

人工降雨の現況*

福 田 矩 彦**

1. はしがき

科学的人工降雨の研究が米国のジェネラルエレクトリック社 (GE) で始められてからすでに 20 数年になる。日本も諸外国と共にこの分野の研究に努力をかさねてきた国の 1 つで、この仕事に従事した人の数が多く、幾多の論文が出され、活発な議論がたたかわされたが「増雨」そのものを目的とした研究や実験は今日では下火になったと聞く。人工降雨の分野に限ったことではないが、一般的傾向として日本の研究者の間では基礎研究が特に重視され、応用のための研究実験は軽んじられる傾向が強い。この研究者自体の中にある傾向が、ひとつには大部分応用研究で占められる人工降雨の研究を、現在の低調な状態に追い込んだものと思われる。このことは、人工降雨および関連する一連の研究が、全世界的傾向として「環境圏コントロール」という形でますます重要視され、強調されてきている現今、日本にとって重大な問題であるといえよう。

目を世界へ向けてみよう。ここ筆者の仕事している米国では、国立科学財団 (NSF) が気象制御に関する研究費をずっと支給し続けており、その関係する分野は基礎から応用にわたっている。また数年前 Bureau of Reclamation の中に大気中の水資源を確保し有効に使用するための部門が出来、実用化へ向って基礎および応用の両面に多額の研究費を支給してきている。ソビエト連邦においても、オーストラリアにおいても応用を重視する傾向は強い。この面の内情は小元 (1970) および土屋 (1970) によってよく紹介されているので、これ以上立ち入って説明することをさけるが、このようによりよい

実用方法とその新しい用途の開発をめざして、多くの国で努力が払われてきている事を忘れてはならない。それは社会においてその分野で教育された人材の必要性を生み、大学はそれに向って努力を払い、そして学界はそれまで続いてきた Journal of meteorology から新しく Journal of Atmospheric Science と Journal of Applied meteorology をつくってそれに応えている点によってもわかる。

人工降雨の分野では、よく次のような極端論がたたかわされる「我々は自然を何も知っていないんだ。自然を知らずに、どうしてコントロールができるんだ」といった意味の基礎分野の研究者の言葉に対して、既に実用運転を行なっている人達の「雨が降ったから良いじゃないか」という言葉が応える。これは、気象制御のように自然の複雑な一面をコントロールしようとするとき、出くわす問題のひとつである。我々はどこまで努力しても、自然を知りつくすことはないし、仮に必要な基礎知識を得たからといって、すぐ応用へ進める訳でもないということを知っていると同時に十分な基礎知識なしには、その方法の改良は望めないということも知っている。基礎と応用の良いバランスが必要だ。

気象制御は今や巨大科学のひとつで、その過去および現状をすべて扱かうには紙数が足りないし、また上記 2 つの叢説に述べられていることも重複するので、ここでは人工増雨を目的とする気象制御の現在の科学技術的問題点とその将来の方向に重点を置いてみることにしよう。この点を正しく理解することは、過冷却水雲および霧の氷への相変化を利用する他の気象制御にとっても、重要であることはいままでもない。なお、人工増雨以外の目的の気象制御の問題点は、別の機会にゆだねたい。

* Current Status of Artificial Rainmaking

** N. Fukuta, University of Denver

—1970年10月26日受理—

2. 雨量計から雲の微物理へ

過冷却雲の水への相変化を利用する気象制御の最大の特徴は、自然がそれ自体変化する力を内蔵しており、我々が変化のきっかけを作ってその力をうまく利用するという点にある。従って、次のような条件が揃っていることが必要だ。

(1) 過冷却雲が充分多量に存在し、その状態が永く持続する。いいかえれば、そういった雲の中へ氷晶を外から入れる機構あるいはその中で氷晶が発生する機構が充分働いていないか、欠けている（自然氷晶核の濃度が低い）。

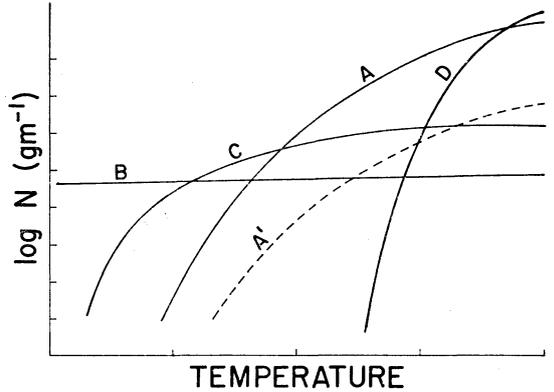
(2) 過冷却雲はコロイド的に安定で、氷晶過程以外は降雨降雪の発達に充分寄与していない。

(3) 多数の水粒子を導入、或は発生させることにより、氷晶が成長して雲の物理または力学的状態を著しく変えることができる。増雨に適した変化の種類が存在する。

こういった条件は、近代的気象制御の実験が始まった当初から知られていた。ドライアイス種まき法が初めて行なわれてから間もなく、ドライアイスより何万倍、何十万倍も有効（低温で）だと証明された AgI を使って、地上発煙法により雲に種まきをし、期待される雨量の増加を雨量計網で調べる実験法が開発された。気象的によく似た二つの地域が目標および標準地区として選ばれ、種まきに適した気象条件が到来したと判断された場合、無作意的に例えば貨幣を投げるなり、くじをひくなりして撒く、撒かないを決め、得られた結果を統計学的に処理して種撒きの効果が判定された。オーストラリアでは同じ方法が用いられたが、地上発煙法の際、有効 AgI 煙が雲へ達していないかも知れないという不確かさを避けるため、飛行機で直接雲中へ種をまく方法がとられた。これが最も広く行なわれてきた類の人工増雨法である。この方法の特徴は、一回の実験にはそれほど費用がかからないが、効果の判定が非常に難しい。効果判定を助ける目的で手段を固定するので、仮にうまくいっても、その範囲内の最適条件がわかるだけの話で、そのため非常に永い期間が必要であること、および別の方法を用いた実験から知識を得たり、与えたりしにくいという点にある。

山岳性過冷却雲への種撒き

上記の方法は、冬季山岳地帯への増雪を目論む実験で新しい発展を生み、かなりの成功を納めた。気象条件が比較的一定している冬季といえど、雪雲の状況、風向そ



第1図 典型的な人工氷晶核の活性温度スペクトル

の他気象条件の変化があり、種の過不足があれば願わしくない効果が出る筈だし、太陽光線によって AgI 煙が不活性化することも考えられる (Smith et al. 1966)。にもかかわらず好結果が得られたのはなぜだろうか。それには次のような原因が考えられる。まず、冬季の雪をもたらすに好条件の気団は、ロッキー山脈に対し、多少の変動はあるにしろ、大体西側から来てその氷晶核濃度は -20°C でせいぜい 1ケル^{-1} 程度である。そういう時は概して曇っていて、AgI 煙は太陽光線で効果を殆んど失なわないし、また煙が拡散して雲へ入るのに充分時間がある。

