



Title	雪の結晶に関する最近の問題
Author(s)	孫野, 長治; MAGONO, Choji
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 29, 33-50
Issue Date	1973-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.29.33
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14027
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p33-50.pdf



雪の結晶に関する最近の問題

孫野長治

北海道大学理学部地球物理学教室
(昭和47年11月30日受理)

Recent Problems on the Study of Snow Crystals

By Choji MAGONO

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo
(Received Nov. 30, 1972)

This paper was written on the base of a review on "The Formation of Snow Crystals" in the International Conference on Cloud Physics, London, 1972.

1. It has been clear that the space concentration of snow crystals in clouds is three or four orders greater than that of ice-forming nuclei expected in the respective air temperature. The effort is now concentrated to clarify the problems about this remarkable difference.

2. It is considered that some traces of ice nucleation type are left on the shape of ice crystals or on the pattern in the center of snow crystals. It is, therefore expected that the type of ice nucleation will be estimated by researching the relation of the ice nucleation type with the shape of ice crystals experimentally.

3. The growth rates of snow crystals are now computed theoretically, and they agree with those of observation within a scattering of one order.

4. The problem that why the crystal habit of snow crystals is intensively influenced by air temperature, is still an important topic, after it was presented by 40 years ago. Cloud physicists in England tried to approach to the problem by considering the migration distance of vapour molecules on ice surface. Even if they succeeded in their law, the problem will not be resolved completely, because the doubt that why the migration distance strongly depends on the air temperature, will be still remained.

5. The occurring frequency of irregular snow crystals is greater than that of regular or classified snow crystals in nature. Intense effort is concentrated to research the formation mechanism of irregular snow crystals, including polycrystalline snow crystals in Japan.

まえがき

1972年のロンドンにおける国際雲物理学会議で雪の結晶に関する評論を依頼されたので、この分野の多くの文献をよむ機会をえた。雲物理学界における日本の比重が相対的に低下してい

る現状にかんがみ、この際若い研究者に現状を知ってもらいたく一文をしたための次第である。

1. 氷晶核数と雪の結晶の数

日本では雲の結晶の初期のものを氷晶とよんでいるが、外国では ice crystal に snow crystal の意味も含めて使っているようである。

一つの氷晶核から一つの雪の結晶が発生するものとすれば、自然氷晶核数に比べて雪の結晶の数がどうも多すぎるようだという感じは相当以前から抱かれていた。しかし地表で測った雪の結晶の数を、雲内の氷晶核数と直接比較して議論するわけにもゆかないので、そのままになっていた。一方では液体（過冷却した微水滴）が固体（氷晶）に相転移するところが面白いのであって、たとえば大気中の氷の微小片が雪の結晶になったところで、気象学的には免も角、物理学的な重要性はないと言う空気でもあった。また自然氷晶核の数が不足していると言う前提にたった人工降雨実験の盛んな頃には、氷晶核は少なくとも雪の結晶は充分あると言う議論は取上げにくかった事情もあろう。

しかし、ここ10年くらいの間に、氷晶または雪の結晶の数が予想される氷晶核数よりも10~1000倍も多いと言う観測結果が多数発表されるに及んでは、この差異は無視できなくなり、またこれを説明しようと言う試みも数多く提出されるようになった。

この問題を早くから取上げてきたのはCSIROのMossopのグループ(1969, 1970, 1970, 1972, 1972)である。彼等は航空機をつかって主として海上の比較的温い雲(-4~-12°C)の中で氷晶の数を測り、その温度で予想される氷晶核数よりも2~3桁多いことを観測した。そうしてこの傾向は対流性の強い雲ほど著しいので、彼等は過冷却した雲粒が雪の結晶に凍着する際に氷晶核の増殖作用があるのではないかと示唆した。

氷晶核数は気温に敏感であり、5°C高ければ1桁減少するので、気温の高いところほど氷晶数と核数の差が開く傾向がある。ロンドンの会議ではMossop(1972)は氷晶の方が3~4桁多いと報告した。

一方Hobbs(1969)の観測によれば、気温が高いほど氷晶の数が多かったので、気温の高い時ほど差が開くと考えた。また笠雲(Auer等1969)でも氷晶の方が1~3桁多いという報告もある。

組織的な観測ではないが、この問題に関する提言は日本の方が早かったかも知れない。Magono *et al.* (1962)は手稲山頂で晴天時でも大気中に予想される核数よりも多数の微小氷片のあることを測定して、雪結晶の破砕片も雪結晶の核になる得ることを示唆し、従来から唱えられている連鎖増殖作用説を支持した。

樋口(1965)は田沢の雪結晶ゾンデの資料の中から針状結晶(-4~-6°Cで成長)をえらび、その温度成長域において予想される氷晶核数よりも2~3桁多いことを指摘した。針状結晶は-4~-6°Cの温度範囲でしか成長しないので、更にその上方の低温層からの氷晶核の降込みを

考慮する必要がないので比較に便利である。また 1968 年のトロントにおける国際雲物理学会議で MAGONO (1968) は、核数に比べて結晶の数が極めて多いことの重要性を指摘した。

一方では氷晶核数測定の Bigg の砂糖溶液法が必しも氷晶核数の真の値を示さないのではないかと言う疑問は、多くの人が早くから抱いていたようであり、この意味であろうか氷晶核数の各種の測定方法の検定も国際的に試みられている。(磯野 (1969), 孫野 (1969, 1971) をみよ) しかし同じ袋のなかに収めた自然大気中の氷晶核数を同時測定しても、方法によって値がひどくばらつき、差異を 1 桁以内に収めるのがやっとのことであった。しかもその中で測定値の高く出るのが Bigg の方法なのであるから、従来の方法を多少手直ししたくらいでは問題がかたづきそうもない。

また自然氷晶でも、対流性の強い厚い雲では氷晶が桁ちがいに多いのであるが、厚さの薄い雲では氷晶核と大体一致するのであるから、誤差の原因を測定器だけに帰するわけにもゆかないのである。

Mossop (1972) は氷晶数が核数より多い機構として次のものが考えられるとした。

1. Slow action nuclei: 天然の核化作用は長い時間をかけて行なわれており、従来 of 測定法では測定時間が早すぎて、核化能力のある核でも測定にひつかからないものが多い。

2. Preactivation: 氷晶核中には、一旦 0°C 以上になると測定器の氷晶函中でも核化能力を恢復しないものがある。

3. 雲中に局所的に非常に過飽和なところがあり、過飽和の度が大きければ氷晶核も多くなる。Bigg の方法で測定する際に、過飽和の与えかたによって測定値が違ってくことは以前から懸念されていたことである。

4. Contact nucleation: 従来は、氷晶核に水蒸気が直接昇華 (deposit) して氷晶に成長する場合と、過冷却水滴にあらかじめ凍結核が含まれているために水滴が凍って氷晶になると言う二つの考えかたが支配的であったが、過冷却水滴に外部から核が付着して凍結すると言う機構 (contact nucleation) が重視されるようになった。

5. より上層の雲、たとえば絹雲からの氷晶の落下。

6. Splinter: 微水滴が凍結時に放出する微小氷片が改めて氷晶核になる。

7. 強い電場が核化能力を増大させる。

8. 上方からの寒冷気塊の降下。

など 12 の機構を列挙したが、その何れも 3~4 桁の差を説明するには不十分とした。

過冷却微水滴が凍結する際のスプリンターは従来からも注目されていたが、最近その重要性が見直されて報告 (CHENG, 1970), (SCHAEFER, 1971), (ROSINSKY, 1972) がぼつぼつ出ており、Bracknell の英国気象台のグループも精力的にこの問題に取り組んでいる。

