

回答

村 上 正 隆*

1. はじめに

「天気」の担当編集委員から、真木氏の原稿を渡されて、それに対する回答を促されたときに、少し違和感を覚えました。学会ホームページによれば、短報の定義は「速報性を要する研究成果、小論文、論文・短報に対するコメントおよび回答を掲載する」とあります。気象研究ノートが（「天気」以外に掲載されたものが）、コメントの対象となるのかも微妙なところかと思いますが、せっかくの機会ですので、個別の回答に先立って、研究の進め方や人工降雨研究の現状に関して著者の認識を述べさせていただきます。

投稿された原稿の中の大部分の議論が、1980年代以前の知識をもとに構築した仮説のストーリーと一致しないから、NHMの計算がおかしいのではないかという論調で、科学的な議論とは思えません。短報としてコメントを投稿するのであれば、もっと科学的な内容であるべきではないかと思います。総じて、事実誤認に基づく批判・客観的根拠に基づかない批判に満ちていて、学会機関誌の掲載物としての情報価値に著しく欠けると言わざるを得ません。

そもそも、仮説は後の新しい、より正確な、実験・観測・モデルなどの科学的知見によって、検証・修正されるべきものではないでしょうか。1980年代以前の仮説に問題があったと考えるのが一般的ではないでしょうか。本末転倒の議論です。私どもの結果に疑義を抱かれるのであれば、私どものモデルと同等以上の信頼性を有する科学的手法を用いて反証を示すべきだと考えます。

2章で「人工降雨法の簡単な解説」として、ヨウ化銀法、ドライアイス法、液体炭酸法、散水法、吸湿剤法の説明とその効果に触れていますが、不正確・不適切な部分が散見されます。ここでは、いちいち説明しませんが、興味のある読者は気象研究ノート第231号や参考文献（AMS 2010; ASCE 2006; Dennis 1980; National Research Council 2003; WMO 2010）に目を通して下さい。

5章の「液体炭酸法の成功例と水資源」における記述、「液体炭酸シーディングの後に雲から雨が降るのを目視した」、「レーダエコーが出現した」、「人工降雨は成功した」、等々を読んで、戦後間もなくの人工降雨の記事を読んでいるような錯覚に陥りました。現在では、人工降雨屋さん（人工降雨を商売にしている人々）ですら、事業の性格上若干のバイアスがみられることもありますが、そのような議論はしません。興味のある方は人工降雨事業にかかわる米国民間気象会社で構成される気象改変協会のホームページ（<http://www.weathermodification.org/> 2015.11.20 閲覧）を参照して下さい。そもそもシーディングしなかったらその雲はどうなったのかと訊かれても、だれも答えることは出来ません。自然の雲に一度シーディングをしてしまうと、シーディングをしない場合の同じ雲と比較することはできないからです。そこで客観的にシーディング効果を評価するために登場したのが無作為シーディングと組み合わせた統計手法です。しかし、自然界の降水変動が大きいため、仮にシーディングによって毎回40%の増雨効果があったとしても、それを統計的に有意な効果として検出するために数百回の無作為シーディングを行う必要があることも、古くから知られています（Dennis 1980）。現在でも、シーディング期間の短縮を行うために様々な解析手法が研究されています（Geerts *et al.* 2010; Manton *et*

* 気象研究所予報研究部. mamuraka@mri-jma.go.jp
—2015年11月30日受領—
—2015年12月15日受理—

al. 2015, 気象研究ノート第231号第10章). 直接, シーディングによる雲の内部構造変化を追跡する物理的手法も併用して, シーディング効果の客観的評価法が研究されています. しかし, 我々の研究プロジェクトでは, これらの方法も3シーズンで計20回程度のシーディング実験に適用して統計的に有意なシーディング効果を導出するのは難しいと判断して, 観測データで検証された信頼性の高い数値モデルを用いてダム集水域の降雪量やダム貯水量に対する一冬を通したドライアイスシーディングの効果を評価しました(気象研究ノート第231号第8章).

2. 個別の質問に対する回答

(1) 第3章の第1, 第2パラグラフのコメントに関して

気象研究ノート第231号の第7章1節や第7章2節では, シーディング実験の事例解析の結果を示しており, シーディングの場所にレーダエコーの強化が見られる場合もあったという観測事実を述べているだけです. 第7章1節では, 航空機による雲の内部構造の直接観測からシーディングによる氷晶生成が確認された場所におけるレーダエコーの強化がドライアイスシーディングの効果だと仮定して降水量の増加を見積もると3,000 t程度となったことを記述しています. ここではシーディングによる雲・降水の変化の統計的有意性を議論していません. その議論は第7章3節と4節で行っています.

