

特集 冬季オリンピック・パラリンピックを支える科学技術

2018年2月に韓国平昌にて冬季オリンピック・パラリンピックが開催される。2014年に開催されたソチ冬季オリンピックでは、日本はメダル数を含む入賞総数が28となる成績を収めており、国外で開催されたオリンピックでは過去最大のメダルを獲得した。このような活躍の背景には、アスリートの育成・強化だけでなく、スポーツ医科学や情報、科学技術分野等によるアスリートの支援、競技器具や用具等の研究開発の発展や積極的な導入があったと報告されている。特に、冬季スポーツはワックス等競技用具の性能向上が競技結果に大きく影響すると言われており、来年の平昌冬季オリンピックに向けてより一層の科学技術の寄与が期待されている。そこで、本特集では、冬季オリンピックに関連した科学技術に着目し、化学工学的な知見や要素技術に関連が深いと思われる、製氷・製雪技術、スキー・スケート用具の素材開発や構造設計、ジャンプ動作の計測解析法などの話題に焦点を絞って、これまでの開発動向例を紹介する。

(編集担当：青木才子)†

人工降雪

村上 正隆

1. オリンピックと人工降雨・降雪

近年、冬季オリンピックの話題が上ると人工降雪ということばをよく耳にする。人工降雨・降雪とオリンピックの関係は、2008年の北京オリンピックで開会式の雨を抑制するためにおこなったCloud seedingに関するマスコミ報道で一躍有名になった。しかし、国際会議などの場でその詳細が科学的に紹介されることもないので、実際どの程度の効果があったのか、その真偽のほどは定かではない。

オリンピック会場の雪不足の解消を目的に最初に人工降雪が試みられたのは1960年、スコアバレー（米国）オリンピックという記録が残っている。冬季オリンピックは雪が十分にあるところで開催されそうなもので、そのような心配は不要のように思われるが、そうでもないらしい。平年だと十分な雪があるはずの、北米大陸西海岸のバンクー

バー（カナダ）で2010年に開催された冬季オリンピックは競技開催が危ぶまれるほどの暖冬小雪で苦労したようである。それもあってか、4年後にロシアで開催されたソチ冬季オリンピックでも、人工降雪の実施が議論されたようである。今年（2018年）韓国で開催される平昌オリンピックでも数年前から積雪確保の選択肢の一つとして人工降雪が考えられていたし、2022年に中国の北京で開催される冬季オリンピックでも真剣に検討されている。これら最近の冬季オリンピックで実際に人工降雪がおこなわれたかどうかは別として、本稿ではオリンピックのたびに話題になる人工降雪について紹介する。

2. 人工降雨・降雪とは

自然の雲にヨウ化銀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」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」・「気象調節」と呼ぶ。

第2次世界大戦直後、米国のジェネラルエレクトリック



Artificial Snowfall
Masataka MURAKAMI
1983年 北海道大学環境科学研究科環境構造学専攻博士課程修了
1984～2016年 気象庁気象研究所
現在 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任教授、世界気象機関 大気研究・環境計画 天気改変研究計画 専門家チーム委員、米国気象学会 意図的非意図的気象改変委員会 委員長
連絡先：〒464-8601 名古屋市千種区不老町
E-mail mamuraka@rain.isee.nagoya-u.ac.jp

2017年11月27日受理

† Aoki, S.

平成29, 30年度化工誌編集委員(2号特集主査)
東京工業大学物質理工学院応用化学系

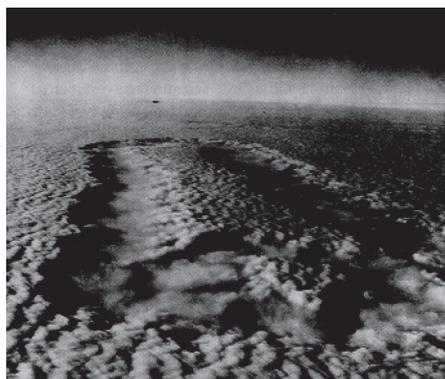


図1 世界で初めておこなわれたドライアイスを用いたシーディング実験¹⁾

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。彼らは、過冷却の微水滴で一杯になっている冷凍庫にドライアイスの破片を落としたところ無数の氷晶が発生することを偶然に発見した。この発見に基づき、小型飛行機で1.5 kgのドライアイスを層積雲に撒いた。発生した氷晶は周りの過冷却雲粒を蒸発させながら成長し、雲に穴を開け、600 m落下した後蒸発した（図1）。この画期的な実験がきっかけとなり人工降雨は世界中に広まったのである。

降水の日々の変化、年々変動は激しく、多すぎると洪水の心配を、少なすぎると渇水の心配をしなければならない。日本では、これまでおおよそ10年に1度の割合で大規模な渇水が発生してきた。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とが分かる。

