



低温室における降雪実験(1)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2008-05-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 油川, 英明, 島村, 誠, 尾関, 俊浩 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00005323

低温室における降雪実験（1）

油川 英明・島村 誠・尾関 俊浩

北海道教育大学岩見沢校物理学教室

Experiments of Artificial Snowfall in the Low Temperature Laboratory（1）

ABURAKAWA Hideaki, SHIMAMURA Makoto and OZEKI Toshihiro

Department of Physics, Iwamizawa Campus, Hokkaido University of Education
Iwamizawa, 068-8642

Abstract

The experiment by which ice crystals were generated from the supercooled water droplets was done by seeding of the carbon powder in the cloud chamber set up in the low temperature laboratory. As a result, at about -15°C sector and plate type crystals were obtained, and at about -5°C column and sheath type were gotten.

The one in the transitional form made a crystal was seen to ice crystals with freezing water droplets on the slide glass which gathered them. In addition, the form to look for the existence of liquid layer to the joint part of ice crystals or ice crystal and the frozen droplet was seen. It was seen that a liquid layer existed on the surface of the snow crystal, and it grew up directly from its layer. The explanation of the phenomenon of the supersaturation in the making of artificial snow crystals became possible by introducing such a liquid layer.

Moreover, the one different from the habit of the snow crystal which had been said so far was seen by the experiment in these ice crystals and frozen droplets. It was that the plate type and the column type ice crystals coexisted and grew up together. It was showed that the snow crystal habit was not decided only by the temperature.

1. はじめに

雪結晶の人工的な生成に関しては、対流型（中谷，1949）や拡散型（Hallet and Mason, 1958；Kobayashi, 1960），あるいは浮遊型（Takahashi and Fukuta, 1988）などの装置による実験がなされてきている。しかし、このような従来の雪結晶の生成実験においては、天然には余りみられない生成条件のもとで行

われてきている。例えば、人工雪の多くは水飽和を超えた水蒸気の過飽和状態において生成するとされているが、このようなことは、天然の降雪現象においてはほとんど観測され得ないことである (Tazawa and Magono, 1973)。また、この相違を解消するため、天然では水蒸気が過冷却微水滴の雲粒から供給されるとして、過飽和の状態は、その湿潤空気による雪結晶へのベンチレーション効果によりもたらされるという提起がなされてきている (Pruppacher and Klett, 1997)。しかし、この仮説的な効果は必ずしも天然の雪結晶の形態について全体的に満足され得る説明がなされるとは言い難い (油川, 2003)。

従来の人工雪に関する実験に共通していることは、雪結晶が水蒸気からの気相成長によるもの (中谷, 1949) ということを前提としており、このことが雪結晶の形成について、その発生から成長までを天然の現象と合致させて理解することから遠ざけているものと考えられる。このことに関連して、Kumai (1951) は、天然の雪結晶のなかに多数の凝結核を発見し、雪結晶が過冷却微水滴の雲粒から直接的に液相成長する可能性を示唆している。

以上のようなことから、本研究においては、水蒸気の過飽和を条件とはせず、天然の降雪現象を想定し、低温室内において過冷却微水滴を散布することによって氷晶を生成させる (油川, 1981) 実験を行い、その氷晶の発生と成長に伴う現象から、天然に即した雪結晶の成長機構を考察したものである。さらに、本研究は、低温実験室における降雪装置の開発を志向し、将来においては、これにより天然の降雪に関わる諸問題を明らかにしようとするものである。

2. 実験の方法

本研究の降雪実験は、低温室において、過冷却微水滴により人工的に氷晶を生成させることにより行われた。すなわち、図1に示されたような、木製の箱 (以下、雲箱と呼称) に噴霧器で微水滴を散布することにより、人工的に過冷却雲粒の雲を形成させ、事前にシーディングされた物質を核として氷晶を発生させ、それを採取して、氷晶の形態を調べようとするものである。ここで、氷晶とは一般的に雪の初期結晶で、その大きさが0.1mm以下のものとされているが、今回の実験ではそれよりも大きい結晶であっても、それら全てについて氷晶と呼ぶことにする。

実験の手順は以下の通りである。まず、図1に示されたような大きさの雲箱を低温室に設置する。ただし、この大きさは使用する低温室の広さに合わせたもので、箱の寸法には特に意味はない。低温室全体を雲箱としても、あるいは適当な大きさの段ボール箱を利用しても、氷晶の作製を行うことができる。このような雲箱を用いるのは、散布する水滴が余り広く拡散しないようにするためである。この雲箱は、中間の高さの位置、図1では上から80cmの位置となっているが、そこに適当な大きさの小窓を作っておく。これは、後述のような噴霧器により水滴を散布したり、生成した氷晶を採取するために利用される。また、雲箱の天井や側面の一部をガラスなど透明なものにしておけば、そこからの照明により氷晶の生成を目視できる。なお、温度の測定は、今回の実験では雲箱内の上端1箇所に感温部を取り付けて行った。

次に、低温室の温度を実験計画に応じて設定する。今回の実験では、 -20°C と -10°C の温度に設定したが、これらの室温は微水滴の散布により雲箱内の温度を各々、 -15°C や -5°C 近傍まで上昇させることになり、氷晶はそれらの温度で生成されることになる。

