



Title	意図的気象改変 : エアロゾルの雲・降水影響
Author(s)	村上, 正隆
Description	VI. 気象工学としての雲とエアロゾル
Citation	低温科学, 72, 297-310
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55066
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_031.pdf



意図的気象改変

— エアロゾルの雲・降水影響 —

村上 正隆

人工的に生成した氷の微粒子を雲内に導入し、自然の雲が雨・雪を生成するメカニズムの持つ律速過程にバイパスをつけて降水を促進させる人工降雨技術（意図的気象改変）は、第二次世界大戦直後に華々しく登場し、現在では世界 40 か国で使用されている。本稿では、人工降雨の原理・歴史・現状と問題点を述べるとともに、最新の人工降雨研究の取り組みを紹介する。

Planned weather modification

— Effects of artificially injected aerosols on clouds and precipitation —

Masataka Murakami

Immediately after World War II, the rainmaking (one of planned weather modification) technology of introducing the artificially generated aerosols (or ice particles) into clouds, bypassing the rate-limiting process which the mechanism in which natural clouds generate rain and snow has, and enhancing rain, appeared brilliantly, and is used at 40 nations in the world now. In this paper, while describing the principle, history and present state, and problems of rainmaking, the leading-edge trend of the planned weather modification research is introduced.

1. はじめに

エアロゾルの一部は雲（凝結）核（Cloud Condensation Nuclei: CCN）あるいは氷晶核（Ice-forming Nuclei: IN）として作用し、雲粒子（微小な水滴（雲粒）と氷粒（氷晶））を生成する。対流活動等により空気塊が上方に輸送される過程で水蒸気が過飽和状態に達すると、エアロゾルを核として水蒸気が凝結し雲粒子が生成する。CCN 数の増加と共に雲粒数は増加し、雲粒径は小さくなる。このメカニズムにより、エアロゾルは雲の反射率（エアロゾルの第一種間接効果；Twomey 1974）や雲の寿命・雲量・降水過程（エアロゾルの第二種間接効果；Albrecht 1989）の変調を通して気候システムに影響を与える可能性が指摘され、気候変動予測研究では重要なテーマの一つと位置づけられている。近年、CCN として働くエアロゾルだけでなく、IN として働くエアロゾルが、氷晶雲内の氷晶の数濃度変化や混合雲内の水粒子／氷粒子の割合の劇的変化を通して、気候に

大きなインパクトを持つ可能性が指摘され、盛んに研究が行われるようになってきた（Rosenfeld et al. 2008; Rosenfeld 2000）。このように、CCN・IN として働くエアロゾルが雲の微物理構造を決定し、雲の放射特性・雲の寿命・雲量・降水効率を変調し、水・エネルギー循環にも大きな影響を及ぼし日々の天気（雲・降水）予報から 100 年後の気候変動予測にまで重要な役割を果たしていることが良く知られるようになった。人為起源のエアロゾルが意図しないで雲・降水、延いては日々の天気から気候変動に影響を及ぼすことを、エアロゾルを介した非意図的気象改変と呼ぶことが多い。

一方、CCN や IN として働くエアロゾルを用いて意図的に雲・降水に変調を与える意図的気象改変は人工降雨とも呼ばれる。人工降雨研究は戦後間もなくから始まり、エアロゾルの間接効果研究（エアロゾルによる非意図的気象改変研究）より遥かに歴史は長い。最近では、CO₂ による地球温暖化を抑制しようとするジオエンジニアリング（意図的気候改変）技術が脚光を浴びている。意図的気象改変と非意図的気象改変はその名の通り雲・降水に変化を与えようと意図的にエアロゾルを雲に導入するか、あるいは人為起源エアロゾルが知らず知らずのうちに雲・降水に変調を与えるかの違いで、本質的には同じ現象を取り扱っており、意図的気象改変研究と非意図的気象改変研究は表裏一体の関係にある。米国気象学会では意図的・非意図的気象改変委員会が、世界気

連絡先

村上 正隆

気象庁気象研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

e-mail: mamuraka@mri-jma.go.jp

象機関（WMO）では世界気象研究プログラムの中の気象改変研究で、意図的・非意図的気象改変研究を一緒に扱っている。

自然の雲にヨウ化銀（AgI）や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。「人工降雨」も「人工降雪」も本質的には同じもので、地上気温が高く、雪や霰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霰の形で降ってくる場合を「人工降雪」と呼んでいる。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」という言葉に、占いや錬金術のような科学的根拠のないもの、いかさまという印象を持っている方もいるかもしれない。大昔には、日照りが続くと雨乞いをしたように、人工降雨は、その願望の強さの余り、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て雨を降らせる試みもなされた。しかし、第2次世界大戦直後、米国のジェネラルエレクトリック社のラングミュア博士（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（Vonnegut 1947; Langmuir 1961）、現在に至っている。

本稿では、まず降水調節の必要性を説明し世界の国々における取り組みを簡単に紹介する。次に人工降雨の科学的基礎と問題点を簡潔に述べた後、人工降雨研究の現状を紹介する。最後に、雲・降水の人工調節の将来を展望する。

2. 気象改変の必要性

降水の日々の変化、年々変動は大変激しく、多すぎても少なすぎても問題となる。日本海側に降る雪を例にとって意図的気象改変の必要性を考えてみる。大量の雪が降ると交通網を麻痺させ、社会生活・経済活動に大きな被害を及ぼす（図1）。一方、山岳部に降り積もる雪は、貴重な水資源となり、雪が少ないとすぐに水不足が懸念される。特に、関東地方のような人口集中域では潜在的な水不足の状態にあり、暖冬少雪と空梅雨が引き続いて起こると、すぐに渇水騒ぎとなる。日本では、これまでおよそ10年に1度の割合で大規模な渇水が発生してきた。1994年夏の全国的な渇水を記憶している人も多いことと思われる（図2）。規模の小さなものも含めると、日本のどこかで毎年のように渇水が発生している。過去20年間の渇水の発生回数を地域別に見ると、人口の集中している首都圏や四国地方で頻発しているこ



図1：五六豪雪時の十日町市の風景（日本気象協会北海道本部谷口恭氏提供）

Fig.1: Photo taken in Toukamachi city in the heavy snowfall winter of 1981.



図2：1994年夏の渇水時の矢木沢ダムの風景（利根川ダム統合管理事務所提供）

Fig.2: Photo of Yagisawa Dam during the drought period in the summer of 1994.

とが分かる。水不足は世界的な傾向で、国連は、気候変動による降水分布の変化や人口増加・局所集中化による水需要の偏在化によって2025年までに世界中の人口の2/3が水不足の問題に直面すると警鐘を鳴らしている。

近年、数値予報の技術が向上して、広い範囲を対象とした2～3日先の天気は良く当たるようになってきた。集中豪雨等の狭い地域に集中して起きる現象にはまだ十分ではないが、改善されつつある。しかし、予報が当たるようになって、降水による災害が全て回避できるわけではない。予測の次には、降水の人工調節によって豪雨や豪雪を緩和する技術への期待が高まってくると考え

られる。

水資源管理という面では、長期予報の精度が向上すれば水資源の効率的運用も可能となると思われる。しかし、それにも限界がある。絶対的な水不足になれば、人々は不便な生活を強いられねばならない。年々変動の激しい降水現象を人工的に調節して、水資源の安定供給を図ることは、世界の多くの国々で重要なテーマとなっている。

3. 人工降雨を実施している国々

戦後まもなく米国で始まった科学的根拠に基づく人工降雨は、現在までに世界気象機関（WMO）に報告されているだけでも約 40 か国において、毎年 100 件以上のプロジェクトに広がりを見せている（図 3）。更に 30 か国余りが人工降雨に高い関心を示している。米国に限っても、西部・中西部の州を中心に数 10 件の人工降雨・降雪プロジェクトが報告されている。中国やタイ等では国家プロジェクトとして人工降雨実験に取り組んできた。しかし、上記プロジェクトの大半は社会事業的要請によるもので、最適シーディング技術の開発や効果の検証についての科学的根拠が不十分なまま実施されている。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）。

日本国内でも、1947 年に九州電力、九州大学、在日米軍の協力により航空機からドライアイス散布する人工降雨実験がはじめて行われた。その後、1951 年から 1965 年頃まで、電力会社などがスポンサーとなり全国の大学や気象研究所が参加し、AgI やドライアイスを用いた人工降雨実験が各地で行われた。しかし、水力発電から火力発電への移行という電力事情の変化に伴い急速に下火になった。1965 年以降は、東京都、福岡県、香川県、沖縄県などでは大きな渇水が起きた際に、地上設置型の AgI 発煙装置、航空機からドライアイス散布装置や散水装置を用いて人工降雨実験を実施しているが、

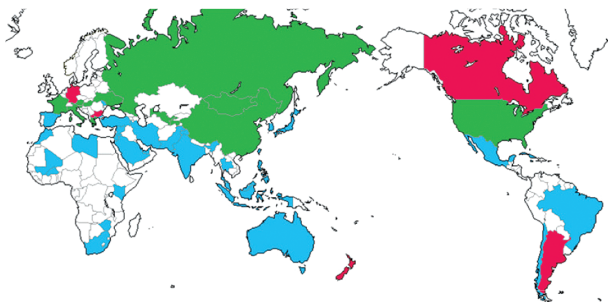


図 3：気象改変を実施している国々。人工増雨雪（青）、降雹抑制（赤）、人工増雨雪と降雹抑制（緑）。

Fig. 3: Nations where weather modification programs are conducted. Precipitation augmentation (blue), hail suppression (red) and both of precipitation augmentation and hail suppression (green).

