

## 過冷却雲中の実験が明らかにする代表的板状雪結晶の形態形成

山 下 晃\*

### 要 旨

過冷却雲中で行われた過去の実験の資料から選んだ4種類の六花などの写真が解析の対象である。これらの結晶の2次元的な形態形成に大きな役割を果たすのは、結晶先端部を起点とする雪結晶特有の層成長であるが、成長するこれらの結晶の表面模様のある裏面にも注目すべき変化が現れる。それは発生時には目立たない中央稜線模様や稜線模様群を目立つものにし、その後、これら模様上の凸部に発生する基底面が拡大する過程で、板状張り出し形成による板状部の2枚板化や気泡の取り込みなどが起きることである。このように、模様上の基底面発生とその後の変化は、一義的には表面模様消失過程でありながら、同時に新たな表面模様形成過程でもある。

### 1. はじめに

映画「雪の結晶（1951）」の画像解析（山下 2011, 2012）は、雪結晶を代表する扇状結晶と樹枝状結晶の側枝発生を含む成長機構を明らかにし、これら結晶の板状部の裏面とも呼ばれる曲面上の稜線模様などについても、その発生発達と変化の概要を示している。映画完成から60年経っての論文発表となった理由は山下（2011）が述べているので省くが、この間に多くの関わりある実験や観測の結果が発表されている。著者の実験（Yamashita 1973；山下 1974, 1979；Yamashita and Ohno 1984），天然の板状雪結晶の多くが2枚板状であること（Iwai 1983），その大きな方の板状部の裏面に表面模様がある（油川 1992）との観察結果，浮遊中の雪結晶を成長させる実験（Takahashi *et al.* 1991）などをその例として挙げることができる。

本論文は、この映画の解析結果を踏まえ、自由落下実験（山下 1974, 1979）及び自然循環型装置による

実験（Yamashita and Ohno 1984）の保存されていた資料に改めて注目することにより、代表的な板状結晶の形態と成長過程との関係を明らかにする。

### 2. 自由落下成長する人工雪

雲を作る部分が高さ14.7 m 直径0.28 m の円筒形の大型装置（Yamashita 1973；山下 1974, 1979）を用いて行った過冷却雲中で雪結晶を成長させる実験では、一度に多数の結晶を成長させると、併合した結晶に続いて多数の単結晶が降ってくる。ここでは、保存されている資料の中から六花と呼ぶのが相応しい結晶の写真を選び、結晶の立体像が読み取れる角板状結晶や放射状結晶の写真も参考にしながら、各結晶の主枝の形態とその変化に関する解析を試みる。装置内の温度分布図（山下 1979）から読み取ることができる各結晶が成長した温度の範囲は、図説明中に記した中心部の温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ である。なお、六花の個々の名称は菊地ほか（2012）を参考にする。

#### 2.1 扇六花，広幅六花，星六花及び樹枝六花

教科書などに載っている雪結晶の写真には、六花と呼ばれる対称性の優れたものが多い。ここで注目するのは、資料の中から選んだ第1図の扇六花の写真と、第2図（167ページ）の樹枝六花，広幅六花及び星六花の写真である。

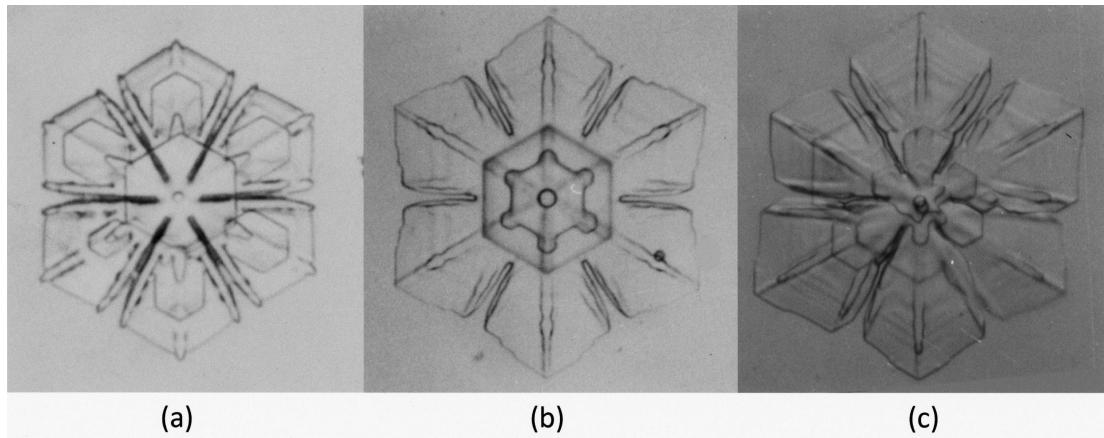
\* 大阪教育大学名誉教授。

akira4303@voice.ocn.ne.jp

—2012年5月1日受領—

—2012年12月26日受理—

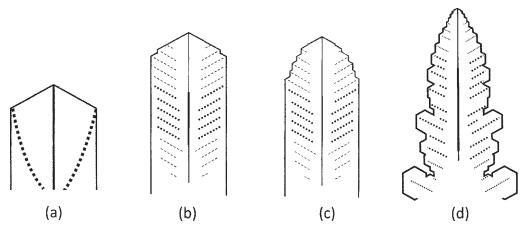
© 2013 日本気象学会



第1図 過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した代表的な扇状結晶。何れもa軸に平行な向きの長さ（全長）は約0.2mm。成長した温度は、(a) -16.9°C, (b) -12.5°C, (c) -16.1°C。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。

扇状結晶についての山下（2011）と樹枝状結晶についての山下（2012）の解析結果を基にすれば、これらの写真を参考にして扇六花・広幅六花・星六花・樹枝六花の主枝の外形と稜線模様との関係を図示することができる。すなわち、第1図(a)～(c)の扇六花については、各結晶主枝の稜線模様は中央稜線模様とその左右両側の曲線状の稜線模様であり、第3図(a)となる。a軸の1つに平行な向きに並んだ稜線模様群が見られる第2図の六花(a)～(f)は、山下（2012）によれば樹枝状結晶であり、そのうちの(a)～(d)は各主枝に3～6対の扇状の側枝が見られる樹枝六花である。その外形と稜線模様の関係を描くと第3図(d)となる。主枝に側枝発生のない第2図の六花(e)及び(f)は、写真からは先端部に柱面の存在を読み取れない(e)が星六花、先端部の柱面が明瞭な(f)が広幅六花であり、外形と稜線模様の関係を描くと、それぞれ、第3図の(c)及び(b)となる。なお、第2図の六花(a)～(e)からは主枝先端部に柱面が現れていると判断することは困難であるが、各主枝の中央稜線模様がa軸のうちの1つに平行であること等に基づく山下（2012）の結論を根拠に、柱面が現れているものとして、第3図の(c)及び(d)は描いている。また、第3図(b)、(c)及び(d)の中央稜線模様と稜線模様群は、明瞭な部分と明瞭でない部分が分かるように描いている。この表面模様の濃淡については2.3で注目する。