2. 核化作用と氷晶の形の関係

核化作用によって氷晶の形(または雪の結晶の中心の形)が異なるとすれば、氷晶の形をみて氷晶核の種類が推定できるので、人工降雨実験ばかりではなく気象学的にも非常に有用であろう。そういう意味で天然の雪の結晶の中心の形をみると(孫野・坂本, 1969)板状結晶の中心に小さな円形をもつ樹枝結晶や全然無地の角板などと非常に変化に富んでいる。

SCHAEFER and CHENG (1968) は -20°C に温度をそろえて空気の断熱膨脹、ドライアイス、AgI, Methylchloride, 火山灰, 氷河粘度や電場方法で seeding をおこない、その時に生じた氷晶形と比較した。化学的な不純物の影響は複雑なので除外して主な結果を要約すると、

1. 断熱膨脹法やドライアイスで空気を急冷した場合の氷晶核は無垢の角板になる。
2. AgI のような凍結核の場合は骸晶になる。
3. 火山灰や氷河粘度は、粒子そのものが多結晶のことが多いために、氷晶も立体放射形になる。
4. 強い電場内で seeding した場合には中央に小突起部のある氷晶になる。

2.1 昇華核 (Deposition nuclei) から生成した氷晶

Schaefer 等の実験は上述の目的でおこなわれた最初のものと思われるが、孫野等 (1970, 1971) の追試した経験によれば、膨脹法やドライアイスで急冷した場合に全部が無地の角板型の氷晶になるわけではなく、厚くてころころした多結晶の氷晶も劣らず観測される。これは微水滴の凍結したものであり、無地の六角板は昇華核から出発した氷晶と思われる。

と言うのは、空気の断熱膨脹やドライアイスで空気が -40°C 以下に冷却される過程において、既存の微水滴が自然凍結するほかに、通常低温では核化能力のないエアロゾルの一部が昇華核として働くものと考えられるからである。

火山灰や氷河粘度は粒径が比較的大きいために放射状(したがって多結晶)に成長するという考えかたに対しては、電場内で生成された氷晶と同様に反論するほどの実験的根拠が得られていないので議論は避けたい。

山見・孫野 (1971) は人工的に作った氷の微小破片を氷晶函に seeding して、 $-15\sim-20^{\circ}\text{C}$ の温度範囲では鼓型の氷晶になることを示した。上記の温度では氷の破片の部分が鼓の胴に相当し、その部分の c 軸に直角に、すなわち a 軸方向に枝が成長するのであり、この辺の関係は次に述べる凍結雲粒から発生した鼓型氷晶でも同様である。

2.2 凍結核 (Freezing nuclei) から生成した氷晶

雪の結晶の中心に小さな円形模様をもつものがかなりあり、これは凍結した雲粒の名残ではないかと漫然と考えられていた。このことに本気で取り組んだのは WEICKMANN *et al.* (1970) や AUER 等 (1969, 1970, 1971, 1972) である。彼等は、円形模様を中心にもつ氷晶は詳細に観測すると必ず鼓型であり、また円形模様の直径が鼓の厚さとほぼ一致することから、円形模様をも

つ氷晶は凍結核によって凍った雲粒から出発したものと断定した。山見・孫野 (1971) は、室内実験で、円形の大きさ分布と微水滴の分布の一致することからも AUER 等の結論を確認した。

3. 雪の結晶の成長速度

雪の結晶の成長速度には種々の測りかたがある。質量を問題にするならば NAKAYA (1954, p. 106, 116) のように溶かして球の直径を測ればよいし、また厚さと密度がわかっておれば結晶の直径を測ればよい。

この目的で結晶形や温度について下記のように多くの室内実験がおこなわれた。

また YAMAMOTO *et al.* (1952) や ISONO *et al.* (1956) は人工降雪実験で風下側に距離を変えて氷晶の大きさを測り成長速度の野外測定をおこなった。天然の雪の結晶の成長速度の測定は割合に難しく、観測例も少ない。MAGONO (1961) や MAGONO and LEE (1973) が雲内の各高度における雪の結晶の最大直径の増加から求めたものが報告されているくらいである。

これらの測定値を次に述べる理論からの計算値と比較してみよう。

HOUGHTON (1950) は雪の結晶の成長速度を始めて理論的に計算した。その前提として雲中の大気は水面に対して飽和しており、水蒸気は水飽和と氷飽和の蒸気圧の差によって定常的に氷(雪結晶)の表面に拡散してゆくものとし、下記のように JEFFREYS (1918) の拡散式で計算した。

$$dM/dt = 4\pi kCK_v(\rho_w - \rho_{0w}) \quad (1)$$

ここで M は結晶の質量、 t は時間、 k は空気中の水蒸気の分子拡散係数、 C は結晶の静電容量、 K_v はベンチレーション係数、 ρ_w 、 ρ_{0w} はそれぞれ周囲および結晶表面における水蒸気密度を示す。何れも CGS 単位。

ただし成長中の結晶表面は昇華の潜熱の放出のため近くの気温よりいくらか温くなる分は、試行錯誤方式によって補正した。

MASON (1953) は、昇華の潜熱は大気の熱伝導によって放散されるものとして HOUGHTON の理論式を改良した。

JEFFREYS の水蒸気拡散方程式には成長中の雪の結晶の静電容量が必要である。HOUGHTON や MASON はこれを適当(板状結晶を非常に薄い廻転楕円球、角柱状結晶を非常に細長い廻転楕円球で近似)に見積って計算をすすめたが、McDONAID (1963) は種々の形のモデル板をつかって、同じ半径の球の電気容量と比較することにより実験的に雪の結晶の容量を求めた。しかし結果は HOUGHTON の見積りと大差のないことがわかった。また非常に複雑な板状の樹枝状結晶の容量を、それに外接する円板または六角板で近似した場合の誤差も明かにした。六角板で近似した場合は 10% ほど大きすぎるようである。

雪の結晶形や成長速度は温度によって大きく支配されることは今や常識である (NAKAYA, 1954, p. 239)。したがって温度範囲ごとに成長速度を計算しなければならない。また結晶は実際には落下中に成長するのでベンチレーションも影響する筈である。これらの点まで考慮すれば

莫大な計算量が必要となるが、これは近年の電子計算機の出現によって可能となった。

KOENIG (1970) は、結晶形が気温によって角柱になるか角板になるかを ONO (1969) の観測結果を実験式でおきかえたものを使用し、またベンチレーションに流体力学的な考察を加えてパラメタライズして、後述のように $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ の温度範囲にわたって計算をおこなった。

最近 JAYAWEERA (1971) は更に詳細な計算をおこなったので、彼の計算結果を中心に、これまで得られた実験・観測・計算の結果を図によって比較してみよう。

雪の結晶の成長速度は、空気が定常的に水面に対して飽和しているとしても、気温・結晶形のはかに大きさそのもの(氷晶化後の経過時間)にも左右される。Fig. 1, 2 および Fig. 3 に夫々 50~100 秒後、300 秒後および 900 秒後の成長速度を質量単位で示す。