低温室が所定の温度に到達したところで、炭素粉末を少量、ガーゼなど適当なものに入れて、それを雲箱の小窓から挿入し、軽くたたきなどにより散布をする。そして、同じ小窓から、今度は噴霧器により水滴を雲箱全体に散布する。噴霧器は、手動のものでもよいが、市販の電動式で塗装用のものが適していた。コンプレッサーによる圧縮空気を利用した噴霧器は、余り形の整った氷晶が得られなかった。これは、圧縮され

て昇温した空気が水滴の温度を高めすぎるからであると考えられる。つまり、氷晶を生成させるために散布される水滴の水は、一定の条件を必要とするわけである。

噴霧器で散布される水は、実験開始の以前に、常温の蒸留水を氷点下でも0℃に近い温度でゆっくりと冷却し、その水面に薄氷ができる程度のものが最も良く、つまり、短時間で、数量も多く、形も大きな氷晶を生成させることができる。これとは異なり、-10℃以下の低い温度で急激に冷却させた水や、0℃以上のかなり高い温度の水は、いくら散布しても氷晶を生成させることはなかった。このことは、冷却された水の分子構造が氷晶の生成に直接的に関与していると考えられ、今後の研究課題として興味が持たれる。

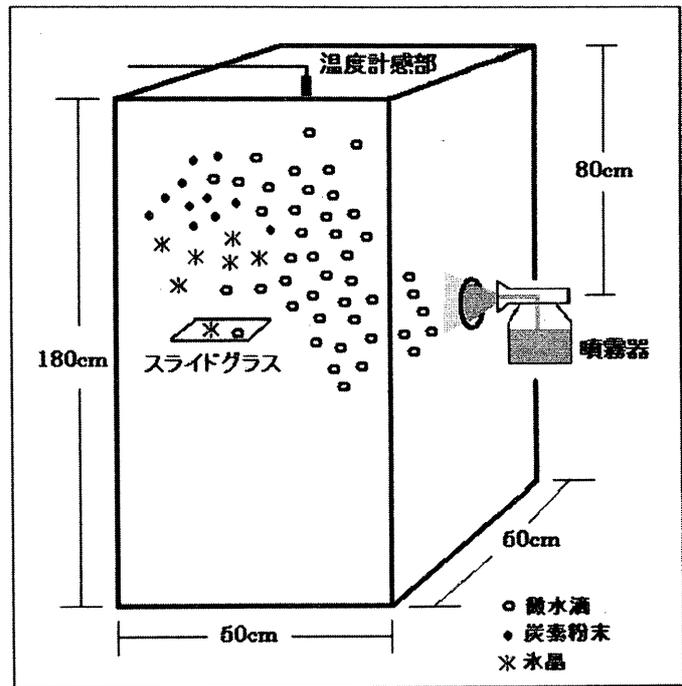


図1 実験装置の概略

散布される微水滴は、その粒径が小さければそれだけ周囲の温度に素早く馴染んで過冷却の状態になる。今回使用した噴霧器は散布する水滴の大きさを調整できるが、その粒径は数十ミクロンから数百ミクロンの値で、天然の雲粒と比較してかなり大きなものとなっている。今回の実験ではこのような水滴の散布によっても氷晶は生成したが、天然の雪結晶の大きさにまでは成長ができなかった。その原因のひとつが、散布する水滴の粒径の大きさにあると考えられ、これが天然の雲粒のような数ミクロンから数十ミクロンのものであれば、それを捕捉することによってさらに大きな結晶へと成長するのではないかと想像される。

微水滴が噴霧されて数十秒後から、雲箱内には無数の氷晶が見られる。これが確認されたなら、雲箱の小窓から、スライドグラスを載せた適当な大きさの台を差し込み、数秒ほど氷晶の採取を行う。これを顕微鏡で観察するわけであるが、氷晶が微小な場合にはすぐに蒸発してしまうので、このようなときはあらかじめスライドグラスの表面に灯油などを薄く塗っておき、その上に氷晶を採取し、素早く他のスライドグラスをそれにかぶせることにより蒸発を防ぐことにした。このようにすれば、小さな氷晶であっても長い時間の顕微鏡観察が可能である。なお、このように採取された氷晶は、図1の雲箱の構造から、最長でも80cmの落下距離により成長したものである。

3. 実験の結果

氷晶の生成は、室温が-20℃及び-10℃の場合について行われた。これらの温度では、各々、板状結晶と柱状結晶の生成が考えられるわけであるが、部分的にはそれとは異なる結晶形態が観察された。以下に、特徴的な観察結果を項目ごとにまとめて述べる。

3-1 温度と結晶形

図2は、本降雪実験において採取された氷晶の一例である。顕微鏡の撮影は暗視野照明法（油川・尾関，2002）により行われたもので、結晶や微水滴だけが白く示されている。結晶の大きさはおおよそ0.2mm

かそれ以下で、結晶の形は六花及び角板状のものがほとんどである。これらの六花や角板において特徴的なことは、成長の当初からそのような形状を示していることで、従来言われてきたような初期結晶を共通にして成長をしたものとは見られない。また、ほとんどの結晶は、形状の差異にかかわらず、その中心部が円形を成していることである。このようなことも、これまで言われてきたような雪結晶が六角形状の初期結晶をもとに成長するという説では、理解が困難である。このことについては後にも述べる。

