

# 焦点系列画像を用いた 3次元広がりをもつ放射状の針状雪結晶の特徴解析

原田 康浩<sup>1</sup>, 斎藤 裕太<sup>1</sup>, 中拂 匠<sup>1†</sup>, 柿崎 佑希<sup>1</sup>  
 ( <sup>1</sup> 北見工業大学 )

## 1. はじめに

我々は、南極氷床内陸部に降る雪粒子の特異な形状<sup>1)</sup>への興味から、低温域での人工雪結晶生成実験を進めている。その結果、 $-50^{\circ}\text{C}$ 程度の気温で水蒸気量が極端に多い場合に図-1のような無垢の針状結晶が放射状に成長するという、特異な結果を得た<sup>2)</sup>。これら複数の針のc軸間の角度が $52^{\circ}\sim 62^{\circ}$ の範囲に集中していることから、放射構造の起点部に基底面の他にミラー指数(10 $\bar{1}$ 1)のピラミッド面が形成され、それらの面から針が放射状に成長している可能性が高いことが分かった<sup>3)</sup>。しかし、その解析では顕微鏡画像の2次元平面内に複数の結晶が存在している場

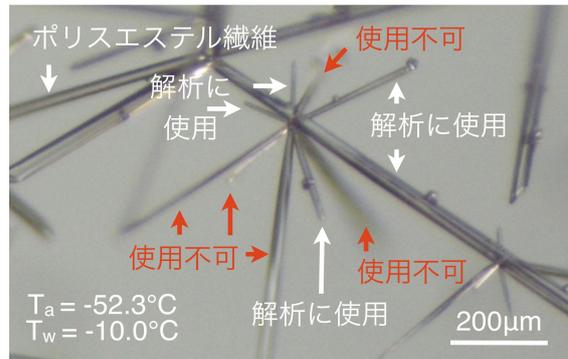


図-1 低温域で人工的に生成された放射状の針状雪結晶<sup>2)</sup>と各針状結晶の角度解析への利用状況。

合しか正しい測定はできず、大部分の針は図-1のように解析に使われていない。そのため、解析結果が放射状の針状結晶の特徴を十分に表すものになっていない可能性もある。

この問題を解決し、3次元的に広がった針状結晶すべてを対象として角度解析が行なえる方法を考案した。それは、測定試料の位置を光軸方向に微動させて焦点の合う位置を変えて複数枚の顕微鏡画像を取得し、画像処理によって試料の高さ情報を抽出するものである。したがって、微動機構以外はこれまでと同じ機材のままであり、特別な測定装置を使う必要はない。本研究では、その原理と放射状の針状結晶のレプリカを測定対象とした適用例について報告する。

## 2. 3次元情報抽出の原理

### 2.1. 焦点系列画像と焦点深度伸長像

図-2は、本研究で使用した試料物体の立体情報を測定し、抽出する方法の原理を示す模式図である。顕微鏡は焦点深度が浅いため、試料ステージが固定されている場合、観察像の焦点の合った位置は奥行き方向のごく一部に限られる。試料ステージを試料の奥行き方向(+z方向)に移動させて像を観察すれば、試料の別な高さで焦点が合った画像が得られる。このように試料の別な高さで焦点が合った画像列(これを「焦点系列画像」と呼ぶ)を入手すれば、2次元平面中のすべての点はその系列画像の中のどこかで必ずピントが合っている。したがって、このようにして得たすべての焦点系列画像に対してピントの合っている位置を検出すれば、「試料表面の奥行き情報(高さ分

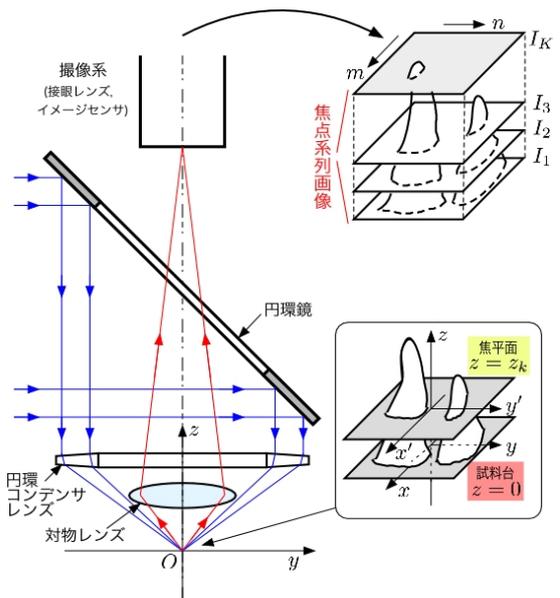


図-2 反射物体試料を落射照明顕微鏡で観察した場合に得られる焦点系列画像

<sup>†</sup>現 警視庁勤務

布)」を入手したことになり、試料の立体形状情報を計測できる。また焦点の合った奥行き位置をそこでの焦点の合った画素の画素値を取り出して、2次元画像のすべての画素で焦点の合った深い焦点深度の1枚の画像（これを「焦点深度伸長像」と呼ぶ）として観察することも可能である。

