



TAMING THE SKY

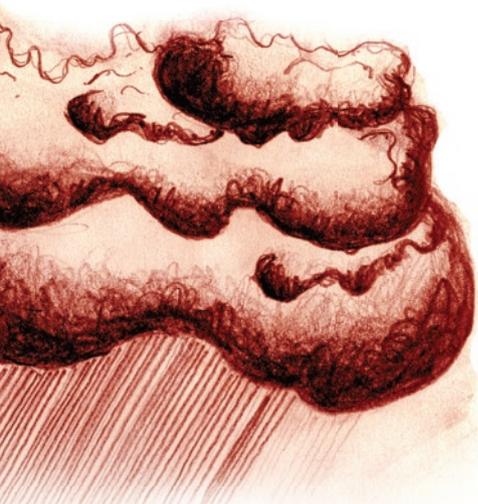
天気を掌握する

Nature Vol. 453 (970-974) / 19 June 2008

雨を降り止ませ、雷をよび寄せ、天気を意のままに操ることなど、本当にできるのだろうか？ かつて夢物語と嘲笑された気象制御の現状について、Jane Qiu と Daniel Cressey が報告する。

中国は、北京オリンピックが開幕する8月8日には万事が統制下にあることを望んでいる。もちろん天気も例外ではない。北京市気象局によると、その日の降水確率は47%である。大会の象徴となる収容人数9万1000人のメインスタジアム（鉄骨を組み上げた構造から「鳥の巣」とよばれている）には屋根がない。中国の気象学者たちは、開会式が雨で台無しにされないように、気象制御技術を用いることを計画している。

オリンピックに向けた北京市の計画は、中国の大規模な気象制御の取り組みの中でもひととき異彩を放っている。ほとんどの場合、気象制御の目的は雨を降らせないことではなく、水を渴望する地域に雨を降らせることにある。古代の中国人は、天気を司っているのは竜であると信じて、十分な雨量と豊作を祈願する丁寧な儀式を執り行っていた。現



までに毎年 500 億トンの雨を作れるようになることを目標にしている。

しかし、中国内外の研究者の多くは、中国気象局が主張する成功を裏づけるだけの証拠が集まっていないと考えている。蘭州の寒区旱区環境・工程研究所の大気科学者である Zhang Hong-fa は、「実は、中国はこの分野でかなり遅れをとっているのです」という。「偽りの達成感、真の発展の妨げになります」。

中国はまた、気象制御全般に対する積年の懐疑論にも直面している。気象制御を擁護する人々は、気象制御は、雨量を増やすだけでなく、霧を除去することもでき、雹を^{ひょう}防いだり、上陸しそうなハリケーンの進路を変えることさえできると主張する（19 ページのコラム「天気予報なんて気にしない」を参照）。批判的な人々は、こうした主張の多くは絵空事であり、現在進められているプロジェクトの大半は信念だけに支えられているという。

気象制御を擁護する人々でさえ、中国の成功を疑っている。世界最大規模の気象制御会社であるウェザー・モディフィケーション社（米国ノースダコタ州ファーゴ）の気象学理事である Bruce Boe は、「中国の人々は、成功の確証が十分でないことを約束しているのではないかと心配しています」と話す。「これは、クラウドシーディング（人工降雨のための雲への種まき）の揺籃期からの問題です」。

人類は、収穫期に雨乞いの踊りをしていた大昔から、天気に影響を及ぼそうと努めてきた。しかし、科学的な気象制御が始まったのは、1946 年にニューヨーク州北部のゼネラル・エレクトリック研究所で行われた研究の後のことだった。ここで、Vincent Schaefer と Irving Langmuir が、種として雲にドライアイス（固体の二酸化炭素）を散布することで核を作らせ、その周りに氷を成長させられることを発見した。さらに Bernard Vonnegut（小説家

