

## 研究ノート

# しもざらめ雪・あられ・降雪結晶からなる 弱層のせん断強度変化の観測例

海原 拓哉<sup>1)</sup>, 八久保晶弘<sup>2)</sup>, 尾関 俊浩<sup>3)</sup>,  
西村 浩一<sup>4)</sup>, 秋田谷英次<sup>5)</sup>

## 要 旨

積雪中の弱層は表層雪崩の原因として知られているが、雪面付近で形成された弱層の、埋没後の時間的変質に関する詳細な観測例は少ない。本研究では、札幌において 2 冬期にわたる積雪断面観測を実施し、しもざらめ雪やあられ、降雪結晶の弱層について、せん断強度の指標である Shear Frame Index (SFI) の経時変化を求めた。その結果、しもざらめ雪弱層とあられ弱層は、降雪結晶弱層と比較して強度の小さい状態が比較的長期間継続した。しもざらめ雪弱層の層厚は 1 ヶ月以上にわたりほとんど変化がなく、この圧密のしにくさが、せん断強度の増加が小さい一因であると考察した。

キーワード: 弱層, しもざらめ雪, あられ, 降雪結晶, せん断強度

Key words: weak layer, depth hoar, graupel, rime-free crystals, shear strength

## 1. はじめに

面発生表層雪崩は、力学的強度の小さい積雪内の弱層が存在し(必要条件), かつ弱層形成後の斜面における上載積雪の増加(十分条件)が揃って発生する現象である。すなわち, 弱層の形成と破壊が表層雪崩の本質的原因であり, これまでに弱層の気象学的形成条件や埋没後のせん断強度の変化が研究者によって注目されてきた。積雪内の弱層は, 降雪結晶, しもざらめ雪, 表面霜, あられ, むれざらめ雪の 5 種類に分類されている(秋田谷・遠藤, 1998)。本研究ではこのうち, 札幌における 2 冬期の積雪断面観測で観察された, しもざ

らめ雪・あられ・降雪結晶の 3 種類の弱層に焦点をあてることにする。

Schweizer and Jamieson (2001) によれば, カナダのコロンビア山脈およびスイスアルプスにおいてスキーヤーが誘発した雪崩を調査した結果, 弱層の種類としては 82% が霜系(こしもざらめ雪・しもざらめ雪・表面霜)であった。一方, 国内においては, こしもざらめ雪・しもざらめ雪の弱層が表層雪崩を引き起こした事例が数多く報告されている(秋田谷ら, 1990; McElwaine *et al.*, 2000; 山口ら, 2004; 尾関ら, 2008)。雪面近傍に形成するこしもざらめ雪・しもざらめ雪の気象学的成長条件については, これまでに多くの研究がなされ(秋田谷・清水, 1987; Fukuzawa and Akitaya, 1993; Birkeland, 1998; Birkeland *et al.*, 1998), 積雪変質モデルでこれらの弱層形成過程を再現する試みが続けられている(Fierz, 1998; McElwaine *et al.*, 2000; 山口ら, 2004)。

こしもざらめ雪・しもざらめ雪のせん断強度は同密度の他の雪質のそれより小さいことが知られており, 密度との相関式が求められている

1) 社団法人日本雪氷学会会員

〒171-0033 東京都豊島区高田 3-9-6-305

2) 北見工業大学未利用エネルギー研究センター

〒090-8507 北海道北見市公園町 165

3) 北海道教育大学教育学部札幌校

〒002-8502 北海道札幌市北区あいの里 5 条 3 丁目

4) 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

5) NPO 法人雪氷ネットワーク

〒064-0804 北海道札幌市中央区南 4 条西 6 丁目 11-2

(Jamieson and Johnston, 2001). Abe *et al.* (2006) および阿部ら (2007) はしもぎらめ雪のせん断強度の指標である SFI (Shear Frame Index) の積雪密度依存性を定式化し, さらに人工積雪を用いた実験からは, 発達段階にあるしもぎらめ雪のせん断強度を積雪密度と温度条件から推測可能であることを示した. 最近, 阿部ら (2009) は等温状態で長期保存された人工しもぎらめ雪のせん断強度の回復過程を調べ, 密度との関係が等温変態過程のそれに近づいていく様子を定量的に示す一方, Hirashima *et al.* (2009) はしもぎらめ雪とその他の雪質との間の連続的変質過程を積雪変質モデルに組み込むことで, 積雪層のせん断強度の表現に関する改良を行なっている.

あられで構成される弱層や, 雲粒のない広幅六花などの降雪結晶からなる弱層については報告例がやや少ない. Jamieson and Geldsetzer (1999) は, あられ弱層の頻度が少ない理由として, 球状粒子のためになだれ発生域の急斜面に堆積しにくい点を挙げているが, 松岡 (1993) は沢状地形に堆積した厚さ 25 cm のあられ層が原因とみられる表層雪崩を観測している. その他, Harper and Bradford (2003) は 2-5 cm 厚のあられ層が積雪硬度を顕著に低下させていた例を報告している. あられ層のせん断強度については Schweizer and Jamieson (2001) や Abe (2004) によって測定され, 後者では密度の関数として求められている. また, 降雪結晶の弱層のせん断強度については八久保・秋田谷 (1996) の測定例があり, 雪温や上載荷重の違いに関わらず SFI が一定の割合で増加することを報告している.

積雪後の変態過程で形成されるしもぎらめ系の弱層や, 雪面上への水蒸気輸送で形成される表面霜弱層 (Hachikubo and Akitaya, 1997) とは異なり, あられや降雪結晶の弱層は降雪時の気象条件が主要因である. 弱層となる降雪粒子の検知を試みた石坂 (2007) は, 積雪モデルに降雪情報を入れる必要があると指摘しているが, 未だ実現されていない.

