

−50°C 以下で生成される放射状針状結晶の特徴

Characteristics of radiating needle type snow crystals generated in low temperature
lower than −50°C

原田 康浩¹, 山口 達也^{1†}, 柿崎 佑希^{1‡}, 中拂 匠^{1§}, 村井 昭夫^{1,2}, 亀田 貴雄¹,
(¹ 北見工業大学, ² 金沢市立内川中学校)

Yasuhiro Harada, Tatsuya Yamaguchi, Yuuki Kakizaki, Takumi Nakaharai,
Akio Murai, and Takao Kameda

1. はじめに

我々は、平均気温が −50°C にも及ぶ低温環境にある南極氷床内陸部に降る雪粒子の特異な形状¹⁾への興味から、対流型人工雪生成装置を用いて −40°C ~ −55°C の低温域での人工雪結晶生成実験を進め、結晶形状と生成条件の関係を調べてきた²⁾。その結果、ドームふじ基地で1年を通して最も高い頻度で観察された砲弾および砲弾集合¹⁾と同じ種類・サイズの結晶の生成条件を見いだすに至った³⁾。さらに、−50°C 以下の気温では図-1 のように、無垢の針状結晶が、結晶生成の核として使用したポリエステル繊維から放射状に伸びたり、成長した1本の針からさらに放射状に枝分かれして成長するという特異な結果を得た³⁾。

我々は、このような特殊な構造となる要因を明らかにすることを目的として、これらの雪結晶の顕微鏡写真を用いて複数の針状結晶の相互の c 軸がなす角度を解析した。その結果、54°~60° で頻度が高いという結果を得て、この気温の条件では個々の針の先端部に基底面に加えてピラミッド面⁴⁾が形成され、その面から針が放射状に成長していることが示唆された⁵⁾。本研究では、これに加えて構成本数を調べることでこのような特殊構造となる原因を探ることを試みた。また、その解析あたっては、放射状の針状結晶が成長する基点(核)が繊維か針か、結晶生成時の条件(生成部の気温と水蒸気量)によってその特徴が変わることが予想されたため、これらの違いによる構成本数の影響についても調べた。

2. 解析対象と解析方法

解析の対象とした雪結晶は、北見工業大学にて 2010 年 6 月 16 日~17 日, 8 月 9 日~10 日, 12 月 11 日~12 日, 12 月 25 日の 4 回にわたって行なわれた合計 5 回の人工雪結晶生成実験で得られた放射状針状結晶の顕微鏡画像である。これらの顕微鏡画像の撮影と記録は、人工雪生成装置内に生成された雪結晶を観察窓を介して実体光学顕微鏡(Nikon SMZ-660)で拡大し、接眼部に取り付けたデジタルカメラ(Nikon CoolPix 5100)で行った。人工雪結晶生成装置の詳細は文献 3)

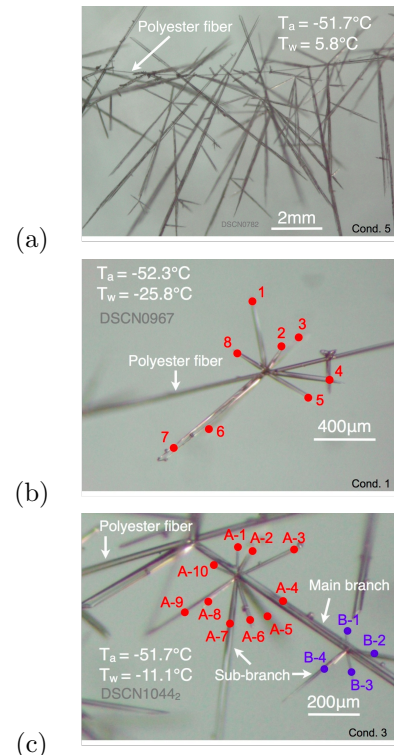


図-1 低温域で人工的に生成された放射状の針状雪結晶³⁾。(a)全体像,(b)拡大像:繊維から放射状に成長した針状結晶,(c)拡大像:1本の針状結晶からさらに枝分かれをして放射状に成長した針状結晶。 T_a は雪結晶生成部近傍の気温, T_w は雪結晶生成装置底部に設置された水蒸気供給部の水または氷の温度。

