

実験気象学 (主として雲物理学) の国際討論会に出席して

山 本 義 一

(昨年 11 月 19 日大阪の人工降雨連絡会で 1954 年 10 月 4~6 日 Zürich の高等工業学校で行われた雲物理学シンポジウムの概況を報告したが、この小文は気象研究所の杉山氏がそれを速記して下さったので、それをもとにして新たに書直したものである。)

§ 1. 講演目録

討論会は 10 月 4 日 9 時 30 分、嘗て Einstein も教授をつとめたことのある由緒ある Zürich Technische Hochschule の講堂で、同校の教授で、このシンポジウムの会長でもある、Sänger 博士の開会の辞に始まり、

H. Dessens, (Obs. du Puy-de-Dôme) : Quelques theories de la nucléation des nuages soumises an contrôle experimental.

B. J. Mason, (Imperial College, London) : The physics of rain and hail formation.

の 2 つの総合報告が午前中にあり、午後は

H. R. Byers, (Univ. of Chicago) : Geographical differences in Cloud populations.

W. Rau, (Max Planck Institute f. Physik d. Stratosphere, Weissenau) : Wirkungsbereiche und Haufigkeit der naturlichen Gefrierkerne.

O. Vittori, (Obs. Meteor. Aeronautics, Monte Cimone, Italia) : Determination de la nature chimique des aerosols.

G. Soulage, (Obs. du Puy-de-Dôme) : Etude experimentale des noyaux glaciogènes naturels.

G. Yamamoto, (Tohoku Univ. Japan) : On the initial stage of ice crystal growth.

と主に基礎的な分野の研究発表があった。第 2 日目には

E. M. Fournier d'Albe, (Geophys. Obs. Quetta, Pakistan) : Giant hygroscopic nuclei in the atmosphere and their role in the formation of rain and hail.

M. Bossolasco, (Istituto Geofisico Italiano, Milano) : Le rôle de la temperature dans la genése des precipitations solides.

L. Facy, (Meteorologie Nationales, Paris) : La capture des noyaux de condensation par chocs moleculaires au cours des processus de condensation. Conséquences meteorologiques et applications pratiques.

H. G. Müller, (Deutscher Wetterdienst, Aerologische Station, München) : Die Zustandswerte in der freien Atmosphäre bei Schauerniederschlagen.

C. G. Rossby, (Univ. of Stockholm) : Some charts of rainwater analysis.

R. J. Murgatroyd, (Meteor. Research Flight, Farnborough, England) : Cloud physics investigation by the meteorological research flight.

G. Fea, (Ministero Difesa Aeronautica, Roma) : Sur la détermination du contenu liquids des nauges.

H. Koschmieder, (Technische Hochschule, Darmstadt) (H. Tippelskirch 氏代読) : Konvektionszellen in flüssigen Schwefel.

と基礎研究の発表が続き、第 3 日目は応用研究の発表で

V. J. Schaefer, (Munitalp Foundation U.S.A.) : Jet streams, thunderstorms and Project Skyfire.

F. H. Ludlum, (Imperial college, London. 目下 Sweden で研究中) : The problem of planning and assessing seeding experiment, (including some new wark on the formation of hail.)

E. Bollay, (North Ameican Weather Consultants, Calif.) : Experimental results in commercial cloud seeding.

各々の講演の概要は Bulletin de L'observatoire du Puy-de-Dôme, No. 3, 1954 に掲載されているから参考とせられたい。尚スイスの気象学雑誌, Archiv f. Meteor. にもものる筈である。

§ 2. 印象に残った基礎研究

ここでは私の印象に残っている二三の講演にのみ言及する。Rau の講演は最も烈しい討論をまき起したものであったから一応その概略を述べよう。Rau は実験室内で空気中に存在する凍結核の数を、凍結を起す温度の函数としてしらべた。彼はこれを Gefrierkernspektrum とよんでいるが、それによると零度以下になると既に凍結核があり、 -4° 、 $-11^{\circ}\sim-12^{\circ}$ 、 -19°C の3つの温度でスペクトラムに山があらわれる。実験条件を変えても、凍結核の数は変るが、数の極大を示す温度は変らないことから、彼はこれらの温度は客観的のものである、つまりそれらの温度で氷の構造に変化があることによるものであろうと推定した。いわばこれらの温度は Rau 流の臨界温度であることに注意しておこう。(この点大阪の講演を訂正しておく。)しかし同時に Rau はこれらの温度で氷の構造が如何に変るかということには何等触れ得なかつたことも注意しておく。更に Rau は、ずっと温度が下って、 -70°C 付近になると如何なる場合も氷晶のみが出来ること、逆にいえばそれ以上の温度では過冷却の水の存在もありうること、及び -70°C 以下の氷晶は cubic crystal であること等既に発表〔1〕したことを改めて確認した。

