



雪結晶の成長形に関する実験的研究*

—昭和59年度日本気象学会賞受賞記念講演—

権田 武彦**

1. 序 論

1気圧の空気中で成長する雪結晶の晶癖変化(六角板結晶に成長するか六角柱結晶に成長するか)が温度によるか、過飽和度によるかという問題は、中谷(1951, 1954), Marshall・Langleben(1954)以来、比較的近年まで未解決のままに残された。その後、Mason(1953), Hallett・Mason(1958), Mason・Bryant・Van den Heuvel(1963), 小林(1957, 1961)らの実験結果が出るに及んで温度説が有力になった。一方、磯野・駒林・小野(1957), 磯野(1958), 磯野・岩井(1969, 1971), 駒林(1970), 権田・駒林(1970, 1971)らはMarshallらの過飽和度説をさらに発展させ、雪結晶の晶癖変化に及ぼす水分子の拡散効果の重要性を指摘した。ごく最近になって晶癖変化の温度依存性は、雪結晶のミクロな表面構造の結晶方位依存性とその温度変化によって説明することが試みられた(黒田, Lacmann, 1982; 黒田, 1982)。一方、雪結晶の形態不安定(多面体結晶から骸晶結晶、樹枝状結晶への成長)は、過飽和度に依存することが指摘されていた(小林, 1961)が、その詳細と形成機構については、ごく最近まで未解決のままであった。

一般に、雪結晶の成長の律速過程は次の3つの過程が考えられる。(1) 蒸気相から結晶表面へ向かう水分子の

拡散過程, (2) 結晶表面上で水分子が結晶相に組み込まれる過程(表面成長カインティックス), (3) 昇華熱の散逸過程。この報告では、雪結晶の形態変化のうち、晶癖変化と形態不安定に及ぼす水分子の拡散効果を中心に、筆者らの最近の研究の概要を述べる。

2. 雪結晶の形態不安定

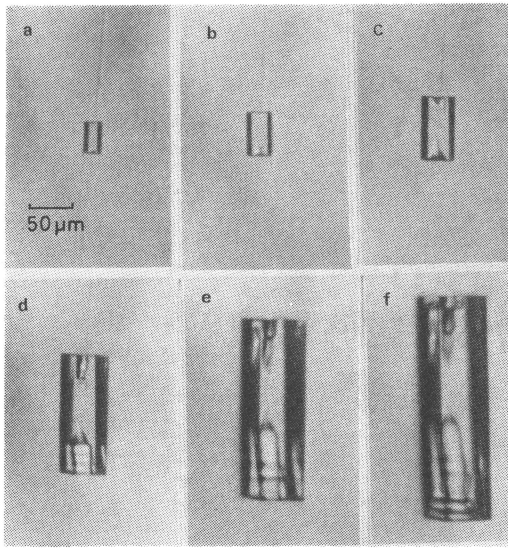
2.1. 過飽和度と結晶サイズ依存性

既に述べたように雪結晶の形態不安定は、過飽和度に依存することが知られていた(小林, 1961)が、その詳細と形成機構については、ごく最近まで未解決のままであった。その後、雪結晶以外の物質について、形態安定性の理論(Chernov, 1974; 黒田, 入沢, 大川, 1977)が発表されるに及んで、雪結晶に関してもこの問題が改めてクローズアップされて来た。最近、Frank(1982)は、この問題に関して定性的な議論をしているが、ここでは、筆者らの最近の研究(権田, 小池, 1982a, 1982b; 権田, 山崎, 1982; 権田, 小池, 1983; 権田, 清, 五味, 1984; 権田, 五味, 1984)を中心にしてその概要を述べる。

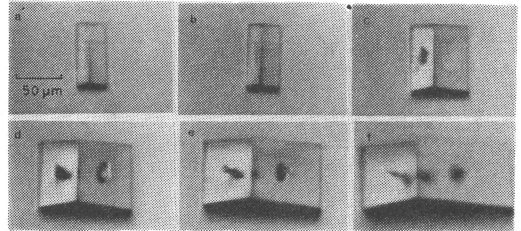
一般に多面体結晶の形が形態不安定を起こす駆動力は、結晶面に沿っての過飽和度(表面過飽和度)の不均一である。成長している雪結晶に向かって水分子が空気中を拡散するとき、表面過飽和度は結晶の角で最も高く、結晶の中心へ行くに従って小さくなっている(Berg効果)。パルクの過飽和度が比較的高ければ、結晶の角

* Experimental study on the growth forms of snow crystals.

