# 風洞型装置により生成した表面霜の剪断強度
# The shear strength of artificial surface hoar formed in a wind tunnel

八代裕平(北海道教育大学大学院 札幌校・岩見沢校)，尾関俊浩(北海道教育大学 札幌校)
Yuhei Yashiro, Toshihiro Ozeki

## １．はじめに

表面霜とは，水蒸気が雪面に昇華凝結した氷結晶のことである．降雪などにより，積雪中に埋もれた表面霜は構造的にもろく，ほかの雪質に比して上載積雪によって破断しやすい．表面霜が広く弱層として埋没した場合，一ヶ所が破断すると，同一層内で破断が伝搬して，表層雪崩を引き起こす．Schweizer and Jamieson (2000)は，欧米で発生する表層雪崩のおよそ半数が表面霜由来であることを報告した[1)]. 八久保(1998)は野外観測により表面霜がよく発達する気象条件が放射冷却，相対湿度，風速の 3 点であることを指摘した[2)]．表 1 に表面霜が発達しやすい条件を記す．しかし上述の 3 条件が自然界で揃うことは珍しく，表面霜に関する研究には多くの課題が残されている. そこで, 津田(2013)は低温室内で表面霜を生成する簡易風洞を作成し，表面霜を発生させた[3)]．その中で図 1 に挙げるようコップ状の結晶が表面霜の基本形で，風の影響があると 1～2 面が卓越して成長することを示唆した. 以上のように表面霜の成長は風に依存することが知られている.

本稿では，人工発生表面霜の剪断強度を計測して，成長の風向依存性と強度への影響の程度を検討した.

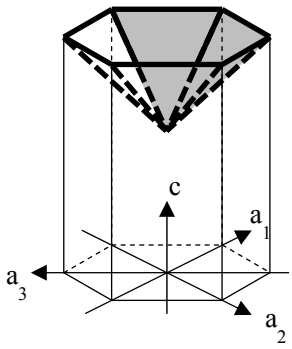


**図 1**　表面霜の基本形

**表 1**　表面霜が発達しやすい気象条件

| 項目 | 設定条件 |
|---|---|
| 放射冷却 | −60 W/m$^2$ |
| 風速 | 2～3 m/s |
| 相対湿度 | 90 %以上 |

## ２．実験方法

### ２．１ 装置の概要

図 2 に示す回流式風洞を使用して，薄くかき氷を敷いたアルミ板(擬似雪面)に表面霜を生成した. ファンで風を起こし，風洞を回流中にかき氷で水蒸気を供給させたのち，冷却した擬似雪面に昇華凝結させた．アルミ板の底には銅管を這わせてあり, ここに恒温槽から−20 ℃のアルコールを循環させて放射冷却による雪面温度の低下を再現させた．実験条件を表 2 に示す.

**表 2**　実験条件

| 項目 | 設定条件 |
|---|---|
| 風洞外寸 | 30 cm×30 cm×90 cm |
| 気温 | −5.0±1.0 ℃ |
| 恒温槽温度 | −20.0 ℃ |
| 生成時間 | 12 時間 |
| 焼結時間 | 48 時間 |



Copyright © 2015　公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

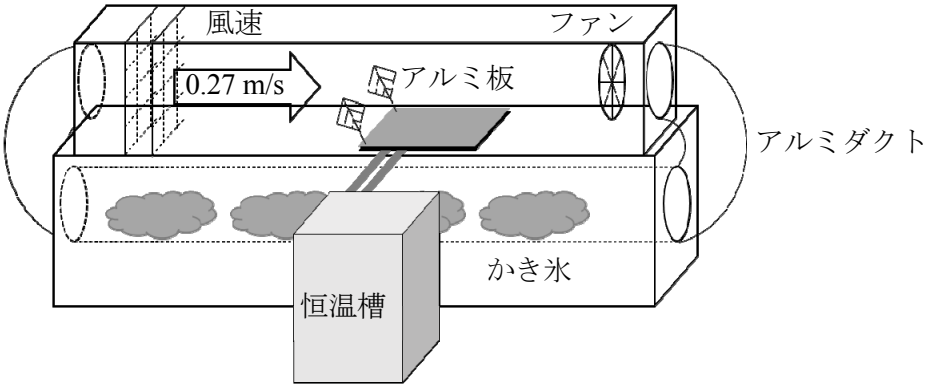


**図 2**　回流式風洞の模式図

## ２．２ 剪断試験

発生させた表面霜の上に，上載積雪として目の細かいかき氷を約 3 cm 程度載せて，約 48 時間焼結を待った．その後シアーフレームテストを行った．得られた測定値をシアーフレームの面積で除して，シアーフレームインデックス(SFI)を算出した．本試験では SFI を剪断力に対する強度の指標とした．　図 3 に剪断方向と試験を行った位置を示す．

