

雪結晶が作る空気模様 II

—変化する柱面の成長に注目した解析—

山 下 晃*

要 旨

角板内部の比較的大きな空気模様は、過飽和度増加に伴って全柱面に生じる開口部が拡大して凹部をつくり、その後、過飽和度減少に伴って全ての開口部が閉じて完成する。この種の空気模様を代表する台形内空気模様と環状空気模様を調べていて、特に注目することになったのは、一旦は2枚板化した角板が、過飽和度減少に伴って1枚板に復帰するときに生じる架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線である。

その外側閉曲線には架橋マークと呼べる部分を含むものがあり、架橋マークの解析を通して、過飽和度に変化がある場合の角板の柱面への水分子供給過程を推定することができる。すなわち、比較的大きな空気模様が生じるときの角板の柱面は、過飽和度が増加するときには主に3次元の拡散場から直接入射する水分子によって成長し、過飽和度が減少するときには主に2つの底面から移動してくる水分子によって成長することが示唆される。

1. はじめに

多くの種類がある雪結晶のうち、結晶成長の初期状態を表す豊富な模様があるのは角板である。山下(2016)は、北極圏で撮影した角板及び六花の写真を用い扁平な角板の柱面の成長が多様な空気模様を作することを明らかにしている。また、柱面2つが接するところに生じた空気模様が見られることから、柱面の成長には拡散場から直接入射する水分子以外の水分子供給が関わっている可能性があるとしている。

角板などの写真を、空気模様の成因に関心を持って閲覧して気付くのは、比較的大きな空気模様が多様でありながら独特の形を備えていることである。大きな空気模様の形成には過飽和度の変化が関わっていることに注目し、解析を進める。

2. 解析と記述法について

2.1 雪結晶の写真と空気模様の確認

解析に用いた写真は、山下(2016)からの1枚を除き、全て Bentley and Humphreys (1931) から選んだ角板などである。この写真集には、“重複掲載がある”あるいは“結晶の外周部分が切り取られている”との批判があり、それらは事実(小林 1975; 油川 2014)である。しかし、結晶中央部分の明瞭な閉曲線模様に注目する限り、角板などの多くの写真が研究に用いることが可能な優れた基礎資料となる。なお、本論文が空気模様とする画像については、Libbrecht (2008) や Komarechka (2013) などに掲載された雪結晶の写真と Don Komarechka の Web ページ <https://skycrystals.ca/snowflake-gallery/> (2018.12.10閲覧) の空気模様の立体像を読み取ることが出来る画像により、同種の空気模様の存在を確かめている。

なお、用いた写真の Bentley and Humphreys (1931) 中の掲載ページなどは各図の説明に明記する。

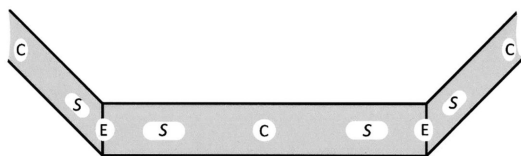
2.2 柱面に開口部が生じる位置

柱面上の位置を表すため、第1図の記号 C (柱面中央), E (2つの柱面が接するエッジ) 及び S (柱面

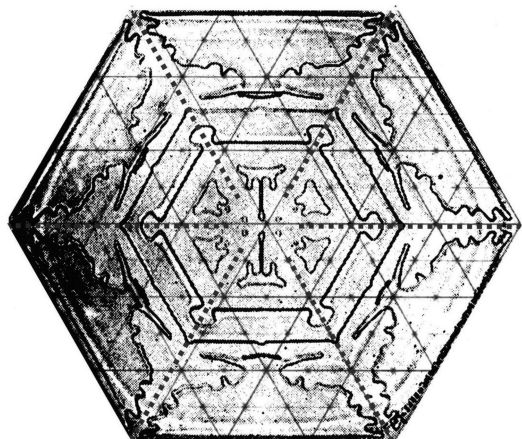
* 大阪教育大学名誉教授。
akira4303@voice.ocn.ne.jp

—2016年12月25日受領—

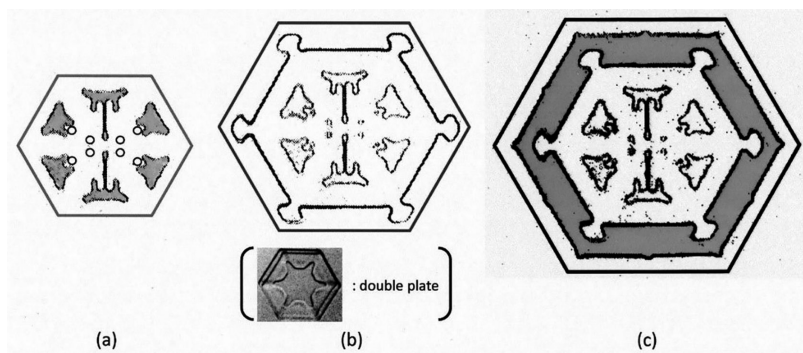
—2018年12月10日受理—



第1図 柱面上の位置を示す記号。Cは柱面中央、Eは2つの柱面が接するところ、Sはspが対になるように生じるところ。



第2図 立体三角グラフと重ねた角板。点線はこの結晶が成長する過程で2つの柱面が接していたところ。用いたのはBentley and Humphreys (1931)の結晶番号4の25ページの写真。



第3図 第2図に見られる架橋復帰型環状空気模様の形成過程。この角板は、柱面に凹部のない(a)から、(b)の2枚板を経て、(c)の柱面に凹部のない状態に復帰している。(a)では、8つの○印がcpを、グレーの部分が台形内空気模様を表している。(c)のグレーの部分が架橋復帰型環状空気模様。なお、(b)の括弧内は参考のための2枚板氷晶の写真。

上のエッジに近い2か所)を用いる。小さな空気模様の、cp (center air pocket) が生じるところがC, ep (edge air pocket) が生じるところがE, sp (side air pocket) が生じるところがSである(山下 2016)。なお、tp (twin air pocket)は省いている。また、Sを斜体にし、spが生じる位置が一定でないことを表している。

2.3 空気模様の名称変更など

山下(2016)の空気模様の名称のうち、大きな空気模様 (large air pocket) を台形内空気模様 (air pocket in trapezoid) に変更する。環状空気模様 (ring air pocket) に大きな空気模様が多くのことが新たに分かったため、新名称は、模様の発生から完成までに柱面が成長する部分が2次元画像では台形で、その台形枠内の模様であることを表している。また、環状空気模様を、連結型、架橋復帰型及びその他の型に分ける。

2.4 立体三角グラフの利用

柱面の成長が空気を取り込む過程を読み取るため、結晶の内部模様と稜線模様の観察を下に、グラフの線が模様から判断した柱面があったところに完全に平行になるよう、立体三角グラフと重ねた画像を作成している。その例が第2図である。作成した画像から6柱面が同じ速さで成長していることが分かり、第2図から、この角板が成長した経過を表す第3図の作成が可能になる。第3図の(a)からは、8つのcpと6つの

台形内空気模様が生じていることを、(b)からは2枚板状化した段階があることを、また、(c)からは架橋復帰型環状空気模様が生じていることを読み取っている。更に、第2図に戻れば、その外側に台形内空気模様を確認することができる。