** Takehiko Gonda, 東京理科大学理工学部.



第1図 -30°C , 過飽和度5.8%の760 Torrの空气中で成長する角柱氷晶; (a) 3.3, (b) 8.8, (c) 18.4, (d) 47.0, (e) 98.2, (f) 14.2 min.



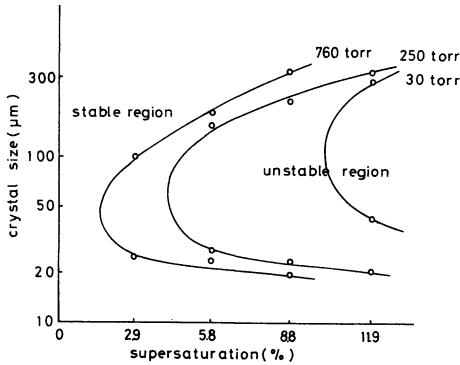
第2図 -30°C , 過飽和度1.4%の250 Torrの空气中で成長する氷晶; (a) 6.7, (b) 8.0, (c) 28.0, (d) 72.2, (e) 115.1, (f) 187.8 min.

事であるが、この現象は、結晶の角近くに露頭したらせん転位によるステップに原因している(図省略)。例えば成長している角柱結晶の $(10\bar{1}0)$ 面の角近くにらせん転位が露頭すると、らせん転位によって作られたステップは、まず表面過飽和度の高い結晶の縁に沿って進み、円弧状のステップを作る。その後、このステップは、表面過飽和度の低い結晶の中心へ向かってゆっくりと前進する。このステップが後から進行して来た別のステップと束ね合いを起こして巨大ステップを作ると、その前進速度は、ますます遅くなって結晶表面をおおいつくす事が出来なくなる。第2図に示した結晶は、この様にして出来た低過飽和度における骸晶結晶である。この結晶は、初め角柱結晶として成長した(a)が、その後、 $[10\bar{1}0]$ 方向のみ成長して角板結晶に変化した。結晶がさらに成長すると(f)、 $(10\bar{1}0)$ 面上の骸晶構造が気泡として結晶の内部にとり込まれて、多面体結晶に変化する。

2.2. 空気の圧力依存性

前節では、雪結晶の骸晶構造の形成がバルクの過飽和度と結晶サイズに依存する事を定性的に示した。また角柱結晶の骸晶は、初め (0001) 面上に生じて、これが $[0001]$ 方向への優先的成長につながる事を述べた。空気の圧力を変えると、水分子の拡散係数が変わって表面過飽和度の不均一も変わるので雪結晶の形態不安定は空気の圧力にも依存するはずである。数多くの実験の結果、数 Torr 以下(760 Torr=1気圧)の低圧空気中では、高過飽和度の下でも結晶は多面体を保ったまま成長する。別の言葉でいえば、雪結晶の骸晶化は、空気の圧力が約10 Torr以上ないと起こらない。第3図は、 -30°C で成長する角柱氷晶の (0001) 面の不安定限界(底面 (0001) が骸晶化する臨界曲線)を示す。これを見るとわかる様に、結晶の形態不安定(多面体氷晶の骸晶化)は、過飽和度と結晶のサイズの外に空気の圧力に

で核形成した2次元核によるステップの前進速度は、表面過飽和度の小さい結晶の中心へ行くに従って小さくなる。後から生じた2次元核によるステップが、先のステップにおいつくと、ステップの束ね合い(bunching)が生ずる。こうして出来た巨大ステップの前進速度は、ますます遅くなって、結晶表面をおおいつくすことが出来なくなる。その結果、結晶の縁がせり上って骸晶構造(結晶の中心は窪む)が形成される。第1図からわかる様に、1気圧の空气中で成長する角柱氷晶は、最初、 (0001) 面の下面(a)、つづいて上面(b,c)が骸晶化する。骸晶構造は成長と共に増大する(d,e)が、結晶がかなり大きくなる(f)と (0001) 面の下の骸晶構造は小さくなり、それはついに気泡となって結晶内部にとり込まれ結晶は再び多面化する。これらの事実は、雪結晶の形態不安定は結晶サイズに依存していることを示している。また骸晶構造が結晶の成長と共に発達する段階では、結晶の縁がせり上るので、この結晶は、 $[0001]$ 方向にますます成長し、長い角柱結晶になる。この事は、 (0001) 面の骸晶化と $[0001]$ 方向への成長とはお互に関係し合っている事を示している。バルクの過飽和度が低ければ、一般に多面体結晶が成長するが、数%以下の低過飽和度でも多面体結晶が骸晶化する場合がある。最近、ビデオによる雪結晶の表面観察からわかった