ここで用いたシアーフレームの寸法を図 4 に示す．一般のシアーフレームでは差し込み時に表面霜が座屈してしまうため，軽量かつ小型のシアーフレームを用いている．

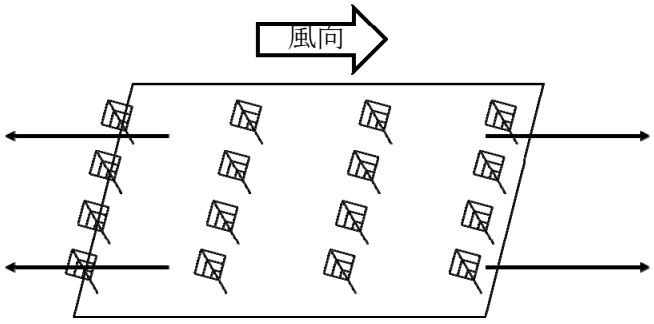


**図 3**　剪断位置と剪断方向

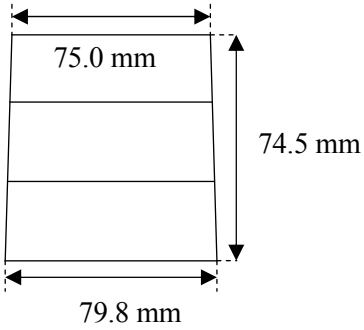


**図 4**　使用したシアーフレーム

## ３．結果

### ３．１ 生成した表面霜

生成した表面霜の形状は図 5 のようなコップの 1～3 面が卓越した形が大部分を占めていた．これは先述の津田(2013)で指摘された通りの形状であった．中には図 6 のような針状の表面霜も見られた．これは雪面に倒れており，他の表面霜の間に埋もれる格好であった．

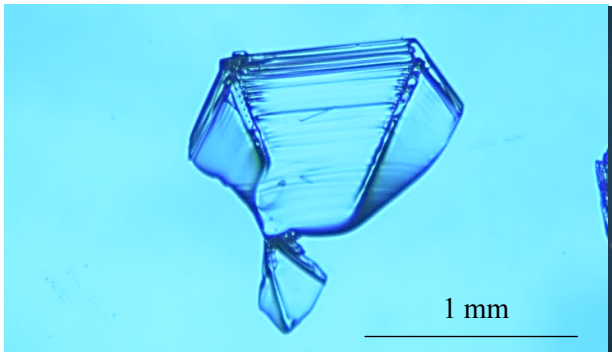


**図 5**　コップ型

**図 6**　針状



Copyright © 2015　公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

### ３．２ シアーフレームテスト

シアーフレームテストの結果を表 3 に示す．試験回数は風上，風下とも 20 回である．有効試験数が異なるのは，シアーフレームの差し込み時に表面霜が座屈して破断した試験を除いたためである．SFI の平均値を比べると風下側での強度が大きくなった．この結果を t 検定にかけたところ風上側強度と風下側強度が弱い優位傾向にあることがわかった．剪断破壊試験の特性として，ばらつきが大きくなることを考慮して，有意水準を 10 %とした．

**表 3**　シアーフレームテストの結果

| | 風上 | 風下 |
|---|---|---|
| 有効試験数 | 13 試験 | 12 試験 |
| 平均値 | 567 Pa | 788 Pa |
| 標準偏差 | 248 Pa | 335 Pa |
| t 検定 | p<0.1 | |

## ４．強度差に関する考察

### ４．１ 結晶の成長方向

表面霜は水蒸気供給の多い方向に向かって成長するといわれている[4]．したがって，本研究の場合は風上側に向かって斜めに表面霜が成長していることが予想された．この予想に従うと，風上では結晶の成長方向に対して順目方向に，風下では逆目方向に剪断したことになる．表面霜の破壊形態が回転モーメントによる根元の破壊だとすると，表面霜に加わる力の回転方向(θ 方向)成分が重要である．剪断力を τ，上載積雪から受ける力を σ とし，成長方向(r 方向)と回転方向(θ 方向)に分解すると図 7 のようになる．図 7 では図の見やすさを優先し，τ と σ の大きさを同程度としている．

風上では，2 力の θ 成分が同一方向なので，小さな剪断力でも破壊が生じる．一方，風下では 2 力の θ 成分が逆方向のため，破壊には風上の場合よりも大きな剪断力を要すると考えられる．

しかし今回使用した上載積雪の密度は 158 kg/m$^3$ で約 3 cm しか載せていないため，σ が τ よりも 1 オーダーほど小さい．したがって，上載積雪から受ける力の影響をほぼ無視することができる．これに従い，剪断力のみ考えると，風上も風下も $\tau_\theta$ の大きさが同じになるため，結晶の成長方向が本試験で生じた風上側と風下側の強度差に影響を及ぼしているとは考えにくい．また，表面霜が風上方向に成長せず，鉛直上向きに成長していることを表面霜の断面観察から確認した(図 8)．