Fig. 1 で縦軸が成長速度 (g/sec), 横軸が気温、また実線、破線および点線は夫々 KOENIG, JAYAWEERA の計算値および FUKUTA (1969) の実験値を示す。また × 印は MASON (1953) の実験値、□ 印を結んだ二重線は SHAW の実験値を表わす。氏名の下につけてある数字は氷晶化後の経過時間(秒)を表わす。経過時間がそろっていない故もあるが、測定値と計算値は大体 1

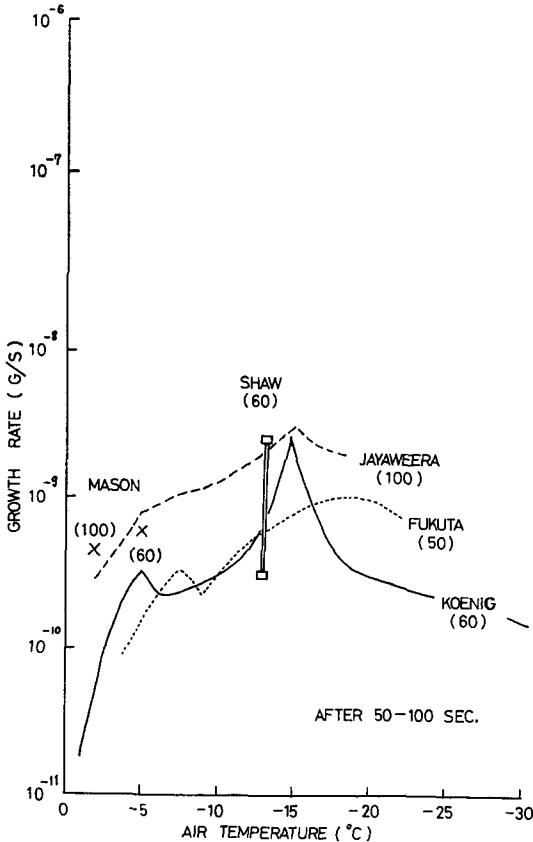


Fig. 1. Comparisons of growth rates of snow crystals in g/s as a function of temperature, 50~100 sec after the nucleation.

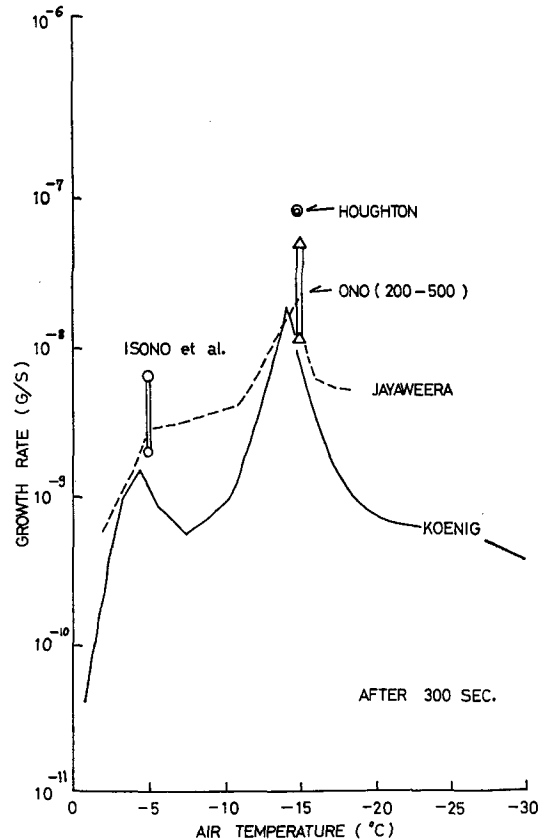


Fig. 2. Comparisons of growth rates of snow crystals in g/s as a function of temperature, 300 sec after the nucleation.

桁以内のばらつきに収まっている。

成長速度が -15°C 付近で最大になることは、この付近で水飽和と氷飽和の蒸気圧差が最大になることから諒解されるが、 $-5\sim-7^{\circ}\text{C}$ 付近（針状結晶の成長域）にもう一つの最大値らしいもののあることに注意されたい。

Fig. 2 は氷晶化後 300 秒における成長速度を示す。○印は HOUGHTON の計算式にしたがって -15°C における値を計算したもので、二つの ○印、△印を連ねた二重線は ISONO *et al.*, (1956) ONO (1970) の観測値の範囲を示す。観測値・計算値とも 50~100 秒後に比べて成長速度が 1 桁くらい増大していることがわかる。また -5°C および -15°C 付近のピークが、より明瞭になってきたこともわかる。

Fig. 3 は 900 秒後の成長速度を示す。●印と ▲印はそれぞれ YAMAMOTO *et al.* (1952) と MAGONO and LEE (1973) の観測値を示すが、前者をのぞけば大体 1 桁くらいばらつきで一致する。 -10°C 付近で最小のあることを両方の計算値とも示しているが、YAMAMOTO *et al.* の観測値はあまりにも小さい。これは観測時に大気が水に対して飽和していなかったためと考えられる。

300 秒後と比較して特に気付くことは、 -5°C 付近のピークが強くなっており、JAYAWEERA の計算値の場合は -15°C 付近の板状結晶の成長速度に匹敵する。

-5°C 付近に成長速度のピークのあることは既に HALLETT (1961) が実験的に発見したことであるが、計算値でピークの表われる点については説明が必要であろう。水蒸気の拡散式 (1) でみられるように、ほかの状態が不変ならば結晶の成長速態はベンチレーション係数 K_v 、静電容量 C および、水飽和と氷飽和の蒸気圧差 ($\rho_w - \rho_{0w}$) に比例する。 $(\rho_w - \rho_{0w})$ は -15°C 付近で最大になるので、 -15°C 付近に成長速度の最大のあることは問題はない。

これまでの理論計算はいずれも、結晶は -5°C 付近で細長い角柱（針状）、 -10°C 付近では短い角柱、 -15°C 付近では薄い角板になるという実験的に知られた結晶習性に基いている。いま同じ質量の結晶を考えると、 -5°C 付近で成長する針状結晶の静電容量は -10°C 付近の短い角

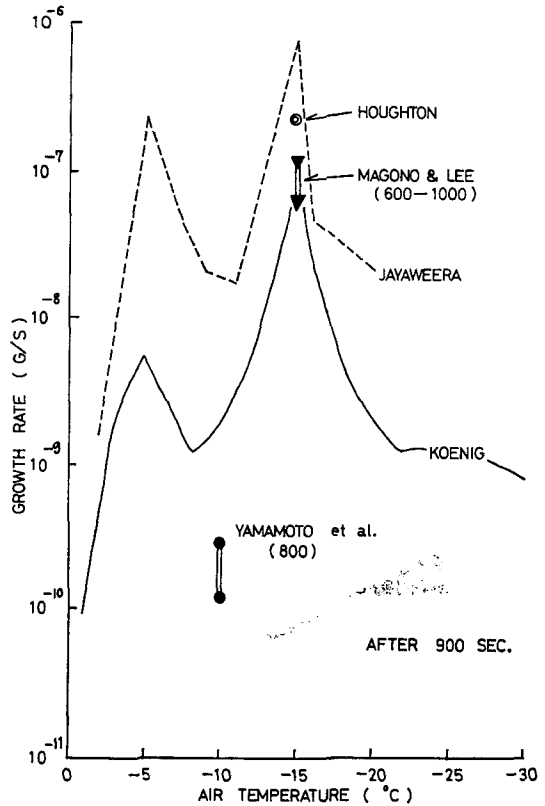


Fig. 3. Comparisons of growth rates of snow crystals in g/s as a function of temperature, 900 sec after the nucleation.

