

低圧における霜の成長に関する実験*

渡 辺 志 伸**

要 旨

低圧大気中で銅面上に成長する氷晶を数例について観察した。その結果を1気圧の場合と比較すると、成長は速く、また厚みのある大きい氷晶となり、またある場合には曲面でおおわれていたり、層状の構造を持つなど、かなり特徴的な性質をもつことが確かめられた。ここではそのうち代表的ないくつかを写真とともに報告する。

1. はじめに

1気圧において氷晶を成長させる実験に比べ、水蒸気の拡散を速くできる低圧下での実験は多くは行われていない。低圧での主な実験の一つとして、小林禎作の実験(1957, 1958, 1967)がある。この実験は、シリンダ内に張った糸に氷晶を成長させる方法を用いた実験であり、雪結晶を生成させるものであった。これに対し今回の実験は、銅面を一方から冷却することにより熱が一方に流れるようにし、氷晶をこの銅面上に成長させ、霜の生成に関する実験とした。こうすることにより、たとえば絹雲が生成する場合のように、氷晶核鉱物の表面の一部に生成し始める初期段階を観察する、あるいは成層圏・中間圏のダスト面に成長する微細な氷晶を観察する実験とみなすことができる。また初期段階の氷晶は、従来電子顕微鏡で観察されているが、強い電子線の影響があるなどの問題があった。この点で本実験は従来の実験を補なうといえる。

また火星に関する最近の研究によると、その極冠と呼ばれる部分は炭酸ガスおよび水蒸気の凍結した霜であるといわれる。(Sharp et al 1971, Hammond 1973)。観測では火星は炭酸ガスを主とする気圧5~10 mbの大気でおおわれ、極冠で気温は -80°C 以下といわれている。本実験はこの火星の霜の基礎研究として、このような諸条件のうちまず気圧を似せてみた。液体チッ素を購入する便がないなどのため温度は、一般の霜の研究の行われている -14°C ~ -21°C とし、地球大気中で水蒸気の霜を成長させた。また火星では霜は火山岩などの表面に

生成すると考えられるが今回は、大部分の実験を冷却の容易な銅面を用いて行い、一例で雲母板を銅面にはり付けて行った。

2. 実験装置

第1図に装置全体の構成図を示す。図中央が本体であり、周囲側面及び下方を発泡スチロールで取り囲み外気と断熱させている。

観察は、図中矢印と Obs. で示すように、本体に組み入れてある銅面を上方から微分干渉顕微鏡を用いて行い、同時に35ミリカメラで撮影する。微分干渉顕微鏡は氷晶のような透明で形のはっきりみえにくい物に対し、その形を観察する場合に有効で、原理的には光源からの光を2本の平行光線に分け、一方を物体の表面で反射させ、これが他方の光と光路差により干渉し明暗ができるのを利用するものである。

