

風洞型表面霜作製装置の開発—大粒径の人工表面霜—

Artificially formed surface hoar in wind tunnel experiments

—Improvement for large surface hoar production—

藤田恭輔 (北海道教育大学札幌校*), 尾関俊浩 (北海道教育大学札幌校)

安達聖 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

富樫数馬 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

Kyosuke Fujita, Toshihiro Ozeki, Satoru Adachi, Kazuma Togashi

1. はじめに

2017年3月27日に栃木県那須町茶臼岳で高校生ら8名が死亡した雪崩のように、スキーヤーや登山者などが雪崩に巻き込まれる事故が絶えない。日本ではこしもざらめ雪などの霜系結晶が表層雪崩の原因となることが多く、7~8割が霜系結晶によるものである¹⁾。Schweizer and Jamieson²⁾によると、カナダ、スイスでの統計では表層雪崩に関係した弱層のうち82%が霜系の結晶であり、その中でも表面霜の割合が全体の約半分を占めていた。このように、表面霜は雪氷災害を起こす原因となり得るものであるため、表面霜に関する研究が重要である。

表面霜は、空気中の水蒸気が雪面に昇華凝結してできた氷結晶のことである。よく晴れた日に雪面で放射冷却が起こり、飽和水蒸気圧が下がる。そこへ微風によって水蒸気が輸送されることで雪面に表面霜が生成される。Hachikubo and Akitaya³⁾は野外観測により表面霜が良く成長する条件を、放射冷却 -60 W/m^2 以上、風速 $2\sim 3 \text{ m/s}$ 程度、相対湿度90%以上であることを示した。Slaughter *et al.*⁴⁾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、日本では表面霜が良く成長する条件が整うことはめずらしいため、表面霜の物性に関するデータが集まりにくかった。本研究では、人工風洞を用いて表面霜を生成し、その物性を測定する。津田・尾関⁵⁾は風洞を用いた人工表面霜の作製装置を開発し、表面霜の生成温度と雪面—気温間の温度勾配によって結晶形に違いが現れることを明らかにした。また、八代ら⁶⁾は人工表面霜の発生装置を大型風洞に応用し、コップの一面型の人工表面霜を用いて、表面霜の粒径(高さ)と剪断強度の関係についての研究を行った。その結果、表面霜が大きいほど、上載積雪が下層と接しにくくなり、剪断強度が弱くなることを示した。本研究では、風洞型表面霜作成装置を改良し、コップの側面型以外の結晶形の表面霜を生成し、発生条件による表面霜の結晶形の違いについて明らかにすること、さらに大粒径の人工表面霜の生成の特徴を明らかにすることを目的とした。

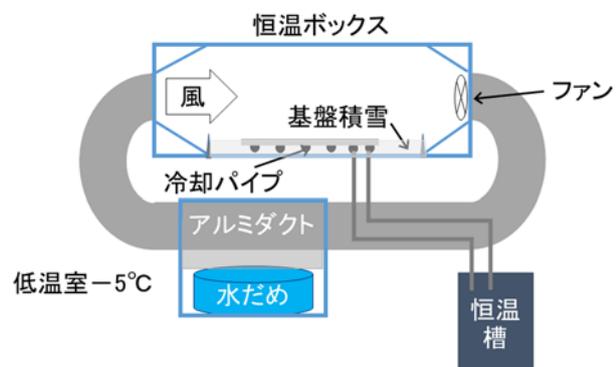


図1 風洞型表面霜作製装置1の模式図。

*現在 北海道札幌白陵高等学校

2. 実験装置

2.1. 人工表面霜作製装置の原理

本研究では、人工雪結晶作製装置を参考に、回流式低温風洞によって人工表面霜を生成した。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。風洞型人工表面霜作製装置では放射冷却による雪面冷却は難しいので、放射冷却に換えて雪面下に冷却板を入れ冷媒により雪面を冷却した。水蒸気の供給方法は移流型とし、低温風洞内に水蒸気源を作って水蒸気圧を高く保ちながら、雪面で飽和以上の水蒸気圧を実現し、霜を成長させた。今までの装置では粒径 2 mm 程度の結晶が主体で、大きくても 6 mm 程度であった。欧米ではしばしば 1 cm を超える表面霜が観察されることから、今回は装置を改良し、水だめとヒーターを用いて水蒸気量を大幅に増加させるようにして、霜の成長を促した。