柱のそれに比べて遙に大きいので成長速度も大きくなる。また成長するにしたがい落下速度が増大するのでベンチレーション係数も大きくなる。したがって 300 秒後付近から -5°C のピークが著しくなるのであろう。

このように成長速度の量的な計算は、観測値を 1 桁の誤差の範囲で表現できるようになった。更により一致をめざすためには、気温や湿度も含めて観測値の精度を高める必要がある。

4. 結晶形と温度

NAKAYA (1954, p. 239) が雪の結晶形と温度の関係を実験的に明かにして以来、GOLD and POWER (1954), 村井 (1956), GRUNOW (1959, 1960), MAGONO *et al.* (1959), MAGONO (1962), MAGONO and LEE (1973) は中谷の結果が天然の雪についても成立することを確認し、また実験室では AUFM KAMPE *et al.* (1951), KOBAYASHI (1957, 1961, 1965) や HALLETT and MASON (1958) は人工雪の装置を改良したり、過飽和度を変えたり、温度範囲や気圧範囲を拡大した。その結果、 $-1, 2^{\circ}\text{C}$ 付近で板状結晶に成長し、 -40°C より低温では非常に細長い角柱状に成長することが新たに判明した。しかし -5°C 付近で針状に、 -10°C 付近で短い角柱に、 -15°C 付近で平板状に成長することは更に確認された。

雪の結晶の物性を調べるために空気や水蒸気以外のガス中での結晶習性を調べた実験も多いがここではふれない。

研究者のすべてによって確認されたところの -5°C 付近で針状に成長、 -15°C 付近で平板状に成長するという不思議な実験事実に対して真剣な考察も試みられている。

HALLETT (1961) は一定の過飽和水蒸気のもで、covellite (CuS) の壁開面に昇華によって厚さの様な平板の氷晶を成長させ、その速度を測った。その結果、 -6°C 付近に成長速度 (基底面の拡大速度) の顕著な最大があり、 -2°C 付近に最小のあることを発見した。この現象を彼は次のように説明した。

-6°C 付近に、氷の表面 (基底面) に到達した水蒸気分子の migration distance (氷表面における水蒸気分子の平均移動距離) の最大があり、そうして migration distance が大きければ水蒸気分子は角の部分をのりこえてプリズム面に蒸着するので、結局は見かけの上で基底面の成長 (基底面の面積の拡大) が大きくなる。彼の考えかたは基底面の成長速度の最大を migration distance の最大で置換したのにすぎないが、物性論的な考えかたを始めて導入したものである。

しかし上記の最大のあらわれる温度 (-6°C) は実験事実 (-15°C 付近で平板状の雪の成長速度が最も早い) と一致しない。また HALLETT の測るのは基底面の成長速度であって migration distance そのものを測ったわけではない。

そこで MASON, BRYANT and VAN DEN HEUVEI (1963) は、covellite 表面上で相隣る板状氷晶の間隔がある程度つまってくると急にその方向の成長速度が衰えることに着目し、この間隔

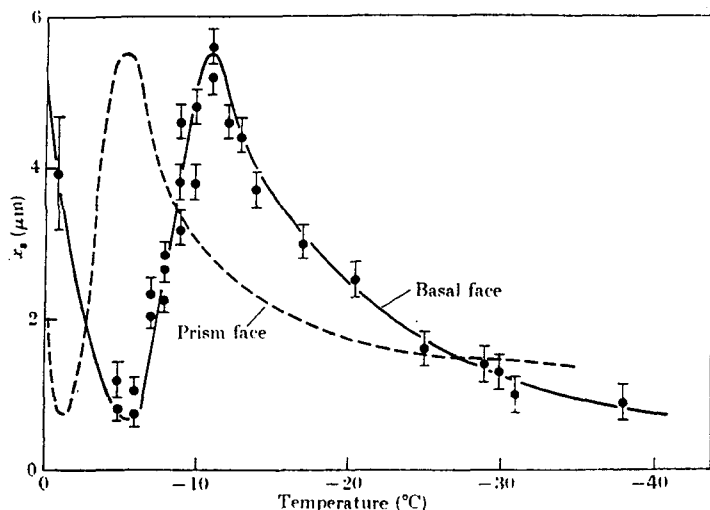


Fig. 4. The mean surface migration distance x_s as a function of temperature (after MASON, BRYANT and VAN DEN HEUVEL).

が migration distance の 2 倍に相当すると考えて、温度との関係を調べたのが Fig. 4 の黒丸実線である。HALLETT の実験値に比べて最大が -12°C に近づき最小が -6°C に近づいた点は人工雪の実験結果に近づいたと云える。

しかしながら、基底面上の migration distance の速度が大きいからといって一概に平板状に結晶が成長するとは限らない。その際プリズム面の成長速度が逆に小さくなっていることが必要である。しかしプリズム面上の migration distance の測定は実験上困難なので測定されていない。そこで MASON 等 (1963) は、プリズム面の migration distance の温度曲線は基底面のものと形は相似であるが、温度の高い方にずれて Fig. 4 の破線のようにになると仮定した。そうすれば -12°C 付近では基底面の migration distance (基底面の成長速度に比例) はプリズム面のそれよりも大きくなるので雪の結晶は板状に成長し、一方 -6°C 付近ではプリズム面の方が大きくなるから結晶は角柱状に成長すると考えれば実験結果の説明に非常に好都合である。

いくら説明に好都合でも大きな仮定を前提としているので依然問題は残されたことになる。後に KOBAYASHI (1965) は MASON 等の測った migration distance の温度曲線が基底面の成長速度の温度曲線と大体一致することを確認した。

これで雪の結晶形の温度依存性を migration distance の形にかえたただけではあるが、一応の説明がついたように見えた。しかし HOBBS and SCOTT (1965) はこの考えかたに異論を唱えた。彼等によれば、基底面の migration distance は必しも基底面の成長速度 (基底面の面積の増大速度) に比例しない。彼等の理論は難しくて十分に理解はできないが、結論として migration distance が大きければ、もし基底面の輪廓が決まっている状態では、基底面は面積は増大せずに厚さが厚くなる、いいかえれば見かけの上でプリズム面が成長することになると主張するので

ある。MASON 等の説明は、step growth の階段と氷晶表面の角とを混同していると言うのである。同じ実験事実に対する解釈がまるで逆になっている。

最近 LAMB and SCOTT (1971) は一定量の過飽和水蒸気のもとで氷晶を成長させ、基底面とプリズム面の双方の linear growth rate (面の鉛直方向の成長速度) を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。これに対し LAMB and HOBBS (1971) は次のように解釈した。図の○印実線で示されるプリズム面の linear growth rate は -13°C 付近で基底面のそれ (Δ 印破線) よりも大きいので氷晶は平板状に成長し、逆に -6°C 付近では基底面の方が大きいので氷晶は細長い角柱状になる。

この問題に関する MASON と HOBBS の論争は前に述べたように同じ事実に基きながら説明は定性的にまる反対なのである。しかしこういう考えかたの相違は、物理学の結晶成長の分野で片のついていることではなかろうか。仮にこの論争に結着がついたにしても migration distance がどのような機構によって温度の影響を敏感に、しかも週期的にうけるかと言う問題は依然として謎である。

