

第36回メソ気象研究会の報告

—人工降雨・降雪研究の現状—

コンビーナー：村上正隆（気象研究所）

1. はじめに

近年、国連などが、人口増加や気候変動による降水分布の変化により2025年までに世界の人口の2/3が水不足に直面すると警鐘を鳴らしている。日本においても、人口密集地域は潜在的な水不足の状態にあり、雨不足・雪不足が続くと容易に渇水となる。例えば、関東以西では、渇水は2～3年に1回と頻発しており、おおよそ10年に1度の割合で深刻な渇水が発生している。そのような状況下、2005年夏に四国・九州など西日本を襲った渇水をきっかけに、2006年度から5年計画で、気象研究所を中心に約10の研究機関が参加して、科学技術振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」を実施した。

「人工降雨・降雪研究の現状」をテーマとした第36回メソ気象研究会は、気象学会秋季大会前日の2011年11月15日に名古屋大学野依記念学術交流館で開催され、約70名の参加者があった。今回の研究会では、世界や日本の水問題、水資源確保の方策の一つとして現在、世界約40カ国で実施されている人工降雨・降雪技術の現状、そして本研究の成果を中心とした人工降雨・降雪研究の最新の話題が紹介された。

2. 基調講演

村上正隆（気象研究所）

2.1 人工降雨・降雪研究の歴史

人工降雨にあまり馴染みのない方々にも講演の内容を理解していただくため、前半では人工降雨の歴史・原理など人工降雨に関する全般的な話と、本プロジェクト開始以前の状況を概観した。

[人工降雨とは]

自然の雲にドライアイスなどの物質をまいて雲の内

部構造を変化させることをシーディング（種まき）と呼び、シーディングにより自然の雲から雨や雪を降らせることを「人工降雨」・「人工降雪」・「降水調節」などと呼ぶ。本質的には「人工降雨」と「人工降雪」は同じものであるが、地上気温が高く、雪やあられが融けて雨となって降ってくる場合を「人工降雨」と呼び、融けずにそのまま雪やあられの形で降ってくる場合を「人工降雪」と便宜的に呼んでいる。もっと広義に霧・雲・降水を人為的に変えることを「気象改変」または「気象調節」と呼んでいる。

人工降雨は、その願望の強さの余り、大昔には日照りが続くと雨乞いをしたように、時として非科学的で疑わしい方法も出現した。近世になっても、雲に向かって大砲を撃ち込んだり、花火を打ち上げるなどして雲を刺激し雨を降らせる試みもなされた。ようやく、第2次世界大戦直後になって米国のジェネラルエレクトリック社のラングミュアー博士（ノーベル賞受賞者）とその一派によって科学的根拠に基づく人工降雨研究が始められた。

[人工降雨の基礎]

人工降雨の基本的な考え方は、最小限の人工的刺激によって自然の雲が持っている潜在的降水能力を最大限に引き出すことである。直接空気塊を加熱して、雲を上空まで発達させ、凝結する雲水量を増加させるには、一般的に莫大なエネルギーを必要とするため実現するのは困難である。現在広く行われている人工降雨は、シーディングによる雲の微物理構造の変化を利用するものである。

雨のでき方は大きく二つに分けることができる。一つは暖かい雨と呼ばれるもので、雲の大部分が0°Cよりも暖かい所にあり、液相の水だけから成る雲から降ってくる雨である。もう一つは、冷たい雨と呼ばれるもので、雲のある程度の部分が0°C高度よりも上空

に存在し、固相の水（氷）を含む雲から降る雨である。

暖かい雨を形成する雲では、一旦40~50 μm の雨滴の芽ができると、それが落下しながら小さな雲粒を効率よく捕捉して急速に大きな雨滴に成長する。ところが、この暖かい雨の機構では、数 μm の雲粒から40~50 μm 程度の雨滴の芽まで成長するのに非常に時間がかかり、寿命1時間程度の雲からは降水が起こりにくいことが分かっている。このような暖かい雨に適用する人工調節法としては、吸湿性物質を雲核として雲内に導入し、大雲粒の成長を促して、早く雨滴の芽を生成させる方法や、散水によって直接雨滴の芽となる水滴を雲内へ導入する方法がある。

