

科学映画「雪の結晶 (1951)」が記録していた 人工雪実験の画像解析 II —扇状結晶及び樹枝状結晶の成長—

山下 晃*

要 旨

樹枝状結晶主枝の中央稜線模様は結晶軸 (a 軸) の1つに平行な直線である。このことは樹枝状結晶が扇状結晶と同様に柱面の層成長により生じることを意味するが、樹枝状成長の特徴は主枝先端部分の両柱面上にほぼ一定間隔で次々と現れるマクロステップのエッジ部分の移動が稜線模様群を作ることであり、稜線模様群中の一部のものの一對ずつの先端部分が目立って成長し側枝となる。

扇状結晶や樹枝状結晶の板状部分の裏面の凹凸を表す稜線模様と畝模様は、発生直後には濃淡が明瞭になるよう変化するが、模様上に発生する基底面の発達に伴って次第に消える傾向がある。扇状結晶の柱面上に付着凍結する雲粒が結晶の成長に及ぼす影響には、柱面が層成長していることを証明するものがある。一方、側枝や稜線模様の先端部分への雲粒の付着凍結の場合には、側枝の発生と成長を促進する影響を与えることも側枝の成長を妨げる影響を与えることもある。また、扇状結晶の基底面など平坦な部分に付着凍結する雲粒は、付着直後はほぼ球形を保ったまま成長する。

1. はじめに

映画「雪の結晶」中の扇状結晶の動画に注目し、その静止画像を解析したのが前編 (山下 2011) である。その後編となる本論文は、同じ映画中の3つの結晶の動画の静止画像を解析の対象とする。それらは、結晶①とする前編と同じ扇状結晶、結晶②とする扇状から樹枝状へ変化する結晶及び結晶③とする樹枝状結晶である。

これら3つの結晶の大きさや成長した温度などについての記録は残されていないため、中谷 (1949) にある同等の形態を持つと著者が判断した結晶に関する記録を基にして結晶を成長させた位置の気温 T_a 、水蒸

気供給源の水温 T_w などの推定値を求めている。その値と利用する静止画像との関係は、結晶①では $T_a = -16^\circ\text{C}$ あるいは -13°C ($T_w = 10 \sim 15^\circ\text{C}$) で66分間に全長が0.65mm から1.3mm に成長するまでの約30秒間隔の132 (No. 1 ~ No. 132) の静止画像、結晶②では $T_a = -15 \sim -17^\circ\text{C}$ ($T_w = 15^\circ\text{C}$) で36分間に全長が0.9mm から2.7mm に成長するまでの約27秒間隔の81 (No. 1 ~ No. 81) の静止画像、結晶③では $T_a = -15^\circ\text{C}$ ($T_w = 10 \sim 15^\circ\text{C}$) で21分間に全長が1.05mm から2.3mm に成長するまでの約20秒間隔の63 (No. 1 ~ No. 63) の静止画像である。

2. 樹枝状結晶と扇状結晶との相違

結晶②が扇状成長から樹枝状成長へと変化するところに注目する。扇状成長しているときの8画像 (No. 1, No. 6 … No. 36) を順番に並べたのが第1図である。柱面上に発生するエッジに、山下 (2011) の結晶①の場合と同様に発生順に E_1 , E_2 などの記号を付し

* 大阪教育大学名誉教授。

E-mail : akira4303@voice.ocn.ne.jp

—2011年12月7日受領—

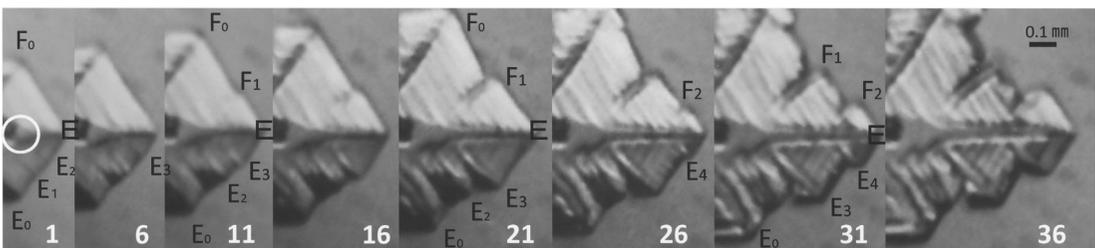
—2012年3月29日受理—

© 2012 日本気象学会

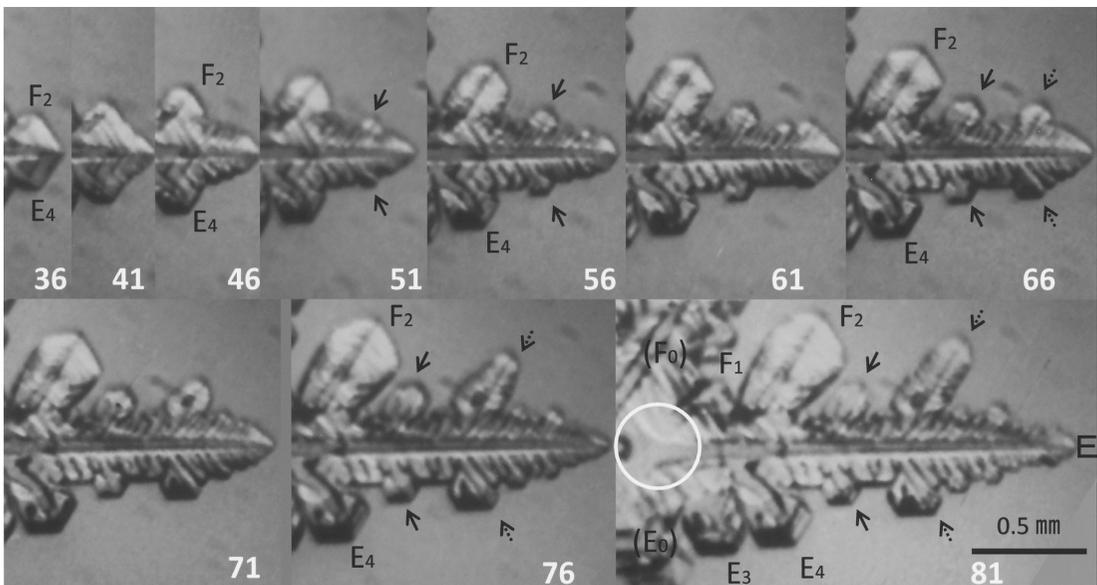
て調べると、水蒸気供給の面で不利な（第1図では下）側がエッジ発生数が多いこと、エッジ E_4 と F_2 の対になっての発生が E_3 を先端とする部分と F_1 を先端とする部分からの側枝発生を可能にしていることなどが分かる。主枝両側の側枝発生数に差が生じていないのは、 E_1 と E_2 を先端とする部分が周辺部の成長の影響により側枝発生に至らなかったためであるが、結晶②の扇状成長する部分についてのこのような結果は、結晶①に関する山下（2011）の結論を確かめる内容になっている。