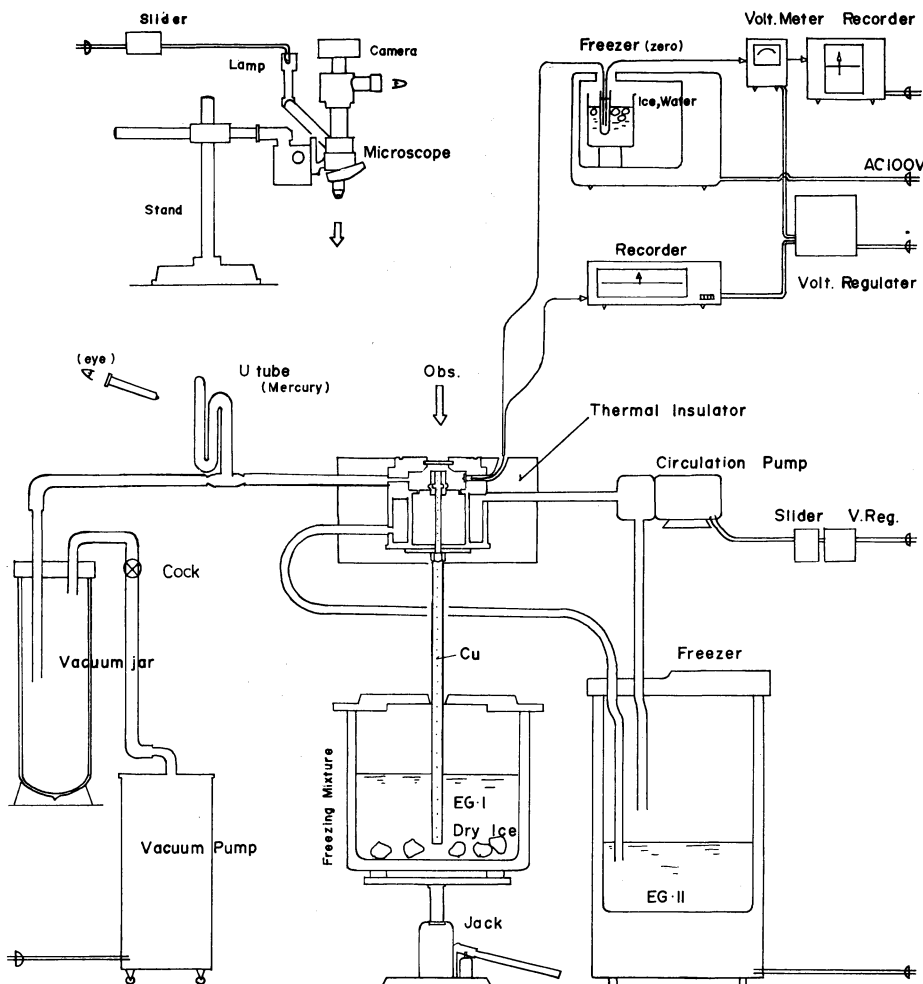
銅面の冷却は下方に長さ30 cmの銅棒を接続し、これを図中 E・G・I と記した液に浸して行う。この液はエチレングリコールに水を加え全量約10 lとして保温槽に入れ、ドライアイスを加えて冷却しクリーム状になった状態で用いる。銅面の温度調節はこの E・G・I をジャッキで上下させ、銅棒の液に沈んでいる部分の長さを変えることで行う。また周囲の壁、すなわち本体の内壁は冷凍庫で冷やした E・G・II と記す液を循環し、銅面との温度差を小さく保ち水蒸気の供給が過大にならないようにする。この液はエチレングリコールに水を加え粘性を小さくしたもので全量約8 lであり、実験中、大部分は冷凍庫内にある。循環パイプは塩化ビニル製で全長約2.5 mあり、周囲を外気と断熱させてある。また循環速度を一定に保つため、循環ポンプの電源には定電圧電源を用いている。

温度の測定には、本体に内蔵され自作検定した二組の

* Experimental Researches on the Growth of Frost at Low Pressure

** S. Watanabe 舞鶴海洋気象台

—1973年6月11日受理—

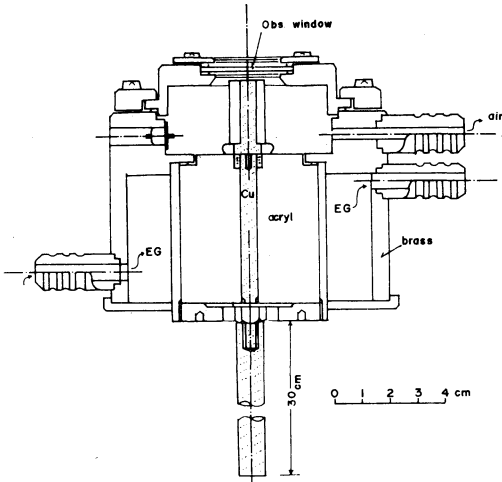


第1図 実験装置全体の構成

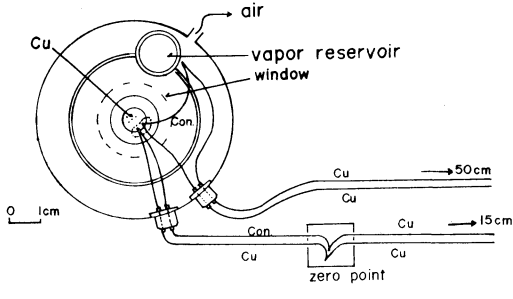
銅・コンスタンタン熱電対を用いる。このうち一組は銅面の温度を電圧計で測り、同時に記録する。このために、水と氷が共存し温度の安定した状態を零点として、銅・コンスタンタンの接点を周囲と絶縁してこの水中に保ち、さらに庫内の気温を -5°C 前後に保った冷凍庫に入れる。もう一組の熱電対は銅面とその周囲の気温との温度差を測り記録する。

