

天から送られた手紙を読む

大阪教育大学 山下 晃

1. はじめに

晴れた日に環天頂アーク（図1）や環水平アークを見せてくれる雪結晶は、単純な形の角板です。1992年6月25日には、大阪管区気象台が大阪市内で環水平アークを観測し、 $-17\sim-19^{\circ}\text{C}$ の巻雲中の角板によることを明らかにしています。温度の範囲が $-11\sim-25^{\circ}\text{C}$ では、上層の薄い雲では角板が、下層の液体の雲粒のある雲では樹枝状結晶などがよく成長します。



図1. 環天頂アーク。
(2018年1月7日 宝塚市内で撮影。)

「雪の結晶は、天から送られた手紙であるということが出来る。そしてその中の文句は結晶の形及び模様という暗号で書かれているのである。」と中谷宇吉郎が「雪」（岩波新書）に書いたのは、今から80年前のことです。暗号の発見と解釈は進まないままでしたが、古い雪結晶の写真を整理していて、角板には空気の規則的な模様があることに気づきました。数年前から手紙を読み始めています。

2. 角板の成長



図2. 成長が速いときの角板の形の変化。(柱面を示すため厚めに描いている。)

角板は、六角形の底面が2つ長方形の柱面が6つの、薄い雪の結晶です。巻雲内で底面を上と下に向けて降り、プリズムになって、「1. はじめに」の気象光学現象を見せてくれることがあります。

雪結晶は角の部分ほど多くの水分子が入射するため、図2 (1)の角板は、(2)、(3)、(4)の順に形を変え、樹枝状結晶などに成長すると説明されてきました。しかし、この説明には、巻雲内の角板の成長は含まれていません。

3. 写真から読み取ることができる角板の成長

柱面が目立って成長するのが板状結晶です。柱面の成長とは、多くの水分子が入射する角の部分に発生する新しい水分子層が、柱面上の水分子を次々と結晶に組み入れ、この水分子層が1層2層と重なって厚さを増していくことです。板状結晶を代表する角板の特徴は、柱面の成長が空気を取り込んで様々な模様を作ることです。その様子を、図3左の北極圏に降った0.84mmの角板について、見ることにします。

この角板の写真を立て三角グラフと重ねたのが図3右です。対称的な位置にある同種の模様が発生したときや完成したときの柱面を想定し、サイズの異なる4つの青色六角形を記入しています。これらから、6つの柱面が同じ速さで、ほぼ同じように空気を取り込んで模様を作って成長したことが分かります。なお、山のイラストのように見える模様の山頂の形に2種類あること、図3右では黄色円内のepが結晶の中心から遠い2か所だけにできることなどには、角板が発生したときの柱面のサイズが関係しています。また、模様を空気模様として名称をつけ、順次、図説明に記入します。