第1図の最後の画像 No.36の先端部を少し拡大した画像からの10画像を並べているのが第2図で、画像 No.46中に注目する表面模様を記入したのが第3図である。この結晶（結晶②）の先端部分は、第2図のNo.41画像以降は、扇状成長ではなく樹枝状成長していることが明らかであり、主枝の全長を21画像について示した第4図からは、樹枝状成長の速度と扇状成長の速度には明らかな（2.0倍の）違いがあることを読み取ることができる。

このように、扇状結晶から樹枝状結晶に変わった結



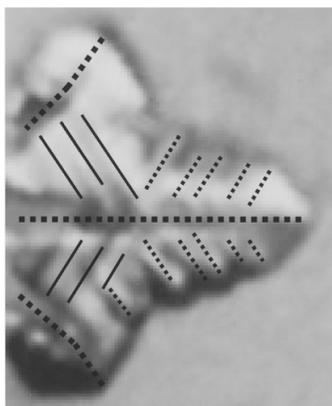
第1図 扇状成長する結晶②先端部の柱面及び表面模様に見える変化（No.1からNo.36までのうちの8画像から）。E、 E_0 及び F_0 はエッジに付した記号。中央エッジEから見て水蒸気供給の面で不利な側の柱面上に新しく生じたエッジに、順番に記号 E_1 ～ E_4 を付し、同じく有利な側に生じたエッジに記号 F_1 及び F_2 を付している。画像No.1中の白丸印は表面模様の無い部分。白数字は画像番号。



第2図 樹枝状成長する結晶②先端部の柱面及び表面模様に見える変化（No.36からNo.81までのうちの10画像から）。最初の画像は第1図の画像No.36の先端部分。画像No.81は少し広範囲のもの。白丸印は拡大した表面模様の無い部分。白数字は画像番号。

晶②の樹枝状成長する部分は、主枝がその中央に a 軸に平行な稜線模様（中央稜線模様とする）を作りながら成長することは扇状成長している段階と変わらないが、主枝先端部の 2 つの柱面間の角度は 120 度以下に見えるが測定困難であり、柱面上に多数発生するエッジに記号を付して追跡することもできない。しかし、（第 3 図には太い点線で示した）中央稜線模様の

両側に、a 軸のうちの 1 つにほぼ平行な（第 3 図には細い点線で示した）多数の稜線模様（稜線模様群とする）が現れて、この稜線模様群の各々の先端が（次々に）発生するエッジの 1 つに対応する（山下 2011）ため、エッジ発生数を求める代わりに稜線模様群の模様本数を数えることができる。なお、稜線模様には発生後に発達する性質があるため、稜線模様群の模様本数を実際に数えるには、1 つの例だが、No.51 画像から No.56 画像へと成長する間の発生数を No.66 画像で数える方法を採用できる。

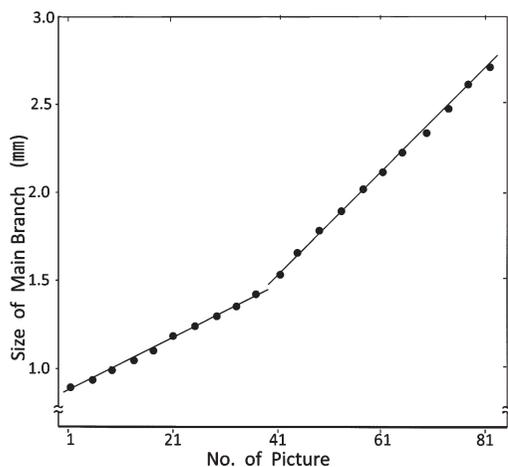


第 3 図 結晶②の画像 No.46 中の稜線模様（点線）と畝模様（実線）。画像の左側半分には畝模様があって扇状結晶の特徴が残っている。右側半分には 1 本の中央稜線模様とその両側に稜線模様群があり樹枝状結晶の特徴が現れている。

実際に求めた稜線模様数は、扇状成長する画像 No. 1 から画像 No.36 までの間では、水蒸気供給面で有利な（第 1 図では上）側が（ F_1 と F_2 を先端とする）2 で不利な側が（ $E_1 \sim E_4$ を先端とする）4 であるのに対して、樹枝状成長する画像 No.41 から No.81 までの間では、水蒸気供給の面で有利な側も不利な側も約 24 である。この極端な（エッジ発生数の違いでもある）稜線模様数の違いが両者の形態の相違に対応しているのである。なお、約 24 ずつの模様のうち水蒸気供給の面で有利な側と不利な側とで対になっていることを確認できるのは約 19 である。