気圧は水銀を用いたU字管に示され、これを望遠顕微鏡で読み取る。気密を保ち、空気もれによる気圧上昇を小さくするため後方に真空ガラスジャーを接続し、低圧となる部分の体積を増す。また、ある気圧になった時点で空気ぬぎをやめ、コックを閉じて真空ポンプとのつながりを断つようにする。

第2図は本体の側断面図である。本体は旋盤を用いて製作した。中心棒には銅、側壁部分には黄銅、両者の断熱材としてはアクリルを用いる。中心棒の上端が霜の生成する銅面となり、この周囲をテフロンでおおい大気と断熱する。この銅面の上方に観察窓があり、窓ガラスの下面までの距離は顕微鏡の焦点内に銅面がくるようにしたため 3mm となっている。中心棒とアクリル、アクリルと外側壁、本体と観察窓のすき間はシリコンゴム及びニトリルゴム製 O-リングを用いて気密を保つようにしてある。air と記す空気ぬぎのための継ぎ手はハンダで本体と接続してある。側面左方はハーメチックシールであり、この穴から熱電対を導びき入れ、ハンダで封じることによって気密が保たれる。また、本体内壁を冷却するた



第2図 本体の概略(側断面)



第3図 熱電対の配線と水供給皿を上方より見る。

め側面下方にはエチレングリコールを循環する空洞があり、図中にEGと示す向きに流れる。

第3図には銅面とその周辺を上方からみた場合の略図と、銅・コンスタンタンの配置を示す。中央の銅面上に銅・コンスタンタンの接点をパラフィンで固定する。一組の他の接点は零点に保ち、もう一組の他の接点は水蒸気供給皿の近くに保持する。この水蒸気供給皿には、蒸留水を入れ実験の前に凍らせておき水蒸気を供給する。皿の深さは約3mmであり、銅面から約2cm低い位置にある。空気の減圧はairと記すパイプを通して行う。観察窓から見られる部分は破線で示す内側のみである。

3. 実験

銅面と本体内壁を冷却するためのエチレングリコールはそれぞれあらかじめ別に冷やしておく。実験の手順は次の通りである。まず蒸留水を入れ凍らせておいた水蒸気供給皿を本体内に入れ、観察窓を取り付ける。またシリコンゴムとO-リングにより本体上部の霜の生成する

部分を気密にし、同時に測壁にエチレングリコール液(E・G・II)を循環し本体の冷却を始める。エチレングリコール液(E・G・I)はドライアイスを加えてクリーム状に白濁するまでさらに冷却する。この段階では銅の中心棒はまだ冷却液に浸していないが、0.5~1時間で銅面の温度は、周囲の冷却に引きずられて氷点下になる。このとき中心棒を下方に接続する。一時銅面の温度はこの操作により上昇するが、中心棒をE・G・Iに浸すことで再び下がり、しだいに周囲の温度に接近してゆき、実験開始からおよそ1~1.5時間後に両者の差がなくなる。真空ポンプによって本体の空気を減圧する操作は、おおむね中心棒を接続したのちの温度差が小さくなりつつあるときに行う。予定した気圧になるまでの所要時間は2~4分で、このときコックを締め真空ポンプをとめる。記録計に示される温度差がなくなる前後の数分のうちに、銅面上の不特定の場所に、小さい氷晶が生成する。氷晶が生成したことを確認して以後、温度は銅面が周囲より0~0.5°C低くなるように調節する。またこれより後、銅面の温度は人為的に変動させる場合のほかは-14°C~-21°Cにあり、実験を通しての変動幅は±1°Cを越えていない。気圧は実験を通して、適宜読み取った。氷晶の生成以後、気圧上昇が生じ、特に真空ガラスジャーの近傍で温度上昇が大きいき気圧の上昇が大きく1.5mmHg程度であった。

1回の実験において、5~6時間を経過すると、氷晶が直径6mmの銅面をおおいつくす程の大きさとなり、みかけ上の成長がゆるやかになるので、このときに実験を打ち切った。

4. 実験結果

本実験で得られた氷晶のうち特徴のある形状をしたものを示す。低圧下で成長する氷晶はいずれもその成長が速い。特に生成時の数分は形の変化を伴っており、顕微鏡で追い切れないものもある。また大部分の氷晶は銅面上で大きく広がるとともに上方へも成長し厚みのある大きい氷晶となっている。