駒林 (1971) は別な方面から雪の結晶習性に接近を試みている。たとえば水球から出発して -15°C 、水飽和の下でプリズム面が角柱に基底面が星状に成長するところをコンピューターでシミュレートした。まだ二次元の計算であって完成したとは言えないが期待される行きかたである。

これまで述べてきたように、理論的な考察はいずれも -15°C よりも温い領域にかぎられているが、これより寒い領域では KOBAYASHI (1965) や MAGONO, KIKUCHI and YAMAMI (1971) の実験・観測資料が提出されているくらいのものである。

5. 不規則結晶

雪の結晶は顕微鏡の焦点深度の関係からであろうか、平板状のものだけが注目される傾向があった。NAKAYA (1954, p. 78) は雪の結晶を分類する際に立体的なものも取入れた。しかしこの分類法でも実際に天然の雪の結晶を記述するのに不便を感じる事が多く、MAGONO and LEE (1966) は不規則結晶や雪粒付などを更に細分して計 76 種に分類した。しかし -20°C 以下の低温領域の結晶形については資料不足の感は免れなかった。

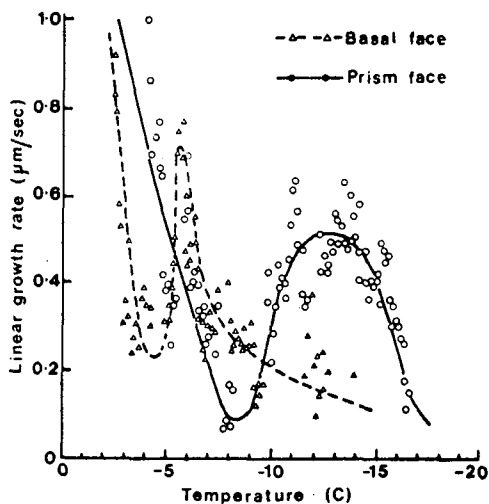


Fig. 5. Experimental measurements of the linear growth rates of the basal and prism faces as a function of temperature (after LAMB and SCOTT).

GRANT (1965) がコロラド州の Climax で雪の結晶を観測してみると、上記の分類法でも大部分が不規則の部類に入ってしまうと言うことであった。これより先 HALLETT (1965) は Yellowstone Natl. Park で細い角柱が非六方晶形型にしかも平行に配列した雪の結晶を報告しており、また KIKUCHI (1969) は南極で多くの非六方晶形型の雪の結晶を観測した。大別すると、一連の平行な細い角柱の配列 (これは単結晶)、平行な角柱の列が対称に配列したもの (これは多結晶)、および側面結晶の週期的に配列したもの (これは多結晶)、および骸晶の一部 (これは単結晶) と見做されるものの 4 種に分類される。後に週期的に配列した多結晶の雪結晶は菊地によって石狩でも発見された。

この種が多結晶型の結晶は霜の結晶でよくみかけるものに酷似しているが、HALLETT や菊地の場合は空から降って来たものであることを確めており、そのつもりで国内の雪結晶の写真集をみると、それらしいものも見付かる。

MAGONO and SASAKI (1970) は人工的に側面結晶を作り、従来の側面結晶と称せられているものに、交叉角板と渦巻面の延長の二種あることを指摘した。後者は単結晶である。

YAMASHITA (1971) は実験的な方法で非六方晶形の雪の結晶の解明を試みた。高さ 15 m の柱状の低温函を利用して氷晶を作り、seeding はドライアイスか液体窒素で冷却した金属棒で行なった。その結果、多数の非六方晶形型の雪結晶を得ることができた。彼はこれらを、2 枝型、内面階段型および三角柱型に分類し、外見は非六方晶形に見えるが、何れも六方晶形の骸晶 (スケルトン) の特別な面だけが発達したものと説明した。また温度に関しては、 -15°C 付近では殆んどが正規の六方晶形に成長するが、 $-2\sim-7^{\circ}$ の温暖領域や $-22\sim-26^{\circ}\text{C}$ の寒冷領域では結晶が非六方晶形型に成長する確率の高いことを発見した。

彼の実験結果から判断すると、前に SCHAEFER and CHENG (1968) が非六方晶形型の氷晶の成長をみて、温度と湿度以外に雪の結晶形を支配する要因があると推定したが、その要因そのものがまた温度の影響を受けるようである。

6. 多結晶型の雪の結晶

多結晶型の雪の結晶は非六方晶形と言う意味で不規則結晶の部に入れてもよいくらいであるが、最近多結晶型の研究が日本で著しいので改めて議論したい。

6.1 立体型が多結晶

NAKAYA (1954, p. 45) は立体樹枝型の雪結晶は、落下中に平板状結晶の基底面に付着した多くの核から樹枝状の枝が立体的に成長したものと推定した。そうして落下中に付着した核と言うのは過冷却して雪粒であろうとわれわれは考えていた。

HALLETT (1964) や BROWNSCOMBE and HALLETT (1967) は上と同じ考えかたで、どちらかと言えば雹の成因に結びつけて、雲粒の粒径、衝突速度および温度をかえて氷面に凍着する雲粒の形や性質を観測した。

これまでの業績のなかで、多結晶型の雪の結晶と言う点で注目されることは HALLETT の次の実験である。彼は、微水滴が角柱の基底面 (0001) に凍着する際に凍結した微水滴の c 軸が、角柱の基底面の a 軸と 30, 60 および 90° の角度をなして基底面上に横わることを観測し、この理由として微水滴の結晶面と基底面との間の格子常数のくいちがひ即ちミスフィットが小さい角度で双方の氷が凍着するもの考えたことである。

HIGUCHI and YOSIDA (1967) は更に組織的な研究をおこなった。低温室内で氷の基底面やプリズム面に凍着した雲粒から立体枝を成長せさせて立体枝と氷面との角度を測定して、30, 60 および 90° 付近に頻度の最大 (後述) のあることを知り、この角度は基底面 (0001) に対して格子のミスフィットの小さい $(1\bar{2}13)$, $(1\bar{2}11)$ および $(1\bar{2}10)$ 面が対応すると考えた。

一方では MAGONO and ABURAKAWA (1968) は立体樹枝状雪結晶と気象条件の関係を調べるために、種々の温度で氷の基底面に過冷却微水滴を凍着させ、両者の軸方向の相異を偏光顕微鏡で観測した。その結果、 -10°C 以下で圧倒的に凍着氷粒と基底面の方向が異なる。即ち多結