扇状成長する（第 1 図の画像の）段階では、柱面上に新しくエッジが発生するとき（同じ柱面上に）先に発生していた（稜線模様先端部でもある）エッジ部分を起点とする層成長が側枝を成長させる（山下 2011）のに対して、樹枝状成長する部分では、中央稜線模様両側の稜線模様群の（柱面上のエッジに対応する）先端部分のうちの一部が突出して成長して（第 2 図の画像 No.51～No.81 に実線矢印と点線矢印で示す 2 対のように）側枝となっている。このように、扇状成長であっても樹枝状成長であっても稜線模様先端のうちの先に発生した先端を起点としての側枝発生であり、側枝発生機構そのものは共通している。

樹枝状成長する結晶③の最終画像（No.63）が第 5 図である。樹枝状結晶の特徴である稜線模様群の発生が見られ、画像 No. 1 から同 No.63 の状態まで成長する間の発生数は、水蒸気供給面で有利な（第 5 図では下）側と不利な（同図・上）側の何れも約 50 であり、そのうちの約 40 が明らかに対になっている。側枝にも水蒸気供給面で有利な側と不利な側とで対になっているものがあり図中に 4 種類の矢印で示している。このような特徴は、結晶②の樹枝状成長する部分のものと共通である。なお、この図には雲粒の付着凍結がある側枝には付着位置を示す記号を付して、その詳細



第 4 図 結晶②の成長。主枝の全長が 0.9mm（推定値）から 2.7mm（推定値）まで成長する間の 21 静止画像におけるサイズを示している。

については次節で述べる。

3. 付着位置別の凍結雲粒の影響

成長中の結晶①～③の全てに雲粒の付着が見られる。ここでは側枝先端部など画像の周辺部への付着凍結を観察できる結晶③と画像の周辺部以外にも付着凍結が確認できる結晶①について、付着位置別に、付着凍結の影響を調べる。

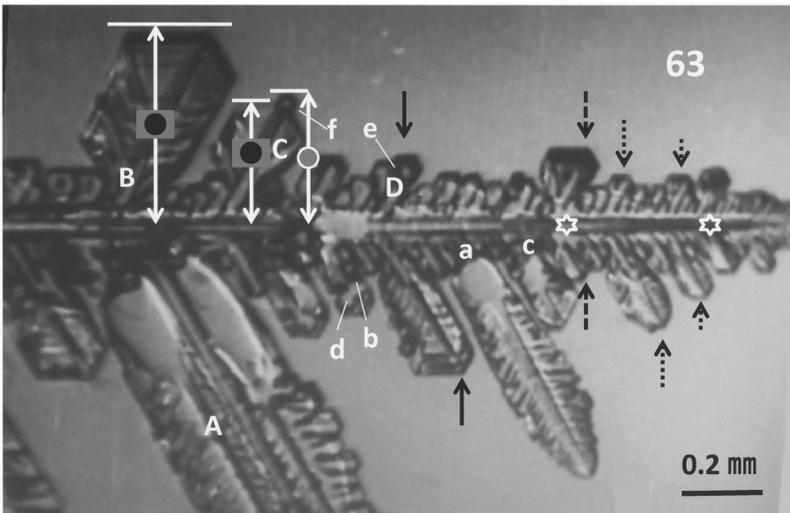
3.1 側枝先端への付着凍結

結晶③の周辺部には6個の雲粒付着凍結（a～f）があり、第5図中のa～fは、それぞれの付着位置を示している。同結晶の画像No.19からNo.27までのうちの6画像の付着凍結が見られる部分を並べて示した第6図には、No.20で初めて確認できる付着をa、No.

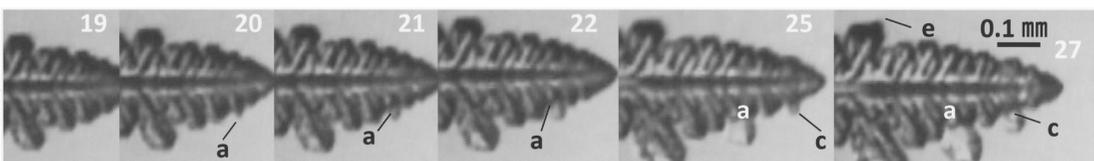
25で初めて確認できる付着をcとしていて、同図のNo.27や第5図でこれら付着凍結の影響を読み取ることができる。すなわち、付着雲粒a及びcは、付着凍結自体が水蒸気供給を有利にする結晶からの突出部となり、その後の樹枝状側枝成長の起点になっている。これらの付着凍結部分からの模様が淡く確認できない部分の広がりも注目され、この部分の急速な成長と薄い板状部分の誕生とが対応しているものと推定している。なお、結晶③の写真について、中谷・花島（1950）は「枝の途中に結晶のシンがつくと、そこから別の小枝がでることがある」と、雲粒の付着凍結の効果とは明記せず、この事実について記している。

この結晶の扇状側枝先端部への付着凍結があったのは第5図中の側枝D上のe及び側枝C上のfであり、画像No.27で側枝D先端部に雲粒eが、画像No.41で側枝Cの先端部に雲粒fが付着凍結している。この場合の側枝の成長に与える付着凍結雲粒の影響を調べるため、側枝の長さを測定し第7図に示しているが、側枝C及び側枝Dは、側枝Bと比べると、付着凍結部分を除いた部分の側枝の成長は明らかに抑えられている。付着凍結雲粒とその成長による部分を含めての側枝も、僅かだが成長が抑えられている。

