



気象制御・人工降雨

小野 晃*

ドライアイスの種まきにより過冷却水雲を雪雲に変えた1946年のラングミュアらの野外実験は、実験室内の低温槽で起こる現象が大気中の雲でいかに実現するかを示したものである。以来世界各国で人工降雨の研究に投入された資源と労働力から見れば、人類のなした努力は決して小さいものではなかったし、その結果として現れた我々の雲—降水現象に対する理解の深化も著しいものがある。とはいえ、この大きな努力と成果が、人類の夢である人工降雨（増雨）を実用的技術の段階まで高めたとは言えない。そして雲物理学を基礎にした人工降雨が現在直面している問題は、雲—降水という現象に現れた自然の様相の、当初の予想をはるかに上回る複雑さと多様さである。もちろんこの多様さ複雑さについては、今後多くのことが知られると思われる。つまるところ、やることは幾らでもあり（対象が複雑であるから）たえず新しい知識はもたらされたとはいえ、人類がそれを用いて自然現象に介入し、これを効果的に変更してゆくための実用技術としてその経済性を正確に予測することは、系の要素が多くあり、その性質や相互作用の性質が十分に明らかになっていないため、今にわかにはできないということなのである。

オーストラリアは米国と並んで、現在世界で最も熱心に精力的に人工降雨の研究を進めている国である。乾燥した大陸オーストラリアは常に水の不足に悩まされてきた国で、増雨効果为目标とした雲へのヨ—化銀種まきが主体である。オーストラリアにおける人工降雨の研究は、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）所属の雲物理研究所が中心になって進められてきた。雲物理研究所で人工降雨研究の中心的役割を果たしているスミス博士は、最近出版された「Weather and Climate Modification」¹⁾の中で、人工降雨に関して次のような意見を述べている。「①ヨ—化銀種まきによる人工降雨の増雨効果を判定することは、当初考えていたよりはるか

に困難で大変なことである。②特定の条件下では確かにヨ—化銀種まきによる増雨効果は認められるが、しかし種まきさえすればいつでも増雨とは限らず、減る場合もある。③どのような雲にいつ、どの場所に、どのくらいの量のヨ—化銀を種まきすれば効果があるという実用化への大事な前提条件を見つけ出す研究は、依然続いていてまだ終わっていない。」これは25年にわたって人工降雨の研究を続けてきたスミス博士の大変率直な人工降雨の現状に対する意見である。

我が国の人工降雨は昭和26年ころから、電力会社からの委託研究の形で大学の気象研究室が中心となって始められた。しかし発煙されたヨ—化銀の雲の中での挙動について、これを調べる手段としての航空機・レーダーなどは経費の点で持つことができず、ヨ—化銀発煙の効果は、降水中の微量ヨ—化銀検出という物理的效果判定法の開発もあったが、その多くは地上で測った降水量の統計処理を唯一の手掛かりとして推定されていた。

ところで昭和36年科学技術庁による人工降雨研究5か年計画は、オーストラリアで10年かかって航空機による人工降雨の実用化に成功したから、日本では5年もやれば実用化できるはずだという科学技術庁の人工降雨の認識に立って発足したものであった。当時我が国でも一部の研究者は、「もはや人工降雨はごく限られた少数の人たちだけが行なうものではなく、やろうと思えば誰にでもできるものだという気がします。しかしそのためには、人工降雨の普及が必要です。……」一昭和33年人工降雨連絡会議機関紙発刊の辞より—と述べているように、人工降雨は実用化の段階に入ったと認識していた。しかし一方、「人工降雨により気象現象を制御するためには、雲などに関する個々の物理的諸条件並びにその変化過程を解明する基礎研究を強力に推進し、その基礎に立って大規模な実験を進めることが現段階では最も重要である。」—人工降雨研究総合報告書（日本人工降雨研究協会関東支部）昭和42年8月—と考える研究者も多かった。人工降雨を実用化するために一見無関係に見える降