広幅六花は、雪結晶のグローバル分類（菊地ほか

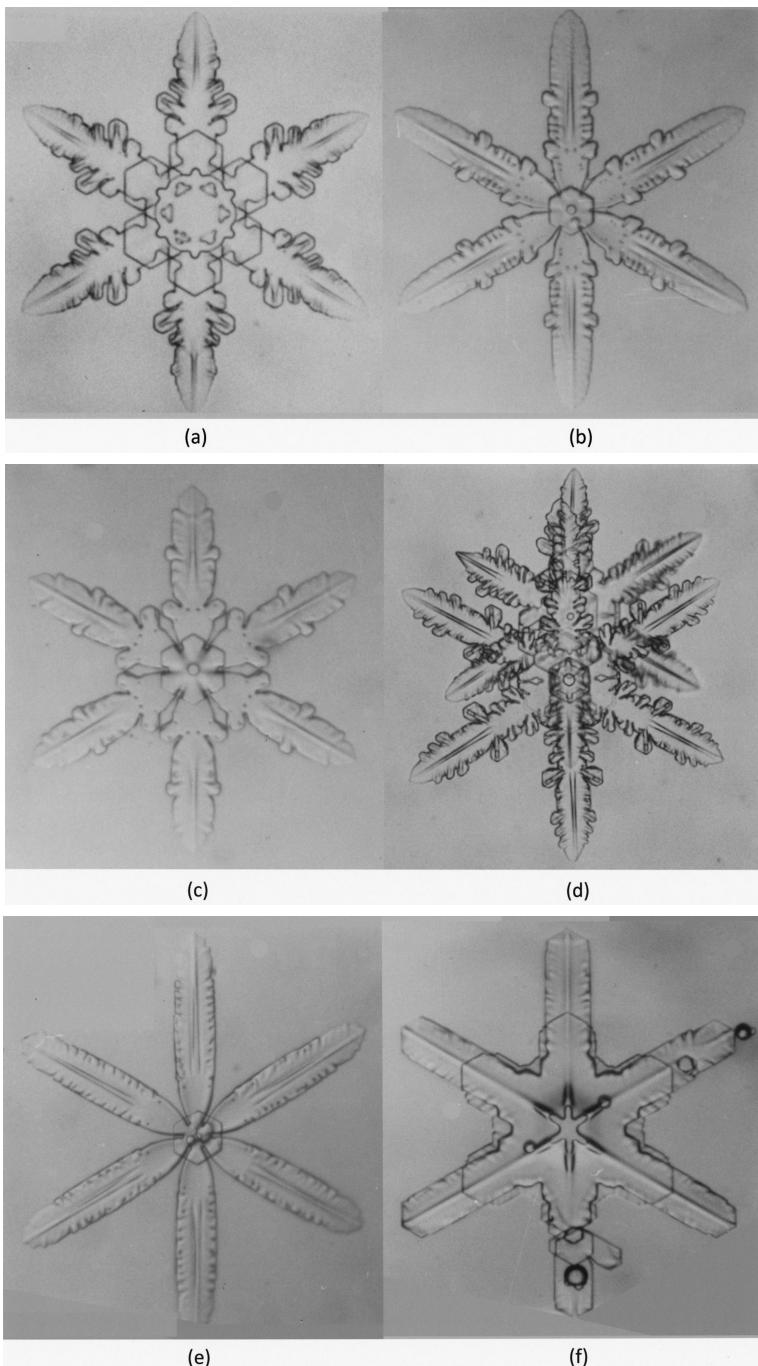


第3図 主枝の外形と稜線模様との関係。(a) 扇六花, (b) 広幅六花, (c) 星六花, (d) 樹枝六花。実線は中央稜線模様を表し、点線は、(a)では中央稜線模様両側の1対の稜線模様、(b)～(d)では稜線模様群を表す。

2012)では扇状結晶に入っているが、ここでは樹枝状結晶の仲間となる。この違いは、グローバル分類が主に結晶外形に注目しているのに対して、本論文では結晶外形ではなく中央稜線模様や稜線模様群に注目することによる。

## 2.2 扇状と樹枝状の混合型結晶

自由落下実験のうちの-16.1°Cで行った実験では2種類の混合型結晶の成長が見られる。その1つは、第4図(a)の結晶のように、中央稜線模様の両側に稜線模様群がある樹枝状成長の特徴（山下2012）を具えているが、その稜線模様群の中に扇状成長の特徴（山下2011）であるa軸のうちの1つとは平行でない稜線模様が混じっている主枝を持つものである。他の1つは、第4図(b)の樹枝状主枝と扇状主枝が混



第2図 過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した樹枝状結晶。全て2枚板状であり中央稜線模様の両側に稜線模様群が見られる。成長した温度とa軸に平行な向きの全長は、(a) -14.4°C, 約0.5 mm; (b), (c) 及び (e) -15.4°C, 約0.5 mm; (d) -14.1°C, 約0.5 mm; (f) -6°Cで生じる柱状結晶を下部ほど温度が低くなり最下部が-17.0°Cの条件で成長させたもの、約0.4 mm. (f) には付着凍結雲粒が見られる。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。

在する結晶である。

このような混合型結晶は、一連の同様の実験のうちの温度が異なる実験では見られず、中谷の人工雪実験の資料（中谷 1949）にも含まれていない。また、樹枝状成長している主枝を扇状成長に変えたり、その逆の変化をさせたりする実験（Ohno and Yamashita 1989）でも確認されていない。