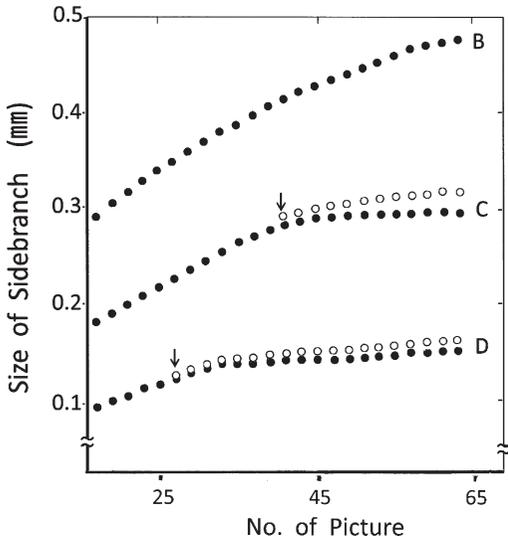
結晶①では、側枝先端部に2つ続いた雲粒付着凍結が見られる。第8図がその画像で、この付着凍結に



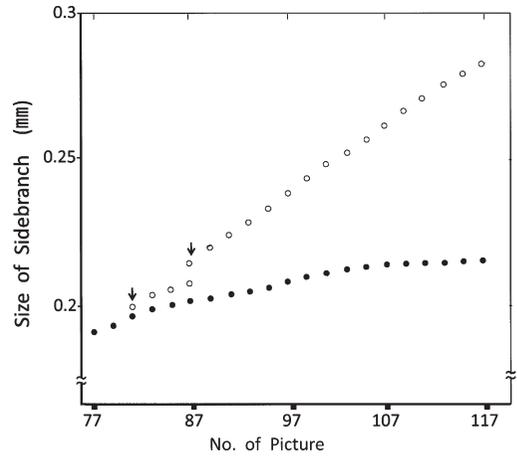
第5図 結晶③（樹枝状結晶）の最終の画像 No.63。星印2つの間が稜線模様数を数えたり対をなしての発生を確認したりし易いところ。上向きと下向きとを一对とする4種類の矢印は、対になっている側枝。A～Dは注目する側枝。a～fは雲粒が付着凍結したところ。側枝BとCの両矢印は、長さを測定した部分で測定結果は第7図。



第6図 結晶③（樹枝状結晶）の稜線模様群周辺への雲粒付着凍結a及びcとその影響（No.19からNo.27までのうちの6画像から）。白数字は画像番号。



第7図 結晶③の側枝 B, C 及び D の成長. 側枝 B, 側枝 C 及び側枝 D の24静止画像中のサイズを示している. ●印が雲粒付着凍結の直接的な影響がない部分のサイズ, ○印が雲粒付着凍結部分を含めたサイズ. 側枝 B と側枝 C については測定部分を第5図に両矢印で例示.



第9図 結晶①の側枝の成長. 先端部に2個の雲粒付着凍結があった側枝の21静止画像中のサイズを示している. ●印は雲粒付着凍結の直接的な影響のない部分のサイズ, ○印は雲粒付着凍結とその成長による部分を含めたサイズ. 測定部分は第8図の No.117画像に両矢印で例示. 図中の矢印2つは雲粒付着凍結を示す.

よる側枝サイズの変化を示すのが第9図である. この場合は, 付着凍結がその位置の両側の柱面の成長をほぼ止めているが, 2つ目の付着凍結による突出部が付着凍結位置を起点とする新しい扇状の枝を発生させていて, この連続付着凍結は, 新しく発生した枝を含めた側枝の全長には大きな影響は及ぼしていない.

3.2 扇状結晶主枝のエッジへの付着凍結

結晶①では, 主枝の先端エッジの隣にある成長速度が異なる2つの柱面が交わるエッジへの付着凍結が見

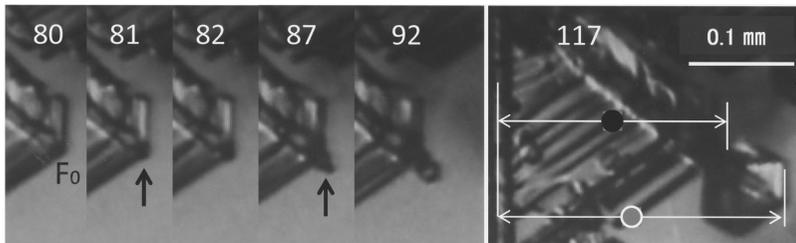
られる. 第10図では画像 No.118で雲粒の付着凍結を確認でき, 同図の画像 No.119~No.132にその影響が現れている. この付着凍結は, 成長速度の遅い方の柱面の成長をほぼ止める効果があり, 成長の速い方の柱面上に新しいエッジ F_3 を発生させている.

3.3 扇状結晶の柱面上への付着凍結

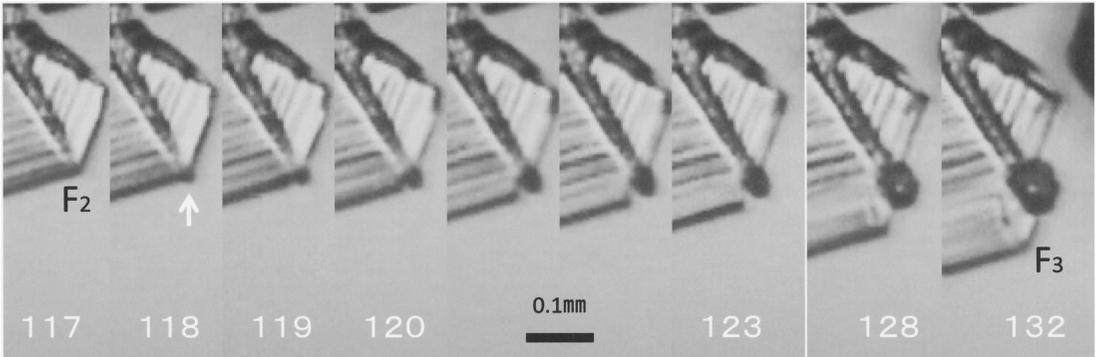
結晶①の柱面上への雲粒付着凍結は, 第11図画像 No.89とその後の画像から明らかのように, 柱面の層成長を分断し, (柱面上を) ステップが移動してこなくなる (第11図では付着位置より上の) 部分の成長をほぼ止めている.