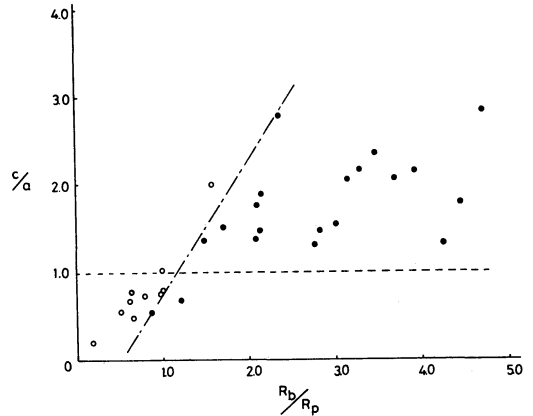
第3図 -30°C , 760 Torr, 250 Torr, 30 Torr
の空气中で成長する角柱氷晶の(0001)
面の不安定限界(骸晶化の臨界曲線)。

も依存している。空気の圧力が低ければ低い程、多面体結晶が成長し易く、逆に空気の圧力が高ければ高い程、骸晶結晶が成長し易い。これらの実験事実は、結晶の形態不安定が、表面成長カイネティックスの外に、水分子の拡散過程に大きく依存している事を示している。第3図で、過飽和度約3%の760 Torrの空气中で成長する氷晶が骸晶構造を持つ結晶サイズの限界は、約25~100 μm である。結晶のサイズが約25~100 μm の時、この成長条件で成長する氷晶は、水分子の拡散場の効果を最も受け易い。そのため、氷晶の(0001)面の縁がせり上って多面体氷晶は骸晶化する。

この時、氷晶は[0001]方向により一層成長して長い角柱結晶になる。

2.3. 結晶のサイズ比と成長速度比依存性

第2図に示した角柱結晶(a)は、水分子の拡散場の効果のみを考えると(0001)面に骸晶構造が出来てもよさそうである。しかしながら結果的には、(10 $\bar{1}$ 0)面上に骸晶構造が形成された(c, d, e)。既に述べた様に、これは、(10 $\bar{1}$ 0)面の角の近くに露頭したらせん転位によって作られたものである。この結晶は、成長段階(a)以後、[0001]方向には成長していない事から推定すると、成長のごく初期段階に(0001)面に露頭したらせん転位が、何らかの理由で成長段階(a)ですでに消滅したものであると思われる。その後、(10 $\bar{1}$ 0)面上に新たに露頭したらせん転位によって[10 $\bar{1}$ 0]方向に成長して晶癖が変化したものである。これらの事実は最近ビデオによる氷晶の表面観察で確認された(図省略)。この実験事実は、雪結晶の形態不安定が結晶のサイズ比 c/a (a, c はそれぞれ氷晶の a 軸, c 軸方向の長さ)以外に成長速度



第4図 -30°C , 760 Torrの空气中で成長する氷晶の(0001)面又は(10 $\bar{1}$ 0)面が、先に不安定になった時の氷晶のサイズ比 c/a と結晶面の成長速度比 R_b/R_p (R_b, R_p はそれぞれ(0001)面, (10 $\bar{1}$ 0)面の成長速度)の関係。○印は(10 $\bar{1}$ 0)面が先に不安定になった結晶、●印は(0001)面が先に不安定になった結晶。

比 R_b/R_p (R_b, R_p はそれぞれ(0001)面, (10 $\bar{1}$ 0)面の成長速度)にも依存している事を示している。第4図は、この事を定量的に示したものである。この図からわかる様に、角柱結晶($c/a > 1.0$)は、初め(0001)面に骸晶が入り易く、角板結晶($c/a < 1.0$)は、初め(10 $\bar{1}$ 0)面に骸晶が入り易い事がわかる。また、結晶の(10 $\bar{1}$ 0)面よりも(0001)面の成長速度が大きくなると、(0001)面が骸晶化し易くなり、逆に(0001)面よりも(10 $\bar{1}$ 0)面の成長速度が大きくなると、(10 $\bar{1}$ 0)面が骸晶化し易くなる事を示している。また氷晶の(0001)面が骸晶化すると、その結晶は[0001]方向へより一層成長し、逆に(10 $\bar{1}$ 0)面が骸晶化すると、その結晶は、[10 $\bar{1}$ 0]方向へより一層成長する。これらの事実は、雪結晶の形態不安定が、晶癖変化と密接に関係している事を示している。

