

強冷法・人工核法シーディングによる豪雨抑制効果と促進リスクに関する数値実験的研究

八木, 柊一郎 / YAGI, Shuichiro

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院デザイン工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. デザイン工学研究科編 / Bulletin of graduate studies.
Art and Technology

(巻 / Volume)

6

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2017-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00031022>

強冷法・人工核法シーディングによる豪雨抑制効果と 促進リスクに関する数値実験的研究

STUDY OF THE MITIGATION EFFECT AND ACCELERATION RISK ON PRECIPITATION OF TORRENTIAL RAINS BY CLOUD SEEDING WITH THE FORCED-COOLING AND ARTIFICIAL-NUCLEUS TECHNIQUE

八木 柊一郎

Shuichiro YAGI

主査 鈴木 善晴

副査 道奥 康治

法政大学大学院 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻修士課程

This study conducted experimental simulations of cloud seeding on torrential rains with the forced-cooling and artificial-nucleus technique in order to examine the mitigation effect and acceleration risk on precipitation. Some severe rainfall events including linear convective systems were simulated using a mesoscale meteorological model. Results of this study clarified that relatively small-scale cloud seeding as the discrete or dynamic seeding can produce some mitigation effects on precipitation. In comparison of the mitigating mechanism of both techniques, vertical updraft and graupel generation in the upper air was noticeably weakened by both techniques in the peak stage of rainfall.

Key Words : cloud seeding, torrential rain, mitigation effect, acceleration risk, mesoscale model

1. 背景と目的

シーディング(クラウド・シーディング)とは、航空機、気球、発煙筒やミサイルを用いて、自然の雲にドライアイスや液体炭酸、ヨウ化銀等の物質を散布することにより雲の内部構造を人為的に変化させる気象制御手法のことである。0 以下の冷たい雲に対しては、ドライアイス法や液体炭酸法を用いることで過冷却水滴の凍結が促進され(強冷法)、あるいはヨウ化銀等の化学物質自体が核となり(人工核法)、雲内に氷晶が大量に生成され、その結果、降水の促進(増雨)をもたらすと考えられている¹⁾。

日本においては、近年、強冷法をベースとした渇水対策としての人工降雨技術を確立するため、文科省や気象研究所を中心としたプロジェクト等²⁾、数多くの実験・研究が実施されている。吉田ら³⁾の研究では、2~3年に1回程度の割合で渇水が発生しているとされる奥利根流域を対象として、雲解像非静力学モデル(NHM)による冬季における人工降雪の数値実験を行うとともに、積雪融雪モデル・流出モデルを用いてダム流入量およびダム貯水量に対する影響を評価している。その結果、シーディングによりダム流入量が18%ほど増加することが見込まれ、またその費用対効果を概算すると6円/m³となることから、水資源確保のための他の方法(例えば海水淡水化の300円/m³)と比較してシーディングは安価な手法であることが示されている。

また、乾燥気候帯に位置するUAEでは、人工核法を

ベースとした「UAE 降水強化科学研究プログラム⁴⁾」が2016年より開始され、世界の乾燥・準乾燥地域に水を持続的に供給することが可能な人工降雨技術を開発して「水の安全保障」の拡充を目指す取り組みが行われている。同国ではこれまでもアメリカ大気研究センター(NCAR)やアメリカ航空宇宙局(NASA)などと協力してシーディングに関する基礎研究やインフラ(気象レーダー網の整備や専用の航空機導入等)への投資が行われていたが、上記のプログラムはさらなる研究の進展を目指して、新たに選定された各国の研究機関と共同で実施するもので、今後の成果が大いに期待されるプロジェクトである。

一方、2013年に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書(AR5)によれば、気候システムが温暖化傾向にあることは疑いのない事実であり、温暖化に起因する局地的豪雨の頻発化や台風の強大化によって、今後、気象災害が地球規模で増加すると懸念されている。我が国においても、集中豪雨による土砂災害や都市域への浸水被害など数多くの被害が発生しており、特に近年は記録的短時間豪雨の増加が指摘されるなど、極端な降水現象に対する防災策、減災策の必要性が強く叫ばれている。

そのような対策の一つとして、これまでシーディングの利用可能性が検討されており、鈴木ら・尾中ら・横山ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾は、領域気象モデルを用いた数値実験により様々な豪雨事例における積雲発達期や積雲発生初期に

シーディングを行うことで、降水抑制効果が得られることを確認している。集中豪雨の規模や強度を人為的に抑制することができれば人的被害のみならず経済的被害の軽減にも寄与することが可能となるが、その実用化のためには、降水抑制効果を最大化するための最適な実施条件を明らかにするだけでなく、シーディングにより降水が促進され豪雨の規模や強度が増大するリスクを限りなくゼロに近づけることが求められる。

そこで本研究では、強冷法シーディングによる降水抑制の有効性と、降水促進リスクに着目したシーディングの信頼性を定量的に評価するため、積雲発生初期における実施可能性を考慮した複数の散布手法を想定したシーディングに関する実験的な数値シミュレーションを行った。さらに本研究では、化学物質散布によるシーディング手法（人工核法）の有効性について検討するため、領域化学輸送モデル WRF-Chem を用いて、散布する化学物質の量や散布高度を変化させながら降水過程に与える影響について感度分析を行うとともに、強冷法シーディングとの抑制メカニズムの比較を行った。

2. 使用モデルとその計算条件

(1) モデルの概要とオプションの設定

本研究では、はじめに領域気象モデルのひとつである WRF (Weather Research and Forecasting Model) を用いて、強冷法シーディングに関する数値実験を行った。WRF とは、アメリカ大気研究センター (NCAR) が中心となって共同開発されたメソ気象モデルであり、局所的な豪雨や突風など激しい対流活動を伴う現象の予測および再現に適したモデルである⁸⁾。

