

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—

山下 晃*

要 旨

六花と呼ばれる雪結晶の各枝は結晶の a 軸の 1 つに平行に成長する。このことは、2 つの柱面が接する最先端部では、柱面が両柱面上に等しい頻度で形成される 2 次元核によって層成長していることを意味し、成長の際のベルグ効果による先端部肥厚が稜線模様を作っている。側枝は柱面上のステップの束ね合いの結果として主枝の両側に対になるように発生するが、非対称な形の主枝では対になる発生ばかりでなく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。以上が映画「雪の結晶」の扇状結晶画像の解析から明らかになる代表的板状雪結晶の成長機構である。

1. はじめに

中谷宇吉郎は、1932年に北海道大学構内に降る雪結晶の観察を始め、その後の数年間で、十勝岳における観測や人工雪実験を通して世界初の本格的な雪結晶の研究(中谷 1949; Nakaya 1954)を完成させている。この研究の主要部分である兎の毛を使った人工雪実験の特長の 1 つは、顕微鏡のもとで成長する結晶を連続して観察したり撮影したりすることが可能なことである。その成長を撮影した優れた動画は、研究が行われた時期からかなりの時間が経過した 1951 年に完成した中谷宇吉郎と花島政人が監修し吉田六郎が撮影した岩波映画製作所の科学映画「雪の結晶」(紀伊国屋書店 2006)の中に観ることができる。著者はこの動画の簡易な解析を試みたことがあり、自由落下実験の報告(山下 1979)の中で、その解析結果が自由落下実験から推定される板状結晶の成長機構及び側枝発生機構を支持するものであることに言及している。本論

文は、30年以上の年月が経ってから、より丁寧な解析を行い、山下(1979)における自由落下実験の結論を具体的に裏付けることを目的としている。

本論文では、この映画中の扇状結晶の成長を記録したところに注目する。撮影が行われた条件などを、中谷(1949)にあるほぼ同等の形態を持つ結晶の実験記録から推定すると、現在観ることができるのは約 66 分間で全長が 0.65 mm から 1.3 mm に成長するところであり、結晶を成長させた位置の気温 T_a は一定 (-16°C あるいは -13°C 付近) で水蒸気供給源の水温 T_w は $10\sim 15^\circ\text{C}$ となる。解析には、およそ 30 秒間隔になる 132 (No. 1 ~ No. 132) の静止画像を用いる。

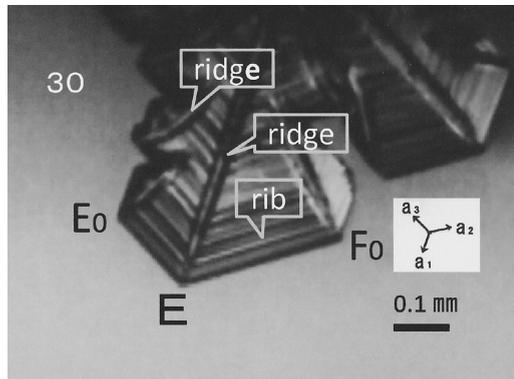
2. 動画から得られる実験結果

この扇状結晶は、第 1 図に示した成長初期段階の画像から分かるように、代表的な天然雪結晶の 6 本の主枝のうちの 1 つに相当する。中谷(1949)に「…この実験方法では、(水蒸気の供給が下方からなされるため)下向きの枝が長く、上向きの枝が短くなるのは止むを得なかった」とあるように、この結晶の主枝の非対称な形態も水蒸気供給の面で有利な側と不利な側とがあることによって生じたものである。先端部の 2 つ

* 大阪教育大学名誉教授。akira4303@voice.ocn.ne.jp
—2011年2月3日受領—
—2011年7月10日受理—

の柱面が接する中央エッジに E, 注目するその他のエッジに E₀, F₀などの記号を付して示すことにし, 表面模様は, 中谷 (1949) に稜線と記されているものを稜線模様 (ridge), 木の年輪相当の成長模様と記されているものを畝模様 (rib) とする.

