

## 降水要素の成長過程について (III)

— 気象学会シンポジウム (1956年度) —

## IV 雪の成長について

花 島 政 人\*

雪の結晶の研究として、最近では雪の結晶の初期状態ともいえる細氷の研究が、天然及 diffusion cloud chamber の使用による人工のもの、あるいは人工降雨の一部として、理論も実験もさかんに進められている。さらに雪の結晶の成長機構の一つとして、雪の結晶の成長が水蒸気の昇華によるだけではないのではないかという問題が賑になってきたのである。すなわち雪の結晶は過冷却した微水滴を含む雪の中でできるが、このとき果して水蒸気の昇華だけで結晶が成長するのだろうか、あるいは雨滴の成長の際の一部に起る雲粒の併合のようなことが、雪の結晶の成長の際も起っているのだろうかというのである。

このことはすでに筆者らが雪の結晶の形を支配する外部条件を求める実験<sup>1)</sup>を行った際触れたことである。人工の雪の結晶を作る装置の中で成長しつつある結晶のまわりに沢山の微水滴が浮んでいるのを見出し、この微水滴は直径がせいぜい数 $\mu$ で、ふつうの雲粒にくらべると1桁ほど小さい。天然の雪の結晶に附着している雲粒の大きさは平均が約30 $\mu$ <sup>2)</sup>で、数 $\mu$ のものは見られないが、人工の雪の結晶においても同様で、30 $\mu$ 程度のものは結晶面に附着するとそのまま凍り、粒として残るが、微水滴の方はその痕跡が見られないのである。それでこのような微水滴はどのようにして水蒸気分子の如く振舞うのだろうかということが疑問の一つであった。

羽生は同じ人工雪の装置の中にコトレル収塵器の原理を用いた装置をつけ、装置内を対流によって上昇してくる微水滴に荷電し、高圧の電場でそれを捕捉し水蒸気だけが結晶に供給されるようにした。そうすると雪の結晶の成長は遅くなるばかりでなく、樹枝状の成長する条件にしても、角板又は扇形状になることを見出している。

また熊井<sup>3)</sup>は電子顕微鏡による雪の凝結核の研究において、中心部の核以外に枝の部分にも沢山の小さい凝結核を見出した。この大きさは直径0.01~0.1 $\mu$ 程度で、単位面積当りの数は平均1 $\mu^2$ につき約10個程度であった。そしてこれは結晶全体には約10<sup>7</sup>個ぐらいあることになる。それで、もしこれらの微粒子の各々が、雲の中に存在している1~2 $\mu$ ぐらいの微水滴の凝結核であるとすると、10<sup>7</sup>個のこの微水滴で厚さ10 $\mu$ 、直径1.6mmの平板結晶が出来る勘定になり、雪の結晶はこのような微

小水滴の集積によって大部分作られるという考えを出したのである。

しかし、これに対し aufm Kampe, Weikmann, Kedesdy<sup>4)</sup>は微小水滴の蒸発速度を考えるとこのような微小水滴は天然には存在しなくて、中谷や花島の人工雪の装置の中に無数に存在しているものは、装置の中に温度の高い水蒸気源があるため高度の過飽和になっているからこのような微小水滴の存在が可能なのであるとしている。その上、雪の結晶のすぐ近くまで来た微小水滴も、氷の低い蒸気圧のために、はやく蒸発してしまい、液相のまま微小水滴が結晶面についてその成長を助けることはおそらくあり得ないとしている。

同様に Marshall と Lagenleben<sup>5)</sup>も人工雪の装置の中にあるという微小水滴は、ただ単に水蒸気の供給源として役立つのであるとしている。

これらの微水滴の sudden evaporation に対し黒岩<sup>6)</sup>が雪の結晶と微小水滴との間の相対速度を考慮することによって、特に結晶の周辺では大部分が液滴のまま附着するだろうという結果を計算から出している。微小水滴の蒸発の計算については、特に水の表面張力の値がこのような微小水滴の場合などにはどう変化するか、又は微小水滴が純粋な水でないことも考えねばならぬところであるが、古く、C. T. R. Wilson<sup>7)</sup>が彼の霧箱中の実験で、塵の全くない空気を用いて、大きい膨脹比での膨脹のとき、一たび霧粒が発生すると、その後は普通では全く霧を生じないはるかに小さい膨脹においても霧の発生する事実から、水膜が非常に薄くなると表面張力が変化し、あるところで極大となり、水滴の蒸発がとまり、微小水滴として存在し得ることを説明している。