図2のような結晶が得られた実験の経過を図3に示す。この図に見られるように、 -20°C に設定された雲箱の中に、 0°C に近い温度まで冷却された蒸留水600mlを噴霧器でおおよそ270秒ほどの時間をかけて散布している。そのために、雲箱内の温度は -12°C ほどまで上昇し、その50秒後にスライドグラスで採取した結晶が図2のようなものである。図3においては結晶の採取が微水滴の噴霧後330秒ほどとなっているが、実際には、噴霧後30秒ほどから氷晶の生成が見られる。

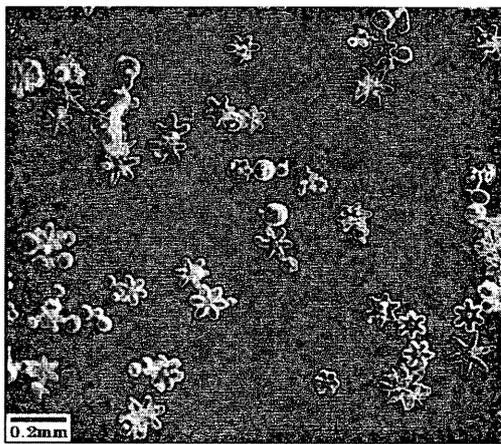


図2 六花などの氷晶

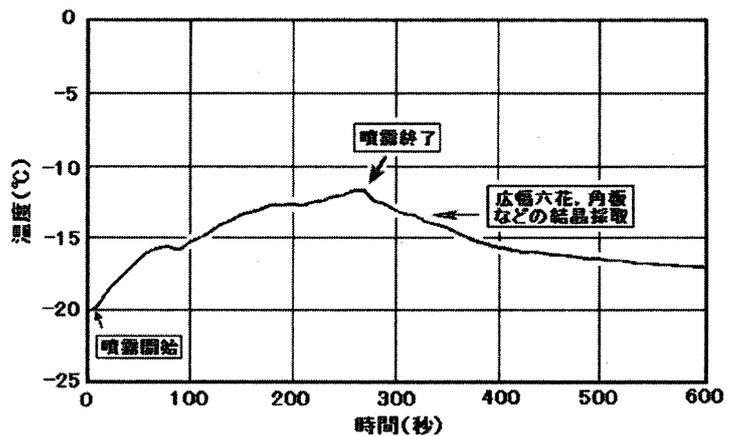


図3 六花などの生成過程

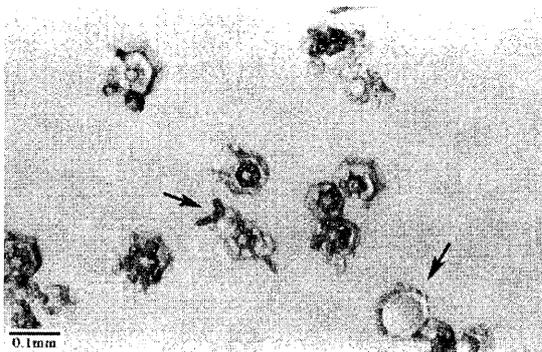


図4 角板などの氷晶

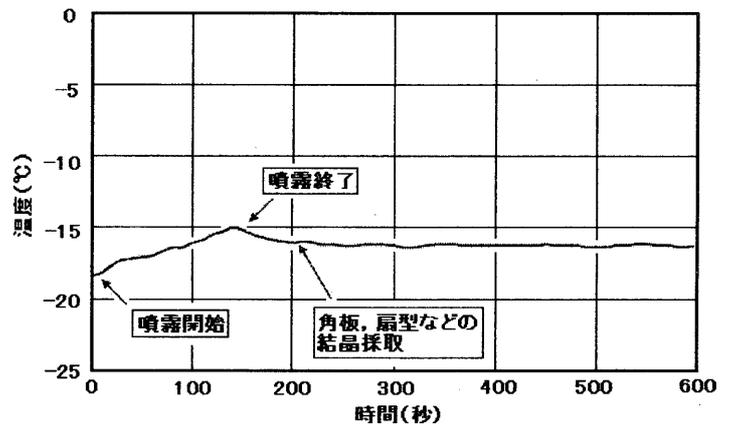


図5 角板などの生成過程

図4は、角板が多く生成された場合の写真で、その経過を図5のグラフに示す。図5では、初めの雲箱の温度が -18°C となっているが、これは、雲箱の底に水蒸気を供給するための水槽を置いたために、 -20°C の室温より温度が上昇しているわけである。水滴の散布によりその温度はさらに上昇して -15°C ほどになっている。結晶はこの温度範囲において生成したことになる。図3の場合と比較して雲箱への水滴の散布量が少なく、温度上昇も小さな値を示している。このような条件においては、主に角板が生成する。ところで、図4の矢印が付されたものは氷晶と異なるもので、その形状から判断して、水滴が凍結・結晶化したものとみなされる。そして、それは一般的な凍結の状態ではなく、明らかに結晶化の過程にあるような形態を示して

