

雪結晶が作る空気模様 I

—角板の空気模様—

山下 晃*

要 旨

角板の空気模様には、柱面がその中央や中央の両側で空気を取り込んで生じるもの、柱面がその両端の部分で空気を取り込んで生じるものなどがある。また、写真に黒い点として写る小さなものから全柱面に跨って発達する環状のものまで、大きさも様々である。

空気が柱面の両端に近い部分にも取り込まれることは、角板の柱面が複数の水分子供給過程によって成長していることを意味する。

1. はじめに

雪結晶の内部や表面の模様について、Bentley and Humphreys (1931) や中谷 (1949) などに掲載されている雪結晶の写真を資料として調べてきた。その過程で気付かされたのが、内部模様を持つ角板あるいは扇付角板などが Bentley and Humphreys (1931) に特に多く掲載されていることであり、内部模様を丁寧に調べた研究が見当たらないことである。

角板は、中谷 (1949) が“ベントレーの観測では数多く見られているが、北海道では極めて稀にしか降らない”と記しているように、日本国内では撮影された例が少ない。また、中谷 (1949) の人工雪実験やその後に行われた多くの雪結晶研究のための実験でも、内部模様の解析が可能な角板を成長させることには成功していない。従って、角板の内部模様の研究は、北極圏などで地上に降った角板あるいは角板として成長した中心部分が明瞭な結晶を丁寧に調べることから始まることになる。

結晶内部の模様を記述するに当たって、本論文では

気泡や大きな気泡に相当する構造を“空気模様 (air pocket)”あるいは“大きな空気模様 (large air pocket)”とする。その理由は、これまで気泡 (bubble, void, gas enclosure)・空洞 (cavity)・凹部 (hollow, hopper) などとされてきた同種のもの総称が必要になったためであり、開口部のあるものを開いた空気模様とすることができる。なお、解析に用いる結晶の種類については菊地ほか (2012) により角板 (P1a) などとする。

2. 使用した資料と解析方法

2.1 イヌビクで観測した雪結晶

カナダ北極圏のイヌビク (Inuvik, 68°21'N, 133°42'W) で1995年3月に撮影した雪結晶 (Yamashita and Arakawa 1997) の資料には、約40個の角板 (P1a) 及び枝付角板 (P4e) などの写真が含まれている。そのうちの中心部分が鮮明に写っている結晶10個の写真を選び空気模様の解析に用いた。

2.2 ベントレーの雪結晶

イヌビクで撮影した角板などだけでは例数が少ないため、その解析結果を補足する目的で、Bentley and Humphreys (1931) から空気模様に注目して30枚の角板などの写真を選び、同様の解析を行った。用いた写真は (結晶番号, ページの順に), 2, 24; 3, 24; 3, 25; 4, 25; 4, 27; 3, 31; 8, 36 (中央部分の拡大写真

* 大阪教育大学 (名誉教授).
akira4303@voice.ocn.ne.jp

—2015年2月16日受領—

—2016年2月3日受理—

が 8, 81) ; 9, 36 ; 12, 36 ; 7, 37 ; 9, 37 ; 12, 37 ; 5, 40 ; 8, 46 ; 5, 47 ; 8, 47 ; 1, 49 ; 11, 49 ; 10, 52 (中央部分の拡大写真が 5, 103) ; 11, 57 ; 10, 58 ; 12, 59 ; 3, 64 ; 8, 77 ; 5, 81 ; 9, 81 ; 12, 81 ; 5, 105 ; 12, 106 ; 1, 109 である。

2.3 解析の準備

樹枝状結晶など板状雪結晶の写真には、六花状の枝の中央に成長経過の記録と見做すことができる稜線模様がついていて、結晶軸 (a 軸) との関係进行判断する目印になっている。しかし、このような模様が角板にはないため、使用する写真をデジタル画像化し、結晶外形と結晶内部の模様から a 軸あるいは a 軸に平行と見做すことができる線分を記入し解析に備える。

この線分記入は、稜線模様があり記入の必要がない写真と目印となる内部模様がないう写真を除き、問題なく終えることができた。

2.4 空気模様の確認

内部模様の解析では、写っている模様が空気模様であるか否かの判断が求められる。

比較的小さなものについては、その基準になるのが前野・黒岩 (1966) が (本論文では空気模様とする) 気泡であることの確認に用いた雪結晶の写真と (同じ結晶の) レプリカの写真との、黒い点にまで注目しての比較である。この比較を基に、本解析では、写真に写っている同様の閉曲線模様及び規則的な分布を確かめることができる黒い点を空気模様とした。なお、解析に用いたイヌビクの結晶には、採集時の写真中の黒い点のうちの一部が一定時間昇華させた後の写真では消えていることから同様の黒い点を空気模様だと判断できるものが1つと、多数の黒い点が撮影条件を変えた写真では円形に変わることを確認しているもの1つが含まれている。