以上のように, 弱層粒子の形成過程および弱層のせん断強度のパラメータ化 (特に密度依存性を中心に) が積雪モデルによる表層雪崩予知の重要研究課題と言えるが, 野外における弱層のせん断

強度が実際にどのように増加していくのか, については情報が少ない. 例えば, Jamieson and Langevin (2004) は湿雪上に形成したしもぎらめ雪弱層のせん断強度変化 2 例を報告しているが, 測定期間はいずれも 1 週間程度である. また, Abe (2004) はあられ弱層の SFI の変化を 2-3 日間観測し, 2 例についてせん断強度の増加を報告している. 山野井 (2005) は厚いあられ層のせん断強度変化を長期間にわたり測定している. Davis *et al.* (1996) と Geldsetzer *et al.* (1998) は, それぞれ 1~3 ヶ月の長期間にわたって表面霜弱層のせん断強度変化を記録しているが, 我々が知る限り他に例はない. 本研究では, 札幌において観測されたしもぎらめ雪, あられ, 降雪結晶からなる弱層の, 10~40 日という比較的長期にわたるせん断強度の変化について報告する.

## 2. 野外観測

### 2.1 気象観測および積雪断面観測

野外観測は北海道大学低温科学研究所北側の農場で行なわれた. 観測期間は 1996 年 12 月~1997 年 3 月 (以下, 96-97 冬期) と 1997 年 12 月~1998 年 3 月 (以下, 97-98 冬期) の 2 シーズンである. なお, 96-97 冬期の気象・積雪断面観測結果については Hirashima *et al.* (2004) で一部報告されており, 積雪変質モデル SNOWPACK の検証実験に用いられている.

気象観測は, 30 秒毎の自動測定値を 30 分毎に集計しその平均値を記録した. 観測項目は気温, 相対湿度, 風速 (いずれも雪面上 1 m の高さで観測), 風向, 短波放射・長波放射 (それぞれ上・下向き), 降水量, 雪面温度 (96-97 冬期のみ, 放射温度計を用いて観測), 降雪強度 (降雪検知器を使用) である. 積雪断面観測は, 期間中 9:30 から毎日実施された. 観測項目は, 積雪深, 積雪層構造 (雪質・粒径), 密度, 積雪水量, 気温, 雪温である. また, 後述するしもぎらめ雪弱層とあられ弱層の形成後には, 弱層近傍の雪温分布を熱電対を用いて測定し, 10 分間隔で自動記録した. なお, 積雪層に対し平行に差し込まれた温度センサは, 積雪層の圧密が進んでも対象とする層によく追従することが確認されている.

## 2.2 弱層のせん断強度の測定

観測期間中に弱層が形成された場合、ハンドテスト（北海道雪崩事故防止研究会，2002）によって存在深度を確認してから，弱層のせん断強度をシアーフレームを用いて測定した（日本雪氷学会編，2010）．本研究では，弱層のシアートテストに広く用いられている面積  $0.025\text{ m}^2$  のシアーフレームを使用した．測定時には3秒以内に弱層が破壊される速度でシアーフレームを引っ張り，張力計で破壊強度を記録した．シアートテストでは，計21回の測定値の中央値を採用することになっているが，本研究では測定値のばらつきを勘案して9-13回の測定値の中央値を採用した．これをシアーフレームの面積で割った値をせん断強度指数（SFI）とした．

## 3. 測定結果および考察

### 3.1 積雪断面観測結果の概況

2 冬の積雪断面観測から得た積雪層構造変化を図1に示す．96-97 冬期の特徴は積雪期前半の

寡雪であり，1月下旬まで積雪深が20 cmを下回る状態が続いた．そのため，積雪層全体に大きな温度勾配がかかりやすい状態が長期間維持され，全層にわたってこしもざらめ雪・しもざらめ雪がよく発達した．その後，2月上旬から積雪深が増加し，2月22日に最大積雪深83 cmを記録し，その後3月上旬に全層が含水・ざらめ化し，3月末に消雪した．この期間中，特徴的なしもざらめ雪弱層が1月下旬に形成され，1ヶ月以上の長期にわたり観察されたほか，降雪結晶による弱層もみられた．97-98 冬期では，積雪量がやや少ないものの，積雪深推移のパターンはおおむね例年通りであった．12月上旬に根雪となり，12月下旬から積雪深が増加しはじめ，2月16日に最大積雪深87 cmを記録した．その後は96-97 冬期とほぼ同様，3月上旬には全層が含水・ざらめ化し，3月末に消雪した．この期間中，あられ弱層および降雪結晶による弱層が観測された．