冷たい雨を形成する雲では、0 $^{\circ}\text{C}$ 高度より上空では過冷却、すなわち0 $^{\circ}\text{C}$ 以下でも凍らない微水滴と、そこに少しずつ出来た氷晶が混在している。水に対する平衡水蒸気圧は水に対するそれより高いため、小さな水滴が急速に蒸発すると同時に、その水蒸気が氷晶に昇華凝結して急速に成長し、雪となり霰となって、地上気温が0 $^{\circ}\text{C}$ より高いと融けて雨の形で地上に降ってくる。ところが、雲頂温度が比較的高い雲では氷晶濃度が低く、降水ができにくいことが分かっている。冷たい雨に適用する人工調節法として現在最もよく用いられているのは、過冷却の雲に人工的に氷晶を発生させる方法である。本方法には更に、空気を-45 $^{\circ}\text{C}$ 以下に冷やして均質凝結凍結過程により水蒸気から直接氷晶を発生させる強冷法（ドライアイスなど）と、人工氷晶核（ヨウ化銀など）を散布して氷晶発生を促進させる方法がある。

[本プロジェクト開始以前の状況]

世界中の約40か国で毎年100件以上の人工降雨プロジェクトが実施されているが、大多数のプロジェクトでは、過冷却の雲にドライアイスやヨウ化銀を用いて人工的に氷晶を導入して増雨・増雪を図る方法がとられている。シーディング物質やその散布方法はほぼ確立されていたが、プロジェクトの大半が社会事業的要請によるもので、最適シーディング法の開発やその効果の検証に関する科学的根拠が不十分なまま実施されており、WMOでは人工降雨・降雪技術の基盤を築くための基礎的総合的研究の実施を求めている（村上2003）。国内では平成6~14年度まで気象庁気象研究所・国土交通省利根川ダム統合管理事務所が共同で、関東地方の主要な水源地である利根川上流域に冬期間十分な量の雪を確保するための山岳性降雪雲の人工調

節に関する基礎的研究を実施し、その可能性を確認していた（Murakami *et al.* 2007）。

一方、暖かい雲に対しては、1990年代から幾つかの国で微粒化した吸湿性粒子を撒いて大きな雲粒を生成し、雨滴の生成を促進する技術が使用されるようになってきたが、その効果については未だ不確定な部分が多かった。

2.2 本プロジェクトから得られた成果

本課題では、統計解析、各種の最新地上リモートセンシング技術、航空機による雲・降水の直接観測、航空機および地上からのシーディング技術、高精度・高分解能の数値気象モデル、積雪融雪流出モデル、世界最高水準の雲生成チェンバーなどの種々の手法を用いて、これまでにない総合的人工降雨・降雪研究を実施した。研究内容としては、ドライアイスやヨウ化銀を用いた人工降雪の高度化と吸湿性粒子を用いた人工降雨の可能性評価に2分される。研究対象地域には、事前評価に基づき、人工降雪については利根川上流域を含む新潟県・群馬県、人工降雨については早明浦ダム集水域を含む高知県を選定した。

基調講演では、以降の5人の講演者の話ではカバーしきれない研究トピックスについて要説した。

シーディングに適した雲の出現頻度の事前評価法に関しては、静止気象衛星MTSATのIR1（11 μm ）、IR4（3.7 μm ）データを用いて、雲頂温度が0 $^{\circ}\text{C}$ 以上でドライアイスシーディングには不適な暖かい水雲、雲頂温度が0 $^{\circ}\text{C}$ 以下でも液体の雲粒を含む過冷却雲、それをほとんど含まない氷雲、をそれぞれ識別するアルゴリズムを開発した。これにより、特別観測などを実施する前にルーチンデータによるドライアイスやヨウ化銀シーディングに対する有効雲出現頻度の予備的調査が可能となった。

シーディングによる増雪効果の定量的指標（降水量として何mm増えるか）であるSeedabilityを数値シミュレーションの結果に基づき、鉛直積分雲水量、雲内平均北西風速、氷晶・雪粒子数密度、及び雲頂気温の重回帰式によって算出するアルゴリズムを開発した（Hashimoto *et al.* 2008）。このアルゴリズムをモニタリング観測データや数値予報モデルの結果に適用することによって、出現する雲のSeedabilityを実況把握あるいは1、2日先まで予測することが可能となった。Seedabilityの高い雲に対して選択的にシーディングすることによって、費用対効果の大幅な改善を図ることも可能となった。シーディングの効果判定に要