降水現象に影響を及ぼすと考えられる雲物理のオプションには、凝結過程・衝突併合過程・ライミング・凝集過程などの計算過程が含まれ、複数の降水粒子に関する変化のプロセスが規定されている。本研究では、水・氷 6 種の混合比と氷晶・雪・雨水・霰の数濃度が予報変数として組み込まれ、シーディングによる雲物理過程の変化を表現するのに適していると思われる Morrison double-moment Scheme⁹⁾を用いた。

その他の物理過程のオプションについては、多数の既存研究を参考に標準的なものとして、放射過程に Goddard shortwave Scheme (short wave), RRTM Scheme (long wave), 地表面過程に Noah Land Surface Model, 大気境界層に Mello-yamada-Janjic scheme を使用した。

(2) 初期・境界条件および計算領域の設定

本研究では、初期値および境界条件として、大気・海面水温データにはアメリカ環境予測センター (NCEP) から提供されている解像度 30km の FNL データ、地形標高データにはアメリカ地質調査所 (USGS) 提供の緯度・経度 30 秒 (約 0.925 km) の解像度を持つ DEM データ (GTPO30) を用いた。本研究のシミュレーションでは Domain4 に強雨域全体が含まれるように 4 つの領域を設定し、格子間隔をそれぞれ 9km (Domain1), 3km (Domain2), 1km (Domain3), 0.333km (Domain4)

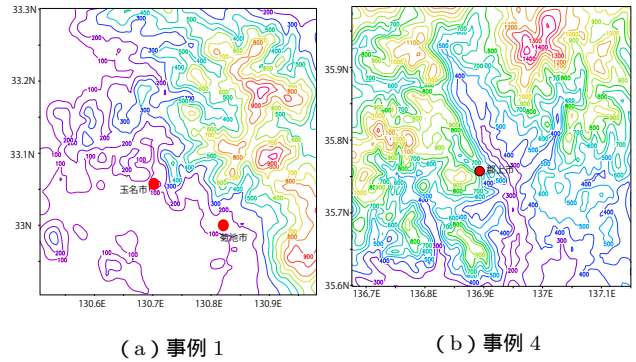


図-1 計算領域 (Domain4) とその地形標高

として、2-way のネスティング計算を行った。格子数はそれぞれ 70×70 (Domain1), 100×100 (Domain2), 100×100 (Domain3), 139×139 (Domain4) とした。なお、積雲パラメータリゼーションのオプションについては倉田ら¹⁰⁾の研究を参考に Domain1 に対してのみ Grell-3 を設定した。

対象とする豪雨事例としては、横山ら⁷⁾と同様に、我が国で豪雨災害をもたらす大きな要因の 1 つとなっている線状降水系 (線状対流系) と呼ばれる降水システムに着目するとともに、2000 年以降に顕著な災害をもたらした気象事例の中から無作為に 16 事例を選定した (詳細は割愛)。解析対象期間は各事例ごとの降雨継続時間を考慮して決定した。

本稿では主に、降水の抑制及び促進の観点で特徴的な変化が見られた梅雨前線の影響により発生した線状降水系の事例 1 (福岡県, 2009 年 7 月 24 日) と前線と低気圧の影響により広域に大雨が発生した事例 4 (愛知県, 2008 年 8 月 28 日) のシミュレーション結果について述べる。事例 1 と事例 4 における Domain4 の計算領域とその地形標高を図-1, また、降水分布を図-2 に示す。なお、本研究における事例の再現精度は必ずしも高いものではないが、本研究の目的 (数値実験および感度分析) から問題ないと判断した。

(3) 強冷法シーディングの表現方法

モデル内でシーディングによる物質散布を直接的に表現するのは難しいため、本研究では、横山ら⁷⁾と同様にモデル内の混合比計算スキームにおける氷晶核の数濃度 n_c の値に一定の操作倍率 α をかけることで間接的にシーディングを表現した。氷晶核 (昇華/凝結凍結核) の数濃度 n_c は、以下に示す Fletcher の経験式によって計算されている。

$$n_c = 10^{-2} \exp(0.6(273.15 - T))/\rho \quad (1)$$

$$n_c' = \alpha \cdot n_c \quad (2)$$

ここで、 n_c , n_c' はそれぞれシーディング実施前後における氷晶核の数濃度 (kg^{-1}), T は気温 (K), ρ は空気の密度 (kg/m^3), α は操作倍率を表す。気象研究所で実施された数値実験等¹¹⁾で過剰にシーディングを行うことで降雪を抑制し得るとの指摘があったことから、横山ら⁷⁾は、より極端な設定として操作倍率 $\alpha = 10^9$ を

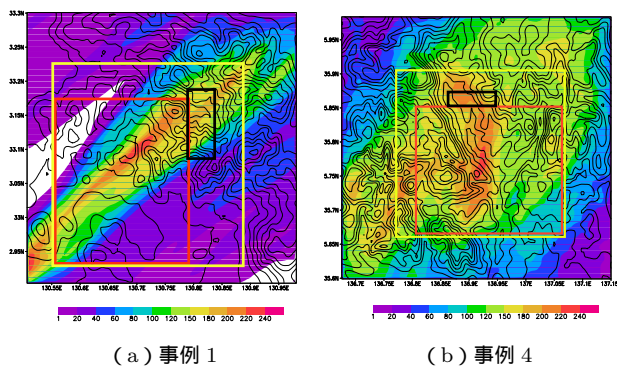


図-2 15 時間積算降水量 (mm) の空間分布と解析対象領域 (黄色) およびシーディング実施領域 (赤・黒色)

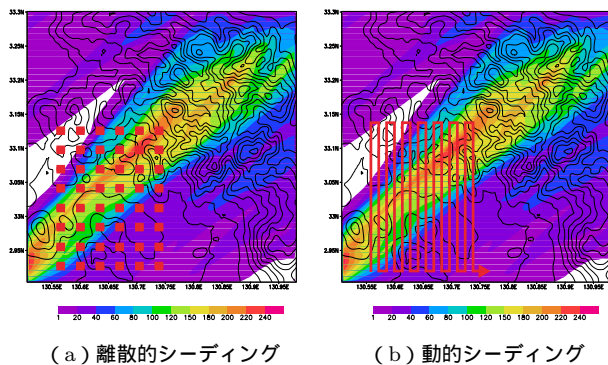


図-3 離散的シーディング (左図) および動的シーディング (右図) における散布イメージ図 (右図は経路を表す)