なお、6次の対称に欠ける角板が少なくないため、グラフの線の交点が結晶の中心になるようには重ねていない。

2.5 柱面上の開口部と雲中の過飽和度との関係

過飽和度が増加し柱面の成長が速くなることは、単分子層が次々と発生することである。また、柱面に開口部が現れるのは、1つの成長層が完成する前に次の成長層が生じる過程が繰り返し起きることによる。

空気模様は、小さなものを除けば、過飽和度増加に伴って柱面の開口部として発生する凹部が拡大し、その後の過飽和度減少によって柱面の成長が遅くなり、その開口部が縮小し閉じて生じる。この解析では、2次元の画像から読み取った柱面の開口部が明らかに拡大中であれば、その部分を過飽和度増加の影響の下に生じたものとし、明らかに縮小中であれば、その部分を過飽和度減少の影響の下に生じたものとする。

2.6 空気模様を構成する境界線

空気模様は、結晶に取り込まれた空気と結晶の境界線である。台形内空気模様では、その一部分を拡大期境界線、縮小期境界線などと記述し、環状空気模様では、内側閉曲線と外側閉曲線とに分けて記述する。

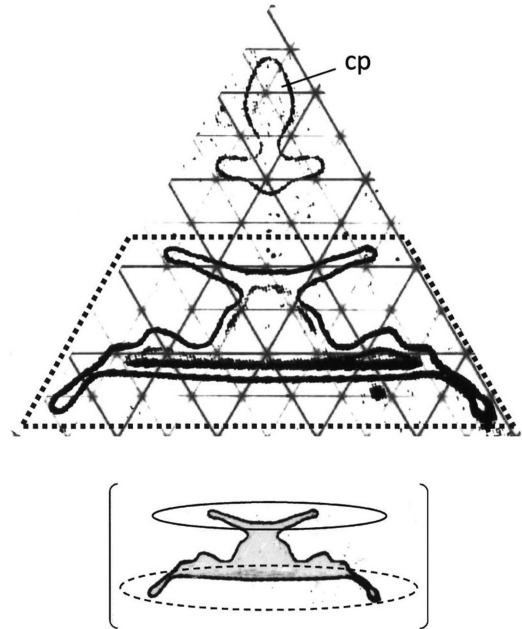
3. 台形内空気模様

比較的大きく各結晶に6つずつ見られるのが台形内空気模様である。この模様を代表する例として、柱面1つの成長によって生じた分だけを第4図に挙げる。その特徴は、台形枠内に生じていて台形に近い形であること、柱面の2か所のSに発生した開口部が拡大しながらCに向かって移動して合体して、(図の実線楕円内の)突出部のある拡大期境界線を作っていること、及び、柱面の開口部が2つに分かれた後に2か所のSで閉じ、(図の点線楕円内の)突出部のある縮小期境界線を作っていることである。

次に、第5図(a)~(h)に、柱面1つの成長によって生じた分を8例挙げる。これらには、膨らみを突出部と同様とみなせば、第4図のものと同じ特徴のある拡大期境界線と縮小期境界線が見られ、(b)と(h)では柱面の中央に柱面に垂直な向きの突出部が加わっている。なお、(a)、(c)及び(f)~(h)には他にも突出部があり、それらにも、拡大期であるか縮小期であるかによって、同様の傾向が見られる。

以上のように、台形枠内に生じる大多数のこの模様は、模様の中央と台形枠の4つの角とを結ぶ線にほぼ平行に、突出部を作っていたり膨らんでいたりで、特徴のある境界線を作っている。この特徴を柱面上の開口部の変化として表したのが第6図である。

なお、第4図及び第5図(d)の結晶の中心に近いと



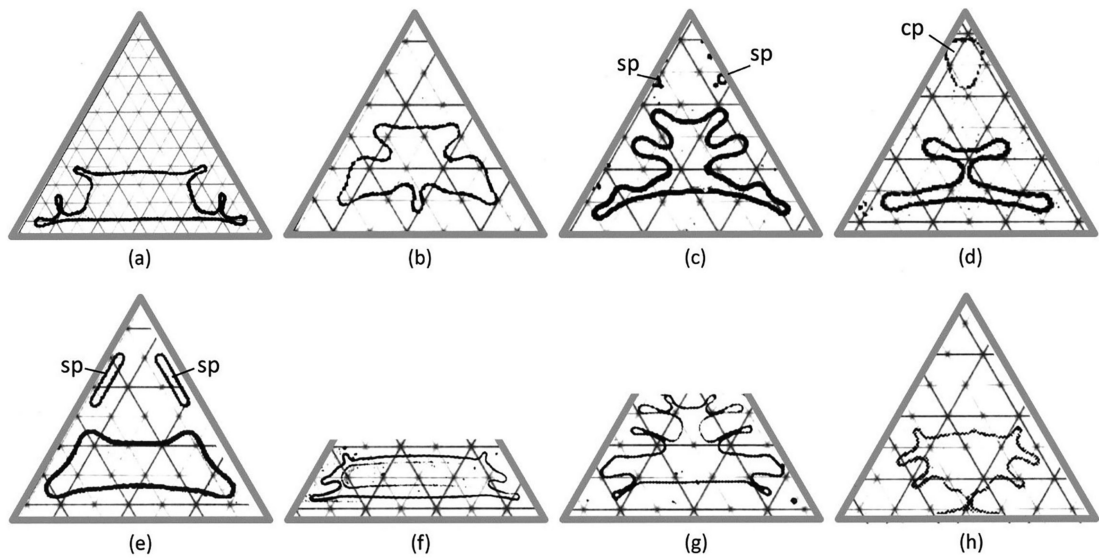
第4図 台形枠内の台形内空気模様。6つずつの模様の1つを結晶の中心が上になるように示している。図中に点線で示した台形(枠)の上底と下底が、この模様形成に関わった柱面に平行である。括弧内には、拡大期境界線と縮小期境界線を、それぞれ、実線楕円と点線楕円で囲んで示している。用いたのはBentley and Humphreys (1931)の結晶番号9の27ページの写真。

ころにはcpがある。このようなcpと台形内空気模様の違いについては、各結晶のサイズが不明な現段階では区別する基準は設けていない。この解析では、比較的大きなものを台形内空気模様としている。

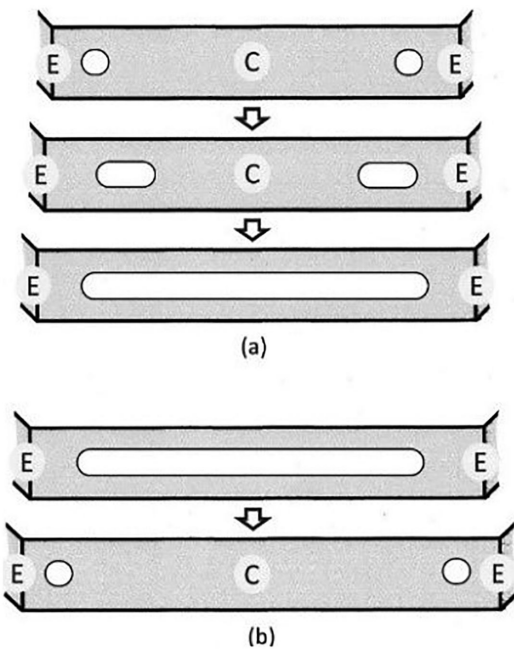
4. 環状空気模様

環状空気模様を説明するのが第7図で、内側閉曲線と外側閉曲線に挟まれた環状部分がこの模様である。第8図に12例を挙げる。なお、内側閉曲線の初期に生じた部分と外側閉曲線のほぼ全体が、それぞれ、台形内空気模様の拡大期境界線と縮小期境界線に相当する。