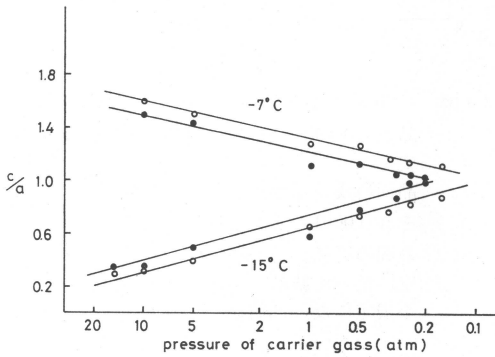
3. 雪結晶の晶癖変化

3.1. 空気の圧力と結晶サイズ依存性

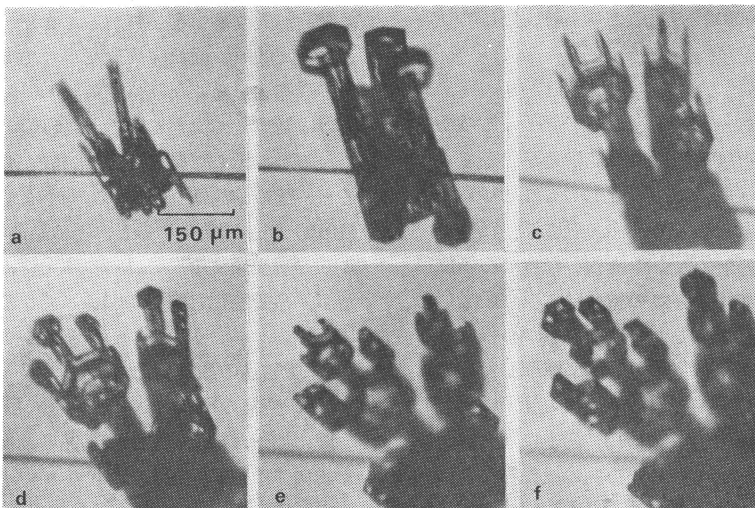
既に述べた様に、最近雪結晶の晶癖変化の温度依存性を説明する理論が黒田・Lacmann (1982); 黒田 (1982)によって提出された。この理論の詳細は黒田氏の解説(1985)を御覧いただきたい。ここでは、雪結晶の成長の律速過程の1つである水分子の拡散効果を中心にして、筆者らの最近の研究(樫田, 1976, 1977, 1980; 樫

田, 難波, 1981; 権田, 小池, 1982 a, 1982 b; 権田, 小池, 1983; 権田, 清, 五味, 1984; 五味, 権田, 1984; 難波, 権田, 1984) の概要を述べる. 気体中の水分子の拡散係数は, 気体の種類と温度を定めると, 気体の圧力に反比例する. 一方気体の熱伝導率は, 筆者らの実験条件の下では一定であるので, 気体の種類と温度を一定に保って気体の圧力を変えると, 水分子の拡散係数のみを変える事が出来る. 第5図は, 高さ約50cmの低温槽内を自由落下した数10 μm の氷晶のサイズ比 c/a の気体