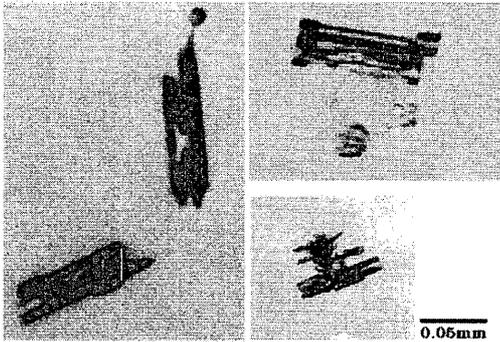


図6 さやなどの柱状結晶

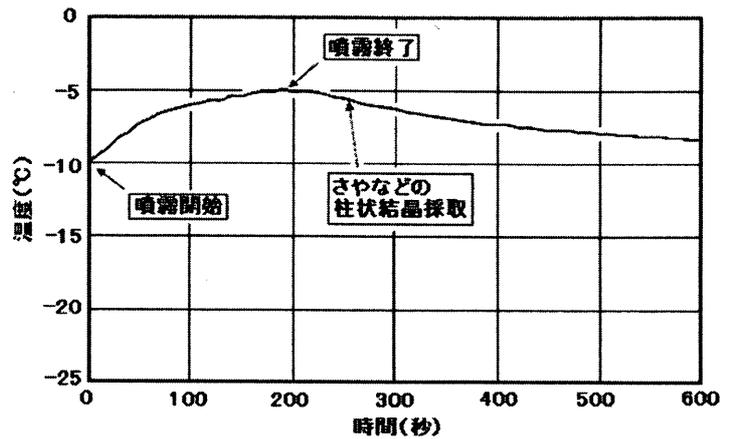


図7 さやなどの生成過程

いる。このことについては後にまた述べる。

図6は、さやなどの柱状結晶を示したもので、それは、図7のような条件により生成したものである。すなわち、図7においては雲箱の初めの温度が -10°C で、水滴の噴霧により -5°C まで温度が上昇している。図6の結晶は、この温度の範囲で生成したもので、さや及び角柱、さらにはその変則的な形態のものが見られる。水滴の散布量は、角板が生成する場合と同じ程度である。

3-2 水滴の凍結と結晶形

今回の実験において、雲箱のなかで過冷却の進行した水滴は、スライドグラスに落下・接触して凍結した場合、前述のように、水滴の形状のまま凍結するというよりも、一部に氷晶の形態を示すように結晶化するようである。その例を図8に示す。これは、先の実験の角板が生成するような条件において得られたものである。なお、これ以後の図は全て同じ条件によるものである。

図8のAは、 0.2mm ほどの水滴がスライドグラス上で凍結し、その端が雪結晶の枝の一部のように成長している。また、Bの凍結水滴も同様で、二個の角板がその縁にあり、あたかも雪結晶の枝のように凍結水滴の外側に向かって成長している。さらに、Cは薄く広がった形態で、上方の先端が 60° の角度を有して凍結・結晶化している。これが、空中に浮遊して凍結した場合、氷晶としての形状で結晶化するのではないかと想像される。なお、このCの凍結は、下端の小角板の接触による影響とみなされる。

図9は、図8と比較して少し小さな水滴が、同じように凍結・結晶化したもので、凍結水滴を中

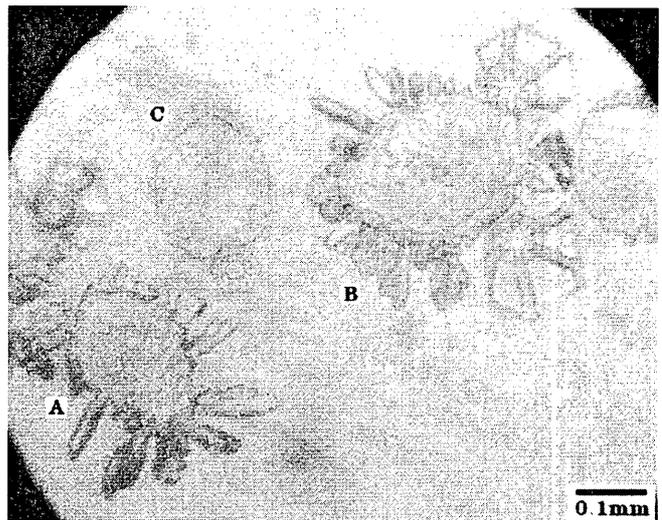


図8 過冷却水滴の凍結結晶化(1)

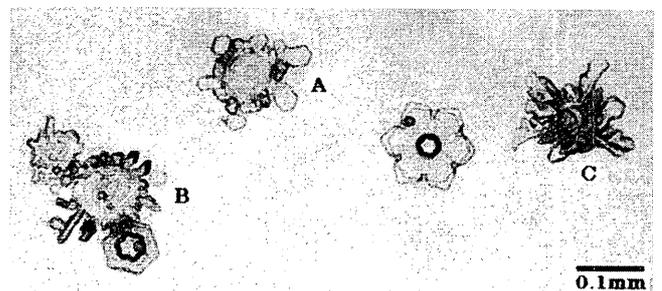


図9 過冷却水滴の凍結結晶化(2)