水不足は世界的な傾向で、国連が近い将来に世界中の人口の約4割が深刻な水不足の問題に直面すると警告している。年々変動の激しい降水現象を人工的に調節し、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・降雪の基礎

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が、人工降雨の基本的な考え方で、現在広くおこな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。

雨・雪の成り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℃よりも暖かい高度にあり、液体の水だけからな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、雲のある程度の部分が0℃高度よりも上空に存在し、固体の水（氷）を含む雲から降る雨である。本稿では降雪を対象としているので、暖かい雨を形成する雲を対象とした人工降雨技術の話は割愛させていただく。冷たい雨を形成する雲の0℃高度より上空では、過冷却、すなわち0℃以下でも凍らない

微水滴（雲粒）と、そこに少しずつできた氷の微粒子（氷晶）が混在している。自然界の雲を調べると、雲頂温度が-5℃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℃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℃付近までは、過冷却の雲粒が存在することも少ない。過冷却の雲粒と氷晶が共存する場合、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℃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 μmで-35℃、10 μmで-37.5℃、1 μmで-40.7℃と、約-45℃までにどんなに小さな水滴も凍結する。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℃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℃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。

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氷晶核という。

大気中の氷晶核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。その他に、金属酸化物や細菌の一種も氷晶核として有効である。

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。冷たい雨の人工調節法としては、過冷却の雲に人工的に氷晶を発生させる方法が現在最も多用されている。これには、空気を-45℃以下に冷やして、均質凝結凍結過程により水蒸気から瞬時に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（図2）。

ドライアイスの場合、-2℃以下の雲の中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、ヨウ化銀粒子が氷晶核として働き始めるのは-4℃位からで、温度依存性が強いのが欠点である。一方、ヨウ化銀は、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

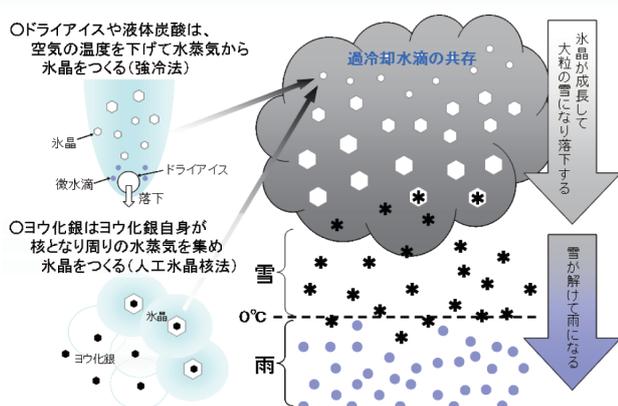


図2 冷たい雲に対するシーディング法

できる手軽さがある。手軽さと低ランニングコストという点で、ヨウ化銀が業務実験用シーディング物質として現在でも最も広く用いられている。

4. 人工降雨・降雪の問題点

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。天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おこな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1970年代までは統計的手法が広く用いられてきた。一般的な統計的手法では、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、年間数10回程の実験から統計的に有意な増雨率を示すのは困難であった。

5. 色々な気象改変技術

現在世界中で最も多くおこなわれているのは、本稿で紹介する増雨・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ある。

次に多くおこなわれているのは、降電抑制である。電は、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。電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、電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。大粒の電の生成を抑制する方法として、シーディングにより電の芽となる霰粒子を多数生成して、自然の電の芽と過冷却雲粒捕捉による着氷成長を競合させ、個々の電を小粒なものとするという考え方が採用されている。

過冷却霧の消散は、水と氷に対する飽和水蒸気圧の差を利用して、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で確実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。1984年のサラエボオリンピックで競技会場の視程改善のために液体プロパンを用いた霧消が実施されたことは良く知られている。米国内陸部の空港の霧消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種々の方法が試されてきたが、今のところ特効薬と呼べるものはない。

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がるが、これを目的とした業務実験や研究プロジェクトは現在ほとんど実施されていない。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数千キロスケールの台風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。

6. 国内外における取り組み

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50カ国において、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)。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の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。

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スを散布する人工降雨実験がはじめておこなわれた。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、ヨウ化銀やドライアスをを用いた人工降雨実験が各地でおこなわれた。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、

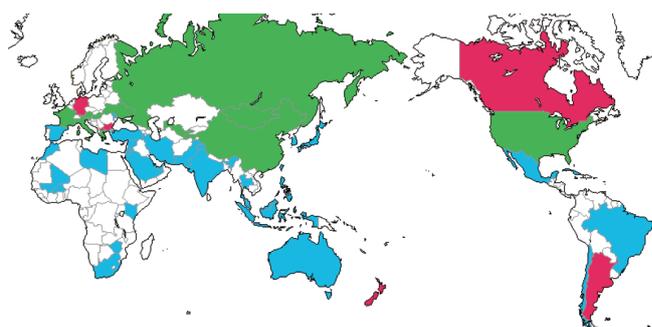


図3 気象改変を実施している国々。人工増雨雪(青)、降電制御(赤)、人工増雨雪と降電制御(緑)