[†]現 カーネルコンセプト勤務

[‡]現 アース工業勤務

[§]現 警視庁勤務

に譲るのでそちらを参照されたい。これらの雪結晶生成実験での結晶生成点の気温 T_a と生成装置底部に設置した水蒸気供給部の水または氷の温度 T_w の値を表-1 にまとめる。ここで、これらの温度の値は、デジタルカメラでインターバル撮影した人工雪結晶の成長過程の記録画像を基に、結晶が生成され始めたと確認できる時刻からその結晶の観察・記録を終了した時刻までの平均値と分散で表わしている。表-1 より、条件1 から5 にわたって生成部の気温 T_a は -52.3°C

表-1 解析対象とした放射状針状結晶が生成された条件。

条件	1	2	3	4	5
$T_a[^{\circ}\text{C}]$	-52.3 ± 0.3	-51.0 ± 0.2	-51.7 ± 0.3	-50.3 ± 0.4	-51.7 ± 0.3
$T_w[^{\circ}\text{C}]$	-25.8 ± 0.8	-16.9 ± 0.4	-11.1 ± 0.6	-1.6 ± 0.6	5.8 ± 0.8

T_a : 結晶生成点近傍の気温, T_w : 水蒸気供給部の水, 氷の温度

～ -50.3° とほぼ一定の範囲であるのに対して、水蒸気供給部の水または氷の温度 T_w は条件1 から条件5 と次第に上昇しており、雪結晶生成部に供給される水蒸気量が多くなることを意味している。図-1(a), (b), (c) はそれぞれ、条件5, 1, 3 の場合の顕微鏡写真に相当する。

放射状に成長した針状結晶の構成本数の数え方の例を図-1(b), (c) に示す。まず、図-1(b) のように繊維から成長している場合と 図-1(c) のように成長した1本の針からさらに複数の針が放射状に成長した場合に分類し、コンピュータ上で鮮明化や拡大処理を行って焦点が合っていない結晶も対象にして目視で本数を数えた。また、図-1(c) のように幹となる針（こちらを「主枝」と呼ぶ）から放射状に枝状の針（こちらを「副枝」と呼ぶ）が延びて成長している場合でも、A-1～A-10 のグループのように主枝のある場所でいったん結晶成長が停止した後に主枝 A-4 も含めたあらゆる方向に複数の針が新たに延びたと考えられる場合には主枝も含めて数え、B-1～B-4 のように主枝が成長した後にその表面の一部から新しく副枝が成長した場合は主枝は構成本数に含めないことにした。

3. 解析結果と考察

図-2 に各生成条件で得られた典型的な放射状針状結晶の顕微鏡写真の例を、図-3 にすべての生成条件および生成基点別に解析した放射状針状結晶の構成本数の頻度分布をまとめて示す。以下では、それぞれの条件、成長基点別の特徴について結果をまとめ、考察する。