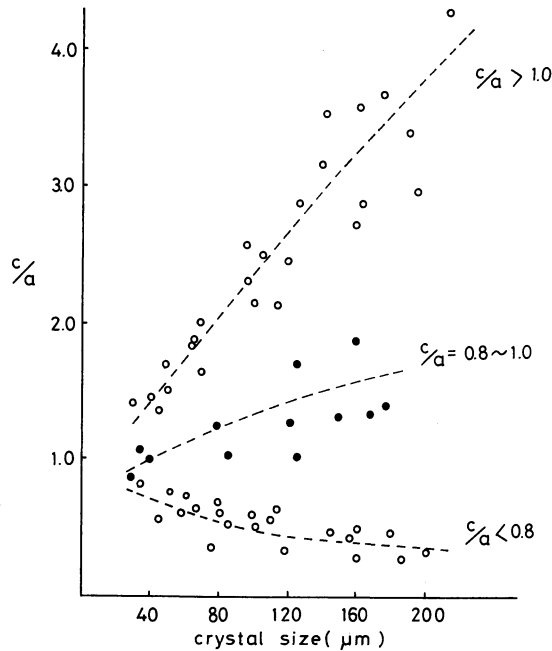
の圧力依存性を示す. これを見るとわかる様に, 結晶のサイズ比 c/a は, 気体の圧力に依存して大きく変化する. すなわち, -7°C の高圧気体中では, $[0001]$ 方向へ優先的に伸びる針状結晶が成長し, また -15°C の高圧気体中では, $[11\bar{2}0]$ 方向へ優先的に伸びる樹枝状結晶が成長する. しかし気体の圧力を下げると, 両温度で成長する結晶は, そのサイズ比が1.0にきわめて近い多面体結晶に変化する. これらの実験事実は, 数10 μm の氷晶の晶癖変化は, 気体の圧力に大きく依存している事を示している. 一方, 第3図からわかる様に, 数10 μm の氷晶の形態はきわめて不安定化(多面体結晶から骸晶結晶, 樹枝状結晶への成長)し易い. それ故, 高圧気体中で成長する氷晶は, 晶癖変化と同時に形態不安定も起こしている. また第3図からわかる様に, 氷晶のサイズが, 約20 μm 以下あるいは数100 μm 以上の氷晶の形態は不安定化しにくい. この大きさの結晶の晶癖は, 気体の圧力の効果も受けにくい事がわかっている(権田, 難波, 1981). 兎毛上に成長する雪結晶について, 同様の効果を調べたものが第6図である. この図からわかる様に, 気体の圧力を1気圧と10気圧の間で交互に変えると, 結晶の晶癖がドラスティックに変わる. すなわち10気圧の気体中(a)では, 長い角柱結晶が成長するが, 気体の圧力を1気圧に下げる(b)と, 長い角柱結晶の先端に角板結晶が成長する. これらの変化は, 気体の圧力を交互に



第5図 -7°C と -15°C , 水飽和の下で成長する氷晶のサイズ比 c/a の気体の圧力変化 (○印: ヘリウム気体中の氷晶, ●印: アルゴン気体中の氷晶)



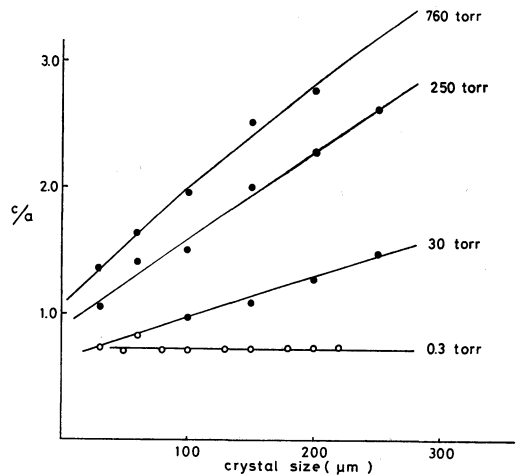
第6図 -14°C , 過飽和度約8%のヘリウム気体中で成長する雪結晶の形態変化の気体の圧力依存性. (a, c, e) 10気圧の気体中, (b, d, f) 1気圧の気体中; (a) 25, (b) 35, (c) 46, (d) 51, (e) 64, (f) 72 min.



第7図 -14°C , 過飽和度 12% の 10 気圧のヘリウム気体中で成長した雪結晶のサイズ比 c/a の結晶サイズ依存性. 図中, c/a の値は約 $30\ \mu\text{m}$ の氷晶の値である.

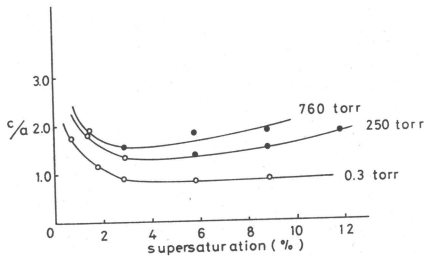
変えると何度でも繰り返される (c, d, e, f). この事は, 高圧気体中では, 雪結晶の成長が主に水分子の拡散過程によって律速されるのに対し, 1 気圧の気体中では, 雪結晶の成長が主に表面成長カインेटックスによって律速されて, その晶癖が温度に依存する事を示している. なお, 10 気圧の気体中で成長する角柱結晶は, 六角板結晶の各角がせり上って出来る針状結晶である. この事実は, 気体の圧力を変えると, 雪結晶は晶癖変化のみではなく, 形態不安定も起こす事を示している. 結晶のサイズが数 $100\ \mu\text{m}$ 以上の雪結晶の場合には, 気体の圧力を変えても第 6 図に示す様な顕著な変化は見られない. これは, 雪結晶の晶癖変化と形態不安定は水分子の拡散過程を通して結晶のサイズに依存しているからである.