形状の特徴的なものとして、

- a. 立方体形をして、明瞭な直線状のエッジを持ち、平面で囲まれたもの
- b. なめらかな曲面でおおわれ、成長途中であるもの。あるいは曲線のエッジを持つもの
- c. 段状構造をもち、成長して三角柱状になるもの、あるいは屋根形になるもの
- d. ピラミッド形となるもの

e. 層状構造をもち、形の不明瞭なものなどが見られた。これらを写真により示す。

画面には銅面上の大きさにして、縦0.64 mm, 横0.96 mmの範囲が写されている。スケールのあるものについても、

10目盛=0.085 mm=85 μ

となっており、画面に写されている範囲はすべて同じ大きさになっている。

写真1, 2, 3は上記a項にあたる氷晶である。この氷晶は生成時に銅面の温度、 -14.8°C 、その後しだいに上昇し1時間後に -14.0°C となり、一方気圧は生成時に13.0 mmHg, 1時間後に13.5 mmHgとやや上昇した実験で成長した氷晶である。

まず写真1は生成時より約7分後のもので数個の立方体形の氷晶が水平にくいちがいがながら連らなっている。エッジは明瞭で、銅面から垂直に立った面がみられ、厚みのあることがわかる。左方にはピラミッド形の氷晶が見える。画面の左下から右上にかけて斜めに走っている同心円状の模様は、旋盤によって製作した際、銅面に付いた削り跡である。

写真2, 3は氷晶の成長を時間的に追っていったもので、写真2は生成時から25分後、写真3は同じ氷晶の60分後のものであり、形を変えずに大きくなり一辺がおおよそ0.5 mmに達する。この氷晶は写真1と違って、立方体形の1個が孤立して成長している。上面の左方はえぐられたように不規則になっている。

写真4の氷晶は生成時から1分後で、急速に大きくなってゆく途中にある。これは温度 -20.0°C 、気圧、4.5 mmHgのとき生成を始めた氷晶であり、曲線のエッジを持っており、b項にあたる。またこのあと不規則ではあるが放射状に成長してゆく。

写真5, 6は同じくb項にあたる氷晶である。写真5は生成時から25分後、写真6は同じ氷晶の30分後のものであり、温度は生成時の、 -19.6°C から30分後に -19.2°C へと、また気圧は2.3 mmHgから3.5 mmHgへとそれぞれ上昇している。写真5の中央右上に見られる突起状結晶が大きくなってゆき、写真6に見られるように氷晶の形が変化した。この写真では下方の銅面の模様が氷晶を通してみえている。

写真7は写真1に似ているがエッジのなす角度が異なっており、区別してc項とした。また銅面に対して斜めに成長している点でも異なっている。画面で三角形の面が白く見えるのは、顕微鏡の光が多く反射しているため

で、この面が水平に近いことを示している。この氷晶は、銅面の温度が -20.0°C から -19.5°C になり、また気圧は4.5 mmHgから6.0 mmHgとなるときに成長してきたものである。この写真は生成時から30分後のものである。

写真7と類似し、c項にあたる氷晶は他にも見られ、それを写真8, 9に示す。写真8は33分後のもの、また写真9は45分後のもので両者ともに温度は -19.5°C 、気圧は6.0 mmHgとなるときに成長したものであるが、それぞれ別々に成長してきた氷晶である。写真8は、はっきり見にくいと思うが、ピラミッド形の氷晶の上面にU字形に溝があり、これと平行して三角形のエッジが連らなっているのが見られた。これらが成長した場合、写真9の氷晶のようになることが考えられるが、この氷晶はエッジがはっきりしており平面に囲まれて三角柱状をしているのがわかる。

写真10, 11ではほぼ水平に近い方向に主軸がくるような成長をした氷晶を示す。写真10の氷晶は、銅面をおおう氷晶から、1個が上方へとび出たように見え、写真11では多数の氷晶が連らなっており、ややわん曲しているのが見られる。これらは、ともに温度、 -19.6°C から -19.0°C へ、気圧、2.3 mmHgから3.5 mmHgへといった上昇中で成長している。時間は約1時間を経過しており、見かけ上の成長は小さい。