2.2. 風洞型表面霜作成装置による大粒径の人工表面霜

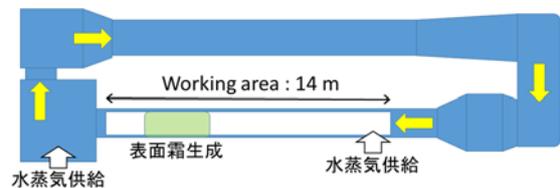
本研究では、2 つの実験装置を使用した。北海道教育大学札幌校の低温室においては実験装置の開発を主眼とした実験を行った。本実験の前身である津田・尾関⁵⁾の風洞では、低温室の温度で飽和水蒸気圧に近づけた空気を冷却板上に移流させることにより基盤積雪上に表面霜を成長させた。本実験では風洞内の水蒸気量を増やすために回流式風洞に改良を施した。実験装置の諸元を表 1 に、風洞型表面霜作製装置(実験装置 1)の模式図を図 1 に示す。風洞装置のワーキングエリアは、断熱材で覆われており、この両端をアルミダクトでつなぎ、ダクトの中間部にダクト内に水蒸気を供給するための水だめを設置した。水だめの温度は投込み型ヒーターにより 0℃から 20℃の範囲で任意の温度に調整した。小型ファンにより風洞内に送風し、整流柵を設けることにより、風速の鉛直分布を制御した。雪面近傍から風洞中央部までは風速が指数関数的に増加しており、接地境界層とみなせる。ワーキングエリアには冷却板を設置し、冷却パイプに恒温槽から冷媒を循環させることにより雪面温度をコントロールした。基盤積雪には屋外で採取した自然積雪を用いた。表面霜の成長時間は 20 時間前後であった。

表 1 実験装置 1 の諸元 (北海道教育大学)

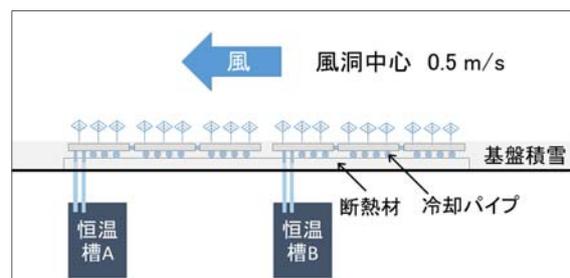
ワーキングエリア	
内寸	30 cm×30 cm×90 cm
風速	0~1 m/s
回流部	
ダクト	アルミ φ 150 mm
水蒸気	ダクト中間部で供給
冷却板	
面積	300 mm×395 mm 1 枚
恒温槽	
温度域	≧ -35 °C

表 2 実験装置 2 の諸元(防災科研 CES)

ワーキングエリア	
内寸	1 m×1 m×14 m
風速	0~20 m/s
回流部	
水蒸気	ワーキングエリア上流端及びワーキングエリア末端で供給
冷却板	
面積	300 mm×395 mm 6 枚
恒温槽	
A	≧ -25 °C
B	≧ -35 °C



(A)



(B)

図 2 CES における実験装置 2 の模式図。

(A)回流式風洞, (B)表面霜生成部。

第 2 の実験装置は防災科学技術研究所雪氷防災センターの雪氷防災実験棟(CES)にある低温風洞を使用した。CES での実験装置(実験装置 2)の諸元を表 2 に、実験装置の模式図を図 2 に示す。3 枚 2 セットの冷却板が 2 台の恒温槽で任意の温度に制御される仕様であり、1 回の成長実験で 0.72 m^2 の表面霜の成長面積を得られる。水蒸気の供給源は八代ら⁶⁾ではワーキングエリア末端 1 箇所であったが、本実験では風上端にも増設し、供給量を増加させた。基盤となる積雪には CES の人工雪の 2 種類を使用した。表面霜の成長時間は約 15 時間であった。

