

# 線状対流系豪雨の抑制を目的とした Pinpoint Seeding の有効性に関する数 値実験

佐野遼佑<sup>1</sup>・鈴木善晴<sup>2</sup>・西山浩司<sup>3</sup>・相馬一義<sup>4</sup>

## Numerical Experiments on the Effectiveness of Pinpoint-Seeding Operation Aiming for Heavy Rainfall Mitigation in Linear Convective Systems

Ryosuke SANO<sup>1</sup>, Yoshiharu SUZUKI<sup>2</sup>, Koji NISHIYAMA<sup>3</sup> and Kazuyoshi SOUMA<sup>4</sup>

### Abstract

This study conducted numerical experiments of heavy rainfall mitigation under multiple experimental conditions using the Weather Research and Forecasting model (WRF) to investigate the effectiveness of Pinpoint-Seeding operation in linear convective systems. By examining the difference of mitigation effects among different seeding methods and implementation conditions, it was found that implementing Pinpoint-Seeding only in grids with strong updrafts resulted in a reduction of approximately 16.5% in maximum accumulated precipitation. This study also clarified the impact of seeding duration and implementation altitude on the mitigation effects. The mechanism of rainfall mitigation through the over-seeding condition, where the growth of ice crystals and snow reduces supercooled water droplets and then suppresses graupel growth, was confirmed by analyzing mixing ratio and number concentration of precipitation particles.

キーワード：クラウド・シーディング、降水抑制、線状対流系豪雨、地球温暖化、ムーンショット型研究開発制度

Key words: cloud seeding, precipitation control, linear convective systems, global warming, Moonshot R&D Program

### 1. はじめに

近年、地球温暖化の進行に起因すると推測されている大型台風や局所的豪雨、線状降水帯による

極端風水害が激甚化しており世界規模で問題となっている<sup>1)</sup>。世界気象機関 (WMO) が2021年8月に発表した報告書<sup>2)</sup>によると、1970～2019年の

<sup>1</sup> 法政大学大学院デザイン工学研究科  
Graduate School of Design Engineering, Hosei University

<sup>2</sup> 法政大学デザイン工学部  
Faculty of Design Engineering, Hosei University

<sup>3</sup> 九州大学大学院工学研究院  
Graduate School of Engineering, Kyushu University

<sup>4</sup> 山梨大学大学院総合研究部  
Graduate School of Integrated Research, Yamanashi University

50年間で干ばつや洪水といった気象災害は5倍に増加し200万人以上が死亡、経済的な損失額は3兆6400億ドル(約400兆円)にまでのぼる。特に日本の地形は世界的に見ても急峻であり、限られた平地に人口や財産が集中して複雑な社会開発がなされている。そのため、土砂災害や複雑な地下構造物が引き起こす都市域の浸水が深刻化している。人命を脅かす極端風水害による被害を防ぐために、構造物等による被害抑制や災害発生時の早期警報発出などといった取り組みが行われている<sup>3)</sup>。

極端風水害は人的被害をもたらす一方で、社会基盤施設の損壊や交通網の機能停止など経済的被害をもたらす側面がある。社会基盤の復興は莫大な資金と労力が必要とされるが、このような経済的被害を軽減する取り組みは未だ十分に行えていない現状にある。人的被害と経済的被害を共に軽減する方策の確立は必要不可欠である。それらの課題は2021年に開始した内閣府主導のムーンショット型研究開発制度の目標8でも取り上げられ、「2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」<sup>4)</sup>するための取り組みが行われている。本研究ではムーンショット目標8への貢献を目指して「クラウド・シーディング」<sup>5)</sup>の技術に着目した。降水量のピーク強度を抑制することで線状降水帯や線状対流系豪雨の被害を抑える気象制御に関する研究を行った。

クラウド・シーディング(以下、シーディングとする)とは自然界に存在する雲に航空機、気球、発煙筒やミサイルを用いて、ドライアイスや液体炭酸、ヨウ化銀などの種となる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である。シーディングを用いた人工降雨(降水促進)を目的とした研究は世界各国で実施されている<sup>6-8)</sup>。起源は1940年代の米国で実施された研究に遡るが、近年の代表的な事例として、アラブ首長国連邦(UAE)での研究プログラム UAEREP(UAE Rain Enhancement Program)<sup>9)</sup>があげられる。このプログラムは2016年から進行中の水の供給が難しい乾燥地帯での水資源の安定的な供給を目指すためのプログラムであり、水不足

が原因となって紛争が引き起こされる危険性を防ぐという目的もある。全世界の研究者が参加しておりシーディングを用いた人工降雨技術の注目度が増している。

一方、気象制御を目的としたシーディングでは、台風を対象とした屋外実験が1960年代に米国で行われた。また、豪雪を対象とした屋外実験<sup>10-12)</sup>が1990~2000年代に我が国において実施されていたが、線状降水帯に対しては過去一度も行われていない。当時の気象シミュレーションの精度では自然現象と制御効果の明確な峻別が出来ず、研究を進めるうえで大きな支障となっていたためにいずれも実用化には至っていない。しかしながら、著者らのグループでは近年の気象モデルや計算機の発達を受けて、数値実験による降水抑制を目的としたドライアイスシーディングの利用可能性をこれまで検討してきた。鈴木ら<sup>13)</sup>・横山ら<sup>14)</sup>は、様々な豪雨事例において積雲発生初期や積雲発達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。特に八木<sup>15)</sup>の研究では、上昇気流に着目することで小規模な四角形実施領域で抑制効果を得ることを目的とした「気流シーディング」が提案されている。さらに中村<sup>16)</sup>の研究では、同手法では必ずしも上昇気流が卓越した領域にシーディングを行えていない可能性があることから、気流シーディングを高度化した「Pinpoint Seeding」を導入しその有効性について検討が行われている。