写真12は、軸がすこしずつずれながら、その軸方向と思われる縦方向に連らなった氷晶を示す。この氷晶は雲母面を用いて成長させたもので、例が小さいが、大気中の氷晶として、この形状の氷晶は今までに報告されていないので、ここに掲げる。この氷晶は、長く伸びて高次の面に囲まれた氷晶(写真で左上から右下へわたる氷晶)の上面が変形してこのようになっているのである。温度は -19.2°C から -19.6°C へ、気圧は3.6 mmHgから4.0 mmHgへとそれぞれの変動中で、写真は生成時から45分ほどたったときのものである。

写真13はピラミッド形の代表的なものである。この氷晶は成長を始めたころには、曲面が囲まれていたが、しだいに写真のように明瞭なエッジを持ってきた。温度は -18.0°C から -17.0°C へ、気圧は9.3 mmHgから10.0 mmHgへとそれぞれわずかに上昇している。撮影時は生成始めから80分後である。

写真14は層状の構造をもち、e項にあたるものである。温度は -14.8°C から -14.0°C へ、気圧は13.0 mmHgから13.5 mmHgへと上昇している。撮影時

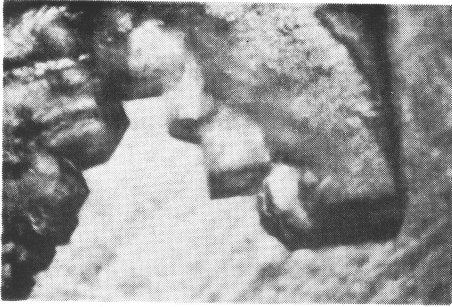


写真1 立方体形をした氷晶, 生成時から7分後, -14°C , 13 mmHg

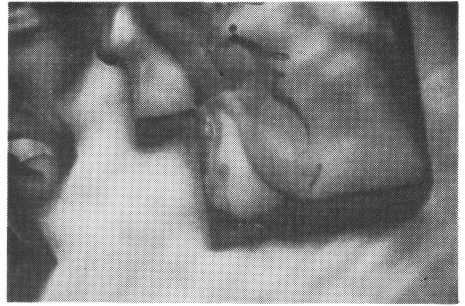


写真2 立方体形の氷晶, 25分後, -14°C , 13 mmHg

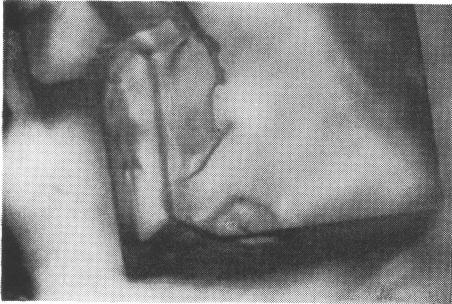


写真3 写真2の氷晶の60分後 (写真2より35分後)