これらの実験結果は、第4図の何れの結晶も、天然雪結晶の場合に近い過冷却雲中の自由落下という条件の下の限られた温度で成長可能であることを意味している。詳細については新しい実験を待つことになるが、このような混合型結晶が成長する可能性があることを示し、雪結晶形態形成の全体像把握が進むことを期待している。

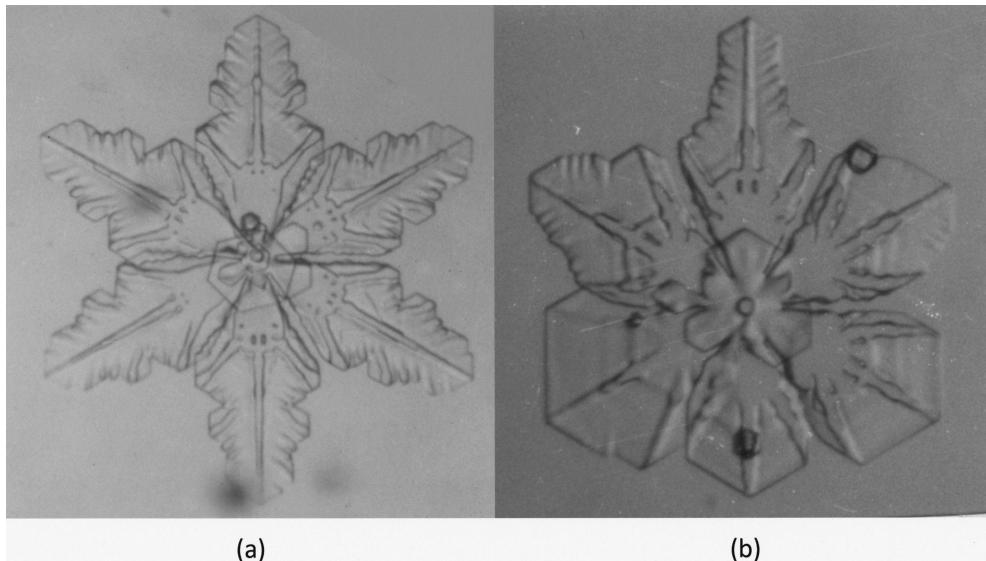
### 2.3 角板状結晶、扇六花、広幅六花、星六花及び樹枝六花の3次元像

比較的厚い2枚板の角板状結晶の3次元像がよく分かるのが第5図の写真であり、中央稜線模様と畠模様との関係をよく表している。扇六花の3次元像を示す写真は撮影されていないが、扇六花は角板状結晶から生じるものであるため、扇六花裏面の中央稜線模様と畠模様がこの（第5図の）写真のものと同様であるとすることに問題はないさうである。

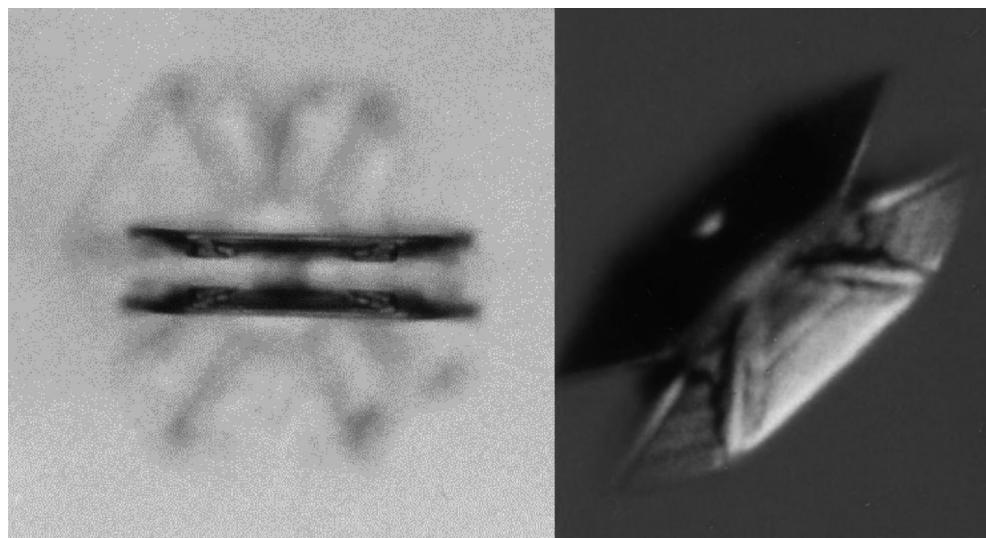
樹枝状結晶の多くは2枚板であり、第2図の写真にもその好例を見る事ができるが、結晶の平面的な外形と模様に注目して撮影された写真では、その3次元像を調べる事はできない。ここでは、放射状結晶の写真に注目して樹枝状結晶主枝の3次元像を調べるこ

とにする。以下の記述では、例えば、放射状結晶の主枝に樹枝六花の主枝に相当するものがあるとき、その主枝を樹枝六花の主枝とする。

第6図(a), (b)及び(c)は1つの放射状結晶の主枝3本の写真である。先ず、(a)は広幅六花の主枝、

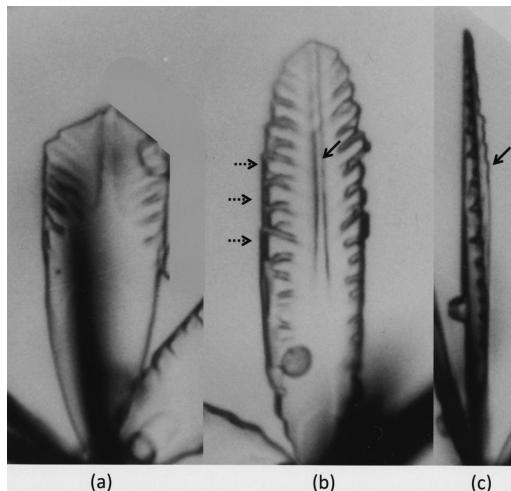


第4図 過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した樹枝状・扇状混合型結晶。何れも、 $a$ 軸に平行な向きの全長は約0.25 mmで $-16.1^{\circ}\text{C}$ で成長したもの。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。