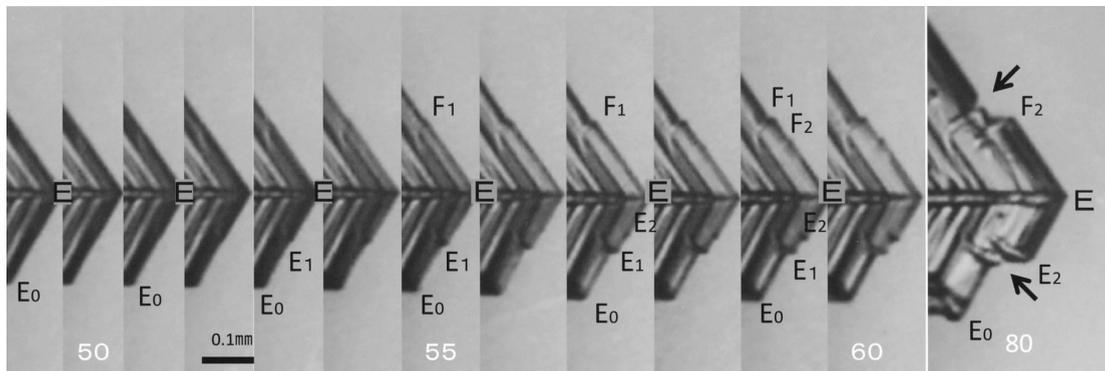
最初に主枝先端部の柱面とその近傍に発生する変化に注目する. 画像 No.49から No.60までと No.80の先端部を拡大して順番に並べたのが第2図である. この図で E と E₀の間の柱面に段差が確認できるのは No.53からである. また, もう1つ (図では上側) の柱面に段差が確認できるのは No.55からである. これら段



第1図 扇状結晶の成長を記録した動画から得た静止画中の画像 No.30. E, E₀及び F₀はエッジに付した記号. 白数字30は画像 No.30であることを示す. 結晶軸は結晶外形から求めたもの.

差のエッジに, それぞれ, 記号 E₁及び F₁を付し, 続けて No.57と No.59で発生が確認できる段差にも, それぞれのエッジに, 記号 E₂及び F₂を付している. その後の画像 No.103から No.110までと No.115及び No.120について同様に並べたのが第3図であり, 続けて発生する段差のエッジに記号 E₃及び E₄を付している. これらの画像から読み取ることができる主枝先端部の柱面及びその周辺などに現れる変化は, 次の①～⑥のように整理することができる.

- ① No.1 から No.132までの全画像で, 中央の直線状の稜線模様は結晶の a 軸のうちの1つ (a₁軸) に平行である. また, この模様が E の位置が結晶成長とともに移動した跡を表していることも明白である. 一方, E₀と F₀も同様に移動して稜線模様を残しているが, (No.1 から No.50までの) 初期のものは曲線である.
- ② E₁, F₁, E₂, F₂の順に (E と E₀の間あるいは E と F₀の間の) 柱面中央付近に相次いで現れたエッジは, 中央エッジ (E) の両側で対になっている (第2図). 新しいエッジは全て曲線の稜線模様を伴っている. なお, 対と見做せる発生であるが, 水蒸気供給の面で不利な (第2図の画像では下) 側にやや早く発生している. また, E₁と F₁が生じたことによる稜線模様は画像上でエッジ発生が確認される前の No.51まで遡って確かめることができる.
- ③ E₃と E₄とは E と E₂の間の柱面中央付近に相次いで現れていて, E₁などと同様に, 曲線稜線模様

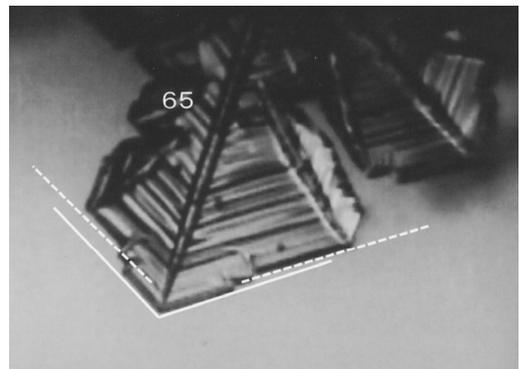


第2図 柱面に現れる変化 その1 (No.49から No.80までのうちの13画像). E と E₀については第1図を参照のこと. E₁, F₁, E₂及び F₂は, それぞれ, 本図中の No.53～No.60, No.55～No.60, No.57～No.80及び No.59～No.80の画像で観察されるエッジ. 画像 No.80中の矢印は2つの柱面間に凹部が生じていることを示す. 白数字は画像番号.