さて Rau の講演に対する討論は Ludlum の質問から始まった。Rau の Spektrum によれば大気中では $0^{\circ}\sim-4^{\circ}\text{C}$ の間でも氷晶が出来ることになるが、その origin になる核はどのようなものかという質問であったが、それに対する Rau の返事は遺憾ながらよく理解出来なかつた。次いで Mason が立て、 -70°C まで過冷却の水がありうるという点については既に二三の人達〔2, 3, 4〕が追試してもうまく行かなかつたので、その実験方法を詳細に説明してほしいということからはじまり、これに Ludlum が加勢して、噂にきいていた外国の学者の猛烈な論戦が展開された。岡目八目、私の印象では討論は英国側に分があるようであったが、Rau もさる者で、最後までとも角切り抜けて、結論としてはごく瞬間的なならそのような低温でも水の状態もあり得るだろうということに一応落着いたようであった。更にそのあとでスイスの M. de Qurvain (Davos の Weissfluhjoch の雪及び英崩研究所長)より Rau の -70°C 以下の氷晶及び Yamamoto の Ag_2S を核とした四角な氷晶は果して結晶構造まで hexagonal でないかどうかの質問があつたが、私はその点は未だ確認してない旨返事した。(この点は私共も研究の当初から疑問と興味とをもっていた点で、帰国後偏光顕微鏡によって吟味している。近い将来に結果を発表出来ると思っている。)

私も臨界温度について質問したかつたが、会場で十分議論するだけの語学の自信がなかつたので、宿屋の食堂で Rau, Weickmaun らと一緒になつたときこの問題

をもち出してみた。それに対する Rau の返事は、従来伝えられている臨界温度は使用した霧函、その冷却速度、内部にとつた空気の汚れ等に関係し、それらの条件を変えると異なつた結果が得られるので、それらは水又は氷の特性に基くものとは考えられないということであつた。当時私は Rau の講演がドイツ語であつた為十分理解出来ず、従つて上述の Rau の返事は総ての臨界温度を否定するものと解釈したのであつたが、其後 Bull. de L'observatoire de Puy de Dôme の記事を参照しつつ当時の講演を思い浮かべると、Rau は -4 、 $-11\sim-12$ 、 -19°C はある意味での臨界温度と考えているようであり、それらよりは低温の、例えば、 -32°C 、 -40°C 等を否定したもののようである。

其後 London へ渡り Imperial College を訪れた際に Mason の意見をもきいてみたが、彼は -40°C 付近のみは氷其物の特性に基いた critical なものと考えているが、それ以外の総ての臨界温度と考えられているものは否定するという見解をとつていた。Mason が -40°C を残している理由は、 -20°C 以下では水滴は凍結核の助けをかりる必要はなく、殆んど spontaneously に凍るといふ Bigg〔5〕の結論と、 -40°C 付近で純粋の水が凍る確率が急増するという彼自身の理論〔6〕に基くものであるが、彼のこの理論が不完全なものであることは秋田大学の大内氏〔7〕が既に指摘された処であり、従つて -40° に対する Mason の見解にも必ずしも同意出来ないように思う。これを要するに氷晶の生成に関して水に特有な臨界温度があるという考えには相当疑問の点が多く、これに関する外国の学者の見解も未だ十分固まっていないようである。