いま、試料ステージの位置を刻み値  $\Delta z$  で次第に下げながら記録して得た焦点系列画像を  $I_k(m, n)$ , ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) とする。これに対し、2次元平面内のすべての点で焦点の合った1枚の画像（焦点深度伸長像）を  $I(m, n)$  とすると、これらの間には次の関係が成立する。

$$I(m, n) = \sum_{k=1}^K I_k(m, n) S_k(m, n) \tag{1}$$

ここで  $S_k(m, n)$  は、 $k = 1, 2, \dots, K$  の焦点系列画像  $I_k(m, n)$  のうち、焦点の合った  $k$  でのみ値が1でそれ以外は0となる関数である。これをサンプリング関数と呼ぶことにする。「任意の位置  $(m, n)$  で合焦位置  $k$  を検出する」とは、「焦点系列画像  $I_k(m, n)$  からサンプリング関数  $S_k(m, n)$  の分布をなんらかの規則にしたがって決めること」に相当する。合焦位置情報の3次元分布、すなわち物体の3次元立体形状の情報はこのサンプリング関数  $S_k(m, n)$  に集約されている。

### 2.2. 合焦位置検出アルゴリズム

「系列画像中のある  $k$  で焦点が合っている」という判断は、「その点の画素値が、明るい点であれば焦点の合った位置で最も大きく、暗い点では最も暗くなる」という性質を利用すれば実施できる。すなわち、「注目する点の画素値が系列画像中で極値を取る  $k$  を合焦位置として  $S_k(m, n) = 1$ , そうでない場合は  $S_k(m, n) = 0$ 」という処理を施せば良い。しかし、ある画素点の画素値は奥行き方向だけでなく横方向の周りの画素値の影響も受けるため、この方法では正しい合焦位置検出はできない。

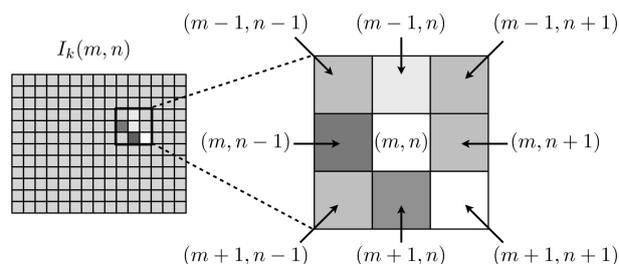


図-3 合焦位置判定のための注目画素と周辺画素の位置関係（ウィンドウサイズ  $3 \times 3$  の場合の例）。

そこで、注目する画素周辺の特定の領域（ウィンドウ）内の統計量に基づいて合焦を判定する方法を採用した。特に、本研究では、図-3 に示すように注目画素  $(m, n)$  のまわりの  $3 \times 3$  画素の領域を考え、次式で定義される領域内の空間的差分の絶対値の和  $AD_k$  を合焦の目安とした。

$$AD_k(m, n) = |I_k(m-1, n+1) - I_k(m+1, n-1)| + |I_k(m+1, n+1) - I_k(m-1, n-1)| + |I_k(m, n+1) - I_k(m, n-1)| + |I_k(m-1, n) - I_k(m+1, n)| \tag{2}$$

この値は、領域内での画素値（明るさ）の変化が大きい場合に大きくなる。焦点が合った位置では、像の明るさの大小は局所的に分布するようになり、コントラストが高くなるため、 $AD_k$  の値も大きくなる。 $AD_k(m, n)$  を焦点系列画像  $I_k(m, n)$  のすべての  $k$  に対して計算し、値が極大となる  $k$  をもって合焦位置（試料ステージの位置は最初の位置から  $-(k-1)\Delta z$ , 焦点の合う物体の試料ステージからの高さは  $z = +(k-1)\Delta z$ ）とする。その  $k$  で  $S_k(m, n) = 1$ , それ以外の  $k$  では  $S_k(m, n) = 0$  とする。

### 3. 実験装置と実験方法

実験では、2010年8月5日に対流型生成装置を用いて結晶生成部の気温  $T_a = -53.2^\circ\text{C}$ , 装置の水蒸気供給部の氷の温度  $T_w = -5.0^\circ\text{C}$  の条件で生成した放射状針状雪結晶を、光硬化性樹脂（東亜合成, ラックストラック LCR0208）を使ってスライドガラス上にレプリカとして固定したものを試料として用いた。図-4 はその全体の様子 (a) とレプリカ部のみを拡大した画像 (b) である。