人工降雨に関する本格的研究は最近までほとんど行われていなかった。

4. 人工降雨の原理

4.1 CCN・IN として働くエアロゾルの雲・降水影響

色々な雲システムからの降水（雨・雪）のでき方は大きく二つに分けることができる。一つは暖かい雨のメカニズムと呼ばれるもので、雲の大部分が 0°C よりも暖かい高度にあり、液相の水だけからなる雲から雨を降らせる。もう一つは、冷たい雨のメカニズムと呼ばれ、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）を含む雲から雪・霰が成長し、地上付近の気温が高ければ融けて雨となる。

大気中にエアロゾルなどの不純物を含まない空気と水蒸気だけからなる系から微水滴が生成する（均質凝結核形成）には、温度にも依存するが相対湿度でおおよそ 400% を超える必要がある。しかし、実際には、暖かい雨を形成する雲では、空気塊が上昇し断熱膨張により気温が下がるとともに相対湿度が上昇し、相対湿度 100% を超えると CCN として働くエアロゾルの上に水蒸気が凝結して直径数 μm 程度の微水滴（雲粒）を生成する。雲粒の直径が $40\mu\text{m}$ より小さい場合には雲粒間の捕捉率（衝突併合率）が極めて小さく、雲粒は水蒸気凝結によってゆっくりと成長する。そして、それが約 $40\mu\text{m}$ 程度の雨滴の芽の大きさになると、落下しながら小さな雲粒を衝突・捕捉して急速に大きな雨滴に成長する。ところが、 1cm^3 当たり 1000 個を越えるような高濃度の雲粒から成る大陸性の雲（大気汚染質の影響を受けた雲）では、一個一個の雲粒が小さすぎて $40\mu\text{m}$ 程度の雨滴の芽まで成長するのに非常に時間がかかり、寿命が 1 時間程度の雲からは雨が降りにくい。一方、 1cm^3 当たり 100 個以下の低濃度の雲粒から成る海洋性の雲では、短時間に降水が始まることが知られている。

雲中の最大水過飽和度は雲底直上に発現し、上昇気流中のエアロゾルの粒径分布・化学組成・上昇流の大きさ等にも依存するが、一般的には 1% 以下で、2% を超えることは稀である。水過飽和度 1% 以下で CCN として活性化するのは直径 $60\sim 70\text{nm}$ 以上のエアロゾルである。エアロゾルは粒子半径によってエイトケン核 ($0.01\sim 0.1\mu\text{m}$)、大核 ($0.1\sim 1.0\mu\text{m}$)、巨大核 ($1.0\sim 10.0\mu\text{m}$)、超巨大核 ($10.0\mu\text{m}$ 以上) に分類することができるが、雲粒の大部分は大核・エイトケン核から生成され、巨大核からは $20\sim 30\mu\text{m}$ の大雲粒が、超巨大核からは $40\mu\text{m}$ を超える雨滴の芽が短時間に生成される。エアロゾル種としては硫酸塩粒子、硝酸塩粒子、有機エアロゾル、海塩粒子、あるいはそれらの内部混合粒子などが CCN として働くと考えられている。

冷たい雨を形成する雲の 0°C 高度より上空では、過冷

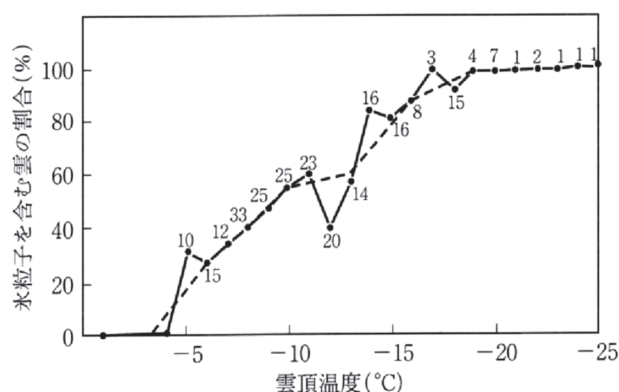


図4：氷晶を含む雲の割合と雲頂温度の関係

Fig. 4: Percentage of clouds that contain ice particles as a function of cloud top temperature.

却、すなわち 0°C 以下でも凍らない微水滴（雲粒）と、そこに少しずつ発生した氷の微粒子（氷晶）が混在している。自然界の雲を調べると、図4に示すように、雲頂温度が -5°C くらいまでは、雲の中に氷粒子（氷晶とそれが成長した雪粒子）は発生しない。更に温度が低くなるにつれて雲中に氷粒子を含む割合が増加し、雲頂温度が -20°C 位になると、どの雲も氷粒子を含むようになる。しかし、これは雲の中が全て氷粒子で占められることを意味するわけではない。 -35°C 付近までは、過冷却の雲粒が存在することも少なくない。全てが氷晶に変化するの -40°C 前後である。水に対する平衡水蒸気圧は氷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、雪となり霰となる。地上気温が 0°C より高いと融けて雨の形で降ってくる。

雲中における主な氷晶発生メカニズムは、均質核形成と不均質核形成に大きく分類できる。均質核形成には、水蒸気から直接氷粒子を生成する均質昇華核形成と、不純物を含まない水滴から氷晶を生成する均質凍結核形成が考えられる。前者は、水蒸気から不純物を含まない水滴を生成する均質凝結核形成と同様に高い過飽和度と、それに加えて低温が必要となる。理論的には、相対湿度 1000% 、気温 -65°C 程度が必要と推定される。後者は、水滴直径に若干依存するが、 $100\ \mu\text{m}$ で -35°C 、 $10\ \mu\text{m}$ で -37.5°C 、 $1\ \mu\text{m}$ で -40.7°C と、約 -45°C までにどんな水滴も凍結する。自然の大気中では均質昇華核形成が起こる前に、均質凝結核形成が起こり、直ちに -40°C 以下で凍結する。従って、均質昇華核形成は決して起こらない。一方、均質凍結核形成は、自然の大気中でも積乱雲の上部や巻積雲のような -40°C 以下で比較的大きな上昇流を持つ雲の内部で起こり得る（村上 1996；村上 2005）。しかし、一般的には雲の温度がこれほど下がる前に、雲粒の生成と同様に、異物質でできた核となる粒子の働きで氷晶が生成される。これが不均質核形成である。大気中に雲粒ができるときは水蒸気から水滴になる1つの道筋しかないが、氷晶の生成にはいくつかの道筋

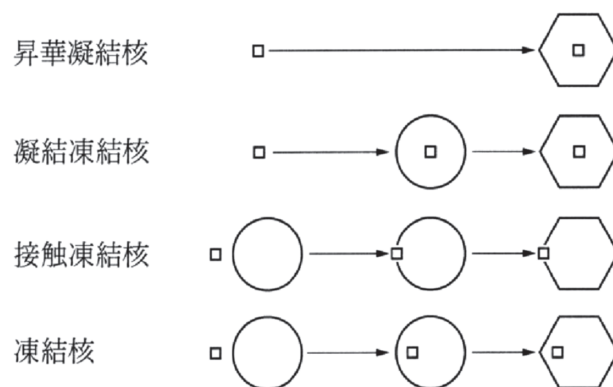


図5：氷晶核（小さい四角で示す）の活性化メカニズム

Fig. 5: Activation mechanisms of ice-forming nuclei

があり複雑である。氷晶を生成する手助けをする粒子を総称して IN という。

IN の働き方は、図5に示すように4通りが考えられ、それぞれ昇華（凝結）核、凝結凍結核、接触凍結核、内部凍結核と呼ばれる。

- (1) 昇華核：昇華凝結によって水蒸気から直接氷へ変化するとき芯となり、氷晶を生成する手助けをする粒子。
- (2) 凝結凍結核：凝結核と凍結核の性質を合わせ持つ粒子で、まず水溶性の物質が水蒸気から水滴が生成されるとき凝結核として働き、次に不溶性の物質が凍結核として働き水滴を凍結させる。
- (3) 接触凍結核：水滴に衝突して凍結させる非吸湿性粒子。
- (4) 内部凍結核：比較的暖かい温度領域で凝結核として、あるいは凝結核として活性化しない粒子が衝突によって水滴内に取り込まれ、その後の温度低下によって水滴を凍結させる働きをする粒子。