大きくて独立した明瞭な閉曲線模様も空気模様とした。ただし、開口部の有無を判別し難い閉曲線模様や2枚板状構造の可能性がある閉曲線模様は解析の対象外とした。

3. イヌビクで観測した角板等の解析

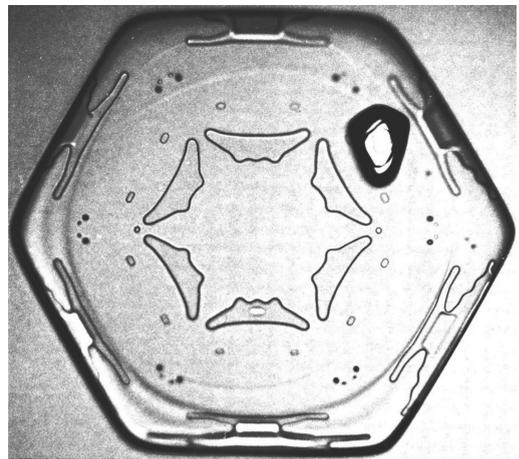
3.1 柱面上の空気模様発生位置

多くの閉曲線模様などが写っているのが第1図の角板 (P1a) の写真であり、同じ写真に記号などを記入し第2図としている。撮影日時は1995年3月19日20時30分である。

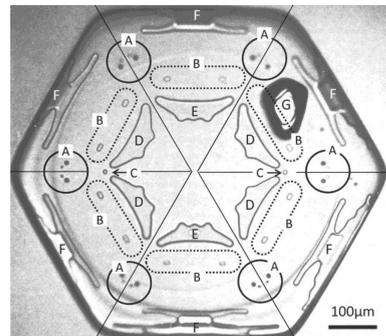
写っている黒い点を含む小さな閉曲線模様は、次の

3グループに分けることができる。その内訳と数は、グループAがAを付した円内の (不鮮明なものを加えて2対ずつの) 24, グループBがBを付した点線内に2つずつある小判型の12, グループCが矢印Cの先の2つであり、何れも2.4節により空気模様である。なお、以下の記述では、このような判断の経緯は省かせていただく。

これら空気模様は成長する柱面に空気を取り込まれて生じたものであり、グループ毎に生じたときの柱面上の位置が異なっている。その位置を柱面に記入した



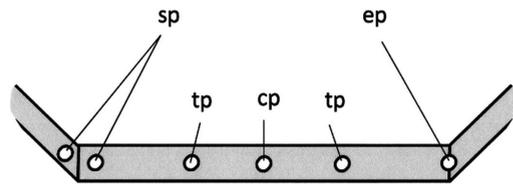
第1図 多くの空気模様がある角板 (P1a)。a 軸に平行な向きの結晶中心部分からの最長サイズを a とするとき、 $2a=0.84$ mm。



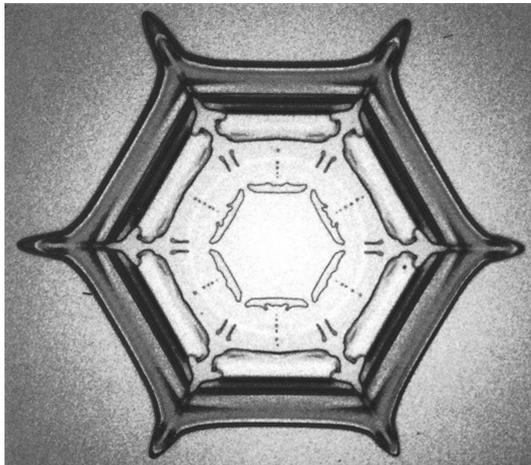
第2図 記号などを記入した第1図の角板。空気模様のうち、実線Aで囲んだ2対ずつがsp, 点線Bで囲んだのがtp, 矢印Cが示すのがep。4つのDと2つのEは大きな空気模様。Fは (解析対象外の) 開いた空気模様。Gは付着粒子。