雪結晶の晶癖変化が, 水分子の拡散過程に依存している顕著な例として第 7 図を示す. 雪結晶の成長が, 水分子の拡散過程によって律速される様な高圧気体中では, 初期結晶のサイズ比 c/a の値によって, その後の晶癖が決まる. すなわち初期結晶のサイズ比 c/a が 0.8 以下の時には, この結晶は成長と共に薄い樹枝状結晶になり, 初期結晶のサイズ比が 1.0 よりも大きくなると, この結

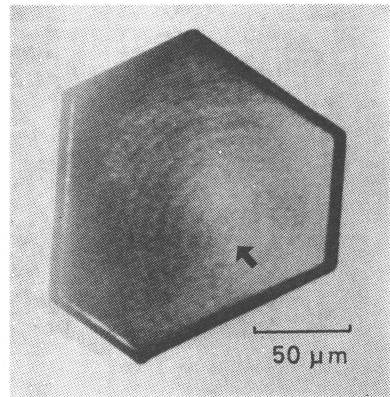


第 8 図 -30°C , 過飽和度 8.8% の 760 Torr, 250 Torr, 30 Torr の空気中で成長する氷晶のサイズ比 c/a の結晶サイズ依存性.

晶は成長と共に長い針状結晶になる. また c/a が $0.8 \sim 1.0$ の時には, この結晶は成長と共にサイズ比が 1.0 に近い角柱結晶になる. これらの実験事実は, 雪結晶の成



第9図 -30°C , 760 Torr, 250 Torr, 0.3 Torr の空气中で成長する $80\ \mu\text{m}$ の氷晶のサイズ比 c/a の過飽和度依存性(○印: 多面体氷晶, ●印: 骸晶氷晶).



第10図 -30°C , 過飽和度 0.4% の 0.3 Torr の空气中で成長した角柱氷晶の (0001) 面上に露頭したらせん転位(矢印)とそれに基づくステップの形成.

長が水分子の拡散過程によって律速される様な環境下におかれると、その晶癖は初期結晶の形によって決まる事を示している。第7図から明らかな様に、雪結晶の晶癖変化は、結晶のサイズに依存している。これは、第8図を見ればより一層明らかである。結晶の成長が、表面成長カイネティックスによって律速される低圧空气中(0.3 Torr)では、雪結晶の晶癖は結晶のサイズには依存しない。しかし、空気の高圧になると、結晶の(0001)面の縁がせり上って骸晶化し、結晶の晶癖も成長と共に変化する。この事は、雪結晶の晶癖は水分子の拡散過程を通して結晶のサイズに依存している事を示している。水分子の拡散場の効果は、気体の圧力が高くなるに従って顕著に現れる。その典型的な例が第7図である。

3.2. 過飽和度依存性

雪結晶の晶癖変化は、温度、空気の高圧、結晶のサイズのみではなく、過飽和度にも依存する。これは、Marshall・Langleben (1954)によって既に予測されていた。これに対して、中谷 (1951, 1954), Mason (1953), Hallett・Mason (1958), Mason・Bryant・Van den Henvel (1963), 小林 (1957, 1961)らは温度説を主張した。しかしながら、最近、筆者らの種々の空気圧中での晶癖変化の研究によって、雪結晶の晶癖は過飽和度にも依存する事がわかってきた(清, 権田, 1984)。第9図は、その結果の一部を示す。低圧空气中(0.3 Torr)で結晶を成長させると、約2%以下の低過飽和度では、長い角柱結晶が成長する。過飽和度が高くなると、結晶のサイズ比 c/a が1.0にきわめて近い角板結晶が成長する。一方空気の高圧を増して250 Torrあるいは760 Torrの空气中で結晶を成長させると、数%以下の低過飽和度では、0.3 Torrの空気中の場合と同じく、長い角柱結晶

が成長する。数%の過飽和度で、結晶のサイズ比 c/a が一旦減少するが、過飽和度の増加と共に再び増加する。同時に、結晶の(0001)面の縁がせり上って骸晶構造が形成される。この様に空気の高圧と過飽和度が増すに従って、角柱結晶が成長し易くなるのは、雪結晶の晶癖が水分子の拡散過程に大きく依存するからである。

