

雪結晶の美しさの科学

大阪教育大学 山下 晃

1. はじめに

雪結晶は、その写真などを見る機会が多い我が国では、対称的な美しさを代表する結晶として広く知られています。その内部の様々な模様にも、また、その複雑な表面の模様や外形にも、雲の中で進んでいる多様な条件の下での結晶成長の結果が現れています。

角板は、「天から送られた手紙を読む」(月刊うちゅう 2018年11月号)で取り上げました。最も単純な外形の雪結晶ですが、内部には対称的で美しい空気模様が見られます。次の「2.」では、柱面の成長によって空気模様が生じる経過を紹介します。



図1. 樹枝状結晶。(大きさは約3mm。透過光(青)と斜光(白)で照らし撮影。旭岳温泉にて。)

代表的な雪結晶が誕生するのは、過冷却状態の雲粒がある $-12\sim-17^{\circ}\text{C}$ の雲の中です。そこでは、外形も表面の模様も千差万別な無数の見事な六花と呼ばれる雪結晶がよく成長します。図1の樹枝状結晶はその1例ですが、多くの場合、個々の写真から結晶の成長過程を詳細に読み取ることはできません。そのため、「3.」では、高さ15mの装置内に過冷却雲を作って行った、自由落下実験の結果を用いて、樹枝状結晶と扇状結晶の美しさを紹介することにします。

地球上に降る雪結晶は、霰(あられ)や凍雨などまで含めて、121種類に細かく分類されています。多種多様ですが、その中には立体的な美しさが際立つものもあります。その代表的な例を「4.」に挙げます。

2. 結晶内部の空気模様が美しい角板

角板は薄い8面体の結晶(図2)です。「天から送られた手紙を読む」(月刊うちゅう 2018年11月号)に、その内部には様々な美しい空気模様があり、環状空気模様の“複数橋マーク”からは結晶成長の基礎情報を読み取っていることを紹介しました。それは、「角板の6つの柱面は、雲から受け取る“入射水分子”、図2の上の底面と(図2では)隠れている底面の両方から流入する(2通りの)“移動水分子”(図3)の、合わせて3通りの水分子供給があって成長する」(山下 2019)という事実です。

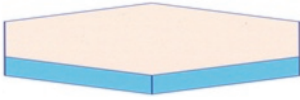


図2. 角板。(底面2つと柱面6つからなる薄い8面体。)

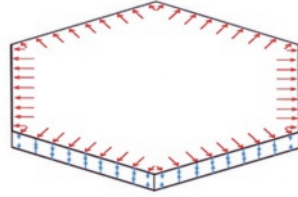


図3. 底面(2つ)から柱面へ向かう“移動水分子”。(底面1つは隠れている。)

角板を美しいと感じるのは、薄い結晶の内部に取り込まれた空気が対称的に分布する複雑な曲線模様を作っているからです。対称的であることには、“入射水分子”は結晶の突出した部分に多くなるが全体としては一様であること、及び、“移動水分子”は(図3の矢印が示すように)底面の角の部分からは少なくなるが全体としては一様であることが現れています。また、複雑な曲線模様になっていることには、“入射水分子”は雲の中の過飽和度の変化に連動して変化するのに対して、結晶表面の“移

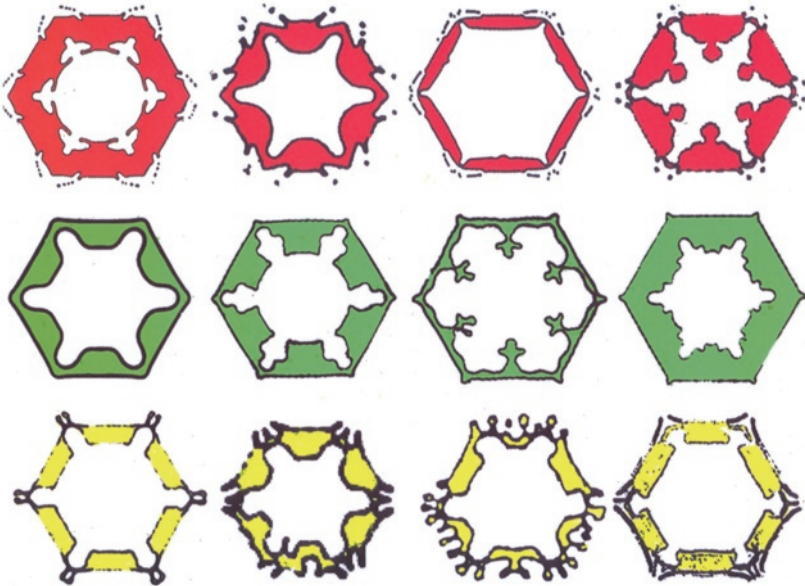


図4. 環状空気模様。(着色した部分が環状の空気模様。“氷-空気”の、内側境界線と外側境界線の形に大きな違いがある。Bentley and Humphreys (1931)から12例。)