ところで天然で雪の結晶のできる際、実際にこのような微小水滴が存在するだろうかとなると、黒岩<sup>8)</sup>が冬期、旭川で川面から立上がる「ゆげ」のようにこまかい微小水滴の附着で霜の結晶ができていているらしいことを報じているが、普通ではこの粒を油の膜の中などに直接採って見ることは非常に難かしいため、むしろネガティブであったのである。

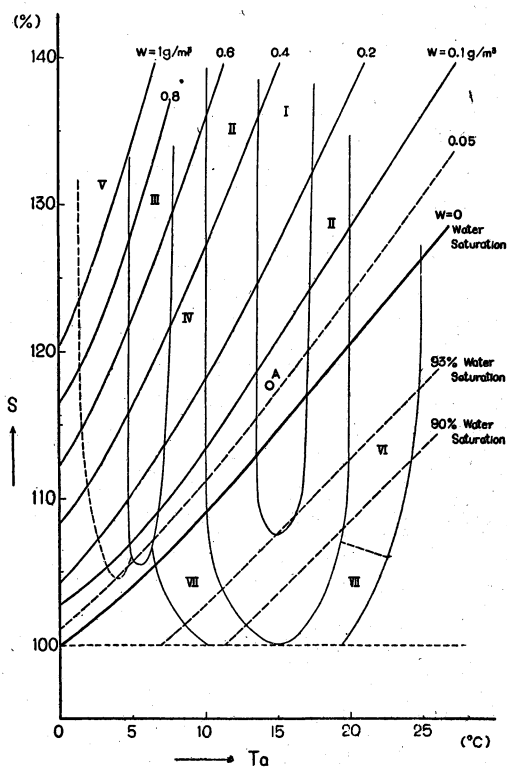
しかし最近 Johnson, Eldridge, Terrell<sup>9)</sup>がワシントン山の山頂での infrared transmissometer による観測の結果が報告されている。この方法は雲に赤外線を通したとき、波長で intensity に相異があることを観測するも

\* 運輸技術研究所

ので、径の分布や霧水量が求められるというのである。  
42の観測のうち20は、直径 $1\mu$ の微小水滴が $20,000/\text{cm}^3$ 以上あり、14は $30,000/\text{cm}^3$ 以上、最大は $68,323/\text{cm}^3$ であったという。これで天然にもこのような微小水滴が雪のできる場合にも存在するだろうということが期待されることになったわけである。

次に雪の結晶の方を見ると、その表面の性質として中谷、松本<sup>10)</sup>の研究がある。2つの氷の球を細い糸で吊し、一度くっつけて離そうとすると normal adhesive force のために糸はある角度まで傾き、時には離れる前に氷球が回転することもあることを見出し、この回転は氷点近くだけではなく、 $-7^\circ\text{C}$ までも見られたことから、また吉田<sup>11)</sup>の窓霜の成長の際の観察をも引用し、氷の表面には液状の膜があるとし、このような膜があれば、微小水滴が結晶の表面に附着したときもその表面で拡がることのできる。過冷却水滴の粘性と氷の表面の液膜の粘性のために、表面で水滴のひろがるのには若干の時間がかかり、水滴が $20\sim 30\mu$ と大きくなると、この時間はかなり長くなるので、それが氷の表面にひろがる前に氷結するのであり、これで着氷の rimed crystal の成因も説明できるとしている。