のが第3図で、本論文では、柱面の両端近くに生じ隣接する柱面に生じたものと対になっているグループAの空気模様をsp (side air pocket), 柱面中央の両側に生じたグループBの空気模様をtp (twin air pocket), 2つの柱面が接するところに生じたグループCの空気模様をep (edge air pocket) とする。なお、この図には、第1図の角板には見出せないが、解析を行った他の結晶には多く見られる空気模様cp (center air pocket) を柱面中央に記入している。また、spとtpとを区分する基準は設けていないが、グループAのspは隣り合う柱面上のものと対となって

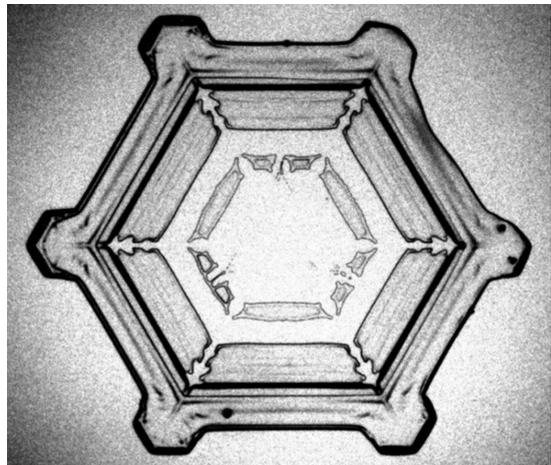
生じていることが明らかであり、グループBのtpは小判型であることが取り込まれた柱面と関わりがある



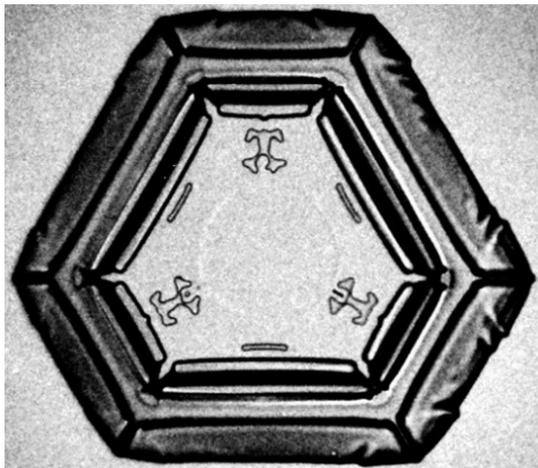
第3図 空気模様sp, ep, tp及びcpが生じる柱面上の位置 (これらが同時に発生することを意味しない)。



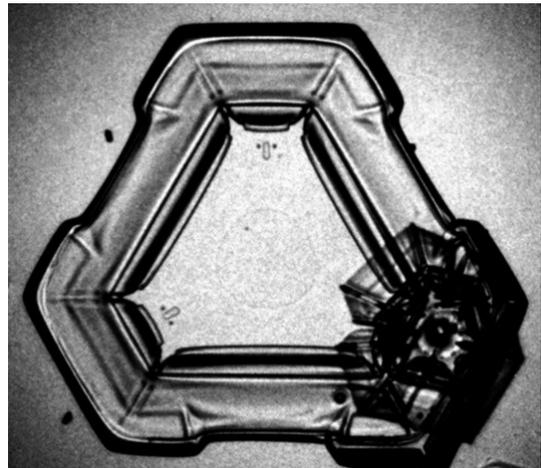
(a)



(b)



(c)



(d)

第4図 イヌビクで観測した角板 (P1a), 扇付角板 (P4f) など. $2a$ の値は, (a)から順に, 1.5 mm, 1.9 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 1.4 mm, 2.0 mm, 2.0 mm, 0.64 mm. (a)~(d)の4結晶は, それぞれ, 一辺の長さ0.01 mm, 0.07 mm, 0.22 mm, 0.40 mmの無垢三角形角板から不等辺六角形結晶に成長している. ((e)~(h)は次頁)