外国へ行くに彼我の比較といったようなことが日頃より強く意識にのぼってくるのは誰しものようである。そこで cloud physics の分野をくらべてみると凝結核や凍結核其物の研究についてはわが国では電子顕微鏡を駆使することによって欧米に優るとも劣らない成果をあげているが、凍結機構の研究の方は嘗ては中谷教授の優れた研究があつたにも拘らず、今ではすっかり立ち遅れてしまった感がある。その主な理由は戦後急速にこの方面が発達した頃わが国では必要な実験装置を備へる余裕がなかつたことによると思われるが、幸いにも、私が見てきた範囲では、例えば現在この方面で最も成果をあげている London の Imperial College の実験室に於いても、われわれの経済力では及び難いような高価な、或いは大規模な実験施設はもっていないようである。従つて今後研究を進めるに当つて、あまりあせつて彼等が下した解釈や結論を前提として新しい研究を企劃するのではなく、少し迂遠のようでも彼等の実験の不備な点、疑問の点を自らの実験で確かめることから出発して、彼等の解釈、結論を十分吟味し批判し、その上に立つて新しい

研究を進めるように心懸けるならば立ち遅れをばん回することも左程困難ではないと信ずる。

話を講演の方へもどして Rossby の研究について述べよう。これは雨量計にたまる雨及び塵埃の化学分析をしたもので、それだけではありふれた研究にすぎないが、Rossby は気象学者としての感覚から、これを Sweden の全観測所で行い、大気の大塵物の Synoptic chart を作り、その地域による特性、気象状況の影響等をしらべた点に興味があった。但し Facy が討論のとき指摘したように、測られたものが雨、塵埃等の複合物に含まれた化学成分なので、直接降水機構に貢献する処は少ないものと考えられる。

Ludlum は Sweden の田舎で雲の高さ、厚さ、大気の大気温度分布等を観測し、一方雲の連続撮影を続けている。そして Sweden では左程厚くない雲で -4°C 以上の温度のものからも屢々雨が降ってくることを見出した。つまりこれまでの降雨理論では説明し難い雨である。しかし Rau が実験室内で認めたように、polar air の中には -4°C 以上でも凍結核があることが事実なら、これ等の雨も一応 Bergeron の理論で説明出来ることが討論のとき指摘された。

§ 3. 応用研究 (主としてアメリカの人工降雨会社の実状について)

Schaefer は目下アメリカで行われつつある人工降雨の新しい応用としての、落雷による山火事の防止について述べた。沢山の映画を使つての講演でこの研究が非常に大規模に行われていることは判ったが、その成果はもう少し将来にならないとはっきりしない様子である。

次に North American Weather Consultants (主に人工降雨の請負を仕事とする会社) の Bolly から米国の commercial cloud seeding の成果につき講演があった、この方面の実状がわが国に殆んど知られていないので、少し詳しくこの講演を紹介することにする。

先ず Bolly は何故アメリカが人工降雨に熱心なのかということから説き起したが、それはこうである。合衆国の全面積の 1/3 が荒蕪地であるが、その多くは若し灌漑が可能ならば農耕地となしうるものと信ぜられている。例えば南北ダコタ州、ネブラスカ州などの乾燥地にもし 10% の降水量の増加があったとしたら、それらの土地の価格は 50% 騰貴することが推定され、又カリフォルニア州の現在灌漑されている農地であっても、もし 10% の降水量の増加があれば、150,000 エーカー当りの年間の農産物収入の増加は \$ 1,250,000 に達するだろうと見込まれている。

さて人工降雨の研究では飛行機から雲中に dry ice を撒く方法が有力とされているにも拘らず、アメリカの営利的な人工降雨の方法は矢張り地上から沃化銀煙を放射する方法をとっている。勿論飛行機も使っているが原則

としては地上発射法なのである。又沃化銀煙の発射法も AgI の Aceton 溶液を Propane Gas で燃やすという当初の方法により意外な程簡単な装置でやっている。ただ人工降雨の成否は適当な沃化銀煙を作ればこと足りるという性質のものでなく、問題は寧ろその後によくあるのであって、それらの点についてアメリカの Rain-maker がどのような苦心を拂っているを Bolly の講演によりたどってみよう。

沃化銀煙の氷晶核としての有効さは紫外線、湿度などの影響を受けることが知られてきたが、最近の Bolton と Qureshi [8] の研究によると温度が減衰を支配する一番大切な要素で、高温のものとしては減衰が早く、例えば $+30^{\circ}\text{C}$ の気温のものでは沃化銀煙の氷晶核としての能率は 30 分間に 1/10 におちるとのことである。Bolly 等はこの結果に基づき、 15°C 以上の状況で地上発射をする場合は目標地域に近づけて行わねば効果がないこと、これに反し冬季は沃化銀煙の効果が長持ちするので、風下広範囲にききめがあることを発射の場合のよりどころとしている。次に沃化銀煙の拡散の問題については Braham, Seely, Crozier [9] の研究に基づき、水平拡散は 30 哩風下で約 15 哩の幅に煙が拡がり、高さについては 8 哩風下で 5000 呎の上空まで有効に拡がるという結果を大規模拡散の目安にしている。