3.3. 表面構造依存性

第9図で、空気の高圧の大小にかかわらず約2%以下の低過飽和度で多面体の長い角柱結晶が成長するのは、低過飽和度では、氷晶の(10 $\bar{1}$ 0)面よりも(0001)面上にらせん転位が露頭し易いからである。この事は、ビデオによる最近の氷晶表面のその場観察によってうらづけられた。第10図は、ビデオ画面の一部である。これを見るとわかる様に、角柱氷晶の(0001)面の縁近くにならせん転位が露頭している(矢印)。その中心から、円弧状のステップが連続的に湧き出しているのがわかる。結晶の外形が六角対称でないのは、この結晶の(10 $\bar{1}$ 0)面の一部にもらせん転位が露頭しているためである。雪結晶の成長が表面成長カイネティックスで律速される様な低圧空气中では、過飽和度のあまり大きくない範囲内(約10%以下)で、晶癖変化の過飽和度依存性は、(0001)面と(10 $\bar{1}$ 0)面上のらせん転位の露頭の有無で説明できる(清, 権田, 1984)。この事は、雪結晶の晶癖変化が結晶の表面構造にも依存している事を示している。また既に述べた様に、過飽和度があまり低くない場合、数10 Torr以上の空气中で成長する結晶の縁はせり上り、骸晶構造

が形成される。この時、骸晶構造を持つ面に直角方向により一層成長して、長い角柱結晶または薄い板状結晶が形成される。これらの事実は、分子のオーダーでみたミクロな表面構造と同時に、マクロな表面構造(骸晶構造)も雪結晶の晶癖に影響を及ぼす事を示している。

4. 要約と結論

ごく最近まで雪結晶の形態不安定は、過飽和度のみ依存するといわれて来たが、この外に、結晶のサイズ、空気の圧力、結晶のサイズ比、結晶面の成長速度比にも依存する事がわかった。すでに述べた様に、結晶の形態不安定の駆動力は、結晶の角と中心の間の表面過飽和度の不均一である。結晶の角と中心の間の表面過飽和度の差は、上記の因子が変化すると変化する。したがって、雪結晶の形態不安定は、結晶の表面成長カイネティックス以外に水分子の拡散過程に大きく依存している。一方、雪結晶の晶癖変化は、比較的最近まで温度のみによるといわれて来たが、この外、空気の圧力、結晶のサイズ、過飽和度、結晶の表面構造にも依存する事がわかった。結晶の表面構造が変わると表面成長カイネティックス、つまり結晶の成長機構が変わる。また水蒸気の拡散過程は、空気の圧力、結晶のサイズ、過飽和度などに依存するので、これらの因子が変化すると、水分子の拡散過程が変化する。それ故、雪結晶の晶癖変化は、水分子の表面成長カイネティックスの外に水分子の拡散過程に大きく依存している。

5. 謝辞

昭和59年度日本気象学会賞を受賞するにあたり、筆者が大学院に在学中に雪結晶の成長に関するテーマを与えて下さり、数多くの討論と絶えまない激励を与えて下さった、礪野謙治名古屋大学名誉教授、駒林誠札幌管区気象台長、武田喬男名古屋大学教授に心から感謝致します。また、最近雪結晶の成長に関する研究をするにあたり、多くの有益な討論を頂いた黒田登志雄北海道大学助教授に感謝致します。また筆者の研究室の学生諸君にもいろいろお世話になりました。紙面をかりて感謝の意を表します。