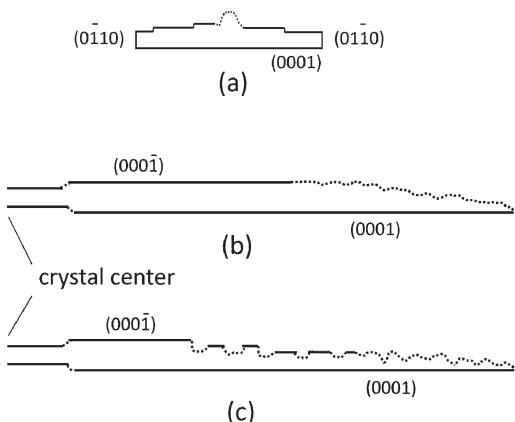


第5図 角板状結晶(2枚板)。左は、 $-17.8^{\circ}\text{C}$ で過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した約0.15 mmの結晶。右は、ほぼ同じ条件で成長した約0.1 mmの結晶。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。

(b)は星六花の主枝であり、広幅六花と星六花とがほぼ同じ条件で成長することに気付かされる。次に、(b)の中央付近の点線矢印が指す部分にはc軸に平行な向きのサイズが $10\text{ }\mu\text{m}$ 弱の柱面が現れていること、



第6図 過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した放射状結晶の主枝（3本が同じ結晶のもの）。広幅六花（あるいは星六花）の主枝に相当し、長さ約0.25 mm。成長した温度は-13.7°C。実線矢印が中央稜線模様を、点線矢印が柱面を示す。中央稜線模様の両側には稜線模様群が見られる。山下（2012）の第17図がこの結晶の写真。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。



第7図 広幅六花あるいは星六花主枝の右円内に示す部分の断面。点線は曲面を表していて、(a)の中央の盛り上がったところは中央稜線模様。(a)のサイズは中央部が厚さ約15  $\mu\text{m}$ 、柱面部分の厚さが10  $\mu\text{m}$ 弱、基底部分が約65  $\mu\text{m}$ 。

(b)と(c)に実線矢印で示した部分が中央稜線模様を示していること、(c)に見られる並んだ黒点が稜線模様群の模様間の細溝群に対応することなどを読み取ることができる。これらの情報を基に、この結晶の平均的な主枝の3断面を、(0001)面が現れている表面を下とし曲面の多い裏面が上になるよう描いたのが第7図である。第7図(a)には、主枝中央部分に生じている(0001)面と第6図(b)の点線矢印が示す柱面を(0110)面及び(0110)面として示している。第7図(b)は、中央稜線模様が先端部では目立たないこと、先端部から少し離れた部分には凹凸が発達した同模様があること、結晶中心に近い部分には(0001)面が現れ厚さが増していく模様がないことを表している。また、第7図(c)は、稜線模様群の凹凸は先端部近くでは目立たないが、中央部分では目立っていて、その複数の凸部に(0001)面があること、結晶中心に近い部分は(0001)面が大きく現れ厚さが増していく模様がないことを表している。なお、第6図(b)から読み取ることができる稜線模様群の模様数は主枝の長さ100  $\mu\text{m}$ 当たり6~10である。

放射状結晶の主枝のうち樹枝六花のものに相当するのが第8図(a)、(b)と(c)の写真である。中央稜線模様の構造は、第6図の広幅六花あるいは星六花の主枝のものとほぼ同じであるが、異なっているのは、(c)で側枝発生が明瞭であることと柱面の存在が平面としてではなく直線としてしか確認できないことである。第9図は樹枝六花主枝の断面を描いている。樹枝六花

主枝の長さ100  $\mu\text{m}$ 当たりの側枝発生数は、第8図(c)と第2図(a)~(d)の写真から読み取ると1~3対である。また、第2図の写真からは稜線模様群を構成する模様数を正確に読み取ることはできないが、上記の広幅六花の場合と同程度の数であるとすると、樹枝六花では稜線模様群の先端部の3分の1~7分の1程度が側枝へと成長していることになる。

ここで、扇状結晶と樹枝状結晶の成長を記録した動画の解析結果（山下 2012）

との共通点を探るため、主枝の先端部から結晶全体の中心部までの位置による表面模様の違いを、結晶成長に伴う時間変化に置き換えて記述してみる。第2図の写真(a)～(e)の何れにも、主枝先端部分には発生直後の目立たない中央稜線模様や稜線模様群が見られるが、主枝中央部分に近いところでは、発生後の発達により、この部分が先端であった際には目立たなかつたものが目立つ存在に変わったものと見做すことができる。また、結晶全体の中心部分に近い主枝上に模様がないことについては、一旦発生した模様が消えた部分であるとの解釈が成立する。この解釈と同じ内容の結

晶成長経過を表すのが第7図の(b)と(c)であり、第2図の各写真からは分かり難い(000 $\bar{1}$ )面の出現も表している。

広幅六花あるいは星六花の3次元像(第7図)と樹枝六花の3次元像(第9図)から分かる両者の結晶成長の違いの概略は次の通りである。すなわち、前者では側枝発生ではなく凹凸模様の発達中に(000 $\bar{1}$ )面、2つの柱面((0110)面及び(01 $\bar{1}$ 0)面)が比較的早目に現れているのに対して、後者では、側枝が発生し凹凸模様の発達はあるが(000 $\bar{1}$ )面の出現が確認し難くc軸に平行な向きのサイズを測定できるような柱面は現れず、映画「雪の結晶」の樹枝状結晶の成長と模様との関係(山下2012)と同じである。

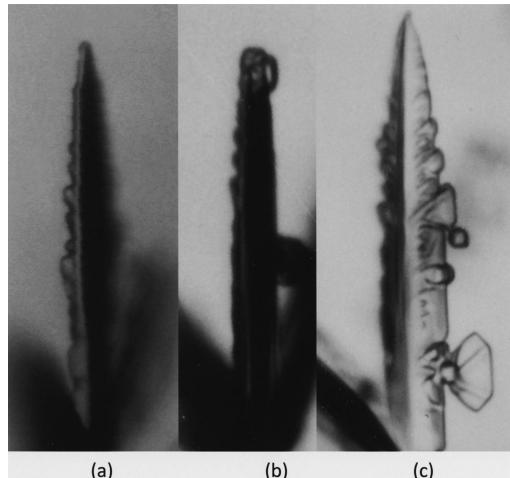
#### 2.4 六花4種類が成長する条件

扇六花と樹枝状結晶の六花3種類との主枝の違いは、第3図が示している。また、樹枝状結晶の六花3種類の2次元的な特徴については、第2図の写真が具体的に示している。すなわち、主枝に側枝発生がなく先端部の2つの柱面のなす角度が約120度で表面模様を除けば扇状結晶に近いのが広幅六花、これとほぼ同じ形態を持ちながら先端部だけは広幅六花のものと違って尖っているのが星六花である。一方、主枝に側枝発生があり、側枝の多くが扇状のものが樹枝六花である。

