

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：10102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12488

研究課題名（和文）表面霜の結晶形と成長量が雪崩斜面の安定度に与える影響に関する研究

研究課題名（英文）Studies on the effect of grain shape and grain size of surface hoar on the stability of avalanche slope

研究代表者

尾関 俊浩（Ozeki, Toshihiro）

北海道教育大学・教育学部・教授

研究者番号：20301947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：表面霜とは水蒸気が積雪表面に凝結した結晶で、雪崩の原因となる。本研究では風洞型表面霜生成装置を開発し、気象条件による表面霜の結晶形の違いと成長量を観測した。装置の改良により2cmを超える表面霜まで生成した。さらに扇、樹枝角板中間型、コップ、シダ、針などの結晶形の生成に成功した。表面霜を人工降雪により埋没させてシアーフレームテストを行った結果、表面霜が2mm以下の小さな領域ではせん断強度は表面霜の成長とともに減少する傾向があった。表面霜層への上載積雪の入り込みを観察した結果、入り込みが多いと弱層にはならず、表面霜が成長することにより上載積雪は入り込めなくなり、弱層が形成されることが示された。

研究成果の概要（英文）：The surface hoar layer is known to be one of the most typical weak layer for dry slab avalanches. In order to investigate the features of surface hoar layer, we developed apparatuses that make surface hoar artificially using circuit wind tunnels. Surface hoar was grown on the snow surface using the high water vapor pressure air and the cooled snow surface on the cooling panel. The shapes of the artificially grown surface hoar crystals were sector, plane, column, cup, and needle.

After growing the surface hoar, new snow particles were piled up on the surface hoar layer. Shear frame tests were carried out after sintering snow. Focus on the results of the grain size was 2 mm or less, the shear frame index tended to decrease with increase the grain size of surface hoar. Cross-sectional observations revealed that small surface hoar crystal was buried under additional snow particles. On the other hand, additional snow particles could not enter the layer of large surface hoar crystals.

研究分野：雪氷学，自然災害科学，雪氷災害

キーワード：表面霜 雪崩 弱層 雪氷災害 自然災害

1. 研究開始当初の背景

表面霜とは、空気中の水蒸気が積雪表面に昇華凝結して生成された霜結晶のことである(図1)。表面霜は柱が林立した層を形成し力学的強度が弱いことから、降雪により積雪中に埋没した場合表層雪崩の原因となることが知られている。スキューターの引き起こす雪崩の約1/3が表面霜由来であるという報告もある(Birkeland, 1998)。積雪の科学研究と雪崩の発生機構の観点から、表面霜に関する研究はこれまで数多くなされてきた。Hachikubo and Akitaya (1997)は野外観測により、表面霜の発達しやすい気象条件を示した。A. E. Slaughter *et al.* (2011)は表面霜の生成が相対湿度、雪面温度、雪面と空気の温度差、風速、長波放射(下向き)に依存することを示した。しかし表面霜結晶は頻繁には生成されないため、その定量的な研究は多くはなされていなかった。特に、温度・湿度・風速と結晶形の関係や、結晶の大きさ、面密度、結晶方向とせん断強度との関係は研究が進まず、未解明の課題であった。

表層雪崩の原因となる弱層は、表面霜、しもざらめ雪、あられ、ぬれざらめ雪、雲粒の付いていない降雪結晶が知られていた。しもざらめ雪の研究は先行して進み、現在は降雪結晶のうち弱層として働くもの、働かないものの研究が鋭意進められている。一方、いままでの積雪分類では、表面霜はひとくくりの分類でしかなかった。雪の結晶が多様なように霜の結晶も多様である。表面霜の結晶形に大きな違いがあるならば、弱層としての働き(せん断強度)が異なっていることが予想されるが、そのような観点で行われた研究はなかった。人工的に表面霜を生成し、破壊強度の試験を行う研究はこの研究が初めてで、先駆的研究であった。