ことを表していると判断し、両者を分けている。

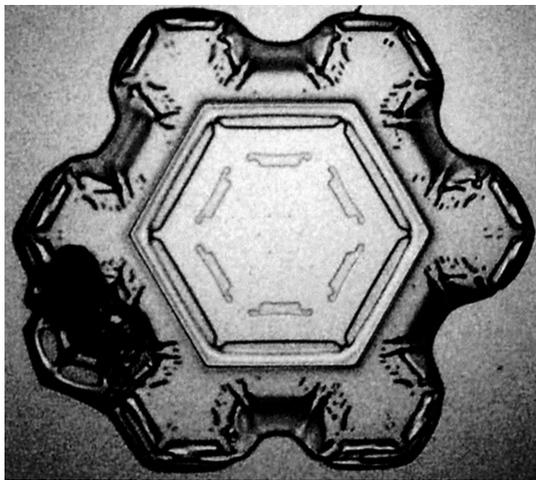
D 及び E は、sp などと同様のものであるが、本論文では大きな空気模様とする。これらについては、柱面における発生位置と完成位置との双方に注目することができる。この場合の発生位置と完成位置は、第3図の記号を用いると、それぞれ、D が tp の 2 か所と sp の 2 か所で E が cp 及び tp の 3 か所と sp の 2 か所である。なお、F は解析対象外の開いた空気模様である。また、記入した線分が角板中心部の 1 点で交わっていないことは、本論文とは別に取り扱う課題である。

3.2 空気模様の種類と特徴

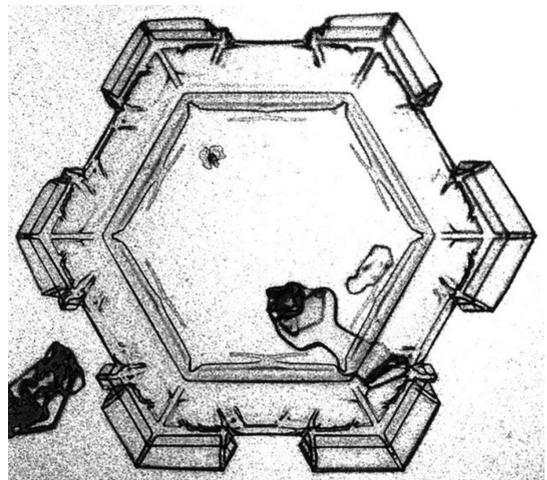
多くの角板 (P1a)、枝付角板 (P4e)、扇付角板 (P4f) などが1995年3月4日の17時から18時の間に降った。それらの写真のうち、解析に用いたのが第4図の(a)~(g)である。また、翌5日にも少数だが同様の結晶が降り、22時40分に採集した同図の(h)を解析に用いた。

次の①~④が解析結果である。なお、線分などを記入した同じ写真が第5図で、この図中の記号を使用する。

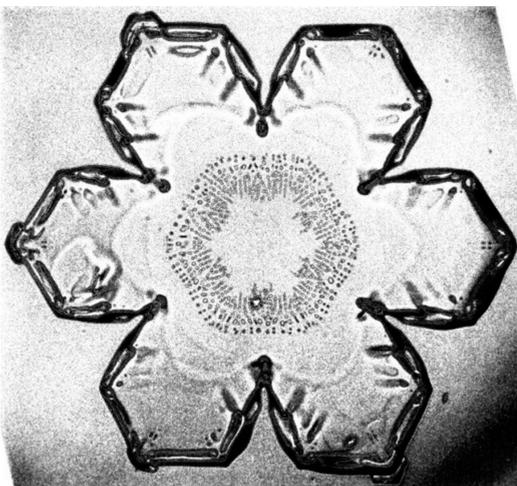
①無垢三角形角板として成長した後に6つの柱面を持つ不等辺六角形結晶として成長したのが、(a)



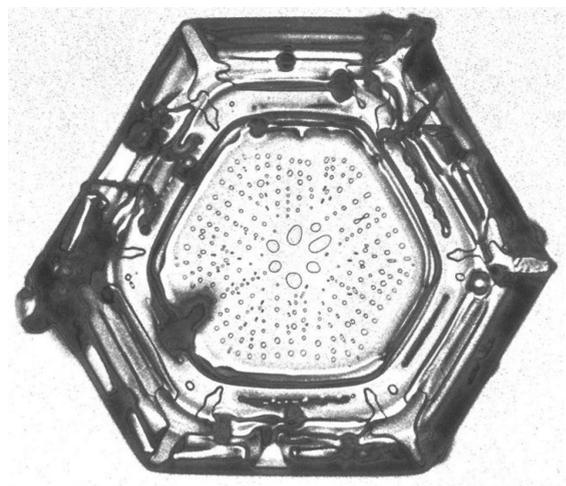
(e)



(f)

