

低温域で生成される放射状針状結晶の特徴

柿崎 佑希¹, 中拂 匠^{1†}, 原田 康浩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)

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-混合型装置を用いて $-40^{\circ}\text{C} \sim -55^{\circ}\text{C}$ 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、ドームふじ観測拠点で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 程度の気温で水蒸気量が極端に多い場合には図-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。

本研究では、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、放射状に伸びた針状結晶の c 軸が相互になす角度の頻度分布を解析するとともに、その結果から生成要因を考察した。

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12月11日～2011年1月23日にわたって行なった合計7回の人工雪結晶生成実験で得られた針状結晶の顕微鏡画像である。これらの実験での結晶生成点の気温は $T_a = -52.3^{\circ}\text{C} \sim -51.1^{\circ}\text{C}$ 、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 $T_w = -25.5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。実験に使用した雪結晶生成装置および顕微鏡画像撮影系の詳細は文献³⁾に譲るのでそちらを参照されたい。

図1(b)は繊維から複数の針が放射状に成長した場合、図1(c)は成長した1本の針の先端からさらに複数の針が放射状に成長するとともに、幹の針もさらに成長した場合の顕微鏡画像である。前者の場合は放射状に伸びる針の角度が繊維の表面状態に強く影響を受けると考えられるため、今回は解析対象から除いた。すなわち、図1(c)のように幹となる針（こちらを「主枝」と呼ぶ）

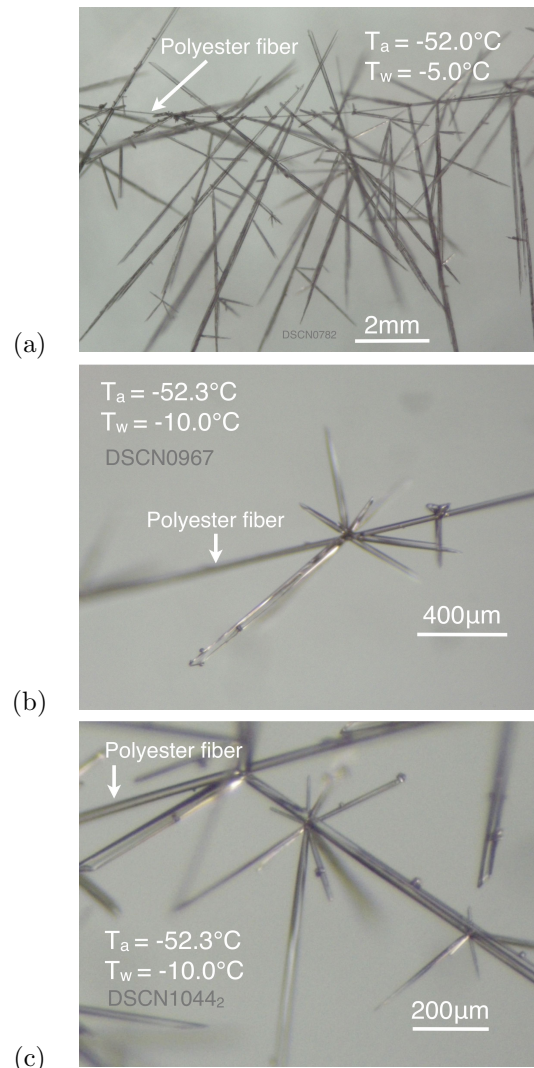


図-1 低温域で人工的に生成された放射状の針状雪結晶³⁾。(a) 全体像、(b) 拡大像：繊維から放射状に成長した針状結晶、(c) 拡大像：1本の針状結晶からさらに枝分かれをして放射状に成長した針状結晶。 T_a は雪結晶生成部近傍の気温、 T_w は雪結晶生成装置底部に設置された水蒸気供給部の水または氷の温度。