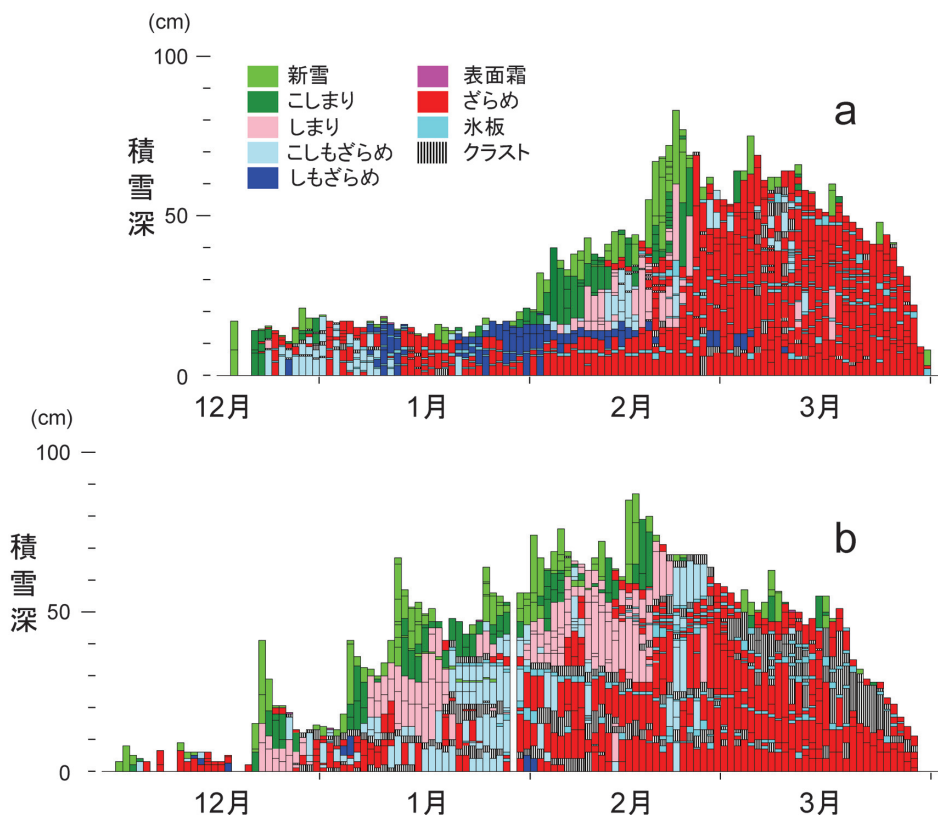


図1 2 冬期にわたる札幌の積雪層構造の時系列変化．(a) 96-97 冬期，(b) 97-98 冬期．

### 3.2 1997 年 1 月末のしもざらめ雪弱層

1997 年 1 月 28–29 日に積雪表層付近でしもざらめ雪が発達した. 1 月 28 日から 30 日にかけての断面観測データ, および気温・雪面温度・風速・正味放射量データをそれぞれ図 2 に示す. 積雪表層 (約 10 cm 厚) で既にしもざらめ化が進行していた 28 日の日中は, 気温が上昇して  $0^{\circ}\text{C}$  を上回っている. 14:30 の正味放射量は雪面へ入射する向きに  $+65\text{ W m}^{-2}$  を記録し, 前後 20 日間に

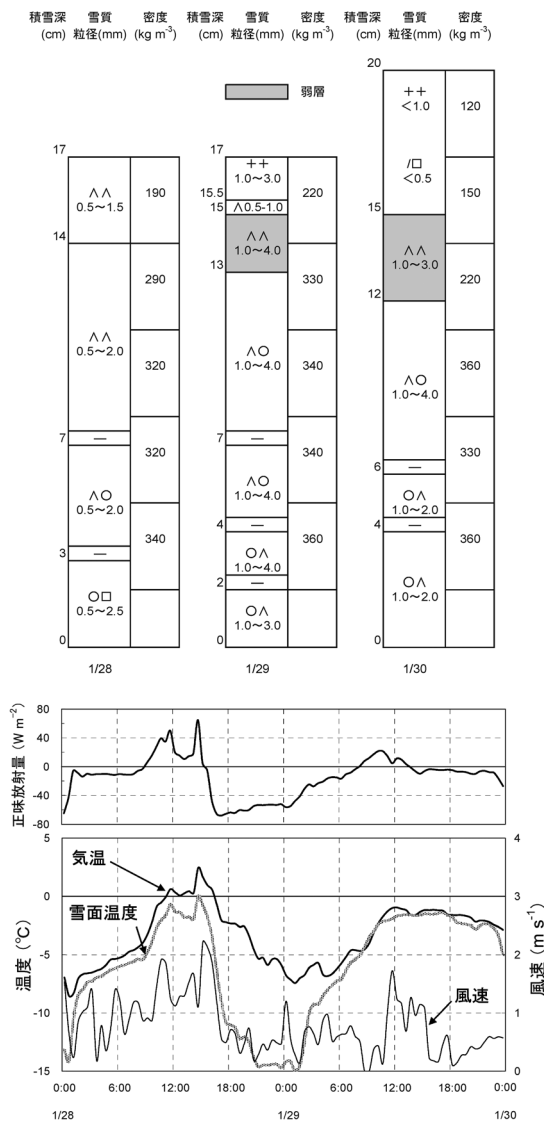


図 2 1997 年 1 月 28 日～30 日にかけての積雪断面の変化と主要な気象要素の時系列変化. 積雪断面図の記号は積雪の国際分類 (Fierz *et al.*, 2009) による.

おける最大値であったことから, 積雪表層のやや内部で内部融解 (吉田, 1960) が生じたとみられる. 事実, 29 日の雪面下 4–10 cm の層はざらめ化し, 粒径が増加している. そして, 28 日晚から 29 日明け方にかけては風速が  $1\text{ m s}^{-1}$  以下で, 放射冷却によって雪面温度は  $-15^{\circ}\text{C}$  近くまで下がったことから, 融解層から雪面近傍への水蒸気輸送がしもざらめ雪を急激に発達させる, 弱層形成の典型的パターン (Fukuzawa and Akitaya, 1993) だったことが分かる.

