風洞型人工表面霜生成装置による大きな成長速度の表面霜の観察

Observation of surface hoar with large growth rates by artificial surface hoar production system

横田 尚也¹, 尾関 俊浩² Naoya Yokota¹, Toshihiro Ozeki² Corresponding author: d14635k2@stu.hokkyodai.ac.jp (N. Yokota)

Artificial surface hoar crystals were formed under conditions in which the supply of water vaper was increased or a larger temperature gradient was applied than in the past experiments. As a result, fern-like and needle type surface hoar crystals with a grain size larger than 10 mm could be produced. On the other hand, there have been cases where hoar frost has formed inside the aluminum duct on the windward side of the cooling plate, causing the duct to become blocked.

1. はじめに

面発生表層雪崩の弱層として、表面霜層が働く 場合があることが知られている. Schweizer and Jamieson¹⁾によると、スイスとカナダで発生した スキーヤーが原因の雪崩の弱層のうち、82%が表 面霜であった.しかし、日本ではスラブ雪崩を引 き起こすほど大きく成長する表面霜はあまり観 察されない. Ozeki *et al.*²⁾は、北海道で2007年 から2017年の10年間に起こった13件の雪崩の 弱層について調査をしたが、表面霜は発見されな かった.そこで、我々は回流型小型風洞装置(図 1)を用いて低温室内で人工表面霜を生成させ、 表面霜による弱層を調査するために、表面霜の結 晶形の観察や剪断破壊強度の実験をしてきた.

Ozeki et al. ³⁾によると、これまで北海道教育大 学での人工表面霜の生成は、積雪表面の温度が -10℃から-30℃、かつ温度勾配が40℃m⁻¹から 230℃m⁻¹の範囲で行われていた.そこで本研究 では、これまで行われてきた実験よりも水蒸気輸 送量の多い条件で実験を行い表面霜を観察する ことを目的とした.成長速度の大きな表面霜の結 晶は我々が雪結晶の観察を行う旭岳温泉六稜山 荘付近でも見られている(図 2).大きく発達し た表面霜の結晶は温泉の流れ込む川のそばで見 られることが多く、雲粒付きの結晶が見られる場 合もある.そこで、図1の装置を改良して、従来 よりも大きな表面霜を成長させるために、水蒸気 輸送量を多くした実験を行った.



図1 低温室に設置した風洞装置の概要.



図 2 旭岳温泉六稜山荘で撮影された雲粒付き の表面霜 (2012).

¹北海道教育大学大学院教育学研究科

²北海道教育大学札幌校

Graduate School of Education, Hokkaido University of Education Sapporo Campus, Hokkaido University of Education

北海道の雪氷 No.43 (2024) Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

2. 実験方法

低温室に設置した風洞装置(図 3)を用いて, 表面霜を生成させた.表面霜を一晩以上おいて成 長させ,10個程度表面霜を採取し,寸法を測るた めに撮影した.撮影はデジカメ(OLYMPUS TG-6)の深度合成モードを用いて接写した.撮影し た表面霜の写真の一例を図4に示す.寸法の計測 にはImageJを用いた.表面霜層は剪断破壊強度 試験を行うため人工雪を擬似降雪させ,24時間 ほど焼結を行った.本解析ではシアフレームの試 験結果は用いない.

表面霜の結晶形や成長速度を変えるために,恒 温槽の温度や水溜めに入れる投げ込みヒーター の設定温度,装置の稼働時間等を調整した.低温 室は実験2を除く全ての実験は-5℃に設定し, 実験2のみ-15℃に設定した.



図3 低温室に設置した風洞装置.



図4 撮影した表面霜結晶の例(実験8).

3. 実験結果

実験は全部で8回行った.そのうち実験データ のそろった7回分について表1にまとめる.観察 された結晶はいずれも大きく,10mmを超えるも のも多く見られた.結晶形は,実験2,5,7にお いてシダ状の結晶が見られた.また実験3では針 状と扇,実験4では扇に混じって御幣,実験6で は複合型,実験8では扇に混じって複合型の表面 霜が見られた.