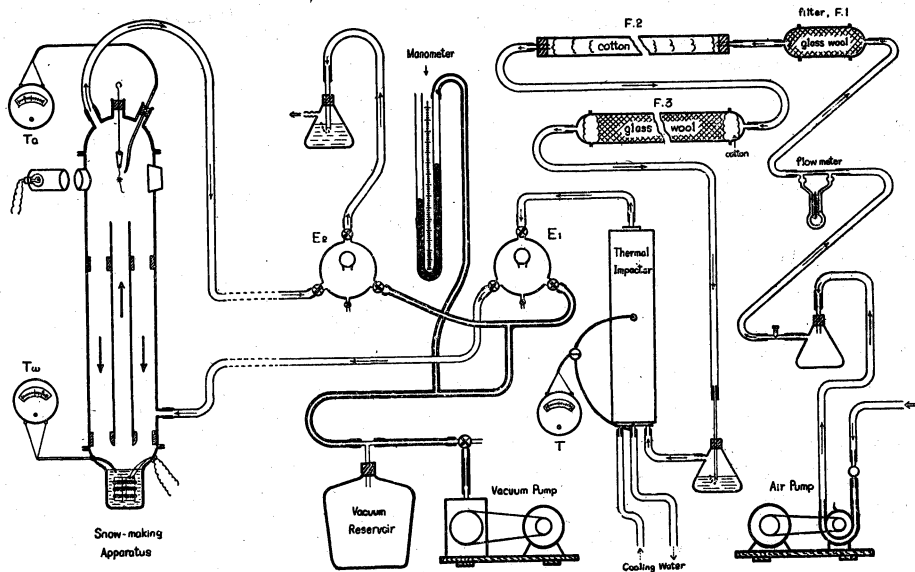
以上のような経過で過冷却微小水滴が雪の結晶の成長に直接関係があるのではないかという考えが、より期待されるようになったわけであるが、その微小水滴の生成のもとになる核について数を当ててみよう。第1図は人工雪の研究から得られた雪の結晶ができるときの過飽和(氷に対して)と温度及結晶形との関係を示したものである。図中  $w=0$  で示す実線は過冷却水に対する飽和を示す線で、これより上部は過冷却水に対して過飽和であ



第 1 図

(図中の温度目盛は氷点下の数字)

り、微小水滴の存在し得る範囲である。ただここで注意することは、水滴の曲率の影響が過大に評価され易いことで、 $r=10\mu$ では0.011%、 $r=1\mu$ で0.11%、 $r=0.5\mu$



第 2 図

の微小水滴でさえも 0.215% でしかないことである。それで今は曲率の影響を直接に考えないでおく。

今、図で最も樹枝状結晶のよく出来るあたりの点Aをとると、液体の水の量は  $0.06\text{g}/\text{m}^3$  である。ここでもし微小水滴の直径が  $2\mu$  であるとする、単位体積中の粒の数は  $n=1.5\times 10^4/\text{cm}^3$  となり、これは市街地のエアロゾルの濃度と似ている。

それでもし結晶がそこへ附着する微小水滴で作られるとすると、これらの微小水滴の核と考えられるエアロゾルは雪の結晶の形を支配する一つの因子になるのではないかと考えられることになる。この点を見るために、エアロゾル等を除去した空気中で人工雪を作る実験が行われた。

装置の概要は第2図の如きものである。人工雪を作る部分は前に用いられたものとほとんど同様であるが、気密になるようにしてある。

ポンプで取り入れられた外気は流量計を通り、かたくガラスウール又は脱脂綿をつめたフィルター  $F_1, F_2, F_3$  を通り thermal impactor に入る。thermal impactor は2重の鉄製の円筒から成り、その向い合う壁はクロムメッキを施して錆を防いでいる。壁の間は約2mm、内筒の中には流水を通して冷却し、外側は電気ヒーターで熱して、その2mmの間隙に約 $80^\circ\text{C}$ の温度差をついている。

フィルターから来た空気はこのせまい温度差のある壁の間を通るが、ここを通過する間にほとんど残りのエアロゾルが壁にとられてしまう。この働きは isotope の thermal separation に使われた方法に似ている。

impactor を出た空気は霧箱に導かれる。ここへ閉じこめられた後、予め低圧にしておいた低圧溜りにつながれると、 $E_1$  中のこの空気は断熱膨脹のため温度が下る。このとき霧の核になるような物質がまだ残っていれば、それを核として霧が発生するから、これで thermal impactor の働きの良否が判定出来る。実際に filter も impactor をも通させない普通の大气で膨脹させると沢山の霧を生ずるが、filter, impactor が十分に働いたときは数個又は全くない程度にまでなる。

かくしてエアロゾルを取り除かれたと判定された空気は低温室内の人工雪の装置へ送られ、雪の結晶の成長の間もずっと連続して流れ、再び低温室外へ出、第2の霧箱  $E_2$  を通って捨てられる。