Kurt Vonnegut の兄）が、ヨウ化銀もこの目的に利用できることを発見し、今日では、こちらの方法が世界中で採用されている。

雨を降らせる技術

今日、オーストラリアからイランまで、さまざまな国が何らかの形でクラウドシーディングを行っている。米国でも、干ばつが起りやすい西部を中心に、10 前後の州で実施されている。クラウドシーディングの効果についての評価にはばらつきがあるが、一般には、ある種の雲へのシーディングにより、最大で 10% 程度雨量を増加させられると認められている。例えば、カリフォルニア州はクラウドシーディングに毎年約 300 万ドル（約 3 億 2000 万円）を費やしているが、何もしない場合の年間降水量の 4% にあたる 3 億 7000 万～4 億 9000 万立方メートルの雨量を増やしていると主張している。

シーディングは、雲の種類に応じて 2 種類の方法のうち、どちらかを採用するのが一般的である。過冷却の状態にある雲（通常は高高度にある）の中では、核になる粒子の周りで水が凍って氷晶ができる。氷晶が重くなりすぎると、落下しながら溶けてゆき、雨または雪になる。高高度の空に核となる粒子がほとんどない場合には、核を追加するために、過冷却の状態にある雲へのシーディングを行う。この方法は、氷核生成シーディングとよばれる。氷核生成に用いる化学物質としてはヨウ化銀が一般的であるが、ドライアイスなどを用いることもできる。

これよりも温度が高い雲（通常は下高度にある）に対しては、吸湿性粒子を使ったシーディングが行われる。このアプローチでは、ナトリウム、リチウム、カリウム塩などの化学物質が用いられる。ポイントは、より大きな核を供給するか、小さな水滴を融合させることにより、落下できる大きさの水滴を作らせることにある。シーディングの効果を生じ

代の中国人は、天気を意のままに操る技術に目を向けている。それは、かつて毛沢東が主導した、「自然を手なずける」ための国をあげての取り組みの一環であるといえる。

中国の気象制御プログラムは世界最大規模である。気象制御プログラムのための予算は毎年 4 億元（約 62 億円）から 7 億元（約 110 億円）にもなり、3 万 2000 人のスタッフが、特殊な装備をもつ 35 機の飛行機と、7000 門の対空砲、5000 基のロケット発射装置を動かしている。中国気象局からの公式な発表によると、この国では 1999 年から 2006 年までに 2500 億トンの雨を降らせ、毎年 300 億トン以上の雨を作っているという。中国の人口は 13 億人であるが、これだけの雨量があれば、そのうちの 5 億人以上の需要を満たすことができる。同国は、さらに 2010 年

させるためには、水蒸気の量と水滴の大きさが重要になる。

クラウドシーディングの有効性には、使用する化学物質の種類のほか、これらをいつ、どのようにして散布するかなど、多くの因子が影響してくる。どの雲をシーディングの標的とするかも重要である。雲の温度、厚み、対流のパターン、風がどのように流入し、流出するかを考慮して、標的を決定しなければならない。Boeによると、その基準は非常に厳しく、「ほとんどの雲は標的として不適格」であるという。

山地の雲がシーディングに適していることについては、多くの専門家が同意している。山地の雲は、気流が山に沿って押し上げられるときに発生する。ヘブライ大学（エルサレム）の大気科学者である Daniel Rosenfeld は、そのような雲は「短命で、比較的薄く、多くの水を含んでいます」という。ウェザー・モディフィケーション社が米国最大規模のシーディングプロジェクトにおいてワイオミング州の山地の雲をターゲットにしているのは、そのためである。ワイオミング気象制御パイロットプロジェクトと命名されたこのプロジェクトの期間は5年、予算は900万ドル（約9億7000万円）である。

ワイオミング州のプロジェクトでは、1機の飛行機と地上の遠隔操作ユニットを用いて、冬にクラウドシーディングを行う。これにより降雪量を増やして雪塊を確保し、雪塊が溶ける夏に水として利用しようというのである。2006年から2007年にかけての冬に行われた最初の試みでは、地上からのシーディングのみが実施された。昨年は、飛行機と25基の地上施設が用いられた。米国国立大気研究所（コロラド州ボールダー）の気象学者であり、このプログラムの評価を手伝っている Daniel Breed は、散布された物質が目標とする雲に入り、そこでより多くの氷核として出現したことを、「有望な結果」とよんでいる。