3. 結果と考察

3.1. 成長した結晶の種類

旧風洞の中心では相対湿度 90%前後であったが、本実験ではほぼ 100%か 100%を超えており、今までよりも大きな水蒸気量の条件下で成長実験を行うことができた。また、ファンを調節して今までよりも風の弱い環境化での成長実験を行った。これにより 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。さらにシダ状や針状やなど今までと異なる結晶形の生成に成功した。本実験で観察された表面霜はコップの側面型(plate)、樹枝角板中間型(sector)、シダ型(dendrite)、針型(needle)の 4 種類であった。

3.2. コップの側面型と樹枝角板中間型

コップの側面型(図 3 左)と樹枝角板中間型(図 3 右)は本実験においてよく観察された結晶であり、天然においてもよく観察される表面霜である。既往の風洞型表面霜作成装置でも生成している。コップの側面型は六角形のコップの側面が 1 面あるいは複数面成長したような形状である。雪面温度が比較的高い領域から生成するが、本実験では冷媒温度が $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ の低温領域のときにもよく観察できた。雪面から 10cm の風速が 0.4 m/s 以上のときに生成し、風速を大きくする程コップの側面型が良く生成した。本実験では、既往の研究よりも大きいものが生成したが、これは新風洞では水蒸気の供給量が増えたからだと考えられる。大きく成長したコップの側面型は 1 面が成長したものと、1 面型が複数連結して成長したものがあつた(図 4)。成長方向は c 軸方向に伸びながら a 軸方向にも広がっている⁷⁾。

樹枝角板中間型は結晶に中心軸があり、それを中心に扇状に成長し、側枝にコップの側面型と同型が見られる。すなわち、コップの側面型と成長軸が 30 度ずれている。雪面温度が低い領域で多く見られる結晶で、本実験の実験条件(冷媒温度 $-35 \text{ }^\circ\text{C}$; 低温室温度 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$)でよく観察できた。特に、10cm の風速が 0.2 m/s と、コップの側面型よりも低速領域で生成した。

3.3. シダ型と針型

シダ型(図 5)と針型(図 6)は本実験装置により生成が可能となった結晶である。風が弱く、水蒸気量が非常に多いときに生成される結晶であり、本実験では、雪面から 10cm の風速が 0.1 m/s と最も低速の条件で生成した。シダ型は結晶の中心に軸がありそれを中心に側枝として樹枝角板中間型が複数成長している。この軸は、樹枝角板中間型の中心と、コップの側

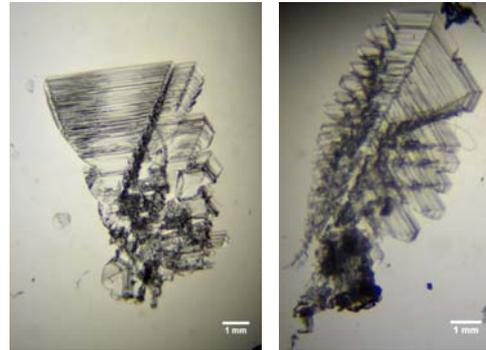


図 3 生成した表面霜。左：コップの側面型，右：樹枝角板中間型。

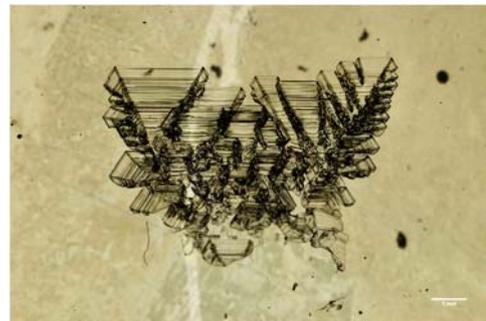


図 4 大きく成長した表面霜。コップの側面型が連続成長。

面型の軸と同じものと考えられる。

針型の表面霜には 2 種類あった。1 つは c 軸に成長した結晶であり、靴状のものも見られた。もう 1 つは樹枝角板中間型が扇状の広がりが乏しく、中心軸のみが成長したような結晶で、表面には凹凸が見られた。図 6 は後者である。本実験では、後者がよく観察された。

