

## あられを含む積雪の剪断強度の時間変化について

松下拓樹, 松澤 勝 ( (独)土木研究所 寒地土木研究所 )

### 1. はじめに

雪崩発生の危険度を把握する場合, 斜面積雪の剪断強度と剪断応力の比を指標とすることが多い. 積雪の剪断強度は, 積雪粒子間の焼結と圧密の進行とともに大きくなり, その時間変化は雪質によって異なることが知られている. 例えば, しもざらめ雪や表面霜, あられの場合, 剪断強度の増加は降雪結晶よりゆっくり進行するため(海原, 1999), 長い期間弱層として振る舞う(遠藤・秋田谷, 2000). その他, 温度環境や垂直荷重, 降雪強度等の堆雪条件などにより剪断強度の時間変化特性が異なる(山野井, 2005; Brown and Jamieson, 2006; 松下ら, 2008). このように積雪剪断強度の時間変化に関する定性的な傾向は示されているものの, 雪質や温度, 垂直荷重などとの定量的な関係までは明らかになっていない.

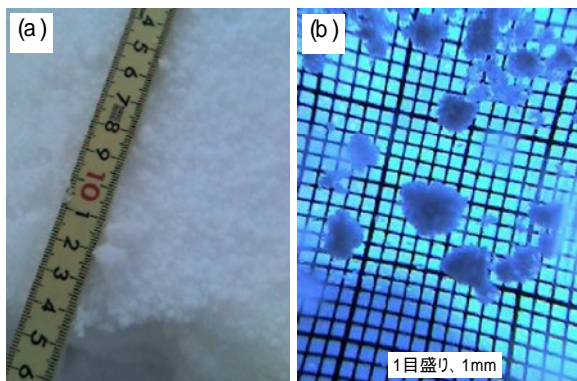
そこで本論文では, あられを含む積雪の剪断強度の時間変化に関する測定結果を示す. ここで弱層となるあられは, 遠藤・秋田谷(2000)によるとあられ粒子が主体となった積雪層のことであるが, 今回測定対象とした積雪はあられと降雪結晶が混在している状態(図1)であり, 本論文ではあられを含む積雪と呼ぶ.

### 2. 測定の概要

積雪剪断強度の時間変化に関する測定は, 札幌市内の寒地土木研究所敷地内にて行った. 表1に測定日時を示す. 測定は, 2009年2月17日の未明から積もった厚さ16cmのあられを含む積雪層(以下, G層)と, その3日後の2月20日に積もった厚さ7cmの新雪層(以下, N層)を対象に行った. G層の測定は降雪後14日経過した3月3日までに8回, N層の測定は降雪後11日までの期間に5回実施した.

G層における測定は, 2月17日時点の層厚16cmに対してG層の底面から7cmと12cmの位置で行い, これらをG-1とG-2とする. またN層は20日時点の層厚7cmに対して

表1 測定日時



回	測定日時	経過日数 (G層)	経過日数 (N層)
1	2月17日 14:50 - 16:00	(初回)	
2	2月18日 14:00 - 15:30	1日後	
3	2月19日 15:10 - 16:20	2日後	
4	2月20日 18:10 - 20:00	3日後	(初回)
5	2月23日 15:30 - 17:30	6日後	3日後
6	2月25日 14:10 - 15:30	8日後	5日後
7	2月27日 16:10 - 17:20	10日後	7日後
8	3月3日 16:30 - 17:40	14日後	11日後

図1 G-2の測定面(a)とあられ(b)  
2009年2月17日撮影

N層の底面から2cmの位置(N-1)とした。G層とN層の層厚変化を把握するため、これらの積雪層の上面と底面には水で薄めたインクを散布しており、2回目以降のG-1、G-2、N-1の測定位置は、インクによってマークされた層厚から相対的に求めた。

測定項目は、雪温、密度(100cc箱型サンプラー使用)、剪断強度(断面積250cm<sup>2</sup>のシアフレームを用いた値、SFI)、上載積雪重量(直径8cmの円筒サンプラー使用)、雪質の観察である。雪温は測定開始前と後の2回の平均値、密度と剪断強度及び上載積雪重量は3回の平均値を測定値とした。

### 3. 結果

雪質観察によると、G-1とG-2のあられの粒径は、17日においてG-1で1~4mm、G-2で1~5mmである(図1)。N-1は雲粒付きの降雪結晶が主体であるが、20日の積雪表面付近には広幅六花結晶が若干みられた。

図2は、各測定位置における積雪密度の時系列変化である。横軸は、最初の測定時刻からの経過時間である。図2より、密度の変化は3つの測定箇所ではほぼ同じ傾向を示し、時間の経過とともに増加して密度が300kg m<sup>-3</sup>に近づくとその増加割合が小さくなった。一方、図3の剪断強度の時間変化はG層とN層で異なった。N層の場合、剪断強度は時間の経過とともにほぼ一定の割合で増加するのに対し、G層の剪断強度は70時間を経過してから剪断強度の増加割合が大きくなる傾向を示した。図中に示す剪断強度と経過時間の回帰直線によると、N-1の直線の傾きは0.025 kN m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>である。一方、G-1とG-2の直線の傾きは経過時間が約70時間まではそれぞれ0.011 kN m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>、0.009 kN m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>であり、N層の約半分の増加速度である。しかし、約70時間以降の