こうした挑戦は、気象制御への信用を損なうどころか、むしろ高めてくれていると彼は語る。「これまで多くの法外な主張がなされてきたことで、大気科学や気象制御はもちろんのこと、科学全般にも大きな迷惑が及んでいたのです」。

独自の取り組み

中国での研究のほとんどは、雨を降らせたり雹を阻止したりして農作物の被害を減らすことを目的としているが、霧を晴らしたり落雷を回避したりすることを目的とする研究もある¹。中国を構成す

る34の行政区の大半が独自の気象制御課をもっていて、2900の地域の3分の2近くに独自のクラウドシーディング基地がある。

中国の人工降雨専門家の一部は、シーディング技術の有効性を評価するための対照実験に取り組んでいる。例えば、河北省気象局気象制御課の副課長である Shi Li-xin とその同僚は、地上の観測装置と人工衛星を組み合わせた間接的な測定のほか、飛行機を使った直接的な測定も行って雲の性質を調べ、最適なシーディング条件を決定しようとしている。雲の厚み、過冷却の状態にある水の量、雲の中のシーディングに適した層などの因子を評価した後に、チームは3つの実験地域を選択した。1つは広さ3万6500平方キロメートルの実験区であり、残りの2つは広さ1万9800平方キロメートルと2万平方キロメートルの対照区である。1990年代の初頭に21回のシーディングを行って、雨量が18%増加したという結果が得られたが、サンプル数が少なすぎるため、統計学的に有意なものにはならなかった。

1975年から1986年にかけて行われた初期の研究では、中国南東部の福建省の気象学者たちが、広さ1万4000平方キロメートルの2つの地域で無作為化シーディング実験を行った。実験日は244日に及び、シーディングを行った地域の降雨量は、行わなかった地域よりも20%多かったという結果になった。

しかし、これらのクラウドシーディング実験の結果は、ピアレビューのある学術誌では発表されておらず、多くの疑問が残っている。Shiによれば、人工雨の生成に関する国家統計には、中央政府から省や村まで、あらゆるレベルの気象制御課からの報告が反映されている。報告の内容は、それぞれの気象制御課の評価と予算に直結するため、誇張した報告を提出する誘因はいくらでもある。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

中国は、降雨を促すための懸命な努力の一環として、5000基のロケット発射装置を動かしている。

中国気象局に近い人物（政治的影響を恐れる本人の希望により氏名は伏せる）によると、中国の多くの大気科学者や気象局職員が、そうした疑問を胸に秘めているという。「皆さんは、クラウドシーディングの有効性が実証されるまで、その運用をやめればよいと思われるかもしれませんが」と彼はいう。「けれども、事態はそれほど単純ではないのです」。

中国科学院の一部門であり、北京に本拠地のある大気物理学研究所の研究者である Lu Da-ren は、「農民たちが、この技術を強く求めているのです」と話す。「これは、単なる科学的な問題ではないのです」。Lu は、気象制御の有効性をより厳密に確認する必要があることを認めながらも、これと並行して試行錯誤を重ねていくアプローチを否定してはならないと主張する。「この技術は、思ったほどの効果はないのかもしれませんが。けれども、農民にしてみれば、何もないよりはましなのです」。

北京市気象局は、オリンピックに備えて、雨の降り方とその時期を変えることを目標にしている。彼らは、北京がオリンピック開催地に選ばれた後の 2002 年から、レーダー、人工衛星、気象観測気球を使って、北京市とこれに隣接する天津市と河北省の上空を通過する雲の構造、温度、水滴の大きさを精査している。

中国の人工降雨専門家は、雲が北京市に到達する前にすべての雨を降らせてしまうか、塩を使って小さい雲を消し、大きな雲ができないようにすることを計画している。これに失敗した場合には、雲に過剰な核を散布して個々の水滴や氷晶を小さくし、地面に到達する前に消えるようにするつもりである。北京市気象局は、北京市、天津市、河北省の 100 か所以上に、大砲、ロケット発射装置、飛行機を配備している。

