

風洞型表面霜作製装置の開発

Development of a surface hoar crystal production system using circuit wind tunnel

津田将史 (北海道教育大学大学院 札幌・岩見沢校), 尾関俊浩 (北海道教育大学 札幌校)

Masashi Tsuda, Toshihiro Ozeki

1. はじめに

表面霜とは、晴れた日の夜間、積雪が放射冷却し、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。結晶生成後の降雪により、積雪中に埋没した表面霜の層は力学的に弱く、表層雪崩の原因となる。このため、表面霜に関する研究はこれまで数多くなされており、特に表面霜結晶の生成に関わる気象条件の研究は、今日においても積雪物性の主要テーマとして取り上げられている。しかし、表面霜は雪面の放射冷却・温度・風速という気象条件に起因するため¹⁾²⁾、肉眼で観察されるような結晶は頻繁には生成されず、その定量的な研究は多くはなされていない。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（単位面積当たりの結晶本数）・結晶方向と剪断強度との関係は研究が進んでいない。

人工雪作製実験において、中谷は装置を対流型にすることで水蒸気を供給し³⁾、小林は拡散的に水蒸気供給を行った⁴⁾。本研究では、これらの人工雪作製装置を参考にし、さらに、これまでに報告された表面霜生成に関わる気象条件の報告を基に水蒸気供給方法を移流型として表面霜の結晶作製装置の開発を行った。本稿では開発された装置と本装置を用いて作製された表面霜結晶の例を述べる。

2. 実験装置

2. 1. 表面霜の生成条件

表面霜の生成機構に関する研究はいくつかある。Hachikubo (1998) は野外観測により、放射冷却 (-60 Wm^{-2} 以下)、風速 ($2 \sim 3 \text{ ms}^{-1}$)、湿度 (90 %以上) の条件で良く生成することを示した。また、数値解析により、相対湿度が 80 %以上では風速に比例して雪面に対する水蒸気凝結量は上昇し、80 %以下では水蒸気凝結量を最大とさせる適切な風速があると結論付け、結晶生成に対する風速の重要性を示した¹⁾。A.E.Slaughter et al. (2011) は 3 冬季における表面霜が生成された 35 例の統計から、表面霜の生成は相対湿度、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²⁾。

2. 2. 装置の仕組み

表面霜の生成条件を基に装置の開発を行った。図-1 に実験装置の概略図を示す。装置は断熱材とアルミ製のダクトで回流式に作製され、大きさ（外寸）は縦 30 cm、横 90 cm、奥 30 cm であり、低温室内に設置される。

計測域の温度を制御するにあたり、低温室内での放射による雪面の冷却は不可能である。本装置では、金属プレート（アルミ製）の下部に銅管を蛇行させて取り付け、その銅管内に恒温槽で温度管理した冷媒アルコールを循環させることで、雪面を任意の温度に設定可能にした。また、ダクトがアルミ製のため、低温室内の温度によって風洞装置内の温度が制御さ

れる．上述したように表面霜形成に際して風の条件が重要と考えられるため，装置内にファンを設置し，装置の形状を回流式風洞型にすることで風を循環できるシステムとした．風洞内を循環する風はダクト内の氷片上を通過し，装置内の湿度を上昇させる．