動水分子”は、“入射水分子”の変化からは遅れて変化することが関わっています。

このように、薄い角板の美しさは、過飽和度が変動するとき、柱面が、変化に時差がある複数の水分子供給によって空気模様を作って成長することによるのです。それが、結晶の内部に取り込まれた空気と結晶との境界線模様の美しさであることは、他の結晶には見られない特徴です。

多様で美しい12例の環状空気模様を図4に挙げます。なお、台形内空気模様は「天から送られた手紙を読む」(月刊うちゅう 2018年11月号)の図10に挙げています。

3. 扇状結晶と樹枝状結晶の美しさ

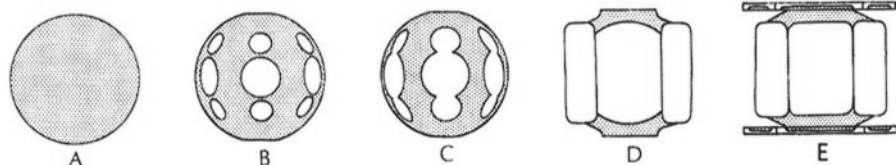


図5. 凍結雲粒の初期成長。

(Bでは球面上に20の結晶面が見られるが、Dでは、結晶面の数は8に減っている。)

過冷却雲の中に誕生する単結晶の凍結雲粒は、図5のA→B→C→Dの順に形を変え、凍結時の直径の2倍程度の大きさまで成長します。その後、 $-12\sim-17^{\circ}\text{C}$ では2枚の板状部分が張り出す図5のEの形を経て、2枚のうちの1枚が樹枝状結晶や扇状結晶に成長します。

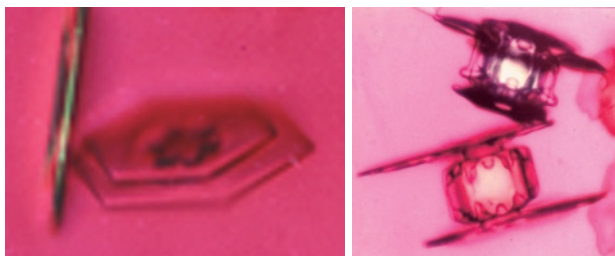


図6. 前図Eに相当する2枚板状結晶。

(何れも、 -14.5°C で成長した約0.15mmの結晶。偏光顕微鏡の鋭敏色検板を使用。)

図5は高さ15mの装置を用いた実験の結果から描いていて、2枚板状結晶の写真を図6に、凍結雲粒から2枚板状結晶を経て成長した樹枝状結晶の写真を図7に挙げます。図8は同様の扇状結晶ですが、左の写真は結晶中央部分の構造が読み取り難い例です。

これらの樹枝状結晶と扇状結晶に見られる模様は、主に表面の凹凸によるものです。なお、これら結晶の各枝には底面が現れている表(おもて)の面と凹凸模様があ

る裏の面がありますが、**図7**と**図8**の写真からは、表の面と裏の面があることを読み取ることができません。表の面と裏の面の違いを読み取るには、角度を変えた観察が必要になります。その例を**図9**に挙げます。

