摩擦係数の雪質による差は小さいが、動摩擦係数は一定でなく速度とともに減少する傾向がある。

D. 考察

しまり雪に対しては $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ の垂直応力依存性

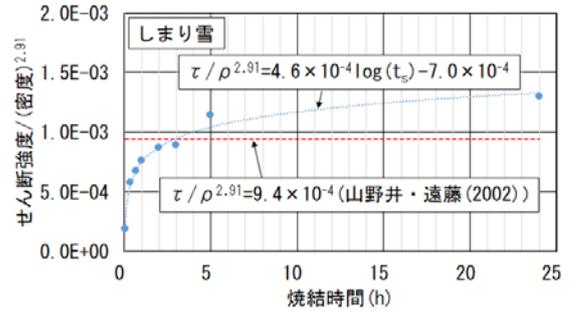


図4せん断強度/(密度)^{2.91}と焼結時間の関係

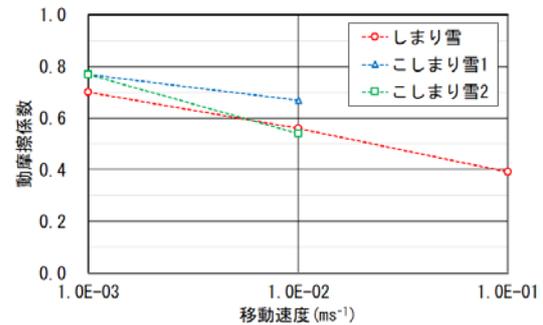


図5動摩擦係数と移動速度の関係

は無視できるため、A, Bを定数とすると、

$$\tau/\rho_{dry}^{2.91} = V_s^{-0.28} \times (A \log(t_s) - B) \quad (5)$$

となる。 $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ の値は、せん断速度 V_s が一桁小さくなるとおよそ2倍大きくなるが、雪をほぐしてから5時間後に $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ の値は3分後の値に比べおよそ一桁大きくなる(図4)。 $\tau/\rho_{dry}^{2.91}$ の値は雪をほぐしてからいつ測定するかに大きく依存する。

E. 結論

こしまり雪としまり雪のせん断強度は、密度だけでなくせん断速度や焼結時間に依存し、特に焼結時間に対する寄与が大きいことが明らかになった。さらにこしまり雪は垂直応力に対する依存性も示した。また、こしまり雪としまり雪の動摩擦係数は速度依存性を示した。

F. 研究発表

1. 論文発表

上之和人, 秋山一弥, 原田裕介, 河島克久: せん断速度制御装置によるほぐした乾きしまり雪のせん断強度の評価, 寒地技術論文・報告集, Vol. 35, p. 85-90, 2019.

2. 学会発表

上之和人, 秋山一弥, 原田裕介, 河島克久: せん断速度制御装置を用いた乾きしまり雪のせん断強度評価, 雪氷研究大会 (2019・山形) 講演要旨集, p. 28.