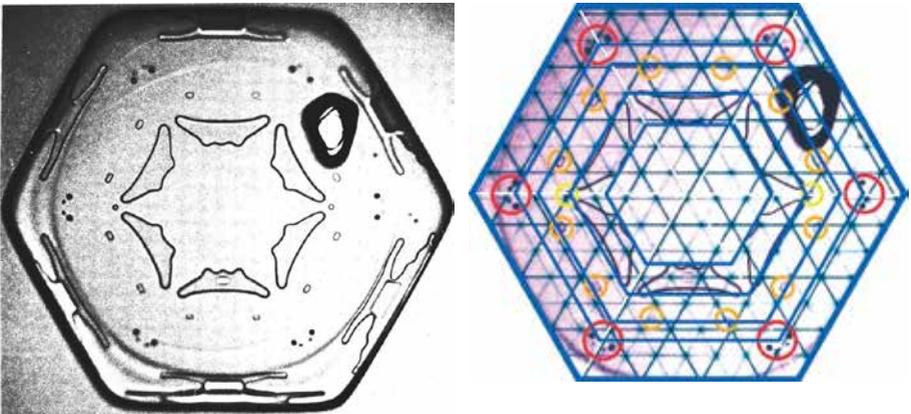


図3. 角板の顕微鏡写真(左)と中央部分を立体三角グラフと重ねた画像(右)。

柱面の成長を読み取るため青色六角形を記入している。山のイラストのような模様は台形内空気模様、黄色円内はep(edge air pocket)、橙色円内はtp(twin air pocket)、赤色円内はsp(side air pocket)。何れも、成長する柱面が空気を取り込んで発生している。(右上には付着氷粒。台形内空気模様は、模様形成中に柱面があった部分が写真では台形であることによる。)

4. 角板に見られる空気模様

北極圏で撮影した雪結晶の写真から、角板の柱面の成長は、空気を取り込んで図4と図5にあるような多様な空気模様を作る(山下2016)ことが分かりました。

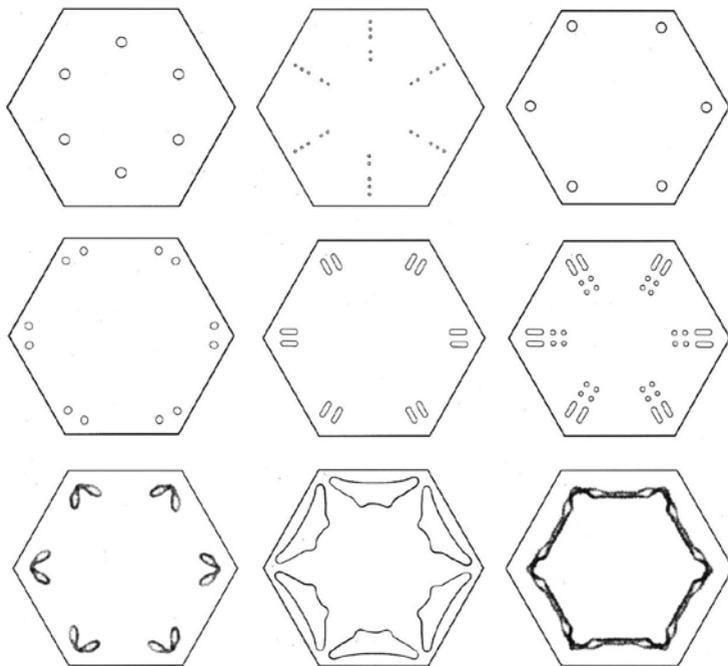


図4. 角板の主な空気模様。(上段の左と中央がcp (center air pocket)、右はep。中段はsp。下段は左から曲がり空気模様、台形内空気模様、環状空気模様。

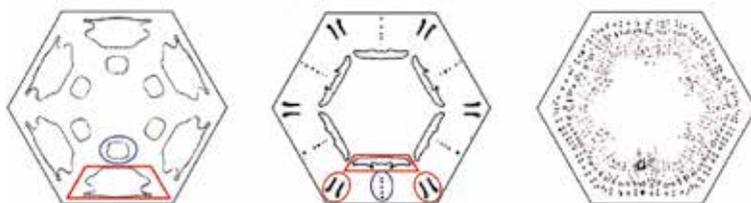


図5. 主な模様の実例。青色円で囲んだのがcp、赤色円で囲んだのがsp、台形枠内が台形内空気模様。右は空気模様群。

空気模様が美しいことには、結晶内の対称的な位置に分布していること、曲線と結晶面が現れた直線とが共存していることなどが関わっています。また、模様のある空間内の空気が氷に対して飽和状態にあることも重要な要素です。

このように美しい模様を作る角板の成長は、epやspが誕生するときの柱面の状態を表す図6から明らかのように、単純に角の部分ほど入射する水分子を受け取るのに有利になるとしたのでは説明できません。