文献

- Chernov, A.A., 1974: Stability of faceted shapes, *J. Crystal Growth*, 24/25, 11-31.
- Frank, F.C., 1982: *Snow Crystals*, *Contemp. Phys.*, 23, 3-22.
- Gonda, T. and M. Komabayasi, 1970: Growth of ice crystals in the atmospheres of helium-argon mixture, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 48, 440-451.
- Gonda, T. and M. Komabayasi, 1971: Skeletal and dendritic structures of ice crystals as a function of thermal conductivity and vapor diffusivity, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 49, 32-42.
- Gonda, T., 1976: The growth of small ice crystals in gases of high and low pressures, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 54, 233-240.
- Gonda, T., 1977: The growth of small ice crystals in gases of high and low pressures at -30 and -44°C , *J. Meteorol. Soc. Japan*, 55, 142-146.
- Gonda, T., 1980: The influence of the diffusion of vapor and heat on the morphology of ice crystals grown from the vapor, *J. Crystal Growth*, 49, 173-181.
- Gonda, T. and J. Namba, 1981: Effect of the diffusion field of water vapor and the crystal size on the morphology of ice crystals grown from the vapor phase, *J. Crystal Growth*, 52, 60-63.
- Gonda, T. and Koike, 1982a: Growth rates and growth forms of ice crystals grown from the vapor phase, *J. Crystal Growth*, 56, 259-264.
- Gonda, T. and T. Koike, 1982b: Morphology of single snow crystals growing in air at low temperature, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Special Issue*, 24, 148-156.
- Gonda, T. and T. Yamazaki 1982: Morphological stability of polyhedral ice crystals grown from the vapor phase, *J. Crystal Growth*, 60, 259-263.
- Gonda, T. and T. Koike, 1983: Growth mechanisms of single ice crystals growing at low temperature and their morphological stability, *J. Crystal Growth*, 65, 36-42.
- Gonda, T., T. Sei and H. Gomi, 1984: Growth forms and growth mechanisms of single snow crystals growing at a low temperature, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Special Issue*, 34, 87-95.
- Gonda, T. and H. Gomi, 1984: Morphological instability of polyhedral ice crystals growing in air at a low temperature, *Annals of Glaciology*, 6 (in press).
- 五味秀樹, 権田武彦, 1984: -30°C で成長する氷晶の晶癖変化と形態不安定性, *日本結晶成長学会誌*, 11, 1, 7.
- Hallett, J. and B.J. Mason, 1958: The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapor, *Proc. Roy. Soc. A.*, 247, 440-453.
- Isono, K., M. Komabayasi and A. Ono, 1957: On

- the habit of ice crystals grown in the atmospheres of hydrogen and carbon dioxide, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **35**, 17-28.
- Isono, K., 1958: Mode of growth of ice crystals in air and other gases, *Nature*, **182**, 1221-1222.
- Isono, K. and K. Iwai, 1969: Growth mode of ice crystals in air at low pressure, *Nature*, **223**, 1149-1150.
- Isono, K. and K. Iwai, 1971: Growth rate and habit of ice crystals in air at low pressure, *J. Meteorol. Soc. Japan, Special Issue*, **49**, 836-844.
- Kobayashi, T., 1957: Experimental researches on the snow-crystal habit and growth by means of a diffusion cloud chamber, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 75 th Anniv. vol., 38-47.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturation, *Phil. Mag.*, **6**, 1363-1370.
- Komabayasi, M., 1970: Shape instability of crystals of ice, carbon dioxide and ammonia grown in a cold chamber, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **48**, 270-286.
- Kuroda, T., T. Irisawa and A. Ookawa, 1977: Growth of polyhedral crystal from solution and its morphological stability, *J. Crystal Growth*, **42**, 41-46.
- Kuroda, T., 1982: Growth kinetics of ice single crystal from the vapour phase and variation of its growth forms, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **60**, 520-534.
- Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetics of ice from vapour phase and its growth forms, *J. Crystal Growth*, **56**, 189-205.
- 黒田登志雄, 1985: 雪結晶の成長機構と形に関する理論的研究, *天気*, **32**, 109-119.
- Marshall, J.S. and M.P. Langleben, 1954: A theory of snow-crystal habit and growth, *J. Met.*, **11**, 104-120.
- Mason, B.J., 1953: The growth of ice crystals in a supercooled water cloud, *Quart. J. Met. Soc.*, **79**, 104-111.
- Mason, B.J., G.W. Bryant and A.P. Van den Heuvel, 1963: The growth habits and surface structure of ice crystals, *Phil. Mag.*, **8**, 505-526.
- Nakaya, U., 1951: The formation of ice crystals, *Compendium Meteor.* (Amer. Meteor. Soc. Boston) 207-220.
- Nakaya, U., 1954: Snow crystals, Harvard Univ. Press., 248-252.
- 難波淳一, 権田武彦, 1984: 高圧ガス中に於ける針状結晶の成長, *日本雪氷学会講演予稿集*, 257.
- 清 忠師, 権田武彦, 1984: 気相から成長する氷の結晶の晶癖変化と成長機構, *日本結晶成長学会誌*, **11**, 1,6.

気象研究ノート151号「気象とカタストロフィー
——気象学における解の多重性——」(1985年2月)

松田佳久・余田成男

目次

- 第1章 序
- 第2章 臨界点の一般論
- 第3章 気象力学における解の多重性
- 第4章 惑星の大気大循環における解の多重性
- 第5章 地球流体力学における解の多重性の問題
- 第6章 気象学における解の多重性の問題
- 第7章 References
- あとがき

配布価格

通常会員 1,500円 定期購読会員 1,200円 団体会員 2,000円 会員外 2,200円