IN として働く代表的な物質を表1に示す。大気中の IN は主に大気中に舞い上がった土壌粒子中の粘土鉱物である。バクテリアの一種も IN として有効であるが、これは植物の葉について霜を発生させる働きをする。ところが、雲頂温度が比較的高い雲では氷晶の数濃度が低く、降水ができにくいことが分かっている。

CCN と IN の議論で注意を要するのは、両者の数濃度の違いである。季節や地理的な条件にもよるが、CCN 数濃度が $10^3\ \text{個 cm}^{-3}$ であるのに対して、IN 数濃度は $10^{-3}\ \text{個 cm}^{-3}$ と約6ケタの違いがある。換言すると、世界中どこに行っても CCN は十分な数存在するが IN は希少である。そのため、一般的に 0.2% を超えるような水過飽和領域は時空間的に狭い領域に限定され、雲底から数 $10\ \text{m}$ の層に見られる程度である。そのほかの雲領域では水過飽和度は小さな値となっている。一方、IN 数濃度は CCN と比べて極端に低いいため、水過飽和領域は時空間的に広く存在し、水過飽和度も水飽和に近い値（ -10°C で $\sim 10\%$ 、 -20°C で $\sim 20\%$ 、 -30°C

表 1：種々の物質の氷晶核としての活性化温度

Table 1: Activation temperatures of various types of materials as ice nuclei.

物 質 名	結晶核子間隔		核として はたらく温度 (°C)	
	a 軸 (Å)	c 軸 (Å)		
純粋な物質				
氷	4.52	7.36	0	
ヨウ化銀 (AgI)	4.58	7.49	-4	不溶性
ヨウ化鉛 (PbI ₂)	4.54	6.86	-6	若干水溶性
鉱物				
ファテライト (vaterite)	4.12	8.56	-7	
カオリナイト (kaolinite)	5.16	7.38	-9	
火山灰 (volcanic ash)			-13	
有機物				
テストステロン (testosterone)	14.73	11.01	-2	
コレステロール (cholesterol)	14.0	37.8	-2	
メタアルデヒド (metaaldehyde)			-5	
バクテリア (bacterium)			-2.6	植物の葉につくバクテリア

で30%の水過飽和度)も稀ではない。したがって、人工雲核・人工氷晶核によるシーディングに対する雲・降水システムの応答は後者の方が大きいのが一般的である。

4.2 意図的气象改変の方法

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つ潜在的降水能力を最大限に引き出すことにある。直接空気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莫大なエネルギーを必要とするため現実的な方法ではない。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内部構造の変化を利用するものである。霧・雲・降水の意図的改変の方法も、暖かい雨と冷たい雨のメカニズムを対象にしたものが考えられている。

暖かい雨に適用する吸湿性粒子シーディングには三つの仮説があり、散布する吸湿性粒子の粒径もそれぞれ異なる。1) 10 μm より大きな吸湿性粒子 (超巨大核) を散布して、速やかに 40 μm 以上の大雲粒 (雨滴の芽) を生成しバックグラウンドエアロゾルから生成する粒径の小さな雲粒を捕捉し雨滴の生成を早める, 2) 1~10 μm の吸湿性粒子 (巨大核) を散布し, 生成する雲粒粒径分布を大粒径側に広げることによって, 以降の雲粒同士の衝突併合過程を促進し, 雨滴の生成を早める, 3) 0.1~1.0 μm の吸湿性粒子 (大核) を散布し, バックグラウンドエアロゾルからの雲粒生成を抑制し, 低濃度で大粒径の雲粒を生成し, 雲粒同士の衝突併合過程を促進し, 雨滴の生成を早めることにより, 最終的には地上に到達する総降雨量を増加させようとするものである。航空機を用いた雲頂上方からの海水・淡水の散布は1) のより直接的な方法ととらえることができる。広域への散布 (拡散) 効率や航空機積載量・環境負荷軽減の観点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, 近年まで有用な散布手法がなかった。しかし, 最近, 吸湿性の塩を微粒化する技術が開発され, 上述のよ

うな問題が克服できるようになり, この分野の研究も活発に行われるようになってきた (Mather et al. 1994; Rosenfeld et al. 2010)。一つは, NaCl を予めミクロンサイズに磨り潰したものを航空機から散布するマイクロパウダー法, もう一つは発煙筒のように酸化剤の中に吸湿性物質 (NaCl または CaCl_2) を混入させ, 燃焼により気化・析出させてミクロンあるいはサブミクロンサイズに微粒化する火工法 (フレア法) が考案されている。この他に暖かい霧に対しては, 直接的に運動や熱のエネルギーを注入する方法もある。例えば, ガスバーナーで気塊を暖めて霧を消したり, ヘリコプターの作り出す下降気流で霧を消す方法である (図6)。

冷たい雨に対しては, 過冷却の雲に人工的に氷晶を発生させる方法が適用され, この方法が現在一番用いられている。これには, 空気を -40°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と, 人工氷晶核を散布して氷晶発生を促進させる方法がある (図7)。

強冷法に用いる代表的な物質はドライアイスで, 昇華蒸発中には, その表面温度は -100°C 近くまで下がることが知られている。1gのドライアイスから 10^{13} 個とい

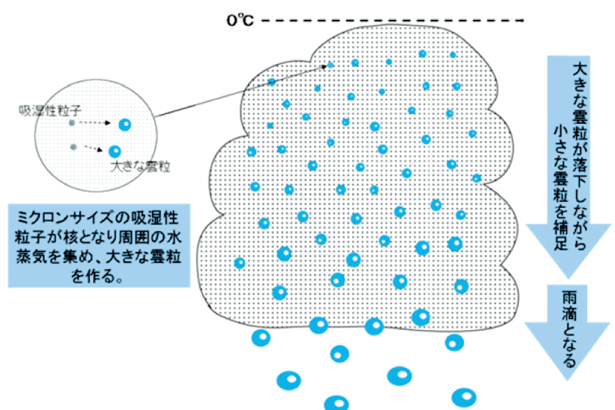


図 6：暖かい雲に対するシーディング法。 (村上 2009)

Fig. 6: Cloud seeding method for warm clouds

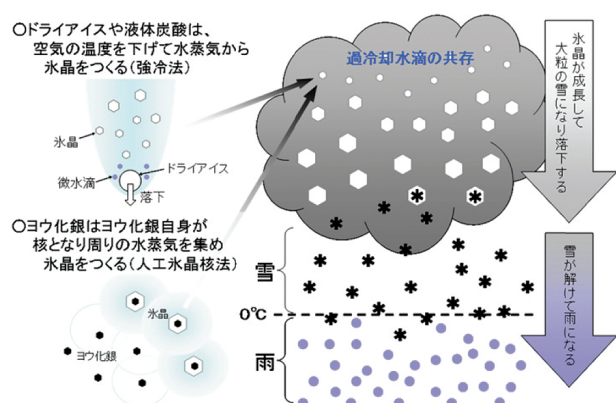


図7：冷たい雲に対するシーディング法。(村上2009)

Fig. 7: Cloud seeding method for cold clouds

う天文学的な数の氷晶を発生することができ、無駄なく理想的に撒ければ、 $5\text{ km} \times 5\text{ km} \times 2\text{ km}$ の雲に100個/Lの氷晶を発生させるのに総量でわずか0.5 kgのドライアイスペレットを撒けば十分である。液体炭酸や液体プロパンでも同様の効果が得られる。液体炭酸や液体プロパンはボンベに封入することで蒸発などの影響を受けず保存が容易であることと、氷晶を生成する際の昇華の潜熱で作出される弱い対流で静穏な過冷却の放射霧の中でも効果が広がるという理由で、地上から散布し空港やスキー場にかかる過冷却霧の消散に使用されたことがあるが、増雨増雪を目的とした人工降雨実験では試験的な使用以外では用いられていない。最近この方法を航空機から雲に対するシーディングに応用する事例も見られるが、対象とする雲の内部にできるだけ短時間で広範囲にシーディング効果をいきわたらせるという点で、シーディング直後の影響空間が1次元になる液体炭酸シーディングより落下しながら氷晶を発生させ影響空間が2次元になるドライアイスシーディングの方が効果的であることが数値シミュレーションでも示されている。散布した液体炭酸は沸騰状態にあり瞬時に気化するため、ごく狭い空間の水過飽和水蒸気から氷晶を生成することになり、一度に大量のシーディング物質を撒いても1 g当たり 10^{13} 個の氷晶を生成できない場合が多いことにも注意を要する。