図6. ep が生じるときの柱面の凹部(左)と sp が生じるときの柱面の凹部(右)。

5. ベントレーの角板の“複数橋マーク”

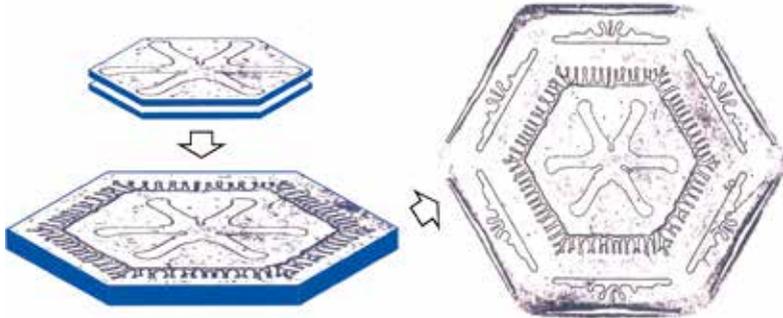


図7. 2枚板になった角板が1枚板にもどって環状空気模様ができる
ときの変化(左)。この環状空気模様がある角板の写真(右)。

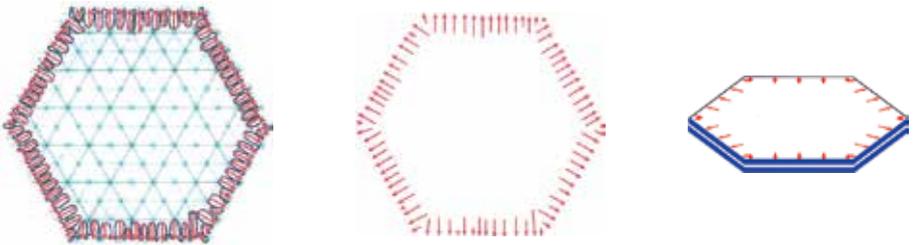


図8. 分離していた柱面に架かった橋が厚さを増した向きに赤矢印を記入した図7
の環状空気模様の外側の曲線(左)。左図の赤矢印(中央)。底面から柱面への水
分子移動(実際には2つの底面から。)(右)。

角板の写真を最も多く掲載しているのは、ベントレーの写真集(1931)です。丁寧に調べると、ベントレーが撮影した角板は、多くの見事な台形内空気模様と環状空気模様を記録していることが分かります。ここに紹介するのは、図7右の角板の環状空気模様です。この模様には、「天から送られた手紙」に書かれた暗号とみなすことができる“複数橋マーク”があります。

成長が速くなるときの柱面には、凹部が発生して拡大することがあり、また、凹部のある柱面の成長が遅くなると、その凹部が縮小する傾向が現れます。図7右の角板では、初期の(図2(1)と同様の形の)小角板

が、柱面の成長が速くなって、図7左上の（図2（4）と同様の）2枚板になり、その後、柱面の成長が遅くなって図7左下の1枚板にもどっています。この2枚板から1枚板に変わるときの柱面の成長は、先ず、凹部に橋を架け、架けた橋を厚くし、その後、柱面を凹部のない状態にしています。この間に誕生したのが“複数橋マーク”とする環状空気模様の外側の曲線です。この曲線に、個々の橋が厚さを増した向きに赤矢印を記入したのが図8左で、記入後に赤矢印だけを残したのが図8中央です。

成長が遅くなったときの角板の6つの柱面には、この赤矢印の分布が示すように、角の部分を除いて、架かった橋の厚さが一様に増すよう水分子が供給されていたこととなります。水分子をこのように供給できるのは、底面から柱面への水分子の移動しかありません。その移動の説明が図8右で、六角形の底面から外に出ていく水分子は角の近くが少なくなることを考慮し、角の部分の矢印を短くしています。実際にも、図8中央では角の両側の矢印が短く、図8左には、角に“複数橋マーク”の突出部があります。