その後, 29 日午前中には降雪があり, しもざらめ雪の層は埋没して弱層となった. アニリン固定法 (木下・若浜, 1959) による, 2 月 3 日 (弱層形成後 5 日) のしもざらめ雪弱層の鉛直断面薄片写真を図 3a に示す. よく発達したしもざらめ雪結晶が低密度層を形成していることが分かる. 図 3b および図 3c はそれぞれ 1 月 30 日 (形成の翌日) と 2 月 19 日 (形成後 21 日) のしもざらめ雪粒子の接写写真である. 弱層形成から約 3 週間が経過した後も, 丸みを帯びてきたものの, 散晶がよく保存されていた.

このしもざらめ雪弱層付近の雪温, および弱層にかかる温度勾配を図 4 に示す. 弱層形成から数日間は, 雪面近傍のために大きな温度勾配がかかっているが, その後 2 月 2–3 日のまとまった降雪により埋没し, 温度勾配が小さくなっている. 平均値で約  $+15^{\circ}\text{C m}^{-1}$  の温度勾配のかかった状態が約 12 日継続し, 2 月中旬以降では温度勾配がほぼゼロとなった. これは, 2 月 17–18 日の降雨によって全層の雪温が  $0^{\circ}\text{C}$  となったためである. しもざらめ雪弱層は次第にざらめ化していったにも関わらず, 3 月末の融雪期まで層を特定することができた.

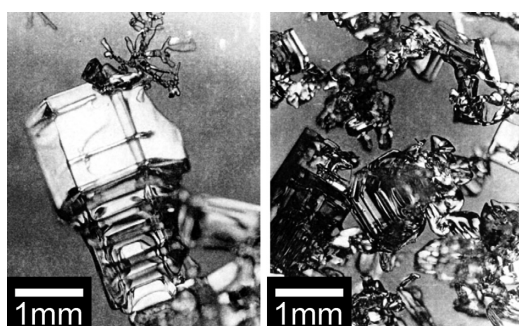
### 3.3 1998 年 1 月中旬のあられ弱層

1998 年 1 月 11 日晚に, あられ混じりの新雪層が堆積した (降雪深 27 cm). この層の中に, 粒径 1–3 mm のあられのみからなる約 1 cm 厚の弱層が存在した. 1 月 11 日から 27 日にかけての断面観測データを抜粋して図 5 に示す. 1 月 11 日の降雪深は 27 cm であり, あられ混じりの雲粒付降雪結晶が大半であったが, あられのみからなる約 1 cm の層が存在し, 1 月 26 日まで断面観測で特定することができた. 1 月 14 日には, 厚さ約 15 cm

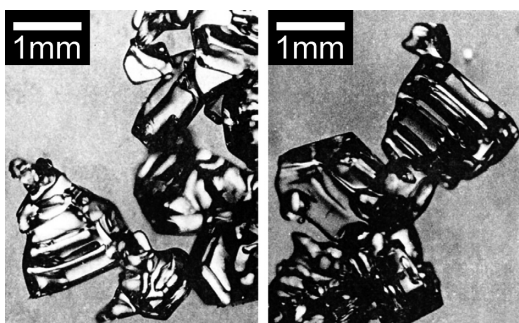




(a)



(b)



(c)

となったこのあられ層を含む新雪層の上下面に熱電対を設置した。この層厚は圧密によって、10 cm (1月26日)まで減少している。この新雪層にかかっていた温度勾配の時間変化を図6に示す。弱層形成後、約2週間にわたって平均して $+26^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 程度の温度勾配がかかっている。その結果、僅かではあるが、あられ粒子がこしもざらめ雪化していく様子がみられた(図7a-c)。あられ層は1月27日以降、上下層のこしもざらめ雪との区別がつかなくなった。1月22日(弱層形成後10日)のあられ層の薄片写真(図7d)からは、上下層の積雪粒子との結合が進んだ様子がうかがえる。

### 3.4 雲粒無し降雪結晶の弱層

2冬期の観測期間中、降雪結晶による弱層は多数観察されたが、大半はハンドテストによっても翌日に存在が確認できなくなったり、数日が経過すると上下の積雪層と区別がつかなくなったりした。本研究では、1997年1月30日(以下、降雪結

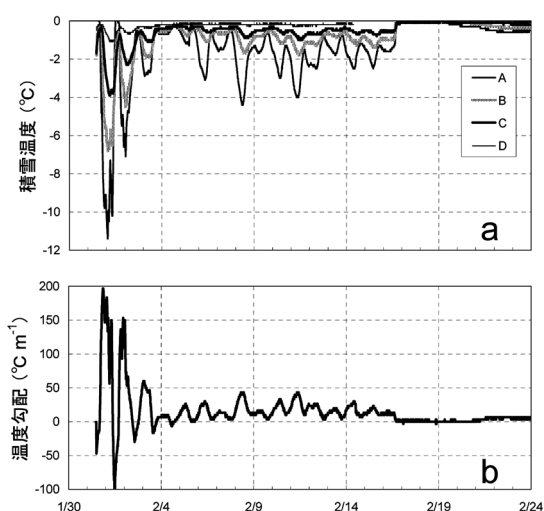


図4 しもざらめ雪弱層近傍の雪温分布 (a) および弱層にかかる温度勾配 (b)。温度勾配軸の正方向は、積雪層上部から下部に向かって温度が上昇する方向。A: 1997年1月31日における積雪底面からの高さ18 cm, B: 同14.5 cm (弱層の中心位置), C: 同10 cm, D: 同0 cm。

図3 1997年1月28-29日に形成されたしもざらめ雪弱層。(a) 弱層形成から5日後の弱層鉛直断面のアニリン薄片, (b) 弱層形成から1日後の弱層粒子, (c) 弱層形成から21日後の弱層粒子。