沖縄県などでは大きな渇水が起きた際に、地上設置型のヨウ化銀発煙装置、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、本格的研究は1990年代までほとんどおこなわれていなかった。

7. 人工降雪研究の最前線

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。このような物理的手法によるシーディング効果の判定に基づき、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)も開発されるようになってきた。一方、統計的手法による効果判定も、事前に数値シミュレーションで降水量とその物理的予測因子の関係を求めておき、最先端の測定技術を駆使した観測から得られる物理的予測因子の値を用いて推定される降水量を標準値として、シーディング時の降水量の実測値と比較することにより、信頼性の高い解析がおこなわれるようになってきた。

気象庁気象研究所が実施した、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)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)の成果を通して人工降雪研究の最前線を紹介する。

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、記録的な少雪年(2006/2007)でもダム集水域に降る一冬の降雪量を最大で約20%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。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、ダム集水域の最大積雪深を1m近く増加させ(図4)、その融雪水により夏期のダム貯水量を大幅に改善(約3,400万トン増)できることが示された。

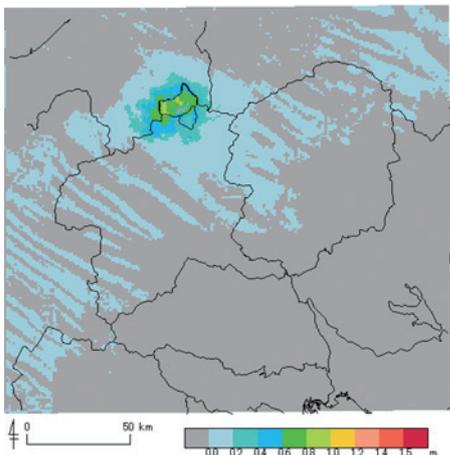


図4 一冬を通したシーディングによる最大積雪深の変化(単位:m)

8. 人工降雪機・造雪機

最近はどこかのスキー場に行ってもゲレンデの脇に人工降雪機を見かける。現在の人工降雪機に近いものは1960年代に実用化されたが、当初は塗装用のスプレーガンから水と空気を噴射し、微水滴の凍結を促すためにSNOMAXの商標で知られる氷核細菌(タンパク)やヨウ化銀の核化剤を添加して用いられた。その後、エアノズルから噴射される圧縮空気の断熱膨張で -40°C 以下の空間を作り、そこにウォーターノズルから噴出される水滴を通過させることで自発凍結(均質凍結)を促し、ビーズ状の降雪粒子を生成するように設計された、核化剤を使用しない人工降雪機が主流となりつつある。純水から成る微水滴は -38°C で凍結するが、実際に使用される雨水、河川水、水道水はごく少量ではあるが不溶性粒子を含むため、純水と比べて 10°C 以上高い温度で凍結する。湿球温度 -2°C 以下で(空気が乾燥している場合は気温が 0°C 以上でも)使用可能となっているが、実際には気温が $-2\sim-3^{\circ}\text{C}$ 以下で使用されている。それより気温が高い場合には、あらかじめ水を作っておき細かく砕いた(削った)ものを吹き飛ばす方式の人工造雪機が使用されることもある。比較的少量の雪を確保するのであれば確実な方法である。

9. おわりに

これまで見てきたように、もともと人工降雪は大量に安価な水を作り出すことが可能な技術として期待されている。7節でも見てきたように人工降雪では一冬で数1000万トン、一回の人工降雪でも数10万トンの水を作り出すのに対して、スキー場で必要とする人工降雪量は桁違いに少ない。例えば、長さ1kmで幅100mの滑降コースに密度 0.3 g/cm^3 、深さ1mの積雪を作るのに必要な水は3万トン程度である。従って、スキー場周辺で容易にその程度の水を確保できるのであれば、ゲレンデの積雪確保のためには、コストの議論は別として、人工降雪機・造雪機を使用する方が確実な方法と言えそうである。

米国中西部のスキーリゾートに行く途中で、よく不思議な光景を目にする。スキー場の近くまで行っても道路横の山肌は枯草、岩、地面が所々顔をのぞかせていて、これでスキーができるのかと心配になる。しかし、一歩スキー場に入ると目の前に広がるゲレンデはしっかりと積雪で覆われている。人工降雪機で用意されたゲレンデのようである。ただし、人工降雪機が大活躍している中西部のスキー場でも、シーディングによる人工降雪を実施しているところが少なくない。やはり、スキー場ではゲレンデの積雪だけではなく、その周辺の積雪もウィンタースポーツを満喫するためには必要なかもしれない。

引用文献

- 1) Pendick, D.: *Scientific American*, 11, 64(2000)