写真1及2は装置内の微小水滴の有無を示すもので、1は普通大气の場合で沢山の粒が強い光で輝いているが、2はエアロゾルのない空気中浮遊している微小水滴がない。共に露出時間は1秒である。中央の白い糸状のものは結晶を保持成長させるための兎毛である。

thermal impactor の働きは長時間安定であるので、一連の実験の前後だけに  $E_1, E_2$  でのチェックを行い、流しつづけた。

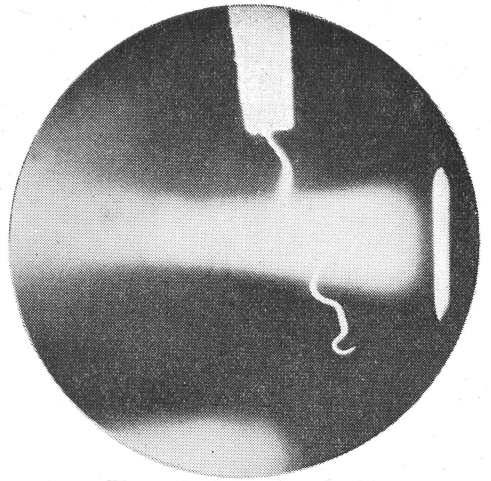


Photo. 1 (×2)

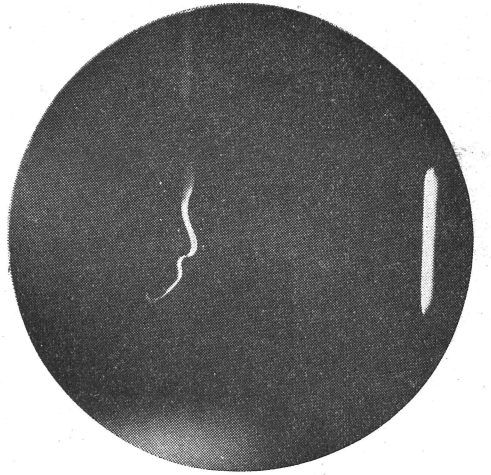


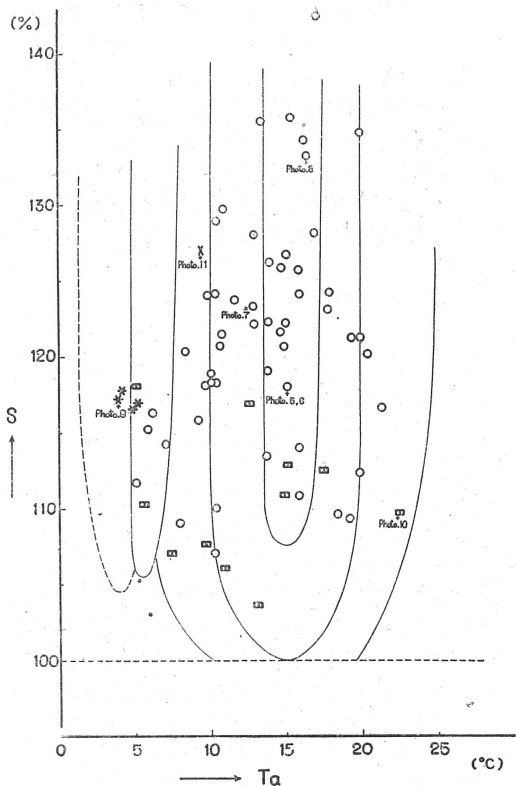
Photo. 2 (×2)

先ず普通の空気を使って雪の結晶をつくってみると、写真3\*の如くである。これは  $T_a = -15^\circ\text{C}$ ,  $T_w = +19.8^\circ\text{C}$  で樹枝状の出来る範囲内である。この結晶が出来た後エアロゾルを取り除いた空気を流し、30分ほど後に兎毛を入れると間もなく結晶が出来、のび出すが、結晶の形は全く異なり写真4の如き針状になるのである。結晶の中央部の黒い部分は、人工雪の装置内の空気がまだ充分に入れ換っていなかったときに成長したと思われる平板結晶で、同様な例が写真5, 6である。若干エアロゾルを含んでいる空気を流しておいて結晶をつくると、樹枝状発達のところでも、枝の先は角板状になる。そこですっかりエアロゾルをとり除いた空気に変えると、底面から軸方向に結晶がのび出すのである。写真7, 8の結晶は共に完全にエアロゾルを取り除いたと思われる空気中で成長させたもので、写真7は  $T_a = -13.0^\circ\text{C}$ ,  $T_w = +15.5^\circ\text{C}$  で普通なら扇形発達をする条件であり、写真