今回はシダ型、針型両方とも冷媒温度 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、低温室温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、雪面から 10cm の風速 0.1 m/s と同じ条件での成長であった。しかし水だめの温度に違いがあり、シダ型が $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、針型が $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ のときに生成した。相対湿度を計測した風洞中央では両方ともほぼ 100% を示しているものの、水だめの温度から勘案するとシダ型のほうがより水分量多い環境で成長したと考えられる。

3. 4. 風速と生成する表面霜の形状

図 7 に高さ 1 m に換算した風速と、生成した表面霜の形状を示す。コップの側面型は、風速が大きいときに成長しやすかった。風速が大きいと水蒸気輸送量が増加するので、この型は成長量が大きくなりやすいことが示唆される。シダ型や針型は無風に近い条件下で成長する。これよりも風速が大きくなり、側枝が複合して成長すると、樹枝角板中間型になると考えられる。

4. おわりに

本研究は、表面霜の成長機構について人工表面霜を用いて実験した。作成装置を改良して水蒸気の供給を増やしたことにより、大きな表面霜を成長させることに成功した。風速の違いにより成長する結晶の種類に特徴が見られ、本研究で作製が可能になったシダ型や針型は何れもほとんど無風の条件が必要であった。今後は表面霜の形によるせん断強度の違いに着目して調査する予定である。

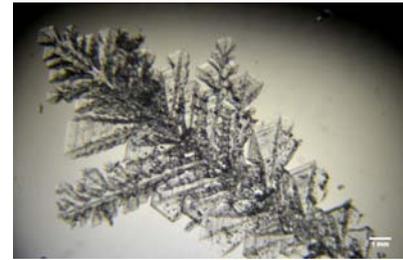


図 5 シダ型の表面霜。



図 6 針型の表面霜。

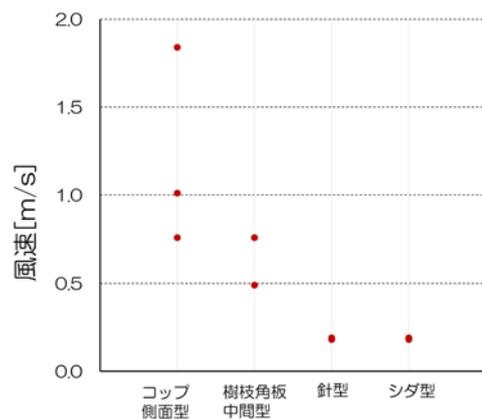


図 7 風速と生成する表面霜の形状。

【参考・引用文献】

- 1) 雪氷災害調査チーム, 雪崩事故防止研究会 (2017): 雪崩教本. 山と溪谷社, 144pp.
- 2) Schweizer, J., Jamieson, J.B. (2000): *Proc. Int. Snow Science Workshop*, 1-8.
- 3) Hachikubo, A., Akitaya, E. (1997): *J. Geophys. Res.* 104(D4), 4367-4373.
- 4) Slaughter, A.E., Adams, E.E., Staron, P.J., Shertzer, R.H., Walters, D.J., McCabe, D., Catherine, D., Henninger, I., Leonard, T., Cooperstein, M., Munter, H. (2011): *J. Glaciology*, 57, 441-452.
- 5) 津田将史, 尾関俊浩, 2012: 雪氷研究大会講演要旨集, P2-10, 207.
- 6) 八代裕平, 尾関俊浩, 安達聖, 中村一樹, 2016: 雪氷研究大会講演要旨集, P1-48, 242.
- 7) 尾関俊浩, 八代裕平, 仲條莉央, 安達聖, 2017: 雪氷研究大会講演要旨集, C4-9, 136.