人工氷晶核として古くから使用され、現在でも最も広く用いられているのはAgIである。AgIをアセトンに溶かして燃焼気化して、直径30～100 nmの微粒子を発生させると、1 gのAgIから $10^{10} \sim 10^{16}$ 個の人工氷晶核を発生することができる。その他に火工法といって花火のように酸化剤と還元剤の組み合わせの中にAgIを入れて燃焼・気化させる方法もある。火工法には航空機につけたり、航空機から投下したり、高射砲・ロケット砲を使って打上げるものもある。AgIのような無機化合物からなるINの結晶構造(格子定数)は、氷の構造とよく類似していることが知られている。近年はAgIアセ

トン溶液の化学成分に工夫を凝らし、AgIのアセトン中における溶解性を向上させるだけでなく、エアロゾル粒子の格子間隔をより氷の格子間隔に近づけIN能を向上させたり、CCNとして働きやすくするためエアロゾル粒子に吸湿性を持たせるように改良が加えられている。現在では、燃焼により生成されるAgI粒子の化学組成は $\text{AgI}_x\text{Cl}_{1-x} \cdot y\text{NaCl}$ となっているのが一般的である。ここで、 $x=0.7 \sim 0.8$, $y=0.5 \sim 4$ 程度の値となっている。人工氷晶核としてAgIのほかにヨウ化鉛(PbI_2)やメタアルデヒドという有機化合物も用いられたこともあるが現在は使用されていない。

ドライアイスの場合、 -2°C 以下では温度に無関係に1 g当たり 10^{13} 個の氷晶を発生するのに対して、AgI粒子がINとして効き始めるのは $\sim -4^\circ\text{C}$ からで、温度依存性が強いのが欠点である。逆にAgIは地上からアセトン溶液を燃焼させて、人工氷晶核を雲内に導入できるという手軽さがある。この手軽さとランニングコストが安価にすむという点で業務実験では現在でもシーディング物質として一番広く用いられている(福田1988; 村上2002)。地上からのAgI発煙の方法で注意を要することは、AgIをINとして有効に働く -10°C 以下の雲領域に確実に送り込むことである。気象条件や地形形状にも依存するが、地上からのAgI発煙が効果的となるのは寒候期の山岳性混合相雲に限定される。この条件を満たさない場合には、航空機を用いたAgIアセトン溶液の発煙法や火工法によるAgIシーディングも用いられるようになってきた。

5. 問題点

人工降雨の研究でいつも問題となるのが、効果判定の難しさである。自然の雲に対するシーディング実験は、同じサンプルを用いて何回もくり返し行う物理や化学の実験とは勝手が異なる。雲の内部構造は、雲の種類、大きさ、発生場所によって異なり、同一の雲でも発達段階により大きく変わる。一旦ある雲に対してシーディングをしてしまえば、しなければどうなったか知ることができない。そのため統計的手法が広く用いられてきた。降水量の気候値のほぼ等しい2地区を選び、一方を標的地、他方を標準地とし、標的地にかかる雲だけにシーディングを行い両地区の降水量を比較する方法が最も良く用いられる。この統計的手法では、シーディング効果が自然の降水量の大きな変動の中に埋もれ、たかだか年間数10回程度の実験結果から統計的に有意な増雨率を示すのは困難であった(表2)。

もう一つの問題は、意図的気象改変の及ぼす自然環境への影響と社会的影響について地域住民に十分な理解を得ることである。特に、社会的影響は複雑な問題である。都市部に降る雪を山岳部に移動して水資源確保を図

表2：単一領域無作為シーディング実験で40%の増雨（増雪）効果を検出するために必要な実験回数またはシーズンの数。（Dennis 1980）

Table 2: Number of experiments units and seasons required to detect a 40% rainfall increase under a randomized single-area design

Experiment	No. of units	No. of units per season	Seasons
SCUD (Eastern U. S.)	178	19	9
Grossversuch IIIA (Swiss hail experiment)	390	15	26
Arizona I	460	22	21
East central Illinois (summer showers)	770	38	20

*Based on data from Neyman and Scott (1967a).

ることを例にとっても、都市部の雪が少なくなることを喜ぶ人もいれば、快く思わない人もいるであろう。十分な水資源を確保することも、全員が賛成するとは限らない。ある地域の水資源確保を図ると隣接する地域で逆の効果があるとすれば、この問題はやっかいである。社会的影響は、国や地方自治体等との連携をとり、社会全体の利益を基準にして判断する必要がある。別の視点からは、人工降雨が社会・自然環境へ及ぼす影響について地域住民の総意を得ることが課題である。

6. 色々な意図的気象改変

現在世界中で最も多く行われているのは、増雨・増雪を目的とした意図的気象改変である。いわゆる人工降雨のことで、シーディングによる水の相変化に伴って放出される潜熱を利用して、凝結量を増加する方法（動的シーディング法）も考えられているがチャンスが少ないため、シーディングにより雲の微物理構造を変化させ、雲内で凝結した雲水から降水への変換効率（降水効率）を改善する方法（静的シーディング法）が採用されている。その他に、降水粒子の落下速度を変化させ、水平風により降水域を移動させる方法もある。増雨・増雪では、冬季山岳性混合相雲を対象としたドライアイスやAgIを用いた方法が最も効果的と考えられている。

次に多く行われているのは、降雹抑制である。雹は、粒径が数 cm、落下速度が 30 ms^{-1} 以上にもなることがあり、その大きな運動エネルギーにより農作物や都市部の建築物・自動車等に大きな被害を与える。雹の運動エネルギーは粒径のおおよそ4乗に比例するので、雹の粒径を小さくすることによって大幅に被害を軽減することを狙ったものである。現在行われている降雹抑制プロジェクトでは大粒の雹の生成を抑制する方法として、シーディングにより雹の芽となる霰粒子を多数生成して、自然の雹の芽と過冷却雲粒捕捉による着氷成長を競合させ、個々の雹を小粒なものとするという考え方である。降雹抑制の効果については、研究者によって意見の分かれるところである。原理的にはともかく、激しい気象擾乱（積乱雲）に対して採られている実際の方法的有効性を疑問視する研究者も少なくない。

過冷却霧の消散は、前節で述べた水と氷に対する飽和水蒸圧の差を利用して、氷晶の成長・落下と微水滴の蒸発により視程改善をはかるもので、その効果が最も顕著な意図的気象改変技術として挙げられている。氷晶発生には強冷法が用いられ、液体炭酸や液体プロパンを使用する方法も提案されているが、実際には航空機からのドライアイス散布が最も用いられている。一方、暖かい霧の消散方法としては、数 $10 \mu\text{m}$ の吸湿性粒子（NaCl, NH_4NO_3 , 尿素など）を霧層の上から大量に撒いて霧粒を蒸発させる方法があるが、環境汚染や費用がかかることが問題である。一般に、雲・降水を対象とする場合は、直接エネルギーを注入する方法は経済効果が悪いので用いられないが、空港の滑走路などの狭い空間を対象とした場合、ガスバーナーで霧粒を含む空気塊を加熱し、相対湿度を低下させ霧粒を蒸発させる方法や、ヘリコプターが作り出す下降流で上層の乾燥した空気と霧層の空気を混合して霧粒を蒸発させる方法が用いられたこともある。

集中豪雨・豪雪の緩和技術は、災害が起こるたびに話題に上るが、これを目的とした業務実験や研究プロジェクトは現在実施されていない。日本を含む中緯度帯で狭い範囲に短時間に強い雨をもたらす、換言すると雲水から降水へ効率良く変換する降水機構として、上空における霰・雹の成長抜きでは考えられない。霰・雹を生成する雲に対してオーバードレーピングを行うことにより、個々の降水粒子の成長を抑え、落下速度を減少させることによって、降水域を風下側に広げ、降水強度を弱めることは原理的には可能性があるが、自然の状態でも効果的に働いている降水過程を変調するためには、膨大なシーディング物質が必要とされ、実効性には問題が残る。

台風抑制の基本的な考え方は、スパイラルバンドに動的シーディングを実施し、バンド内の対流雲を発達させ、既存の目の壁雲の外側に新たに壁雲を形成するというものである。新しい壁雲の循環が内側に流れ込む気流を阻止し、角運動量の保存則から水平風速を減少させ、中心付近の気圧傾度を弱めることにつながる。台風抑制に関する研究として、1960年代に米国で実施されたProject Stormfuryは有名であるが、当時は台風のメ

カニズムそのものの理解が不十分で、有意な結果は得られなかった。しかし、近年の急速な技術革新（特に計算機技術）によって、雲微物理スケールのシーディング効果と台風の発達という数千キロスケールの擾乱発達を同時に扱う数値シミュレーションも可能となりつつある。2005年8月にハリケーンカトリナが米国南部を襲って大きな被害をもたらしたことを受けて、米国国土安全保障省がハリケーン制御の技術開発に意欲を見せているが、日本の気象庁にあたる米国海洋大気庁は現在のところ慎重な姿勢を取っている。