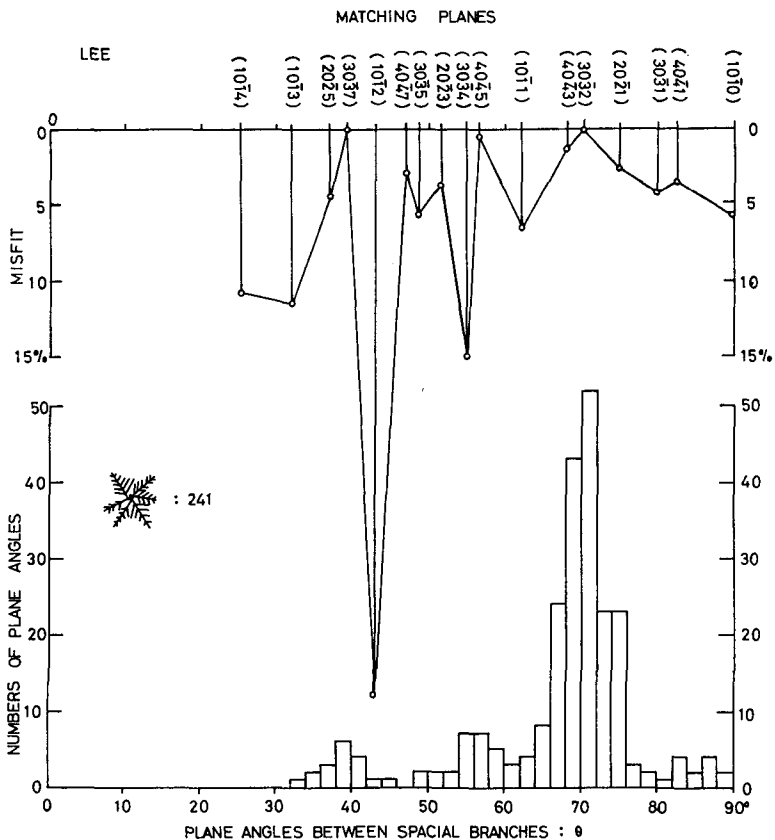


Fig. 6. Distributions of axial angles between the spatial branches of dendritic snow crystals of the radiating type (lower), and the corresponding matching planes (upper) (after LEE).

晶になることを知った. 更に ABURAKAWA and MAGONO (1972) は -10 , -20 および -28°C で氷の基底面に凍着した雲粒から樹枝を立体的に成長させて, 基底面との間の角度の分布を測り, -10°C では最大が 45° 付近, -20 および -28°C では共通して顕著な最大が 78° 付近にあって, 立体樹枝のなす角度は温度の影響も受けるので必しも格子のミスフィットだけでは説明できないことを明かにした.

LEE (1972) は, 天然雪の多結晶型の結晶について枝の間の角度を測定した. 立体樹枝, 放射樹枝や放射型の側面結晶について各面間の角度をユニバーサルステージと写真を併用して精密に測った.

その一例を Fig. 6 に示す. 図の下方の横軸は放射樹枝面相互の間の角度, 縦軸に測定した数を示すが, 39 , 56 および 70.5° にピークがみられ, ことに 70.5° のピークが顕著である. 彼は, 一つの雪の結晶で c 軸を異にする二つの面が交叉する場合にも両者の a 軸が共通なことに基礎をおいてマッチング面 (ミスフィットの最小になるような面) を Fig. 6 の上方のように計算した. 上方の縦軸 (下方に向かって) はミスフィットの大きさを % で示し, 下方の図の最大に対する角度 (横軸) に対応するマッチング面の名前を挙げてある.

一見してわかるように天然の雪の場合でも角度の最大がミスフィットの最小に非常によく対応している. ことに 70.5° に対応するマッチング面 $(30\bar{3}2)$ は (0001) 面に対してミスフィットは 0.1% 以下であり, ほとんど格子間にずれはないと言ってよい.

このように結晶面間のミスフィットが最小になるように, 異なった面が凍着する時に交叉すると主張するマッチング説は, 多結晶型の雪の結晶の枝の方向を説明するのに非常に有効と思われるが, 問題は決して終わったわけではない. 次に二, 三の疑問点をあげよう.

Fig. 7 に, 立体樹枝が基底面とな

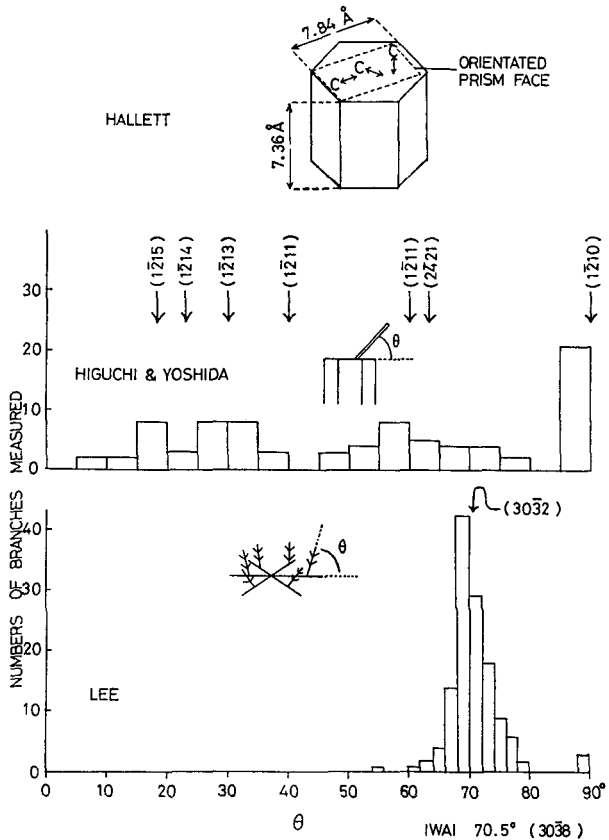


Fig. 7. Comparisons of distributions of axial angles between the basal plane and the prism plane, measured by HALLETT, HIGUCHI and YOSIDA, and LEE.

す角度について HALLETT, HIGUCHI and YOSIDA および LEE の測った角度分布を比較図示してあるが、HALLETT の場合は微水滴の c 軸が基底面に平行し、HIGUCHI and YOSIDA の場合は枝が空間的にのびてその c 軸が基底面とする角度分布の最大は $30, 60$ および 90° 付近にあり、LEE の場合は顕著な最大が 70.5° にあり、これに対応する面は $(30\bar{3}2)$ と考えた。IWAI (1971) は LEE と同じく 70.5° に最大を見出したが彼の場合は対応面を $(30\bar{3}8)$ と考えた。前出の ABURAKAWA and MAGONO の場合の角度分布の最大も多少ずれている。このように観測者によって角度分布の最大値が異なったり、その対応面が異なったりすると、それを土台にした説明は一般にはなかなか受入れられないであろう。

一方では ABURAKAWA and MAGONO が指摘したように、同じ観測者によって実験しても雲粒の凍着温度によって立体樹枝のなす角度分布が大幅に変るようなことがあるとすれば、マッチング説で主張するようなことがあるにしても、これに劣らない他の要因も内蔵されているものと見なければなるまい。

6.2 放射型の多結晶の成因

立体型の雪の結晶は、平板状の雪の結晶に凍着した雲粒を核として立体的に枝が伸びたものと考えられるに反し、放射型の雪の結晶は、核化する時に既に多結晶であったと思われる。多結晶の核の成因として、微水滴の急激な凍結、多結晶の土粒子、多結晶の氷片、微氷球の焼着および氷晶の合体の五つの機構が考えられている。

たとえば NAKAYA の人工雪の写真集 (1954, p. 45) や KIKUCHI (1972) の南極の雪の結晶の写真を見ると、多結晶の微水滴から放射状に枝が伸びたように見えるものが多い。そこで菊地・孫野・石本 (1971) は実験的に -20°C 以下の気温で確に微水滴から放射状雪結晶のできることを示した。

微水滴が急激に凍結する際に多結晶になる傾向の強いことは、これまで HALLETT (1964), MAGONO and ABURAKAWA (1968) の実験結果から予想はされていたが、何れも氷面上で凍らせたり細糸で微水滴を釣して実験したものであり、自由大気中の実験が望まれた。

最近、高橋 (1972) は微水滴を高い低温函内を自由落下させて多結晶に凍る割合を調べ、また PITTER (1972) は低温垂直洞内に浮んだ微水滴の多結晶に凍る割合を、粒径別・温度別に測定した。水滴が大きいほど、また温度が低いほど多結晶に凍る比率の多いことは予想どおりであり、氷面上凍結の場合と大差はなかった。