ここで過冷却雲中で期待される変化を第1図、Aに示される典型的な AgI 煙の活性温度スペクトルから考察してみよう。撒かれた AgI 煙を含む気団はゆっくり山側に沿って上昇し、温度が下って過冷却雲ができるとその粒子はスペクトルの温度の高い側から序々に活性化され、氷晶を発生する。図のスペクトルの形からすぐわかることは、温度が下ると活性化する AgI 粒子の数が急激に殖えるということである。ところが、実際に発生する氷晶はこのスペクトル通りになるとは限らない。それは氷晶核が限られた大きさで持続時間の短い冷凍箱の中の霧の中で、自然の雲の中とは異なる条件の下で測定されたものであるためと、もう一つ次のような理由による。AgI 煙を含む過冷却雲がさらに冷えると、発生する氷晶の数が増す。もしその煙の濃度が多少多目になっていたとすると、成長する氷晶が水蒸気を奪い去り、その氷に対する過飽和度をさげるので、有効度の低い AgI 粒子の核化 (nucleation) が妨げられ始める。そのため、活性化温度の低い核は、働く機会を持つことなしに吐き出されてしまう。これは勿論氷晶核の浪費であるが、こ

のため種の撒き過ぎ (overseeding) による害は軽減される。発生した氷晶は、気団全体がゆっくり上昇することにより冷えて作り出す過飽和度に助けられ、よく発達した、雲粒の付着 (riming) の殆んどない雪片になって落下する。なお都合の良いことには、雲から山肌迄の距離が近いのと、気団の上昇が緩慢なため、遅い速度で落下する小雪片も問題なく山の斜面に達する。雪片が落ちてそこに水蒸気の抜き取りがなくなると、再び過飽和度が上って残っている活性度の低い核が働いて氷晶を補う。気団の水蒸気は、こうして成長落下してゆく氷晶によって汲し取られる。

山岳性気団について Grant 等 (1969) は、気団が山に沿って上昇冷却することにより作り出す凝結 (正しくは他に過飽和と水蒸気量の変化も含めなければいけない) の量と、自然に発生或は存在する氷晶がその雲中で成長し奪い去る水蒸気量との間に同一時間内に差が生じていけば、その分だけ人為的コントロールの対象になるとして、その量を制御ポテンシャル I (modification potential I) と呼んだ。これに対して、もし過冷却雲の中で氷晶が発生、成長することにより生ずる潜熱が雲の力学的状態に影響を与え、その凝結の量を変えるなら、それに同様の考え方が当てはまるとして、これを制御ポテンシャル II と呼んでいる。

こう話を進めてくると、事は簡単に見えるが、そこにはいろいろな問題がかくれている。まず過冷却雲中の氷晶核と氷晶の数が一致するだろうかという問題である。人工氷晶核を氷晶数の不足している過冷却雲中へ導入してその数を補い、自然の降雨降雪の機構を助けるのがこの実験目的であるから、この点がはっきりしないと雲中の氷晶数を正しくコントロールすることはできない。この場合、勿論計算に基づいた人工氷晶核の雲中での濃度も、発煙炉の出力、拡散、核の不活性化を加味して求めておく必要がある。Mossop 等 (1967, 1968, 1969), Hobbs (1969), Veal 等 (1969) および Grant (1968) の結果を総合してみると、氷晶と氷晶核の比は、温度の上昇と共に大体指数関数的に上昇していると言える。-20°C から -35°C でその値は 1 に近く、-5°C ~ -10°C 辺りでは $10^3 \sim 10^4$ にもなる。勿論、これらの値をそのまま受け取るのは危険で、仮にその測定自体を信用するとしても中には氷晶が低温上層部ででき温度の高い部分へ落ちてきていたり、Preactivate された氷晶核が働いていたのかも知れない。また雲の発達の後半によくみられる下降気流や、雲中の渦の下降部分等によって降りてき

ていた可能性もある。しかしこう観測データが積み重ねられてきてみると、その機構はともかくそういう状態が存在することは事実と認めざるを得ない。従って種撒きを計画するときにはこの事を考慮に入れなければならないし、その過程が解明される必要がある。これはまた、比較的高温の過冷却雲への種撒きの可能性を示唆するものである。

人工雪をどこへ落とすかという点も、この山岳性の雲への種撒きにとって重要な問題である。場合によっては、人工雪が山肌に落ちない前に気流が山に沿って降りかけ、せつかくできた雪を蒸発させてしまうかも知れない。こういった問題は単に地表で降った雪なり雨を調べるだけでは解決できないことで、雲物理の知識が必要になる。そこでは核化、氷晶の成長、落下、雲粒の附着が問題となり、雪の習性、数の増減、温度、気圧、雲粒の粒度分布等が間接的に影響してくる。

コンピューターと雲の微物理

このような複雑な問題を総合して扱おうにはコンピューターの助けが必要で cloud modeling がこの意味で最近注目をあびてきた。以前の雨量計に基づく種まきと、雲の微物理を入れたコンピューター実験のちがいは、前者が一つの結果を出すのに何年もかかり、しかも気象的条件の変動に悩まれるのに対し、後者は分の単位で計算し、いろいろ条件を変えた影響も容易に出るという点にある。これには高度の微物理、その他の知識が必要となるが、反面難かしい点は実験で得られる経験式で代用したり、或は可能性の範囲を計算し、それが如何に他に敏感に影響を与えるかを調べるとかして補う。コンピューター実験は、従って現象を実験室および自然の観察結果と絶えず比較し、それによって改良される必要がある。雨量計型種撒きは初期において唯一の可能な方法だった。経費も安くあがりそうにみえたが、十数年後の現在、その実験から学んだことは非常に少なく、それから種撒きの最適条件を見つけること (optimization) は不可能に近いことがわかる。もちろん、実施している側は「雨がふえたから良いじゃないか」と反論する。実用という面からだけみると、その事実を頼りに継続することは現在の雨と利益を確保するという意味で意義をもつが、将来飛躍するための研究としての意義は少ない。微現象の因果関係とコンピューターの性能に依存する方法の隠れた利点は、一般の科学的方法と同様、他の分野へ応用の可能性である。仮に人工増雨の目的で研究がなされたとしても、その知識は降電の防止とか、台風の制御