最近にわかに注目を集めている（注意深く見守る必要がある）のは、炭酸ガスの増加に伴う地球温暖化を抑制するためのジオエンジニアリング（意図的気候改変）の議論である。例えば、上層雲の変調を通して地球の反射率を高めて温暖化を抑制することが提案されている。IN濃度はCCN濃度のおおよそ百万分の一と少ないため、 0°C 以下で氷過飽和状態の空間を見出すのは比較的容易である。例えば、飛行機雲が発達するような大気層に、シーディングを行うことにより、自然に放置した場合より、早くかつ広範囲に氷晶雲を生成することが可能である。シーディングにより氷晶の大きさ、数濃度を変えることも十分可能である。このような雲の微物理特性の変化や氷晶雲の生成を通して、地球の放射収支に影響を与えることも可能となるかもしれない。この他に、海水を大量に大気中にスプレーしてCCN数濃度を増加させることにより大気下層の雲の反射率を高める方法や、成層圏下部に散乱性の硫酸塩エアロゾルやその前駆物質ガス（ SO_2 ）などを注入して、太陽光放射を弱める方法なども提案されている。しかし、これらの提案されているジオエンジニアリングの方法のほとんどが、エアロゾルの間接効果という（雲物理学的）観点から、これまで人工降雨研究のなかで行われてきた雲物理学的研究と比べて不十分と言わざるを得ない。全球気候モデルにパラメタリゼーションとして取り込むことにばかり気を取られて、基礎的物理過程の理解・モデルによるその適切な取り扱いが今後の課題である。また、ジオエンジニアリングを選択することで、地球温暖化の主因である人為的二酸化炭素の排出抑制に対する意欲が失われることを危惧する声も聞かれる。

7. 人工降雨降雪研究の最前線

近年、航空機などを用いた雲・降水の測定技術や雲の数値モデルの目覚ましい進歩により、降水機構に関する理解が格段に深まっており、シーディングによる雲の内部構造の変化から降水量の増減までの一連の変化を自然の雲の状態と区別し評価することが可能となってきた。このようなシーディング効果の物理的評価手法と組み合わせることで、従来の統計的評価手法の信頼性も高まっ

た。一方、シーディング効果に関する統計的解析手法も、標的地の降水量の物理的予測因子を導入することによって、シーディング効果の評価に要する期間を大幅に短縮する見込みが示されつつある。シーディング効果に関する実験結果や観測結果に基づくパラメタリゼーションを導入した信頼性の高い数値モデルを用いて、最大限の効果を引出す最適シーディング法（場所・タイミング・量）も開発され、季節を通したシーディング効果も評価できるようになってきた。

まず、意図的気象改変研究におけるエアロゾルの雲・降水影響の取り扱いについて、AgIシーディングを例にとり紹介する。地上からのAgIアセトン溶液の燃焼や航空機からのAgIアセトン溶液の燃焼、あるいは航空機からの吸湿性フレアの燃焼から生成されるAgI粒子を、未だ活性化せず空気中に存在する粒子、それぞれ雲水・雨・雲氷・雪・霰に取り込まれた粒子に区分し、別々の予報変数として計算することによって、AgI粒子が昇華核・凝結凍結核・内部凍結核・接触凍結核として雲内で氷晶を生成し、以降の降水過程を変調する様子を詳細に計算している（図8）。使用している数値モデルはバルク法雲物理パラメタリゼーションを組み込んだ非静力学モデルであるが、非意図的気象改変（エアロゾルの間接効果）研究でも、これほどエアロゾルの雲核・氷晶核形成過程を詳細に取り扱った例はほとんど見られない。

冬季山岳性混合層雲を対象とした意図的気象改変研究の最新動向を、気象庁気象研究所と国土交通省利根川ダム統合管理事務所との共同研究「山岳性降雪雲の人工調節の可能性に関する基礎的研究」（平成6～14年度）（Murakami et al. 2003）や文部科学省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」（平成18～22年度）（村上2009）の成果を通して紹介する。冬季の山岳性降雪雲に対して、雲頂からドライアイス进行を撒き、氷晶を発生させ、雪の成長を促進する方法を検討した。野外実験観測では、単に航空機からドライアイス进行を撒くだけではなく、最新鋭の観測機器を搭載した航空機で雲の内部構造の変化を調べるとともに、各種レーダ、マイクロ波放射計などを地上に配置してシーディング前後の雲の様子をモニタリングし、人工降雨に適した雲を識別する手法やシーディング効果の評価法などを開発・活用しながら、総合的な研究を実施した。

山岳性降雪雲を対象とした準実スケールのドライアイスシーディング実験を実施し、航空機を用いてシーディング前後の雲の微物理構造の変化を解明し、増雪のメカニズム・増雪効果を定量化した。過冷却雲水を豊富に含む雲ではドライアイスシーディングにより生成された氷晶は10分後までに昇華凝結成長により数 $100\mu\text{m}$ にまで成長し、それ以後は付着併合成長により数 mm の雪

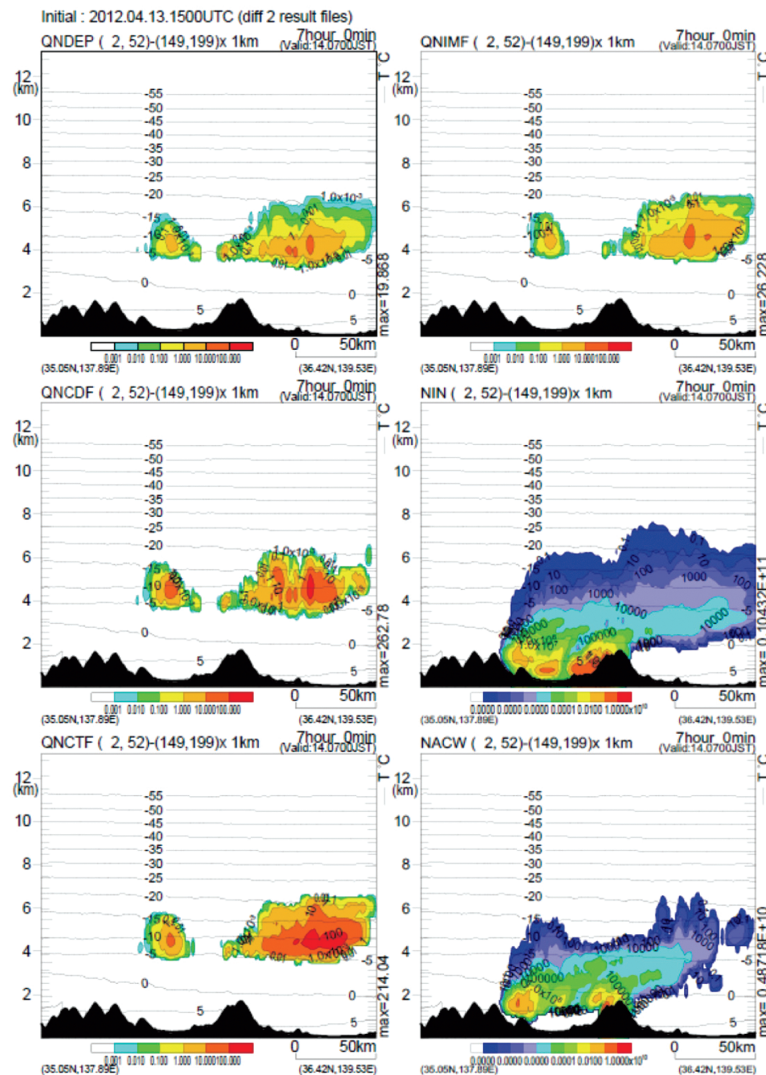


図8：バルク法 NHM による AgI シーディングの取り扱い。昇華核形成（左上），凝結凍結核形成（左中），接触凍結核形成（左下），内部凍結核形成（右上）の積算値，大気中の AgI 粒子数濃度（右中）と雲水中の AgI 粒子数濃度。（気象研究所 橋本明弘氏提供）

Fig.8：Treatment of AgI particles in NHM implemented with a double moment cloud microphysics parameterization. AgI particles activated through deposition nucleation (upper left), condensation freezing nucleation (middle left), contact freezing (lower left), immersion freezing (upper right), non-activated AgI particles in the air (middle right), and AgI particles in cloud water (lower right).