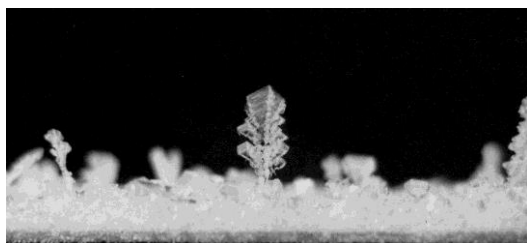


図1 約2mmの表面霜の成長した雪面。

2. 研究の目的

本研究では(1)表面霜の結晶形に関する研究と、(2)表面霜が弱層となった場合の雪崩斜面の安定度に関する研究を行う。まず、表面霜を人工的に成長させる装置を開発し、気温、雪温、湿度勾配、風速により現れる表面霜の結晶形の違いと成長量を明らかにする。第2に作成した表面霜を積雪で挟んだサンドイッチ構造の積雪層を作成し、雪崩斜面の安定度を与えるせん断破壊試験を行う。積雪内部の構造はX線CTにより高空間分解能で3次元撮像を行い解析する。表面霜の結晶

分類はいまだ行われておらず、その強度に違いがあるのかも解明されていない。本研究は表面霜の結晶形、大きさ、結晶方位とせん断破壊強度の関係を与える先駆的な研究である。

3. 研究の方法

(1)表面霜の結晶形に関する研究は、国内では表面霜は希にしか大きく成長しないので、人工的に成長させてその弱層としての性質を計測した。人工雪作製装置を参考に、水蒸気供給方法を移流型とした風洞型表面霜作製装置を作成し、一定の条件下で生成された表面霜の成長過程を追った。表面霜は放射冷却と、高い湿度、微風の環境下でよく成長することが知られている。風洞型人工表面霜生成装置では放射冷却に換えて冷媒により雪面を冷却し、低温風洞内で水蒸気を供給しながら霜の成長を促した。これにより気象条件(温度・温度差・湿度・風速)と結晶形、成長速度との関係を明らかにした。

チャレンジングなプロトタイプの実験装置の作成、実験方法の研究を北海道教育大学にある低温実験室がない(図2)、実験の規模を拡大したり、人工降雪を用いたり、X線CTとMRIを用いた実験は防災科研雪氷防災研究センターの雪氷防災実験棟(CES)で行った(図3)。

(2)表面霜が弱層となった場合の雪崩斜面の安定度、すなわちせん断破壊強度に関する研究は、表面霜作成装置を用いて条件を整えて作成した表面霜に、人工降雪により新雪を

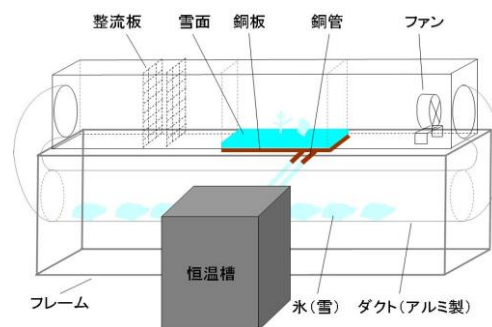


図2 風洞型表面霜作成装置の概略図。北海道教育大学の仕様。

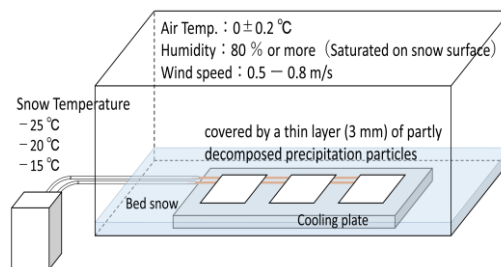


図3 大型表面霜作成装置の概略図。雪氷防災研究センターCESの低温風洞の仕様。



図 4 小型シアーフレームによるせん断破壊試験。雪氷防災研究センターCES.