といった問題の基礎知識として役立つ、また逆に他の分野の知識も採り入れることができる訳である。

雲の中で起る微物理的現象に関して、最近知識が長足の進歩をとげた。核化の問題では、過冷却の水滴が乾燥した核粒子と衝突して凍結する接触凍結 (contact nucleation) が一番有効な機構であり、Schaefer and Cheng (1968) によると種撒きでできた氷晶の内部模様はドライアイスと AgI とで違うこと、Weickmann 等 (1970) によると水滴が凍結してできた氷晶は鼓型をしていて、その中央部の橋渡しをしている部分はもとの水滴の大きさを示していること等である。これらの点は最近 Colorado State University であった雲物理会議でも問題になったが、現在まで満足な説明は得られていない。

これらの問題に関して、筆者は次の様に考える。ドライアイスの種撒きでできた氷晶は、プロパン、フロン或は圧搾空気を使い急激に冷却してできる氷晶と形は同じで、AgI の種撒きによってできた氷晶は PbI_2 やフログリン、あるいは 1.5-ジヒドロキシナフタレン (1.5-dihydroxynaphthalene) と同じであること、またメタルデヒド (metaldehyde) の水蒸気活性 (Fukuta, 1968) 法でできた氷晶は平たい鼓型が -10°C ~ -20°C で多いことからして、氷晶の形の違いは核作用機構の違いと、その直後そこに存在する状態 (殊に水蒸気と温度) を反映しているものである。例えば、極度の冷却によってできた氷晶はその初期に約 1μ の大きさで、周りをほとんど氷飽和状態の空気にとりまかれ、じょじょに暖かい過冷却霧と混って成長する。従って変化が穏やかで、水蒸気圧の勾配が氷晶の表面近くで小さく、高過飽和度に適した樹枝状結晶の傾向を示さず、きれいな六角板あるいは柱になる。AgI 煙その他が氷晶を発生する時にできる特殊表面模様は、その核粒子が働くとき既に過飽和の水蒸気によって取り巻かれているので、小さな氷晶ができるや否やその表面近くにかなり強い水蒸気圧の勾配ができ、これが駒林 (1968 a,b) のいう形の不安定 (shape instability) を起す。しかし大きさがまだ小さいため、完全な樹枝状にまで発達できずその面上に名残りの模様を残す。

では過冷却水滴の凍結の場合、なぜ鼓型結晶になるだろうか。凍結によって水滴の温度が 0°C 近くまで昇り、そのため水蒸気を時には霧粒の形で逆に供給するとすぐまた冷えかける。その時、もし気温が -10°C 以下 (板状結晶の育つ温度範囲) であると -6°C 辺りの柱状結晶の安定な温度領域を通して冷えるので、多少とも角柱の

傾向が助長され、その上に成長する板状結晶は Mason (1962) によって示されているように、その角から成長して鼓となる。一般に鼓ができると水分の内側への補給が事実上停るので、水滴のもとの大きさが保存される。これはメタルデヒドの水蒸気活性による氷晶の発生の時、特に著しい。こう考えれば、鼓型結晶は言うまでもなく六角板傾向の強い -10°C ~ -20°C の範囲内のみで水滴が凍った時でき、それ以外の温度では期待できないことが判る。これは氷晶の形の不安定化と密接に関係があり、それは氷晶の大きさと過飽和度の関数なので、ドライアイスその他の冷たい気体の中で凍ると考えられるごく小さい水滴には当てはめられない。なおこの問題の詳細については筆者の次報を参照頂きたい。

核化後氷晶がどんな形をとり、どこではっきりした形の上での特徴を示しかけ、どんな条件下に樹枝状になるかの問題は最近駒林によって解かれた。彼によると、過飽和度の比較的大きい状態では氷晶が小さいと成長上安定な形は球で、それが大きくなるにつれ六角柱 (長短は温度に依存) から樹枝形へと移る。これは筆者 (1967 b) が指摘した点、すなわち核化を論ずる時、核に六角柱の形を与える取扱い (Mason, 1957; Fletcher, 1962) は意味がないことを支持する。

氷晶の気相中での成長に関する知識はコンピュータを使うプログラムで重要であるが、その初期の挙動が流体力学的挙動も含め、筆者の研究室で調べられた (Fukuta, 1969)。そしてその質量の増加は、電磁理論近似のマックスウエル型定常状態古典式

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi CS \left[\frac{L^2}{KRT_{\infty}^2} + \frac{1}{\rho_{\infty, sat} D} \right]^{-1}, \quad (1)$$

ここで C は静電容量、 S は過飽和度、 L は昇華潜熱、 K は空気熱伝導率、 D は水蒸気の空気中の拡散係数、 T_{∞} は周りの空気の温度、 $\rho_{\infty, sat}$ はその気温における飽和水蒸気密度、よりかなり遅いことが判った。 -15°C の過冷却霧中核化後 47.5秒で測定された氷晶の質量は、測定した氷晶の大きさと形を入れ後述の2つの補正を考慮した (1) 式の値の約 $1/3$ であり、これはまた駒林の昇華係数を加味した取扱いと傾向的に一致する。この昇華係数の影響は、氷晶が大きくなると理論的に消えることがいえるので、直径 200μ 程度以下の氷晶でないかと考慮する必要はない。なお、微水滴の成長および蒸発速度の一般式が、同様な観点から最近導かれた (Fukuta and Walter 1970)。

氷晶が過冷却霧中で成長するとき、水蒸気拡散場が無

限遠まで伸びず、大体近傍の過冷却水滴の辺りで一定値（水上飽和）になるのでこの補正がある（Marshall and Langleben, 1954）。また氷晶がゆっくり落下している間はその周りの拡散場が曲っても、お互いに打ち消し合っているが、それが速度を超すとその影響を考慮に入れなければならない。マックスウェル式に対するこの影響を換気係数（ventilation factor）と呼ぶ。この両者とも氷晶の気相中の成長速度を（1）式の値より増大させる。従って上記の影響をすべて考慮した成長速度をマックスウェル式の値と比較すると、初期にはその値より低く後期にはそれより大きくなる。

ここでもうひとつあげたいのは、前にも多少ふれたが成長する氷晶同志の水蒸気の奪い合いの問題である。一定温度で水飽和から氷飽和へ下る間、氷晶成長に使える水蒸気量はたかだか 0.2 gmm^{-3} であるが、気団がゆっくり冷える時数濃度と温度次第で、氷晶は過冷却霧なしに成長でき、 0° から -20°C まで冷えるとすると使える水蒸気量は 4 gmm^{-3} にも達する。しかし -20° から -40°C に冷える際は 1 gmm^{-3} も残っていない。この競争氷晶成長は今まで殆んど取り扱われていないが注目する必要がある。