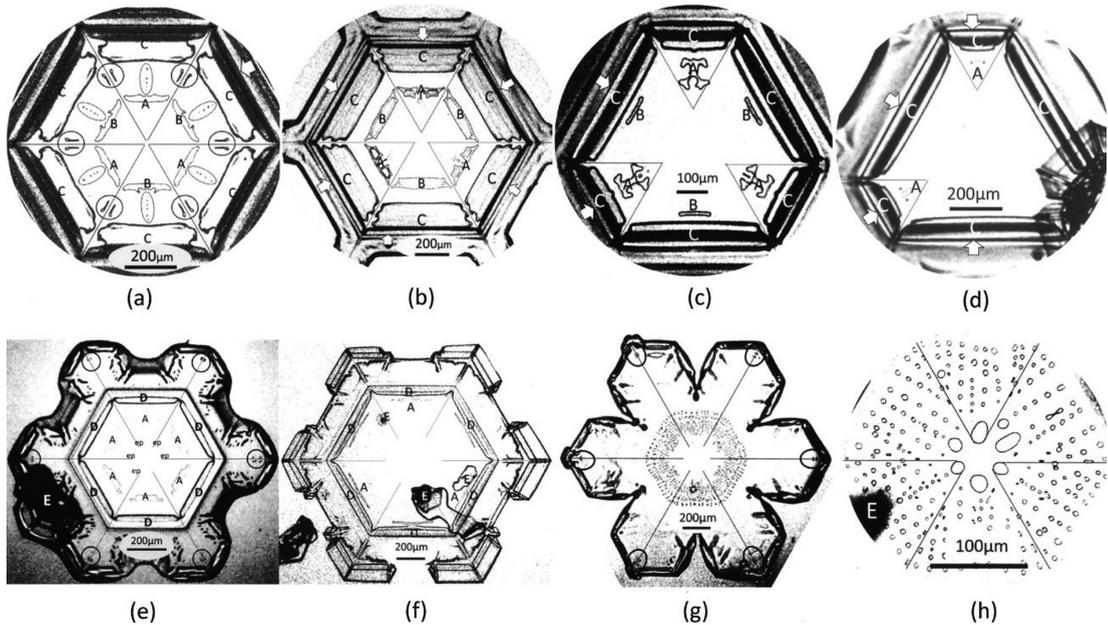


(g)



(h)

(第4図(e)~(h))



第5図 記号などを記入した第4図の結晶。(a) 実線円内が sp, 点線楕円内の cp の列が cp line, A と B は大きな空気模様。(b) A の一部と B が大きな空気模様。(c) A が大きな空気模様, B は cp。(d) A は cp と tp。(e) A が大きな空気模様, 円内は sp。(f) A は cp。(g) 円内は sp。なお, (a)~(d)の C 及び (e)と (f)の D は, 本文中に記した理由により, 何れも解析対象外である。また, E は付着粒子。

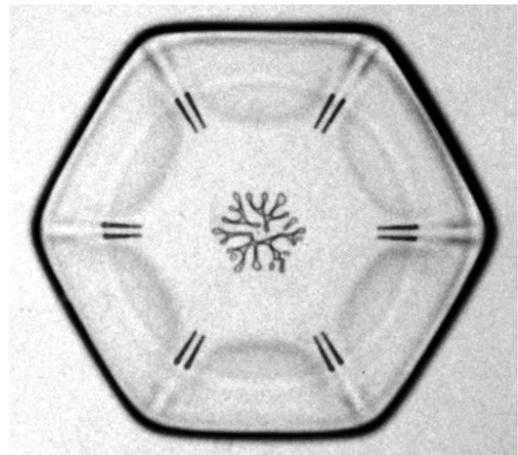
~(d)の4結晶である。柱面6つが大小交互に並んでいて、柱面の成長によって生じる空気模様の形態が、大きな柱面によるものと小さな柱面によるものとは明らかに異なっている。

- ②初期段階から6次の対称性を維持して成長しているのが(e), (f)及び(g)の3結晶であり, (e)の6つの大きな空気模様 A は同じ形と見做すことができる。
- ③中央部に ep を確認できるのが結晶(e)である。
- ④群と呼べるほど多数の空気模様があり, その多くが $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 向きや $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 向きに並んでいるのが(g)と(h)の2結晶である。空気模様群 (air pockets making groups) とする。

なお, (a)~(d)の4結晶中の C は矢印が指示する部分が開口部を表している可能性があることと独立した閉曲線模様ではないことから, (e)及び(f)の D を付した部分は, どちらも6つの D を合わせての閉曲線模様であるため2枚板状部分である可能性があることから, 解析対象外としている。