実験 2 から 8 までの表面霜の平均成長速度は 0.29 mm h⁻¹であったが,実験 2 では 0.54 mm h⁻¹ と平均よりも 0.25 ポイント大きく,おおよそ倍 の速度で成長したことが分かった.また,実験 2 で採取した 10 個の表面霜の平均長さは 11.9 mm であり,全実験の中で最大だった.しかし,実験 2 では,アルミダクトの出口に霜が成長し,水蒸 気輸送を妨げる現象が見られた(図 5).また,実 験 2 で成長した表面霜には雲粒が付いていた(図 6).

実験8は平均霜長さが9.1 mmと実験2に次い で大きかった.しかし,成長速度が0.20 mm h⁻¹と 平均よりも低い値を示した.実験8では,恒温槽 温度を-35℃と全実験の中で最も低くし,なおか つ,稼働時間を46時間と他の実験よりも倍の長 さとした.表面霜の層は,図7に示すように,表 面霜が横倒しになった層の上に別の表面霜が成 長した構造であることが観察された.

成長速度が平均よりも低かった実験 6 及び実 験8は、いずれも稼働時間が46時間程度であり、 実験6,8を除いた実験の平均である24時間より も稼働時間が十分長くなると平均成長速度が遅 くなることが分かった.

П	風洞温 度 [℃]	恒温槽 温度 [℃]	水溜め 温度 [℃]	平均 霜長さ [mm]	成長速 度 [mm h ⁻¹]
2	-1.0	-30.0	30	11.9	0.54
3	-2.7	-20.0	20	7.3	0.27
4	エラー	-20.0	25	7.5	0.30
5	0.3	-20.0	20	7.5	0.30
6	1.1	-23.0	20	6.5	0.14
7	-0.6	-20.0	20	7.4	0.30
8	-3.6	-35.0	20	9.1	0.20

表 1 実験の諸条件と表面霜の長さ・成長速度.



図5 実験2でダクト出口に見られた霜.



図6 実験2で見られた雲粒付きの表面霜.



図7 実験8で見られた2層の表面霜層.



図8 実験8の倒れた表面霜層をバラして撮影.

-89-

実験3,4,5,7では平均霜長さ及び成長速度が ほとんど揃っており,再現性が高かった.これらの 実験で成長した表面霜の平均長さは,7.3~7.5 mm と非常に狭い範囲に収まった.また,これらの実験 では,稼働時間を24~27時間の間に揃えていたこ とから,温度勾配等の条件を揃え,さらに,稼働時 間も揃えることで,表面霜の成長速度を制御できる ことがわかった.

4. 考察

実験2において,表面霜の成長速度が大きかった 要因は,雪面温度と低温室温度の温度勾配が大きか ったこと,そして水蒸気輸送量が多かったことだと 考えられる.しかしこの実験条件では,表面霜を成 長させるチャンバーに入る前にアルミダクトで霜 が発生してしまい,実験後半は成長速度が鈍化した と推察される.以上の理由から,実験2のような水 蒸気輸送量が多く,雰囲気温度が低い条件では,冷 却板上での霜の安定的な成長速度を保つことは難 しいであろう.これらの問題を解決することができ れば,川近くで見られる雲粒付きの表面霜を表面霜 生成装置で安定して生成させられる可能性がある.

実験8において,表面霜層が横倒しになった層と その上に表面霜層ができたのは,装置の温度勾配が 大きかったこと及び稼働時間が長かったことが要 因であると考えられる.稼働時間が長いと,成長し た表面霜が倒伏してしまい,その上にさらに新たな 表面霜が生成し,下の表面霜は埋もれてしまって2 層構造になることが推察された.したがって,倒れ た表面霜の長さは結晶の長さに考慮されないため, 成長速度が遅くなったのであろう.倒れた表面霜層 はそのまま観察すると降雪層のように見えるが,図 8にあるように採取してバラすと,表面霜の結晶形 が残っている様子が見られ,初期に成長した表面霜 結晶であることが分かる.