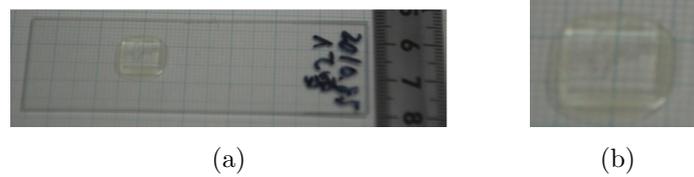


図-4 測定対象試料の雪結晶レプリカ：(a) 全体像，(b) レプリカ部の拡大像。

顕微鏡は、オリンパス社製生物顕微鏡 BX50 を使用し、開口数 0.40、倍率 10 倍の対物レンズを用いて、顕微鏡試料ステージを手動で  $\Delta z = 10\mu\text{m}$  ずつ  $240\mu\text{m}$  まで下に移動させながら、3 板式カラー CCD カメラ (Fujix, HC-2500, 画素サイズ  $6.8\mu\text{m} \times 6.8\mu\text{m}$ ) で検出し、 $1280\text{W} \times 1000\text{H}$  のデジタル画像として合計 25 枚コンピュータに取り込み、焦点系列画像とした。画像の 1 画素の物体面上のサイズは対物および接眼レンズの倍率から、 $\Delta x = \Delta y = 1.35\mu\text{m}$  である。焦点系列画像からの 3 次元情報抽出、画像表示、角度解析などの一連のプログラムは、Matlab 言語を用いて開発した。

#### 4. 結果

図-5(a) はレプリカの顕微鏡画像である。1280 × 1000 画素の画像から、本研究では図中の  $199 \times 163$  画素の部分に注目して処理を行なった。図-5(b), (c) はそれぞれ、25 枚の焦点系列画像のうちの  $k = 14$  番目、および  $k = 23$  番目の画像である。画像中の矢印はその結晶がその画像で焦点が合っていることを示す。

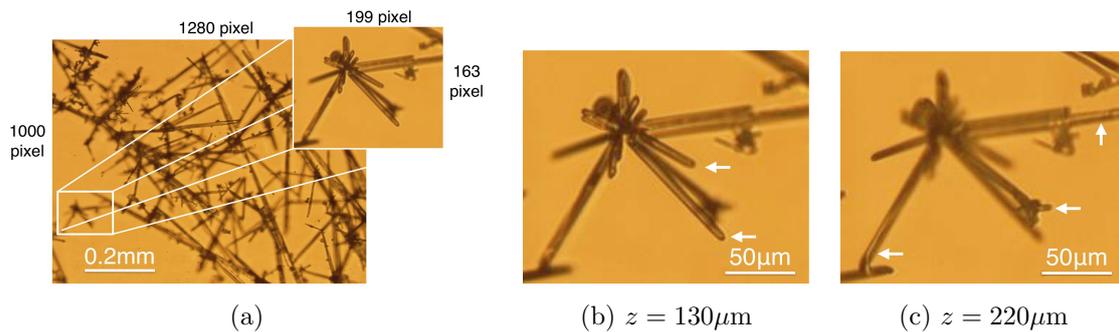


図-5 放射状針状雪結晶のレプリカの顕微鏡写真の全体像 (a) と一部を拡大した像 (b), (c)。

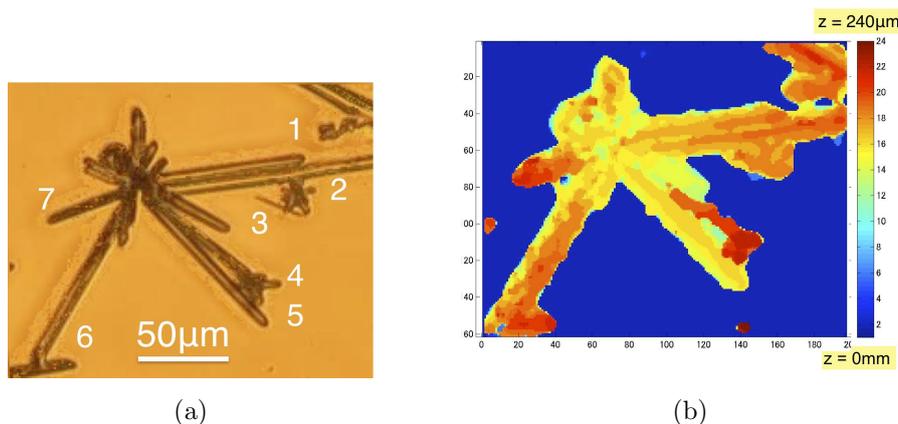


図-6 焦点深度伸長像 (a) と高さ分布のカラーマップ表示 (b)。

図-6 は処理結果であり、(a) は焦点深度伸長像  $I(m, n)$ 、(b) は  $S_k(m, n) = 1$  となる  $(m, n, k)$  の組み合わせを  $k$  に関してカラーコードを割り当てて表現した図である。このカラーマップの任意の点の画素値 (0-24) を読み出して、 $\Delta z = 10\mu\text{m}$  を乗じれば、その点の針状結晶の表面の高さ