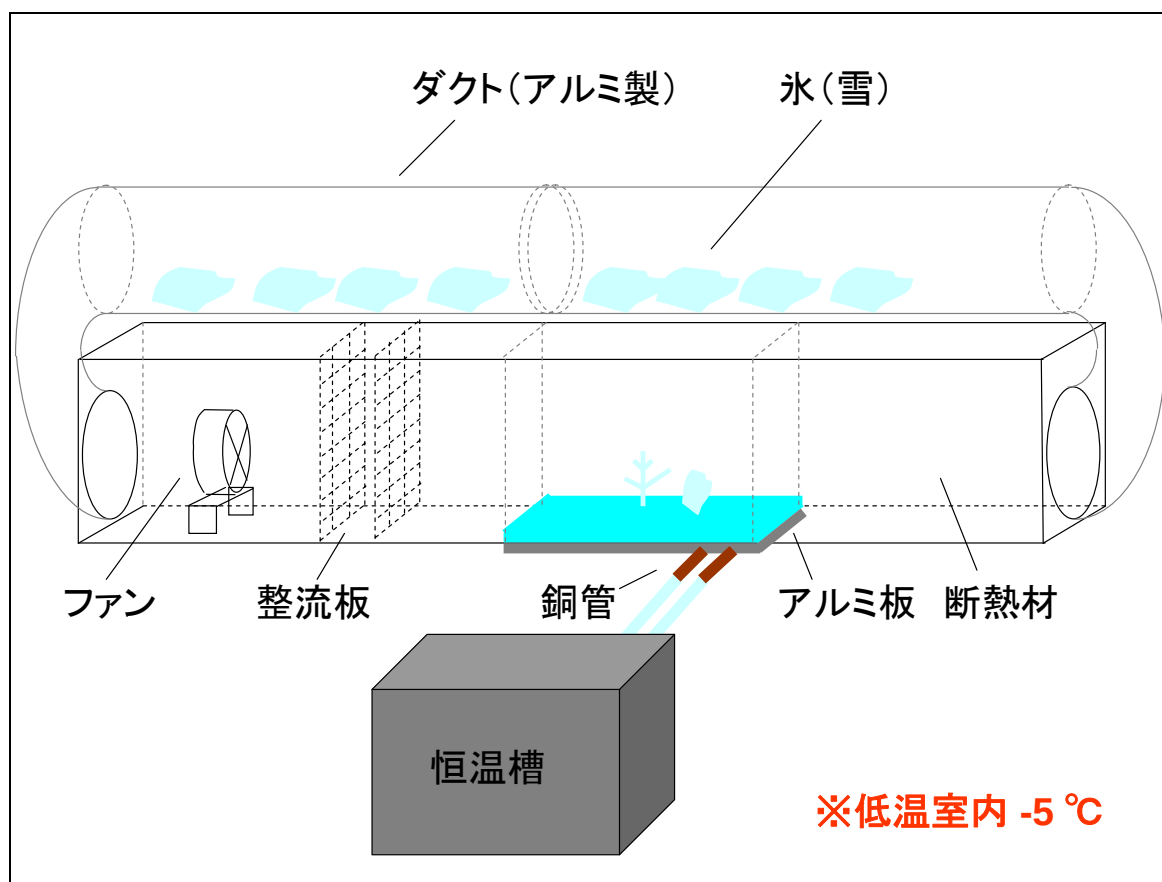


図- 1 装置の概略図

2. 3. 雪面（金属板）の冷却

実験開始直後，すなわち，冷媒アルコールが銅管内を循環し始めた直後は，冷却により雪面温度が急激に低下するが，3～5 分後には雪面の温度は一定となる．温度変化の時間は冷媒アルコールの温度によって多少異なる．図-2 には，装置内が定常状態である実験開始 90 分後，低温室：-5.0℃，アルコール温度：-25.0℃での装置内の温度の鉛直分布を示す．横軸は雪面からの高さ，縦軸は温度を示している．雪面に近づくほど温度は低下し，大きな温度勾配 ($^{\circ}\text{Ccm}^{-1}$) が生じる．この温度勾配が水蒸気輸送の駆動力となる水蒸気圧差を生じさせるため，雪面近傍で冷却された水蒸気は雪面に昇華凝結し，霜結晶が成長する．

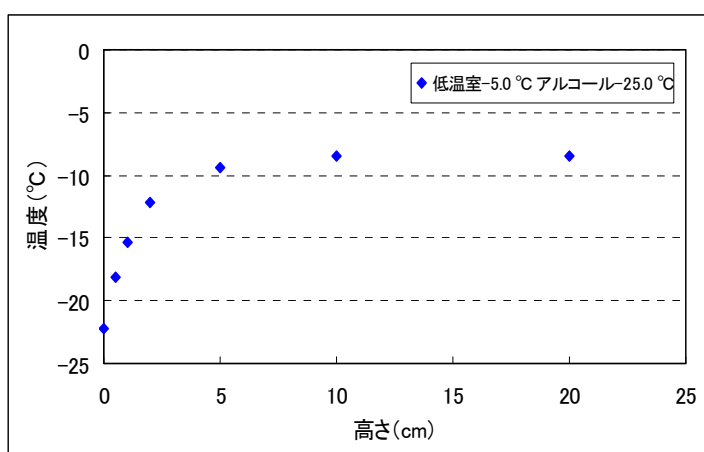


図- 2 装置内の鉛直温度分布

3. 実験

3. 1. 実験手順

表面霜を成長させるまでの手順を以下に示す.

- 1) 恒温槽を任意の温度に設定し, アルコールを冷却する.
- 2) かき氷機で薄く削った氷を, 篩い機を用いてアルミ板に薄く敷く (厚さ 3 mm).
- 3) 装置内にアルミ板を入れ, 蓋をする.
- 4) 恒温槽と銅管 (アルミ板の下に配置) をチューブで繋ぎ, 恒温槽から冷媒アルコールを循環させる.
- 5) ファンのモーターの電圧を調整し, 風速を決定する. 実験は 12 時間行う.

3. 2. 実験結果

図-1 の装置を用いて実験を行った結果, 自然界で観察されるような表面霜が観察された. 図-3 から図-5 には, 低温室: -5.0°C , 恒温槽アルコール: -25.0°C , 風速: $0.2\sim 1.4\text{ m/s}$, RH86.3 % (20 cm), 実験時間 12 時間の条件下で生成された結晶を示す. 結晶の大きさは $1\sim 3\text{ mm}$ (平均 2 mm), 結晶形は Sector (扇状) で, 結晶表面には骸晶模様が観察された. また, 雪面温度, つまりは結晶生成温度を変化させることにより, 様々な形状の霜結晶が観察された. 図-6 から図-8 にその結晶例を示す (格子幅全て 2 mm). 図-6 は低温室: -5.0°C , 恒温槽アルコール: -30.0°C , 図-7 は低温室: -5.0°C , 恒温槽アルコール: -35.0°C , 図-8 は低温室: -5.0°C , 恒温槽アルコール: -40.0°C で生成された表面霜結晶である.