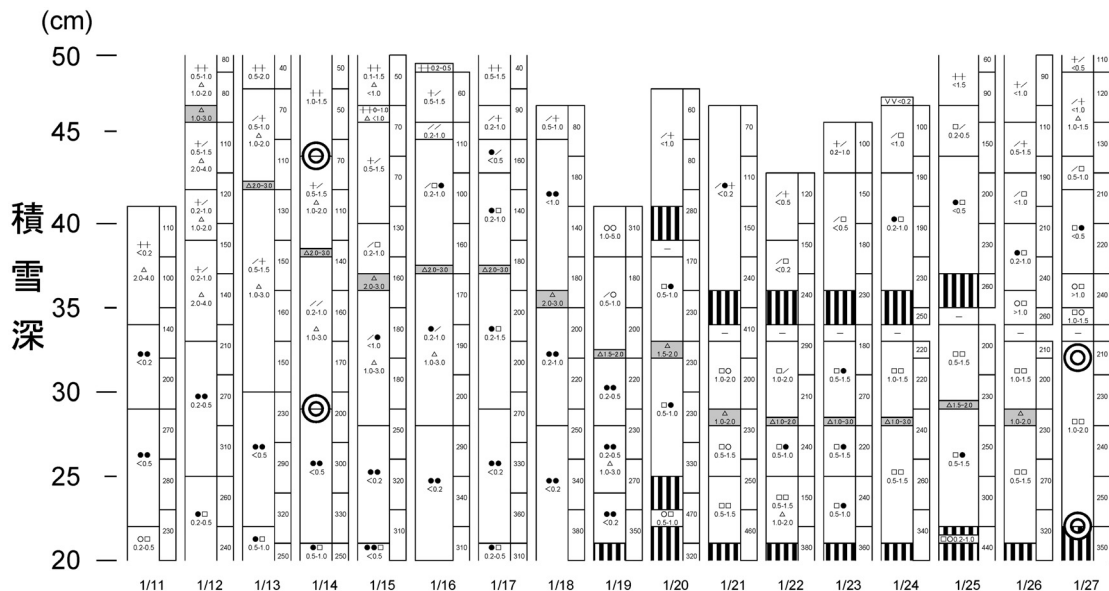


図 5 97-98 冬期における顕著なあられ弱層付近の積雪断面の変化 (左: 雪質および粒径 (mm), 右: 密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )). ただし, 積雪深 20-50 cm のみ抜粋. 網掛け部分はあられ弱層を, 縦縞部分は融解再凍結クラストをそれぞれ表す. 図中の記号は積雪の国際分類 (Fierz *et al.*, 2009) による. ◎は熱電対を設置した深度 (1 月 14 日) および圧密後の回収時の深度 (1 月 27 日).

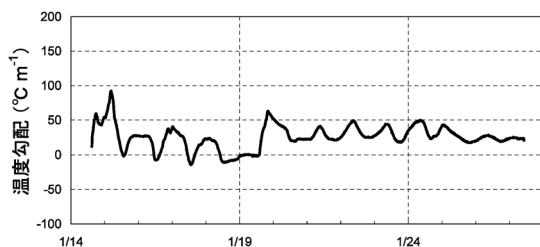


図 6 あられ弱層上下の雪温から求めた, 弱層付近にかかる平均的な温度勾配の時系列変化. 温度勾配軸の正方向は, 積雪層上部から下部に向かって温度が上昇する方向.

晶弱層 a) と, 1998 年 2 月 4 日 (以下, 降雪結晶弱層 b) に形成された 2 つの弱層に注目する.

降雪結晶弱層 a は前述のしもざらめ雪弱層の形成直後に堆積したものであり, 降雪当日にはしもざらめ雪弱層のわずか 2 cm 上にあった (図 2). 1 月 30 日の薄片写真を図 8 に示す. 弱層の厚さは約 2 mm であり, この写真の下方に前述のしもざらめ弱層の上部が写っている. 降雪結晶弱層 b は, 上下の積雪層との境界が比較的是っきりしたが, 形成から 8 日後の 2 月 12 日には区別がつかなくなった.

### 3.5 弱層のせん断強度の時間変化

各弱層の SFI と弱層上の上載荷重の時系列変化を図 9 に示す. SFI の増加については降雪結晶弱層 b が最も早く, 次いであられ弱層, しもざらめ雪弱層の順となっている. しもざらめ雪弱層は, 形成後 1 ヶ月以上経過した時点では SFI がやや大きくなっているものの, 20 日目頃までは SFI 増加率の小さい状態が維持されている. なお, 降雪結晶弱層 a は前述のしもざらめ雪弱層の直上にあり, 測定開始後の数日間にはほぼ同じせん断強度であったが, 弱層形成後 6 日目以降はしもざらめ雪弱層よりせん断強度が増加し, 測定時には先にしもざらめ雪弱層が破壊されたため, 測定できなかった. 一方, 降雪結晶弱層 b とあられ弱層では上載荷重が小さいにも関わらず, SFI の増加率はしもざらめ雪弱層のそれより大きい. 特に, 降雪結晶弱層 b は形成後 8 日目までせん断強度が測定できたが, それ以降は測定限界の 4 kPa を越えたために測定できなかった.