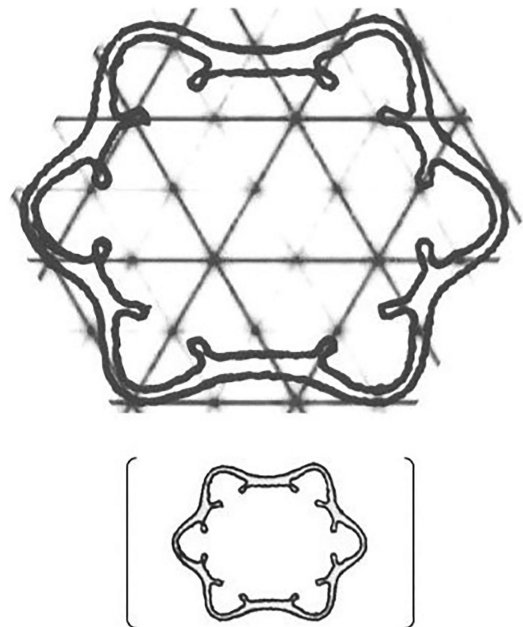
台形内空気模様には、隣り合う縮小期境界線の突出部が、互いに近接して生じている例がある。これと同様の形成過程があり、互いに近接して生ずる突出部が繋がった場合とみなせるのが、第8図の(a)である。第7図の例も同様であり、これらを連結型環状空気模



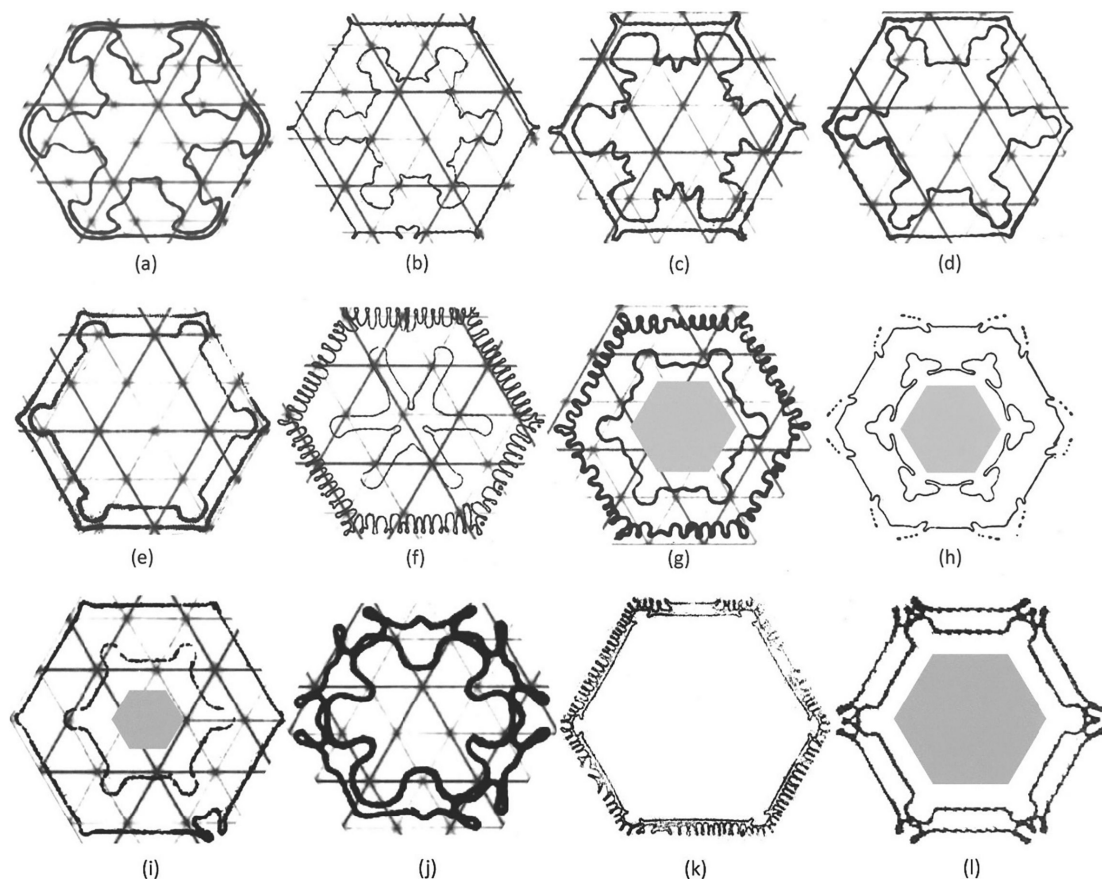
第5図 台形内空気模様8例。最下部が閉じていない(h)は、完成した台形内空気模様ではない。なお、(f)と(g)の上部は削除している。用いた写真の Bentley and Humphreys (1931)の結晶番号とページは、(a)から順に、9, 33; 8, 47; 8, 48; 6, 40; 5, 32; 5, 25 (=12, 25); 7, 37; 1, 26.



第6図 代表的な台形内空気模様が生じるとき柱面開口部の変化。(a)は拡大期、(b)は縮小期を表している。なお、柱面のc軸に平行な向きのサイズは不明。



第7図 環状空気模様。括弧内に、内側閉曲線と外側閉曲線の間がこの模様であることを示している。用いたのは Bentley and Humphreys (1931)の結晶番号7の48ページの写真。



第8図 環状空気模様。(a)は連結型、(b)～(i)は架橋復帰型、(j)～(l)はその他の型。なお、(g)、(i)及び(l)の中央に見られるcpは隠し、(h)は、二重になった模様の内側を隠している。何れも、内側閉曲線と外側閉曲線の間が空気模様。なお、(b)の形成過程を第9図に説明している。用いた写真の Bentley and Humphreys (1931)の結晶番号とページは、(a)から順に、1,95; 5,49; 11,33; 3,58; 10,83; 5,28; 1,91; 11,73; 6,107; 6,137; 12,80; 7,162。

様とする。

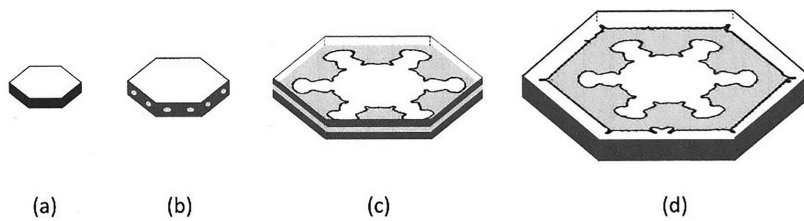
最も多く見られるのが、第8図の(b)～(i)に挙げた型で、一旦は2枚板化した角板が1枚板に復帰して生じている。第8図の(b)を例に、その形成過程を説明するのが第9図である。復帰の際に柱面上の開口部に架橋があることから、これらを架橋復帰型環状空気模様とする。なお、板状結晶には2枚板状のものがあ、2枚のうちの片方だけが大きく成長し六花と呼ばれることが知られている(山下1979)。その場合、小さい方の板状部は柱面に垂直な六角形として記録されていることが多い。この解析では、この小さい方の板状部と架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線の区別が困難な例はなく、明らかな架橋復帰型環状空気模様を