氷晶の成長の問題は、一般にデリケートでフィードバックしてくる因子が多く、これが cloud modeling を難しくしている1つの原因である。例えば、氷晶が成長し早く落下しかけると見掛上の水蒸気の濃度勾配が変り、成長を促進し始める。それがさらにすすむと樹枝状成長の傾向が現われ、それが抵抗になって落下が遅くなる。ところが水滴がつくと、その平衡が破られ速く落ちかけて霰等の方向へ向かうといった具合である。従って cloud modeling の目的では、氷晶の微物理的挙動は必ずその流体力学的挙動と一緒に描写されねばならない。

過冷却雲粒との衝突による雪片の質量の増加は単位時間当たり一般に次のように表わされる。

$$\frac{dm}{dt} = AEQ(V_c - V_d), \quad (2)$$

ここで A は落下方向に垂直な粒子の断面積、 E は併合係数、 Q は雲水量、 $V_c - V_d$ は氷晶と雲粒の落下速度の差。微水滴に関しては、衝突前に蒸発することが知られている（Kuroiwa, 1958）し、雲粒のつき方次第では、氷晶の流体力学的断面や落下速度が変ることも考えられる。

雪雲の挙動を Denver で観察していると、必ずと言って良い位霰が最初に降ってくるのが認められる。こ

れは何コ、何十コかの大粒の水滴が凍ってくっついているもので、落下速度は確かに雪片より速い。そして段々よく発達した雪片が混るようになる。これは単に落下速度によるふるいわけだけで起っているものだろうか。高速で落下する霰についている凍った水滴が次の過冷却水滴とぶつかる時の衝撃でとれたり、あるいは過冷却水滴がかすって去る時、その中で凍結しかけ急速に伸びかけた氷晶芽をちぎってゆきはしないだろうか。こういう氷晶と水滴の衝突に伴う現象は、基礎的にも応用的にも興味ある領域である。こうしてみると、氷晶同志の衝突併合、蒸発、融解といった問題も決しておろそかにはならない。

風洞実験

コンピューターへ組み込む目的で調べてみたら判ったことであるが、成長する氷晶に関してデータの使えるのが少ないし、また実際点に在るデータの間に相当の食い違いがある。前にも述べた様に、氷晶のデータは流体力学的描写が伴わないとこの目的には使いにくい、さらに一歩進んでそのデータに一連性が欲しくなる。すなわち核化から雪片（霰）までの全過程を一回の実験で行なったデータが望ましい。そのためにはどうしても過冷却の霧を使う風洞か、大きな霧箱（霧室）が必要となる。最近の SUNYA (State Univ of N.Y. at Albany) の風洞実験からも示されたように、実に今まで知られていなかったいろいろな事が明らかにされる。過冷却霧の風洞を作るのは難しく、大ざっぱな SUNYA のもの以外、今までに成功していない。

風洞で粒子を支えるには、その中央部に安定化領域を作り粒子を押し戻すか、あるいは粒子を外へ押しつける力を除く方法が現在考えられている。この粒子を中央へ押し戻す力は気流の流速の凹みに基づくという説明をみかけたが、これは流体力学的に誤りで、実際にはそれを作るため流れの中へ何か抵抗体を入れるのでその近辺で流れの全エネルギーが摩擦で下り、そのため静圧も下って安定化が起るためと筆者は解釈する。この実験には器壁の影響がつきものであるが、これに対する一つの試みとして、今筆者の研究室で器壁を動かすタイプの風洞を組立中である。

電場、音場を利用して粒子を浮かせる方法も提唱されて実際に行なわれているが2次の影響が出る恐れがあるので確かに安全だということが証明されなければその使用は望ましくないし、仮に安全とわかって氷晶周囲の水蒸気拡散場の変形、雲粒の付着は流速の関数で、その

氷晶の実際の落下速度において調べなければならないが、その速度が実験中ひとりてに再現されないから別にそれを探す努力がいろいろあり、実験の一連性が失われる恐れも出る。

水分の輸送

種撒きで作られた氷晶の微物理的性質に頼るプロジェクトがワシントン州のカスケード山脈で行なわれている。これは普通なら山の西側に落ちる雪を東側へ落そうというもので、観測によると種撒きをしない場合雪片に沢山水滴がついて凍結し、その落下速度が 1 m sec^{-1} であるが、若し種撒きで充分の数の雪片を作れば、その落下速度は 0.5 m sec^{-1} 位になるはずだからこれを利用しようというのがその狙いである。

現在のところこれには、核の導入に確実に期するため飛行機から AgI pyrotechnical flare (氷晶核発煙炉の項参照) を落とし、その煙の行方と拡散を航空機用自動氷晶核カウンターで追跡する方法で調べ、空中および地上へ落下する氷晶は各種の連続レプリカ法 (continuous particle sampler) を用いて記録している。雲の状態を記録するため、レーダーのスクリーンを微速度映画 (time lapse movie) でとる方法も用いられている。

航空機観測によると、カスケード山脈の西側高度 5500 m, -22.5°C で雲が全部氷晶していて氷晶の濃度は $200 \sim 3000 \text{ l}^{-1}$ もあったことがあったが、くっつき合っている氷晶はたった 2 コ位の割であり、また高度 4000 m 辺でも直径 $75 \sim 125 \mu$ 位の氷晶が 50 l^{-1} 位、直径 $15 \sim 75 \mu$ の雲粒 350 コ位と混っていたと報告されている (Hobbs *et al.*, 1970)。そのため種撒きは 3300 m 強の高度で上記 AgI 発煙炉 (1 コ 10 gm AgI のを含む) を十数コ落す式で下層部の雲へ向かって行なわれている。

このプロジェクトは、現在のところ積雪量の増加と雪中の凍結核との間に平行関係がみつからなかったり、目標地区での雪中の銀の量が種撒きをした折、自然のレベルより有意義な量増さなかったりして問題をもっているが、種を撒いた時は雲粒の氷晶への附着が少ないか中程度となり、撒かない時の中程度から強度という結果に較べて確かに差が出ているようである。

氷晶核の発煙炉とその特性

気象制御に関していると、物質の取扱いとその実用開発になれないせいか、いつの間にか AgI を唯一至上の氷晶核として受け入れ疑おうともしない人達に出くわし、よく驚くことがある。氷晶核は気象制御の道具ともいべきもので、その種類、性質、そしてその使用法を