ここ数か月間、各地の気象局は野外での試験に力を入れている。北京市気象局は試験結果の詳細についての公表を拒んでいるが、開会式に雨を降らせ

ないことができるかどうかは、主として雲の性質と天気予報の精度によって決まると主張し、「我々は、局地的で弱い天気のパターンについてはかなりよい結果を出しているが、広い地域を覆う大きくて厚い雲ができてしまった場合には、完全に雨を防ぐことはできない」という声明を発表している。

不完全な証拠

問題の一部は、クラウドシーディングが効果を生じる仕組みがほとんどわかっていないことにある。米国学術研究会議 (NRC) が 2003 年に発表した影響力ある報告書²は、「気象制御を目的とする働きかけの有効性についての説得力ある科学的証明は、まだ提出されていない」と断定している。これに対して気象制御協会は、NRC の委員たちの気象制御に関する経験や知識の不足を批判し、彼らがクラウドシーディングの科学的証明に求めている水準は厳しすぎて、「大気科学の分野で、この要請を満たす証明ができる問題はほとんどない」と反論している。

まず、雲の性質は場所によって大きく異なり、同じ場所でも時間とともに変化していく。また、一部の国々での資金不足も問題である。例えば米国では、気象制御のために中央政府から提供される資金は、1970 年代末に年間 2000 万ドル前後になったのをピークとして、現在では極めて少なくなっている。個々のプロジェクトに対する資金は、各州が提供しなければならない。コロラド州立大学（米国、フォートコリンズ）の大気物理学者である William Cotton は、「気象制御の科学研究に関しては、我々は 25 年近くも暗黒時代にいるのです」と述べる。「ですから、誰かから定量的な結果を求められても、我々はそれを提出することができないのです」。

プレトリアの南アフリカ気象局の研究部長であり、世界気象機関の気象制御専門家チームの議長でもある Deon Terblanche は、「天気予報と同じ問



どの雲にシーディングを行い、どのアプローチを用いるかは、その結果に大きな影響を及ぼす。

題があるのです」という。「特定の雲が 30 分後にどうなるかを予測することさえ、極めてむずかしいのです。雲になんらかの働きかけをしても、自然の状態にある雲がどうなるかを厳密に予測できないなら、働きかけによって効果が生じたことを証明するのは困難です」とはいえ彼は、現在用いられている気象制御技術のいくつかは、統計的に有意と見なせるだけの大きな効果を生じていると指摘する。

モナッシュ大学（オーストラリア、ヴィクトリア州）の Michael Manton は、クラウドシーディングの効果を証明するのが困難な理由を 3 つ挙げる。それは、シーディングの規模とその効果が生じる規模とのミスマッチ、雨量の自然な変動とシーディングによる増加との関係、および評価の費用である。「私は、[NRC が報告書を発表した] 2003 年以降、状況はたいして変わっていないと思います」と彼はいう。「クラウドシーディングの技術は、世界の多くの地域で明示的または暗示的に信頼されているため、慎重に制御された条件下での検証が行われていないのです」。

さらに、大気汚染エアロゾルが雲の形成と降雨に及ぼす影響の大きさが認識されるようになってきている。一部の研究者は、エアロゾルのために暖かい雲の中で形成される水滴が小さくなり、雨量が減少する可能性があると考えている。また、エアロゾルが冷たい雲の中での水滴の形成や2つの雲システム間のダイナミクスに影響を及ぼす可能性もあると、メリーランド大学カレッジパーク校のZhanqing Liはいう。「エアロゾルは、クラウドシーディング研究というジグソーパズルのミッシングピースである可能性があります。不適切なシーディング条件下では、意図に反する効果を生じさせてしまう可能性があるのです」。