片（降雪粒子）にまで成長することが分かった（図9）。シーディングカーテンの幅はシーディング直後の200～300 mから拡散により20～30分後には2～3 km程度まで広がり，その中の氷晶濃度は1,000 個/L程度から100 個/L程度に減少することも確認された（図10）。2Dイメージから算出したシーディングカーテン内のレーダ反射強度は周囲と比べ3～5 dB程度増加することが示された（図11）。レーダ観測から得られる時空間的に大量のデータを用いて，シーディングカーテンの推定位置でレーダ反射強度が周囲と比べて若干強くなることも確認した。

現実的なドライアイスシーディング実験を再現するため，高精度な雲の数値モデルを開発し，そのモデルを用いて最適シーディング法の検討などを行った。集中観測期間中には，このモデルを用いて，観測支援資料として

人工降雪に適した雲の出現予報実験やシーディング効果予測実験を実施した。山岳性降雪雲に対して理想的な（最も効率の良い）シーディング法を採用した場合，ダム集水域に降る一冬の降雪量を最大30%程度増加させる可能性があることが数値シミュレーションで示された（図12）。また，積雪融雪流出モデル・水管理モデルと組み合わせることで，一冬を通してドライアイスシーディングをすることにより夏期のダム制限容量に移行する6月30日の貯水量を大幅に改善できることも示された（図13）。

次に吸湿性粒子（NaClやCaCl₂）シーディングを例にとって，意図的気象改変研究におけるエアロゾルの雲・降水影響の取り扱いを紹介する。南アフリカの研究グループが吸湿性粒子フレアシーディングを混合相対流雲に適用し，航空機直接観測から雲底付近の雲粒粒径分

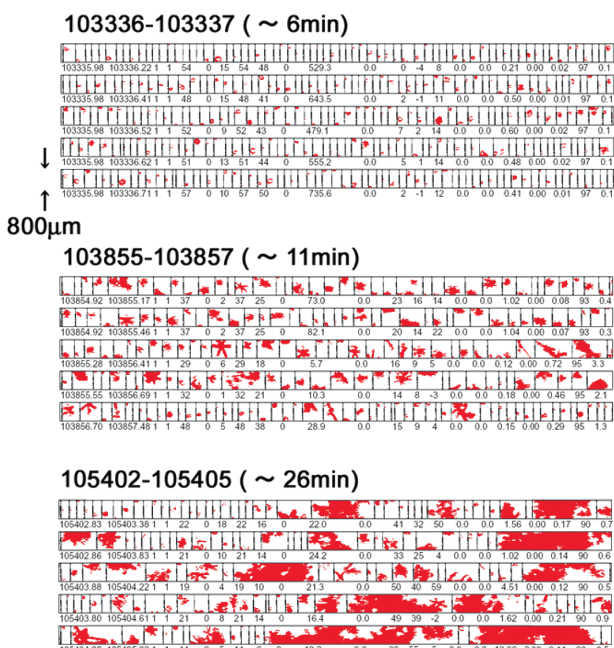


図9：シーディング6分後、11分後、26分後におけるシーディングカーテン内で観測された雲粒子・降水粒子の画像(2D-Cイメージ)。(Murakami et al. 2003)

Fig. 9 : 2DC images of ice particles in seeding curtain, 6, 11 and 26 min. after dry-ice pellet seeding.

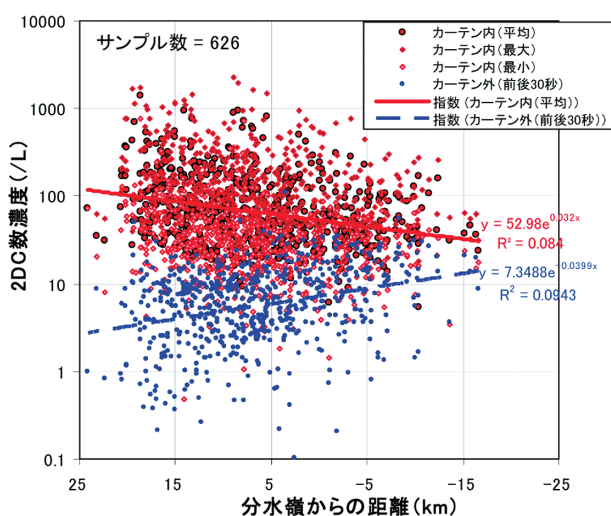


図10：氷晶・雪粒子の2Dイメージから求めた氷晶数濃度。シーディングカーテン内(赤色)とその周辺(青色)。(村上2009)

Fig.10: Ice particle concentrations in seeding curtains (red) and their surroundings (blue) obtained from 2DC images as a function of distance from the divide.

布が広がり(図14)、レーダ観測から推定した雲内雨水量の増加、降雨持続時間の増大(図15)を示して以来、脚光を浴びてきている。吸湿性粒子を用いたシーディングに関しては、未だ研究段階でその効果についても大きく意見の分かれるところである。雲生成チェンバーや詳細雲物理モデルを用いて、吸湿性粒子シーディングの効果に関する基礎的実験を実施し、標準的な大気状態における平均粒径0.8から10 μm のNaCl粒子(マイクロパウダー)や発煙(フレア)法で生成される粒径0.3か

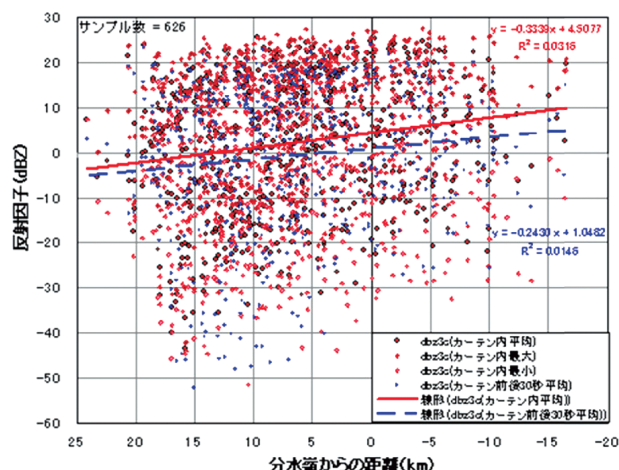


図11：氷晶・雪粒子の2Dイメージから計算したレーダ反射因子。シーディングカーテン内(赤色)とその周辺(青色)。(村上2009)

Fig.11: Radar reflectivities in seeding curtains (red) and their surroundings (blue) calculated from 2DC images as a function of distance from the divide.

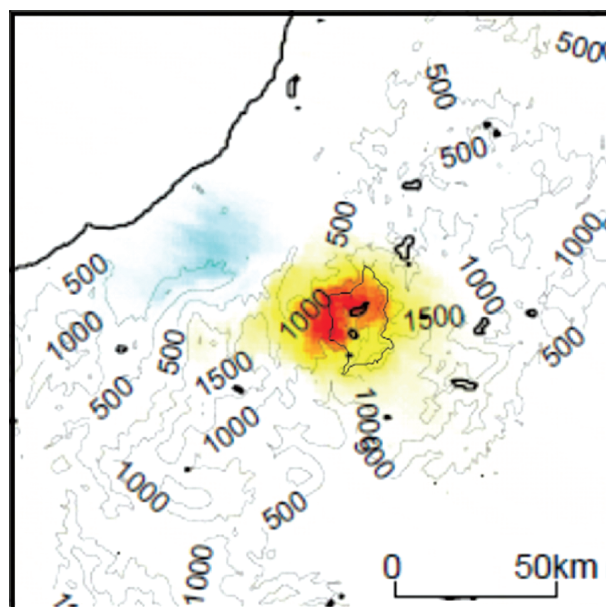


図12：一冬を通したドライアイスシーディングによる積算降水量の増分。(村上2009)

Fig.12: Increases in cumulative surface precipitation due to dry-ice seeding through a whole winter season.

ら数 μm の CaCl_2 粒子について、最も有効なシーディング粒子の同定を進めてきた。雲生成チェンバー実験ではマイクロパウダー(平均粒径0.8から10 μm のNaCl粒子)をシーディングすることによって、大粒径の雲粒の生成と雲粒総数濃度の増加を伴う初期雲粒粒径分布の顕著な変化が現れることが確認された。一方、発煙(フレア)法で生成される吸湿性粒子(粒径0.3から数 μm の CaCl_2 粒子)をシーディングして雲粒総数濃度の顕著な増加は見られるが大粒径の雲粒の増加を伴う初期雲粒粒径分布の顕著な変化は見られなかった(図16)。吸湿性リフレアからは0.3 μm 付近にピークを持つ粒子と2 μm 付近にピークを持つ粒子が生成される

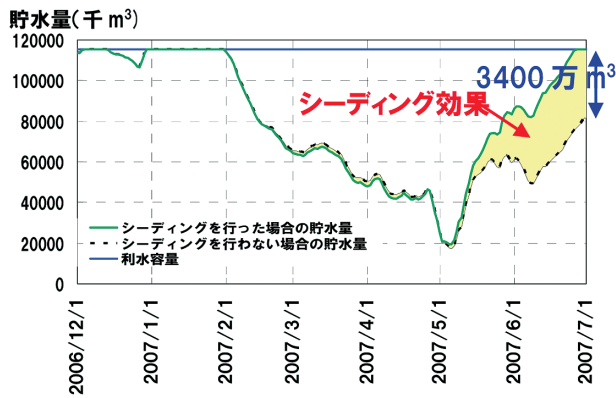


図 13：一冬を通したドライアイスシーディングの矢木沢ダム貯水量に対する効果。(村上 2009)

Fig. 13: Effects of dry-ice seeding through a whole winter season on the water storage of Yagisawa Dam.