心として枝の成長が見られる。図のAは、水滴の中心部に歪んだ小円が見られ、その外側には六角形状の変形した文様があり、さらにその外側は広幅の六花が成長している様子がうかがわれる。これに比べて、Bは外形が余り整っていないが、その中心部には小球状の突起が見られる。さらに、Cは凍結水滴というよりも、形態は複雑であるが、独立した雪結晶としての形状を示している。このように、過冷却水滴の凍結・結晶化は、空中で生成した氷晶とは異なり、形状は種々複雑であるが、一般的な凍結氷球と氷晶との中間的な形態を示しているものとみなされる。

ところで、過冷却水滴から生成する結晶には、形態の異なるものが共存したり、対称性の欠けるものが見られる。その例を図10及び図11に示す。

図10は、凍結した水滴の縁から柱状結晶が成長していることを示している（図の矢印部分）。この下部には角板が成長し、あるいはそれに接触している凍結水滴から伸びている枝からも分かるように、雲箱の中は板状結晶の成長条件にあった。このような柱状結晶は、それを成長させる凍結水滴の側に原因があると考えられ、ひとつには、この水滴の大きさに関係があるのではないかと推察される。そして、このような現象から、雪結晶は板状と柱状が併存して成長する可能性が考えられる。一方、図11のAは、厚角板の氷晶をその主軸に対して垂直な方向から見たものであるが、その結晶の底面から上方に枝が伸びている。このような成長は放射状結晶などに見られるものである

が、その成因については明らかでない。この図で見る限りでは、角板とその上の枝は同時に成長していると考えられる。また、この厚角板とともに、Bの結晶もともに二重角板であるが、その上下の角板の厚さには差異があるように見られる。このような厚さに差があるような形態で成長する雪結晶について、従来の水蒸気による気相成長説（中谷，1954；小林，1960など）では、上下の角板に対して水蒸気の供給に違いがあるということになる。しかし、0.1mmに満たない距離において、そのような水蒸気の不均一性と、その状態が相応の成長時間にわたって継続することについては、極めて想定し難いことであると言える。このような結晶の成長は、水蒸気からの気相成長とするよりも、結晶の表面が液膜で覆われていて、それによる液相成長を想定した方が妥当なようである。そのような液膜の存在をうかがわせる現象について、以下に述べる。

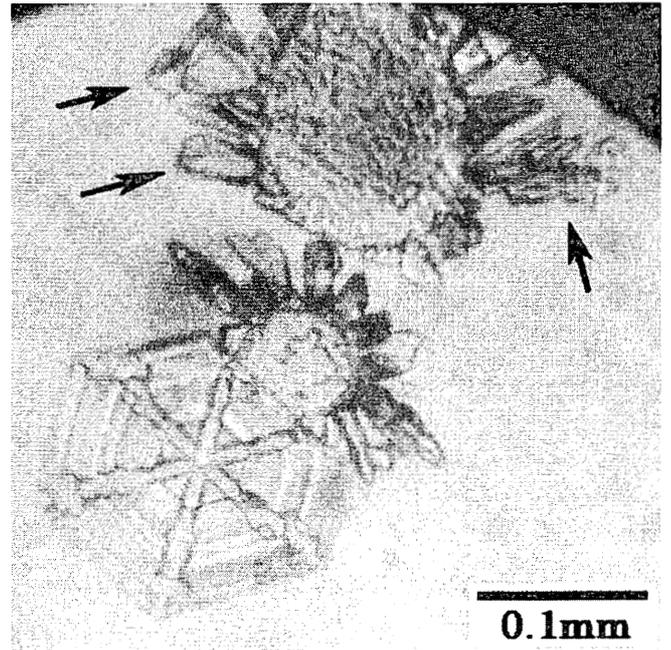


図10 過冷却水滴の凍結結晶化(3)

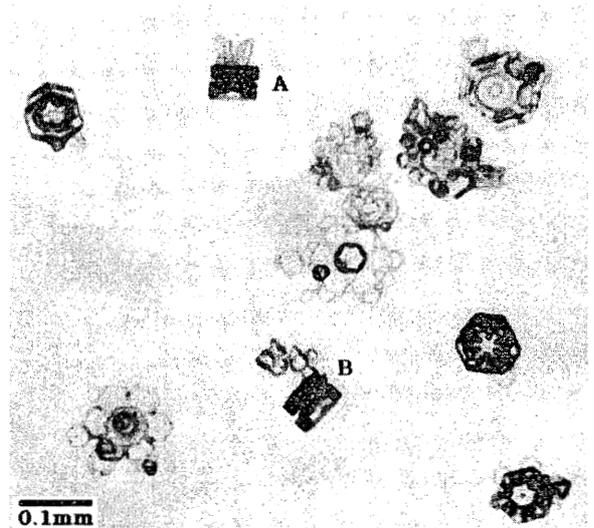


図11 厚角板などの氷晶

3-3 氷晶表面の液膜について

図12は、雲箱の中でスライドガラスの上に採取した角板結晶である。図の矢印を示した部分は角板結晶同士が連結しているところで、その形状から、結晶としての固相による成長というよりも、液相による連結部の成長とみなされる。氷結晶の連結は焼結によっても起こり得る現象であるが、その場合は結晶全体が球形に変態していくことになる。しかし、この図に示された角板の連結部以外の角は結晶形を保持した状態であることから、この連結は一般的な氷結晶の焼結作用によるものではないと判断される。つまり、これら各々の角板状氷晶の表面には水膜が存在し、その一端が接触することによって連結箇所には凹部の窪みが形成された結果、他の箇所よりも表面エネルギーが減少することにより、水膜が窪みに引き寄せられて液層が厚みが増すことにより、その部分の水部分の成長が進行して、連結部の形成がなされたものと推察される。