かつてクラウドシーディングの有効性を示す最も説得力ある証拠と考えられていたイスラエルの無作為化シーディング実験をめぐる論争が再燃したのも、このエアロゾルとの関係だった。1960年代と1970年代に6年間ずつ実施された2回の実験の結果は、シーディングにより雨量が12～15%増加したことを示唆していた。しかし、この結論を疑う人もいた。最近では、テル・アビブ大学のZev Levinが進めているエアロゾルを考慮に入れた研究により、高度に汚染された地域では、シーディングを行っても効果がなかったり、かえって雨を降りにくくしてしまう可能性さえあることが示されている。「これは、議論の始まりにすぎませんが、高度に汚染された地域での大規模なクラウドシーディングに警鐘を鳴らすものです」とLiは語る。もちろん、大気汚染エアロゾルが大量にある中国では、この懸念は極めて大きい。

イスラエルの水委員会は、数年にわたる大規模なクラウドシーディング実験を開始したところである。その予算は、毎年100万ドル（約1億1000万円）である。エルサレムのヘブライ大学とテル・アビブ大学の研究者は、これまでの実験から得られた知見に基づき、最



シーディングに用いるヨウ化銀などの物質は、軽飛行機を使って散布する。

新の技術を導入して、雲の性質を測定し、シーディング物質を追跡し、雨の形成におけるこれらの役割を評価する予定である。究極の目的は、この技術によりイスラエル北部のティベリウス湖（ガリラヤ湖としても知られる）の貯水量を増やせるかどうかを確認することにある。

世界気象機関と国際測地学・地球物理学連合の委託による報告書には、エアロゾルが降雨と気候システムに及ぼす影響をもっと理解する必要があると述べられている。この報告書は7月中に発表されることになっている。報告書の編集長であるLevinは、「エアロゾルは、降雨に至る一連の反応と複雑なフィードバック機構に関与しています」と話す。「クラウドシーディングは、我々がほとんど理解していない複雑な過程を、いっそう複雑にしてしまいます」。報告書では、クラウドシーディングの基礎にある物理過程の十分な理解なしに統計ツールを使用することの限界も強調されている。

Rosenfeldは、中国のクラウドシーディングを本当の意味で前進させるためには、雲の性質の測定、数値モデルの構築、無作為化およびターゲティングさ

れたシーディング実験の実施などを組み合わせたアプローチをとるしかないと主張する。「これらのクラウドシーディング技術がないなら、中国人は当てずっぽうにシーディング物質を散布しているだけということになります」と彼は説明する。

しかし、広い地域で長期にわたって無作為化またはターゲティングされたシーディング実験を行うことは、適当な雲にシーディングを行う機会を逃すことを意味している。中国は現在、水不足に苦しんでおり、一部の中国人気象学者は、こうした機会を見送ることなど考えられないと主張する。「いい雲があるなら、クラウドシーディングを行わなければなりません」とShiはいう。「さもないと、農民は激怒するでしょう」。雨に対する農民たちの関心は非常に高く、上空を通過する雲にシーディングを行った村に自分たちの雨を「盗まれた」として、隣村を訴える村まであるほどなのである。

多くの研究者は、中国の気象制御計画が実践に偏っていることを心配しており、研究者と現場の責任者はもっと協力し合わなければならないと考えている。中国気象科学研究院に新設され

天気予報なんて気にしない

 Benjamin Franklinにより雷が自然に発生する電気的一种であることが発見されて以来、人々は、特定の場所に雷を落とす方法を見いだすために努力してきた。こうした試みには、雷が金属中を伝わりやすいという事実が利用されている。金属は電気抵抗が小さく、落雷を防止するための装置の開発や試験に役立っている。中国、ブラジル、米国などの研究者は、大地に接続した針金または針金とナイロンのハイブリッド繊維を通して雷を誘導するために、雷を伴う嵐が起きている空にロケットを打ち込んでいる。北京に本拠地のある大気物理学研究所の Qie Xiu-shu は、中国の大気科学コミュニティでは雷の研究の第一人者として有名であり、その同僚は、彼女のアプローチが雷の物理過程に新たな光を投じたことを示している³。ま

た、嵐に強力なレーザー光線を照射して大気中の分子から電子を放出させ、こうした電子を導線として働かせることもできる。レーザーパルスを利用して雲の中で電氣的活動を引き起こす試みも、ある程度は成功しているが、現時点では、レーザーの出力が弱すぎたり不連続であったりして、まだ落雷を誘導するには至っていない⁴。