する統計期間は、効果の大きさと降水の自然変動の大きさに依存するので、Seedabilityの高い雲に対する選択的シーディングは、統計期間の短縮にも繋がる。

このように安定的水資源確保や渇水の予防措置を目的とした人工降雪技術はほぼ実用化レベルに近づいた。

一方、即効的渇水対策技術としての夏季人工降雨に関しては、比較的背の高い雲を対象としたドライアイスまたはヨウ化銀シーディングと雲頂高度が5 km以下の背の低い雲に対する吸湿性粒子シーディングが考えられる。前者は、雲内に $-3 \sim -5^{\circ}\text{C}$ の過冷却領域があれば、人工的に夥しい数の氷晶を発生させ、成長した氷晶が融解することによって雨滴の芽を生成することが確認されている。 0°C 高度より下方に雨滴の成長に適した雲がどの程度頻繁に出現するかが問題である。

本プロジェクトで開発したFMCW方式Ka-bandドップラーレーダ、W-band、X-band、K-bandドップラーレーダ、2波長偏光ライダー、多波長マイクロ波放射計などの地上リモートセンサーによる天頂モードのシナジー観測データの解析から、暖候期の四国上空におけるドライアイスシーディングに適した雲と吸湿性粒子シーディングに適した雲の出現頻度は、ともに5~10%であることが示された。早明浦ダム周辺に着目すると、渇水期間でも午後には日射に伴う積雲系の雲が発生し、場合によっては降雨をもたらすことが示され、有効雲の出現可能性を強く示唆した。

3. 降水の長期変動から見た渇水問題

藤部文昭（気象研究所）

3.1 関東・四国の気候特性と人工降雨・降雪の適応性

冬季、関東は平野部では乾燥した晴天になるが、北部の山岳地帯では日本海側から吹き越す雪雲によって、多いところで1ヶ月に200mmを超える降水がある。この降水の多くは積雪の形で春まで保たれる。利根川水系の8つのダムの降水量と貯水量の年変化を見ると、4~6月は降水量が少ない（1ヶ月当たり100mm弱）にもかかわらず貯水量は増える。これは雪解けによる増水によるものである。このように、冬季の人工降雪は暖候期の水資源を確保する有力な方策になる。ただし、人工降雪が暖候期の渇水緩和に有効に活用されるためには、季節予報の精度向上が必要である。

一方、四国の早明浦ダム周辺では春~夏の降水量が平均値としては多いが、雨は台風の接近時などに集中して降るなど時間の変動が大きい。それに応じて、ダムの貯水量は短期間に増減する。従って、夏季の渇水対策としては人工降雨による即応的な対応に期待せざるを得ない（藤部ほか 2008）。

3.2 日本の降水の長期変動

国内51地点の1901~2010年のデータによると、日本の年降水量は100年当たり5.8%の率で減少している（10%有意）。また、近年は降水量の年々の変動が大きく、極端な少雨年も見られる。

日降水量を階級別に見ると、降水量100mm以上の日数は100年当たり20%の率で増えている。一方、降水量1mm以上の日数は100年当たり15%の率で減少し、その分、降水のない日が増えている。このように、過去1世紀の変化は大雨の日数と無降水日数とともに増える傾向を持つ。また、渇水に関連の深い尺度として、連続する31日間の降水量の下位1%値（各月・各地点の110年間の値のうち、下から数えて1%分に相当する少雨）を見ると、その発現頻度は100年当たり94%の率で増えている。

将来の気候変化に関しても、21世紀末にかけての日本において大雨日数の増加と少雨日数の減少を予想するシミュレーション結果が得られている。降雪量の変化に関しては、北海道の山地で降雪量が増える一方、本州の大部分で降雪量の減少が予測されている。関東の場合、利根川上流域の冬季の積雪深は減り、雪解けも早まることが予測されており、夏季の水資源の確保が課題になっていく可能性がある。

4. 航空機を用いたシーディング実験

折笠成宏（気象研究所；現 仙台管区気象台）

冬季に越後山脈周辺にかかる山岳性降雪雲は、冬型気圧配置、寒冷前線通過前後、南岸低気圧の通過直後にしばしば過冷却の雲水を豊富に含んだ様相で出現することが知られている（Murakami *et al.* 1998）。矢木沢ダム周辺の風上側で、各種雲物理測定機器を搭載した航空機により準実スケールのシーディング実験を実施した（7冬季分、約3週間ずつ各10フライト程度）。過冷却雲粒を含む雲に対してドライアイスを用いたシーディングを行うことによって、最初1,000個 ℓ^{-1} 程度の微小な氷晶からなる幅200m程度のシーディングカーテン（SC）が形成され、ダム集水域に達するまでに降雪粒子サイズへと成長する。航空機に