又沃化銀煙を飛ばせるべき雲としてはその温度が -5°C 以下 -15°C までのものを目標とする。これは -15°C 以下の雲中では大気中に既存の凍結核が有効に働くという考え方である。(この点は Bigg や Rau の研究結果からすると -20°C までの雲を対象とした方がよさそうだ)

又雨を降らせる為の雲中の凍結核の最適濃度としては Kampe, Weickmann [10] の評価に基づき $10^3 \sim 10^4$ 箇/ M^3 を採用している。さて上述 Braham らの研究では source strength 3×10^{11} 箇/秒 で煙を出した場合風下 10 哩の地点で大気中の平均粒子濃度は 200 箇/ M^3 であるから、source strength が $10^{11} \sim 10^{12}$ 箇/秒の沃化銀発射装置を使った場合 10 哩風下では大気中の沃化銀濃度は $10^3 \sim 10^4$ 箇/ M^3 の最適値になる。Bolly の装置では 1 分間に 0.1 g の沃化銀を燃やすことによって 10^{12} 箇/秒の source strength が得られる。

これらの各種の目安により 1 台の発射装置の有効目標区域は大気風下の 30~50 哩、幅 15~30 哩の範囲と概算され、目標区域の大きさに応じて何台もの装置を適当に分布した網目を作って実施している。

人工降雨の効果の判定法は沃化銀煙を飛ばす目標地域 (Target area) と、それに隣接して気象条件はほぼ同様であるが沃化銀煙の作用を受けない照査地域 (Control area) とを選んで、両地域の過去の降水量の相関曲線を予め求めておき、人工降雨実験を行った年の

両地域の降水量の関係がそれからどれほど deviate しているかを調べるという最も簡単な regression method によっている。North American Weather Consultants では過去 4 年間に合衆国の西部及び中部の各地で延 50000 時間を越える実験を行ってきたが、その平均の成果は上記判定法によると約 20 % の降水量の増加をもたらしたと推定される。

尙 Radar をうまく利用すると、即ちトラックにのせた移動式 Radar によって途中の自然の雨で遮蔽されないような適当な地点を選ぶと、目標地域の雲からの降雨を観測することが可能となり、これは沃化銀煙の作用状況をしらべる上に甚だ有効なので、昨年 Radar による観測を行っている。又沃化銀煙の発射方式としては連続発射よりも脈動的発射の方が効果があることを経験的に見出した。その理由として考えられることは脈動的発射による濃度の変化に富んだ沃化銀煙が雲へ入って行くことになり、その結果雲に対する氷晶核の最適濃度を作り出す可能性が増すこと、及び自然其物が、特に対流雲が脈動的様相を呈していることなどである。現在最も多く用いている脈動週期は 15 分間に 3 分づつ沃化銀煙を放射することの繰返しである。

以上が Bolla の講演の概要であるが、これを要するにアメリカのように金持ちの国でも営利事業となると極力合理化をはかっていることが注目をひく、例えば経済的に有利な地上燃焼方式をとっていること、しかも発射装置はごく簡単なものを用いていること、及び効果の判定法は統計的ではあるが計算に過大な労力のいらぬ方式をとっていることなどである。しかも発射した沃化銀煙を効果あらしめるために基礎研究にも万偏なく注意を拂い、新しい成果は早速採り入れて増雨効果の向上に資していることはわれわれが参考とすべき点であろう。

Bolla の講演について Fournier d'Albe (UNESCO の費用により目下 Pakistan へ行っている) が Pakistan で行っている熱帯地方の雲に対する食塩の細粉をまいての人工降雨の講演があった。これも地上に塔を立てて、其処から撒布するのであるが、その成果は未だまともでないようであった。