3.4 扇状結晶の平坦な部分への付着凍結

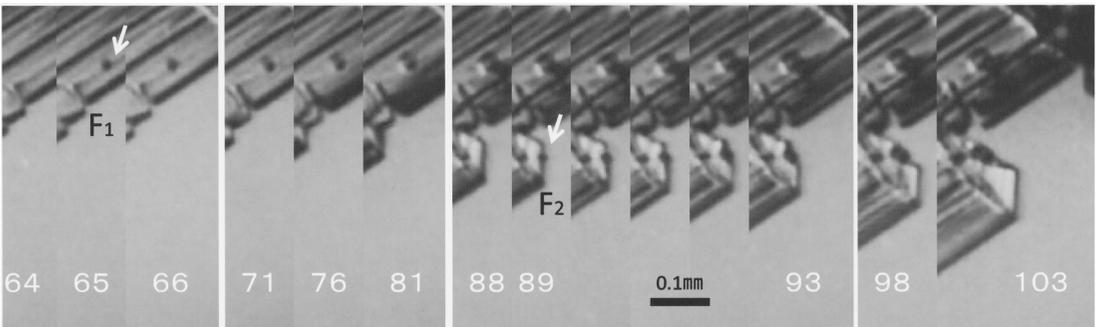
結晶①の平坦な板状部分へ雲粒の付着凍結があるのだが, 第11図の画像 No.65に白矢印で示す部分である. この場合, 付着凍結後も画像上では円形のままで成長し同図の画像 No.103では直径が2.2倍になっている. 結晶①には同様の雲粒付着凍結が19個あり, 何れ



第8図 結晶①(扇状結晶)の側枝の先端部への雲粒付着凍結とその影響 (No.80から No.117までのうちの6画像から). 画像 No.81及び同 No.87中の矢印は2度の雲粒付着凍結を示す. 両矢印が示す部分を測定. F_0 は側枝中央エッジで, 記号は山下 (2011) による. 白数字は画像番号.



第10図 結晶④（扇状結晶）の成長速度の異なる2つの柱面の間のエッジ F_2 への雲粒付着凍結とその影響（No.117からNo.132までのうちの9画像から）。白矢印は雲粒付着凍結があったところ。 F_3 はこの付着凍結の影響があって新しく生じたエッジ。エッジ記号は山下（2011）による。白数字は画像番号。



第11図 結晶④（扇状結晶）の柱面上及び平坦な部分への雲粒の付着凍結とその影響（No.64からNo.103までのうちの14画像から）。画像No.65の平坦な部分と画像No.89の柱面上に、白矢印が示す付着凍結が見られる。エッジを示す記号は山下（2011）による。白数字は画像番号。

も画像上では円形を保ったまま（平均1.59倍に）大きくなっている。

なお、結晶①～③への付着凍結雲粒には多結晶と判別できるものはなく、その影響を丁寧に調べることができる（3.1～3.3に挙げた）ものは母結晶と同じ結晶方位を持つものである。

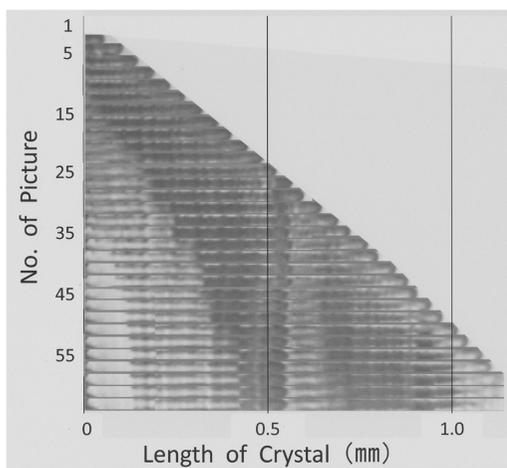
4. 稜線模様と畝模様の発生発達とその変化

第2節では、稜線模様群の模様数を数えるのに、発生時に近い画像ではなく、少し時間が経って模様が明瞭になった画像を用いることを述べた。発生直後の中央稜線模様と稜線模様群にこのような凹凸の増幅傾向があることは、結晶③の先端部を比較した第6図の6画像からも明らかである。中央稜線模様の変化を調べ

るための図が、結晶③の静止画像から模様部分だけを切り取って並べた第12図である。透過光照明により撮影されているこれらの画像には、結晶の表裏両面ともに平面（基底面）あるいは平面に近いところは白く、何れかの面に凹凸があるところは黒く写っているため、（第12図の）31画像の比較から結晶表面の変化の概略を知ることができる。すなわち、全体として黒から白に変わっていることは模様上に基底面が現れる傾向があることを意味している。また、結晶の先端部から中心部へ向かっての縞模様の白黒の順番に大きな変化はないが、結晶の中心に近いところでは白い部分が目立って拡大していて、稜線模様とその周辺の凹凸ある面上にも基底面が大きく現れてくることを示している。

結晶②の稜線模様上に生じる表面模様の無い部分が拡大していることは、第1図の画像 No. 1 中に白丸印で示した部分と第2図の画像 No.81中に白丸印で示した同じ部分とを比較すれば明らかである。結晶③の側枝 A については、第13図の13画像を比較すれば分かるように、この場合も、表面模様の無い部分は次第に拡大している。また、この図の画像には（模様の無くなった）表面上に新たな円環状の薄い成長模様が生じている。結晶の内側ほど水蒸気供給の面で不利であることから、この部分は中央が僅かな凹部となっているものと推定している。