図 10 は, シアーフレームで得られた各種弱層のせん断強度 (SFI) 変化について, 過去の測定例と比較したものである. 降雪結晶弱層について

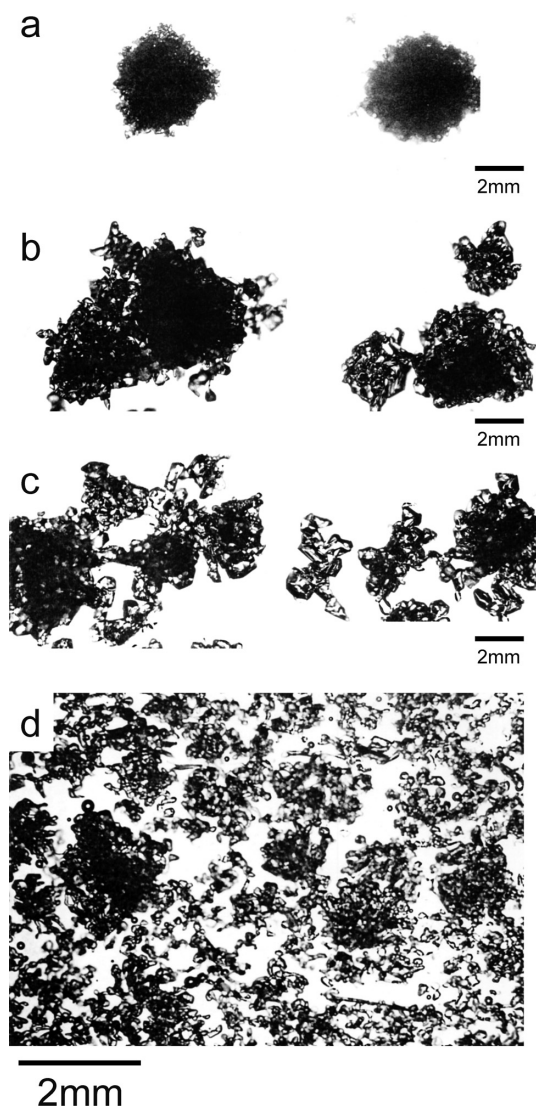


図 7 1998 年 1 月 12 日に形成されたあられ弱層。(a) 弱層形成翌日の弱層粒子、(b) 弱層形成から 8 日後の弱層粒子、(c) 弱層形成から 10 日後の弱層粒子、(d) 弱層形成から 10 日後の鉛直断面のアニリン薄片。

は、本研究で得られた 2 例は形成後の数日間の SFI がやや小さいものの、八久保・秋田谷 (1996) の結果と傾向が一致しており、他の雪質に比べて SFI 増加率が最も大きいことが分かる。一方、表面霜弱層の文献値である 4 例 (Davis *et al.*, 1996; Geldsetzer *et al.*, 1998) は値のばらつきが大きいものの、SFI が極めて小さな値のまま推移する例

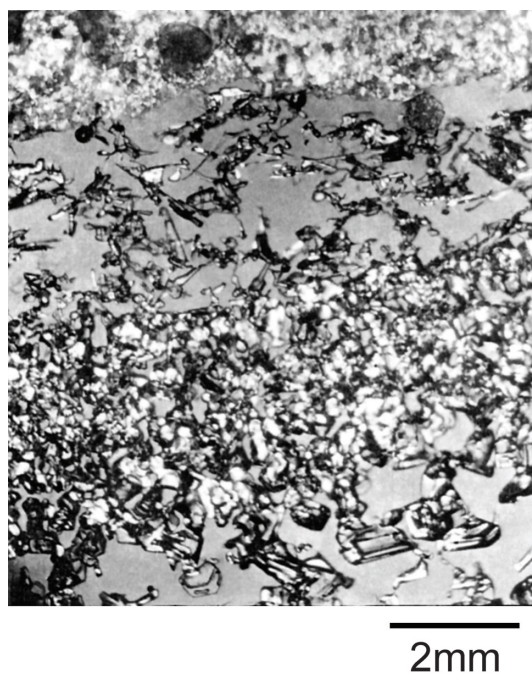


図 8 1997 年 1 月 30 日における降雪結晶弱層 a の鉛直断面のアニリン薄片。ややクラスト化したこしもざらめ雪の層に挟まれた、層厚約 2 mm の降雪結晶による低密度層が明らかである。なお、最下層の骸晶は前述のしもざらめ弱層。

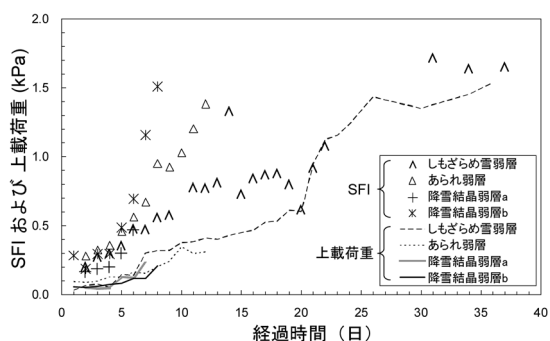


図 9 2 冬期に観測された 4 つの弱層の SFI および弱層上の上載荷重の時系列変化。

もあり、長期間にわたって降雪結晶弱層よりも小さいせん断強度が持続している。本研究で得られたしもざらめ雪弱層は、表面霜弱層と同程度の SFI 増加率であったと言える。また、あられ弱層の SFI 増加率はしもざらめ弱層と降雪結晶弱層との中間にあり、弱層として比較的残りやすいことが示唆される。



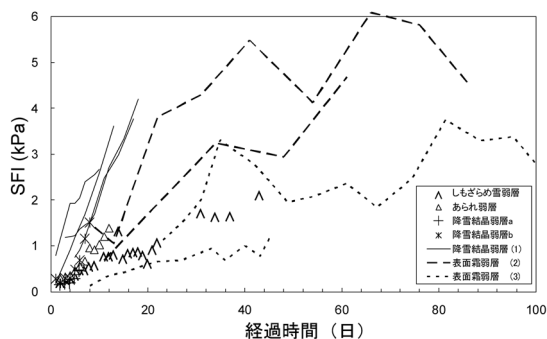


図 10 本研究で測定された弱層の SFI の時系列変化, および文献値との比較. 図中 (1) は八久保・秋田谷 (1996) の降雪結晶弱層, (2) は Davis *et al.* (1996) の表面霜弱層, (3) は Geldsetzer *et al.* (1998) の表面霜弱層の SFI 測定例.