選んでいる。

この他、第8図の(j)～(l)のように、架橋復帰型とするのには2枚板化が不完全なもの、細い帯状のものなどがある。これらを併せて、その他の型の環状空気模様とする。

連結型環状空気模様の特徴は、連結部分を除けば、柱面上の開口部の変化は台形内空気模様の場合の第6図の(a)及び(b)が表す特徴と同じである。

架橋復帰型環状空気模様の内側閉曲線には、台形内空気模様や連結型環状空気模様の拡大期の、第6図の(a)が表す特徴を備えたものが多い。一方、外側閉曲線には、明瞭な過飽和度減少に伴って生じることによる注目すべき特徴があり、その詳細は5節に記す。



第9図 角板に架橋復帰型環状空気模様が生じる過程。(a)には濃いグレーの部分の柱面に開口部はない。過飽和度増加により、(a)から(b)へ、(b)から(c)へと成長するまでに、柱面に発生した開口部が拡大して繋がり、2枚板になっている。その後、過飽和度減少に伴って開口部に架橋が始まり、(d)では全ての開口部が消え模様が完成している。(d)の薄いグレーの部分が、角板が2枚板から1枚板に復帰して生じた架橋復帰型環状空気模様。なお、柱面のc軸に平行な向きのサイズは不明。用いたのは Bentley and Humphreys (1931) の結晶番号5の49ページの写真。

5. 架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線

全柱面に生じた開口部が拡大して繋がると、角板は2枚板状になる。その後の過飽和度減少に伴って架橋が始まり、架橋が進むと開口部が無くなり、外側閉曲線が誕生する。

5.1 外側閉曲線の特徴

第3図の(c)、第8図の(b)、(c)、(d)、(e)、(h)及び(i)に見ることができるように、外側閉曲線には、柱面の開口部に一斉に架橋があったことを意味する柱面に平行な直線部分が多い。なお、台形内空気模様の縮小期境界線や連結型環状空気模様の外側閉曲線には、このような直線部分は殆ど見られない。

これに対して、6つの柱面に平行な多くの凹凸部分からなる第8図の(f)と(g)からは、架橋が始まったところが分かり、架橋を伴って成長する部分的な柱面の状態を読み取ることができる。また、第8図(b)の柱面に平行に生じた直線の一部に見られる凹凸からも、同様に、架橋を伴って成長する部分的な柱面の状態を読み取ることができる。このように架橋の影響が表れている部分を“架橋マーク”とし、第8図(f)の凹凸模様と同図(b)の下部の凹凸模様について、それぞれ、5.2節と5.3節に形成過程を記述する。

Eに突出部があるのが第8図の(b)と(c)、Eに膨らみがあるのが第3図の(c)及び第8図の(d)と(e)である。また、Eの突出部が他の突出部に比べて僅かに長いのが(f)と(g)である。このようにEに突出部などが見られることは、復帰型環状空気模様が完成する直前までこの部分の柱面に開口部が残っていたことを意味する。なお、Eの近傍に対をなす突出部があった

り、その突出部の先に飛び石状に連なるspが見られたりする第8図の(h)と(i)では、Eの近傍で架橋を伴う変化が生じている。

5.2 複数橋の架橋マークを作る柱面の成長

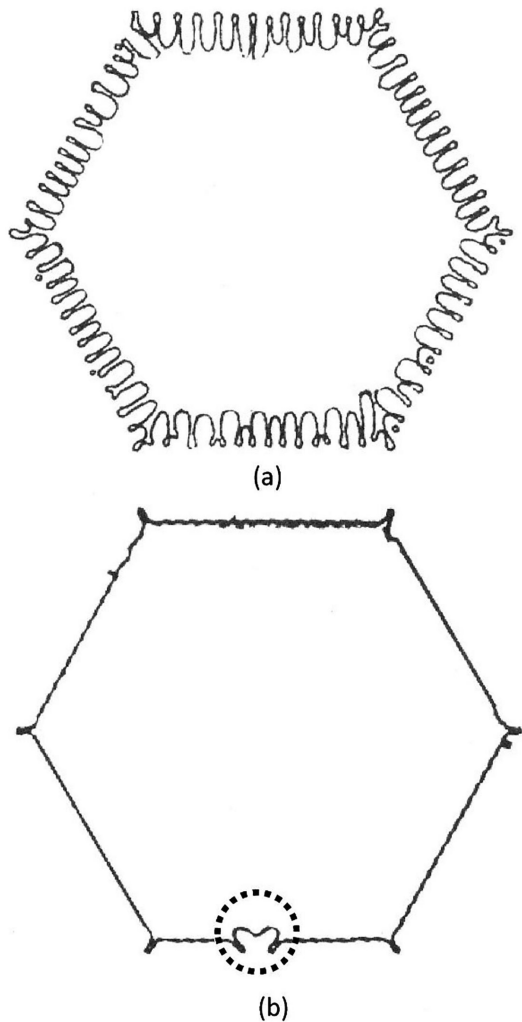
第10図(a)は、第8図(f)の外側閉曲線だけを示していて、全体が複数橋の架橋マークである。また、その一部分を用いてこのマークの形成過程を説明するのが第11図である。外側閉曲線

を上柱面を下に並べたこの図では、柱面の成長が、柱面を分離していた開口部の1か所に橋を架け始めたところが(a)、ほぼ同時に他の5か所でも橋を架け始め6つの橋が繋がるまでが(b)、(c)及び(d)である。何れの橋も、架橋直後には幅が広がっているが、その後は、幅は広がることなく成長層が次々と重なり橋の厚さだけが増している。(d)には橋の厚さが増した向きに矢印を記入しているが、矢印の向きは柱面に垂直で橋と橋との間に生じている空気模様の突出部が伸びた向きと同じである。

このように多くの橋が同じ向きに厚さを増していることは、柱面のEの近傍を除く全域に、矢印が示す向きの均一な柱面の成長を可能にする水分子の供給があったことを表している。この柱面への水分子供給については7節で取り上げる。