稜線模様の断面を、中谷（1949）のスケッチと第12



第12図 結晶③（樹枝状結晶）主枝の中央稜線模様の変化（No. 3 から No.63までのうちの31画像から）。各画像は画像 No. 1 の先端から先に相当する部分を切り取ったもの。

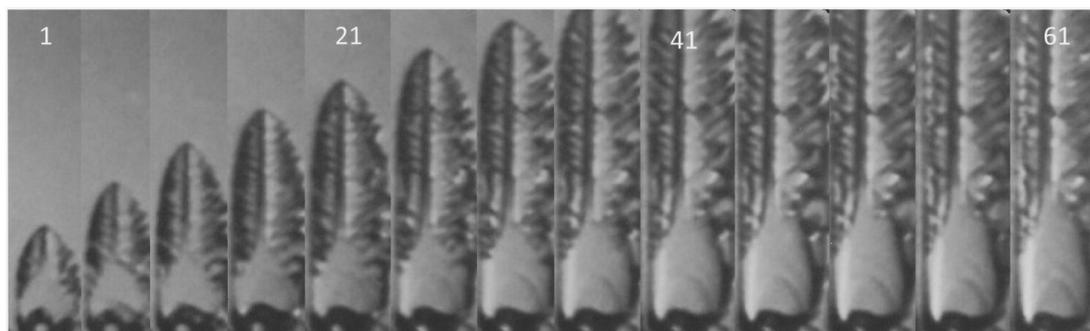
図を参考にして描いたのが第14図である。山下（2011）は、この断面には第14図の(a)から(b)への変化が起きるとしたが、第12図の画像は第14図の(a)から(b)への変化ばかりではなく(b)から(c)への変化も起きていることを示している。また、中谷（1949）が同種の実験の説明の中で散晶状発達が見られるとしている稜線模様を起点とする局部的な2枚板化にも注目したい。すなわち、同種の実験では中谷（1949）の Plate 253 No.1235他の写真にあるように、第14図の(c)から局部的な2枚板となる(d)への変化も、かなりの頻度で起きているのである。

ここで、扇状結晶の畝模様の変化に注目する。結晶②の第1図の画像 No. 1 と画像 No.26との間に発生したこの模様は、画像 No.36などとの比較から明らかになるように、発生初期段階の薄い濃淡模様が次第に濃いものになっている。この模様も結晶の中央部分では稜線模様同様に消える傾向にあることから、その断面は、第15図の(a)の状態のものが、中谷（1949）の実験と観察に基づく断面スケッチに相当する第15図の(b)、基底面のよく現れた第15図の(c)あるいは第14図の(e)のように変化しているのである。

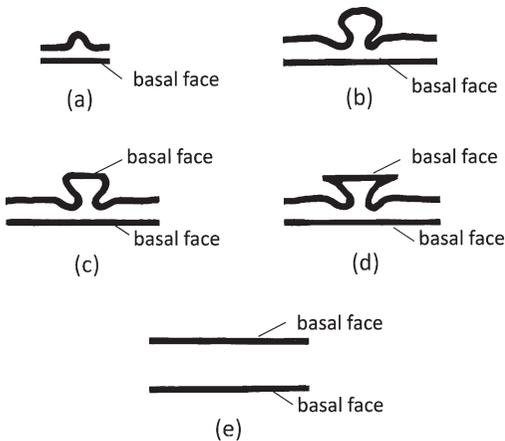
以上のように、水蒸気供給の面で最も不利な結晶の中心に近い部分では、曲面上に基底面が現れて畝模様も稜線模様も消失する傾向があることが分かったが、中谷・花島（1950）が「模様が消えて、透明な氷板に変わる場合のあることがわかった」と記しているこの内容は、中谷（1949）の Plate 291～292の写真からも読み取ることができる。

5. 議論

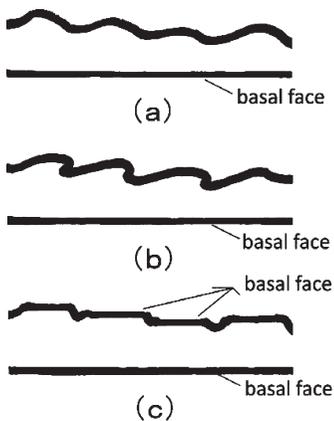
代表的な板状雪結晶の成長を3次元的に捉える解析



第13図 結晶③（樹枝状結晶）の側枝 A の成長と表面模様の無い部分の変化（No. 1 から No.61までのうちの13画像から）。側枝 A については第5図参照。白数字は画像番号。



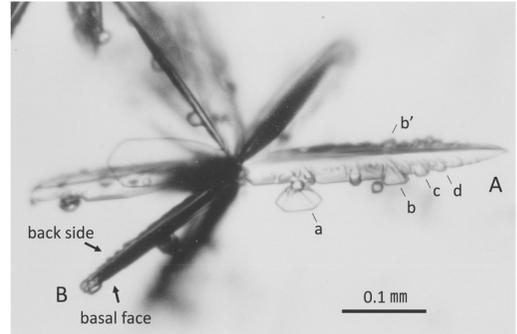
第14図 稜線模様の表を下にした断面。(a)発生初期。(b)両側に細溝。(c)模様上に基底面。(d)基底面の発達に伴う2枚板化。(e)模様消失。中谷(1949)には(b)相当のスケッチがある。



第15図 畝模様の表を下にした断面。(a)発生直後。(b)凹凸模様の発達した状態。(c)凹凸模様が消失しつつある状態。中谷(1949)には(b)相当のスケッチがある。

を進めてきたのが山下(2011)であり本論文であるが、解析には2次元画像を多数使用している。得られた結論の立体像が明確になるよう、5.1では、自由落下実験(山下1974, 1979)で得た放射樹枝の中から今回の解析結果と関わりのある未発表の写真2枚を用いる。