[†]現 警視庁勤務

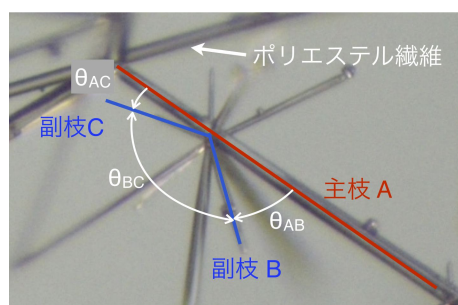
から放射状に枝状の針（こちらを「副枝」と呼ぶ）が成長した部分を解析対象とした。放射状に伸びた複数の針の中から長手方向全体にわたって焦点が合っていると判断できる複数の針を選定し、それらの結晶の c 軸間の角度を測定した。すなわち、ピントが一部合っておらず、画像の2次元平面上にのっていない可能性がある結晶は解析対象から除外した。

また、結晶主軸相互の角度が鈍角となる場合は、主枝と副枝の間の角度の場合と、副枝と副枝の間の角度の場合の2つに区別して測定規則を変えた。前者の場合は、図-2(a)に示す通り、鋭角となる角度を測定値（例： θ_{AB} や θ_{AC} ）とし、後者の場合は鈍角であってもそのまま測定値とした（例： θ_{BC} ）。

角度測定には、NIH (National Institute of Health) で JAVA 言語を用いて開発され、無料で配布されている画像処理・解析ソフト ImageJ⁵⁾ の角度測定ツールを用いた。測定では、各針状結晶が平面上にあるかないかを判定しやすくするために、適宜、画像の拡大や鮮鋭化を行なって処理した。また、1ヶ所に対して測定を5回行い、その平均値を測定結果とした。図-2(b)は ImageJ を用いた測定例を示している。2本の針状結晶うちの一方の軸上の一点、2本の交点、他方の軸上の点を順番にマウスで選択することで測定対象の角度が決まり、測定値を得る。現在の測定値の他、これまでの測定履歴は別ウィンドウに表示され、記録される。

3. 測定結果

図-3 は結果の頻度分布をグラフ化したものであり、横軸が c 軸間角度（角度間隔 2° ）、縦軸がその間の角度をとる結果の数を表す。データ点数は合計で59個である。このグラフにはいくつかのピークが見られるが、データ点数が少ないことを考慮すると角度 $52^\circ \sim 62^\circ$ の範囲に特徴的なピークが存在すると言える。特に、 $54^\circ \sim 60^\circ$ で突出しており、この角度となるなんらかの理由があると考えられる。



(a) 角度測定の規則



(b) ImageJ を用いた測定時の画面例

図-2 角度測定の規則と測定例。

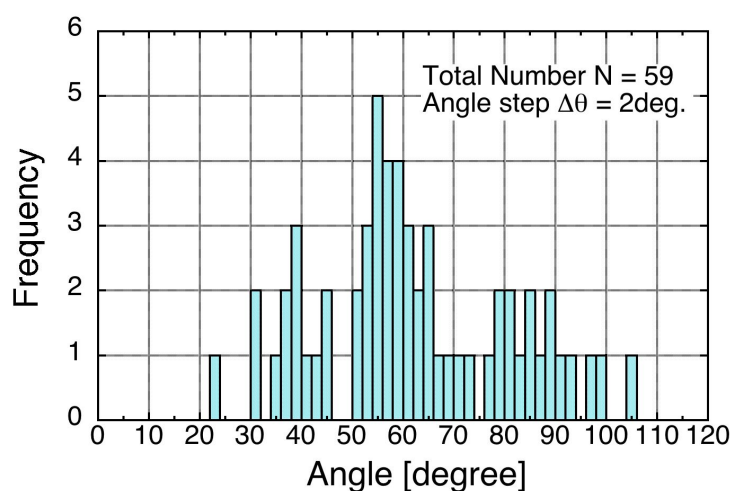


図-3 放射状針状結晶の結晶 c 軸間角度のヒストグラム

4. 放射構造生成要因の検討

ある点を中心に放射状に伸びる立体的な雪結晶として砲弾集合が知られており、その相互角度の測定および生成要因を解析した Kobayashi らの研究がある⁶⁾。そこでの角度頻度のピークは 70° 近くにあり、その成因は放射構造の核に相当する結晶集合部分の立方晶構造にあると結論付けている。本研究でのピーク角度はその値から 10° 近く離れており、その要因は別であると考えられる。