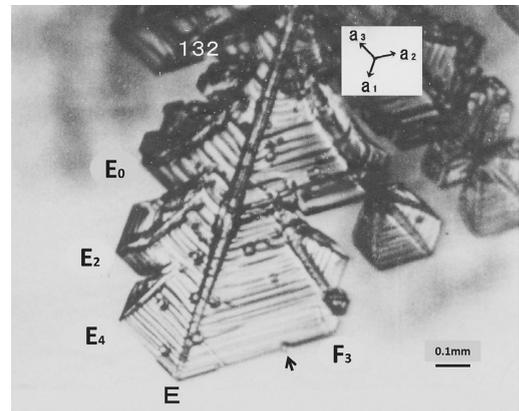
を伴っている。しかし、これらと対になる（ E と F_2 間の）エッジは発生していない。 E_3 と E_4 が発生したのは水蒸気供給の面で不利な柱面のサイズが小さい側である。

- ④ E_0 の位置の移動の跡である稜線模様は、 E_1 と E_2 が相次いで発生した直後に曲線から結晶の a 軸のうちの1つに平行な直線に変わっている。 F_1 と F_2 の相次ぐ発生の場合の F_0 の位置の移動に伴うものも、 E_3 と E_4 の場合の E_2 の位置の移動に伴うものも同様である。この稜線模様の変化と第2図 No.80及び第3図 No.120画像中に矢印で示した凹部の発生が、 E_0 、 F_0 、 E_2 をそれぞれの中央エッジとする、側枝の発生に対応している。
- ⑤ 側枝は、エッジの発生に伴って発生するため、主枝の両側にペアで発生する場合と水蒸気供給の面で不利な片側に単独で発生する場合とがある。
- ⑥ ごく近傍に相次いで発生したエッジのうちの先に発生した E_1 、 F_1 及び E_3 は、次第に目立たなくなって消え、これらによって生じた稜線模様も次第に判別し難くなっている。

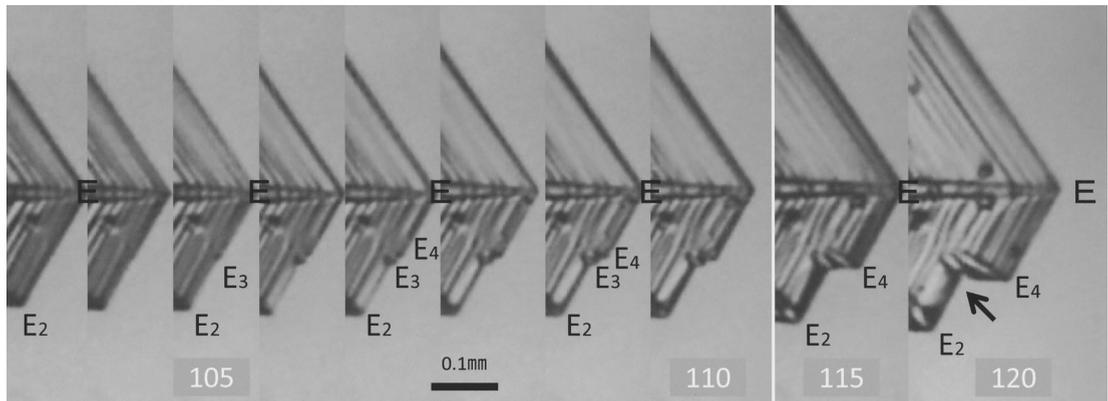
ここで、画像 No.65と最終画像 No.132を第4図と第5図に、それぞれ示す。第4図を用いると結晶先端部の2つの柱面間の角度測定が可能であり、柱面に平行になるよう図中に記入した2本の白い点線のなす角度が 118.5 度であるのに対して2本の白い実線のなす角度が 115.6 度であって、最先端部の角度の方が 2.9 度