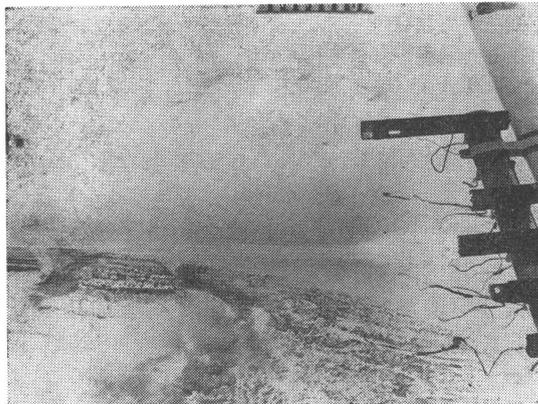
よく理解し、あるいは新しく開発しなければ進歩はあり得ないし、また万能氷晶核というものもない。氷晶核の実用発煙炉の性能からくる制限が、よく種撒きの範囲を制限していることがあるので、ここでは氷晶核の問題にふれてみることにしよう。

人工氷晶核の重要な特徴は、その煙 1 gm が発生する天文学的な数の氷晶で、この性質が、膨大な体積をもつ自然の過冷却雲へ人間が挑むことを可能ならしめたのである。

よく知られている氷晶核は AgI PbI_2 、ドライアイスで、現在でも一番よく使われていることは周知の事実だ。AgI をアルカリ金属の沃化物と一緒にアセトンに溶かし、それを焰の中で蒸発再凝結して煙にする方法が多く用いられたが、時には東北大で開発された液体アンモニアに溶かす方法も使われた。結局それらの狙いは液体にして連続安定な取扱いを可能にしたのと、焰の高温による急蒸発、急冷を利用する点にある。AgI に関する問題はいろいろあるが、よく知られている点や重要でない点はここでは省く。この方法で発生させられた AgI 煙の活性温度スペクトルは普通第 1 図 A 型である。液安の代りにイソプロピルアミンを使う方法が CSU で開発され、かなりの好結果を出したが、この物質は毒性が青酸ガスの 2 倍もあるので、その使用はすすめられない。

この毒性の問題は、氷晶核物質を扱おう時よく問題になる点のひとつで、発煙する時取扱い上注意しなければならない毒性と、実際空気中へ撒いた後の毒性とが考えられる。前者は特に危険でない限り、取扱いを厳密に指示すると、安全な方法を採用入れることによって一応解決できるが、空中へ撒いた後それが飲料水に入ったり、肺へ入ったりすることに由来する毒性は充分考慮しておく必要がある。勿論、人間活動はこんな量とは比較にならない位多量の毒物を大気中へ送りこんでいるので、問題はそちらが先だともいえるが、特に危ないのは体内に蓄積する可能性のある毒物、例えば重金属イオンなどで量が少ないからといって安心できない。逆に人間の体内に代謝系統を持っているような物質の場合、アルコール飲料を飲む時のように度を過ぎない限り安全で、後で述べるメタルデヒドはこの類に属する (Fukuta 1967 b)。なお氷晶核による大気汚染の問題に関しては、雪なり霰なりになって一緒に落ちるから問題はないという見方がとられている。

氷晶核物質の値段と工業生産性も考慮に入れておく必要がある。航空機の使用料や人件費の方が遙かに上まわ



第2図 航空機用固体 AgI 発煙炉

るので、それはあまり問題にならないと言う人もあるが、将来自動地上発煙法（実用運転として引合うには、それが開発されねばならない）が改良された場合、この点が問題になるからである。

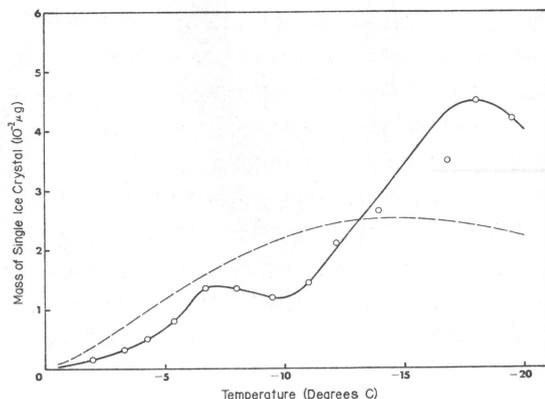
AgI 発煙炉の最近の進歩は固体燃焼炉で、これには二つのタイプがある。一つは航空機に搭載し燃焼する式のもの（第2図）で pyrotechnical generator と呼ばれ、もうひとつは照明弾式の pyrotechnical flare で航空機から特殊ピストルで射出し燃やしながら落すものである。ソ連で開発されたものは AgI と酸化剤、還元剤、充填剤の混合したものである。米国では AgIO_3 を使うのでこれ自身が酸化剤の役目を果し、後は還元剤（例えば Al）と充填剤より成っている。これらの方法で得られた煙の特徴は、水溶性で AgI の溶解度をあげるアルカリ金属沃化物がアセトン炉の場合とちがって存在しないので、雲底から吸い上げを利用して撒く時、実際飛行機でとびこんで雲中にできた氷晶を調べてみると、アセトン炉を使った時より氷晶の発生率が -10°C 近辺で約10倍多い。そして比較的高温でよく効く。この炉は地上でテストすると、黄色い煙を出しアセトン炉より発生核数が劣る。煙を取り扱ったことのある人には常識だが、煙にその物質特有の色がついている時はその粒子の大きさは大体 1μ 以上だから、その黄色い煙の色からしても効率の良いはずがない訳である。結局、機体にとりつけ飛行中に燃やす場合、周りの強い気流により AgI 蒸気が急冷、急希釈されるため、その粒子が細くなり効率が上るものと考えられる。従ってこのタイプの発煙炉の出力検定には、実際それが使われるのと同じ状態の気流を与えてやらねばならない。もしそれが過冷却雲中で起るなら、理想的にはその状態を作ってやる必要があ

る。

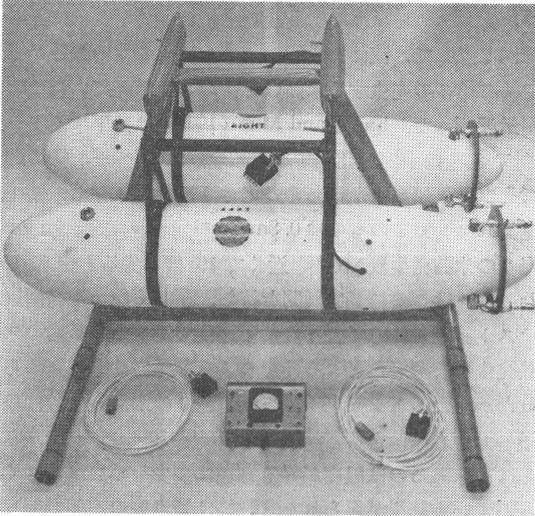
同じ意味で、流体力学的シミュレーションの失敗がドライアイスの発生する氷晶数をゆがめて伝えていたことが最近判った。Eadie and Mee (1963) は落下するドライアイスの小塊が発生する氷晶の数は 0°C から -8°C の間でその落下速度すなわちその大きさに強く依存し、落下速度 16m sec^{-1} のものは 0.8m sec^{-1} のものに比べ 1gm 当りの氷晶発生数が 0°C 近くで 10^5 倍も劣ると報告した。我々はこの結果に疑問を持ち、新しく作った発煙炉テスト施設を使って夫々の落下速度でドライアイスの氷晶発生数を調べたところ、そのような傾向は全く認められなかった。ドライアイス 1gm 当りの氷晶発生数は粒子の大きさにほとんど無関係に $10^{11}\sim 10^{12}\text{gm}^{-1}$ で、さらに興味あるのは温度が昇ると逆に多少その数が大きくなるという結果が得られた（詳細は筆者等の次報参照）。