採用していたが、本研究では、操作倍率 $\alpha = 10^3, 10^5, 10^7$ も採用して、シーディングの実施規模 (想定される物質散布量) が比較的小さい場合でも降水抑制効果が得られるのかどうかを検討することとした。なお、これらの操作倍率が実際にどの程度の物質 (ドライアイスや液体炭酸) を散布することに相当するのかについては、現時点で十分な知見は得られていない。

(4) 強冷法シーディングの実施条件

まず、シーディングによる降水への影響を評価するため、図-2 に示す雨域全体を含む広範囲な領域を解析対象領域 (黄枠) とし、その風上側に位置する積雲発生領域および積算降水量が多い強雨域を含む内側の領域をシーディング実施領域 (赤枠) として設定した。シーディング実施高度は、積雲発生初期に液体雲水の生成が確認された高度を基準として、最下層の気温が 0 以上にならないように事例ごとに高層・中層・低層の 3 パターンを設定し、シーディングの開始時刻は実施領域内で液体雲水の生成が確認された直後とした。

本研究では、横山ら⁷⁾と同様にシーディング実施領域内全ての格子点で氷晶核数濃度を变化させる「面的シーディング」に加え、氷晶核数濃度を变化させる格子点を一定間隔で設ける「離散的シーディング」(気球の放球による物質散布を想定)、一定の間隔・速度で格子点を移動しながら氷晶核数濃度を变化させる「動的シーディング」(航空機による物質散布を想定)、上昇気流の発達に着目した「気流シーディング」の 4 つのシーディング手法を用いてシミュレーションを行った。気流シーディ

ングは、上昇気流が比較的強い範囲で局所的に氷晶核数濃度の値を变化させる手法であり、その実施領域の面積は図-2 の黒枠で示すように面的シーディングの約 5~25 % 程度である。なお、シーディングの開始時刻は上昇気流の発達に着目して決定した。離散的シーディングおよび動的シーディングの散布イメージを図-3 に示す (図中の赤色で示した部分の氷晶核数濃度を变化させてシーディングを表現する)。それぞれのシーディング手法の継続時間は、面的シーディングは 60 分間、離散的シーディングは 20 分間、気流シーディングは 120 分間とした。動的シーディングの継続時間は実施領域の広さによって事例ごとに異なるが、Maki ら¹²⁾の航空機による散布実験を参考に 1 つの格子点 (333m) あたり 4 秒間の速さで移動するように設定した。

以上の実施条件と 4 つの操作倍率を用いて、1 事例あたり、面的・動的・気流シーディングはそれぞれ 12 ケース、離散的シーディングは 36 ケースのシミュレーションを行った。以下では、シーディングを実施しないケースを Case-0 とし、面的シーディングを Case-A-(操作倍率)-(高度番号)、離散的シーディングを Case-B-(操作倍率)-(高度番号)-(格子点間隔)、動的シーディングを Case-C-(操作倍率)-(高度番号)、気流シーディングを Case-D-(操作倍率)-(高度番号) と表記する (高度番号は実施高度が低い順に表記する)。

3. 複数の手法を想定した強冷法シーディングによる豪雨抑制効果とそのメカニズム

(1) 領域積算最大降水量・時間最大降水量の変化に着目した強冷法シーディングに関する感度分析

本研究では、シーディングのシミュレーション結果に対して降水抑制効果の大小や有無などを定量的に評価するため、領域積算最大降水量や時間最大降水量、領域平均降水量、時間平均降水量などの評価指標を用いて評価を行った。なお、いずれの評価指標においても、図-2 に示す解析対象領域内 (黄枠) の値の変化に着目して、Case-0 に対する変化率を算出した。

事例 1 および事例 4 の各シーディング手法 (Case-A~D) における領域積算最大降水量の変化率をそれぞれ図-4、図-5 に示す。横軸は実施した氷晶核数濃度の操作倍率を表し、縦軸は変化率、グラフの色の違いがシーディングを実施した高度の違いを示している。事例 1 (図-4) では、全体的に領域積算最大降水量がマイナスの変化傾向すなわち降水抑制の傾向にあることが確認できる。一方、事例 4 (図-5) では、抑制ケースが見られず、全体的にプラスの変化傾向すなわち降水促進の傾向を示す結果となっている。

領域積算最大降水量の変化率の閾値を $\pm 5\%$ として、両事例の各シーディング手法 (Case-A~D) における抑制・促進ケースをカウントしたところ、事例 1 の抑制ケースはそれぞれ、2, 13, 5, 5 となり、促進ケースは、0, 2, 1, 0 となった。また、事例 4 の抑制ケースは、全手法で 0 となり、促進ケースは、4, 23, 4, 2 となった。よって、線状降水系に起因する事例 1 では降