第4図 角度を測定した先端部（画像 No.65）。



第5図 動画最終画像 No.132. 結晶軸は結晶外形から求めたもの（矢印は付着凍結雲粒）。



第3図 柱面に現れる変化 その2（No.103から No.120までのうちの10画像）. E については第1図を、 E_2 について第2図を参照のこと。 E_3 及び E_4 は、それぞれ、本図中の No.105～No.110及び No.107～No.120の画像で観察されるエッジ。画像 No.120中の矢印は2つの柱面間に凹部が生じていることを示す。白数字は画像番号。

小さい。なお、No.65を含む前後5画像について測定した同角度差の平均値は2.0度である。

3. 成長機構と側枝発生

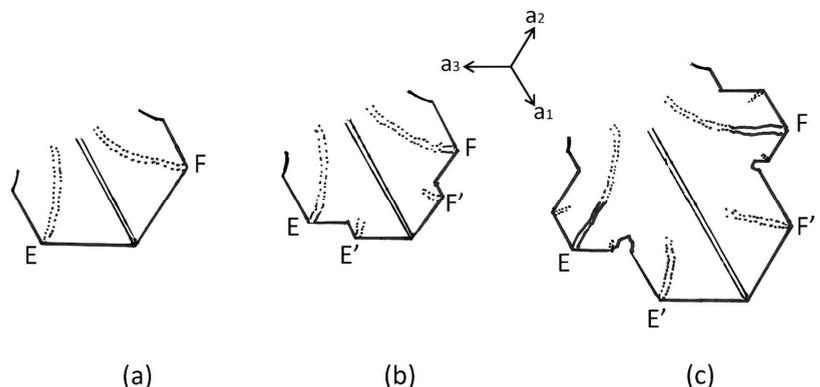
まず、稜線模様注目する。中谷 (1949) は、扇状結晶などの主枝の板状の面を表と裏に区別できることを図 (中谷 (1949) の第71図; Nakaya (1954) では Fig.391) を描いて示している。基底面がよく現れている側が表であり、ラフな面 (曲面) が現れていて稜線模様などの凹凸があるのが裏である。前節の①~③から稜線模様はエッジの発生とその位置の変化に伴って生じることが明らかであり、(水蒸気供給の面で有利になるため結晶の稜や角の部分がよく成長することを意味する) ベルグ効果によってエッジの部分がその周辺より厚くなることにその成因を求めることができる。すなわち、結晶の成長に伴ってエッジは移動するが、そのエッジが存在した位置が肥厚部分として残り稜線模様になるのである。中谷 (1949) は結晶中心部のこの模様を調べ稜線模様のことを稜線と細溝と記しているが、肥厚部分が線状に生ずればその両脇に凹部となる細溝が発達するのは自然なラフな面 (曲面) の成長過程である。

エッジの発生と結晶成長にともなうエッジの移動を表す稜線模様に注目して前節①~③の結果が得られることは、柱面がステップの移動によって単分子層ずつ厚みを増す層成長をしていることに対応する。前節に記した主枝先端部の角度の測定結果は、先端部柱面上のステップの平均間隔が単位ステップの高さの約30倍程度であることを示しているが、観察可能なエッジの発生は、柱面上を移動中の先行するステップに後続のステップが追いつくことによって発生するステップの束ね合いにより誕生した多分子層のステップであるマクロステップが発達したことに対応する。前節②に示した、 E_1 と F_1 の発生が確認される前に見られる稜線模様の曲線は、その向きの変化に注目するとき、光学顕微鏡で観察できない程度のマクロステップが単位ステップとほぼ同じ向きに移

動していたことを意味している。

主枝の成長する向きが、 a 軸のうちの何れかの1本に平行であり、最初から最後まで不変であるということは、図 (第1図、第4図及び第5図) では、 E で接する $(1\bar{1}00)$ 面と $(10\bar{1}0)$ 面の成長速度が等しいことを意味する。また、これらの図の主枝自体の非対称な形は、 E で接する $(1\bar{1}00)$ 面と $(10\bar{1}0)$ 面の成長が最も速く、次に速いのが $(10\bar{1}0)$ 面と接する $(01\bar{1}0)$ 面、その次が $(1\bar{1}00)$ 面と接する $(0\bar{1}10)$ 面であることに対応している。これらの事実を生み出す要因になっているのが、単分子層ずつ厚みを増す層成長では新しい層の発生源となる核も単分子層の2次元核であり、第1図の画像No.30の例では、その2次元核が最先端部 E のごく近傍の両柱面上に等しい頻度で形成されていることであり、2次元核形成頻度が、 E 近傍の両柱面上、 F_0 近傍の $(01\bar{1}0)$ 面上、 E_0 近傍の $(0\bar{1}10)$ 面上の順に高いことである。