実験 3, 4, 5, 7 においては,表面霜の成長速度 が 0.27 mm h⁻¹から 0.30 mm h⁻¹と小さい範囲内に収 まっていたことから,安定的な水蒸気輸送が行われ ていたと考えられ,この装置の構成に適した条件で あった.

ここからは温度勾配や雪面温度について考察する. 今回の実験 2~8 では, ベースとなる雪面の温度をモニタリングしていなかったため,予備実験における恒温槽と雪面の温度差より雪面温度を推定し, Ozeki *et al.*³のグラフにプロットした(図 9).

北海道の雪氷 No.43 (2024)

Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

Ozeki*et al.*³⁾ では, 10 cm 高さの温度が0℃よりも低い条件で表面霜の成長が行われていたが, 今回の実験では7回中2回の実験でチャンバー内温度が0℃以上であった. 雪面温度は–15 ℃から–25 ℃の範囲であり, これまで行われた実験よりも範囲が狭かったものの, 10 cm 高さでの温度が今までの実験よりも高い条件であり(図9の上部に分布), 温度勾配が100 ℃ m⁻¹から240 ℃ m⁻¹の範囲であり, 水蒸気輸送量が大きい条件で実験が行えていた特徴が現れている. 一方, 表面霜を成長させるチャンバーの天井や側面等に水滴が付いている現象が見られた

(図10).水蒸気輸送量は,投げ込みヒーターの設 定温度に依存していると考えられ,上で述べたよう な水滴は設定温度が28 ℃以上の時に見られたこと から,水蒸気輸送量が過剰であることを示唆してい る.また,雲粒付きの表面霜は実験2 で見られたが, 同じく水蒸気輸送量が多かった実験8 では見られ なかった.2 実験での条件の違いは低温室の雰囲気 温度であり,実験2は-15℃,実験8は-5℃であっ た.よって,雲粒付きの表面霜が生成する条件は, 水蒸気輸送量が多く,気温が低いときである可能性 がある.一方で,気温が低いと,図5のように,ダ クト内など意図していない場所に霜が出来てしま い,安定的な水蒸気輸送の観点から課題がある.

5. まとめ

本研究では,従来よりも高い水溜め温度による水 蒸気量増加や、大きな温度勾配、低い温度環境での 人工表面霜結晶の成長を試みた. その結果, 10mm を超える大粒径のシダ状や針状の表面霜結晶を生 成することができた.一方で、表面霜が成長する冷 却板のあるチャンバーの手前で,アルミダクト内に 霜が成長してダクトを閉塞して, 流量が低下したと 推察される例が見られた. 今後の課題は、水蒸気量 が多い条件下において,冷却板上の表面霜ではない 部分に霜が成長する現象を回避することである.こ のような現象が起こってしまうと、表面霜の成長を 制御することが難しくなってしまうため、水蒸気輸 送量の多い実験を行う上では実験装置の改良が必 要であることが明らかとなった.また,雲粒付きの 表面霜の生成条件は十分に解明されなかったので, 今後の課題である.

【謝辞】

本研究の遂行にあたり,防災科学技術研究所新庄 雪氷防災研究支所から人工雪を提供していただい た.ここに記して感謝の意を表す.本研究の一部は JSPS 科研費 24K07148 の助成を受けた.



図9 雪面温度と温度勾配による表面霜のダイヤグ ラム.丸印が本実験. Ozeki et al.³⁾を改変・追記.



図10 表面霜を生成するチャンバー天井の水滴.

【参考文献】

- J. Schweizer and J.B. Jamieson, 2000: Field Observations of Skier-triggered Avalanches, *Proc.* of International Snow Science Workshop 2000, 1-8.
- T. Ozeki and 15 others, 2018: Characteristics of Weak Layers of Slab Avalanches that Occurred in Hokkaido in the Decade from 2007 to 2017, *Proc. International Snow Science Workshop 2018*, 997-1000.
- T. Ozeki, M. Tsuda, Y. Yashiro, K. Fujita and S. Adachi, 2020: Development of artificial surface hoar production system using a circuit wind tunnel and formation of various crystal types, *Cold Reg. Sci. Tech.*, **169**, 1-7.