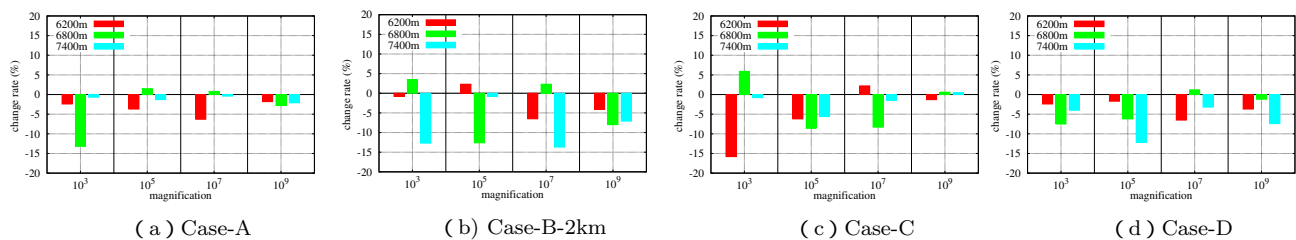


図-4 事例1における各強冷法シーディングによる積算最大降水量の変化率

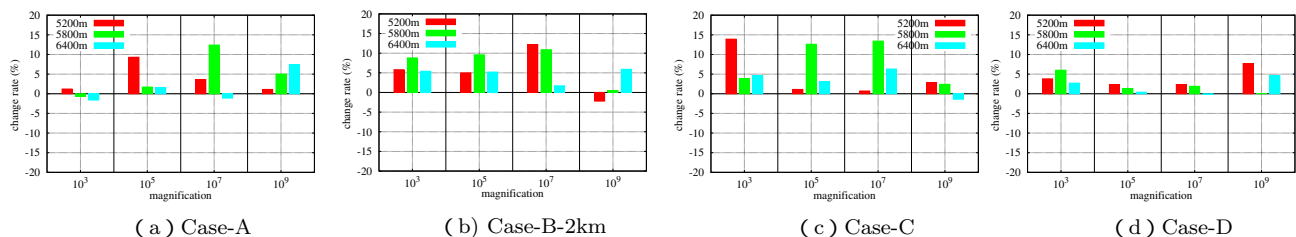


図-5 事例4における各強冷法シーディングによる積算最大降水量の変化率

水抑制の傾向にあり、強雨域が広くスケールの大きい事例4では降水促進の傾向にあることが確認された。

事例1では、全てのシーディング手法において10%以上の抑制ケースが確認され、特に離散的・動的・気流シーディングにおいて、実施領域が大きい面的シーディングよりも多くの抑制効果が得られた。一方、事例4では全てのシーディング手法で抑制効果は得られなかったが、気流シーディングにおいて促進ケース数が最も少ない結果となった。このことから、実施領域の広い面的シーディングや氷晶核数濃度の操作倍率が大きいシーディング($\alpha = 10^9$)ではなく、比較的小さい規模(実施領域が狭い、操作倍率が小さい)のシーディング(離散的・動的・気流)であっても一定の降水抑制効果が得られる可能性があることが分かった。さらに、上昇気流に着目したシーディングを実施することで促進リスクを低減させられる可能性が示唆された。

次に、時間最大降水量の変化に着目して、同様に抑制効果の評価を行った。事例1および事例4の各シーディング手法(Case-A~D)における時間最大降水量の変化率をそれぞれ図-6、図-7に示す。横軸、縦軸、グラフの色の違いは図-4、図-5と同様である。事例1(図-6)では、全体的に時間最大降水量がマイナスの変化傾向すなわち降水抑制の傾向にあることが見て取れる。Case-Aの高度7400mに実施したケースでは、操作倍率の値が大きくなるにつれて減少率が大きくなっていることから、同ケースではシーディング散布量に比例して、より大きな降水抑制効果が得られている。一方、事例4(図-7)では、領域積算最大降水量では抑制ケースが確認されなかったが、Case-B-3-3-2kmで約-10%の変化率が得られている。しかし、全体的にはプラスの変化傾向すなわち降水促進の傾向を示す結果となっている。

時間最大降水量の変化率の閾値を $\pm 5\%$ として、両事例の各シーディング手法(Case-A~D)における抑制ケースと促進ケースをカウントしたところ、事例1の抑制ケースはそれぞれ、3、9、4、3となり、促進ケー

スは、2、8、0、1となった。また、事例4の抑制ケースは、1、11、2、0となり、促進ケースは、4、10、5、5となった。したがって、これらの指標においても線状降水系に起因する事例1では降水抑制の傾向にあり、強雨域が広くスケールの大きい事例4では降水促進の傾向にあることが確認された。

一方、両事例とも、操作倍率が比較的小さいケース($\alpha = 10^3, 10^5$)においても10%以上の抑制ケースが確認され、また、事例1では全てのシーディング手法において、事例4では離散的シーディングにおいて10%以上の抑制ケースが確認された。このことから、時間最大降水量の観点でも比較的小規模なシーディングであっても一定の降水抑制効果が得られる可能性があることが示唆された。

(2) 強冷法シーディングによる降水抑制の有効性と降水促進リスク

シーディングを実施した全16事例および線状降水系による3事例に対して降水抑制の有効性と降水促進リスクを統計的に評価するため、領域積算最大降水量と時間最大降水量の観点で得られた抑制・促進ケース数から、各々の抑制・促進割合を求めた。結果を表-1に示す。全事例に対する評価として(同表(a))、領域積算最大降水量の観点では抑制割合が約11%、促進割合が約15%で、時間最大降水量の観点では抑制割合が約13%、促進割合が約19%となった。一方、線状降水系に起因する3つの事例のみを対象として評価したところ(同表(b))、前者の観点では抑制割合が約18%、促進割合が約15%で、後者の観点では抑制割合が約38%、促進割合が約11%となり、どちらの評価指標においても全事例に対する評価より高い抑制割合と全事例以下の促進割合を示した。このことから、積雲発生初期における強冷法シーディングは線状降水系に起因する事例に対して特に有効であることが分かる。