上載させたうえで表面霜のせん断破壊実験を行った。せん断強度の計測には、広く積雪のせん断破壊計測で行なわれるシアーフレームを用い、シアーフレームインデックス (SFI: 剪断強度指数) で評価した。表面霜の弱層はたいへん弱く、またせん断試験を人工表面霜上で効率よく行うことが必要であったので、軽くて小型のシアーフレームを開発してせん断試験に用いた (図 4)。結晶形が剪断破壊強度の結果に大きく影響することが予想されたので、表面霜の結晶形を変えた実験を試みた。最後にこれまで得られた表面

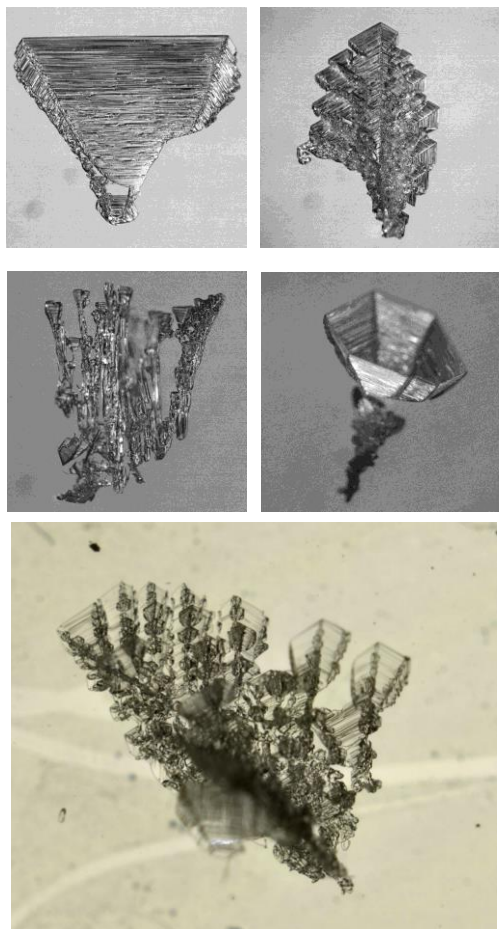


図 5 様々な結晶形が見られる人工表面霜.

霜のせん断破壊実験の結果を統合し、結晶の大きさとせん断強度の関係を求めた。内部の構造は X 線 CT を用いて高空間分解能の 3 次元撮像により詳細に解析を行った。

4. 研究成果

初期に開発した風洞型表面霜生成装置は粒径 2mm 程度の結晶が主体であった。欧米ではしばしば 1cm を超える表面霜が観察されることから、装置の温度勾配と水蒸気量を大きくするように改良を施し、最終的には 2cm を超える大粒径の表面霜を成長させることに成功した。さらに扇、樹枝角板中間型、コップ、シダ、針などの様々な結晶形の生成に成功した (図 5)。これにより気象条件による表面霜の結晶形の違いと成長量との関係が明らかとなった。

表面霜を人工降雪により埋没させてサンドイッチ構造とした積雪層のせん断破壊試験では、表面霜の大きさと SFI (剪断強度指数) の間の関係を見いだした。表面霜が 2mm 以下の小さな領域ではせん断破壊強度は表面霜の成長とともに減少する傾向があった (図 6)。一方、2mm 以上大きくなるとせん断強度は表面霜の大きさに対する依存性が不明瞭となった。また、表面霜へ降雪させる雪質がせん断強度に影響することが示された。さらに X 線 CT により表面霜層への上載積雪の入り込みを観察した結果、弱層とならない場合は上載積雪の表面霜層への入り込みが多いことがわかった。表面霜が成長することにより上載積雪は表面霜層へ入り込めなくなり、弱層が形成されることが示された。この効果は上載積雪の雪質にも依存することが示唆された。

本研究を発展させて雪面温度、雪面と空気の温度差、水蒸気勾配、風速の条件により表面霜の結晶形と成長量がわかれば、成長シミュレーションを行うことが可能となる。さらに結晶形、結晶の大きさ、上載積雪の雪質からそのせん断破壊強度が予測できれば、今後の斜面積雪の安定性解析 (雪崩予測) に役立つことが期待される。

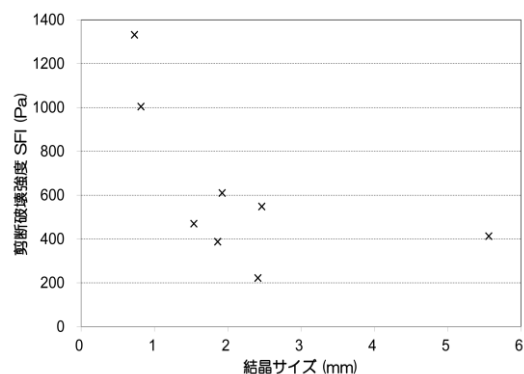


図 6 表面霜の粒径 (高さ) と SFI の関係.