となる。これら二つの結果を組み合わせれば、視野内で3次元的に伸びた複数の針の向き、長さ、奥行き、相互の角度など、3次元情報を無駄なく解析に使用することができる。なお、図-6(a)中の番号は、この後の角度解析に使用した針状結晶を区別するために付けた番号である。

### 5. 針状結晶の c 軸間の角度の解析結果

図-6(b)のカラーマップを用いて、放射状に伸びた2本の針状結晶の先端部と根本の画素番号  $(m, n)$  と画素値  $k$  を読み取り、一画素のサイズ  $(\Delta x = \Delta y = 1.35\mu\text{m})$  と試料ステージの移動幅  $\Delta z = 10\mu\text{m}$  を使って、試料面の実空間に直す。図-7のように、2本の結晶の先端の座標を  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ 、根本の座標を原点  $O$  とすると、それら2本の針状結晶が3次元空間で成す角度  $\theta$  は

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right] \quad (3)$$

で計算できる。もしも、 $z$  方向の3次元的な広がり を考慮せず、2本の結晶が  $x-y$  平面上に存在すると誤って解釈した場合の相互の角度  $\theta'$  は、式(3)で  $z_1 = z_2 = 0$  とした値になる。

表-1は、図-6(a)の針状結晶1-7に対して上述の計算による相互角度の結果をまとめたものである。奥行き方向に伸びた針である4や7が関係した相互角度の値(例えば、結晶2-7, 3-4, 4-5の組み合わせ)は、明らかに今回の3次元情報を利用した方法により、有効なデータとして利用できるようになった。他にも、結晶2-3, 2-6の間の角度も、結晶が同一平面内にあると考えて得られる値よりも現実的な値となっており、本方法の有効性が確認できる。ただし、ここで得られた結果は、放射状の構造が基底面と6つのピラミッド面の存在に起因するとの仮説<sup>3)</sup>から予想された値に必ずしも一致していない。これは雪結晶を構成している六角柱が扁平になっているものが多いこと、レプリカ作成の際の放射状構造の破損や結合などが関係している可能性がある。

### 6. まとめ

焦点系列画像の取得とその画像処理・解析により、放射状に成長した針状結晶が互いに3次元的に成す角度を測定できるようになった。この結果、これまでは2次元平面内に同時に存在する結晶どうしの角度しか測れなかったのに対して、飛躍的にサンプル数を増やすことができるようになった。

### 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, 中拂 匠, 原田 康浩, 村井 昭夫, 亀田 貴雄, 2011:  $-40^\circ\text{C} \sim -55^\circ\text{C}$  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).
- [3] 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 (掲載予定).

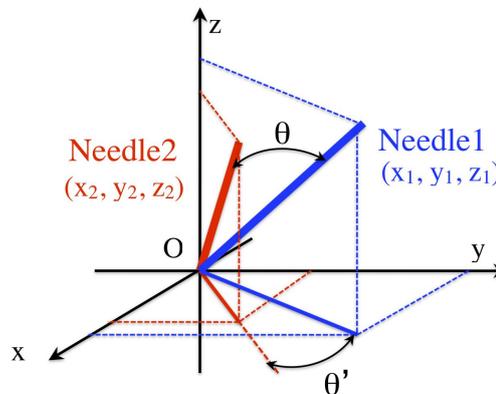


図-7 相互角度計算のための座標系。

表-1 3次元広がり を考慮した結晶 c 軸間の相互角度  $\theta$  と 2次元投影面での角度  $\theta'$  の測定結果。

結晶の 組合せ	角度 $\theta$ [°]	角度 $\theta'$ [°]	差 $ \theta' - \theta $ [°]
1-2	0	0	0
2-3	36.1	29.3	6.8
2-4	39.3	45.0	5.7
2-5	50.6	52.1	1.5
2-6	100.9	116.5	15.6
2-7	99.5	146.9	47.4
3-4	37.1	11.2	25.9
3-5	13.8	14.2	0.4
4-5	25.0	11.1	13.9
5-6	69.9	74.0	4.1
6-7	40.6	43.4	2.8