\*写真3~8は口絵参照

8は  $T_a = -16.5$ ,  $T_w = +16.5^\circ\text{C}$  で最も樹枝状発達に適した条件であるにも拘わらず、何れもC軸方向に成長した結晶になっている。

結晶成長後その結晶の周辺の空気を吸収し、全含水量を測定した。その結果は第3図の如くである。すなわち



第3図

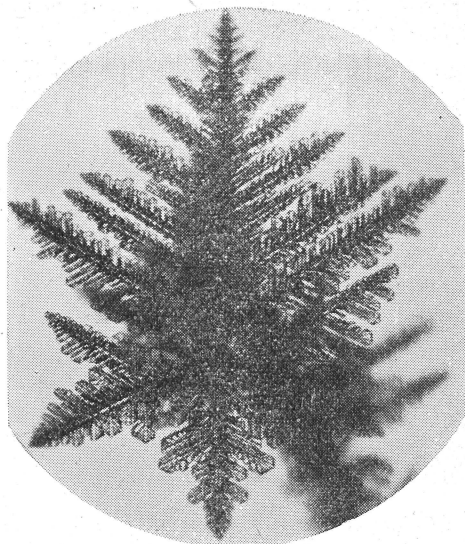


Photo. 9 (×26.1)

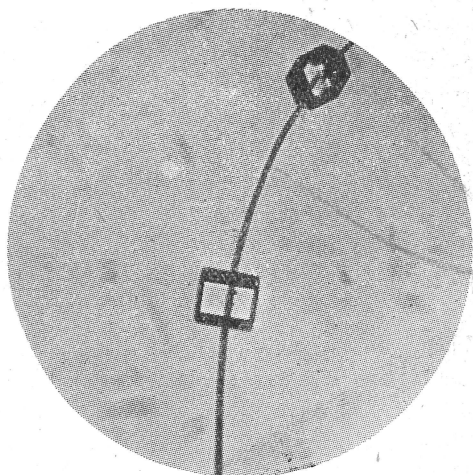


Photo. 10 (×52.3)

普通の空気で結晶をつくったときの結果の第1図と比較してみると、樹枝状、扇形角板状等の発達をする範囲を覆って広い範囲にわたりC軸方向への成長に変っていることが分る。

第3図中\*印で示したものは写真9に示すような結晶

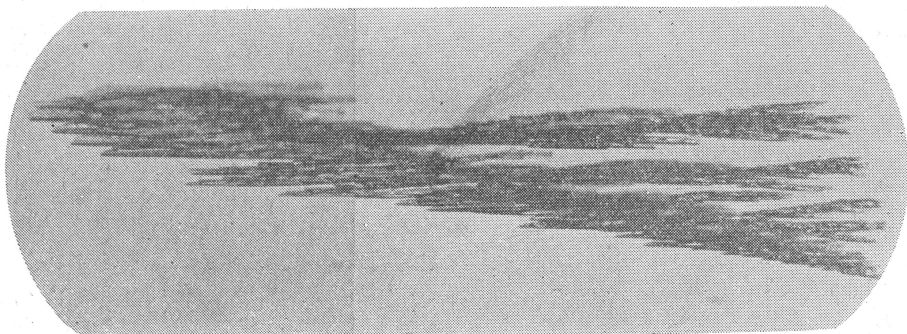


Photo. 11 (×25.2)

で、一見樹枝状とは構造がちがひ鱗片状の集合となっている。又×印で示したものは写真IIに示すような筈状でこれらは従来見られなかったものである。■印で示したものは写真10の如きC軸に成長してはいるが、内部もつまっているものである。

これら数種のこまかい成因は別としても、また広い範囲にわたりC軸方向への鞘状の成長が起ることも、今のところ適当な説明が見出されない。しかし、エーロゾルを除去し、微小水滴の全く浮遊していないような状態で、雪の結晶を発達させると、同じ  $T_a$  及  $S$  (過飽和度) に対しても、結晶外形が全く相異して行くということは、微小水滴が単なる水蒸気の供給源ではなくて、微小水滴それ自身が、雪の結晶の発達に対し大きな役割を演じていると考えられるのである。