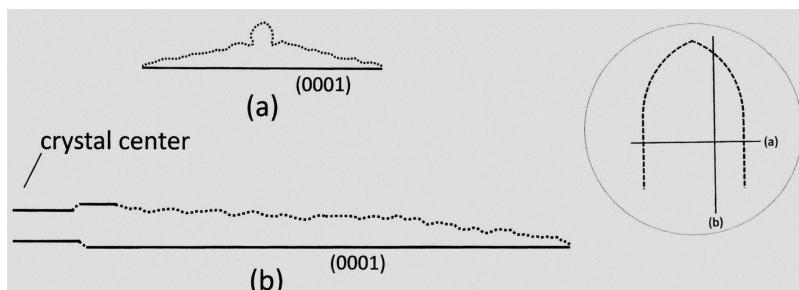
樹枝状結晶の六花の2次元的な特徴は、広幅六花と星六花は、先端部では柱面のc軸に平行な向きのサイズが正確に測定できないほど小さくて薄い板状だが、主枝中央部から結晶全体の中心部にかけては板状部の側面に柱面が発達していく第7図(a)にあるように少し厚くなっている。一方、樹枝六花は、先端部分から主枝中央部分を経て結晶全体の中心部にかけての周辺

部分が、第9図(a)にあるように薄くなっている。

以上の相違点を成長過程の違いに置き換えると、広幅六花や星六花が成長するのは、主枝先端部と比べるときの主枝周辺部分で、柱面の成長が減速し始めてc軸に平行な向きのサイズが増し始め、数多くある稜線模様群中の何れの先端部分も側枝形成に寄与しなくなる場合になる。一方、樹枝



第8図 過冷却雲中を約3分間自由落下して成長した放射状結晶の主枝 (b)と(c)は同じ結晶のもの)。樹枝六花の主枝に相当し、長さ約0.25 mm。成長した温度は-13.7°C。高粘性オイル中に落下させた結晶を撮影。



第9図 樹枝六花主枝の右円内に示す部分の断面。点線は曲面を表していて、(a)の中央の盛り上がったところが中央稜線模様。(a)のサイズは中央部の厚さが15 μm、基底面部分が約70 μm。

六花が生じるのは、発生時から $c$ 軸に平行な向きに殆ど厚みを増すことなく成長する稜線模様群先端部分のうちの一部が相対的に速く成長して側枝となる場合であり、山下（2012）が解析した樹枝状結晶と同じ内容になる。なお、第2図の樹枝六花(a)～(d)では、主枝上の2つの稜線模様群の先端部5対のうち1対程度から側枝が発生している。

以上のように扇六花、広幅六花、星六花及び樹枝六花の4種類に分かれる形態上の違いが生じる理由は、結晶が成長する温度の僅かな違いにあるものと推定している。これらの結晶の $a$ 軸に平行な向きの成長速度は $c$ 軸に平行な向きの成長速度より大きく、その比をTakahashi *et al.* (1991) のサイズの比を示す図から求めると、-12°Cで13、-15°Cで100、-18°Cで8となる。このように、僅かな温度の違いがあれば、このサイズ比に対応するよう成長速度比が急変する領域であるため、板状主枝の周辺部が一定の薄さを保って成長するか、あるいは、先端部分を除いて厚さを増す成長が始まるかの二者択一的な変化が起き、六花の種類が分かれることになるものとの判断できるのである。なお、第1図、第2図の(a)～(e)、第4図、第6図及び第8図の写真的六花あるいは六花の主枝相当部分が成長した温度は、高橋（2011）が扇六花、広幅六花、星六花及び樹枝六花について求めている温度の範囲に、ほぼ、入っている。

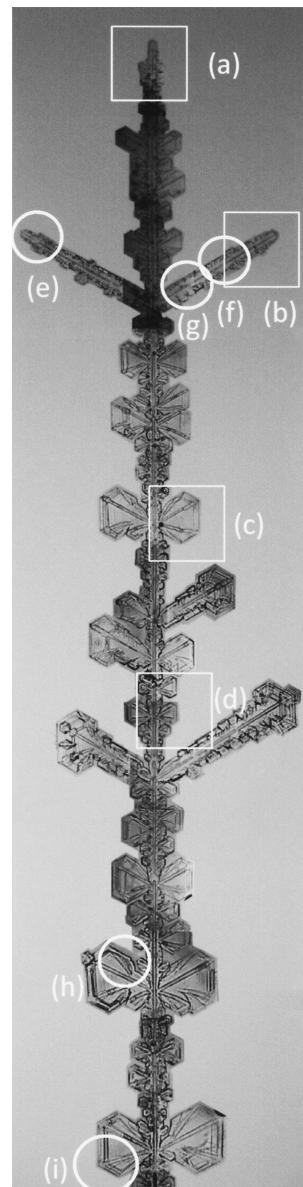
### 3. 静止雲中で成長する巨大結晶

自然循環型クラウドチェンバー（Yamashita and Ohno 1984）は、過冷却雲中の対流が殆どない部分に張った糸上に樹枝状結晶や扇状結晶などを成長させることができる装置である。樹枝状結晶の観察には、偶然発生したものも利用可能だが、過冷却雲を動かす操作などを行って発生させることもできる。ここでは約-15°Cで約20時間成長した第10図に示す長さ約6cmの巨大結晶に注目する。

この結晶の側枝を含む先端部分のうち樹枝状結晶の特徴である明瞭な稜線模様群が存在するところは、主枝の先端に近い部分と1対の最も長い側枝だけである。その他の側枝には、扇状のものが多く樹枝状から扇状に変化したものもある。注目するところは、第10図中に(a)～(d)を付した□印の部分及び(e)～(i)を付した○印の部分であり、これらを拡大した写真が、それぞれ、第11図及び第12図である。なお、この節では、動画の解析結果（山下 2012）との共通点を探る