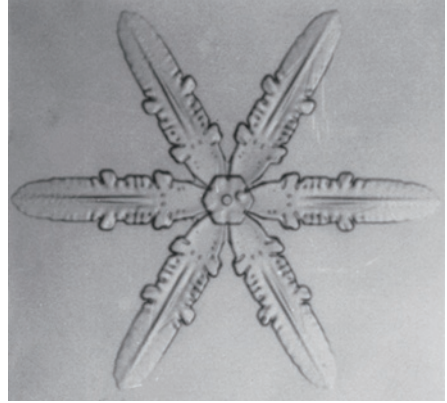
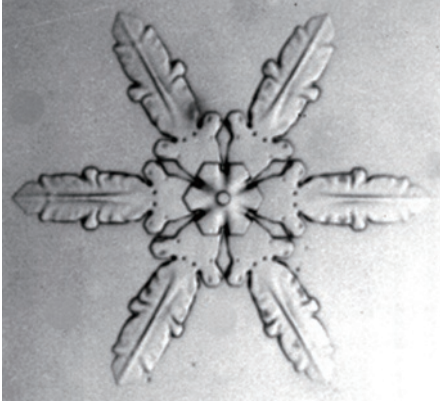


図7. 過冷却雲中で成長した樹枝状結晶。(−15.4℃で自由落下しながら3分間成長した2例。何れも0.5mm。中心の小円が凍結雲粒から成長したことを表し小さな六角形が2枚板化後の片方の六角板が殆ど成長しなかったことを表している。)

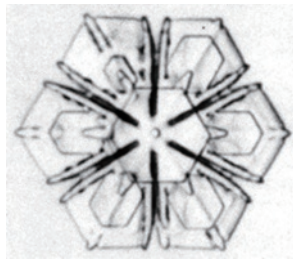
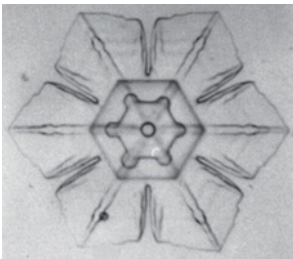


図8. 扇状結晶。(何れも、過冷却雲中で約3分間に0.2mmまで成長している。成長した温度は、左が−12.5℃で右が−16.9℃。)

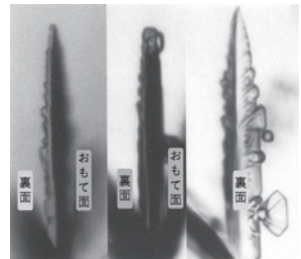


図9. 樹枝状結晶の主枝。(右の主枝では表の面が隠れている。)

底面が現れていることは、樹枝状結晶や扇状結晶の成長には、表の面である底面が“移動水分子”を柱面へ送り出す重要な役割を果たしている可能性が大きいことを意味しています。この可能性が事実であることを確認するのは容易ではありませんでしたが、最近になって、樹枝状結晶の主枝が扇状結晶の主枝の約2倍の速さで成長することや裏の面の凹凸模様の発生を記録した映像を調べ、これら代表的な雪結晶の成長にとっての“移動水分子”の役割が明らかになってきました。

扇状結晶や樹枝状結晶の美しさは、裏の面の模様や枝分かれが、複雑ではあっても6本の主枝で同じように発生しているところにあります。結晶の先端部分が目立ってよく成長していることに、これらの結晶が規則的な落下運動をしていて、柱面も底面も先端部ほど“入射水分子”をよく受け取っていることが現れています。樹枝状結晶などは、効率よく“入射水分子”を受け取ることができる表の面である底面を下に向けて降ります。