よる雲内直接観測データから、レーダ反射因子では平均3～5 dBZ、降水強度では平均 0.1mmhr^{-1} 程度の増加を示した。また、雲・降水粒子の2次元イメージから、SC内と隣接する周辺とで粒子タイプ出現率や平均体積直径について、どのような違いがあったか比較解析した。その結果、全体の平均からみて経過時間と共に違いは小さくなる傾向であったが、一部の事例ではSC内の平均粒径が周辺と比べて顕著に大きくなる場合があった。シーディングを行ったデータセットでは、降雪粒子の成長機構として昇華凝結が卓越する中で、雪粒子同士の衝突併合による凝集が顕著になる事例があることが示唆された。

これらのシーディング効果に関する直接観測の結果は、シーディング効果を総合的に評価する目的で、シーズンを通じた評価が可能な数値実験データやリモセン観測データと比較された。このため、数値実験は特にシーディング時刻・位置・レートを実際の航空機によるシーディング実験に即して行った。100m程度の解像度を用いれば、SCの幅、SC内外の氷晶数濃度や平均粒径の時空間変化を概ね再現できることが示された。リモセン観測との比較では、レーダ反射因子をSC内外で比較するため、航空機による直接観測を基準として鉛直断面観測上でのSC位置を推定する方法を開発した。

一方、暖候期のシーディング実験は、氷点下の部分を多く含む雲であれば寒候期と同様にドライアイスを用いたシーディング方法が期待できる。実際に、高知県周辺で行ったシーディング実験事例を基に、氷晶数濃度や平均体積直径の時間変化を調べた。SC内ではシーディングしてから10分前後で平均 $200\mu\text{m}$ 以上までの雪粒子へと成長したことを確認し、落下して融解すれば雨粒の芽として有効に働くことが示された。

暖候期で氷点下の部分を含まない雲に対しては、雨粒の芽となる大きい雲粒への成長を促進するために吸湿性粒子シーディングが検討されている。高知県周辺において小規模スケールのマイクロパウダー法およびフレア法による野外シーディング実験を行った（3夏季分、約3週間ずつ）。条件が適した場合には、シーディングの影響を受けたと考えられる気塊内で雲粒粒径分布の拡がりを $30\mu\text{m}$ 以上の粒径範囲で時々検出した。しかし、航空機による直接観測だけでは雲粒から雨粒生成までの連鎖反応を追跡するのは困難であり、数値実験や室内実験による研究結果と合わせて総合的に評価する必要がある。

5. リモセンで捉えたシーディング効果

岩波 越（防災科学技術研究所）

2006, 2007, 2009年度冬季に、新潟・群馬県境付近の越後山脈北西斜面において、航空機からのドライアイスシーディング効果の検出のため、いずれも走査型の防災科学技術研究所2波長（Ka及びWバンド）、気象研究所Xバンド、京都大学Kaバンドレーダによる三次元走査モードの観測を行い、雲の内部構造の変化を解析した。

2007年12月17日には、3式のレーダが長さ約17km、幅と厚さ約1km、最大反射強度27dBZの棒状のエコーを観測した。このエコーの位置・形状は、シーディング経路をその高度の風で移動させた線分と良く符合しており、シーディングにより発達した雪雲の検出に成功したものと考えられる。鉛直断面観測を連続していた京大Kaバンドレーダでは、2回のシーディングに対応するエコーの発達・衰弱過程を風上側から山岳を越えて風下側のダム集水域まで30分間にわたり追跡できた。また、気象研Xバンドレーダの反射強度データから、6kgのドライアイスシーディングにより、約3,000tonの雪が生成されたと見積もられた。

航空機観測から発現が明らかになっているSCについて、レーダ観測による検出を、防災科研Ka及びWバンドレーダの反射強度の2波長比（DWR）を用いて試みた。Hubbert and Bringi (1995) の繰返しフィルター法を適用して2波長比を散乱と減衰の効果に分離し、航空機観測で検出されたSC位置と比較した。2007年12月10日の事例では、反射強度が5dBZ程度の値をもち、有効半径に強く依存する散乱効果が大きく低下する位置と一致したことから、2波長比が高濃度の氷晶が多数存在するSCの検出手段になる可能性が示された。