図13は、このことを一層顕著に示している。すなわち、図のAの結晶において矢印が示された箇所は、その角と凍結水滴との結合を示しており、その形状はブリッジ状に盛り上がり、液相の連結による成長であることが、図12の場合以上に推断できる。このようなブリッジは、Yosida (1939) の過冷却水滴の凍結において見られる現象とほとんど同じである。

なお、図のAの結晶に連結した凍結水滴の中央部分には円形状の凸部が見られ、また、凍結水滴の縁からは板状結晶の枝が成長している。さらに、結晶Bは、外形が角板であることに比して、その中心部が必ずしも整っていない。このような形状は、気相成長からは想定し難く、液相が関与して成長したものとみなされる。また、比較的大きく成長している結晶Cは、結晶Aや他の図の結晶のように、円形文様が見られ、そして、中央の小六角板は下方に位置した角だけが他の角よりも少し伸びた成長を示している。これらの形状は、やはり、液相からの成長とみなされるべきであろう。

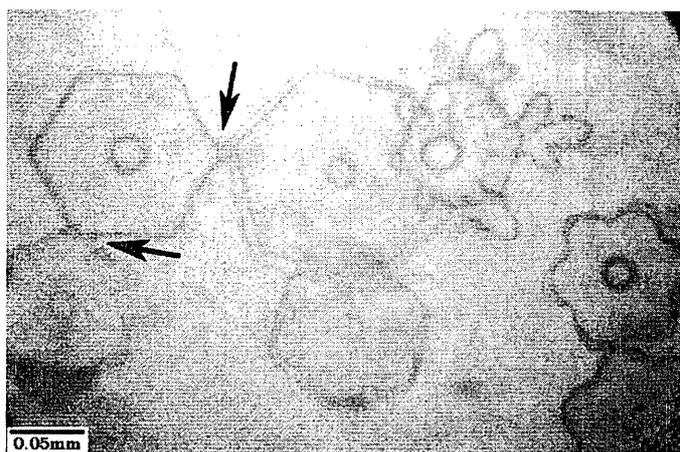


図12 角板同士の結合部分

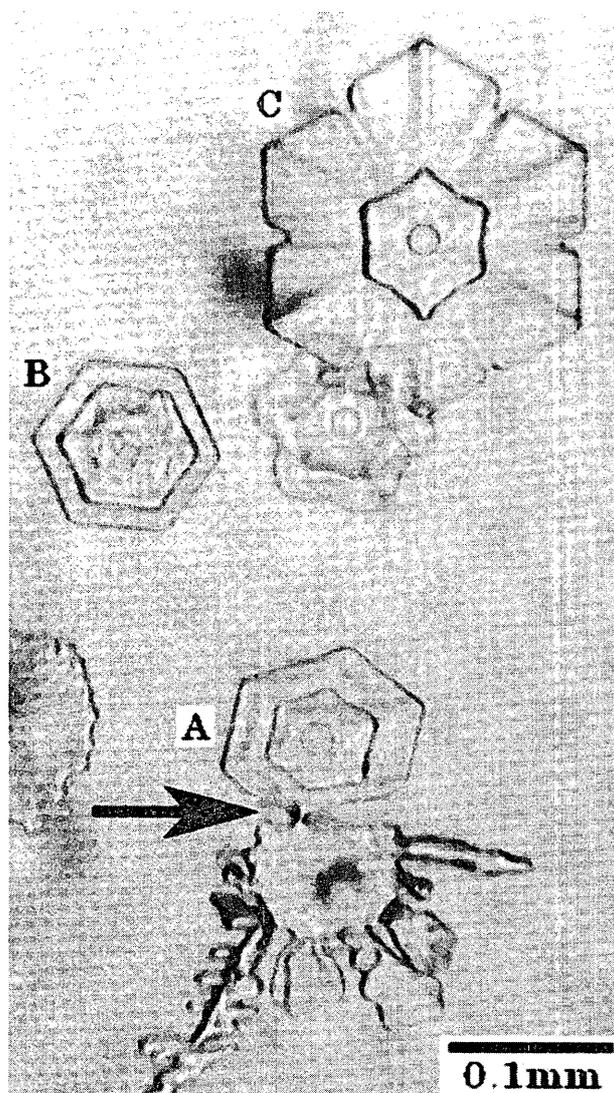


図13 角板と凍結水滴の結合部分

4. 考 察

本実験は、従来の氷晶生成とは異なり、過冷却水滴を雲箱に噴霧することにより、比較的短時間で、0.1 mm以上の結晶を生成させることができた。これに関連して考察した幾つかのことを以下に述べる。