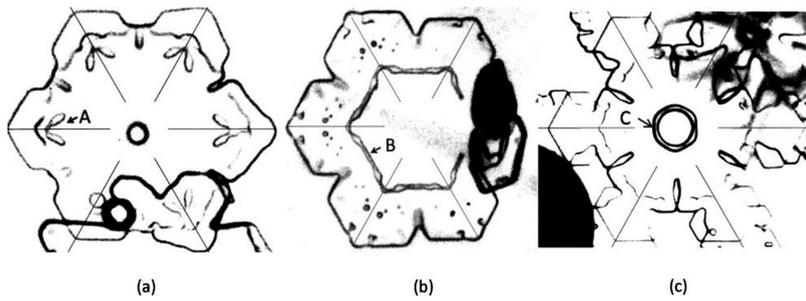
3.3 不定形空気模様

中央部分に不規則な形の空気模様, その外側に6対の sp が見られるのが, 3月5日22時15分に降った第



第6図 不定形空気模様がある角板 (P1a). $2a=0.6 \text{ mm}$.

6図の角板である。中央部分の模様を不定形空気模様 (irregularly curved air pocket) とする。



第7図 説明用の扇付角板 (P4f) など。(a)のAが曲がり空気模様、(b)のBが環状空気模様、(c)のCが小環状空気模様。人工の結晶で、サイズは、(a) $2a=0.16$ mm, (b) $2a=0.16$ mm, (c) 小環状部の直径が0.04 mmである。なお、(a)の曲がり空気模様には完全でないものが含まれている。また、(b)の環状空気模様には欠けた部分がある。

4. ベントレーの写真に見出した空気模様

ベントレーの写真30枚については、同様の解析を結晶中央部分とその周りに明瞭に写っている空気模様限定で行った。前節のイヌビクの角板などの中心部分にないのが、本論文では曲がり空気模様 (bent air pocket), 環状空気模様 (ring air pocket) 及び小環状空気模様 (small ring air pocket) とする3種類である。ここでは、これらと同様の空気模様を自由落下実験 (山下 1974, 1979) の資料写真から選び、記号を付して第7図の(a)~(c)とする。

これらが見られるベントレーの結晶は、(結晶番号, ページの順に) 曲がり空気模様が 8, 46と10, 52 (中央部分の拡大写真が 5, 103), 環状空気模様が 3, 64, 5, 81など多数, 小環状空気模様が11, 57と 9, 81である。

5. 解析結果と課題

角板の柱面に取り込まれる空気を作る大小空気模様の全容をまとめたのが、第8図と第9図の(a)である。また、結晶中央部に見られる空気模様が第9図の(b)と(c)である。ここでは、小項目に分けて解析結果と課題を併せて記述する。

なお、これらの図のcp-2などがベントレーの結晶30のうちの何れに見られるかは図説明に記す。

5.1 柱面上の発生位置により区分できる空気模様 (第8図のcp-1からcp-2, tp-1の順にsp lineまで)

空気模様のうち比較的小さなものの特徴は、その数が特に多い場合を除けば、第3図にspなどと記入した柱面上の発生位置に注目しcp-1からcp-2, tp-1の

順にsp lineまでのように描くことができる。なお、小判型に描いた空気模様が見られることは、内部が2つの底面と2つの柱面と曲面からなる負の結晶としての安定な形になっている可能性を表して興味深い。また、図には示していないが、3柱面が内部に現れているcpもベントレーの結晶 5, 40 (40ページ5番目)に見られる。

列状のものはcp lineなどとし、cp lineは $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 向き、その他は、前野・黒岩 (1966)の結果と同じ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 向きに並んでいる。cp lineでは2つのcpが数字8の形に繋がることもある。

5.2 大きな空気模様・曲がり空気模様・環状空気模様 (第8図のlarge air pocket以降の3つ)

大きな空気模様の代表的な例が第2図のDとEであり、3.2節の①と②にあるように、柱面サイズの違いまで形に反映している。

これらの特徴は、角板柱面の成長の加速時に発生し始め減速時に完成する可能性があることであり、柱面上の発生位置と完成位置とに分けて解析を進めているが、その結果は、雪の結晶成長に関わる内容であるため、別の論文“雪結晶が作る空気模様 II”として投稿予定である。

5.3 空気模様群 (第9図の(a))