鉛直断面観測データによるSC内外のレーダ反射因子の比較によるシーディング効果の統計的評価から、航空機の直接観測から求めたシーディング効果ほどではないが、弱いシーディング効果が確認された。

6. 吸湿性粒子シーディングに関するチェンバー実験

田尻拓也（気象研究所）

概念モデル“吸湿性粒子シーディング”のシナリオは、エアロゾル・雲・降水過程の連鎖に着目し、

(1) 大気中エアロゾルに比べ優位に雲凝結核（Cloud

condensation nuclei, CCN) として働く吸湿性粒子の散布

- (2) 雲底付近の雲粒粒径分布 (初期粒径分布) の変動
- (3) 吸湿性粒子に由来する雲粒の速やかな成長と衝突・併合過程の促進
- (4) 積雲のライフタイムにおける降水開始の早まり
- (5) 結果として総降水量の助長の展開を期するものである。

これまで米国・メキシコ・サウジアラビア・南アフリカ・東南アジア諸国等における野外実験や手法の有効性を評価するための室内実験・数値実験・雲降水シミュレーションが試行されてきたが、十分な実証には至らず、科学的データの一層の蓄積が求められる状況にある (例えば, Bruintjes 1999; Silverman 2003)。

暖候期における“人工降雨の可能性”を探るには、雲の初期発達段階に格好の刺激を与えるシーディング物質を特定する必要がある。雲水から降水への変換を誘導する、呼び水としての吸湿性粒子 (その概念・作用) には、超巨大核 (サイズ $>10\mu\text{m}$; 速やかに雨滴の芽として働く)、巨大核 (サイズ $1\sim10\mu\text{m}$; 雲粒粒径分布のテールが広がる)、大核 (サイズ $\sim 1\mu\text{m}$; 背景 CCN との水蒸気の争奪により初期雲粒数濃度を抑制) が考えられる。広域への散布 (拡散)・航空機積載量・環境負荷軽減の兼ね合いから巨大核あるいは大核は、超巨大核散布より有望であるが、近年まで有用な技術手法がなかった。現在では、NaCl の微粒化技術や発煙装置の開発が進み、それぞれ、マイクロパウダー (MP) 法、吸湿性フレア (HF) 法として一部製品化されている。

野外実験では、背景 CCN が変動し現象再現性が見込めない条件下、シーディング効果の兆候を捉える難しさがある。気象研究所の雲生成チェンバー施設に吸湿性粒子発生・導入機構を追加整備し、再現性のある吸湿性粒子シーディング室内実験に着手した。基礎技術の開発、シーディング物質の絞り込み、透過型電子顕微鏡によるエアロゾル粒子の組成と混合状態の分析、予備実験を経て、野外実験に即した大気環境場に適用シーディング物質を同定する一連の実験を行った。

予備実験により、MP 法には赤穂化成製 T0 (約 $2\mu\text{m}$ の NaCl 粒子) に固結防止剤を付加したものを、HF 法には米国 ICE 社製の吸湿性フレア (サブミクロンの KCl および CaCl_2 粒子が主体) を選び出した。背景 CCN には $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を用い、高知市での

野外観測結果に即して数濃度 $1,000\text{cm}^{-3}$ (過飽和度 1.0%) とした。雲生成 (断熱膨脹) 実験は、実験初期値 (気温・気圧・露点) および上昇速度を一定とし、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ のみの“シーディングなし”と $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ に吸湿性粒子を付加した“シーディングあり”について行い、初期雲粒粒径分布の違いを調べた。吸湿性粒子の付加量は、野外実験の測定値を基準に 3 通りの数濃度を設定した。結果、MP 法では全事例 (散布量 0.1~10 倍) で $20\mu\text{m}$ 超の雲粒の速やかな生成 (付加量が多いほど顕著) を計測し、併合過程の開始を早めるシグナルであるテールの広がりを捉えた。HF 法では、散布量増加により僅かな粒径の広がりはあるものの、初期雲粒発生数の増加が顕著であった。

本チェンバー実験により、吸湿性粒子シーディングシナリオの第 2 段階までの詳細解析が可能となった。次なる段階の評価研究は、ハイブリッド雲微物理モデルにより進められており、次の講演報告に示される。シーディング法の優劣や適用範囲をより正確に見極めるには、多様な背景 CCN と大気状態における評価実験からの更なる知見が求められる。