これらの実験結果を総合すると、雲粒程度の過冷却微水滴がある温度以下で凍結する際に大部分が多結晶になることは確実であり、それを核にして放射状に樹枝が成長することも確かである。そうしてその臨界温度は、天然の放射状樹枝結晶の発生高度から考えて -20°C 付近と思われる。

放射状樹枝の成因としては他に SCHAEFER and CHENG (1968) のように多結晶の土壌粒子、また山見・孫野 (1971) が実験したように多結晶の氷の破砕片も核になり得る。また KUMAI

(1964) や KIKUCHI (1972) は、凍結した微小氷球が3個以上が付着焼鈍した場合にも多結晶の核になる可能性を指摘した。

一方、氷晶が初期に付着しあった場合、たいていは直角に付着するが、これも見かけの上で放射状樹枝の核となる可能性がある。氷晶付着の機構については CHENG (1967) と MAGONO and TAZAWA (1972) は電気的な吸着力を考え、SMITH-JOHANSON (1969) は落下中の流体力学的な吸引力を考えた。

上述のように、放射状樹枝型の雪の結晶は、多結晶の核を中心に成長したものであることは確かであるが、そのうちで最も重要なのは、低温で過冷却した雪粒が急激に凍結して多結晶氷粒となって放射状樹枝の核として働くものであろう。その理由は、この種の雪の結晶はまとまって降ることが多く、その発生高度の温度を調べると殆んどの場合、 -20°C 近くになるからである。

結 言

約40年前、故中谷教授が人工雪の実験によって名種の型の成長の温度条件を決めて以来、大すじの変化はないにしても随分と研究範囲が拡大したものと痛感され、当然のことながら今後さらに飛躍的な進歩をはかるためには、より高度の氷の物理学の知識が入用になってきた。

文 献

- 磯野謙治, 1969. 雲の核の測定に関する国際集會について. 天気, 15, 477-478.
- 菊地勝弘・孫野長治・石本敬志, 1971. 凍結した微水滴を核とした雪結晶について. 日本気象学会1971年度春季大会予稿集, p. 117.
- 駒林 誠, 1971. 氷飽和に近い条件下で成長する雪の結晶の形の計算シュミレーション. 日本気象学会1971年度秋季大会予稿集, p. 58.
- 樋口敬二, 1965. 雪の結晶の数と氷晶核の数の比. 日本気象学会昭和40年秋季大会予稿集, 195-196.
- 高橋忠志, 1972. 凍結微水滴の結晶構造. 日本気象学会1972年度春季大会予稿集, p. 62.
- 孫野長治, 1969. ランスメゾン・トロット. 天気, 15, 479-480.
- 孫野長治, 1971. はげとひげ. 天気, 18, 373-376.
- 孫野長治・遠藤辰雄・三沢 健・山本幸一, 1971. 液体窒素の氷晶化作用について. 日本気象学会1971年度予稿集, p. 115.
- 孫野長治・坂本洋和, 1969. 雪の結晶の中心部の形について. 日本気象学会昭和41年大会予稿集, p. 49.
- 孫野長治・山見信之・坂本洋和, 1970. 氷晶形に及ぼす氷晶核の種類について. 日本気象学会1970年度秋季大会予稿集, p. 122.
- 村井五郎, 1956. 雪の結晶形と上層大気条件の関係について. 低温科学, 物理篇, 15輯, 14-32.
- 山見信之・孫野長治, 1971. 氷片と過冷却水滴による氷晶発生について. 日本気象学会1971年度春季大会予稿集, p. 118.
- ABURAKAWA, H. and C. MAGONO, 1972. Temperature dependency of crystallographic orientation of spatial branches on snow crystals. Jour. Met. Soc. Japan, 50, 166-170.
- AUER, A. H., Jr., 1971. Observation of ice crystal nucleation by droplet freezing in natural clouds. Jour. Atmos. Sci., 28, 285-290.
- AUER, A. H., Jr., 1972. Inferences about ice nucleation from ice crystal observation. Jour.

- Atmos. Sci., 29, 311-317.
- AUER, A. H., Jr. and D. L. VEAL, 1970. The dimension of ice crystals in natural clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 27, 919-926.
- AUER, A. H., Jr., D. L. VEAL and J. C. MARWITZ, 1969. Observation of ice crystal and ice nucleus concentrations in stable cap clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 26, 1342-1343.
- AUFM KAMPE, H. J., H. K. WEICKMANN and J. J. KELLY, 1951. The influence of temperature on the shape of ice crystals growing at water saturation. *Jour. Met.*, 8, 168-174.
- BROWNSCOMBE, J. L. and J. HALLETT, 1967. Experimental and field studies of precipitation particles formed by the freezing of supercooled water. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 93, 455-473.
- CHENG, R. J., 1967. Yellowstone field research expedition VII. Final Rep., Seventh Yellowstone Res. Expedition, Atmos. Sci., Res. Center, St. Univ. New York at Albany, 57-60.
- CHENG, R. J., 1970. Water drop freezing: ejection of microdroplets. *Sci.*, 170, 1395-1396.
- FUKUTA, N., 1969. Experimental studies on the growth of small ice crystals. *Jour. Atmos. Sci.*, 26, 522-531.
- GOLD, L. W. and B. W. POWER, 1954. Dependence of the forms of natural snow crystals on the meteorological conditions. *Jour. Met.*, 11, 35-42.
- GRANT, L. O., 1965. Shapes and concentrations of snow crystals observed at 11,500 ft. MSL near Climax, Colorado. 244 Natl. Meeting, Amer. Met. Soc., Cloud Phys., Reno.
- GRUNOW, J., 1959. Observations and analysis of snow crystals for proving the suitability as aerological sondes, I. Final Rep., U.S. Dept. Army, Contr. No. DA-91-508-EUL-286, 1-65.
- GRUNOW, J., 1960. *ibid.* II, Contr. No. DA-91-591-EUL-1030, 1-80.
- HALLETT, J., 1961. The growth of ice crystals on freshly cleaved covellite surfaces. *Philos. Mag.*, 6, 1073-1087.
- HALLETT, J., 1964. Experimental studies of the crystallization of supercooled water. *Jour. Atmos. Sci.*, 21, 671-682.
- HALLETT, J., 1965. Field and laboratory observations of ice crystal growth from the vapor. *Jour. Atmos. Sci.*, 22, 64-69.
- HALLETT, J. and B. J. MASON, 1958. The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour. *Proc. Roy. Met. Soc. A*, 247, 440-453.
- HIGUCHI, K. and T. YOSIDA, 1967. Crystallographic orientation of frozen deoplets on ice surfaces. *Physics of Snow and Ice, Part 1*, Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., 79-93.
- HOBBS, P. V., 1969. Ice multiplication in clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 26, 315-318.
- HOBBS, P. V. and W. D. SCOTT, 1965. A theoretical study of the variation of ice crystal habits with temperature. *Jour. Geophys. Res.*, 70, 5025-5034.
- HOUGHTON, H. G., 1950. A preliminary quantitative analysis of precipitation mechanisms. *Jour. Met.*, 7, 363-369.
- ISONO, K., M. KOBAYASHI, Y. YAMANAKA and H. FUJITA, 1956. An experimental investigation of the growth of ice crystals in a supercooled fog. *Jour. Met. Soc. Japan, Ser. II*, 34, 34-39.
- IWAI, K., 1971. Notes on snow crystals of spatial type. *Jour. Met. Soc. Japan*, 49, 516-520.
- JAYAWEERA, K. O. L. F., 1971. Calculations of ice crystal growth. *Jour. Atmos. Sci.*, 28, 728-736.
- JEFFREYS, H., 1918. Some problems of evaporation. *Philos. Mag.*, 35, 270-280.
- KIKUCHI, K., 1969. Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, 22, 99-116.
- KIKUCHI, K., 1972. Sintering phenomenon of frozen cloud particles observed at Syowa Station, Antarctica. *Jour. Met. Soc. Japan*, 50, 131-135.
- Kobayashi, T., 1957. Experimental researches on the snow crystal habit and growth by means