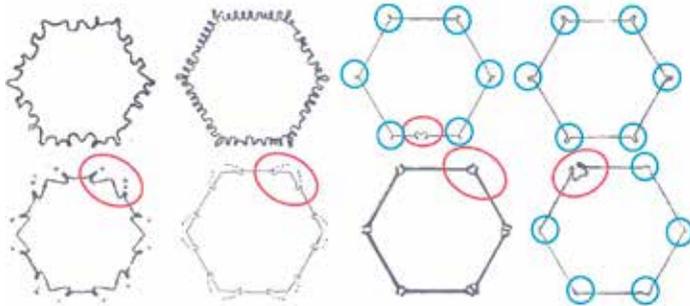


図9. 環状空気模様の外側の曲線8例。（規則的な部分と不規則な部分が共存していて、特に円で囲んだ部分を丁寧に調べている）

以上のように、この“複数橋マーク”から、角板の柱面の成長には ①底面から柱面への水分子の移動が関係している、②（“複数橋マーク”が生じる時間帯に限れば）この移動が主な役割を果たしている、という雪の結晶成長の真相を知る上で貴重な2つの事実を読み取ることができます。同種類の結晶の水分子の供給は同じであり、暗号とするのに相応しい重要な情報が、“複数橋マーク”に隠されているのです。なお、角板が1枚→2枚→1枚と変化してできる、環状空気模様の外側の曲線には、架橋が一定間隔ではなく発生するため、図9にあるような興味深いところを見つかることができます。それは、曲線全体、直線部分、赤色円内の部分、青色円内の部分、六角形に近いこと、凹凸の間隔など多様ですが、何れも角板の成長の基本となる事実を記録しているのです。

6. “複数橋マーク”の解読から始まる新しい雪結晶の研究

明らかに柱面の成長が遅くなるときに生じるのが、環状空気模様の外側の曲線で、“複数橋マーク”はその1例です。従って、柱面の成長が速くなってできる環状空気模様の内側の曲線や、柱面の成長が少し早くなった後に遅くなってできる図10の台形内空気模様などがどのようにできるかについて、雲から入射する水分子と底面から移動してくる水分子のうち、何れの影響を大きく受けて柱面が成長しているかを調べるのが、次の課題になってきます。

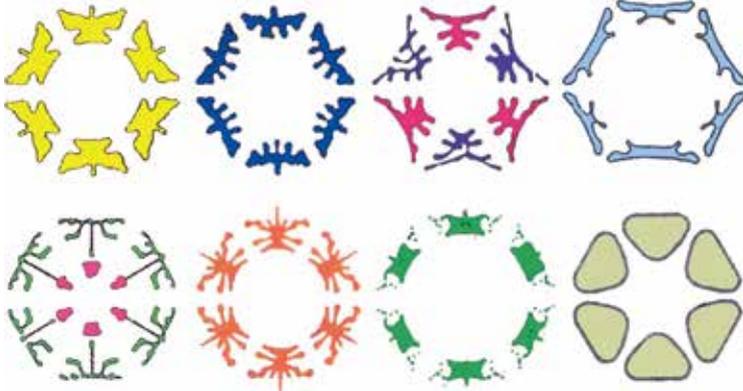


図10. 角板の柱面が空気を取り込んで作った台形内空気模様8例。(空気の部分に着色しているが、色の違いには結晶成長の観点からの意味はない。複雑な形の模様注目すると、これらには共通する特徴がある。)

水分子の底面から柱面への移動には、雲から入射する水分子を受け取る底面に水分子がどのように分布し、それが雲の状態が変わるときにどのように変化するかが関係します。水分子は観察できませんので、暗号に相当する多くの模様を見出して解読するなど、今後の研究の発展に期待しています。

文献：Bentley and Humphreys, 1931: Snow Crystals. Dover Pub., Inc.
 山下晃, 2016: 雪結晶が作る空気模様 I. 天気, 63.

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)。