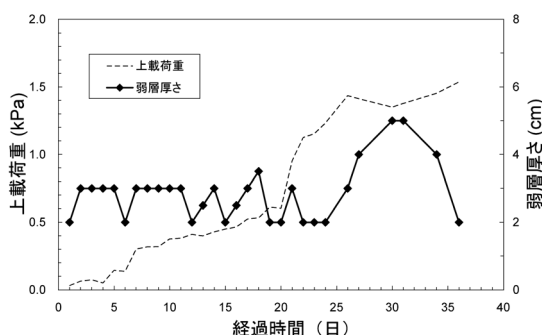


図 11 しもざらめ雪弱層にかかる上載荷重および弱層の厚さの時系列変化.

積雪層のせん断強度は, 第一義的には単位体積当たりの雪粒子の結合 (ボンド) の数とその太さによって決定される. 積雪後の等温変態過程・温度勾配変態過程・融解再凍結過程がこれらに対して複雑に影響すると考えられるが, ここでは雪粒子の結合の数を直接的に増加させるであろう, 上載荷重による弱層の圧縮について検討してみる. 図 11 は, 断面観測時に測定されたしもざらめ雪弱層の層厚と上載荷重の時間変化を表したものである. 弱層形成後 30 日付近で層厚が 5 cm に達しているが, この時期は 2 月末の融雪初期で弱層上はざらめ雪であったこと, また温度勾配の小さい積雪の底面近傍に位置していたことから, しもざらめ雪弱層がこの時期に発達したとは考えにくい. おそらく, しもざらめ雪弱層の母体となった新雪層の層厚の空間的不均一性によるものと思わ

れる. すなわち, 弱層の層厚は長期間にわたって 2-3 cm 程度を保っていたと推定される. しもざらめ雪は圧縮粘性係数が小さいことが知られており (小島, 1956), 霜結晶が縦方向に連なる構造を有することから (図 3a), 圧密によって粒子同士の結合が増加しにくかったと考察される.

#### 4. おわりに

札幌で観測されたしもざらめ雪弱層, あられ弱層, 降雪結晶弱層の数例について, せん断強度の指標である SFI の時間変化を調べ, 相互比較を行った. しもざらめ雪弱層は, 表面霜弱層の過去の報告例と同程度の, せん断強度の小さい状態が 1 ヶ月以上にわたって維持されていたことが分かった. これに対し, 降雪結晶弱層は最も早くせん断強度が増加し, あられ弱層はこれらの中間であることが示された. なお, 本研究で報告したしもざらめ雪弱層に関しては, Hirashima *et al.* (2004) が積雪変質モデル SNOWPACK のアルゴリズムを改良することで, 積雪表層での形成過程をおおむね再現することに成功している. このように, 本報告で示した弱層のせん断強度の時間変化を再現するプロセスを正確に積雪変質モデルに組み込み, 改良することは, 雪崩発生危険度の予測につながると期待される. 一方で, 降雪時の気象条件に左右されるあられや雲粒無し降雪結晶については, 石坂 (2007) が報告しているように, 降雪時の情報が得られる観測法, もしくは精度の高い予測法の開発もまた急務であると考え.

#### 謝 辞

本稿を執筆するにあたり, 当時の大学院生諸氏には積雪断面観測を手伝っていただいた. ここに感謝の意を表します.

#### 文 献

- Abe, O., 2004: Shear strength and angle of repose of snow layers including graupel. *Ann. Glaciol.*, **38**, 305-308.
- Abe, O., Xu, J., Liu, J., Hirashima, H., Mochizuki, S., Yamaguchi, S., Sato, T. and Sato, A., 2006: Shear strength of natural and artificial depth hoar layers. *Proceedings of the International Snow and Science Workshop*, 7-14.