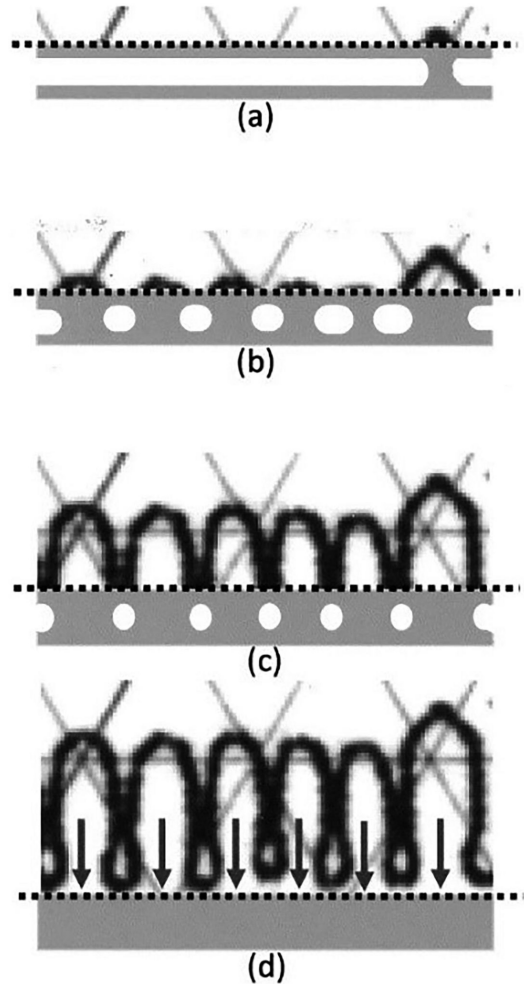
5.3 橋2つの架橋マークを作る柱面の成長

第10図(b)は、第8図(b)の外側閉曲線だけを示していて、点線で囲んだところに、2か所だけ先に橋が架かって生じた架橋マークがある。その発生過程の詳細を説明するのが第12図である。開口部の2か所に橋が架かり始めたところが(a)で、架かった2つの橋が幅を広げて合体し厚さを増しているところが(b)である。1つになった橋が厚くなり、橋の近くの柱面全体の開口部に一斉に橋が架かったとき(柱面のこの部分に)小開口部が2つ残っているのが(c)である。小開口部が残っていて空気模様の突出部2つが生じているのが(d)で、空気模様の突出部2つが互いに近付くように伸び、その後、柱面上の開口部が消え架橋マークが完成しているのが(e)である。



第10図 架橋マークがある外側閉曲線。(a)は第8図の(f)で全体が複数橋の架橋マーク。(b)は第8図の(b)で、点線円内が橋2つの架橋マーク。

この形成過程を、周辺部との相違に注目し、形成が始まった(a)から柱面のほぼ全体の開口部に一斉に橋が架かる(c)までを〈前半〉、一斉に橋が架かった後の(e)までを〈後半〉とする。この場合、柱面の成長が、〈前半〉の橋が2つだけ先に架かったことにより、この部分だけが橋の幅を広げ橋の厚さを増すのに必要とする結晶表面の水分子を多く取り込み、結晶表面に周辺部より水分子が少ない部分を作ったことになる。この結晶表面に水分子が周辺部より少ない部分が残ったことが、〈後半〉の、互いに近付くように伸びる空気

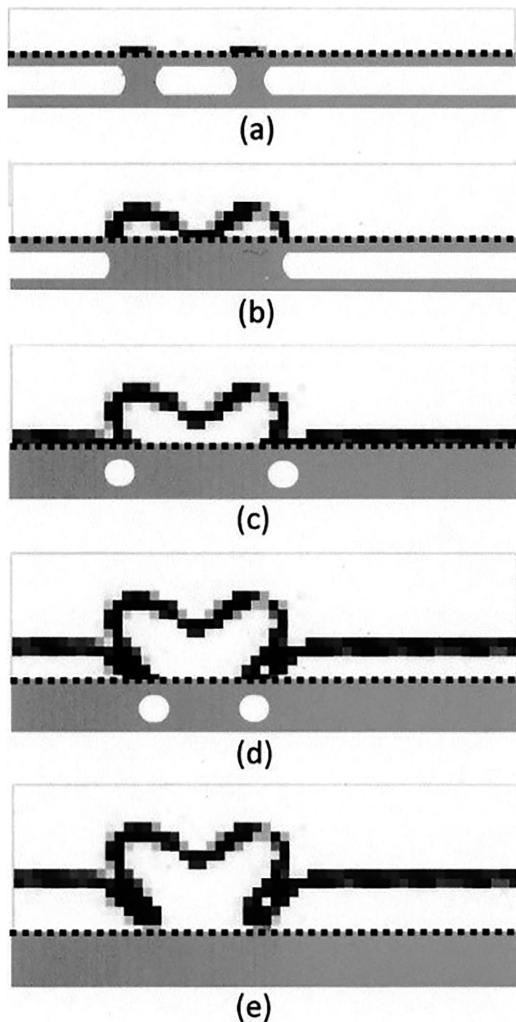


第11図 複数橋の架橋マークが生じる経過。第10図(a)の一部分について、外側閉曲線と(グレーの部分の)柱面を並べ、(a)の開口部1か所の架橋から(d)の架橋完成までを、順を追って示している。矢印は架かった橋が厚さを増した向き。なお、柱面のc軸に平行な向きのサイズは不明。

模様の突出部2つが生じる原因になっている。

何らかの原因があって、結晶面に流入する水分子を結晶表面のある部分が少ない部分に多く結晶に組み込むとき、その結果として、表面の水分子が少ない部分が生じ、その状態の解消に外側閉曲線の形に現れるほどの時間を要する埋め合わせ現象が起きているのである。

この場合、2か所に架かった橋の厚さが増した向き



第12図 橋2つの架橋マークが生じる経過。第10図の(b)の架橋マークについて、外側閉曲線と(グレーの部分の)柱面を並べ、(a)の開口部2か所の架橋開始から(e)の架橋完成までを、順を追って示している。なお、柱面のc軸に平行な向き的大小は不明。

も空気模様の突出部が伸びた向きも柱面に垂直ではない。しかし、柱面に垂直な軸に左右対称な形の架橋マークが少し柱面中央を外れたところに生じていながら、その両側の柱面の成長に影響していないのである。この事実とは、Eの近傍を除いて、柱面のどの部分にも均一な成長が可能な数の水分子の流入があったことを表している。

なお、第11図の説明では、多数の橋の厚さを増す柱

面の成長があって橋と橋との間に空気模様の突出部が並んで生じたとしているが、この場合も空気模様が柱面の開口部がより水分子が少ない部分へ移動して閉じていることに違いはない。

ここまでが2種類の架橋マークの解析結果である。このような明瞭な架橋マークのある外側閉曲線の数はいくつか、鮮明な画像であれば、何れも同様の解析が可能で、例えば、第10図(a)の代わりに第8図(g)の外側閉曲線を用いることができる。

5.4 結晶表面の水分子

これら架橋マークから読み取ることができる興味深いところに、結晶表面の水分子の状態の部分的な変化がある。それを次の①～③に整理する。

- ①成長している柱面には、局所的に周囲より多くの水分子を結晶相に取り込むところが生じることがある。架橋マークから、その部分の成長に関わる水分子を供給する結晶表面の大きな範囲を読み取ることができる。
- ②成長している柱面が局所的に水分子を多く結晶相に取り込むとき、結晶表面に水分子が少ない部分が生じ、その後の柱面が、空気模様の突出部を表面の水分子が少ない部分に作るよう成長することがある。
- ③結晶表面の水分子の分布の変化は、架橋マークにその影響が記録されるほど、時間のかかる現象である。