* Akira Ono, 名古屋大学水圏科学研究所

水機構に対する系統的な研究へと傾斜し、いわゆる「実用人工降雨」から離れていった。しかし人工降雨は実用段階と誤認され、“かんばつ”時には人工降雨はその解消に役立つものとして新聞などで報道されることもあった。しかしこの種のものは科学的分析の場における態度に甘さがあり、人工降雨本来の目標への接近を妨げることこそなれ水問題の危機を救うことにはならなかった。そして全体として降水機構に対する基礎的研究が主流となってきた。当然のことながら、有効性（経済性）を明確にうたわない研究は研究経費の点で厳しい条件の下におかれることになった。したがっていわゆる実用人工降雨のころに比べ、にぎにぎしくはないがしかし時間をかけて、降水機構の研究に必要な施設の整備とそれを用いた研究、また海外の研究プロジェクトに参加するなどして、地味な努力が積み重ねられてきた。

中緯度地方では、雲の上の部分に 0°C 以下の過冷却水雲があり、この中で氷晶核を中心に生じた氷晶が急速に成長することによって雨や雪となる。

ところで地球上で水の蒸発は広い面積から絶えず徐々に起こっているのに対し、雨や雪などの降水現象は比較的狭い面積に、時間的にも集中して起こっている。これは、水蒸気分子が集まって雲粒や氷晶を作り雲を形成し、更にこれらが雨滴や雪片を作るために何段階かの律速過程を経なければならず、そのうえ粒子同志の衝突による併合過程が相次いで多数回行なわれなければならないからなのである。またこのような過程が進行するためには、雲粒よりもはるかに大きいスケール、雲の大きさから数百キロメートルのスケールの大気場の物理的気象的条件が整わなければならないからである。

従来ヨー化銀種まきによる人工降雨及び関連気象調節（降ひょう制御、台風制御など）の技術化実用化への試みの実体は、複雑にからみあった諸要素の織りなす自然（雲及び降水系）の、ほんのわずか一つ二つの要素（具体的には水の相変化）に目を付けて、その要素に望ましい変化を与える要因（具体的にはドライアイス、ヨー化銀の種まき）を外部から人間の手で付け加えようとしたものであった。しかし、複雑にからみ合った諸要素の織りなす現実の自然、雲-降水系全体の性質が十分に解明されていないので、果たして実用技術として社会の要請に答えることができるかという経済性については、残念ながら今にわかに科学的な答えを出すことができない。

人工降雨を含めた気象調節は気象学の重要な課題の一つであり、人類の将来にとって、地球の環境を良好に保ち悪化を防ぎ自然災害を軽減するためには気象調節に関する研究を進めていくことが必要で、これには誰も異論がない。問題になるのは、どのような速度、規模で進めるかという判断である。

気象調節の問題は、基本的には物理学の実験の一つであるが、いろいろの点で通常の物理学の実験とは異なっている。

物理学の実験は、実験条件を限定してすべての個々の要素を分析し、それを加算することで全体の系と等置することのできる、或いは対象とする系の外部からの付随的な複雑化する要因が系自体に及ぼす影響を極小にして行なうことのできる、いわゆる線形の系を取り扱ってきたものである。このような取り扱いのできない系は、一般に非線形の系と言われている。

人工降雨を含めた気象調節は、実験条件が限定できない。自然に与えられた大気という非線形の開放系の中で実験を行なわなければならない。

非線形の系では、個々の要素が互いに相互作用を引き起こすので、部分的要素の加算が全体の系と等置することができない。したがって、全体の系は分解せずにそのまま取り扱わなければ、その系の性質が変わってしまうのである。つまり人工降雨を含めた気象調節のような複雑な非線形の対象に対して外部から新しい要因を添加する場合、そのもたらされる結果に対する自然科学的な分析の困難さが常につきまとうものである。

もちろん、非線形の問題を電子計算機で数値計算によって近似的に解くことはできる。そして、このような方法で得られる系の性質の解明は非常に有益な情報を与えてくれる。現時点で得られる知識・情報を効率的に整理活用して、モデル或いはシステムを作って予測や実用的な結果を得ようとするシステム工学或いは情報科学的方法は、複雑な非線形の系を理解するうえで評価すべきものであろう。このような傾向は、人工降雨を含めた気象調節の分野においても一つの有力な手段として用いられつつある¹⁾。けれどもここに注意すべきことがある。モデルなりシステムの方法は万能ではなく、極めて制限された適用範囲をもつことを念頭においておくことである。モデルなりシステムを作るうえでは、相互作用のある諸要素をパラメタライズして研究を進める方法が取られている。こういう方法では、系の具体的な性質が明確に定義され、相互作用を及ぼす部分部分の性質を規定す