4-1 氷晶を生成させる過冷却水滴と炭素粉末について

人工雪を作製するに際して、従来、その初期結晶の生成にはいろいろと工夫がなされ、氷晶の生成は簡単なものではなかった。すなわち、中谷（1949）は核の役割をする兎毛の装置への入れ方やそれへの水蒸気の供給に細かな注意を払い、小林（1961）は低過飽和における雪結晶の作製において、初期結晶の生成には飽和度を上げるなどの配慮を行っている。また、Takahashi and Fukuta（1988）は、実験槽とは別個の場所で氷晶を作製し、それを浮遊させて結晶成長を行っている。このような初期結晶の生成方法は天然の現象に比して余り一般的とは言えず、雪結晶の実験をより天然に近い状態で行うためには、氷晶の作製がより容易な方法で行われることが望まれる。そして、雪結晶の生成は、このような初期結晶の形成が最も重要であると考えられる。

本実験においては、天然の雪雲を想定し、過冷却微水滴から氷晶の生成を試みたものである。この場合、雲箱に散布する過冷却水滴は、事前に氷点下の温度で冷却された水を噴霧する必要がある。そして、その水は0℃に近い温度で、ゆっくりと冷却されなければならない。また、その水は蒸留水である必要は特になく、水道水などによっても氷晶の生成が得られる。他方、蒸留水であっても、冷却のされない常温のものや、あるいは-10℃以下の低い温度で急激に冷却されたものは、同じように散布しても、氷晶の生成は見られなかった。

また、氷晶を生成させるためには、水滴の噴霧に先だって、雲箱の中に炭素粉末を散布する必要がある。それは市販の活性炭素などで、その散布量は極くわずかでよく、実験の前に室温に充分なじませておいたものを用いる。

このような準備によって得られる氷晶は、0.1~0.3mmほどの大きさであるが、その中心部には円形の文様が多く見られる。例えば、図13に示された氷晶A, B, Cの中心円の直径は皆ほぼ同じ大きさで、20 μ mほどである。このような円形文様が氷晶核による水蒸気の昇華作用によって形成されるとは考え難いので、これが微水滴から生成するものとするれば、この文様は水滴の形状を示していると考えられる。すなわち、氷晶の初期はこのような大きさの過冷却微水滴により生成されると見なされる。他の図に示された氷晶も、その中心部が円形の場合、直径は同じように20 μ m程度である。

ところで、雲箱に水滴を散布するために用いられた噴霧器は、前述のように、このような微小な水滴を多数つくり出すことができないので、これらの微水滴は、水滴の散布により雲箱が水蒸気で満たされることにより（但し、水飽和を超えることはない）、事前に散布された炭素粉末を核として凝結形成されたものではないかと考えられる。一般に炭素は複雑な形状で、その比表面積が大きいことから、水蒸気の凝着が活発に行われるものと考えられ、他の物質に比して凝結核としての能力が高いものと判断される。また、水蒸気の凝結には炭素の帯電効果も作用していると考えられる。

これらのことから、水飽和ないしはそれに近い蒸気圧で、炭素粉末に対して氷点下の温度において水蒸気が迅速に凝結し（温度差を伴わない水蒸気の拡散による）、過冷却微水滴が形成され、その径が20 μ mを臨界として過冷却状態が破れて、微水滴が結晶化すると考えられる。ただし、微水滴の臨界径や過冷却の破れについて、あるいは液相の結晶化については全く新たな提起であり、その内容については今後の研究に委ねたい。

4-2 板状結晶と柱状結晶の共存性について

雪結晶の習性は、従来、温度によって一義的に決められることが、中谷ダイヤグラム(Nakaya, 1954)及びその後の修正されたダイヤグラム(Frank, 1982)によって示されてきた。しかし、図10において示されたように、板状結晶が生成している領域で柱状結晶が成長することは、この一義性に疑問が生じることになる。

図10において、柱状結晶が生成しているのは、0.1mm以上の径の水滴がスライドガラスに接触して凍結した縁の部分である。このような結晶が凍結水滴の縁への水蒸気の昇華作用に因るものであれば、その形は板状となるはずであることから、これらは水蒸気の昇華に因るものではないと考えられる。つまり、このような結晶は、水滴の過冷却状態(つまりは、水の分子構造)に関係し、その凍結に伴う液相からの結晶化ではないかと推察される。また、電場を付加して結晶を生成させた場合、同一の温湿度条件であっても、その極性に応じて成長する結晶が板状であったり柱状であったりするという報告も見られる(油川, 2003)。このように、雪結晶の習性、今の場合は晶癖(小林, 1980)が、従来のような生成条件では温度により一義的に決められるとされてきたが、今回の実験においても、微水滴の過冷却状態が影響していると考えられ、雪結晶の習性は温度だけでは決定されないようである。

4-3 結晶表面の液体層について

従来の人工雪は、過飽和状態の水蒸気から気相成長するものとされてきた。しかし、天然においてはそのような過飽和の状態はほとんどみられない。つまり、雪結晶の生成において、人工の場合と天然とでは明らかに違いがあったわけである。この違いを埋め合わせるための推論として、ベンチレーション効果(Pruppacher and Klett, 1997)が提唱されてきた。しかし、天然の雪結晶がほとんど非対称の形態を有している(油川他, 2003)などのことから、このような推論は余り妥当とは考えられない。