6. 2柱面隣接位置(E)と空気模様

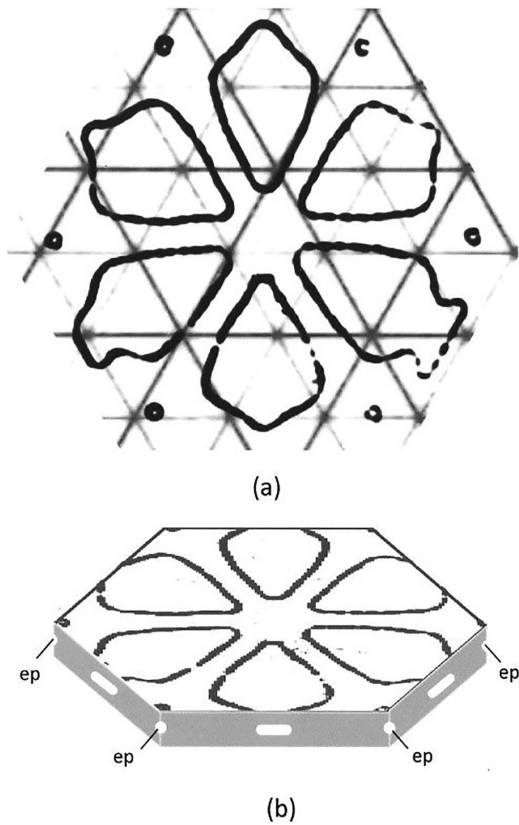
Eにはepが生ずることがある(山下 2016)。過飽和度の変化との関係に注目し、空気模様としての発生数は少ないEと関わりのある空気模様を調べる。

6.1 小さな空気模様 ep

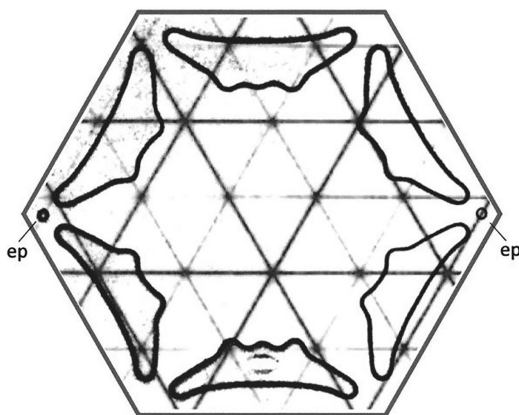
写真から発生条件を調べることができるのは、epが他の空気模様と関わりがあって生じている場合である。2つの例を挙げる。

大きめの6つのcpと6つのepが生じている角板が第13図で、これらを示すのが(a)、ep発生時の柱面の開口部を示すのが(b)である。図から、cpが縮小過程にあるときの柱面にepが発生していることを読み取ることができる。

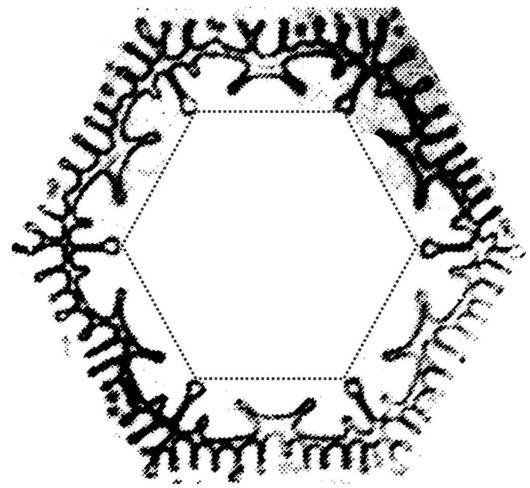
次が、第14図の台形内空気模様が6つとepが2つ生じている例で、山下(2016)の第1図の角板の中央部分である。epが台形内空気模様の完成直後(あるいは完成時)に生じていることを読み取ることができる。形が僅かに異なる2種類の台形内空気模様がある



第13図 大きめの空気模様 cp と ep との関係。(a)は2種類の空気模様、(b)は ep が生じるときの柱面の開口部を示している。なお、柱面の c 軸に平行な向きのサイズは不明。用いたのは Bentley and Humphreys (1931) の結晶番号 2 (= 5) の 78 ページの写真。



第14図 台形内空気模様の完成時に生じた ep. 山下 (2016) の第 1 図の中央部分。



第15図 その他の型の環状空気模様。点線の六角形が E に開口部が発生したときの 6 つの柱面。用いたのは Bentley and Humphreys (1931) の結晶番号 1 の 30 ページの写真。

ことと ep が結晶の中心から少し遠い 2 カ所だけに生じていることも注目される。

6.2 2 柱面隣接位置 (E) と関わりのある空気模様
形成が E から始まっていたり、形成途中で E と関わりがあったりする空気模様が見られる。例数が極めて少ない特殊な空気模様についても調べていて、2 つの例を挙げる。

まず、外側閉曲線に多くの凹凸があるその他の型の環状空気模様の例を第15図に挙げる。図中に点線の六角形を記入し、柱面に最初に開口部が生じたところが Eであることを読み取れるようにしている。この場合は、開口部が E に生じた原因を調べることができる他の空気模様はなく、その後の過飽和度の増加と減少の影響を受けて環状空気模様の形成は進んでいる。その過程で、E に生じた開口部は縮小しているが消えることがないまま残っている。

次が、架橋復帰型環状空気模様が二重に生じている第16図の角板で、その二重の部分の説明するのが下の括弧内のグレーの部分である。結晶中心に近い方が特殊な例で、その形成初期段階の柱面開口部の変化を示すのが第17図である。(a)は、過飽和度の増加に伴って開口部が 6 つの C に発生した段階を、(b)は、これらの開口部が一旦は拡大した後に縮小に転じてから E にも開口部が加わっていることを、(c)は、全ての開口部が繋がって角板が 2 枚板化したことを表してい

る。この変化は、過飽和度の増加→減少→増加の変化に対応しているとして説明することができる。この過程で、E に生じた開口部は縮小しているが消えることがないまま残っている。

以上のように、その他の型の環状空気模様の内側閉曲線の形成が E の部分で始まる第15図の例では過飽和度に関する考察はできないが、第16図の架橋復帰型環状空気模様の例の、E の部分における開口部の追加

形成には過飽和度の減少が影響している。

一方、どちらの場合も、E に生じた開口部が過飽和度の増加に対応して縮小しているが消えず、空気模様の突出部となっている。なお、空気模様の凸部に細くて長い部分が多く見られることについては、過飽和度の変化の影響と分けて検討すべき課題だと判断している。

6.3 曲がり空気模様

E と S を含む位置に生じる曲がり空気模様の例を第18図に挙げる。E を挟んで隣り合う S に発生した2つの柱面上の開口部が、僅かに拡大した後に E を含むよう合体して閉じ、特徴のある形の空気模様を作っている。この場合も、E を含むよう合体して閉じるところに過飽和度の減少が関わっている。

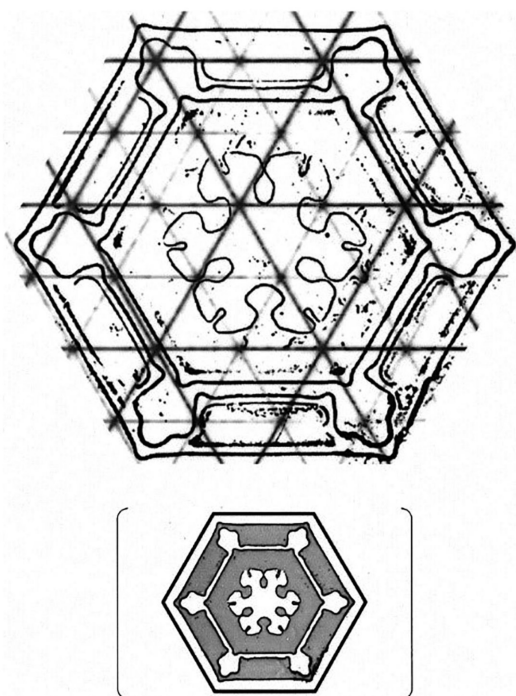
7. 架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線形成時の柱面の成長