ため、2.3の場合と同様、ある枝に注目するとき、その先端から成長が始まった位置までに見られる表面模様や取り込まれた気泡の分布の違いを、結晶成長に伴う時間変化に置き換え、また、第11図の(a)が示す部分を(a)、第12図の(e)が示す部分を(e)などと記述する。

先ず注目するのは、この結晶の樹枝六花の主枝の一

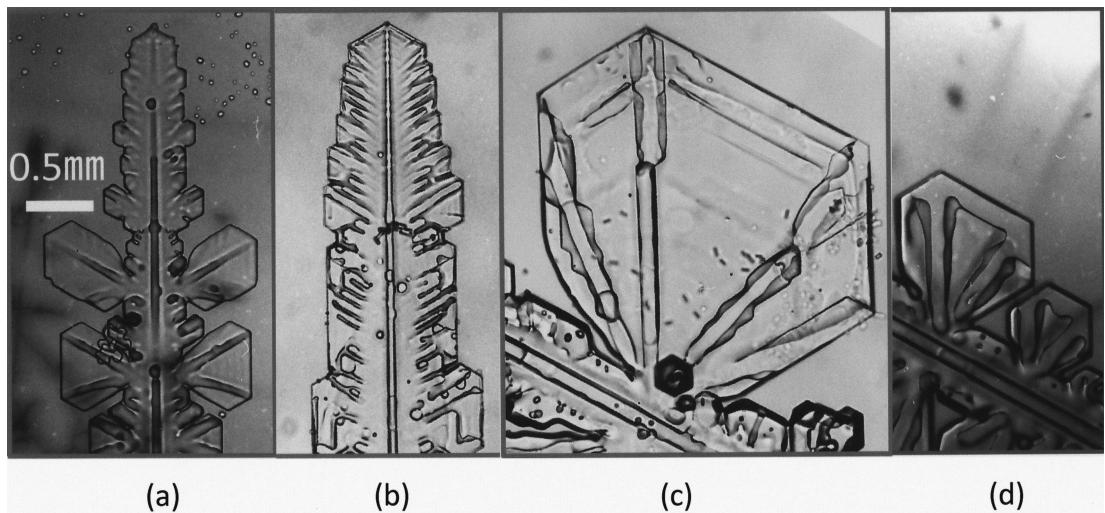


第10図 長さ約63 mm の巨大結晶（顕微鏡写真35枚による組み写真）。

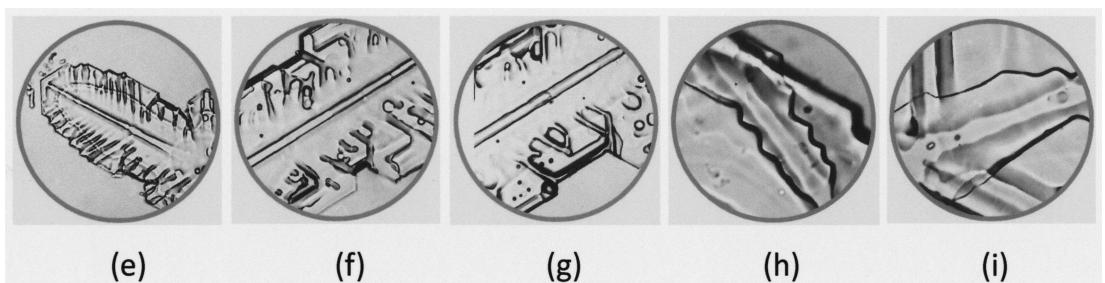
部(a)と広幅六花の主枝相当の側枝(b)との相違点である。(a)と(b)の両者は主枝と側枝の関係にあるが、ここでは、注目する(b)の先端部は、(a)の先端部とは約1 cm 離れていて周辺の側枝とも5 mm 以上離れているため、2本の独立した枝として比較する。(発生時を揃えたときの) 側枝などのサイズの比率を成長速度の比とすると、(a)の成長速度を1とするとき(b)のそれは0.53であり、先端部の柱面のa軸の1つに平行な向きの長さは(b)の方が(a)より大きく、側枝に関しては、(a)には両側に扇状のものが対をなして発生しているのに対して(b)では(正しくは側枝の側枝となるが)発生していない。次に注目する(c)と(d)は、何れも扇状の側枝である。(a)の成長速度の10分の1以下と成長が遅い(c)には、稜線模様上に新

たに現れた基底面を含む部分からの薄い板状張り出しが生じ、部分的に2枚板化が見られる。これは第7図(a)の状態からの成長であり、その断面が第13図となる。また、ほぼ成長が止まったと判断できる側枝(d)の先端部は、稜線模様の無い基底面と柱面とだけからなる無垢板状に変化している。

結晶成長に伴う稜線模様群の凹凸模様の変化は、(e), (f)及び(g)を比べると分かるように、発生場所近くでは目立たないが、発生直後からは変化して鮮明になり、次第に模様上に新たな基底面が現れて発達することによって、早く生じた部分ほど模様による凹凸が少なくなっている。(g)では模様がほぼなくなっているが、模様と模様との間の細溝部分が残りその一部が小さな気泡となっていると見做すことができる。稜

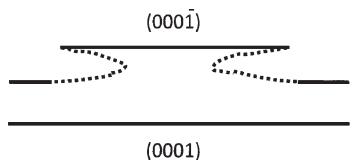


第11図 巨大結晶の形態の異なる4種類の枝（第10図中の□印部分の拡大画像）。左端のスケールは(a)～(d)共通。成長する向きが上になるよう並べている。

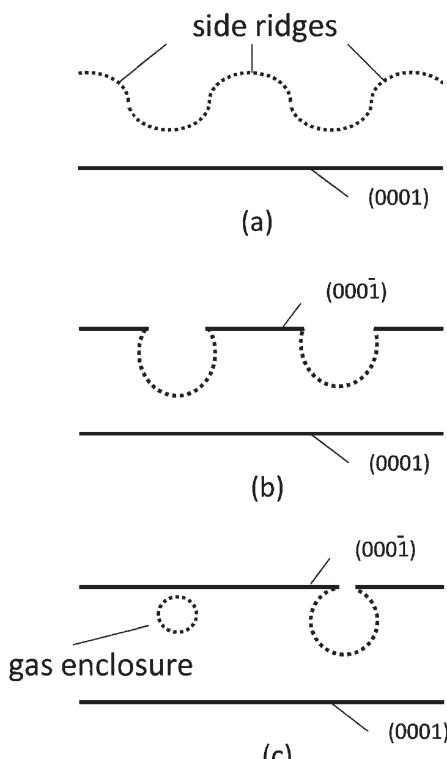


第12図 巨大結晶の表面及び内部の模様（第10図中の○印部分の拡大画像）。各円が結晶中の直径1.3 mm の部分を切り取っている。

線模様群の間の細溝群の部分に生じたものと推定される同様の気泡は、(c)と(d)の下部の結晶全体の（写真では傾斜している）中央稜線模様の両側にも見ることができる。稜線模様群がある部分の気泡形成に至る過程のa軸の1つの向きに平行な断面は、模様の凸部に(0001)面が生じるところまでは第7図(c)の状