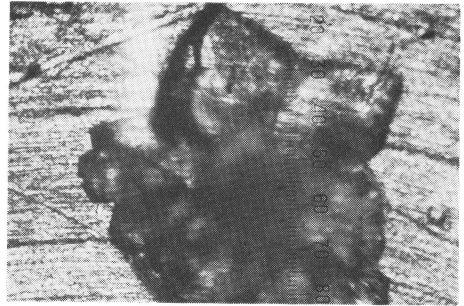


写真4 生成時ころの氷晶, 1分後, -20°C , 4.5 mmHg

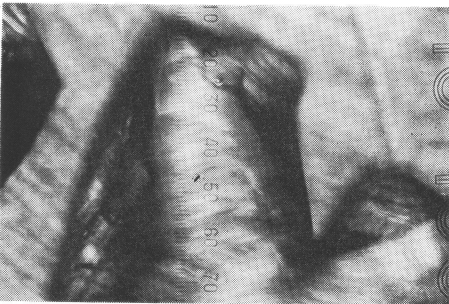


写真5 丸みをもった氷晶, 25分後, -19°C , 3 mmHg

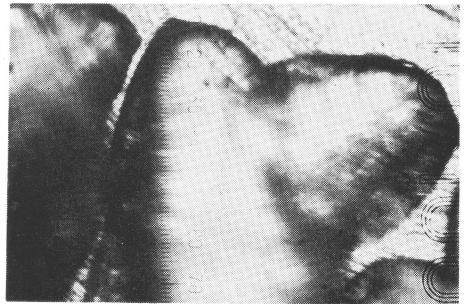


写真6 写真5の氷晶の30分後

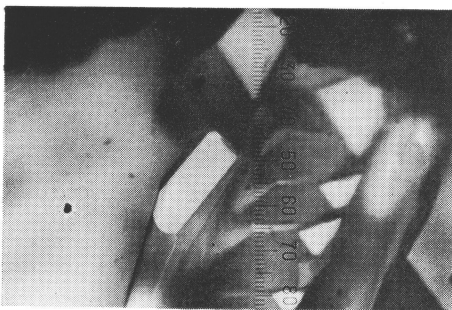


写真7 三角柱状の氷晶, 30分後, -19.5°C , 6 mmHg

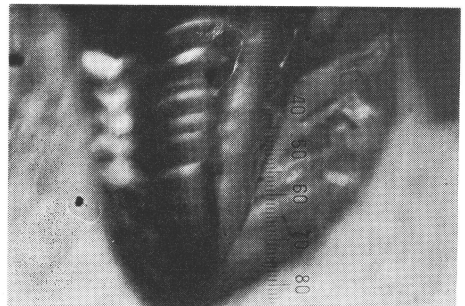


写真8 三角柱状の氷晶, 33分後, -19.5°C , 6 mmHg

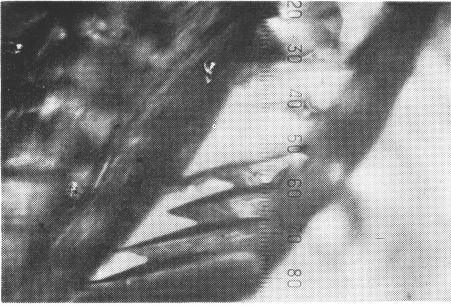


写真9 三角柱状の氷晶, 45分後, -19.5°C , 6 mmHg

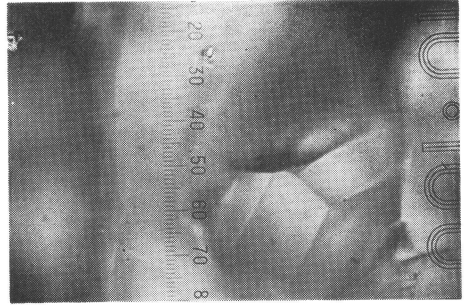


写真10 孤立した三角柱状の柱晶, 約1時間後, -19°C , 3 mmHg

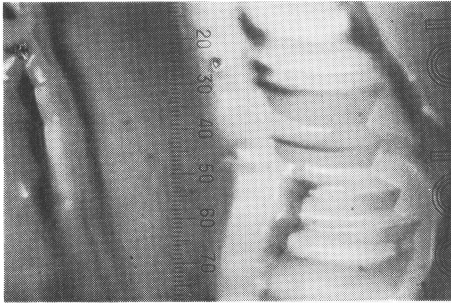


写真11 連らなつた三角柱状の氷晶, 約1時間後, -19°C , 3 mmHg

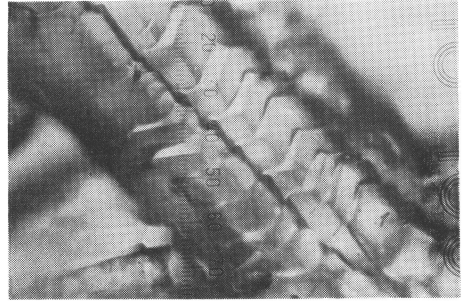


写真12 雲母面での氷晶, 45分後, -19.6°C , 4 mmHg

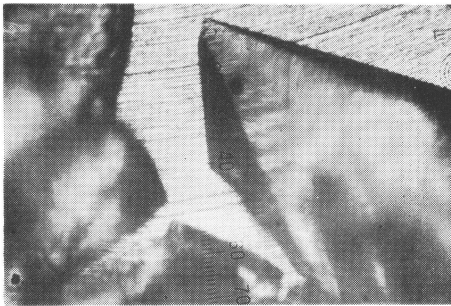


写真13 ピラミッド形の氷晶, 80分後, -17°C , 10 mmHg

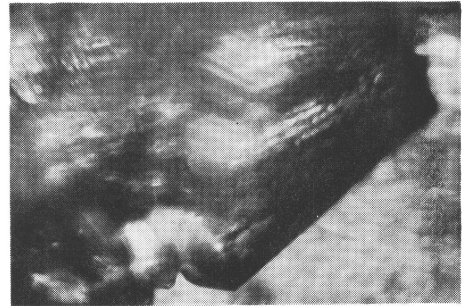


写真14 層状になった氷晶, 50分後, -14°C , 13.5 mmHg

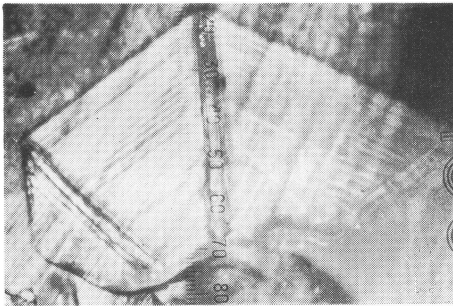


写真15 $1/5$ 気圧での氷晶, 20分後, -19°C , 146 mmHg

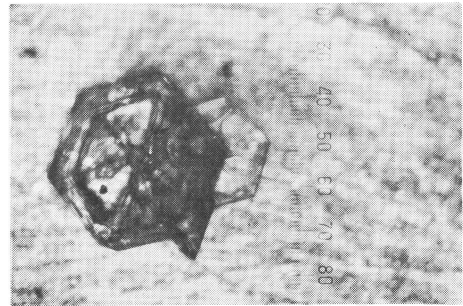


写真16 1気圧での氷晶, 70分後, -19°C , 1気圧

は、生成を始めてから50分後である。

低圧との比較のために1/5気圧、1気圧で成長させた氷晶を示す。まず写真15は -19.5°C から -19.0°C へ、気圧は145 mmHgから146 mmHgといった状況で成長した氷晶である。また写真16は空気ぬきをしないで成長させた氷晶で温度は -19.0°C から -20.5°C へ下がり、再び -19.0°C となっている。いずれの氷晶も扇形六角板で、大きさが異なっているが、この状態からの成長はゆるやかであった。またこの氷晶は雪結晶に近いものである。