ここで側枝発生に注目する。六花と呼ばれる天然の雪結晶の主枝から生じる側枝のほぼ全てが対になっていることが示すように、一対ずつの側枝発生は雪結晶の対称性の優れた見事な形態を演出する主要な要素である。今回解析した a 軸の1つに平行に成長する非対称な形の主枝の場合でも、前節の②と④にあるように、最初の側枝は対になっているの発生である。ここで、通常の雪結晶の側枝の大部分を占める一対ずつの発生機構を第6図により説明する。すなわち、(a)に示した成長する主枝の先端部左右の両柱面上に、ステップの束ね合いによりマクロステップが発生発達して観察可能な新しいエッジ E' と F' が発生したことを示す



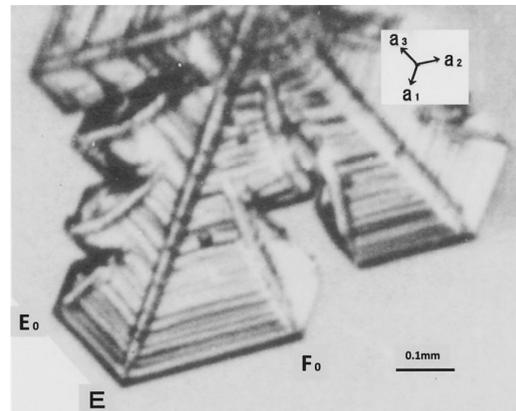
第6図 主枝の側枝発生説明図。(a) 一般的な主枝、(b) 両側にエッジ E' 及び F' が発生した主枝、(c) E 及び F を中央エッジとする対になっている側枝が発生した主枝。

のが (b) である。このとき、E と F の近傍の柱面には主枝先端部の柱面上に生じた 2 次元核からのステップが移動してこなくなるため、E で接する 2 つの柱面と F で接する 2 つの柱面とは、それぞれ、E と F の近傍で形成される 2 次元核によって層成長することになり、更に、これら層成長する柱面上にステップが移動してこなくなる（2 次元画像では凹部となる）部分が E と F の両側に生じるとき、枝としての独立した成長が始まり (c) が示す側枝誕生となる。通常の六花状結晶の対称的形態を持つ主枝では、側枝はこのように一対ずつ発生するのである。

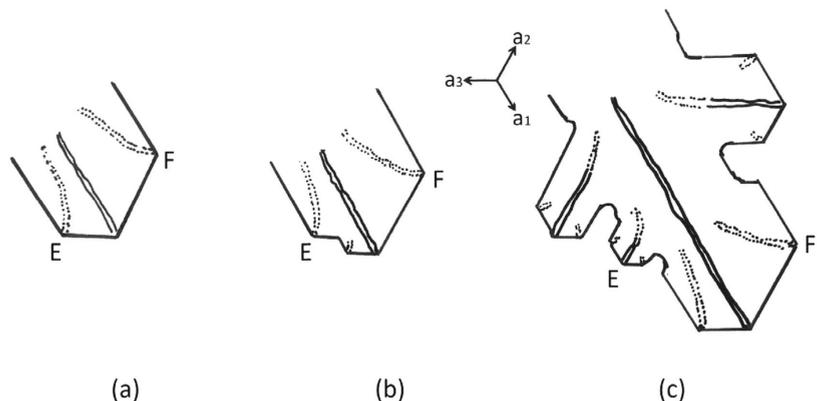
この対になった側枝の発生源となるのが、柱面上では水蒸気供給の面で最も不利な中央付近におけるエッジの対になった発生である。エッジが対で発生する原因は、画像上では濃淡である畝模様が生じることに対応する揺らぎが、主枝先端部分の両柱面上の 2 次元核形成頻度にもあることが関わっているものと考えている。すなわち、2 次元核形成頻度の揺らぎは「瓜二つ」といえるステップ密度の揺らぎを両柱面上にもたらし、ステップ密度が高くなる両柱面中央付近に、ほぼ同時に、ステップの束ね合いを発生発達させることになるのである。