第13図 張り出し形成による稜線模様部分の第7図(a)の状態からの2枚板化。実線が基底面、点線が曲面を表す。中央稜線模様の場合はa軸の1つの向きに垂直な断面。



第14図 発達した稜線模様群のa軸の1つの向きに平行な断面の変化。実線が基底面、点線が曲面を表す。(a)稜線模様群、(b)模様上に基底面が現れた稜線模様群、(c)基底面を含む部分の張り出し形成に伴って取り込まれる気泡。

態の先端部分から中央部分にかけてと同じであるため、第14図(a)から第14図(b)への変化として描くことができ、その後に(0001)面の発達を伴う板状の張り出し形成があるとき、気泡取り込みを示す第14図(c)のように変化する。

第13図が示す薄い板状の張り出し形成は、水蒸気供給の面では側枝の先端部分や周辺部分より不利な中央部分に生じている。この注目すべき結晶成長については次節でも取り上げることにする。なお、扇状側枝上の稜線模様部分の2枚板化は、(h)と(i)にも見出すことができる。また、この例だけだが、(i)には稜線模様上に基底面が現れることに伴うものと推定される気泡が見られる。

#### 4. 議論

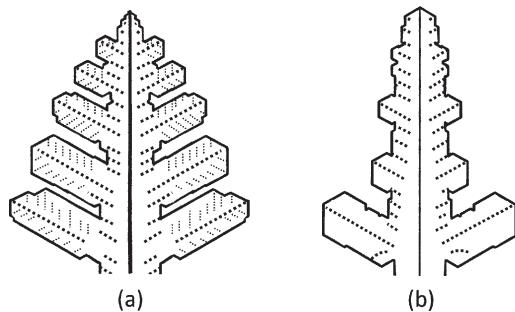
##### 4.1 六花5種類の2次元像

第2節では自由落下実験の資料を基に4種類の六花の特徴を示すことができたが、天然雪結晶の六花は5種類（菊地ほか 2012）である。

中谷の人工雪（中谷 1949）には羊歯六花に相当する結晶が含まれている。詳しく調べた山下（2012）の結晶③は、樹枝状結晶の非対称な形の1つの主枝に相当し、その水蒸気供給の面で不利な側の側枝が扇状のものばかりであるのに対して、有利な側の側枝には扇状のもの他に多数の樹枝状のものがある。この樹枝状側枝が並んで発生している側が羊歯六花主枝の片側に相当するものとして、羊歯六花の主枝を描いたのが第15図(a)である。なお、高橋（2011）は、雲水量を増やす操作により成長中の樹枝六花が羊歯六花に変わることを示している。

自由落下する六花を成長させる実験は、天然の六花と呼ばれる雪結晶の研究にとっては理想的なものであり、主枝の外形と稜線模様の相違点を描いた第3図(a), (b), (c)及び(d)は、順番に扇六花、広幅六花、星六花及び樹枝六花の各々の主枝の模式図とすることができる。これに第15図(a)の羊歯六花を加えれば六花5種類の主枝の2次元の図が揃うことになる。

前節の巨大結晶には、扇六花、広幅六花及び樹枝六花の主枝に相当する主枝あるいは側枝がある。この結晶の先端部である第11図(a)は樹枝六花の主枝と見做すことができ、その外形と稜線模様を描いたのが第15図(b)である。この図と第3図(d)の主な相違点は、先端部分に柱面の存在による直線部分を確認できるか確認し難いかであり、何れも樹枝状結晶の特徴（山下



第15図 羊歯六花の主枝(a)と樹枝六花の主枝(巨大結晶の場合)(b)。実線は結晶外周と主枝の中央稜線模様を、太い点線とは、それぞれ、主枝と側枝の稜線模様群を表す。なお、(a)では主枝の稜線模様群の一部は側枝の中央稜線模様でもある。

2012) をそなえている。

巨大結晶(第10図)に含まれる樹枝六花や広幅六花に相当する部分のサイズは、自由落下中に成長した結晶(第2図)の対応する部分と比較して、何れも、約10倍程度であり、両者には極端な差がある。稜線模様群については、その模様の間隔が、第11図の(b)の部分では約 $64\text{ }\mu\text{m}$ 、自由落下実験の星六花の主枝(第6図(b))の場合が約 $13\text{ }\mu\text{m}$ であり、約5倍もの違いがある。このようにサイズにも成長速度にも大きな違いがあるにもかかわらず、第3図が示す同じ形態上の基準により六花を区別できるのである。

#### 4.2 樹枝状結晶の3次元像と気泡の取り込み

2.3の後半と前節では、過冷却雲中で成長した樹枝状結晶の写真について、主枝の先端部から結晶全体の中心部までの位置による表面模様の違いを、結晶成長に伴う時間変化に置き換えることを試みている。この方法によって、発生時には目立たない板状部裏面の中央稜線模様や稜線模様群が、凹凸の目立つ模様に変化した後に模様上の凸部に生じる基底面の発達に伴って消える傾向にあることを示すことができたが、この内容は山下(2012)の解析と共通であり、信頼できる結果を得たものと判断している。

稜線模様上に生じる基底面を含む部分からの張り出し形成による2枚板化と気泡の取り込みは、前節の巨大結晶の解析の結果であり、自由落下実験の写真(第2図)からは、稜線模様が消滅する部分の近傍に気泡と凹部の何れであるかは不明の小さな黒い点を見出せる程度で2枚板化は見出せない。しかし、人工雪の2