#### 参 考 文 献

- 1) 花島政人, 1944: 人工雪の生成条件について (補遺), 気象集誌, **22**, 123.
- 2) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の結晶の研究, 60.
- 3) Kumai, M., 1951: Electron Microscope Study of Snow-crystal Nuclei, J. of Met., **8**, 151.
- 4) aufm Kampe, H. T., Weickmann, H. K., and Kedesdy, H. H., 1952: Remarks on Electron-microscope Study of Snow-crystal Nuclei, J. of Met., **9**, 374-376.
- 5) Marshall, J. S. and Langleben, M. P., 1954: The Theory of Snow Crystal Habit and Growth, J. of Met., **11**, 104.
- 6) 黒岩大助, 1955: 過冷却雲中に於ける雪の結晶の成長, 低温科学, **14**, 1.
- 7) Wilson, C. T. R., 1897: Phil. Trans., **189**, 265.
- 8) 黒岩大助, 1954: 過冷却した霧の中での樹霜の成長, 低温科学, **13**, 105.
- 9) Johnson, J. C., Eldridge, R. G., Terrel, J. R., 1954: An improved Infrared Transmissometer for Cloud Drop Sizing, M. I. T., Dept. of Meteorology Scientific Report No. 4.
- 10) Nakaya, U. and Matsumoto, A., 1954: Simple Experiment showing the Existence of "Liquid Water" Film on the Ice Surface, J. of Colloid Science, **9**, 41-49.
- 11) Yosida, Z., 1940: Window Hoar Crystals on Clean Glass Surfaces, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., II, **3**, 43-55.

#### 討 論

磯野: 氷晶の成長速度はどの程度ですか。

花島: 針状の成長速度は感じでは樹枝状ぐらいのよう

ですが、 $\frac{dm}{dt}$  はちょっと測りようがまだないのでわかりません。

丸山: nuclei-free にしたとき、角板の出来る条件は?

花島: half-clean ともいうべき空気の状態のとき、今まで樹枝状が発達するとされていたところです。

丸山: 飽和水蒸気圧はどうやって測りましたか?

花島: 雪の結晶の出来る周辺の空気を一定量採り、その中の水分を五酸化磷に吸収させて測りました。

丸山: crystal 面における微小水滴の数の空間的な gradient は判りますか。

花島: crystal の surface 近くで微小水滴がどうなっているかは直接は分かりません。流れにむらはありませんが、装置内の対流で粒は流れています。

小林: 鱗片状の出来る条件はどんなものですか?

花島: 今迄樹枝状結晶が出来るとされてた条件で、空気が half-clean のときです。

黒岩: 過飽和度及び温度は Nakaya-chart と同じでも、結晶形を変えさせる役目をしているのは、微小水滴であるということを示すわけですか?

花島: そうだと考えます。

丸山: 生長速度  $\frac{dm}{dt}$  を測定するといいますが、

花島: 測るうまい方法がないのですが、何かうまいものはありませんでしょうか。

黒岩: 空気の流速はどれくらいですか?

花島: 結晶附近の流れの速さは分かりませんが、clean-air の送気量は約 1l/分です。

駒林: crystal mass のことですが、へこみがあったりするときに、どうやって mass を出したらいいでしょうか?

花島: パラフィン膜などをつけ硝子板の上で融かすと、殆んど完全な半球になりますから、その径をはかって求めることが出来ます。

黒岩: crystal-surface の "ぬれ" が大きくとりあげられているが、nuclei-free にしてもそうでしょうか?"ぬれ" ているのは pure-water でなく solution ではないかと思われすが、厚さ 1000Å くらいの solution の膜ではないでしょうか? nuclei-free だと一応 "ぬれ" がないわけですが、すなわち pure-water だけが凍って solution の層は外へ外へと出てくるわけです。

磯野: 微小水滴が一度 evaporate してから crystal-surface についたのかどうか判りませんか? これを知る方法はないでしょうか?

黒岩: 真空中で vapor だけを入れてやってみる必要があると思いますが。(磯野: 同意)

花島: かって  $\frac{1}{2}$  気圧くらいに減圧してやってみました。差はみられませんでした。

山本: 微小水滴が残っていないかどうかはどうして観測されましたか?