また, 第7章4節でも述べているように, 航空機による直接観測から期待されるシーディングによるレーダエコーの強化は一般的には高々3~5 dBで, 数dBZの時空間変動を示す降雪雲エコーからシーディング効果を検出するのは容易ではありません. シーディングによる顕著なレーダエコーの強化がみられる事例では, シーディング前の雲内氷晶濃度が極端に低いために過冷却雲粒が存在する場合(降りそうで降らない雲)が殆どで, シーディング効果は降水の増加率としては比較的大きな値を示しますが, 増加量としては一般的にかなり小さな値となります. 降水の増加量の観点からは, 自然の状態で弱い或いは並の降水を伴っても, なお雲中に豊富な過冷却雲水を含む雲に対するシーディングを検討する必要があります.

(2) 第3章の第3パラグラフのコメントに関して

本科振費プロジェクトの目的は, 気象研究ノート第

231号の「はじめに」でも述べているように, 各種人工降雨技術の有効性を科学的に検証し技術を確立することで, 実際に多量の降水・水資源を得ることが目的ではありません. 人工降雨事業ではなく, 研究プロジェクトです. このコメントは事実を誤認しており, 本プロジェクトに関して, 事実と反する誤った印象を, 読者に与えかねません.

(3) 第4章の第1, 第2パラグラフのコメントに関して

気象研究ノート第231号の第8章1節で示した結果は, 最新のシーディングスキームを組み込んだNHMで計算した結果です. 第8章1節でも説明している通り, ドライアイスペレットに関しては, 雲・降水粒子と同様に予報変数として組み込み, その数濃度・混合比の変化をペレットの落下・移流・蒸発による粒径変化などを考慮して計算しています. 液体炭酸は大気中に放出されると瞬時に(モデルの1タイムステップ内に)沸騰・気化しますので, 予報変数としては取り扱わず, 雲の中では1 g当たり 10^{13} 個の氷晶を生成するとして, 散布率・飛行速度・飛行経路とモデル格子の相対的位置関係から, 時々刻々, 該当するモデル格子内に氷晶を導入しています. (液体炭酸からの氷晶生成率に関しては, 後述するようにまだ多くの不確実性がありますが, シーディング効果を最大限に見積もったスキームを使用しています)

「1. はじめに」で述べたとおり, 1980年代以前の仮説のストーリーと一致しないから, NHMの計算がおかしいのではないかというのは, 科学的な議論ではありません. 1980年代以前の概念モデルのストーリーに問題があったと考えるのが一般的ではないでしょうか. 私どもの結果に疑義を抱かれるのであれば, 私どものモデルと同等以上の性能を有する手法を用いて反証を示すべきだと考えます.

雲中の上昇気流の有無に関しての言及がありますが, Fukuta (1996) で液体炭酸シーディングが有効な対象として, 過冷却の放射霧や層雲の例を挙げているので, ドライアイスと液体炭酸のシーディング効果比較では意図的に初期状態では鉛直流がゼロの状態を仮定しています.

両者のシーディング物質としての有効性に関して一言付け加えさせていただくと, シーディングから約3時間を経過するとシーディング効果(積算地上降水量)に大差なくなりますが, シーディング後1時間程

度の早い時間には有意な差（ドライアイスの方が効果的）が見られます。実際の人工降雨では、標的に正確に増雨をもたらすために、出来るだけ標的地から近いところ（標的地までの移動時間の短いところ）でシーディングすることが必要となります。また、ドライアイスは雲の上から散布するのに対して、液体炭酸は過冷却の雲の中を飛行しながら散布しなければいけないので、安全飛行に留意する必要があります。このような理由から、世界的に見ると液体炭酸を用いた人工降雨の手法は殆ど用いられておりません。