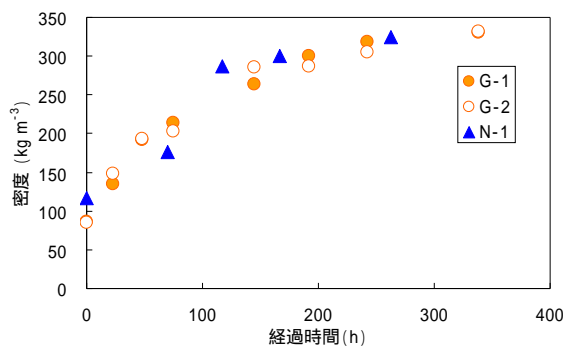


図2 密度の測定結果

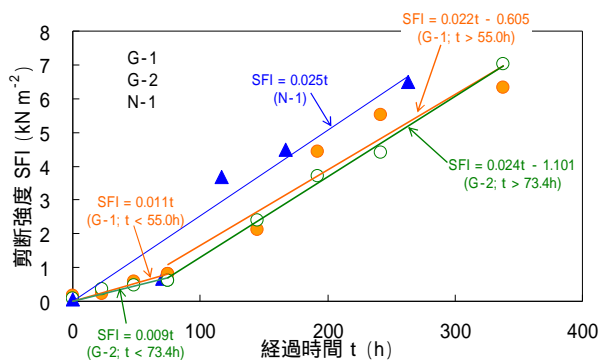


図3 剪断強度の測定結果

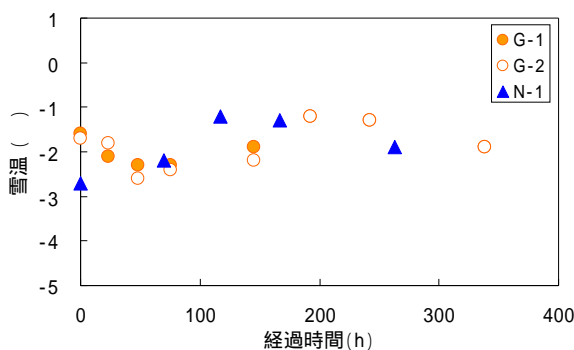


図4 雪温の時系列変化

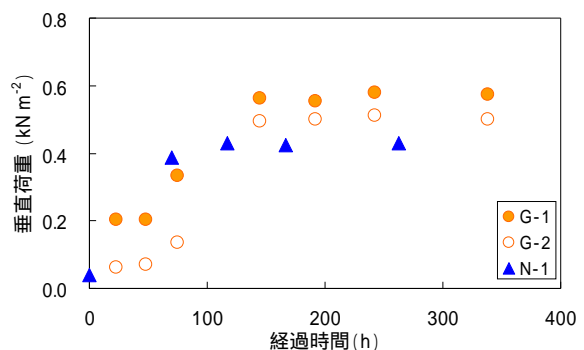


図5 垂直荷重の時系列変化

直線の傾きは G-1 と G-2 でそれぞれ  $0.022, 0.024 \text{ kN m}^{-2}\text{h}^{-1}$  となり, N 層と同程度の増加速度となった. G 層の雪質は, 75 時間(2 月 20 日)まではこしまり雪であったが, それ以降はしまり雪に変化した. また, 75 時間までの剪断強度の測定では, G 層内のあられの粒構造が明瞭でシアーフレームを引いた剪断面にあられ粒による筋状の跡が観察されたが, それ以降の測定ではあられの粒構造が不明瞭となりシアーフレーム剪断面は平坦であった.

すなわち, 剪断強度の増加速度の変化は, 積雪粒子の焼結や圧密過程を通じた雪の変態に伴って起きたと考えられる. これに関連する要素として図 4 に雪温の測定値と, 図 5 に上載積雪重量の測定値から求めた垂直荷重を示す. 図 4 の雪温は各測定箇所とも  $-1 \sim -3$  であり, G 層と N 層に大きな差はない. 一方, 図 5 に示す G 層の垂直荷重をみると, 約 70 時間を境に  $0.1 \text{ kN m}^{-2}$  から  $0.5 \text{ kN m}^{-2}$  へ増加した. そこで, 垂直荷重と剪断強度との関係について調べたが, 今回の測定結果から明確な関係を得ることはできなかった(図は省略).

#### 4. 考察

剪断強度の時間変化に関して, 本論文で示した測定結果と既往の調査結果を比較した(図 6). 海原(1999)と山野井(2005)はあられが主体の積雪, Abe(2004)は本論文と同じあられと降雪結晶が混在した積雪の測定結果である. ここで山野井(2005)と海原(1999)の測定値と関係直線は, これらの文献の図から値を読み取った.