が、後者の数濃度は前者の 10^{-3} から 10^{-4} と低濃度であるため、巨大粒子から生成される大雲粒の数濃度が粒子計測装置の検出限界以下だったためと考えられる。

観測用航空機とシーディング用ヘリコプターを用いた野外吸湿性粒子シーディング実験では、マイクロパウダー法と吸湿性フレア法ともに雲底付近に自然の状態よ

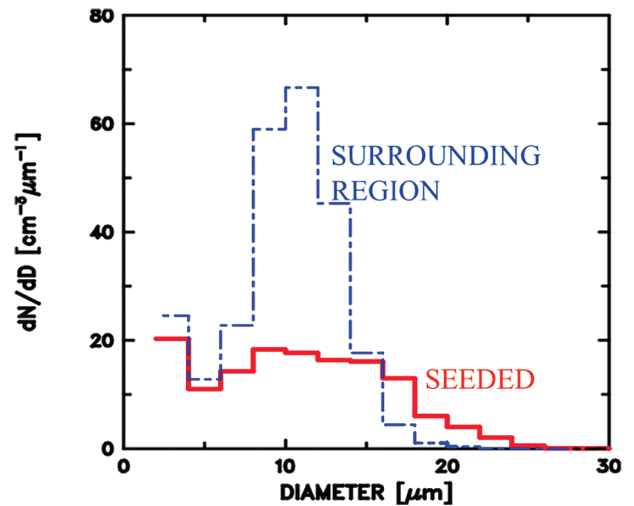


図 14：吸湿性フレアでシーディングした場合としない場合の雲底付近の雲粒粒径分布。(Mather et al. 1997 に加筆)

Fig. 14: Changes in cloud droplet size distribution near cloud base due to hygroscopic flare seeding.

りも大粒の雲粒が生成することは確認することができたが (図 17), その後の増雨につながる雲の内部構造の変化まで確認することはできていない。バックグラウンド

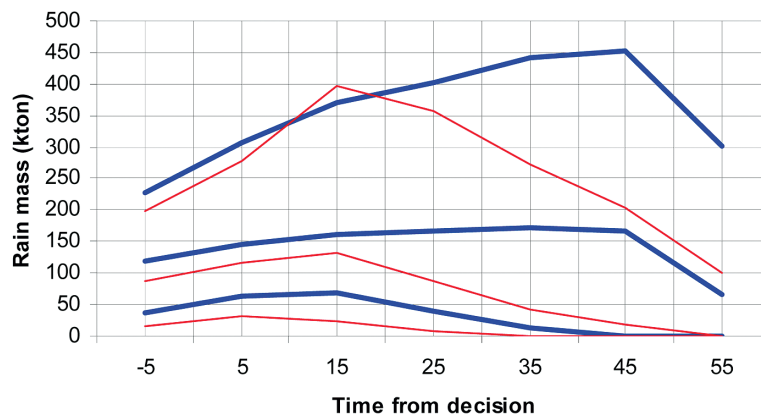


図 15：シーディングした場合（青）としない場合（赤）のレーダーエコーから求めた雲中の雨滴質量のシーディング決定時刻からの時間変化。下から 25, 50, 75 パーセンタイル。(Mather et al. 1997 に加筆)

Fig. 15: Comparisons of the first, second, and third quartiles of the seeded (blue) vs the control (red) group of storms. Note that the seeded storms peak later and at higher rain masses than their unseeded counterparts.

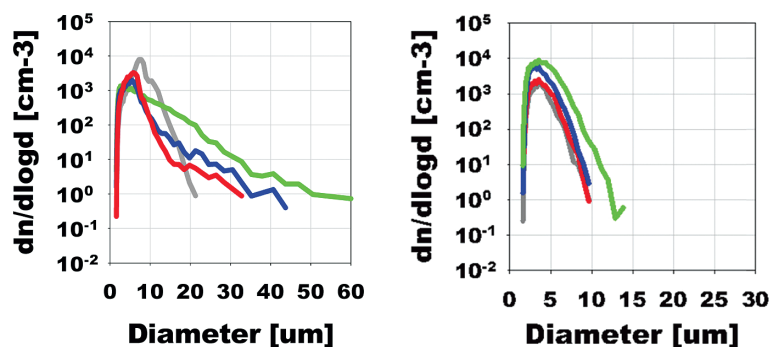


図 16：雲生成チェンバー実験から得られた NaCl マイクロパウダーシーディング（左）と吸湿性フレアシーディング（右）による雲粒粒径分布の変化。バックグラウンドエアロゾルからの雲粒粒径分布（グレー）、バックグラウンドエアロゾルに低濃度（赤）、中濃度（青）、高濃度（緑）のシーディング物質を付加した場合の雲粒粒径分布。(村上 2009)

Fig. 16: Changes in initial cloud droplet size distributions due to NaCl micro-powder seeding (left) and hygroscopic flare seeding (right). Droplets size distributions formed on background aerosol (gray), background aerosols + low (red), moderate (blue), high (green) concentrations of seeding aerosols.

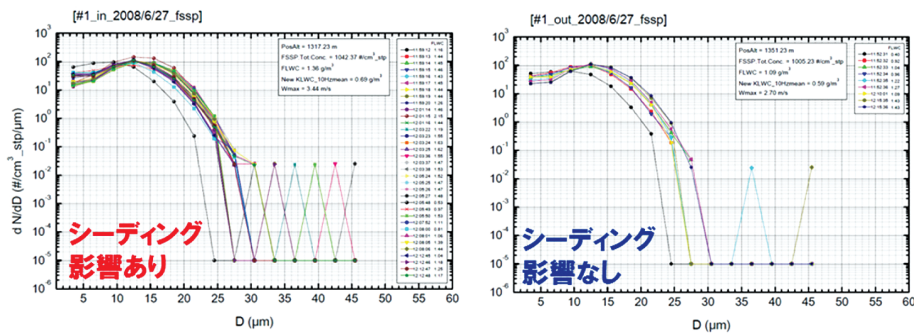


図 17：吸湿性フレアシーディングの影響を受けたと考えられる部分と受けなかったと考えられる部分の雲底直上における雲粒径分布。(村上 2009)

Fig. 17: Cloud droplet size distributions with (left) and without (right) hygroscopic flare seeding effects observed by an instrumented aircraft just above cloud base.

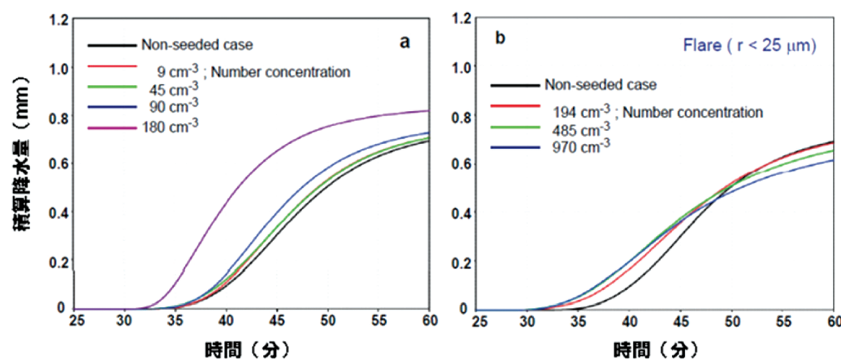


図 18：地上総降水量の時間変化。マイクロパウダーシーディング(左)とフレアシーディング(右)。(Kuba and Murakami 2010)

Fig. 18: Effects of NaCl micro-powder (left) and hygroscopic flare (right) seeding on cumulative surface precipitation.