<引用文献>

- 1) Birkeland, K.W., 1998. Arctic and Alpine Research, 30(2), 193-199.
- 2) Hachikubo, A., Akitaya, E., 1997. J. Geophysical Research, 104(D4), 4367-4373.
- 3) Slaughter, A.E. and 10 others, 2011. J Glaciology, 57, 441-452.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① 藤田恭輔, 尾関俊浩, 安達聖, 富樫数馬, 風洞型表面霜作成装置の開発—大粒径の人工表面霜—. 北海道の雪氷, 査読無, 37, 2018, 印刷中.
- ② 三浦辰也, 尾関俊浩, 安達聖, 富樫数馬, 積雪における可視光の透過実験—青い雪—. 北海道の雪氷, 査読無, 36, 2017, 93-96.
- ③ 八代裕平, 尾関俊浩, 風洞型装置により生成した表面霜の剪断強度. 北海道の雪氷, 査読無, 34, 2015, 23-26.

[学会発表] (計 8件)

- ① 藤田恭輔, 尾関俊浩, 安達聖, 富樫数馬, 風洞型表面霜作成装置の開発—大粒径の人工表面霜—. 日本雪氷学会北海道支部, 2018.
- ② 尾関俊浩, 八代裕平, 仲條莉央, 安達聖, 表面霜の成長量が積雪の剪断強度に与える影響—人工表面霜による実験—. 第36回日本自然災害学会年次学術講演会, 2017.
- ③ 尾関俊浩, 八代裕平, 仲條莉央, 安達聖, 大型低温風洞による表面霜の生成とせん断破壊実験. 雪氷研究大会(2017十日町), 2017.
- ④ 三浦辰也, 尾関俊浩, 安達聖, 富樫数馬, 積雪における可視光の投下実験—青い雪—. 日本雪氷学会北海道支部, 2017.
- ⑤ 八代裕平, 尾関俊浩, 安達聖, 中村一樹, 風洞型装置により生成した人工表面霜のせん断強度に関する研究 雪質の異なる上載積雪を使用した場合. 雪氷研究大会(2016名古屋), 2016.
- ⑥ T. Ozeki, Y. Yashiro, M. Tsuda, S. Adachi, K. Nakamura, Shear strength tests of artificial surface hoar formed in a wind tunnel. International Snow and Avalanche Symposium in Niseko,

2015.

- ⑦ 八代裕平, 尾関俊浩, 安達聖, 中村一樹, 望月重人, 人工発生表面霜の剪断強度に関する研究. 雪氷研究大会(2015松本), 2015.
- ⑧ 八代裕平, 尾関俊浩, 風洞型装置により生成した表面霜の剪断力に対する強度. 日本雪氷学会北海道支部, 2015.

[図書] (計 1件)

- ① 中村一樹, 尾関俊浩, 榊原健一, 大西人史, 阿部幹雄, 山と溪谷社, 雪崩教本. 2017, 143pp.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾関 俊浩 (OZEKI, Toshihiro)
北海道教育大学・教育学部・教授
研究者番号: 20301947

(2) 研究分担者

中村 一樹 (NAKAMURA, Kazuki)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・その他部局等・主任研究員
研究者番号: 50725231

高橋 庸哉 (TAKAHASHI, Tsuneya)
北海道教育大学・教育学部・教授
研究者番号: 60236297

安達 聖 (ADACHI, Satoru)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・その他部局等・特別研究員
研究者番号: 80719146

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

八代 裕平 (YASHIRO, Yuhei)

仲條 莉央 (NAKAJO, Rio)

藤田 恭輔 (FUJITA, Kyosuke)

富樫 数馬 (TOGASHI, Kazuma)