5.1 主枝の立体像と雲粒付着凍結について



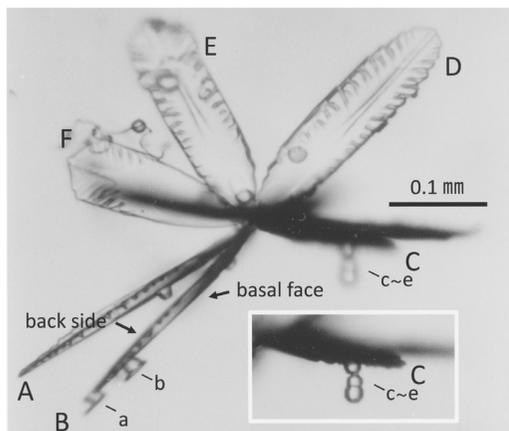
第16図 放射樹枝。-13.7°Cで自由落下中に約200秒間成長。AとBは注目する主枝。a~d及びb'は側枝。高粘性オイル中に採取後撮影。

自由落下実験の資料の中から選んだ結晶③の第6図の画像と共通点のある写真の1つが、第16図の放射樹枝である。この写真の主枝Bは、樹枝状結晶の主枝の表の面が平面で裏面には稜線模様群の凹凸があることをよく表している。主枝Aは、同図中にbとb'などと符号を付して示したように、本論文第2節の結晶②と③の解析結果にある、対となつての側枝発生の1例である。また、この主枝Aには、付着凍結雲粒aから生じたものと読み取れる先端部が薄い側枝があり、3.1前半に述べた推定を裏付けるものになっている。

付着凍結雲粒からの板状結晶成長の初期状態をより鮮明に示しているのが、同じ実験の第17図の写真の主枝Bの表面(基底面)への付着凍結雲粒aとbの場合である。また、主枝BとCの付着凍結雲粒a~eの(球形と見做しての)平均直径は15 μm であり、この結晶を成長させた過冷却雲の雲粒の直径2~18 μm (平均直径6 μm)よりかなり大きく、付着凍結後の球形のままのサイズの増加が起きていたことを意味している。このほぼ球形を保ったままのサイズの増加は、3.4の結晶①の基底面あるいは平面に近い部分への付着凍結雲粒の場合に円形のまま平均1.59倍になっていることと共通して、これらを併せて考慮し、付着凍結後の雲粒に球形を保ったままの成長があることは間違いないと判断している。

5.2 側枝発生について

側枝発生に関するNelson(2005)のマクロステップモデルは、マクロステップの発生と関わりがあるところは本研究と共通しているが、Nelson(2005)が



第17図 雲粒付放射樹枝。右下枠内は直上と同部分。-13.7°Cで自由落下中に約200秒間の成長。B及びCは雲粒の付着凍結に注目する側枝、D~Fは稜線模様群が見られるが側枝発生はない主枝、a~eは付着凍結雲粒。高粘性オイル中に採取後撮影。

主枝の成長速度増加が側枝を発生させるとしているのに対して、扇状成長する主枝の成長速度の増加は樹枝状成長をもたらすとの結果を得ているのが本研究であるため、両者の直接的な対比は困難になっている。また、結晶②の樹枝状成長する部分の側枝と結晶③の側枝に注目するとき、水蒸気供給面で有利な側のものには樹枝状のものと扇状のものとが混在しているのに対して、不利な側ものは全て扇状である。一方、天然の雪結晶には、稜線模様群の発生が見られるのに側枝発生がない主枝を持つものが存在し、同様の例を第17図の結晶の主枝D~Fにも見ることができる。このように樹枝状成長する枝の全体像については改めての検討が必要になっている。

5.3 扇状成長と樹枝状成長との明確な違い

扇状成長と樹枝状成長との違いを、エッジ発生数（あるいはエッジ部分の存在が発生原因となる稜線模様の数）の明らかな差によって説明できることが、結晶①~③の解析から明らかになったが、両者に明らかな差が生じるのには理由があるはずである。ここでは、扇状成長する結晶の柱面におけるエッジの2つ続いたの発生に注目する。結晶①の解析（山下 2011）では、6例のエッジ発生が全て2つずつの連続発生であって何れの場合も先に発生したエッジが発生直後に消えている。本論文の結晶②の場合も第1図にある

エッジ E_1 , E_2 の連続発生が同様の結果をもたらしている。

山下 (2011) は、柱面上のエッジ発生はマクロステップの発生に伴うものであり、エッジは発達したマクロステップの一部であるとしている。従って、エッジの連続発生はマクロステップの連続発生があったことを意味するが、扇状成長において柱面の層成長と基底面の層成長以外に他の部分の成長はないものと仮定するとき、1つのマクロステップの誕生がその発生位置近くに新たなマクロステップ発生を促す原因を見出すことはできない。しかし、実際の扇状成長ではマクロステップのエッジ部分が生み出す稜線模様の形成があり、新たに生じたエッジの部分に稜線模様形成に伴う水蒸気吸収源が出現することになる。そのことがエッジ周辺の柱面上に水蒸気供給の面で不利となる部分を作り、最初に生じて発達中のマクロステップ近くのステップ移動速度が落ちることになれば、それが新たなマクロステップ発生原因となり得るのである。このように、主枝先端部両側の柱面上のマクロステップの発生発達が次のマクロステップ発生に有利に働くのであれば、1つの稜線模様の発生が稜線模様群の発生を誘導する可能性があることになり、扇状成長と樹枝状成長との中間的な成長がなく、何れかの成長が卓越することが理解できることになる。