以上で 3 日間に亘っての研究発表は終り、最後に人工降雨の有効さについての討論があった。先ずアメリカの Byers から大統領の諮問機関として 5 人の委員からなる Advisory Committee for Weather Control が出来たが、そこでは当初人工降雨の有効さについて全く白紙の態度から出発し、国の内外の情報を集めて検討し意見を立てることになっているので、特に国外の情報を歓迎するとの事であった。人工降雨の将来性については色々意見が発表されたが、それらを総合すると同じ Byers の言葉「科学の発達の史的考察はわれわれを人工降雨の問題についても樂觀的見解に導く、しかしこの問題は世

間に与える影響が大きいだけにその効果の判定についてはわれわれは出来るだけ科学的な、そして慎重な態度をとるべきである。」が大多数の討論者の意見でもあった。

§ むすび

今回の Zürich のシンポジウムはその直前に行われた Rome の IUGG の総会にくらべると、後者が幾分お祭り騒ぎの華かなものであったのに対し、講演者もきき手も熱心で討論も活潑であった。これは IUGG の総会が 2 週間の長きに亘り、参会者も圧倒的に多かったのに対し、Zürich の会議は 3 日間で参会者も 50 名位であったことが関係しているように思える。学術的討論会は小ぢんまりした部屋で比較的小人数で行う場合に一番効果があがるようである。ただ今回のシンポジウムでは副期的な研究の発表はなかったことは残念である。又応用研究の方でも、飛行機から dry ice を撒く方法で現在最も成果をあげているオーストラリアの研究の実状をきけなかったのは物足りなかった。それにつけても、せめて討論のときにでも、飛行機から dry ice をまく方法と地上から沃化銀を放射する方法との利害得失についても外国の研究者の意見をきいてくればよかったと今になって後悔している。不思議とこの点は何等討論の対象にならなかったし、私もその当時は全くうっかりしていたのであった。

この点については確かアメリカの気象学会(?)の検討であったか、法の優位、或は沃化銀法に疑問の点があることを述べた報告を見たことがあるので、地上燃焼法に頼らざるを得ないわが国としてはその効果の判定を一層科学的にやる必要があると思う。わが国のこれまでのやり方は、国が狭いので無理もないが、目標地域と照査地域の区別が判然としないような発射方式をとっていたので、徒らに判定法を難しくしてしまった傾向がある。この点もっと考慮する必要があるはしないだろうか。

次にわが国の初期の研究で努力が傾倒された個々の case に対する増雨効果を吟味するというやり方が、効果は統計的にしか判らないという見解に圧せられて、ここ 1, 2 年来気象学者の個々の case に対する興味が薄れてきたことは、いささか憂をつついて蛇を出した感がしないでもない。もとより人工降雨の最終的判定は 5 年乃至 10 年の data を集積した上統計的調査によるより他に良策はない。しかし仮りにこれまでの結果からみて効果ありと仮定しうるならば、個々の case についての研究を更に進めて、どのような気象状況の雲に対し有効か、又は有効でないかを吟味することは、人工降雨の研究上一番大事なことである。Bolla 氏の講演はこの点について教訓的であり、もし移動式 Radar の使用の路がわれわれにも開かれるならば、人工降雨の効果の増大に有用であるばかりでなく、雲其物の研究にも大いに役立つだろう。(東北大学) (参考文献は 26 頁に)

書 評

天気予報三十年 大谷東平著
新書版 250頁 130円
法政大学出版局 1955年初版

“予報屋のたわごと”，“気象人の生活”，“気象物知り帖”，雨乞いから人工降雨まで，“生活と気象”の5部から成る。多忙な日常の間に書いた軽いものも多いが、やはり台風と取り組んで30年の経歴から生れた意見と議論、例えば‘予報官の怒り’、‘台風予報の敗北’などが最も迫力もあり個性が出ていて読ませる。満州放浪中の感情がちらりとのぞいている‘お水取りと春のさきがけ’、簡潔な筆ながら日本の秋の気候を見事に描写した‘秋空’に著者の心境がうかがわれるけれども、他の項目にももっと感情を入れてもよいと思う。もっとも故土佐林氏を憶う‘お前と俺の25年’、気象界を去る人々を画く‘見返る柳’にこまやかな感情が滲み出ている。ラバウルの難飛行‘止風線に突っ込む’は実に面白い読物で、もっと書いて欲しかった。第3～5部に見られる広い見透しと見識は感歎のほかはないが、中でも‘天皇と津波’、‘列車内の気流’がよい。気象人ならば読み出したら止められぬ好著。各項に掲載日付を入れれば著者の思考のあとを追って行けるから好都合とは評者同僚の言。(佐貫亦男)