一方、雪結晶の生成過程をインターバル撮影で記録した結果を観察すると、針状結晶が放射状に枝分かれするのは主枝の先端、あるいはそこから伸びた副枝の先端からであった。図-1(a)にもその様子を確認できる。そこで、あらためて放射状に針状結晶が伸びる前段階の針の先端部分に注目して観察を行なった。図-4 はその結果であり、いずれも基底面に加えて斜めの面（ピラミッド面）が1面ないし複数面できていることが分かった。この針の先端の基底面とピラミッド面の間の角度 α を、ImageJ を使って解析したところ、 $\alpha = 60.9^\circ \pm 3.8^\circ$ という結果を得た。結晶主軸がこれらの基底面および斜めの面から垂直に成長すると考えると、図3の突出した角度の範囲 ($52^\circ \sim 62^\circ$) に収まっており、針の先端面に現われるピラミッド面の存在が放射状構造の角度を決めていると言える。

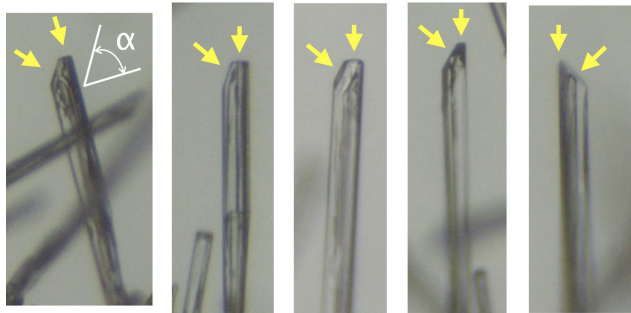


図-4 針状結晶の先端構造の拡大図。

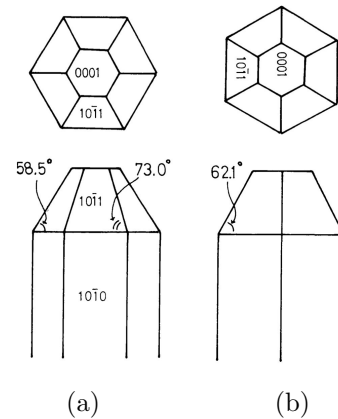


図-5 ピラミッド面の特徴的角の理論値⁴⁾。

針の先端に基底面とピラミッド面が出現するという我々が観測した事実は、1965年に Kobayashi が行なった同じ気温域で拡散型装置を用いた結晶生成実験でも観測され、理論モデルから先端面の角度関係が説明されている⁴⁾。図-5(a), (b) はそこに掲載された理論モデルの面構造の図⁴⁾を再掲したものである。ミラー指数 (0001) の基底面と (10 $\bar{1}$ 1) の6つのピラミッド面で構成され、側方から先端の様子を観察した時、 58.5° 、 73.0° 、および 62.1° の3つの特徴的な角度が見られることを示している。我々の実験結果で得られた基底面とピラミッド面とが成す角度 $\alpha = 60.9^\circ \pm 3.8^\circ$ は、図-5(a) の 58.5° に相当する角度か (b) の 62.1° に相当する角度を測定していると考えられ、ミラー指数 (10 $\bar{1}$ 1) のピラミッド面が出来ていることを示唆している。