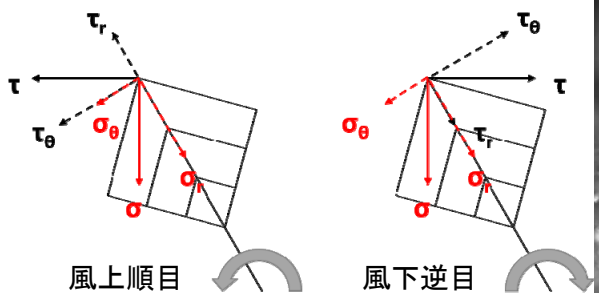


**図 7**　モーメントの影響
左図は風上側の順目剪断
右図は風下側の逆目剪断

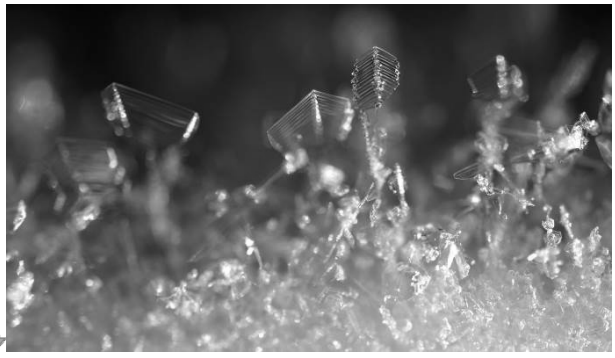

**図 8**　表面霜の層の断面
写真の左から右に向かって風が吹いている．



Copyright © 2015　公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

### ４．２ その他の要因

結晶の成長方向の他に剪断強度に違いをもたらす可能性がある要因を表 4 に挙げる．まず、面密度である．面密度が大きいと，剪断力が分散されて表面霜 1 本あたりに加わる剪断力が小さくなるため，強度が上昇すると予想される．次に表面霜の大きさである．表面霜が大きく成長するにつれて，回転モーメントも大きくなるため，強度が減少すると予想される．最後に結晶形である．４．１．の考察では根本の破壊を考えていたが、図 6 に示した針状結晶などの細い結晶の割合が増えると，根本の破壊よりも先に結晶自身が破断してしまうことが予想される．この場合、断面の形状によっても強度が左右される．

**表 4**　強度に影響を与えるその他の要因

| 要因 | 与える影響 |
|---|---|
| 面密度 | 剪断力の分散 |
| 表面霜の大きさ | 回転モーメント |
| 結晶形 | 断面形状 |

現状ではこれらのデータ数が不足しているため，剪断強度を計測することと並行して，これらの項目についてもデータを収集し，影響の程度について検討を進めたい．

### ５．今後に向けて

今回の実験により，表面霜の剪断破壊メカニズムの解明には以下の課題が明らかとなった．まず破壊の場所とその形態の特定が重要である．対象物体の最も弱い部分がその物体の強度を決定するからである．現在は試験後に残った雪の深さから，破壊が根元で起きていることが予想される．しかし，対象が小さく破壊の場所と形態を特定するには至っておらず，表面霜内の破壊と表面霜－上載積雪間の破壊の可能性も考慮する必要がある．今後は，MRI と X 線 CT を用いて積雪中の表面霜の内部構造と破壊形態を立体的に把握したい．

表面霜内の破壊が優位な場合は，表面霜の形状が重要である．断面積だけでなく，断面の幾何的性質が強度に大きな影響を与えるからである．先行研究から結晶形が気温－気温と雪面の温度差によって変化することがわかっている [3)]．これを利用し，また増補しつつ主要な結晶形が強度に与える影響を検討する予定である．

面密度は表面霜 1 本あたりに加わる剪断力決めるため，いずれの破壊形態の場合でも重要な計測項目である．現状では，面密度計測用の写真に写っている表面霜の輪郭がぼやけていること，根元の様子がわからないことの 2 点が問題となっている．今後は，レーザーシートによる照明や蛍光塗料の噴霧とブラックライトによる照明を試す予定である．

### 【参考・引用文献】

1) J. Schweizer, J. B. Jamieson，2000 : Field Observations of Skier-triggered Avalanches.　*International Snow Science Workshop*，1-8.
2) 八久保晶弘，1998 : Surface hoar growth on snow．8-12.
3) 津田将史，2013 : 風洞型表面霜作成装置を用いた表面霜の成長機構の研究．4-31.
4) 秋田谷英次・成瀬廉二・尾関俊浩・福沢卓也，2002 : 決定版雪崩学．北海道雪崩事故防止研究会，山と渓谷社，44-46.



Copyright © 2015　公益社団法人日本雪氷学会北海道支部