ここまで、注目すべき空気模様の特徴を3節、4節及び6節に記述し、架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線を取り上げた5節では、この閉曲線に見出した架橋マークを調べている。ここでは、架橋マークの解析結果を下に、角板の柱面への水分子供給を検討する。

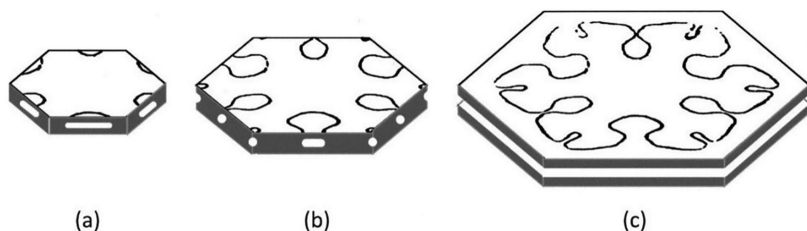
7.1 水分子供給の1次過程

角板が成長しているとき、雲の中には3次元の拡散場が生じ、結晶面では入射する水分子が外へ出ていく水分子より多い状態が継続している。柱面では、入射し表面拡散を行う水分子がステップに沿って存在するキンクに達したところで次々に結晶相に組み込まれていく。また、殆ど成長しない底面にも、入射し表面拡散を行う水分子があつて結晶相に組み込まれる部分がある。しかし、底面で表面拡散する水分子と柱面で表面拡散する水分子との関係は分かっていない。

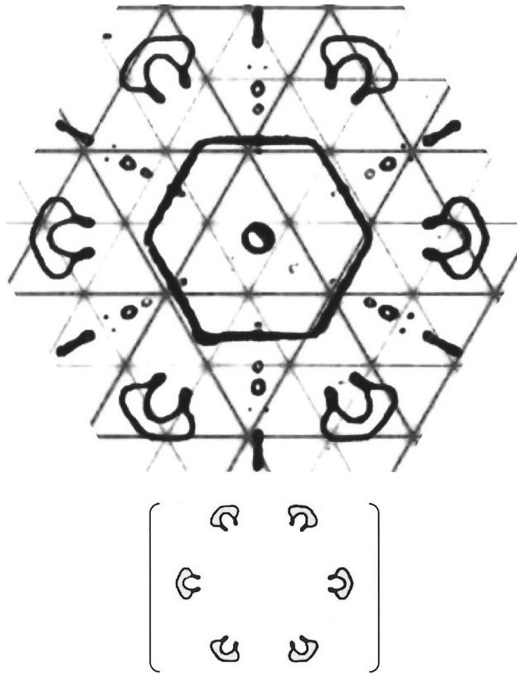
結晶面に水分子を供給する3次元の拡散場の模式図が第19図である。この拡散場から水分子が結晶面に供給される過程を“1次過程”とする。なお、この図にある拡散場で多面体結晶が成長するとき、その成長には先端部ほど有利となるベルグ効果があることが知られていて、凹部が発達し



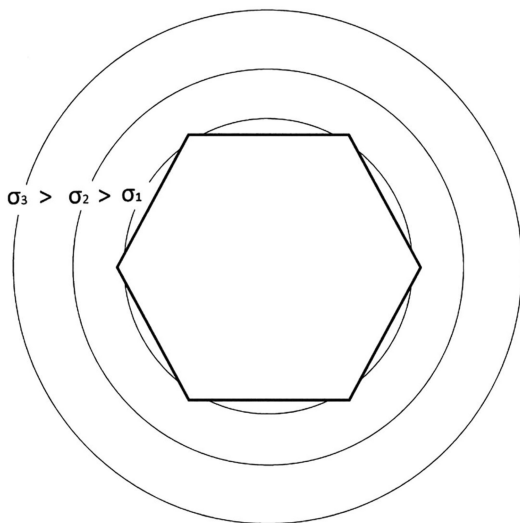
第16図 二重の架橋復帰型環状空気模様。括弧内のグレーの部分が空気模様。用いたのは Bentley and Humphreys (1931) の結晶番号10の35ページの写真。



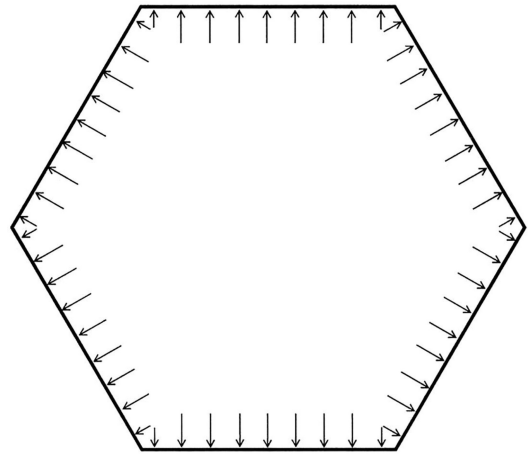
第17図 第16図の内側模様の初期段階の形成経過。柱面に開口部を描き、その変化を(a)～(c)に示している。なお、柱面のc軸に平行な向きのサイズは不明。



第18図 曲がり空気模様。括弧内にこの模様を示している。なお、2枚板状結晶であり cp line も見られる。用いたのは Bentley and Humphreys (1931) の結晶番号 6 の54ページの写真。



第19図 拡散場の模式図。 σ は成長中の角板のまわりの過飽和度。ベルグ効果を説明する。



第20図 柱面へ水分子を供給する2次過程。第10図(a)を参考にして底面の部分を描いていて、矢印は底面上の水分子の柱面への移動を、小矢印はこの移動がEの近傍で少なくなることを表している。

易いのは結晶面の中央部分である。

7.2 水分子供給の2次過程

各柱面に数本～十数本の橋が架かる成長があつて生じたのが、第10図(a)の複数橋の架橋マークである。5.2節にあるように、架橋が始まってからの6柱面は、このマークが完成するまでの間は開口部を残したまま、均一な成長を可能にする水分子の供給を受けている。これは、1次過程を主とする水分子供給によるものではない。

3次元拡散場から角板への水分子供給は、このような場合も、1次過程に限られる。従つて、柱面の成長には1次過程によって2つの底面に入射して表面拡散を行っている水分子の柱面への移動が関わっていることになる。この第2の水分子供給過程を“2次過程”とし、その底面の部分を第10図(a)の架橋マークを参考にして描いたのが第20図である。図中の長い矢印の向きは、第11図(d)に柱面が厚さを増した向きに記入した矢印の向きと同じにし、サイズを揃え、この移動が均一であることを表している。また、短い矢印はEの近傍ではこの移動が少なくなることを表している。なお、Eの近傍の移動を少ないとする根拠は、第10図(a)の架橋マークではこの部分の空気模様側の突出部が少し長いことにあり、表面拡散を行っている水分子の平均移動距離が底面のどの部分でも一定であるとするとき、2つの柱面が六角形の底面と接するEの近

傍が1度の移動で柱面に流入可能な水分子数が少なくなることに対応している。柱面の成長にとっては、先端部が有利になる1次過程に対して、底面からの流入である2次過程は、このように、2つの柱面が交わるところが不利になる関係にある。