エアロゾルや自然の雲の内部構造観測から、夏季の南よりの風が卓越する気象条件下でも、高知県上空の大気や雲の特性は純粋な海洋性ではなく汚染質の影響を強く受けており、吸湿性粒子シーディングの適用範囲にあることが確かめられた。

吸湿性粒子シーディングによる増雨効果を調べるため、詳細雲物理モデルを組み込んだ2次元モデルを用いた数値実験を行った。マイクロパウダー法では十分な量を撒けば最大10~20%の増雨効果を期待できることが示された。現行のフレア法では5 μ m以上の粒子を含めば降水のタイミングを早めることができるが(降水域を移動させる可能性を示唆)、必ずしも総降水量の増加にはつながらないという結果を得ている(図18)。マイクロパウダー法・フレア法共に、シーディング効果はシーディング物質の量や上昇流の強さ、バックグラウンドエアロゾル等に依存することが示されている。シーディング効果(地上降水の増加)のシーディング物質の量や粒径分布に対する感度実験を行い、シーディング効果とシーディングによる雲粒数濃度の減少に良い相関があることを見出した(図19)。雲粒数濃度の減少量はバックグラウンドエアロゾルの数濃度や粒径分布・シーディング物質の粒径分布や量にも依存するが、吸湿性粒子シーディングによって雲粒数濃度が減少する場合に地上降水量が増加する結果となった。これは、超巨大核や巨大核

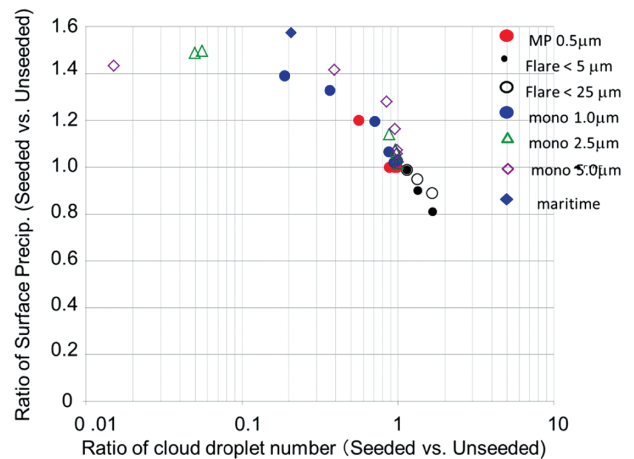


図 19：吸湿性粒子シーディングによる雲粒数濃度変化と積算地上降水量変化の関係。(Kuba and Murakami 2012)

Fig. 19: Relation between changes in cumulative surface precipitation and cloud droplet number concentration due to hygroscopic seeding.

によって少数の大雲粒(雨滴の芽)が生成されても、降水開始のタイミングは早まっても総地上降水量にはあまり影響せず、雲粒数濃度を減少して全体的に雲粒粒径を大きくした方が総地上降水量の増加につながることを意味しているようである。

8. まとめ

今後、地球温暖化に伴い豪雨豪雪・少雨少雪などの異常気象が頻発することが懸念されているなか、降水の人工調節は、日本の山岳性降雪雲のように条件を満たした雲では最大 30% 程度の増雪が見込める魅力的な技術である。水循環サイクルを少しでも調節して人類がその恩恵を受ける、人工降雨に代表される意図的気象改変に関する研究は、ますます重要性が増すものと思われる。世界的には水不足問題が深刻化することは間違いなく、そのような国々への技術支援の必要性が高まることは間違いない。

人工降雨・降雪が行われている国や地域の多くは慢性的な水不足問題を抱えていて、「一滴でも多くの雨が降ればいい」という考え方が大勢を占めており、基礎的研究に基づく技術開発が不十分なまま事業として実施されているのが実情である（村上 2003）。一方、日本を含む東アジアの海洋に面した国々や地域では、渇水や水不足は一過性のもので、1 年以上にわたって継続することは希である。しかし、たとえ 3～6 ヶ月の渇水でも被害は甚大で、渇水被害を軽減できないかとの思いは切実である。このような状況下では、タイムリーでピンポイントな人工降雨・降雪技術が要求されるため、より高度な技術が必要となってくる。渇水対策や水資源管理技術の確立のためには、人工降雨・降雪と同時に短期・長期の降水予報精度の向上とその利用が必須であることはいうまでもない。

本稿の冒頭でも述べたように、意図的・非意図的気象改変に関する研究は、その研究手法や対象とする物理過程の共通性から、表裏一体の密接な関係にある。意図的気象改変は非意図的気象改変を理解する上で、準実スケールの実験と見なすことが出来る。一方、非意図的気象改変は大気環境の変調を通して、意図的気象改変（シーディング効果）にも大きな影響を与える可能性がある。非意図的気象改変は人為起源のエアロゾルが知らず知らずのうちに雲・降水を変調するもので、一般的に自然状態とのコントラストも弱くその実態がとらえにくいことが多い。人為的エアロゾルもバックグラウンドエアロゾルとの差別が不明瞭で、エアロゾルの間接効果の物理過程の解明やその影響評価が難しい。一方、意図的気象改変ではバックグラウンドエアロゾルとは明瞭な差別のある特徴的粒子（CCN 能の高い・IN 能の高い）を使用し、意図的に雲・降水を変調しているので、エアロゾルの間接効果に関する物理過程の解明に有効である。人工降雨研究（意図的気象改変研究）に関連して、本巻（低温科学第 72 巻）で紹介した山下ほか（2014）、久芳（2014）、橋本（2014）、田尻ほか（2014）の研究成果が得られていることを見ても分かるように、意図的気象改変研究と非意図的気象改変研究は密接な関係にあ

り、今後、効果的かつ効率的に研究推進を図るためにも、両者を総合的に進めることが求められる。

参考文献

- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227–1230.
- Dennis, A. S., 1980: Weather modification by cloud seeding. *International Geophysics Series*, 24, Academic Press, 267pp.
- 福田矩彦, 1988: 気象工学 — 新しい気象制御の方法 —, *気象研究ノート*, 第 164 号, 日本気象学会, 213pp.
- 橋本明弘 (2014) 高精度ビン法雲微物理モデルの開発. 低温科学, 72.
- 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.
- Kuba N. and M. Murakami, 2012: Effect of hygroscopic seeding on warm rain clouds- -Numerical study using a hybrid cloud microphysical model-. *Proceedings of the 16th International Conference on Clouds and Precipitation*, Leipzig, Germany.
- 久芳奈遠美 (2014) ハイブリッド雲微物理モデルの開発. 低温科学, 72.
- Langmuir, I.; 1961: Cloud Seeding by Means of Dry Ice, Silver Iodide, and Sodium Chloride. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, Vol.14, pp.40–44, November 1951. Reprinted in *The Collected Works of Irving Langmuir*, Vol.10, pp.189–196, 1961.
- Mather, G. K., and D. Terblanche, 1994: Initial results from cloud seeding experiments using hygroscopic flares. *Sixth WMO Scientific Conf. on Weather Modification*, Paestum, Italy, WMO, 687–690.
- Mather, G. K., D. E. Terblanche, F. E. Steffens, and L. Fletcher, 1997: Results of the South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares. *J. Appl. Meteor.*, **36**, 1433–1447.
- 村上正隆, 1998, 第 4 章 雲と降水, 新教養の気象学, 朝倉書店.
- 村上正隆, 2002, 人工気象調節, キーワード気象の事典, 東京書籍.
- Murakami, M., N. Orikasa, M. Hoshimoto, K. Kusunoki, H. Kosuge and H. Ikeda, 2003: Present state of Japanese research on orographic snow cloud modification for water resources augmentation. *Preprint of the 8th WMO Scientific Conference on Weather Modification*.
- 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. 村上正隆, 2005: 第 1 編 第 5 章 雲と降水の物理学, 気象ハンドブック (第 3 版).
- 村上正隆, 2009: 人工降雨・降雪による渇水被害軽減研究の国内動向, 水と水技術 (オーム社), No.1, 90–95.
- 村上正隆, 2011: 科学技術振興調整費 重要課題解決型研究「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」事後評価成果報告書, 251.

- 村上正隆, 2012, 人工降雨, 降雪, 化学と教育, Vol.60, No.6, 242-245.
- Rosenfeld, D., 2000: Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution, *Science*, **287**, 1793-1796, doi: 10.1126/science.287.5459.1793.
- Rosenfeld, D., et al., 2008: Flood or drought: How do aerosols affect precipitation?, *Science*, **321**, 1309-1313, doi:10.1126/science.1160606.
- Rosenfeld, D., D. Axisa, W. L. Woodley, R. Lahav, 2010: A Quest for Effective Hygroscopic Cloud Seeding. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1548-1562.
- 田尻拓也, 山下克也, 村上正隆 (2014) 広範なエアロゾル種の雲核・氷晶核能. 低温科学, 72.
- Twomey, W., 1974: Pollution and the planetary albedo. *Atmos. Environ.*, **8**, 1251-1256.
- Vonnegut, B., 1947: The Nucleation of Ice Formation by Silver Iodide., *J. Applied Physics*, **18**, 593-595.
- 山下克也, 村上正隆, 田尻拓也, 橋本明弘 (2014) ダスト粒子の雲粒・氷晶発生を扱う詳細雲微物理ボックスモデルの開発. 低温科学, 72.