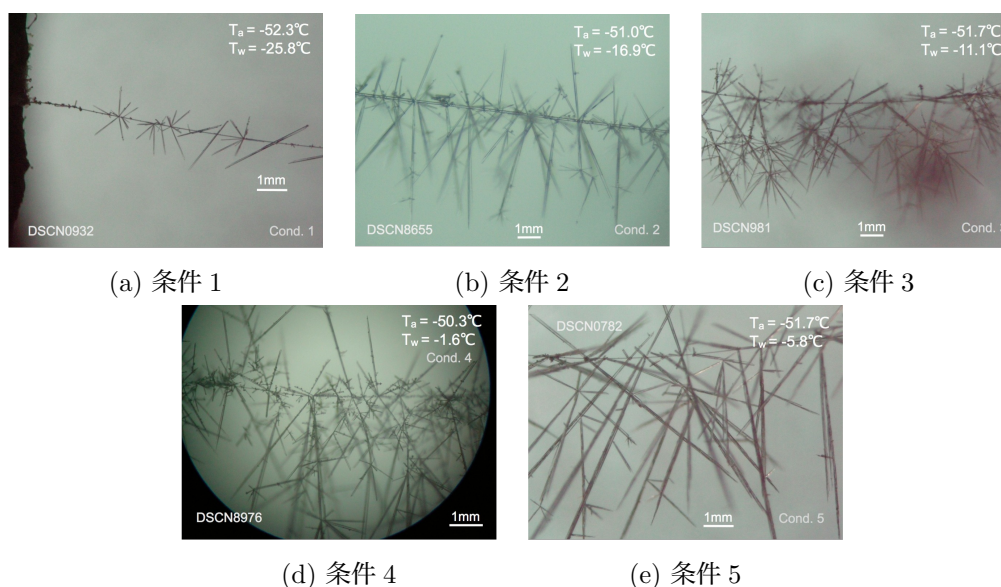


図-2 各条件で生成された放射状針状結晶の顕微鏡写真の例。

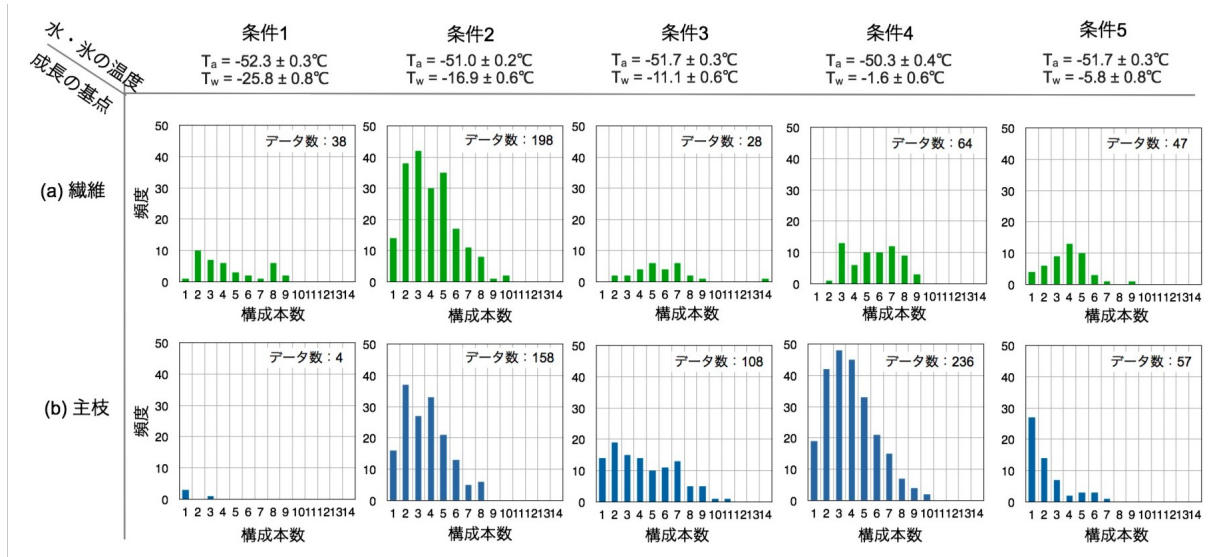


図-3 各生成条件で得られた放射状針状結晶の構成本数の頻度分布。上段 (a) は人工雪結晶生成装置で使ったポリエステル繊維を核として成長した場合、下段 (b) は成長した一本の針（主枝）からさらに放射状に成長した場合の結果。

5つの生成条件のうち、水蒸気供給部の水または氷の温度 T_w が最も低い条件 1 ($T_w = -25.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$) では、繊維から針状結晶が放射状に成長することが確認されたが、さらにその針から枝分かれして成長する様子は「データ数 4」が示す通り、ほとんど見られなかった。繊維から成長した場合、そのデータ数は少ないが、構成本数 2 本から 4 本、および 8 本で高い頻度を示している。

2 番目に水蒸気供給部の水または氷の温度 T_w が低い条件 2 ($T_w = -16.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$) では、繊維からの成長、主枝からの成長ともに放射状針状結晶となる多くの例が観察され（データ数はそれぞれ 198 と 158）、いずれも構成本数が 2～5 本で高い頻度が得られた。

3 番目に水蒸気供給部の水／氷の温度 T_w が低い条件 3 ($T_w = -11.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$) では、繊維からの成長例が少なく（データ数 28）、主枝から成長した放射針状結晶が数多く観察された（データ数 108）。この結果は図-2(c)に見られるように、結晶生成装置の構造上、水蒸気が下から上に供給されるのに対して、繊維から下に向かって延びた主枝およびそこから枝分かれした副枝の成長に優先的に水蒸気が使われたためと考えられる。構成本数の頻度分布で 7 本にピークが見られるのは、繊維の周りおよび主枝の先端に基底面に加えて 6 面のピラミッド面が形成され、そこから複数の針が成長しているという前報での仮説⁵⁾を支持するものである。