非対称な形の主枝であってもエッジが対で発生することは注目に値するが、ここでは、エッジが単独発生する第 3 図の場合に、エッジ発生が水蒸気供給の面で不利な（第 3 図では下）側の柱面上であることに注目する。側枝発生数を読み取るための初期段階の第 7 図の画像は、今回の解析の画像 No.23 に相当するものであり、水蒸気供給の面で不利な図の左側の側枝発生数が 3 であるのに対して、右側の発生数が 2 であることを示している。この第 7 図の状態から第 5 図の画像の状態に成長するまでの同発生数は左側が 2 で右側が 1 であるため、合計すると、左側 5 に対して右側 3 になる。このように、非対称な形の主枝では、両側に側枝が対になって発生するばかりではなく片側に単独の発生があるため、左側と右側とで側枝数の異なる

主枝が存在することになる。この主枝の場合、対となるエッジ発生にも時間差があって水蒸気供給の面で不利な側の柱面上が先であるが、これらの事実は、相対的に水蒸気供給の面で不利な側の方が、有利な側に比べてステップ移動速度が遅く、ステップ間隔が狭くなる結果としてステップの束ね合いが生じ易くなることに対応している（「ステップ移動速度」を「ハイウェイを走る車の速さ」に、「ステップ間隔」を「車間距離」に、「ステップの束ね合い」を「交通渋滞」に、それぞれ置きかえて考察することがあることを、参考のために、付記させていただく）。ここで、第 8 図により非対称な形の主枝の側枝発生を説明する。先端部



第 7 図 側枝数を数えるための画像（画像 No.23 に相当）。結晶軸は結晶外形から求めたもの。



第 8 図 形が非対称な主枝の側枝発生説明図。(a) 非対称な形の主枝、(b) 片側に新エッジが発生した主枝、(c) 対になった側枝発生に加えて片側だけにエッジが発生することがある場合の側枝が発生した主枝。

が (a) のように非対称な形の主枝の場合は、水蒸気供給の面で不利な側にだけステップの束ね合いによるマクロステップが発生し発達して、(b) に示したような段差が生じ、側枝発生の原因になることがある。対となる発生の他にこのような単独の発生があるとき、(c) に示したような側枝の数が水蒸気供給の面で不利な側に多い主枝が誕生することになる。

教科書や写真集に載っている六花と呼ばれる代表的な雪結晶の多くは、冬の寒冷地の高山にかかる薄い雲から降った結晶のうちから整った形のものを選んで顕微鏡下に移して撮影されたものである。十勝岳に降るこのような雪結晶について中谷 (1938) は「鉛直線を軸として螺旋形の道に沿って回りながら落ちてくる。この回転運動は枝の対称的発達を助けるのであるが、…」と記している。このような規則的な落下運動が六花と呼ばれる雪結晶の 6 本の主枝先端部を水蒸気供給の面で有利不利のないほぼ対等な条件にしているのである。

なお、前節②と③のエッジ (E_1 と E_2 , F_1 と F_2 及び E_3 と E_4 の 3 例) の連続発生と⑥の先に発生したエッジ (E_1 , F_1 及び E_3) の消滅も注目すべき実験結果であるが、この連続発生が樹枝状成長と扇状成長の相違に深く関連しているため、本論文の後編 (II) の中で検討させていただく。

4. 議論と今後の課題

ここでは本論文の層成長に関わるところと側枝発生に関わるところとを分けて述べることにし、その後で、約60年前に撮影された映画の解析が必要になった経緯を考えてみたい。

表面模様のある板状結晶の代表である扇状結晶の形態を決める成長機構について、主枝及び側枝の最先端部で接する両柱面上に等しい頻度で形成される 2 次元核による柱面の層成長によって全ての枝が a 軸のうちの 1 つに平行になる外形が決まることと、曲面が存在する裏面がベルグ効果による稜線模様発生と関わっていることが明らかになった。この結果は、山下 (1979) の樹枝状結晶についての記述と Nelson and Knight (1998) の付録の Yamashita (1976) を基にした記述とが間違いのないものであることを、非対称形主枝の成長を記録した動画により、確かめたことになる。