さらに、線状降水系に起因する事例の中でも気流シーディングを実施したケースのみに条件を限定して評価

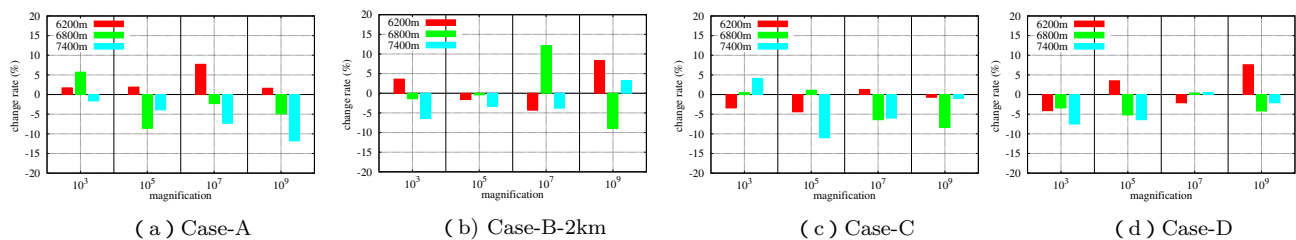


図-6 事例 1 における各強冷法シーディングによる時間最大降水量の変化率

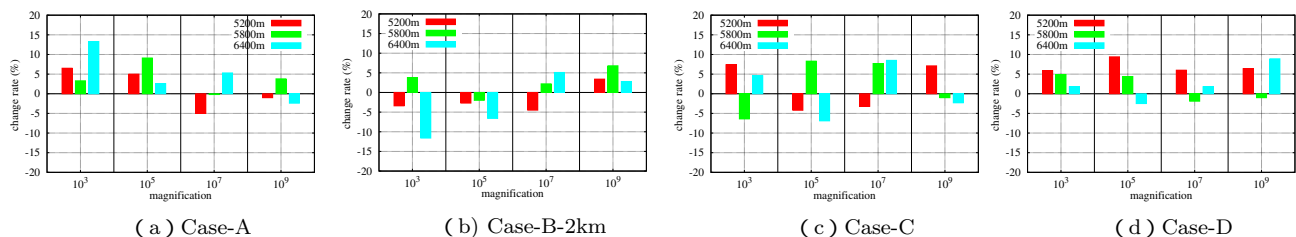


図-7 事例 4 における各強冷法シーディングによる時間最大降水量の変化率

表-1 全事例および線状降水系による豪雨事例を対象とした場合の降水抑制・促進ケース数と各々の割合

(a) 全事例 (全 768 ケース)

領域積算最大降水量			時間最大降水量		
抑制	促進	変化なし	抑制	促進	変化なし
84 (11%)	112 (15%)	572 (74%)	103 (13%)	146 (19%)	308 (68%)

(b) 線状降水系 (全 216 ケース)

領域積算最大降水量			時間最大降水量		
抑制	促進	変化なし	抑制	促進	変化なし
39 (18%)	32 (15%)	145 (67%)	82 (38%)	24 (11%)	110 (51%)

(c) 線状降水系の気流シーディング (全 36 ケース)

領域積算最大降水量			時間最大降水量		
抑制	促進	変化なし	抑制	促進	変化なし
7 (19%)	2 (6%)	25 (75%)	13 (36%)	3 (8%)	20 (56%)

すると同表(c), 前者の観点では抑制割合が約 19%, 促進割合が約 6%で, 後者の観点では抑制割合が約 36%, 促進割合が約 8%となった。促進割合がどちらの指標においても 10%以下となり, このことから, シーディングに伴う豪雨促進リスクを低減させるためには, 気流シーディングが有効であることが示唆された。

現時点では, シミュレーションを実施した事例数・ケース数が限られているため, 本研究では各ケースの計算条件や実施条件の細かな違いは考慮せずに, アンサンブル平均としての抑制割合・促進割合を算出している。そのため表-1の数値は暫定的な評価結果ではあるものの, 同表をグラフ化した図-8に示すように, 対象とする事例を限定することで(a)から(b)へ, また実施条件を限定することで(b)から(c)へ抑制・促進の割合が変化しており, 今後, 同図(d)で示されるような促進リスクが十分に小さくかつ高い抑制割合(と高い抑制効果)

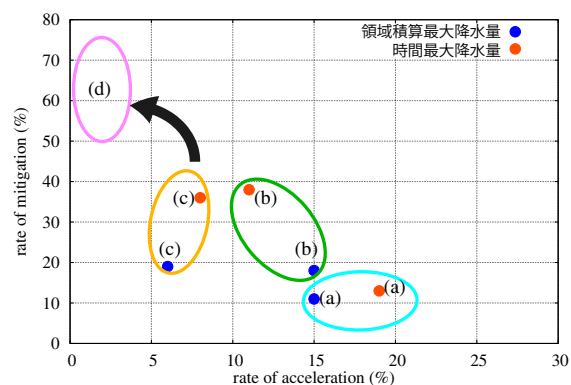


図-8 各評価指標における現時点での抑制割合(縦軸)と促進割合(横軸)(a)~(c)は表-1に対応, (d)は最終目標

が期待できるようなシーディング手法や実施条件を模索することで, 最終的な実用化へと繋げていきたい。

(3) 強冷法シーディングによる豪雨抑制メカニズムの解析

領域積算最大降水量の観点で抑制効果が得られた一例として, 事例 1 の Case-D-5-3 に着目し, 豪雨抑制のメカニズムに関する解析を行った。まず, 雨のピークの時間帯を迎えるまでに大気中の降水粒子全体および鉛直風速にどのような変化が生じたかを確認するため, Case-0 における解析対象領域内の全高度の各降水粒子の混合比の時間変化を平均したものと, 鉛直風速の高度別時間変化を図-9に示す。また, 同図を積雲の発達ステージを参考にして, 積雲発生初期(1), 積雲発達前期(2), 積雲発達後期(3), 成熟期(4)の4つに区分し, 各ステージにおける平均値とそのCase-0との偏差を求めた。結果を図-10に示す。

同図より, 第一ステージ(図中の(1))でシーディングを実施し, それを受けて第二ステージ(図中の(2))では, 氷晶(桃色)・雪(水色)・霰(赤色)の混合比が増加していることが確認できる。これらの降水粒子が