枚板化を骸晶の発達と記している中谷(1949)には、2枚板化と気泡の取り込みを読み取ることができる(Pt.253, No.1235のような)写真も掲載されているのである。一方、天然雪結晶の写真(Bentley and Humphreys 1931; 中谷 1949; 小林 1983; Libbrecht and Rasmussen 2003; Libbrecht 2008; 菊地・梶川 2011)に注目するとき、部分的な2枚板化が読み取れるものは多数あり、前野・黒岩(1966)が指摘しているa軸の1つに平行な向き、すなわち、稜線模様群が作る細溝群と同じ向きに並ぶ気泡群や、中央稜線模様の両側に2列に並ぶ気泡群など、多くの例も見出すことができる。その典型的な例を挙げるとすれば、Libbrecht and Rasmussen(2003)の100ページの写真であろう。

このように、盛んに柱面が層成長している樹枝状結晶や扇状結晶の先端部分では気泡の取り込みではなく(山下 2011, 2012)、板状雪結晶裏面の稜線模様群や中央稜線模様などの凸部からの薄い板状の張り出しが2枚板化や気泡取り込みといった形態形成に大きな役割を果たしているのである。

#### 4.3 板状の張り出し形成

稜線模様の凸部における基底面発生から薄い板状張り出し形成(第13図)に至る変化と、気泡の取り込みに至る変化(第14図)に注目する。この結晶成長は、曲面として成長している模様上に基底面が発生するとき、殆ど成長しない基底面の出現が、曲面のうちのこの基底面に隣接する部分に急速な水蒸気の昇華凝結をもたらして起きている。基底面は拡大し基底面を含む部分の薄い板状の張り出しが生じることになるこの成長は、山下(1979)の単結晶凍結雲粒から2枚板状結晶が成長する過程と共通である。

この曲面と結晶面とが共存する状態の変化は、注目すべき雪結晶特有の結晶成長であるが、ここでは実験事実としての記述に留め、詳細については単結晶凍結雲粒の球面からの成長に関する資料(山下 1974, 1979)を用いた整理の進展に委ねる。

#### 5. 結論

動画の解析(山下 2011, 2012)を終えたことで、過冷却雲中で行われた過去の実験に改めて注目することが可能になった。この解析で示すことができたのは、5種類の六花の2次元像(①~③)と3次元像とその変化の過程(④と⑤)である。また、⑥は雪結晶特有の張り出し形成についてである。

- ① 主枝の中央稜線模様の両側に 1 対の曲線稜線模様があるのが扇状結晶の扇六花であり、同じ両側に稜線模様群があるのが樹枝状結晶の 4 種類の六花である。
- ② 樹枝状結晶のうち側枝発生がないのが広幅六花と星六花である。広幅六花は、先端部の 2 つの柱面が明瞭で両者のなす角度がほぼ 120 度である。一方の星六花の場合は、先端部の 2 つの柱面が、小さくて確認できなかったり両者のなす角度が 120 度以下で尖って見えたりする。
- ③ 樹枝状結晶のうち側枝発生があるのが樹枝六花と羊歯六花である。扇状の側枝が多いのが前者であり、樹枝状の側枝が多いのが後者である。
- ④ 樹枝六花の主枝では、稜線模様群の個々の模様先端部の柱面に c 軸に平行な向きのサイズ増が認められず、一部の先端部が側枝発生に至っている。これに対して広幅六花と星六花の主枝では、中央部の稜線模様群の個々の模様先端部の柱面に c 軸に平行な向きのサイズ増があって、何れの先端部も側枝発生に寄与していない。これが樹枝六花と広幅六花あるいは星六花との 3 次元的な相違点である。
- ⑤ 板状結晶の 2 次元的な外形と表面模様を生みだすのは柱面の層成長である。この成長に加えて、板状部の裏面と呼ばれる曲面部分の成長が、表面模様の発達、模様上における基底面の発生、基底面の発達に伴う模様の消失や板状張り出し形成による 2 枚板化、張り出し形成による気泡の取り込み等を通して、その形態形成に大きな役割を果たしている。
- ⑥ 水蒸気の供給の面で側枝などの先端部に比べて不利な稜線模様の凸部には、基底面の発生発達があつて薄い板状張り出し形成が見られることがある。この現象は、凍結雲粒からの 2 枚の板状張り出し形成の場合と同様であり、雪結晶特有の形態形成に大きな役割を果たしている。

#### 参考文献

- 油川英明, 1992: 雪結晶の「裏」と「表」について. 雪氷, 54, 123-130.
- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931: Snow Crystals. McGraw-Hill. 226pp.
- Iwai, K., 1983: Three-dimensional structure of plate-like snow crystals. J. Meteor. Soc. Japan, 61, 746-755.
- 菊地勝弘, 梶川正弘, 2011: 雪の結晶図鑑. 北海道新聞社, 190pp.
- 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.
- 小林禎作, 1983: 雪の結晶—冬のエフェメラル. 北海道大学出版会, 39pp.
- Libbrecht, K. 2008 : Snowflakes. Voyageur Press, 512 pp.
- Libbrecht, K. and P. Rasmussen, 2003 : The Snowflake —Winter's Secret Beauty—. Voyageur Press, 112pp.
- 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.
- Ohno, T. and A. Yamashita, 1989 : Morphology of ice crystals grown in a slowly flowing supercooled cloud.
- Sunagawa, I. ed.: Morphology and Growth Unit of Crystals. TERRAPUB, 627-635.
- 高橋庸哉, 2011 : 鉛直過冷却雲風洞実験による樹枝状雪結晶の成長温度領域の決定. 日本気象学会2011年度春季大会予稿集, A108.
- Takahashi, T., T. Endoh, G. Wakahama and N. Fukuta, 1991 : Vapor diffusional growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C. J. Meteor. Soc. Japan, 69, 15-30.
- 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.
- 山下 晃, 2012 : 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—. 天気, 59, 425-435.
- Yamashita, A. and T. Ohno, 1984 : Ice crystals grown in an unforced air flow cloud chamber. J. Meteor. Soc. Japan, 62, 135-139.

## Morphology of Plate-type Snow Crystals Grown in a Supercooled Cloud

Akira YAMASHITA\*

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

(Received 1 May 2012 ; Accepted 26 December 2012)

---