- 阿部 修・望月重人・平島寛行・佐藤篤司, 2007: こしもぞらめ雪の剪断強度の定式化. 寒地技術論文・報告集, **23**, 126-129.
- 阿部 修・平島寛行・望月重人, 2009: 等温変態下におけるしもぞらめ雪の剪断強度の回復実験. 雪氷研究大会 (2009・札幌) 講演要旨集, p 208.
- 秋田谷英次・遠藤八十一, 1998: 雪崩の発生機構. 気象研究ノート, 日本気象学会, **190**, 3-17.
- 秋田谷英次・清水 弘, 1987: 積雪内の弱層形成に関する観察事例. 低温科学, 物理篇, **46**, 67-75.
- 秋田谷英次・清水 弘・成瀬廉二・福沢卓也, 1990: ニセコ雪崩 (1990.1) の積雪と気象条件からみた発生機構. 低温科学, 物理篇, **49**, 15-23.
- Birkeland, K.W., 1998: Terminology and predominant processes associated with the formation of weak layers of near-surface faceted crystals in the mountain snowpack. *Arct. Alp. Res.*, **30** (2), 193-199.
- Birkeland, K.W., Johnson, R.F. and Schmidt, D.S., 1998: Near-surface faceted crystals formed by diurnal recrystallization: a case study of weak layer formation in the mountain snowpack and its contribution to snow avalanches. *Arct. Alp. Res.*, **30** (2), 200-204.
- Davis, R.E., Jamieson, B., Hughes, J. and Johnston, C., 1996: Observations on buried surface hoar - persistent failure planes for slab avalanches in British Columbia, Canada. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 81-85.
- Fierz, C., 1998: Field observation and modelling of weak-layer evolution. *Ann. Glaciol.*, **26**, 7-13.
- Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K. and Sokratov, S.A., 2009: The International classification for seasonal snow on the ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1, UNESCO-IHP, Paris, 80pp.
- Fukuzawa, T. and Akitaya, E., 1993: Depth-hoar crystal growth in the surface layer under high temperature gradient. *Ann. Glaciol.*, **18**, 39-45.
- Geldsetzer, T., Jamieson, B. and Johnston, C., 1998: Experience with microphotography of buried surface hoar. *The Avalanche Review*, **17** (2), 6-8.
- 八久保晶弘・秋田谷英次, 1996: プレート降雪結晶の弱層のせん断強度変化. 北海道の雪氷, **15**, 70-73.
- Hachikubo, A. and Akitaya, E., 1997: Effect of wind on surface hoar growth on snow. *J. Geophys. Res.*, **102** (D4), 4367-4373.
- Harper, J.T. and Bradford, J.H., 2003: Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **37**, 289-298.
- Hirashima, H., Nishimura, K., Baba, E., Hachikubo, A. and Lehning, M., 2004: SNOWPACK model simulations for snow in Hokkaido, Japan. *Ann. Glaciol.*, **38**, 123-129.
- Hirashima, H., Abe, O., Sato, A. and Lehning, M., 2009: An adjustment for kinetic growth metamorphism to improve shear strength parameterization in the SNOWPACK model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **59** (2-3), 169-177.
- 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, 349pp.
- 石坂雅昭, 2007: 降雪取り込み型低温室を利用した弱層形成降雪粒子の観測. 雪氷, **69**, 481-488.
- Jamieson, B. and Geldsetzer, T., 1999: Patterns in unexpected skier-triggered avalanches. *Avalanche News*, **58**, 7-17.
- Jamieson, B. and Johnston, C.D., 2001: Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. *Ann. Glaciol.*, **32**, 59-69.
- Jamieson, B. and Langevin, P., 2004: Between a slab and a hard layer: Part 3 - Two field studies of facets growing above wet layers. *Avalanche News*, **72**, 48-51.
- 木下誠一・若浜五郎, 1959: アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77-96.
- 小島賢治, 1956: 積雪層の粘性圧縮Ⅱ. 低温科学, 物理篇, **15**, 117-135.
- 松岡健一, 1993: あられを滑り層とする表層雪崩 ネパールヒマラヤにおける観測報告. 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p 186.
- McElwaine, J., Hachikubo, A., Nemoto, M., Kaihara, T., Yamada, T. and Nishimura, K., 2000: Observations and simulations of the formation of the faceted snow crystals in the weak-layer of the 1998 Niseko Haru no Taki avalanche. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **31** (3), 235-247.
- 日本雪氷学会編, 2010: 積雪観測ガイドブック. 朝倉書店, 136pp.
- 尾関俊浩・八久保晶弘・岩花 剛・中村一樹・樋口和生・大西人史・佐々木大輔・秋田谷英次, 2008: 2007年11月に北海道上ホロカメットク山で連続発生した雪崩. 雪氷, **70**, 571-580.
- Schweizer, J. and Jamieson, J.B., 2001: Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **33** (2-3), 207-221.
- 山口 悟・西村浩一・納口恭明・佐藤篤司・和泉薫・村上茂樹・山野井克己・竹内由香里・Lehning, M., 2004: 上高地乗鞍スーパー林道で発生した雪崩

- (2003 年 1 月 5 日) の調査報告. 雪氷, **66**, 51-57. 吉田順五, 1960: 日射による積雪の内部融解. 低温科学, 山野井克己, 2005: あられ層のせん断強度と寿命. 日本物理編 **19**, 97-110.  
雪氷学会全国大会講演予稿集, p 83.

## Field observation of weak layers of depth hoar, graupel and rime-free crystals

Takuya KAIHARA<sup>1)</sup>, Akihiro HACHIKUBO<sup>2)</sup>, Toshihiro OZEKI<sup>3)</sup>,  
Kouichi NISHIMURA<sup>4)</sup> and Eizi AKITAYA<sup>5)</sup>

*1) Member of the Japanese Society of Snow and Ice,  
3-9-6-305, Takada, Toshima-ku, Tokyo 171-0033*

*2) New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology,  
165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507*

*3) Sapporo Campus, Hokkaido University of Education,  
5-3 Ainosato, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 002-8502*

*4) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601*

*5) Seppyo Network,  
Minami 4 Nishi 6-11-2, Chuo-ku, Sapporo, Hokkaido 064-0804*

**Abstract:** Although a weak layer in deposited snow is one of the causes of slab avalanches, only a few attempts have been made to study their metamorphism over a long period. We observed weak layers of depth hoar, graupel, and rime-free crystals in Sapporo, Japan, during two winter seasons and measured the time variations of their SFI (shear frame index). The shear strength of the weak layers of depth hoar and graupel remained low in contrast to that of rime-free crystals. The thickness of the depth hoar layer did not change for an entire month. We hypothesized that the low compressibility of depth hoar is the reason for its low shear strength.

(2010 年 12 月 2 日受付, 2011 年 1 月 15 日改稿受付, 2011 年 1 月 31 日受理, 討論期限 2011 年 9 月 15 日)