プロパンやフロン-22はドライアイスと非常によく似ていて、どちらも 1gm 当り同程度の氷晶を出し、その数はドライアイスと同様あまり温度に依存しない。これらの物質の発生する氷晶数の温度スペクトルは大体第1図B型で代表される。

航空機用液体プロパン噴霧型氷晶発生装置が最近我々の研究室で開発され、アリゾナ州の種撒きテストで予期されたような結果を収めた（第3図）。その目的は第4図で示されるように、 -6.5°C にある氷晶成長速度極大を利用することである。氷晶成長速度は（1）式でみられるように C、すなわち大きさの関数で、 -6.5°C 極大をうまく利用するためには、そこへ達する迄に氷晶をできるだけ大きくしておく必要がある。そのため 0°C 近辺で多数の氷晶が必要で、それに液体プロパンの蒸発冷却



第4図 過冷却霧中で氷単結晶の質量。点線は（1）式で球形を仮定し得られた質量（どちらも種撒後47.5秒：Fukuta, 1969）



第3図 航空機用液体プロパン噴霧氷晶発生装置

効果を使用した訳である。その平なスペクトルから判るように、上層低温部へ気団が動いた場合種の撒き過ぎの恐れはなく、成長した降雪降雨粒子の落下速度は AgI エアセントパーナーの煙を撒いた時に較べずっと大きいことが期待される。

有機氷晶核はその研究が1960年代に急速に進んだが、その開発の現状を少しみてみよう。有機物の中には臨界核化温度だけでみたら有効なものはいくらかもある。しかし、そうかといって他の条件も満足していなければその実用開発は進められない。毒性が低いとか、値段が安いとか、工業大量生産が可能とかいった一般的必要条件の他に、1 gm 当り発生できる氷晶核の数が充分大きくなければならない。1 gm 当り 10^{10} コ以上の粒子を経済的に発生するには、噴霧、破碎といった所謂分散法 (dispersion method) は向かない。どうしても、一度蒸気にしてから煙粒子をその凝結で作る凝縮法 (condensation method) に頼る以外ない。しかしこの方法を使うと、メタルデヒド、フロログルシン、1,5-ジヒドロキシナフタレン以外の大部分の有機物が氷晶核としての性質を失なうことが判った。そのため開発は当然この3物質にしぼられた。尿素も一時話題に上った (Knollenberg, 1966 a,b) が、この条件を満足しないばかりか、実際砕いたものについてテストしてみると、氷晶発生数が低く実用には程遠かった。

有機氷晶核開発の技術上の難点は 1 gm 当りの核数がなかなか上らないことである。それは有機物では概して蒸気圧が高いので、急冷しても瞬間過飽度が AgI の場

合ほど昇らないのと、ケルビン効果による微粒子の蒸気圧の増加が大きいため、核化直後の微粒子が既に少し成長した大粒子に食われてしまうことによるらしい。他方、その効果のためスペクトルの低温部を形造ると思われる微粒子がなくなり、スペクトルの形が平になる傾向を示す (第1図C型参照)。これは氷晶核を含む気団が温度の低いレベルへ上った時、撒過ぎになるのを防ぐので好都合の点でもある。有機氷晶核煙の発生機構とできた煙の性質は基礎的にも応用的にも興味ある問題である。有機氷晶核に共通なもう一つの点は焰の中を通ると分解してしまうことで、この問題に対して筆者等は、冷たい空気中へ有機氷晶核粉を分散させるか、あるいは水などの不燃性液体中へ懸濁噴霧し、その液体の蒸発によって有機物を蒸発させる高温気体を適温にさげ好結果を得ている。

第5図は航空機用メタルデヒド発煙炉をつけたセスナ180型機 (Fukuta, 1967 a) で、そこで使われた発煙法の原理は Cab・O・Sil という微細酸化珪素で流動化されたメタルデヒドの粉末を、飛行機の排気中へ空気吹きとばして導入蒸発し、これを外の気流中で急冷凝縮する方式である。4回の夏型積雲への種撒き中、2回ははっきりしたレーダーエコーが出、そのうちの1回、 -2°C の高度で雲をつら抜いて撒いた時出たエコーは $10 \times 12\text{km}^2$ に達した。

氷晶核の開発に携さわる時、理解していなければいけないことは、一つの核物質でできる範囲がその物理、化学的性質できまっていて、その好都合、不都合な性質はよくその物理、化学的性質の裏と表になっていることである。無理にある性質を改良しようとしても、できなかつたりできても別の不利点が強調されてきたりする。従って、もともとそういう性質をもった核物質を開発使用の方が望ましい。これはいいかえると、いろいろ道具を持ち、それを異なった目的で使うように、異なった数種の氷晶核発煙炉を開発し、目的に応じ、条件に応じて使いこなすのが将来のその望ましい方向と考えられる。

氷晶核発煙炉に関する将来の問題点は、地上発煙の場合異なった発煙炉の自動化、空中発煙ではその簡単化と規格化、出力の連続および遠隔コントロールであろう。

測定器

雲とそれを取りまく雲囲気を調べるにはその中へ入って行なう近接的方法と、外から行なう遠隔的方法がある。後者はレーダー法 (ドップラーレーダーを含む) のように巨大粒子の挙動を調べるもの、ライダー (lidar)

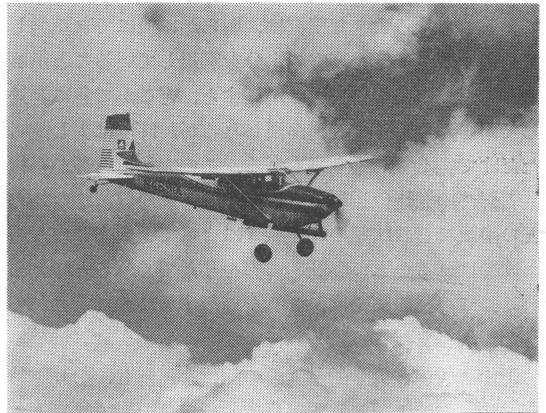
等のように雲団気中の水蒸気量とか粒子の状態を調べるものである。近接の方法は雲の微物理の発達に伴ない開発されてきたが、雲水量、水滴の粒度分布、氷晶の数濃度、形と大きさ、質量、氷晶核濃度、乱流の強度、上昇および下降気流等が一般の気象観測データと共にその対象となる。