柱面上に発生する空気模様である。数が多く発生位置による整理はできないが、第8図のcp lineやsp lineと同じ向きの列を作るものが多い。

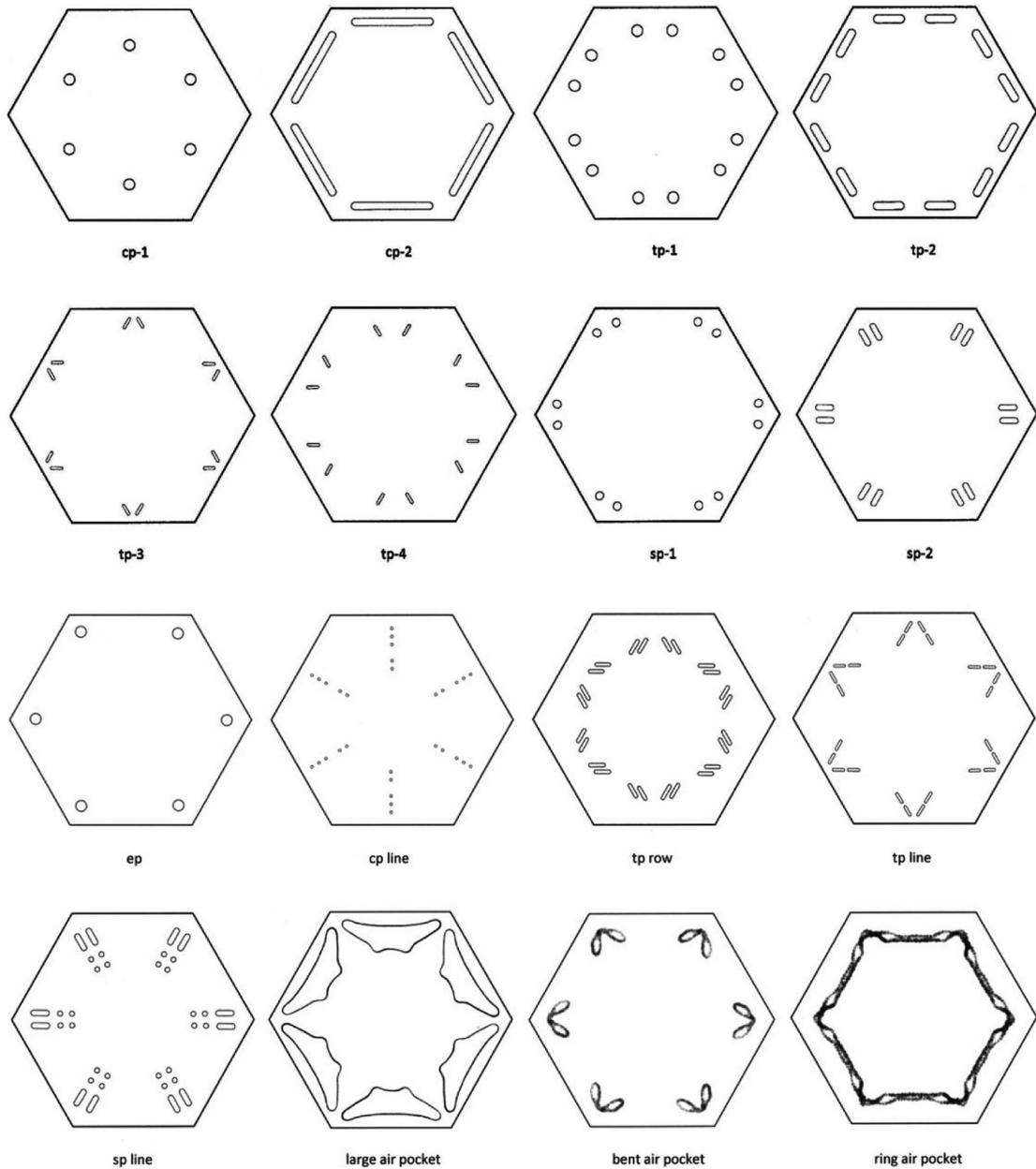
柱面の成長には、このように多くの空気模様を作る場合と1つの大きな空気模様を作る場合とがある。両者の違いがどこにあるのかは、新しい課題になる。

5.4 小環状空気模様と不定形空気模様 (第9図の(b)と(c))

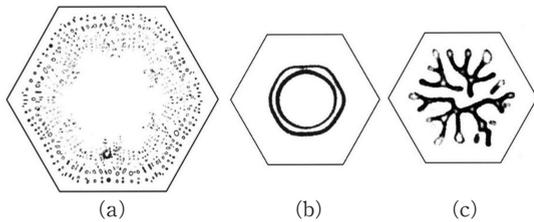
角板などの中央部分に見られる。これらの形成は、無垢の角板が誕生する初期成長に関わる課題である。