以上は、結晶②で扇状成長から樹枝状成長への移行が急激であり明確であることと多くの天然雪結晶でも両者を明確に区別できることに注目しての考察である。著者は扇状成長する結晶先端部を樹枝状成長する先端へ変化させたりその逆の変化をさせたりする自然循環型クラウドチェンバーを用いた実験 (Ohno and Yamashita 1989) を行ったことがあり、主枝の成長が2種類に分かれる理由には関心を持っていたことを付記させていただく。

6. 結論と課題

科学映画「雪の結晶 (1951)」にある画像の解析により、山下 (2011) が明らかにした内容は、(i)扇状結晶の成長機構は2つの柱面が接する主枝先端部などを起点とする層成長である (ii)成長速度が異なる2つの柱面が接する主枝両側のエッジ部分は、主枝先端部の2つの柱面上に新たなエッジが生じるとき、新しい層成長の起点となって側枝の発生源になる (iii)側枝は対になって発生することが多いが、非対称な形の主枝では、水蒸気供給の面で不利な側に単独で発生す

ることがある (iv) 扇状結晶の成長では2つの柱面が交わるエッジ部分のベルグ効果による肥厚が稜線模様を作り、柱面の層成長の揺らぎが畝模様を作る… のように要約できる。その後編となる本論文の結論は、次の(1)~(4)である。

- (1) 樹枝状結晶の成長機構は、主枝などの先端部を起点とする(扇状結晶と同じ)層成長である。樹枝状成長の特徴は、主枝先端部の両柱面上に次々と発生するエッジが中央稜線模様の両側に稜線模様群を作ることである。
- (2) 樹枝状成長では、中央稜線模様両側の稜線模様群中の一部のものの一対ずつの先端部が卓越して成長し側枝となる。
- (3) 付着凍結する雲粒は、側枝発生源となったり側枝の成長を阻害したりして、母結晶の対称性に優れた形態形成を乱すものである。その一方で、柱面に付着凍結する場合の影響には、母結晶が層成長している証拠となるものがある。基底面など平坦なところへの付着凍結の場合には、ほぼ球形を保ったままの成長が見られる。
- (4) 扇状結晶や樹枝状結晶の板状部の片面の凹凸である稜線模様と畝模様は、発生直後には凹凸が発達し目立つように変化する。しかし、結晶中央部分など成長が遅いところでは、曲面上に基底面が現れて模様が消える変化が進行する。稜線模様上に現れる基底面が拡大し2枚板状部分が生じることや、模様が消えた中心部表面には緩やかな窪み状の表面を作る成長模様が現れることもある。

代表的な雪結晶の結晶面と曲面とが共存する状態での側枝発生を伴う成長機構の研究には、山下(1979)、Frank(1982)、Nelson(2005)などがあるが、実験事実として広く受け入れられていないのが現実である。そのような中で、実験結果を通して扇状結晶と樹枝状結晶の成長の詳細を明確に示すことができたのが本研究である。しかし、これらの結晶が成長を始める前の段階、すなわち準備段階ともいえる結晶成長については、山下(1974, 1979)に含まれている凍結雲粒の初期成長の研究やFrank(1982)が‘lacunary catastrophe’と名付けた考え方はあるが、曲面の変化と結晶面の発生との関係の詳細については明らかになっていない。自然界の雪結晶の観察だけでは明らかにできないのが凍結雲粒からの初期成長過程や種まき法の効果に関するところである。新しい視点から、山下(1979)、Yamashita(1973)、Takaha-

shi and Mori(2006)などにある実験結果を整理することが必要になっている。

その一方で、今回の解析に用いた動画は僅か3つの結晶の成長記録である。天然の同種の結晶には広幅六花、星六花、樹枝六花、羊歯六花などと分類される(菊地・梶川 2011)多様な形態のものがある。より多くの実験結果を集約して、この種の結晶の全体像を整理して示す研究や主枝先端部柱面上のエッジの連続発生に関わる研究も求められている。

謝 辞

映画「雪の結晶」の静止画像の使用については、学術研究目的の特例扱いで、株式会社岩波映像のご許可をいただきました。ここに記して謝意を表すとともに、雪結晶成長の記録としてのこの映画の価値がより一層高まることを期待します。名古屋大学名誉教授の樋口敬二先生には、中谷研究室の人工雪実験の成果やこの映画撮影に関わることなどについて、多くのことを教えていただきました。また、北見工業大学の亀田貴雄教授に多くの貴重なご意見をいただき参考にさせていただきました。有難うございました。

参 考 文 献

- Frank, F. C., 1982 : Snow crystals. *Contemp. Phys.*, 23, 3-22.
- 菊地勝弘, 梶川正弘, 2011 : 雪の結晶図鑑. 北海道新聞社, 190pp.
- 中谷吉郎, 1949 : 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 319pp.
- 中谷吉郎, 花島政人, 1950 : 雪の結晶. 岩波写真文庫 7, 岩波書店, 64pp.
- Nelson, J., 2005 : Branch growth and sidebranching in snow crystals. *Cryst. Growth Des.*, 5, 1509-1525.
- Ohno, T. and A. Yamashita, 1989 : Morphology of ice crystals grown in a slowly flowing supercooled cloud. *Morphology and Growth Unit of Crystals*, edited by I. Sunagawa, Terrapub, 627-635.
- Takahashi, C. and M. Mori, 2006 : Growth of snow crystals from frozen water droplets. *Atmos. Res.*, 82, 385-390.
- Yamashita, A., 1973 : On the trigonal growth of ice crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, 51, 307-317.
- 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.

山下 晃, 2011: 科学映画「雪の結晶(1951)」が記録していた人工雪実験の画像解析 I —代表的板状結晶の成長機構—. 天気, 58, 847-853.

Analysis of Artificial Snow Crystal Pictures Found in
the Classical Movie Snow Crystals (1951) Part II
—Growth of Sector Plate and Dendrite—

Akira YAMASHITA*

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

(Received 7 December 2011 ; Accepted 29 March 2012)