この中でもごく初期から重要性が認められ、観測されてきて問題の特に多いのが氷晶核の測定である。自然氷晶核の濃度は時間的・空間的に変り、それ自体活性度の温度スペクトルをもち、その働く機構も一つはでないことが判っているので、一つや二つ測ったとてあまり意味をなさない。その測定には有意義な活性法を使って、連続あるいは断続的に多数の測定点を出す必要があり、その気団の経歴、氷晶核の空間分布等も問題の雲に関して調べなければならない。そこにはデリケートな問題があまりにも多く、それを網羅することは紙数が許さないので省くが、この観点から自動連続カウンターの重要性が理解される。日本では名古屋大学、気象研究所等で開発された連続あるいは断続カウンターがこの条件を満たす。米国では氷晶核上に成長した氷晶が毛管中を通る時発する音で検出する式の NCAR カウンター、連続高速断熱膨張と偏光による氷晶検出を使う MRI カウンター (Fukuta and Kramer, 1968) および過冷却砂糖溶液上に成長する氷晶の自動検出を用いる我々の研究室の新しいカウンター等がこの部類に属する。これら三つのカウンターはどれも航空機搭載可能であるが、特徴がそれぞれちがうので注意を要する。

将来の測定器の開発方向は、それが正しくデータを記録しているかといった基本問題の他、自動化と連続化、および航空機その他への搭載という点にあるとみられる。新しいアイデアの導入される可能性とその必要度が高い。

3. 雲力学と微物理の相互作用

夏季に行なわれるアリゾナ州の人工降雨実験に参加し、雲の発達状態を観察してみると、日本のように地形の起伏の多い、常時湿度の高いところではあまり知られていない現象に気がつく。広く平で、標高2.3kmの台地では、早朝雲一つない快晴の空を認めても、9時頃からぽかっとひとつ積雲のはしりが出かけ、11時頃にはその数と大きさがかなり増加し、午後の1時から3時頃になると大抵一つか二つはきり雨足を垂らしている積乱雲が認められるようになっていく。これはもちろんその時の気象条件に大きく左右されるが、その数多くの積雲中



第5図 セナス 180 型機に取り付けたメダリドヒド試験発煙炉

から雨をもたらす積乱雲が生れるには、そこにそのきっかけがある訳で、その発達のきっかけを種撒きで生ずる氷晶が成長する時発生する潜熱で作り、メソスケールの降雨を作り出そうという試みが同州フラッグスタッフ市で行なわれてきた。一つや二つの積雲から仮に水分を地上へ降したとしても大して役立たないが、こういう乾燥地帯の雨の大部分を補給しているメソスケール積乱雲群を作り出すことができれば、その意義は大きい。そこでは雨の価値が違う。

この目的の種撒きを行なうにはまず積雲発達の正確な理解が必要であるが、この実験では Weinstein-Davis (1967) 型の1次元モデルを使って、その時の sounding のデータからその日の積雲状態が予言される。この雲モデルでは、雲が発生する時の凝縮潜熱により気団が軽くなり、そのため加速されて上へ発達する状態を取り扱われる。この時周りの空気の影響も考慮に入れられるが、雲頂の位置は加速された雲が上昇し周囲の空気と浮力的に釣り合う点を通りこし、速度を失なって止まる点で定義される。種撒きの効果はこのモデルを使う場合、核の導入による氷晶化の程度を高さの関数で仮定し、その時の気象条件で雲頂の変化を調べることによってなされる。もちろん種撒きの狙いは、雲をより強く加熱し、雲頂を上げそのためそれが持続性降雨機構を内蔵するメソスケールの積乱雲群に発達し、補った氷晶核にその降雨も促進させようという点にある。上述の液体プロパン噴霧氷晶発生装置は主として、種撒き後発達した雲中に撒過ぎを起さずまた初期の加熱を最大にする目的で開発されたものである。

微速度映画で自然積雲の発達の場合を観察すると、後で発達してくる大きな積雲は、明らかに前にでき蒸発して消えた雲が残した高空の水分を利用していることが判る。段々雲の密度と大きさが増すと、どこかで急に発達して雨を降らせる積乱雲が現われるが、時には少し降っただけで止んでしまう事もある。この大型積雲群から積乱雲群への発達の過程の理解がこの実験の鍵、すなわちどの場所でどの状態の時種撒きによってその発達のきっかけを作れるかという問題に答を与えてくれると考えられる。この種の実験は、これを理解する事に集中されてきたが現在まだ答は得られていない。

雲の微物理と力学的挙動との関係を理解し、それを積雲、積乱雲およびそれらが構成する各種の嵐の描写とコントロールに応用する分量は歴史が浅いが、今後非常に重要な発展をすることが予想される。降電の抑制や台風への制御もこの分量の発展によって進歩をみせるだろう。

4. あとがき

ひと口に人工増雨といっても最近の科学的レベルは高く複雑で、その概要を一応ざっと説明する予定であったが、予期したより長くなり、そのため暖かい雲に関する人工増雨研究の説明は省かざるを得なくなってしまった。筆者の専門分野ということもあって、説明が雲物理に偏したきらいはあるが、気象制御の分野ではこの傾向が益々強くなりつつあることも事実で、この分野は今後雲の微物理と力学的挙動を含めた気象の要素との相互作用を明らかにしつつ、種散きの最適条件を探す方向へ進むものとみられる。

なおまた、分野がこのように複雑化し、新しい技術用語が沢山現われると、改めてその統一をはかる必要があることをここに指摘しておきたい。第2および5図の写真は Bureau of Reclamation から提供されたもので、ここに謝意を表する。