低圧では1個の氷晶ができると、その氷晶が大きくなってゆくが、1気圧の場合には1個の氷晶が成長しているときに、銅面上で別の氷晶が成長しており、たとえば六角板と、樹枝状結晶といった二者が成長していることがあり、気圧が高いため水蒸気の供給が低下して、水蒸気圧にむらが生じたためであろう。

5. 考察

i) 生成面の効果

従来氷晶をある面上に生成しようとするとき、その面がメッキなどで鏡面仕上げされていると、核となる氷晶が生成しないといわれており、本実験で写真に見られるような同心円状の細かい溝が銅面に付いていたことは、氷晶の生成を促がしていたと考えられる。また雲母面について、ヘキ開面を出す際に付いた傷がわずかにあったが、本実験の例ではまず表面に過冷却の水滴と思われるものが生じ、これが凍結してのちに氷晶が成長し始めており、従来の考えを支持するといえる。

低圧下において成長する氷晶については、厚みを持っており、ある程度成長が進んだ場合には生成面の種類の違いによる差異はなくなると考えられる。また、三角柱状の氷晶などは下方は銅面でなく別の大きい氷晶であるといった場合が多く、生成面の直接の影響はあらわれないであろう。

ii) 温度の効果

本実験では銅面の温度は -14°C から -21°C の範囲にある。小林禎作(1958)によれば、雪結晶の成長方向は温度によってきまり、本実験の範囲では、主軸と直角な方向に成長する場合に当たり、板状になる性質をもつ。また水蒸気の過飽和度の違いにより二次的な成長がきまり、氷晶形の違いがあらわれるという。本実験で、気圧が高い場合には、雪結晶に類似した、扇形六角板となった。低圧下では、雪結晶とは異なる氷晶形となっている。

温度の変動は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下であり、氷晶形への影響は少なく、層状構造を強化する程度であろうと考えられる。銅面と周囲の温度差は 0.5°C 以下に保っているが、両者相互間のひきずり、銅面温度の変動などにより、多少の変動はさけられない。水蒸気の供給量は、この温度差による蒸気圧差を利用して水蒸気を供給するものであるから、多少の変動があると考えられる。

iii) 気圧の効果

低圧下では1気圧に比較して、急速な成長をし、大きい氷晶となり、またその成長方向が全球面状であり幅とともに厚みをもつ、といえる。気圧の上昇は各実験で不ぞろいであり、生成時から2倍近くになる場合がある。こういった場合、水蒸気の拡散係数は半分になり、水蒸気の供給量は減るとも考えられるが、1/5気圧に見られるような成長の仕方に変わる、ということではなく、各実験に固有な影響があったと考えるほかはない。