なお、水分子の異種結晶面間の移動は、Mason *et al.* (1963), Kuroda and Lacmann (1982) 及び Nelson (2001) により検討されたことがある。また、山下 (2016) は角板が柱面の両端に近いSや(2つの)柱面が交わるEでも空気を取り込んで成長する現象に注目し、この移動が第2の水分子供給源である可能性に言及している。

7.3 外側閉曲線と2次過程

複数橋の架橋マークを調べて解ったのは、第8図(f)の外側閉曲線形成時に、柱面が主に2次過程の水分子供給を受けて成長していることである。

これに加えて、次の①と②を確かめることができる。

①5.1節の外側閉曲線の特徴のうち、架橋が一斉に生じたとみなすことができる柱面に平行な直線部分が多いこと、及び、Eに突出部などが見られることは、1次過程の影響によるとして説明することはできない。これに対して、このような直線部分が多いことは2次過程の影響によるとしての説明が可能であり、Eに突出部などが見られることには2次過程の影響が直接現れている。

②5.3節の橋2つの架橋マークを作る柱面の成長を調べた内容は、柱面が2次過程の水分子供給を受けて成長したことを表している。

以上から、架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線は、2次過程が主な水分子供給源となって柱面が成長して生じたものとすることができる。

8. 空気模様形成時の1次過程と2次過程の役割

比較的大きな空気模様を調べ、架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線が生じるとき、角板の柱面が2次過程を主な水分子供給源として成長していることが分かったのである。これは角板の柱面へ水分子を供給するのが1次過程と2次過程であることを意味し、発生する空気模様の違いなどによって、それが変わることはない。

ここでは、1次過程と2次過程とが相対的にどのような関係にあって柱面の成長に関わっているかを、空気模様が過飽和度増加に伴って発生して拡大し過飽和

度減少に伴って縮小して完成することに注目し、検討する。

8.1 過飽和度変化時の1次過程と2次過程

1次過程は3次元の拡散場における水分子の供給であり、2次過程は1次過程で入射した後に表面拡散を行っている水分子の移動である。従って、注目するのは1次過程と2次過程が安定な状態にあるときに過飽和度が変化して1次過程が変わると、その影響を受けた底面の状態と柱面の状態が変化し、どちらも安定な状態になって初めて新たな安定な2次過程が実現することである。この場合、最初の安定な状態から新しい安定な状態に達するまでに“ある程度の時間”を要することになる。すなわち、過飽和度増加時の“ある程度の時間”内の柱面の成長には、強化される1次過程が2次過程より大きく影響し、過飽和度減少時の“ある程度の時間”内の柱面の成長には弱くなる1次過程に代わって2次過程がより大きく影響し、何れの影響も空気模様の形に現れる可能性があることになる。なお、この考え方の根拠となるのは、5.4節の③の、“表面拡散を行っている水分子の分布の変化は外側閉曲線の形に影響するほど時間がかかる”解析例である。

8.2 拡大期境界線及び内側閉曲線

台形内空気模様の拡大期境界線の特徴は、第6図(a)が表している。また、4節では、連結型環状空気模様の内側閉曲線の初期に生じた部分には第6図(a)が表す特徴があり、また、架橋復帰型環状空気模様の内側閉曲線も、第6図(a)が表す特徴を備えたものが多いとしている。

その“柱面の両端に近い2か所のSに発生した開口部がCに近づくよう移動しながら拡大する”特徴は、過飽和度増加時に、柱面の成長に“ある程度の時間”1次過程が2次過程より大きく影響する結果とみなすことができる。

8.3 縮小期境界線及び外側閉曲線

台形内空気模様の縮小期境界線の特徴は、第6図(b)が表している。また、7節で詳述した架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線は除くが、4節では、連結型環状空気模様の外側閉曲線にも第6図の(b)が表す特徴が見られるとしている。

その“Cを中心に拡大していた開口部は縮小して2つに分離しEの近傍の2か所で閉じる”特徴は、過飽和度減少時に、柱面の成長に“ある程度の時間”2次過程が1次過程より大きく影響する結果とみなすことができる。

8.4 2 柱面隣接位置 (E) と空気模様

曲がり空気模様を含めた E と関わりのある空気模様には、過飽和度の情報がない場合は除くが、6 節に記したように、過飽和度減少に伴う水分子供給の 2 次過程の影響が現れている。

9. まとめ

比較的大きな空気模様を調べ、架橋マークを見出すことができた。その解析を通して、次のような、水の気相成長の基本となる結果を得た。なお、①は空気模様の名称についてである。

- ①山下 (2016) の大きな空気模様 (large air pocket) を台形内空気模様 (air pocket in trapezoid) に変更し、環状空気模様 (ring air pocket) を、連結型、架橋復帰型及びその他の型に細分する。
- ②複数橋の架橋マークが生じることがあるのが、架橋復帰型環状空気模様の外側閉曲線である。この架橋マークは、過飽和度減少時に外側閉曲線が生じるときの柱面の成長に、3 次元拡散場からの 1 次過程の水分子ではなく、2 つの底面からの移動である 2 次過程の水分子が大きく関わっていることを表している。
- ③比較的大きな空気模様が生じるときの 1 次過程と 2 次過程の関係は、次の通りである。すなわち、結晶面上の水分子分布が直ちに過飽和度の変化に伴う安定な状態に達することはないため、過飽和度が増加するときには強くなる 1 次過程が柱面へ水分子を供給する主な過程となる時間帯があり、過飽和度が減少するときには弱くなる 1 次過程に代わって 2 次過程が柱面へ水分子を供給する主な過程となる時間帯がある。この 1 次過程と 2 次過程の関係が、多様な

空気模様をつくっている。

- ④E には ep が生じることがあり、E から始まる環状空気模様も存在する。これらの E と関わりがある部分の形成には、過飽和度減少時の水分子供給の 2 次過程の影響が現れている。
- ⑤橋 2 つの架橋マークが生じている事例から、部分的だが、結晶表面の水分子の状態を知ることができる。

参 考 文 献

- 油川英明, 2014: ベントレーの “Snow Crystals” における雪結晶写真の二重掲載について. 雪氷, 76, 173-178.
- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931: Snow Crystals. McGraw-Hill, London and New York. 226pp. (Republished in 1962 by Dover Pub., Inc.)
- 小林禎作, 1975: 雪に魅せられた人びと. 築地書館, 160 pp.
- Komarechka, D., 2013: Sky Crystals. Don Komarechka Photography. 304pp.
- Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetics of ice from the vapour phase and its growth forms. J. Crystal Growth, 56, 189-205.
- Libbrecht, K. 2008: Snowflakes. Voyageur Press. 512pp.
- Mason, B. J., G. W. Bryant and A. P. Van den Heuvel, 1963: The growth habits and surface structure of ice crystals. Philos. Mag., 8, 505-526.
- Nelson, J., 2001: Growth mechanisms to explain the primary and secondary habits of snow crystals. Philos. Mag. A, 81, 2337-2373.
- 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.
- 山下 晃, 2016: 雪結晶が作る空気模様 I—角板の空気模様—. 天気, 63, 393-400.

Study on Air Pockets Enclosed in Snow Crystal Part II —Analysis of Air Pockets Taking Growth Process of Prism Faces into Consideration—

Akira YAMASHITA*

* Professor emeritus from Osaka Kyoiku University
E-mail: akira4303@voice.ocn.ne.jp

(Received 25 December 2016; Accepted 10 December 2018)