図-3 アルミ板に生成された表面霜



図-4 生成された表面霜 (図-3 拡大)

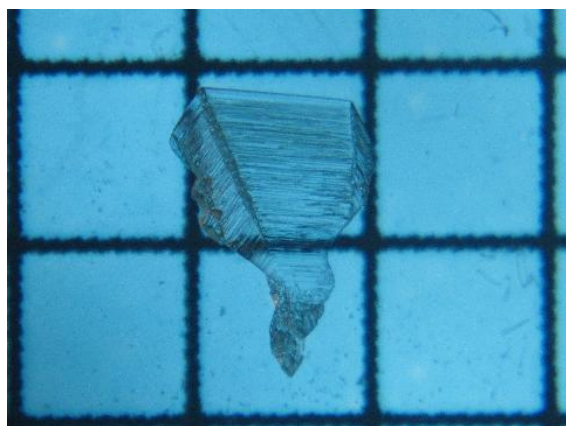


図-5 表面霜結晶 (形状: Sector)

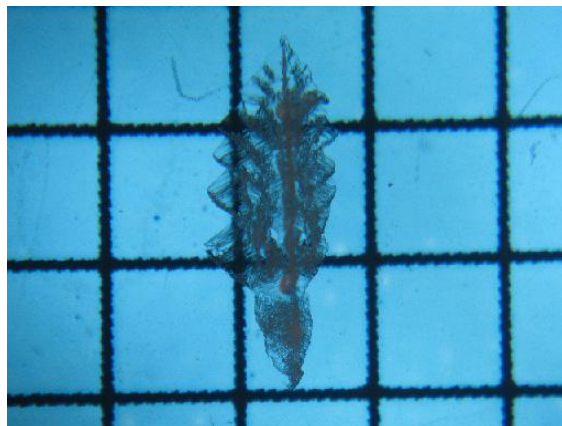


図-6 表面霜
(形状: Combination of column and plane)

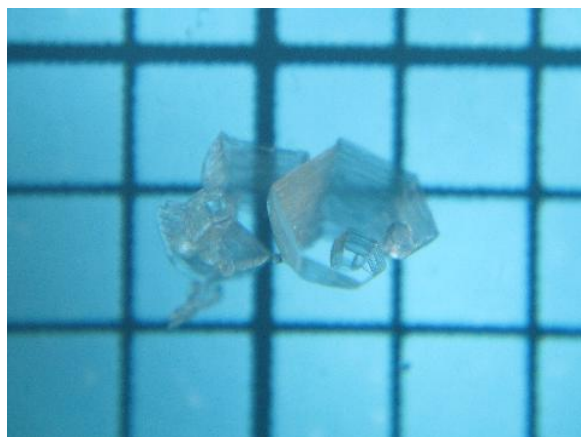


図-7 表面霜 (形状 : Cup)

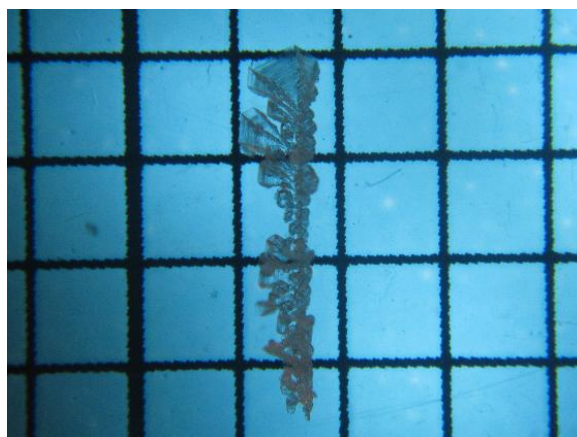


図-8 表面霜
(形状 : Combination of column and plane)

4. まとめ

本実験装置が開発されたことにより，任意の実験条件で表面霜作製実験が可能となった．条件によっては，自然界で観察されるような結晶が生成された．また，雪面温度の変化とともに結晶形にも変化が見られることから，雪の結晶と同様の温度による結晶習性（晶癖変化）が示唆された．

今後，本装置を用いて上述した項目の調査を目的に表面霜作製実験を行い，表面霜ダイアグラムを完成させたい．生成された結晶試料を用いた剪断強度試験を行い，結晶形・面密度・結晶方向との関係の調査が応用課題として挙げられる．

【参考・引用文献】

- 1) Hachikubo, A1998 : Surface hoar growth on snow. Doctoral Thesis, Hokkaido University, 50pp.
- 2) A.E.Slaughter et al, 2011 : Field investigation of near-surface metamorphism of Snow. *Journal of glaciology* 2012 , 57, 441-452.
- 3) 中谷宇吉郎, 1949 : 雪の研究. 岩波書店, 161pp.
- 4) 小林禎作, 1957 : Diffusion Cloud Chamber による雪結晶習性の研究. 低温科学, 物理篇, 16, 1-26.