6. 残された問題点

本実験は第1段階のため、不備な点、疑問点が残る。まず、銅面とそれ以外の霜の生成面との比較考察をしていないこと、温度範囲が割合限られておりまた銅面と周囲との間に相互のひきずり等があること、実験装置周辺の暖化による不安定な気圧上昇、水蒸気の供給に拡散対流の方法を用いたが、供給量に差があること、霜の生成する大気が実験室のものであり、エアゾル等を考慮していないこと、顕微鏡の光がスポット的にあたることによる影響の有無、など本体・装置に関連する問題点のほか、実験・方法についても、本実験は氷晶の成長を追ったにすぎず定性的であり、氷晶の主軸を決める、あるいは軸比、成長速度、水蒸気の過飽和度といった定量的な測定を行っていない点、また温度・気圧の効果についても不十分ものである。今後、実験装置の改良という問題を含めこういった問題の考察を試みたい。

あとがき

最後に、本実験は気象大学の昭和47年度卒業研究の1つとして行ったものである。本実験の遂行にあたり指導ねがった大学の駒林誠教官、荒井哲男教官(現在横浜地方気象台)、岡田芳隆教官、ならびに本体の製作をお願いした気象測器工場の岡正康氏、伊勢成氏ほかの方々、本体の形状について範をとらせていただいた東京理科大学の権田武彦講師、気密に関し助言願った名古屋大学の石坂隆助手、その他の方々に深く感謝します。

文 献

- 1) Hammond, A. L. 1973: The new Mars;

- Volcanism, water, and a debate over its history, Science, **179**, 463-467.
- 2) Isono, K. and K. Iwai 1969: Growth mode of ice crystals in air at low pressure, Nature, **223**, 1149-1150.
- 3) Isono, K. 1958: Mode of growth of ice crystals in air and other gases, Nature, **182**, 1221-1222.
- 4) Kobayashi, T. 1957: Experimental researches on the snow crystal habit and growth by means of diffusion cloud chamber, 75 th Anniversary Volume of Jour. Meteor. Soc. Japan, 38-47.
- 5) Kobayashi, T. 1958: On the habit of snow crystals artificially produced at low pressure, Jour. Meteor. Soc. Japan, **36**, 193-208.
- 6) Levi, L. and T. Kobayashi 1967: Ice filaments grown in a gradient of vapour pressure, Jour. Meteor. Soc. Japan, **45**, 315-325.
- 7) Sharp, R. P., B. C. Murray, R. B. Leighton, L. A. Soderblom and J. A. Cutts 1971: The surface of Mars; 4 south polar cap, Jour. Geophys. Res., **76**, 357-368.

(以下442頁の続き)

山路自然科学奨学賞	賞牌 副賞 100万円 理・工学	11月30日	山路ふみ子自然科学振興財団 〒102 東京都千代田区 3-5 TEL 03-261-0397
山路自然科学 研究助成金	1件100~200万円 理・工学	学会締切 9月20日 天気本号416頁参照	
秩父宮記念学術賞	賞状, 賞牌 賞金 5万円 山に関する学術的研究 調査	12月25日	日本学術振興会 〒101 東京都千代田区一つ橋 2-1-2 TEL 03-263-1721
藤原賞	賞状, 賞牌 副賞500万円 理・工・農・医学	2月28日	藤原科学財団 〒104 東京都中央区銀座4-7-5 王子ビル TEL 03-561-7736 03-563-1111
朝日学術奨励金	金額制限なし 人文科学・自然科学	2月28日	朝日新聞社
毎日学術奨励金	人文科学・自然科学 総額600万円	5月31日	毎日新聞社事業部「毎日学術奨励金」係 〒100 東京都千代田区一つ橋 1-1-1 TEL 03-212-0321
偕成学術奨励金	人文科学・自然科学 総額300万円	6月30日	偕成会 事務局 〒103 東京都中央区日本橋兜町 2-33 偕成ビル TEL 03-666-2022 5017
松永賞	褒賞 賞金 100万円 3名以内 理学・工学	6月30日	松永記念科学振興財団 〒100 東京都千代田区大手町 1-4 電力中央研究所内 TEL 03-201-6601 7034