る係数などが正確に表されていないと、系全体の性質が突如として遷移する様相が、自然とのよい対応をもってとらえられなかったり、或いは自然との対応関係の断絶をもたらす恐れが大きいということである。したがってモデルなりシステムは極めて制限された適用範囲をもつことを念頭において、常に自然との対応関係の復活を図ることが必要である。

そのためには、常に未知の「自然」を知ろうとする立場に立って、観測・実験をとおして新しい「自然」を知り、小規模な予備の実験から始め、実験結果を確認し、モデルや理論を改善して、自然との対応関係の復活を図りつつ系全体の性質の理解が深められるように、系統的な研究が進められるようにしてゆくことが必要である。

気象調節で問題になる対象は、原理的な面では国境を超えて一般論が役に立つ面もおおいにあるが、対象の構成が極めて複雑で地域的にも変化が多く、したがって系全体に及ぼす影響にも地域による特異性が出てくる。つまり人工降雨は、一般論として基礎になるのは降水機構であるが、どのような雲に、いつ、どの場所に、どのくらいのヨ一化銀を種まきすれば効果があるという実用化への大事な前提条件は地域的に異なって、それぞれの地域での個性があり、一般論は余り実用化という面では役に立たず、個別論が必要である。したがって、外国で得られるデータに依存するのではなく、日本における種まきによる増雨効果を実用化することを考える際には、日本における雲及び降水形成の特性を明らかにすることが不可欠である。この点で、10年の年月をかけて観測専用航空機を整備して、雲の微細構造の観測を行ない、ヨ一化銀種まきによって15%の増雨効果があることを確立した砂漠の国イスラエルの研究の進め方に、我々は学ぶことが多い¹⁾。

我が国においても、まずレーダーをはじめ各種測定装置を装備した観測専用航空機や研究用各種レーダーなどの設備をもち、新しい観測方法を開発しなければならない。それらを総合的に駆使して、雲及び降水系について新しい事実、新しい物理過程を見つけ、雲一降水系全体の性質を明らかにする努力を積み重ねていくことが大事である。そのためには系統的組織的にこの種の共同研究を進めるうえで、センターとしての役割を果たす組織を国立研究機関の中に作り上げていくことが重要な課

題であると私は考えている。

人工降雨及び気象制御関連の入門書として、まず、**Hess 編: Weather and Climate Modification¹⁾**があげられる。1974年出版のこの本では Byers による Weather modification の歴史が特に面白い。

基礎論として、雲物理学、雲物理学的諸物理量の測定法、及び効果測定にとって重要な統計的処理が可能な実験計画法の話がのっている。

各論としては世界各地で行なわれた Weather modification project の紹介が続いており、主体は人工増雨実験であるが、ソ連の hail suppression や米国の hurricane modification などの紹介も含まれている。一通り世界でどのような試みがなされてきたかを知ることができる。

米国気象学会誌 **J. Applied Meteorology Vol. 14** には、1975年 Florida Fort Landerdale で開かれた Weather Modification 会議の討論が中心の特集号がつけられている。特に冒頭に各セッションの座長連名で overview がまとめられており、現状を知る上で参考になる。

Review of Geophysics and space physics Vol. 17, No. 7 は、第17回 IUGG 総会にむけて、1975~1978年間の地球物理の各分野での主な成果をまとめた National Report が特集されている。この National Report は、毎回 IUGG 総会の年に特集されていて、米国を中心に地球物理の各分野での Activity を知るのに便利で、この号には **Grant・Cotton** による **Weather Modification²⁾** が含まれている。

しかし、いずれの引用文献も new idea とか new definite results が示されている訳ではなく、問題の核心の周辺をおしゃべりしているという感は免れない。

文 献

- 1) Hess, W. N., 1974: Weather and Climate Modification, John Wiley and Sons, New York, p. 791.
- 2) Sax, R. I., et al., 1975: Weather Modification: Where are we now and where should we be going? An Editorial overview, J. Appl. Met., 14, 652-672.
- 3) Grant, L. O. and W. R. Cotton, 1979: Weather Modification, Review of Geophysics and Space physics, 17, 1872-1890.