7. 吸湿性粒子シーディングによる増雨効果

久芳奈遠美 (海洋研究開発機構;
現 大気海洋研究所)

暖かい雨に対する凝結核散布の効果为数値実験で調べた。空間格子点のピン法雲微物理モデルに与える初期雲粒粒径分布を、パーセルモデルを使って凝結核から Lagrange 流に計算するというハイブリッド雲微物理モデルを開発し、凝結核が初期雲粒粒径分布とそれに引き続く雲の微物理構造の変化に与える影響を精度良く評価することを可能にした。特に従来のモデルでは難しかった巨大凝結核の増雨効果について精度よく評価することができる。

対象の雲は浅い対流雲、深い対流雲、層状雲の 3 種類、散布粒子は単分散粒子、塩のマイクロパウダー、吸湿性粒子フレアの 3 種類である。浅い対流雲に単分散粒子を散布する場合、半径 $0.25\mu\text{m}$ 以下の粒子では地上降雨量が減少、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子では地上降雨量が増加する。経済性や環境影響 (塩害) を考慮すると $1\sim 2\mu\text{m}$ が最適な粒径であると考えられる。

浅い対流雲にマイクロパウダーを散布した場合は、モード半径が $0.5\mu\text{m}$ のマイクロパウダーでは 360/cc で増雨効果が最大になり (competition effect),

1800/cc 以上では雨が減ってしまう。モード半径が $2\ \mu\text{m}$ の場合では、散布量が増すにつれて降水量が増え (competition effect + raindrop embryo effect), 25/cc で増雨効果は飽和する。ただし雨が增えた場合でも数密度が低い海洋性 CCN の場合の降水量には及ばない、という結果を得た。大量の吸湿性巨大粒子の散布により、雲粒数密度を減らすことはできても、小さな雨滴が大量にできることで、かえって大きい雨滴はできにくくなってしまい、海洋性気団ほどには降水量を増やせないということがわかった。

浅い対流雲にフレアを散布した場合は、ミクロンサイズの粒子から大粒径の雲粒が少数生成されるものの、 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 付近にピークを持つ大量の小粒径粒子により雲粒数濃度が増加し、地上降雨量の減少につながることを示された。

一般的に雲層が厚くなるほど自然の降水過程が効果的となりシーディング効果は不明瞭になる傾向があった。また、対流雲に比べて層状雲では、シーディングに対する降水量の増減の応答が抑えられる傾向であった。バックグラウンド CCN の数濃度が増加するほど、シーディング効果は顕在化する傾向も確認された (Kuba and Murakami 2010)。

8. 総合的水資源予測モデルを用いた人工降雨・降雪の影響評価

橋本明弘 (気象研究所)

本プロジェクトの特徴のひとつは、フィールド実験と同時に数値実験を取り入れることで様々なコストを抑えつつ、多面的に人工降雨・降雪技術の検討を行うとともに、気象モデルと水文モデルを組み合わせ、総合的に水資源の予測を試みた点であった。

モデル開発に関しては、種々のシーディング物質 (ドライアイス・液体炭酸・ヨウ化銀) とシーディング手法 (航空機による散布・地上からの散布・連続散布・間欠散布) を取り扱える 3 次元雲シーディングモデルを開発した。利根川最上流部ダム集水域の数ヶ月間にわたる流出量を再現できるよう、積雪融雪モデル、流出モデルおよび水運用モデルの最適化を施した。早明浦ダム集水域についてはメッシュ型流出モデルを開発し、水運用モデルとともに最適化を施した。

各種シーディング方法の有効性に関しては、まず航空機からのドライアイスシーディングと液体炭酸シーディングの比較を行った。冬季山岳域での航空機散布による過冷却雲の素早い氷化という目的において、ド

ライアイスは液体炭酸に対して優位であることを確認した。地上からのヨウ化銀・液体炭酸を用いたシーディングの有効性の検討も行った。

人工降雪による水資源確保の有効性評価に関しては、記録的な少雪となった 2006-07 年寒候期については、シーズンを通じた航空機からのドライアイスシーディングを数値モデルの中で忠実に再現し、集水域における増雪効果を定量的に評価した。この結果を入力値として積雪・融雪・流出モデルおよび水運用モデルを用いた数値実験を行い、冬季の人工降雪によって春以降のダム貯水量の改善に役立つことを定量的に示した (吉田ほか 2009)。また、人工降雪による広域の環境影響評価を行い、標的地 (ダム集水域) 以外の地域に与える気象学的・水文学的影響は極めて小さいことを示した。