5.5 6次の対称の有無

解析を行った角板などには、中心部分に6次の対称が見られないものが少なくない。その数は、イヌビクの結晶10のうち (第1図及び第4図の(a)~(d)と(h)



第8図 柱面の成長に伴って生じる様々な空気模様 (模式図). cp (center air pocket) は柱面中央に, tp (twin air pocket) は柱面中央の両側に, sp (side air pocket) は柱面の両端に近い部分に, ep (edge air pocket) は2つの柱面が接する部分に, それぞれ, 生じるものである. なお, 英語名を記した“大きな空気模様, 曲がり空気模様, 環状空気模様”は本論文中の写真を加工し使用している. 次に, Bentley and Humphreys (1931) から選んだ結晶30のうちの何れに見られるかを写真番号とページの順に列記する. cp-2 : 12, 81 ; 5, 105. tp-2 : 8, 77. tp-3と tp-4 : 11, 57 ; 10, 58. sp-2 : 11, 57 ; 12, 81. ep : 5, 105 ; 1, 109. cp line : 12, 59 ; 3, 64 ; 8, 77. tp row : 3, 25. tp line : 12, 106. sp line : 11, 49 ; 8, 77 ; 12, 106. bent air pocket : 8, 46 ; 10, 52 (中央部分の拡大写真が 5, 103). なお, cp-1, tp-1, sp-1, large air pocket 及び ring air pocket は多いので省略.



第9図 その他の空気模様, (a)空気模様群 (air pockets making groups), (b)小環状空気模様 (small ring air pocket), (c)不定形空気模様 (irregularly curved air pocket). Bentley and Humphreys (1931) の結晶30のうちの何れに見られるかは, 写真番号とページの順に, (a) : 8, 36 (中央部分の拡大写真が 8, 81), (b) : 11, 57 ; 9, 81, (c) : 12, 59.

の) 6, ベントレーの結晶30のうち7である。6次の対称が見られない結晶の成因も, この種の結晶が多い理由も, 角板の初期成長に関わる課題である。

5.6 空気模様の成因

角板が柱面の両端に近い部分や (2つの) 柱面が交わる部分でも空気を取り込んで成長する現象は, 雲から柱面に届く水分子だけによって柱面が成長することを前提としたのでは説明できない。そのため, 雲から柱面に直接届く水分子供給とは異なる特徴がある第2の水分子供給の検討が必要になるが, ここでは, 底面から柱面への水分子の移動にその可能性があることを指摘するに止めさせていただく。

6. まとめ

角板などの空気模様を調べ, 多種多様な空気模様

を, 柱面上の発生位置などに注目して分けし, その結果を第8図と第9図にある合計19枚の小図に示すことができた。

その一方で, 解析結果が多くの課題を伴ったものであることが注目される。底面2つと柱面6つが揃った状態で成長するのが角板である。その誕生と成長の詳細が明らかになり, 雪の結晶成長の全体像が見えてくることを期待している。

参考文献

- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931 : Snow Crystals. McGraw-Hill, London and New York, 226pp. (Republished in 1962 by Dover Pub., Inc.)
- 菊地勝弘, 亀田貴雄, 樋口敬二, 山下 晃, 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー, 2012 : 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶の分類—グローバル分類—. 雪氷, 74, 223-241.
- 前野紀一, 黒岩大助, 1966 : 雪の結晶の中の気泡. 低温科学 物理篇, 24, 81-89.
- 中谷宇吉郎, 1949 : 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 319pp.
- 山下 晃, 1974 : 大型低温箱を使った氷晶の研究. 気象研究ノート, (123), 47-94.
- 山下 晃, 1979 : 自由落下中に成長する人工雪の結晶—凍結微水滴からの成長—. 日本結晶成長学会誌, 6, 75-85.
- Yamashita, A. and T. Arakawa, 1997 : Ice crystals and snow crystals observed at Cambridge Bay and Inuvik in Arctic Canada. Part 2: Snow crystals. Influence of the Arctic on Mid-Latitude Weather and Climate, Edited by R. Kimura and K. Tsuboki, University of Tokyo, 102-115.

Study on Air Pockets Enclosed in Snow Crystal Part I —Air Pockets of Plate—

Akira YAMASHITA*

* Osaka Kyoiku University (Prof. Emeritus).
E-mail: akira4303@voice.ocn.ne.jp

(Received 16 February 2015; Accepted 3 February 2016)