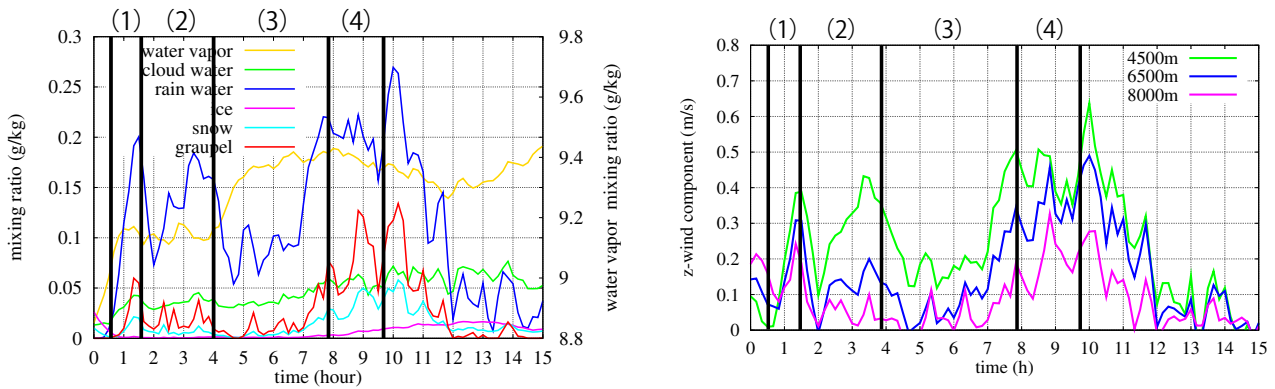


図-9 事例1のCase-0における各降水粒子の混合比の時間変化（左図）および鉛直風速の高度別時間変化（右図）

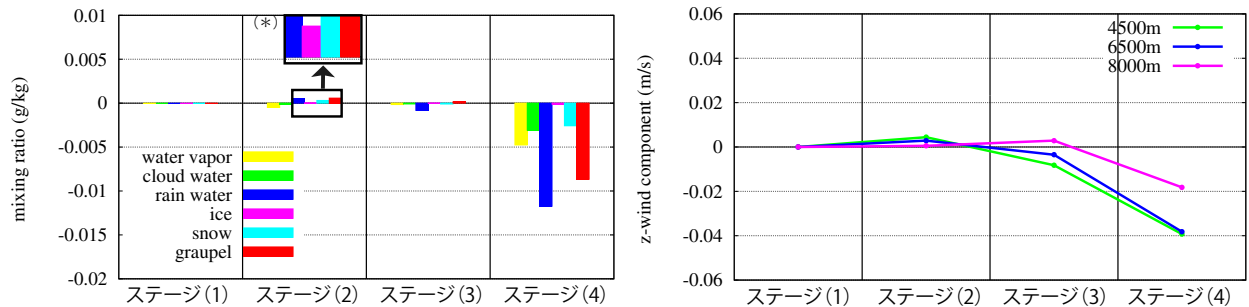


図-10 事例1のCase-D-5-3における各降水粒子のステージ別平均混合比（左図）および高度別・ステージ別の平均鉛直風速（右図）(Case-0との偏差)((*)は拡大図であることを表している)

生成された際に潜熱が発生し、上昇気流が強化されたため、同ステージにおける鉛直風速が強まったと考えられる。さらに、第二ステージから第三ステージにかけて、地上でこの時刻に降水を確認していることから、成長した降水粒子が落下したと考えられる。その影響により、第三ステージ（図中の（3））では、鉛直風速が弱まってきているのが見て取れる。これは、第二ステージで生成された降水粒子が落下する過程で、大気中の空気を引きずり降ろしたことで、鉛直風速が弱まったと考えられる。結果、第四ステージ（図中の（4））で鉛直風速がさらに弱化し、降水粒子（特に霰（赤色））が減少したことで、豪雨抑制に繋がったと考えられる。

4. WRF-Chemを用いた人工核法シーディングに関する数値実験

(1) モデルの概要とオプションの設定

次に本研究では、領域化学輸送モデル WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model with Chemistry) を用いた人工核法シーディングに関する数値実験を行った。同モデルは、気象場と化学反応系をオンラインで結合して同時に計算を行う事で、特定の領域における大気浮遊物質の輸送や化学反応のシミュレーションを行うことができるモデルである。化学反応過程の計算を気象場と同一の空間解像度で実施することが可能であり、また、エアロゾルが放射過程に与える影響や降水過程に与える影響を表現することができる。本研究では、エアロゾルスキームとして、エアロゾル

による降水過程への影響を表現できる MOSAIC を使用した。化学気相反応スキームには CBMZ、光分解反応スキームには Fast-J を使用した。物理過程オプションと初期値・境界条件および地形標高データは前節と同様に設定した。

また、本節では2つの領域に対して、格子間隔を 9km (Domain1)、3km (Domain2) と設定し、2-way のネスティング計算を行った。格子数は両ドメインともに 70×70 とし、積雲パラメタリゼーションについては、Domain1 に対してのみ Grell-3 を設定した¹⁰⁾。

人工核法シーディングの対象とする豪雨事例については、強冷法シーディングでも対象とした事例を含む8つの事例で実施した。解析対象期間は各事例ごとの降雨継続時間を考慮して決定した。本節では、強冷法シーディングでも用いた事例4に対して、人工核法シーディングを実施した結果について述べる。事例4における Domain2 の計算領域とその地形標高を図-11(a) に示す。

(2) 人工核法シーディングの実施条件

解析対象領域は図-11(a) に示すように設定し、シーディング手法は実施領域全体に散布する「面的シーディング」と「気流シーディング」を用いた。開始時刻は両手法ともに強冷法シーディングと同様に積雲発生初期としたが、面的シーディングでは積雲発達期でも行った。実施領域は風上側の積雲発生領域と積算降水量のピーク地点を含む領域 (L) と、同領域よりも小規模な領域 (S) の2パターンを設定した。継続時間は強冷法と同