扇状結晶の側枝は、柱面上のステップの束ね合いが作るマクロステップの発達に伴って生ずるものであ

り、通常は主枝の両側に対になって発生する。ただし、非対称な形の主枝の場合には対としての発生ばかりでなく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。この結論も、山下 (1979) にある内容を動画により詳しく正確なものに改訂したところに意味がある。Nelson (2005) は、扇状結晶ばかりでなく六花と呼ばれる板状結晶全般についての側枝発生機構を研究対象にしている。Yamashita (1976) あるいは山下 (1979) の記述を基にしながら、側枝発生論の構築を目指している。映画「雪の結晶」中の全ての動画の解析結果との比較検討が不可欠であるため、本研究との関連については映画中の樹枝状結晶他の解析結果が中心となる予定の本論文の後編 (II) で議論させていただく。

「雪の研究」(中谷 1949; Nakaya 1954) に記された研究結果のうちの雪結晶の形と結晶成長に関わる詳細な観察記録については、その内容を発展させる研究が行われない時期があったが、1974年に東京で開催された結晶成長国際会議 (ICCG-4) の招待講演で Frank (1974) が紹介し、注目されることになった。中谷 (1949) が記述している稜線模様などが生じるラフな面 (曲面) である板状雪結晶の裏面については、成長する雪結晶の表面には基底面と柱面だけが現れるとする Frank (1974) も述べている考え方があり、正しい理解が遅れていた。その後 Frank (1982) は、雪結晶の成長は凹部が極端に発達するところに特徴があるとの見方により、板状結晶の成長については、ラフな面 (曲面) を示した図を用いて稜線模様の成因とこの模様が細溝を伴うものへと変化する理由を説明している。山下 (1979) が、自由落下実験により結晶表面にラフな面 (曲面) が発生する過程を示し、さらに、板状結晶の成長機構と側枝発生機構についても言及したのは、ほぼ同時期である。しかし、1980年代になって板状雪結晶の成長機構の基本に関わるところで、疑似液体層の存在を前提とする理論が目ざされたり不安定論により側枝発生を論じたりする、当時としての新しい考え方が導入され、板状雪結晶が柱面の層成長により形成されるものだとする考え方への注目度が減ったため、山下 (1979) の常識的な内容についても研究者間の議論がない期間が続くことになった。このような状況を変える研究が、疑似液体層の存在を考慮する必要はなく転位の存在による渦巻成長もあり得ないとする Nelson and Knight (1998) や Nelson (2005) であり、本研究のような実験結果の詳細かつ

正確な記述であると考えている。この研究分野の今後の活性化を期待したい。

映画「雪の結晶」中の動画には、扇状結晶および樹枝状結晶の表面模様の変化や付着凍結雲粒の効果についての貴重な情報が含まれている。本論文の後編（II）で取り上げることにしたい。

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准教授および査読者のお二人にも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., 1974 : 雪の結晶—日本人の研究—。自然,

29(12), 28-38.

Frank, F. C., 1982 : Snow crystals. *Contemp. Phys.*, 23, 3-22.

紀伊国屋書店, 2006 : DVD「科学と技術」中の「雪の結晶」(ドキュメンタリー映像集成-4)。

中谷宇吉郎, 1938 : 雪。岩波新書, 161pp.

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.

Nakaya, U., 1954 : Snow Crystals, Natural and Artificial. Harvard Univ. Press, 510pp.

Nelson, J., 2005 : Branch growth and sidebranching in snow crystals. *Cryst. Growth Des.*, 5, 1509-1525.

Nelson, J. and C. Knight, 1998 : Snow crystal habit changes explained by layer nucleation. *J. Atmos. Sci.*, 55, 1452-1465.

Yamashita, A., 1976 : Growth processes of ice crystals and a law which is related to the symmetric growth of plate-like snow crystals. Preprints, Int. Conf. on Cloud Physics, Boulder, CO, Amer. Meteor. Soc., 136-141.

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.

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

Akira YAMASHITA*

* *Osaka Kyoiku University (Prof. Emeritus).*

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

(Received 3 February 2011 ; Accepted 10 July 2011)