- of a diffusion cloud chamber. *Jour. Met. Soc. Japan*, 75th Anniv. Vol., 38-47.
- KOBAYASHI, T., 1961. The growth of snow crystals at low supersaturations. *Philos. Mag.*, 6, 1363-1370.
- KOBAYASHI, T., 1965. On the variation of ice crystal habit with temperature. Part I, Physics of Snow and Ice, *Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ.*, 1, 95-104.
- KOBAYASHI, T., 1965. Vapour growth of ice crystal between -40 and -90°C . *Jour. Met. Soc. Japan*, Ser. II, 43, 359-367.
- KOENIG, I. R., 1970. Numerical modelling of ice deposition. *Jour. Atmos. Sci.*, 28, 226-237.
- KUMAI, M., 1964. A study of ice fog and ice-fog nuclei at Fairbanks, Alaska, Part I, CRREL Res. Rep. 150, 1-24.
- LAMB, D. and P. V. HOBBS, 1971. Growth rates and habits of ice crystals grown from the vapor phase. *Jour. Atmos. Sci.*, 28, 1506-1509.
- LAMB, D. and W. D. SCOTT, 1971. Linear growth rates of ice crystals grown from the vapor phase. *Jour. Cryst. Growth*, 12, 21-31.
- LEE, C. W., 1972. On the crystallographic orientation of spatial branches of natural polycrystalline snow crystals. *Jour. Met. Soc. Japan*, 50, 171-180.
- MCDONALD, L. E., 1963. Use of electrostatic analogy in studies of ice crystal growth. *Zeit. Angew. Math. Phys.*, 14, 610-619.
- MAGONO, C., 1962. On the growth of natural snow crystals. Abstract Internatl. Conf. Cloud Phys., Australia, Pap. 5, 2.
- MAGONO, C., 1962. The temperature conditions for the growth of natural and artificial snow crystals. *Jour. Met. Soc. Japan*, Ser. II, 40, 185-192.
- MAGONO, C., 1968. Problems on physical understanding of snow fall phenomena. Proc. Internatl. Conf. Cloud Phys., Toronto, 243-248.
- MAGONO, C. and ABURAKAWA, 1968. Experimental studies on snow crystals of plane type with spatial branches. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 85-97.
- MAGONO, C., K. HIGUCHI, K. ORIKASA, T. TAKAHASHI, K. KIKUCHI, T. NAKAMURA, T. KIMURA and K. SAKURAI, 1962. Investigation on the growth and distribution of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, III. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 1, 373-387.
- MAGONO, C., K. KIKUCHI and N. YAMAMI, 1971. On the meteorological conditions for the growth of snow crystals in cold temperature regions, as revealed by radiosonde data in the Antarctica. *Jour. Met. Soc. Japan*, Ser. II, 49, 179-183.
- MAGONO, C. and C. W. LEE, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 2, 321-335.
- MAGONO, C. and C. W. LEE, 1973. The vertical structure of snow clouds, as revealed by "Snow Crystal Sondes", Part II, *Jour. Met. Soc. Japan*, to be published.
- MAGONO, C. and H. SASAKI, 1970. On the optical axes of snow crystals of the side plane types. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 269-275.
- MAGONO, C. and S. TAZAWA, 1972. Aggregation phenomena of ice crystals. *Jour. Met. Soc. Japan*, 50, 489-493.
- MAGONO, C. *et al.*, 1959. Preliminary investigation on the growth of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 1, 195-211.
- MASON, B. J., 1953. The growth of ice crystals in a supercooled water cloud. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 79, 104-111.
- MASON, B. J., 1971. *The Physics of Clouds*. Clarendon Press, Oxford, 671 pp.
- MASON, B. J., G. W. BRYANT and A. P. VAN DEN HEUVEL, 1963. The growth habits and surface

- structure of ice crystals. *Philos. Mag.*, 8, 505-526.
- MOSSOP, S. C., 1970. Concentrations of ice crystals in clouds. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 51, 474-479.
- MOSSOP, S. C., 1972. Ice-forming nuclei. *Proc. Internatl. Conf. Cloud Phys.*, 20-21.
- MOSSOP, S. C., R. E. COTTIS and B. M. BARTLETT, 1972. Ice crystal concentrations in cumulus and strato cumulus clouds. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.* 98, 105-123.
- MOSSOP, S. C. and A. Ono, 1969. Measurement of ice crystal concentrations in clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 26, 130-137.
- MOSSOP, S. C. and E. R. WISHART, 1970. Ice crystals in maritime clouds near Tasmania. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 96, 487-508.
- NAKAYA, U., 1954. *Snow Crystals*. Harvard Univ. Press, 510 pp.
- Ono, A., 1969. The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 26, 138-147.
- ONO, A., 1970. Growth mode of ice crystals in natural clouds. *Jour. Atmos. Sci.*, 27, 649-658.
- PITTER, R. L., 1972. A wind-tunnel investigation of the crystalline structure of small, frozen water droplets falling at terminal velocity in air. *The Internatl. Cloud Phys. Conf.*, London, 62-63.
- ROSINSKY, J., G. LANGER and C. T. NAGAMOTO, 1972. On the ejection of microdroplets from the surface of a freezing water drop. *Jour. Appl. Met.* 11, 405-406.
- REYNOLDS, S. E., 1952. Ice crystal growth. *Jour. Met.*, 9, 36-40.
- SCHAEFER, V. J. and R. J. CHENG, 1968. The effect of nucleus on ice crystal structure. *Proc. Internatl. Conf. Cloud Phys.*, Toronto, 255-259.
- SCHAEFER, V. J. and R. J. CHENG, 1971. The production of ice crystal fragments by sublimation and electrification. *Jour. de Recherches Atmospheriques*, 5, 5-10.
- SMITH-JOHANSON, R. I., 1969. Ice crystal agglomeration: T. formation. *Jour. Atmos., Sci.*, 26, 532-534.
- WEICKMANN, H., U. KATZ and R. STEELE, 1970. AgI-sublimation or contact nucleus, Reprints Papers, 2nd Natl. Conf. Weather Modification, Santa Barbara, Amer. Met. Soc., 332-336.
- YAMAMOTO, G., S. OGIWARA, K. YOSHIDA, A. MIURA, T. OKITA and T. OHTAKE, 1952. Observations of the rate of growth of ice crystals artificially produced in the atmosphere. *Tohoku Univ. Sci. Rep.*, 4, 83-87.
- YAMASHITA, A., 1971. Skelton ice crystals of non-hexagonal shape grown in free fall. *Jour. Met. Soc. Japan, Ser. II*, 49, 215-231.