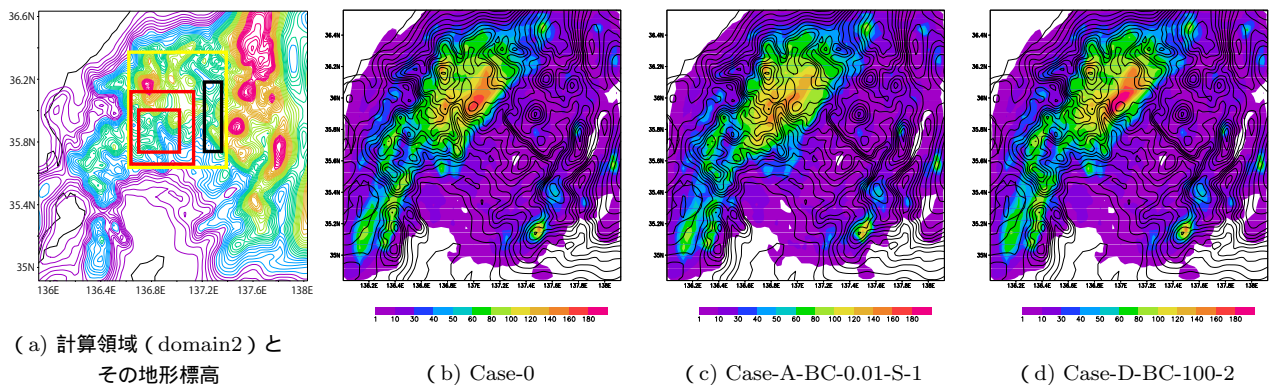


図-11 事例4の地形標高（黄枠：解析対象領域，赤枠：面的シーディング領域，黒枠：気流シーディング領域），Case-0 および人工核法シーディング後の積算降水量の分布

表-2 事例4の積雲発生初期の面的・気流シーディングによる領域積算最大降水量の変化率（％）

手法	散布量	2000m	3600m	5200m	6400m
面的 (L)	0.01	0.7	-5.9	-2.7	-5.5
	1	6.5	-0.5	7.0	5.8
	100	21.3	12.1	7.2	7.2
面的 (S)	0.01	-10.0	7.1	-1.8	24.5
	1	-6.1	1.5	-6.4	-0.5
	100	5.1	-0.5	-6.8	11.4
気流	0.01	6.0	6.6	-2.0	-2.0
	1	9.9	-0.7	7.4	-4.1
	100	0.3	23.6	-0.9	-2.3

様であるが，10 分おきに物質の散布を実施した．シーディング対象高度は，気温が 0 以上の高度約 2000m と 0 付近の高度約 3600m，0 以下の高度約 5200m および約 6400m の 4 パターンを設定した．散布物質（エアロゾル）の種類については，複数の物質の中から最も効果の高かったブラックカーボン（BC）を採用した．本研究ではシーディング実施領域内の各格子点において，エアロゾル混合比の値にそれぞれ 0.01 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)，1 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)，100 ($\mu\text{g}/\text{kg}$) を加算することで，3 パターンの散布を表現した．

なお，本節では面的シーディングを Case-A-(散布物質)-(散布量)-(実施領域)-(高度番号)，気流シーディングを Case-D-(散布物質)-(散布量)-(高度番号) と表記する（高度番号は実施高度が低い順に表記する）．

(3) 人工核法シーディングによる豪雨抑制効果に関する感度分析および抑制メカニズムの解析

事例4における Case-0 および人工核法シーディングにより抑制効果が確認された Case-A-BC-0.01-S-1，Case-D-BC-100-2 における 18 時間積算降水量を図-11(b)～(d) に示す．同図 (c)・(d) より，シーディングにより降水分布が変化していることが確認できる．Case-A ではピーク地点の赤いグリッドが減少していることから積算降水量の減少が見受けられ，Case-D では赤いグリッドが増加していることから，積算降水量の増加が確認できる．その他の実施ケースの結果を表-2 に示す．同表より，エアロゾルの散布領域が狭い場合でも降水過

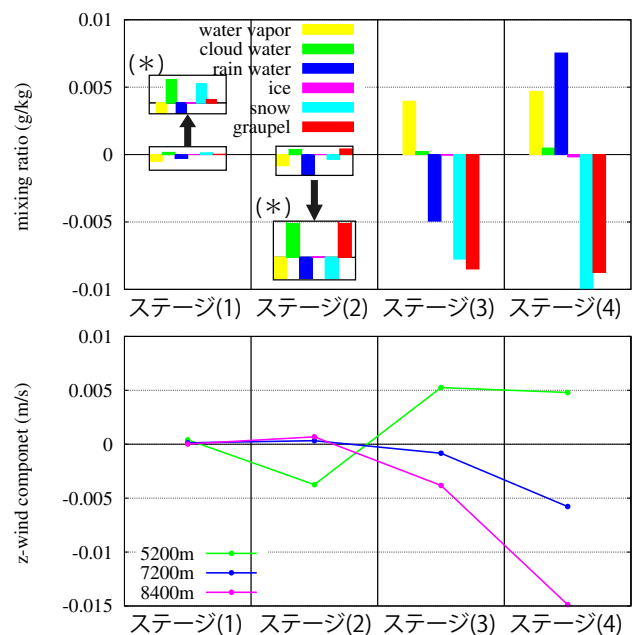


図-12 事例4の Case-A-BC-0.01-S-1 における各降水粒子のステージ別平均混合比（上図）および高度別・ステージ別の平均鉛直風速（下図）(Case-0 との偏差)(*) は各々の拡大図であることを表している）

程へ影響を与え得ることが分かる．また，事例4は強冷法シーディングによって領域積算最大降水量の抑制効果が得られなかったのに対し，人工核法シーディングでは抑制効果が得られた点で違いが見られた．

抑制効果が得られた一例として，事例4の Case-A-BC-0.01-S-1 に着目し，人工核法シーディングによる豪雨抑制メカニズムの解析を行った．強冷法シーディングのときと同様に積雲発生初期 (1)，積雲発達前期 (2)，積雲発達後期 (3)，成熟期 (4) の 4 つに区分し，ステージ別の平均値を求めた．その結果を図-12 に示す．