 **雹**
雲の中に散布されるヨウ化銀粒子は、雨を降らせるだけでなく、さまざまな被害をもたらす雹の粒を小さくすると考えられている。理論的には、雲の中でより多くの水滴が作られるようにすれば、個々の水滴に集まる水の量が少なくなり、雹にまで成長できる水滴の数を減らせるからである。気象制御実験が行われた地域のいくつかでは、農作物に損害を受

けた農民からの保険金請求が激減している。1997年にノースダコタ州で行われた研究では、雹を抑える技術が用いられた年には、雹による損害に対して農民に支払われる金額が大幅に減少していることがわかっている⁵。



ハリケーン

米国では、1962年から1983年にかけて、陸地に接近するハリケーンの勢力を弱めることを目標とするストームフュアリー計画が実施されたが、不成功に終わった。このプロジェクトでは、ハリケーンの外側の雲にヨウ化銀を散布し、ハリケーンの目の壁雲を大きくすることで、全体の風速を下げるのが期待されていた。近年では、エルサレムのヘブライ大学の気象学者である Daniel Rosenfeld が、ハリケーンの縁で温かい雨を降らせることで、その勢

力を弱められる可能性を示唆している⁶。コロラド州立大学（米国、フォートコリンズ）の William Cotton らが行ったシミュレーションも、ハリケーンの中に塵などの粒子を投下することで、その勢力を弱められる場合があると示唆しているようである⁷。



霧

世界の数か所空港では、滑走路の霧を晴らして視界をよくするために、アイスシーディングを行っている。この技術の有効性は確認されているものの、凝固点以下まで冷えた、過冷却の状態にある霧でしかうまくいかないようである。ほかの気象制御技術とは異なり、霧を晴らす技術の効果は一目瞭然である。Rosenfeld は、「効果が出ているところでは霧に穴があくので、はっきりわかるのです」という。

D.C.&J.Q.

た気象制御センターの所長である Guo Xueliang は、センターは、こうした問題のいくつかに取り組んでいくことになるという。去年の12月に設立されたこのセンターには、最終的には約60人の研究者が集まることになっている。彼らは、数値モデル、研究室でのシミュレーション、野外実験などを利用して、雲の性質と降雨の原理を分析するつもりである。「我々は、クラウドシーディングの指針となる基礎研究の重要性はよくわかっており、複数の省で、科学的に厳密な比較対照野外実験を行う予定です」と Guo は話す。

中国の贅沢なプログラムは、より多

くの資金を得られることになりそうである。同国は、第11回5か年計画において、気象制御を重要プロジェクトの1つと定めて、その研究と実践のために最新の装備を投入するといっているからである。学術研究機関と気象局との連携を補助する大規模な国家プロジェクトも、科学省が資金を提供する5か年計画などの形で準備されている。

中国には、この動きを推し進めなければならない理由がいくつもある。オリンピックが近づくにつれ、北京市気象局は、最高の仕事をしなければならないという大きなプレッシャーを感じている。関心的になっているのは、開会式の

大がかりなショーだけではない。世界中の気象学者が、人工消雨についての北京市のコメントを聞きたがっている。雨が降らなかった場合には、彼らは何というだろうか？

Jane Qiu は北京から、Daniel Cressey はロンドンから *Nature* に寄稿している。

1. Guo, X. & Zheng, G. *Adv. Atmos. Sci.* (in the press).
2. National Research Council. *Critical Issues in Weather Modification Research* (National Academies, 2003).
3. Yang, J. *et al.* *Atmos. Res.* (in the press).
4. Kasparian, J. *et al.* *Opt. Express* **16**, 5757-5763 (2008).
5. Smith, P. L., Johnson, L. R. & Priegnitz, D. L., Boe, B. L. & Mielke, P. W. *J. Appl. Meteorol.* **36**, 463-473 (1997).
6. Rosenfeld, D. *et al.* *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **7**, 5647-5674 (2007).
7. Cotton, W. R., Zhang, H., McFarquhar, G. M. & Saleeby, S. M. *J. Weather Modification* **39**, 70-73 (2007).