後氷期の世界 湊 正雄著 B6—219頁 280円
1954年6月 築地書店

本書は氷期と後氷期に関係した問題を興味深くのべたすぐれた解説書である。

北欧では最近後氷期の問題を地質学者だけでなく、広く気候学、測地学などをはじめ、地球物理学、地形学、土壌学、あるいは生物学、人類学、考古学などの分野の人たちが協力してとり上げ、着実な研究を進めている。日本でも第四紀研究連絡委員会などが、この方面の研究をとり上げはじめ、とくに火山学方面の人たちがこの方面の研究とむすびついてかなりの成果をあげている。各方面の研究の持ちよりと、総合がどのような学問的成果となってあらわれるかということを知り得る。

日本アルプスや北海道の山々に残る氷河地形の山相や、日本列島周辺の陸棚にみられる海底谷の問題など、氷期と後氷期の解氷の現象にかたく結びついた問題なのである。「地層学」などの名著によって知られた著者はバルト海沿岸の土地の隆起の問題から説き起し、ちやうど沢山の手がかりから最後の結論を推理してゆく探偵小説的手法で、興味深く日本の問題にもメスを入れてゆく。気象学を学ぶものにも、この書物によって容易に気象学に隣接した学問の総合的な探究の方法を学ぶことができるので、一読して参考になる点が多い。(J)

大空の科学 伊藤暹自著
A5 190頁 290円
1955年 同和春秋社

気象関係の著書が数ある中で本書は大空というテーマの中に萬象を把握しようとする冒険を試みて、成功している本である。「皆さんじっと大空を見つめたことがありますか」と冒頭に読者層を少年少女にしぼって書き出し、「雲に関する学問は今まで長年かかって行われてきた単なる分類や観測だけでは解決のつかないところにきているようです」と締めくくっているところを見ても、著者が最初、中学生あたりを念頭に置いて書き出した内容が、途中から相当な高い学問の内容に及んでいるむきがある。大空の形から、飛行機、気球の発達史、風船爆弾、水爆の実験、大気の構造、空の色、空気のあわ、にじの話、空気の成分、日がさ、月がさ、雲の形、本の名に及んで筆を止めている。纏め方もうまいし、一番近より易く感ずるのは豊富に使用している写真や挿絵である。べらべらうまくっていても充分楽しめる本である。だがこの本の内容がこのまま子供達の頭に受入れられるかといわれるといささか疑問がないでもない。これでも子供達にはまだむずかしいと思われる。この本は子供達より、先生か父兄にむしろおすすめしたい本である。全体にわたって溢れている、著者の認識とあたたか味は伊東暹自氏そのものの影絵にも見える。唯一つ本書は文部省の気象教程の(小中学の単元としての)参考書に当たっているとは決して思われぬ。こういう点では儲けることを無視したのかどうかは知らないが、このような良書を世に出した同和春秋社に敬意を表する。(藤原寛人)

(8頁よりつづく、山本氏参考文献)

参 考 文 献

- [1] W. Rau, Suhrift. Deut. Akad. Lnft. 8, 65, (1944).
- [2] S. M. Cevlong, Proc. Roy. Soc. A. 190, 137, (1947).
- [3] A. W. Brewer and H. P. Palmer, Proc. Phys. Soc. B. 64, 765, (1951).
- [4] B. J. Mason and F. H. Lndlum, Rep. Prog. Phys., Phys. Soc. XIV, 171, (1951).
- [5] E. K. Bigg, Q. J. Roy. Met. Soc. 79, 510, (1953).
- [6] B. J. Mason, ibid. 78, 22, (1952).
- [7] K. Ouchi, Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophysics. 6, 43, (1954).
- [8] J. G. Bolton and N. A. Qureshi, Bull. Amer. Met. Soc. 35, 359. (1954).
- [9] R. R. Braham, B. R. Seely and W. D. Crozier, Trans. A. G. U. 33, 825, (1952).
- [10] aufm. H. J. Kampe and H. K. Weickmann, J. Met. 8, 283, (1951).