同図より，シーディングを実施した直後の第一ステージ（図中の (1)）から，液体雲水混合比（緑色）の増加，雨水混合比（青色），水蒸気混合比（黄色）の減少が確認できる．これは，散布されたエアロゾル自身が核となって水蒸気を捕捉し，液体降水粒子を生成したため，雨水の成長を抑制したと考えられる．次に，第二ス

ジ(図中の(2))では、霰混合比(赤色)の増加が確認できる。これは、第一ステージで降水粒子が生成された際に潜熱が発生し、上層の鉛直風速が強化され、降水粒子が成長したためと考えられる。第三ステージ(図中の(3))では、上層における鉛直風速の弱化が確認できる。第二ステージまでに生成された降水粒子が落下する過程で大気中の空気を引き摺り下ろしたためと考えられる。第四ステージ(図中の(4))においても霰混合比(赤色)や雪混合比(水色)が減少しているが、第三ステージまでに成長した降水粒子の落下によって、上層の鉛直風速が弱化し、大気中の降水粒子が全体的に減少した結果、豪雨の抑制に繋がったと考えられる。

以上より、エアロゾル自身が核となって液体降水粒子(雲水)を生成し、成長した大気中の降水粒子が落下する過程でピークの時刻を迎えるまでに鉛直風速が弱化し、大気中の降水粒子の成長が抑えられたことで、豪雨の抑制に繋がることが示された。

5. まとめと今後の課題

本研究では、強冷法シーディングによる降水抑制の有効性と、降水促進リスクに着目したシーディングの信頼性を定量的に評価するため、積雲発生初期における実施可能性を考慮した複数の散布手法を想定したシーディングに関する実験的な数値シミュレーションを行った。さらに、化学物質散布によるシーディング手法(人工核法)の有効性について検討するため、領域化学輸送モデル WRF-Chem を用いて、散布する化学物質の量や散布高度を変化させながら降水過程に与える影響について感度分析を行うとともに、強冷法シーディングとの抑制メカニズムの比較を行った。

その結果、強冷法の離散的・動的・気流シーディングにおいても面的シーディングと同程度以上の豪雨抑制が確認され、また、氷晶核数濃度の操作倍率が低倍率の場合でも抑制効果が確認できたことから、面的シーディングと比べて小規模な実施範囲で、想定される散布物質が少ない場合でも有効であることが示された。中でも線状降水系に起因する事例において比較的高い抑制効果が期待できる。さらに、降水促進リスクという観点では、上昇気流の発達に着目した気流シーディングが低リスクであることが示唆された。一方、領域化学輸送モデル WRF-Chem を用いたエアロゾル散布による人工核法シーディングでは、実施条件によっては強冷法シーディングと同程度の抑制効果が確認されたことから、人工核法シーディングが気象制御手法として有効であることが示された。また、強冷法シーディングよりも降水の抑制割合は低く、促進リスクも高い結果となったが、気温が 0 以上の高度が低い雲に対しても有効であるという違いが見られた。

両手法の抑制メカニズムを比較した結果、強冷法シーディングでは高層の固体降水粒子の成長を促進させるのに対し、低層で実施した人工核法シーディングでは低層の液体降水粒子の成長を促進させることから、シーディングにより直接的に生成される降水粒子の種類は

異なるものの、雨のピークの時間帯を迎えるまでに生成された降水粒子が落下し、雲内の鉛直風速を弱めることが両手法における共通のメカニズムであることが確認された。

今後は、より多くの事例・実施条件でシミュレーションを行い、強冷法・人工核法シーディングによる抑制効果が高く、促進リスクの低い最適な実施条件は何かを明確にすることが挙げられる。また、豪雨促進リスクの統計的な評価を行い、その精度を向上させることで、促進リスクと災害リスクのトレードオフを考慮したリスクマネジメント手法の確立を目指す必要がある。

参考文献

- 1) 真木太一、鈴木義則、脇水健次、西山浩司：人工降雨・渇水対策から水資源まで - , 技報堂出版, 2012 .
- 2) 文部科学省・科学技術振興調整費プロジェクト：「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」ホームページ, <http://jcsepa.mri-jma.go.jp/index.html> .
- 3) 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：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(3), pp.209-222, 2009 .
- 4) UAE 連邦気象・地震局：「UAE 降水強化科学研究プログラム」ホームページ, <http://www.uaerep.ae/> .
- 5) 鈴木善晴・田中聡一郎・郷祐美子：豪雨抑制効果に着目したシーディングによる気象制御手法に関する数値実験, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I391-I396, 2012.
- 6) 尾中俊之・鈴木善晴：シーディングによる豪雨抑制効果の評価・検証とその抑制メカニズムの解析に関する数値実験, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70, No.4, I553-I558, 2014.
- 7) 横山一博、尾中俊之、鈴木善晴：積雲発生初期のクラウド・シーディングによる豪雨抑制効果とそのメカニズムに関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, I499-I504, 2015 .
- 8) Wang, W., C. Bruyere, D. Michael, D. Jimmy, G. Dave, L. Hui-Chuan, M. John, R. Syed and Z. Xin: WRF version3 modeling system user's guide january 2012.
- 9) Morrison, h., J. A. Curry, V. I. Khvorostyanov: A new double-moment microphysics parameterization for Application in Cloud and Climate Models. PartI: Description, J. Atmos. Sci., 62, 1665-1677, 2005 .
- 10) 倉田学児、大嶽公康、北田敏廣：PSU/NCAR MM5 を用いた長距離物質輸送に対する雲物理場の影響の推定, 地球環境シンポジウム講演集 Vol. 5, pp.103-108, 1997 .
- 11) 気象研究所物理気象研究部・予報研究部：日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究, 気象研究所技術報告, 第 48 号, pp.207-221, 2005 .
- 12) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki and Kenji Wakimizu: Artificial Rainfall Technique Based on the Aircraft Seeding of Liquid Carbon Dioxide near Miyake and Mikura Islands, Tokyo, Japan. J. Agric. Meteorol., 69(3), 147-157, 2013.