（４）第４章の第３，第４パラグラフのコメントに関して

ドライアイスシーディングで生成される膨大な数の氷晶を成長させる（生き残らせる）ために必要な、過冷却雲粒の蒸発によって生成される水蒸気も含めた、余剰水蒸気が周囲に十分あるかどうかは重要な問題です。勿論、モデルでは余剰水蒸気（氷飽和を超える水蒸気）が存在しない空間ではドライアイスや液体炭酸シーディングを行っても新たな氷晶生成は起こりません。しかし、使用するモデルの空間解像度と実際のシーディングに伴う雲の微物理構造の変化の空間スケールの相違には注意を要します。ドライアイスの場合は、散布後 10 m s^{-1} 程度で約 2 km を落下しながら昇華し氷晶を比較的広い空間に生成しますが、液体炭酸の場合は、散布後瞬時に沸騰・気化し氷晶を狭い空間に集中的に生成しますので、高濃度の氷晶を成長させるために十分な余剰水蒸気が存在するか、 1 g の液体炭酸から 10^{13} 個の氷晶が生成されるのか検証を要するクリティカルな問題です。航空機からのドライアイスや液体炭酸シーディングで生成する高濃度の氷晶から成る空間の飛行方向に直交する方向の空間スケールは、シーディング直後には数十 m ～ 100 m 程度です。それよりも極端に大きな格子サイズのモデルを用いる場合には注意を要します。ここで両者の比較に用いているモデルの空間解像度は 50 m ですので、さほど問題ないと考えています。

ドライアイス 1 g 当たりから 10^{13} 個程度の氷晶が生成することは室内実験でも、航空機観測でも確かめられています（Fukuta *et al.* 1971；Horn *et al.* 1982；村上・松尾 2005）。ドライアイスの最適な散布率に関しても、数値シミュレーションから求められております（気象研究ノート第231号 第１章，第８章）。一方、液体炭酸 1 g 当たりの氷晶発生数に関しては、著者の

知る限り、それを確かめた室内実験も航空機観測もありません。空気中で昇華中のドライアイスの表面温度が約 -100°C に対して、液体炭酸のそれが -90°C でほぼ同等（ -60°C 以下では均質凝結凍結ニュークリエーションが頭打ちになるからという理由で）であるという計算結果から氷晶発生数も同等であろうという推測に基づくものです（福田 1988）。液体炭酸を用いたシーディングの有効性を厳密に議論する場合には、 1 g 当たりの氷晶発生数を検証する必要があります。

（５）第４章の第５パラグラフのコメントに関して

ドライアイスと液体炭酸の比較で、散布率をとともに 50 g s^{-1} としているのは、散布率を等しくすることで公平な比較を行うためです。使用する航空機に搭載可能な機器のサイズや重量の制約等から、ドライアイスの場合は $10\sim 100\text{ g s}^{-1}$ 、液体炭酸の場合は $1\sim 10\text{ g s}^{-1}$ の散布率であることは認識しています。実際の散布率を用いてシミュレーションすると、シーディング効果の差がさらに広がる傾向にあります。

（６）第４章の第６パラグラフのコメントに関して

数値シミュレーションで自然由来の氷晶核化過程を無効化していることに関する言及がありますが、これは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明確にするためです。例えば、自然由来の氷晶核化過程が十分働いている場合は、ドライアイスや液体炭酸シーディングを行ってもその効果（降水量の増加）の両者による違いが現れなくなります。場合によってはオーバーシーディングの状態となり、若干ではありますがシーディング効果そのものが負の効果となることもあります。このように、両者のシーディング効果がばやけるのを避けるために自然由来の氷晶核化過程を無効化しました。無効化がどちらのシーディング方法に有利ということはありません。

このパラグラフ中のそれ以外の文章は理解不能です。

（７）第４章の第７パラグラフのコメントに関して

ここで使用したモデルの現象再現性は、1980年代以前の仮説のストーリーとは比べものになりません。シミュレーションの結果からも明らかなように、シーディング直後は氷晶高濃度域の形状はドライアイスが２次元的、液体炭酸が１次元的になります。科学的な根拠に基づく議論が必要と考えます。

(8) 第4章の第8, 第9, 第10パラグラフのコメントに関して

航空機からのドライアイスシーディング, 地上からのAgIシーディング, 地上からの液体炭酸シーディングの比較の主眼は, 航空機シーディングと地上シーディングの比較です. 先の比較からも分かるように, 航空機シーディングであえて液体炭酸を選択する理由はないのでドライアイスのみとしました. 地上シーディングでは, 現在最も広く用いられているAgIシーディングと過去に山岳斜面で使用されたことのある液体炭酸を比較対象としました.

図8.1.18で線種の説明が逆になっていました. この場を借りて誤植をお詫びし, 訂正します. (オリジナル論文 (Hashimoto *et al.* 2008) をたどれば, 本文と対応付けができます.)