花島：スライドでもお見せしましたように、装置の中へ光の beam を送り、水滴による scattering があるかどうかによりました。結果はありませんでした。

磯野：電子顕微鏡で氷晶を見て、核がついていてもそれだけでは、微水滴がついてから evaporate したのかどうか、また、これが dendrite の成長に本質的なものかどうかは判別出来ないと思いますが。

丸山：要するに、微水滴の存在が大きな役目をしていることは疑えなくなったわけですね。

伊東：微水滴のある、なしによって結晶形が変わることをどうお考えになっていますか？

花島：どうしてなのか、まだむずかしい問題だと思います。

伊東：dust-free にしてやられたわけですが、水滴の self-nucleation は考えられませんか？

花島：beam で見た範囲ではなかったようです。勿論この beam の波長を変えれば scattering をおこすのかも知れませんが。

大谷：air の convection の effect はありませんか？

花島：非常に大きくなれば effect が出るかもしれませんが。

高橋：微水滴の数を変えて行ったときの crystal の形は？ 数がある程度少なくなると、急に変わるのではないのでしょうか。微水滴に critical な数があって、そこに問題があると思われませんが。

花島：そこ迄は未だ判りませんが、そんな気が多分にします。

丸山：この crystal-type の transition の点を電子顕微鏡で見ると面白いと思う。

山本：微水滴でなくともよいように思われますが、たとえば、aerosol でもよいと思われる。

黒岩：蒸気圧が 130% になると soluble な aerosol は水滴になってしまいますが。

磯野：イオンだけを核にして作った fog で実験してみるとどうでしょうか。

花島：アンモニアなどを入れてやってみても差はなかったようです。心配なのはごく微量の親水性物質、たとえば高級アルコールのために crystal-type が変わることがあることです。

磯野：cold-box 内にアルコールの蒸気が少し入っていると AgI を seed しても crystal は出来なくなるようです。

駒林：すでに crystal が出来ているとき、アルコール蒸気を入れると (-15°C ぐらいでやった)、crystal が消えたことがあります。拡散係数は、水蒸気もアルコール蒸気もあまり変わらないのですから蒸気圧の違いによるものと思われま。

丸山：アルコール蒸気の影響というのは、氷晶の表面にアルコール蒸気がつくからでしょうか？

駒林：水滴がアルコール水溶液になって、飽和水蒸気圧がひどく下がるためと思われま。

高橋：花島さんの実験結果を自然雪の場合に応用出来ませんか？ いろんな type の自然雪があるが、それが微水滴の存在で説明出来ないか？

駒林：霧と共存するかしないかで type が変わるとすると、これが Bergeron type の生長にどんな影響を及ぼすでしょうか？

丸山：生長速度  $\left(\frac{dm}{dt}\right)$  が判らないから、そこ迄論は進められないと思います。

座長：大変有益な御講演をして下さった花島さん及び活発な御討論をして下さった方々に厚くお礼申し上げます。一以上一 (速記、東大 山中義昭)

### 「日本の気象」— 気象史の一断面—

気象学史研究会編著

三一書房刊行、新書判、212頁 定価 140円

最近、気象庁の中で気象史の研究に興味を持つ人達がグループを作って、気象学や気象事業の生い立ちを歴史的に、また、批判的に研究されている。この本はそれらの人達の研究の結果を読物風にまとめたものらしく、気象史の一断面という副題もついている。

読んで見ると非常に面白く、一気にお終いまで読んでしまったが、面白かったというのは気象学や気象事業がどんな背景の下に、どのように発展して来たかということが中心になっており、気象の関係者なら誰でも興味を持つ筈の問題を扱っているからである。特に私の興味を引いたのは第2章の災害や第3章の日本の気象学の後進性についてであり、参考になったのは第5章の気象事業の歴史であった。

けれども、内容について意見がないわけではない、各

章の表題はどれも気象史の断面を知るに好個のものではあるが、表題が大きすぎて内容が簡易すぎるように思う。たとえば、風土については気候は最も重用な要素ではあろうが、風土と言えどもっと広い問題を含むであろう。日本の気象事業の成立のための背景については気象関係の古代からの簡単な歴史が中心になっているが、もっと日本の事情を加えてもらいたかった。たとえば足利時代の御朱印船の活動、江戸時代の漂流などと季節風の関係、当時の社会条件など。気象の国際性の章も前半は日本の気象に対する水爆の影響の問題で、それは国際性の章と区分した方が解りがよい。しかし、全体を通じて教えられた処は大きかった。

日本のように気象の影響の大きい国の気象事業をどう発展させるかということは、政治、経済とも関係する大きな問題で、それには過去を振り返って見ることは是非必要である。この書にもられたようなことが、単に気象関係者だけでなく、多くの人の関心を引くことを望みたい。

1956, 10, 6 肥沼寛一