図 6 によると, 経過時間 70 時間付近までは, 本論文の測定値は海原(1999)や山野井(2005)の関係直線の傾きに近い増加速度で変化した. しかし, 70 時間以降は今回の測定値の増加速度が大きくなりこれらの関係直線から離れていく. 一方, Abe(2004)の測定値は, 本論文の 70 時間以降の測定値に近い増加速度で変化している.

既往の調査におけるあられ粒径と雪温を比較すると, 山野井(2005)が測定したあられの粒径の多くは 5mm 以上で 10mm 以上のものもあり, 今回の測定より大きなあられであった. 一方, Abe(2004)は粒径  $0.5 \sim 6\text{mm}$  で本論文とほぼ同じであるが, 雪温  $0.0 \sim$

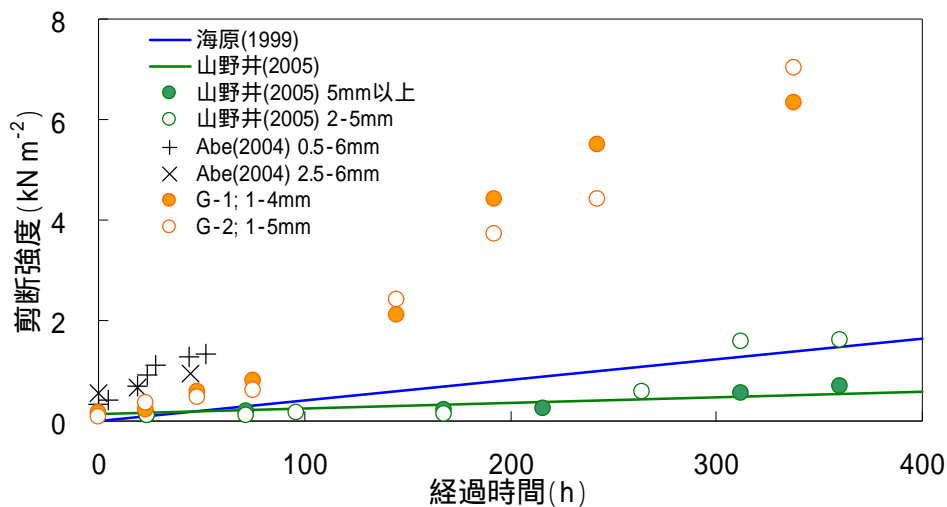


図 6 剪断強度と経過時間の関係. 海原(1999), 山野井(2005), Abe(2004)と本論文の測定値の比較. 図中の凡例の数値(mm)は, あられの粒径.

-0.5 とやや高い温度条件での測定であった。

遠藤・秋田谷(2000)によると、弱層となるあられは大粒で大きさの揃った場合である。この場合、積み重なったあられの間に大きな空隙が残り、時間が経過しても圧密が進行せず長時間弱層として維持される。海原(1999)と山野井(2005)の調査結果は、弱層となる粒径の大きなあられ層を対象としたものである。一方、トレンパー(2004)によると、あられは堆積後1～2日で安定化するとある。これは本論文や Abe(2004)のように、あられと降雪結晶が混在する積雪を対象とした場合と考えられる。遠藤・秋田谷(2000)によると、あられを含む積雪層は厳密には弱層ではない。しかし、本論文で示した測定結果より、雪温が-2 程度であれば降雪後数日間は弱層として振る舞う可能性が考えられる。弱層となる大粒のあられが降る機会は一冬でもそれほど多くはないが、あられ混じりの降雪は一冬にしばしば発生する。あられの降雪後は、斜面積雪の安定化に関して降雪結晶主体の積雪よりも少し長い期間注意が必要であると考えられる。

## 5. おわりに

積雪剪断強度の時間変化に関して、今回はわずか1事例の測定結果であるが、今後はこの結果に基づいて解析を進めて斜面積雪の安定化への影響について評価していくつもりである。また将来的には剪断強度の時間変化と、密度、雪温、上載積雪荷重との関係を雪質ごとに定量的に明らかにしていきたいと考えている。

## 参考文献

- Abe, O., 2004: Shear strength and angle of repose of snow layers including graupel. *Annals of Glaciology*, 38, 305-308.
- Brown, C., and B. Jamieson, 2006: Evolving shear strength, stability and snowpack properties in storm snow. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, U.S.A.*, 15-21.
- 遠藤八十一, 秋田谷英次, 2000: 雪崩の分類と発生機構. 雪崩と吹雪, 古今書院, 13-81.
- 海原拓哉, 1999: しもざらめ雪弱層の強度変化及び圧縮に関する研究. 平成10年度北海道大学大学院地球環境科学研究科修士論文(北海道雪崩事故防止研究会編, 2002: 決定版 雪崩学. 山と溪谷社, 51p)
- 松下拓樹, 松澤勝, 伊東靖彦, 加治屋安彦, 2008: 新雪剪断強度の時間変化について. 北海道の雪氷, 27, 91-94.
- ブルース・トレンパー, 日本雪崩ネットワーク訳, 2004: 第5章 積雪. 雪崩リスクマネジメント, 山と溪谷社, 107-142.
- 山野井克己, 2005: あられ層のせん断強度と寿命. 2005年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 83.