(9) 第4章の第11, 第12パラグラフのコメントに関して

私どもは化学物質の毒性に関する専門家ではありませんが, 戦後間もなくから世界中で数多くなされた専門家による人工降雨起源のAgIの環境影響評価の結果によると, 濃度がバックグラウンドレベルに近いため問題ないとされています. 化学に詳しい福田(1988)にも同様の記述があります.

3. おわりに

真木氏から短報として投稿された原稿内容に対しては批判的にならざるを得なかったが, コメントを頂いたこと自体は, 広く「天気」の読者に人工降雨研究に関心を持っていただくと同時に, 大気科学全般に共通する研究の進め方に関する著者の考え方を述べさせていただく機会を与えていただき, 感謝いたします. 一部の会員の方々は, 人工降雨を錬金術のような似非科学と見下しているかもしれませんが, 米国気象学会の中には意図的・非意図的気象改変委員会 (<https://www2.ametsoc.org/stac/index.cfm/committees/committee-on-planned-and-inadvertent-weather-modification/> 2015.11.20閲覧) が設置され, 人工降雨は人為起源エアロゾルの気象・気候影響 (エアロゾルの間接効果) 等と同列に扱われています. ある意味では, 最先端の人工降雨研究の方がよほど実証的研究といっても過言ではありません.

参考文献

- AMS, 2010: An Information Statement of the American Meteorological Society, "Planned Weather Modification through Cloud Seeding". <https://www2.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/planned-weather-modification-through-cloud-seeding/> (2015.11.20閲覧).
- ASCE, 2006: Guidelines for Cloud Seeding to Augment Precipitation. 2nd Ed. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 81, 181pp.
- Dennis, A. S., 1980: Weather Modification by Cloud Seeding. International Geophysics Series 24, Academic Press, 267pp.
- Fukuta, N., W. A. Schmeling and L. F. Evans, 1971: Experimental determination of ice nucleation by falling dry ice pellets. J. Appl. Meteor., 10, 1174-1179.
- 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, (164), 213pp.
- Fukuta, N., 1996: Project Mountain Valley Sunshine - Progress in science and technology. J. Appl. Meteor. 35, 1483-1493.
- Geerts, B., Q. Miao, Y. Yang, R. Rasmussen and D. Breed, 2010: An airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds. J. Atmos. Sci., 67, 3286-3302.
- 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.
- Horn, R. D., W. G. Finnegan and P. J. DeMott, 1982: Experimental studies of nucleation by dry ice. J. Appl. Meteor., 21, 1567-1570.
- Manton, M. J., A. D. Peace, K. Kemsley, S. L. Kenyon, J. C. Speirs, L. Warren and J. Denholm, 2015: Further analysis of a snowfall enhancement project in the Snowy Mountains of Australia. (Submitted to J. Appl. Meteor. Climatol.)
- 村上正隆, 松尾敬世, 2005: 野外シーディング実験. 気象研究所技術報告, (48), 200-206.
- National Research Council, 2003: Critical Issues in Weather Modification Research. Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academy of Sciences, The National Academy Press, 123pp.
- WMO, 2010: WMO Weather Modification Statement and Guidelines (updated in the ET meeting in Abu

Dhabi, 22-24 March 2010) http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WMR_doc-

uments.final_27_April_1.FINAL.pdf (2015.11.20閲覧).

Reply

Masataka MURAKAMI*

* *Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.*

(Received 30 November 2015; Accepted 15 December 2015)

「短報」並びに「回答」掲載の経緯について

「天気」編集委員会

2015年7月に真木会員より、「会員の広場」に「気象研究ノート（第231号）『人工降雨・降雪研究の最前線』へのコメントおよび液体炭酸人工降雨法の有効性の解説」の投稿があった。本稿においては、「気象研究ノート」の内容について詳細な議論を行っており、気象研究ノートを読んでいない会員にとっては、理解が困難であると想定された。

このような状況を受け「天気」編集委員会では、本投稿内容を主旨とする短報として、「天気」に投稿し、これに対する回答を掲載する形を取るのが適切であると判断した。その後、真木氏より「会員の広場」投稿

原稿の内容を反映した「短報」として、再投稿がなされた。

投稿された「短報」に対して、通常と同様の査読を行い、査読者コメントを反映した改訂版について、査読者の確認を経て受理した。

受理された「短報」に対する「気象研究ノート」執筆者の一人村上氏の回答案が提出され、編集委員会のコメントを反映した改訂版について受理した。

以上の経緯を踏まえて、本原稿を「天気」に掲載することとなった。