一方、人工降雨による渇水被害軽減の有効性評価に関しては、早明浦ダムの貯水率が一時 0% となった 2008 年暖候期 (4-9 月) を対象に、雲生成チェンバー実験やハイブリッド雲物理モデルの結果に基づき、吸湿性粒子 (マイクロパウダー) シーディングにより活性化する雲粒数濃度の減少を仮定し、ダム集水域周辺で吸湿性シーディング模擬実験を行った。その結果を入力値として、メッシュ型流出モデル・水運用モデルを用いて数値実験を行い、吸湿性粒子シーディングによって貯水率を改善できる可能性を示した。

8. おわりに

人工降雪に関しては、利根川上流域の山岳性降雪雲を対象として、最適シーディング法・人工降雪の有効性・環境影響・費用対効果の定量的評価法等の開発により、科学的根拠に基づく人工降雪実施に関する施策判断が可能になった。

一方、人工降雨は理論的にその可能性は示されたが、実用化シーディング技術の開発・費用対効果・環境影響などの課題を克服できるか否かを見極めるために、さらに 3-5 年間の研究が必要と思われる。

本研究で開発された技術は、2011 年 10 月から開始した東京都小河内ダムを対象とした人工降雨研究でも活用されている。近い将来、国内外を問わず他の地域における人工降雨・降雪の可能性評価にも役立つことが期待される。

最後に、人工降雨・降雪研究の気象学における意義・重要性を述べさせていただきたい。人工降雨・降雪研究は、現在注目されているエアロゾルの間接効果

を積極的に利用し、数10km スケールの降水現象に及ぼす影響を調べるもので、大気科学の幅広い分野、特に雲物理・メソ気象の分野とは密接に関連している。野外におけるシーディング実験は、エアロゾルの間接効果を直接検証できる唯一の準実スケールの実験と言っても過言ではない。近年、だれでも手軽に走らせることができるようになった数値モデルを使った研究をする若い方々が増えているが、必ずしも十分なモデル性能の検証の上に立って、シミュレーション結果の議論がなされているわけではなさそうである。本プロジェクトでは、室内実験・地上観測・航空機観測データを用いて各種数値モデルの比較・検証を実施しながら研究を進めてきた。今後、一人でも多くの若い研究者の方が、実験・観測的手法も含めた雲物理・メソ気象の基礎的研究に興味を持っていただけたらと願ってやまない。

謝 辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた名古屋大学水循環研究センターの方々に感謝します。

参 考 文 献

- Bruintjes, R. T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 805-820.
- 藤部文昭, 村上正隆, 越田智喜, 吉田一全, 2008: 早明浦ダム周辺の降水量とダム貯水量の変動特性. *天気*, **55**, 469-473.
- Hashimoto, A., T. Kato, S. Hayashi and M. Murakami, 2008: Seedability assessment for winter orographic snow clouds over the Echigo Mountains. *SOLA*, **4**, 69-72.
- Hubbert, J. and V. N. Bringi, 1995: An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 643-648.
- Kuba, N. and M. Murakami, 2010: Effect of hygroscopic seeding on warm rain clouds — Numerical study using a hybrid cloud microphysical model—. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 3335-3351.
- 村上正隆, 2003: 第8回WMO気象改変に関する科学会議出席報告. *天気*, **50**, 715-720.
- Murakami, M., M. Miyao, N. Orikasa, Y. Yamada, H. Mizuno and K. Soeda, 1998: Seedability of orographic snow clouds in central Japan. Preprint of the 14th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification, 569-572.
- Murakami, M., N. Orikasa, M. Hoshimoto, K. Kusunoki, M. Seki and A. Ikeda, 2007: Recent Japanese activities in weather modification research. 9th WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMP-No.44.
- Silverman, B. A., 2003: A critical assessment of hygroscopic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 1219-1230.
- 吉田裕一, 村上正隆, 糊澤義一, 加藤輝之, 橋本明弘, 山崎 剛, 羽田紀行, 2009: 渇水対策としての人工降雪効果の試算. *水文・水資源学会誌*, **22**, 209-222.