4 番目に水蒸気供給部の水／氷の温度 T_w が低い条件 4 ($T_w = -1.6 \pm 0.6^\circ\text{C}$) の場合も、条件 3 の場合と同様に、繊維からの成長例に比較して主枝からの成長例が数多く観察された。図-2(d)に示すように、条件 3 と同様に繊維から下方に成長した結晶の成長に水蒸気が優先的に使われたためと考えられる。一方、主枝からの成長における構成本数の頻度は 2～5 本で高く、6～7 本といったピラミッド面の存在によると考えられる本数での頻度が相対的に低い。これは図-2(d)に見られるように、過冷却水滴と思われるものが数多く付着していたり、主枝結晶の表面に c 軸方向に沿って割目のような欠陥が多く見られ、いったん長く成長した主枝のそのような欠陥から針が成長したものが多く見られた結果と考えられる。

水蒸気供給部の水／氷の温度 T_w が最も高い条件 5 ($T_w = -5.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$) の場合は、主枝から成長した針の構成本数が 1 本に高い頻度を示すという特異な結果を得た。これは水蒸気量が比較的多い環境のために個々の針の成長速度が速く、図-2(e)のようにほとんどの結晶が 1 本ずつ独立に長い針として成長してピラミッド面の構造を作り難い状態であったことと、条件 4 の場合と同様に、主枝の表面で c 軸に沿った方向に筋状の欠陥が多くみられ、そこから副枝が成長する傾向が

高かったことによると考えられる。

4. まとめ

気温 -50°C 以下で顕著に生成される放射状の針状結晶の構成本数を、水蒸気供給部の水・氷の温度の違い、すなわち水蒸気量の多寡および放射状構造の生成基点（繊維と主枝）に分けて、解析した。

繊維から放射状に成長する現象は水蒸気量の多少に関わらず常に観察され、その構成本数は 2～10 本の広い範囲に分布していること、特に 2～5 本に高い頻度を示すことが分かった。これは、この気温領域では水蒸気量に関わらず、雪結晶の成長の初期の段階で繊維を中心に放射構造の核となる多面体の氷晶が形成されることを示唆している。

主枝からの放射状構造の生成現象は、水蒸気量が極端に少ない場合はほとんど見られず、ある程度の水蒸気量が主枝からの放射状針状結晶構造の形成に必要であることがわかった。その際の構成本数は 1～7 本と広い範囲に分布するが、水蒸気供給部の水／氷の温度が $T_w = -11.1 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ の場合 (条件 3) には 7 本に明確なピークを示し、この水蒸気量の条件では主枝先端にピラミッド面が形成されているという前報告の仮説⁵⁾を支持する結果となった。しかし、水蒸気量がより多い場合 (条件 4, 5) には個々の主枝の成長速度が速いため、1 本の長い針に成長することが多く、放射構造の基と想定しているピラミッド面が形成されにくいことがわかった。

なお、以上の結果は、雪結晶の生成条件のうち、結晶生成部の水蒸気量を人工雪結晶生成装置下部にある水蒸気供給部の水／氷の温度をもってその多少を推定しており、実際の水蒸気量を計測しているわけではない。このことから、今回得られた結果の水蒸気量に対する依存性には不確定要素が含まれている点を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] Kameda, T., Fujita, K., Sugita, O. and Hashida, G., 2007: Snow crystals, ice crystals and blowing snow at Dome Fuji, JARE Data Reports, **298** (Glaciology 32), 46–64.
- [2] 柿崎佑希, 原田康浩, 亀田貴雄, 村井昭夫, 2010: $-40^{\circ}\text{C} \sim -55^{\circ}\text{C}$ における人工雪結晶生成実験とその特徴 (序報), 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演要旨集, A3-02, p.176.
- [3] 柿崎 佑希, 中拂 匠, 原田 康浩, 村井 昭夫, 亀田 貴雄, 2011: $-40^{\circ}\text{C} \sim -55^{\circ}\text{C}$ における人工雪結晶生成実験とその特徴, 北海道の雪氷, 30, 127-130.
- [4] Kobayashi, T., 1965: Vapour Growth of Ice Crystal between -40 and -90°C , *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 359–367. s
- [5] 柿崎 佑希, 中拂 匠, 原田 康浩, 村井 昭夫, 亀田 貴雄, 2011: 低温域で生成される放射状針状結晶の特徴, 北海道の雪氷, 30, 131-134.