雪結晶の生成に関する人工と天然との違いを埋め合わせるには、その気相成長(中谷, 1949)を前提とすることによっては解決し得ない。本実験において示された、氷晶表面における水膜の存在及びそれによる結晶成長の機構を考えることにより、解決の可能性をうかがうことができる。すなわち、図12及び図13に示されたように、氷晶の表面には相応の水膜が存在する。これが、現象的には氷晶同士あるいは氷晶と微水滴とが固着するようなことが生じる。これはまた、雪片の形成についても有益な論拠を与えるものであると考えられる。雪結晶が水膜により成長するものであるとすれば、天然においては過冷却微水滴の雲粒によりその水分が供給され、また人工雪作製における水飽和を超える水蒸気過飽和については、雪結晶表面の水膜を形成・成長させるためであると考えれば、天然と人工の雪結晶の成長条件のどちらも成立することになる。また、従来の人工雪の成長においては水蒸気により水分が供給されなければならないとされているが、これは水蒸気の供給源と結晶成長域の距離が天然に比して極めて短いという装置の構造的な問題で、緩慢に水分が供給されなければ天然のような過冷却状態の微水滴と同様の現象をつくりだすことができないということからであると考えられる(油川, 2003)。

雪結晶の表面における水膜については、理論的には分子レベルの厚さとしての疑似液体層の存在が議論されてきているが(Kuroda and Lacmann, 1982)、そのなかで、肝要なパラメータについては実験的に決定されるべきであると述べられており、今後、図12などに示されたような氷晶の生成実験から、結晶表面における実際的な水膜の厚さを決定するなどのことがなされ、雪結晶の液相成長について検証される必要がある。

5. おわりに

低温室における雲箱のなかで、炭素粉末のシーディングにより、過冷却微水滴から氷晶を生成する実験を

行った。その結果、 -15°C では六花や角板状の結晶が、また -5°C ではさやなどの柱状結晶が生成した。

氷晶を採取したスライドガラス上には、凍結した水滴とともに、氷晶へ結晶化する過渡的なものもみられた。さらに、氷晶同士あるいは氷晶と凍結水滴との接合部分に水膜の存在をうかがわせる形態がみられた。

このようなことから、雪結晶は過冷却微水滴から直接に結晶化した氷晶をもとに、その結晶表面に水膜を形成して、それにより液相成長することが考えられる。このような水膜の導入により、従来の人工雪作製における過飽和の現象についても説明が可能と考えられる。

実験により生成した氷晶及び凍結水滴の結晶形において、従来言われてきたような雪結晶の習性とは異なり、板状結晶と柱状結晶が共存して成長するという現象が見られ、温度によるその一義性が成り立たない場合がみられた。

本論文は、著者の一人である島村 誠の卒業論文をもとに、関連の実験結果及び考察を付加して作成されたものである。

本実験に関わり、その一部において独立行政法人防災科学研究所新庄支所の低温室の便宜を頂いた。ここに併記して関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 油川英明 (1981) : 雲箱において生成した特異な雪結晶. 低温科学, 物理篇, 40, 155-157
- 油川英明・尾関俊浩 (2002) : 二光源による雪結晶の暗視野顕微鏡写真撮影法. 雪氷, 64, 541-547
- 油川英明 (2003) : 実証の「落し穴」—中谷宇吉郎の人工雪をめぐる—。年報いわみざわ, 第24号, 47-58
- 油川英明・尾関俊浩・丸藤貴弘 (2003) : 雪結晶の対称性について. 北海道教育大学紀要 (自然科学編), 第53巻, 第2号, 17-26
- Frank F. C. (1982) : Snow Crystal. Contemporary Physics, 23, 3-22
- Hallett J. and Mason B. J. (1958) : The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour. Proc. Roy. Soc., 247, 440-453
- Kobayashi T. (1960) : Experimental Researches on the Snow Crystals Habit and Growth Using a Convective-Mixing Chamber. J. Meteor. Soc. Japan, 38, 231-238
- Kobayashi T. (1961) : The growth of snow crystal at low supersaturations. Phil. Mag., 6, 1363-1370
- 小林禎作 (1980) : 六花の美. サイエンス社, pp249
- Kumai M. (1951) : Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei. J. Meteor. 8, 151-156
- Kuroda T. and Lacmann R. (1982) : Growth kinetic of ice from vapour phase and its growth forms. J. Crystal Growth, 56, 189-205
- Nakaya U. (1954) : Snow Crystals—Natural and Artificial. Harvard Univ. Press., pp510
- 中谷宇吉郎 (1949) : 雪の研究. 岩波書店, pp161
- Pruppacher H. R. and Klett J.D. (1997) : Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd edition). Kluwer Academic Publishers, Boston, pp954
- Takahashi T. and Fukuta N. (1988) : Supercooled Cloud Tunnel Studies on the Growth of Snow Crystals between -24 and -20°C . J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 66, No. 6, 841-855
- Tazawa S. and Magono C. (1973) : The Vertical Structure of Snow Clouds as Revealed by "Snow Crystal Sondes", Part I. J. Meteor. Soc. Japan, 51, 168-175
- Yosida Z. (1939) : Window Hoar Crystals on Clean Glass Surface. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. II, 3, 44-55

(油川 英明 岩見沢校教授)

(島村 誠 北海道大学低温科学研究所大学院生)

(尾関 俊浩 岩見沢校助教授)