引用文献

- Eadie, W.J., and T.R. Mee, 1963: The effect of dry-ice pellet velocity on the generation of ice crystals. *J. Appl. Meteor.*, **2**, 260-265.
- Fletcher, N.H., 1962: *The Physics of Rainclouds*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Fukuta, N., 1967a: An airborne generator of metaldehyde smoke. *J. Appl. Meteor.*, **6**, 948-951.
- Fukuta, N., 1967 b: Review of physics of ice nucleation and its application to weather modification. Final Rept. to Bureau of Reclamation, Denver, Colo., P.O. 7-D-3053 and P.O. 7-D-4133. (MRI 67 FR-497)
- Fukuta, N., 1968: Some remarks on ice nucleation by metaldehyde. *Proc. International Conf. on Cloud Phys.*, Toronto, August 26-30, pp. 194-196.
- Fukuta, N., 1969: Experimental studies on the growth of small ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 522-531.
- Fukuta, N., and G. K. Kramer, 1968: A fast activation continuous ice nuclei counter. *J. Research Atmos.*, 169-173.
- Fukuta, N., and L.A. Walter, 1970: Kinetics of hydrometeor growth from a vapor-spherical model. (Accepted for publication in *J. Atmos. Sci.*)
- Grant, L.O., 1968: The role of ice nuclei in the formation of precipitation. *Proc. Internat. Conf. Cloud Phys.*, Toronto, August 26-30, 305-309.
- Grant, L.O., C.F. Chappell, W.E. Shobe, L.W. Crow, H. Stockwell, P.W. Mielke, Jr., R.A. Wykstra, and J.L. Rasmussen, 1969: An operational adaptation program for the Colorado River basin. Interim Rept. for the Bureau of Reclamation under Contract No. 14-06-D-6467.
- Hobbs, P.V., 1969: Ice multiplication in clouds. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 315-318.
- Hobbs, P.V., L.R. Radke, J. Locatelli, C. Robertson, R. Farber, and D.A. Burrows, 1970: Studies of artificially seeded and unseeded winter storms over the Cascade Mountains (1969-1970). Rept. to Bureau of Reclamation under Contract No. 14-06-D-5970.
- Knollenberg, R.G., 1966 a: Urea as an ice nucleant for supercooled clouds. *J. Atmos. Sci.*, **23**, 197-201.
- Knollenberg, R.G., 1966 b: A note on a universal solid reagent seeding unit. *J. Appl. Meteor.*, **5**, 897-899.
- 駒林 誠, 1968: 雪の結晶と大気物理学, 科学, **38**, 239-246.
- Komabayasi, M., 1968: Shape instability of crystals of ice, carbon dioxide and ammonia grown in a cold chamber. *Proc. Internat. Conf. Cloud Phys.*, Toronto, August 26-30, 260-264.
- Kuroiwa, D., 1958: Icing and snow accretion. Monograph No. 6, *Res. Inst. of Applied Electricity, Hokkaido University*, 1-30.
- Marshall, J.S., and M.P. Langleben, 1954: A theory of snow crystal habit and growth. *J. Meteor.*, **11**, 104-120.
- Mason, B.J., 1957: *The Physics of Clouds*. London, Oxford University Press.
- Mason, B.J., 1962: *Clouds, Rain and Rainmaking*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Mossop, S.C., A. Ono, and K.J. Heffernan, 1967:

人工降雨の現況

- Studies of ice crystals in natural clouds. *J. Recherches Atmos.*, **3**, 45-64.
- Mossop, S.C., 1968 a: Comparison between concentration of ice crystals in clouds and the concentration of ice nuclei. *J. Recherches Atmos.*, **3**, 119-124.
- Mossop, S.C., R.E. Ruskin, and K.J. Heffernan, 1968 b: Glaciation of a cumulus at approximately -4°C . *J. Atmos. Sci.*, **25**, 889-899.
- Mossop, S.C., and A. Ono, 1969: Measurement of ice crystal concentration in clouds. *J. Atmos. Sci.* **26**, 130-137.
- 小元敬男, 1970: 米国およびソ連における気象調節研究, 天気, **17**, 301-309.
- Schaefer, V.J., and R.J. Cheng, 1968: The effect of the nucleus on ice crystal structure. *Proc. Internat. Conf. Clouf. Phys.*, Toronto, Aug. 26-30, 255-259.
- Smith, E.J., J.A. Warbourton, K.J. Heffernan, W.J. Thompson, 1966: Performance measurements of silver iodide smoke generators on aircraft. *J. Appl. Meteor.*, **5**, 292-295.
- 土屋 巖, 1970: 気象制御・気候改造, 気象研究ノート, No. 104.
- Veal, D.L., A.H. Auer, Jr., and J.D. Marwitz, 1969: Information Circular No. 59, Natural Resources Res. Inst., Univ. of Wyoming.
- Weickmann, H.K., U. Katz, and R. Steele, 1970: AgI-sublimation or contact nucleus? *Proc. Second Nat. Conf. Weather Modif.*, Santa Barbara, April 6-9, 332-336.
- Weinstein, A.I., and L.G. Davis, 1967: A parameterized numerical model of cumulus convection. NSF Rept. No. 11 NSF GA-777, Dept. of Meteor., Pennsylvania State University.

学術会議会員候補者推薦選挙告示

昭和46年には、第9期学術会議会員選挙が下記により行なわれますので、別記の次第に則り気象学会の推薦者を行なうための選挙を行ないます。

記

1. 候補者受付期間 7月11日～25日
2. 投票期間 11月25日までに到着のもの

別記

1. 立候補および候補者推薦の届出
 - イ) 候補者の資格：昭和46年4月1日現在気象学会員で、かつ学術会議選挙有権者
 - ロ) 届出方法：立候補者はつぎの書類を付して、日本気象学会選挙管理委員会に届ける（郵送可）
 - i) 候補者氏名、生年月日、主な勤務機関、卒業学校名、年次、種類（全国、地方区）本人が登録した専門別第○部□□学、住所。但し、地方区は支部の推せん者を学会推せんとする。
 - ii) 推せん者があれば推せん者名（学会員のみ）
 - iii) 候補者の所信と抱負（400字以内）
 - ハ) 届出締切：昭和46年4月3日（土）
 - ニ) 宛先：千代田区大手町1-3-4 気象庁電子計算室気付 日本気象学会選挙管理委員会
 - ホ) 候補者の公示

天気4月号に折り込む投票用ハガキに記入

2. 投票

イ) 投票者資格

昭和46年4月1日現在の通常会員

ロ) 投票しめ切り：昭和46年5月28日（金）

3. 開票および推せんする候補者の決定

イ) 開票期日：昭和46年5月29日（土）

ロ) 推せんする候補者の決定

i) 全国区 上位2名中、1位を専門別（地球物理）に、2位を専門にかかわらない候補者に推せんする。（2名連記）。

ii) 地方区 各支部の決定にまかせる。気象学会に要望あったものは気象学会の推せんとする。関東中部地方区は常任理事会が代行する。

ハ) 開票結果の告示：天気6月号に掲載

昭和45年12月1日

日本気象学会選挙管理委員会

（委員長）窪田 正八

（委員）安藤 隆夫、浅田 暢彦、大河内芳雄、北出 武夫、新田 勲