4. 立体的な形が美しい雪結晶

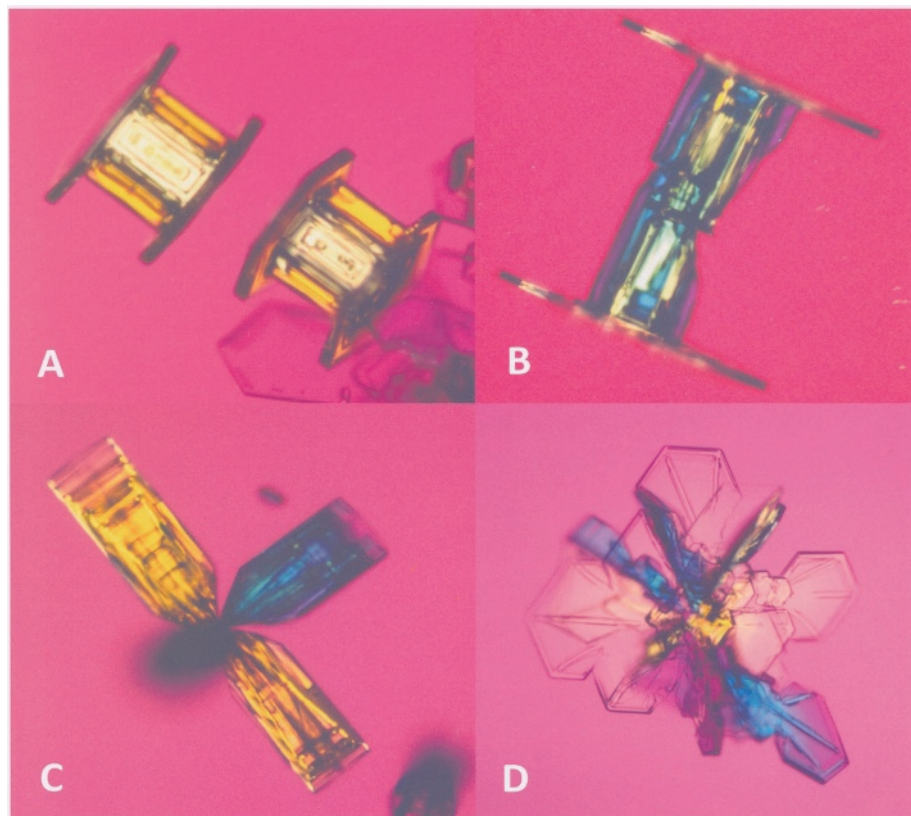


図10. 北極圏に降った雪結晶。(偏光顕微鏡の鋭敏色検板を使用。成長温度とサイズは、Aから順に、 $-33\sim-14^{\circ}\text{C}$ 0.5mm、 $-33\sim-14^{\circ}\text{C}$ 1.0mm、 $-36\sim-24^{\circ}\text{C}$ 0.7mm、 $-21\sim-16^{\circ}\text{C}$ 0.5mm。なお、温度は現地の高層観測のデータから推定。)

ここまでで紹介したのは板状結晶です。これに対して、柱状結晶は、六角形の2つの底面が小さく(底面に接する)6つの柱面が細長い結晶で、 $-4\sim-6^{\circ}\text{C}$ と -25°C 以下の雲の中で成長します。

図10には、AとBに約 -30°C の高層の雲で成長した柱状結晶が下層の雲まで降ってきて形を変えた“鼓(つづみ)状結晶”を挙げました。この変形は、下層の雲の温度が板状結晶の成長する $-14\sim-20^{\circ}\text{C}$ の範囲内であったためです。CとDは、それぞれ、“砲弾集合”と“放射角板”であり、いずれも、多結晶です。

5. おわりに

角板は、水飽和以下の雲内で昇華核に発生する薄い雪結晶で、6つの柱面は“入射水分子”と2つの底面からの規則的な“移動水分子”(「2.」の図3)の供給によって成長します。この成長によって取り込まれた空気がつくる空気模様は、内部が氷飽和に保たれているため、変形が少なく、結晶成長の貴重な情報を含んでいます。なお、角板を薄い状態に保つ成長には限界があり、六角形の底面のサイズが1mmを超えることは稀にしかありません。

これに対して、凍結雲粒からは、「3.」の図5のEまでの変化があるとき、樹枝状結晶や扇状結晶が成長します。この場合は、柱面の成長に重要な役割を果たす“移動水分子”が1つの底面(おもて面)からであるため、空気を取り込むことはなく、先端部分を薄く保ったままの継続的な成長が可能になります。

写真集(Libbrecht 2008)やウェブ(<https://skycrystals.ca/snowflake-gallery/>)を通して閲覧できる雪結晶には、様々な条件で成長したものが含まれています。個々の写真から、その結晶の成長経過を推測することは容易ではありませんが、「2.」と「3.」に記した成長が基本であり、また、双方の成長が混在している場合も多いことを考慮し、雪結晶の写真などを鑑賞したり学んだりしていただきたいと思っています。なお、数が多いので、写真集などは主なものを挙げています。

文献: 山下晃, 2019: 雪結晶が作る空気模様Ⅱ. 天気(日本気象学会誌), 66.
Bentley and Humphreys, 1931: Snow Crystals. Dover Pub., Inc.
Libbrecht, 2008: Snowflakes. Voyageur Press.

著者紹介 山下 晃(やました あきら)



1966年、東京大学理学部助手。気象学・雪氷学・結晶成長学の研究を行う。1977年から大阪教育大学に勤務し、学生指導の傍ら、同様の研究を行う。2002年、大阪教育大学名誉教授。博士(理学)。