そこで次に図-5の先端構造を持つ針の先端各面から成長した放射状の針の c 軸が成す角度の理論値を求めてみた。図-6のように、基底面 (0001) から伸びる針を A、6つのピラミッド面 (10 $\bar{1}$ 1) のうち、連続した4つの面から伸びる針をそれぞれ B_1 — B_4 で表わすとした。図-6(b) は代表例として基底面から伸びる針 A とピラミッド面から伸びる針 B_1 の間の成す角度の例である。す

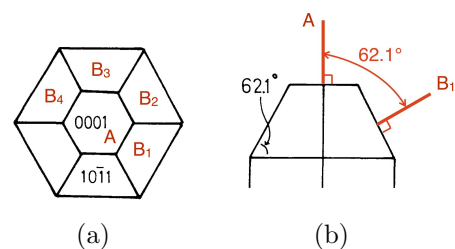


図-6 基底面とピラミッド面の定義。

表-1 各面の法線間角度の理論値.

面の組み合わせ	A-B ₁	B ₁ -B ₂	B ₁ -B ₃	B ₁ -B ₄
法線間の角度	62.1°	52.4°	99.9°	124.2°

すべての組み合わせの角度についてまとめた結果を表-1に示す. 図-3の測定結果は, これらの理論値のうち A-B₁ の関係にある主枝と副枝 (角度 62.1°), B₁-B₂ の関係にある副枝と副枝 (角度 52.4°) の存在の頻度が高いことを意味している. 一方, 図-3 は B₁-B₃ のような副枝を 1 つ間に挟んだ副枝どうし (角度 99.9°) と, B₁-B₄ のような間に主枝を挟んだ副枝どうし (角度 124.2°) の存在頻度が低いこと意味するが, 前者は画像の 2 次元平面内に同時に焦点が合って存在する場合を解析対象としているために測定されず, 後者は A-B₁ の主枝-副枝 (角度 62.1°) として測定されているためにヒストグラムには現われていないと考えることができる. また, 図-3 に示す測定結果が 52°-62° の範囲に多少幅広く分布している原因として, 雪結晶を構成している六角柱が多少扁平になっているものも含まれている可能性が考えられる. なお, 今回の解析結果では測定データ数が 59 点と十分に多いとは言えない点も注意が必要がある.

以上の点を考慮に入れた上で結果を評価すると, 今回観察された放射状針状結晶の生成には, 針の先端に生じるミラー指数 (10 $\bar{1}$ 1) のピラミッド面の存在が強く関与していると言える.

5. まとめ

対流拡散型の人工雪生成装置を用いた実験で, 気温 -40°C~-55°C の低温環境下で水蒸気量が高い場合に多く観測された放射状の針状結晶に注目し, それらの c 軸が相互に成す角度の頻度分布を 2 次元の顕微鏡画像に対する画像処理・解析によって調べた. その結果, 角度 52°~62° の角度となる頻度が高く, 特に 54°~60° に突出する結果を得た. これらの事実は, 個々の針の先端に基底面に加えてピラミッド面が形成され, その面から針が放射状に成長していると考えられること, ほぼ説明できることが分かった.

なお, 今回は解析対象データの数が 59 点と必ずしも多くない. より多くのデータ解析を行って, 本研究での結論を強化する必要がある. また, 今回は相互の角度のみに注目して解析したが, 放射状に延びる針の本数も放射状構造の生成要因に密接に関連していると思われる. 今後の解析には取り入れていきたい.

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°C ~ -55°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°C~-55°C での人工雪結晶生成実験とその特徴, 北海道の雪氷, 30 (掲載予定).
- [4] Kobayashi, T., 1965: Vapour Growth of Ice Crystal between -40 and -90C, *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 359-367.
- [5] ImageJ official site URL: <http://rsbweb.nih.gov/ij/> (2011/06/17 現在).
- [6] Kobayashi, T., Furukawa, Y., Takahashi, T., and Uyeda, H., 1976: Cubic structure models at the junctions in polycrystalline snow crystals, *J. Crystal Growth*, **35**, 262-268.