中村の Pinpoint Seeding は上昇気流が卓越した上位グリッドのみにシーディングを実施する、より小規模な手法である。先行研究<sup>13-15)</sup>に比べ大きな降水抑制効果が得られ、特に時間最大降水量が3割弱抑制された。上昇気流が発達し、かつ降水のピーク前の時間帯にシーディングを実施することで降水抑制効果を得ることができると述べている。しかし実施条件について、抽出する上位グリッド数や継続時間はそれぞれ1パターンのみで十分な検討がなされておらず、高度においては散布物質の落下を考慮した設定を行えていない。抑制効果の向上に有効な手法であることが示唆されたものの検討パターンが少なく、その信頼性に課

題が残されている。

そこで本研究では、Pinpoint Seeding による降水抑制効果の有効性及び信頼性を検証し抑制可能性を向上させるため実施条件の再検討を行った。領域気象モデル WRF を用いた数値実験において、実施条件の違いがもたらす抑制効果の差異を定量的に評価することで、Pinpoint Seeding による小規模かつ効果的な制御手法を明らかにすることを目的とする。

## 2. 使用モデルとその計算条件

### 2.1 モデルの特徴とオプションの設定

本研究で使用した WRF (Weather Research and Forecasting Model) とは、気象予測と学術研究の両方のために開発された最先端の領域気象モデルである。米国大気研究センター NCAR (National Center for Atmospheric Research) や米国環境予測センター NCEP (National Centers for Environmental Prediction) を中心に共同で開発され、多数の力学法則が導入されている。本研究では WRF の中でも ARW (Advanced Research WRF) の Version 4.5.2 を使用した。

降水粒子の成長に影響する雲微物理スキームは、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、複数の降水粒子の変化の過程が規定されている。本研究では降水粒子を混合比に加えて数濃度で計算することが出来る精緻なバルク法である「Morrison Double-moment Scheme」<sup>17)</sup> を、シーディングによる降水粒子の変化を表現するのに適していると考え先行研究<sup>14-16)</sup>と同様に選択した。シーディングでは氷晶の質量が増加するだけでなく小さな氷晶も多量に生成される (1 g のドライアイスから $10^{13}$ 個の氷晶<sup>18)</sup>)。同スキームではドライアイスなどの散布により氷晶核の数が大幅に増加する現象を表現することが可能である。

その他の物理過程のスキームについては、WRF のユーザーズガイドや既存研究を参考に標準的なものを選択し、放射過程に Rrtmg Scheme、地表面過程に Noah Land-surface Model、大気境界層に YSU Scheme を使用した。また積雲パラメタ

リゼーションのオプションについては、格子スケールに適しているものを用いる必要があるため Domain1 のみに Kain-Fritsch を適用した。

### 2.2 初期・境界条件および計算領域の設定

初期値および境界条件として、大気データには気象庁が提供する水平解像度 5 km の MSM (Meso-Scale Model) の GPV データを用いた (以下、MSM データとする)。MSM データには土壌温度や土壌水分といったデータは含まれていないため、これらの不足しているデータには NCEP が提供する 1 度×1 度の FNL データを用いた。海面水温データには米国海洋大気局 NOAA が提供する 0.25 度×0.25 度の OISST データを用いた。地形標高データには米国地質調査所 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 (GTOPO30) を用いた。

気象制御を行う降水事例として、寿命が短い複数の対流セルが次々と発生・発達しそれらが線状に並ぶことで長時間停滞する豪雨をもたらす線状対流系豪雨 (バックビルディング型線状対流系)<sup>19)</sup>に着目し、その中でも代表的な事例として知られる亀岡豪雨<sup>20)</sup> (京都府、2012年7月15日) を選定した。同事例では日本海に停滞する梅雨前線に向かって南から暖かく湿った空気が流れ込み大気の状態が非常に不安定となり、神戸の六甲山を起点に線状対流系が発達した。解析雨量で京都市西京区及び亀岡市付近では午前 4 時までの 1 時間に約 90 mm、京都市北区付近では午前 5 時までの 1 時間に約 90 mm の猛烈な雨が降った<sup>21)</sup>。この大雨によって京都・亀岡両市合わせて住家損壊 5 棟、床上浸水 85 棟、床下浸水 202 棟の被害が出た<sup>22)</sup>。

領域設定については、計算時間の都合や計算精度を上げる関係上格子間隔が異なる計算領域を 2 つ設け、Two-Way ネスティング計算を行った。計算領域とその地形標高を図 1 に示す。特に降水量の変化などを評価するのは Domain2 であり、0.333 km 四方の解像度で水平方向に 391×391 の格子点数で設定した。鉛直層数は地表から 100 hPa 面までの 45 層で、50 m ~ 700 m の可変格子である。

事例の再現性については、不十分な点はあるも

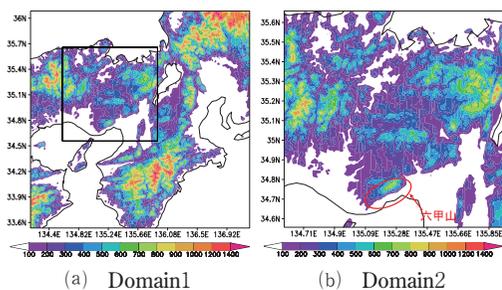


図1 計算領域とその地形標高 (m)

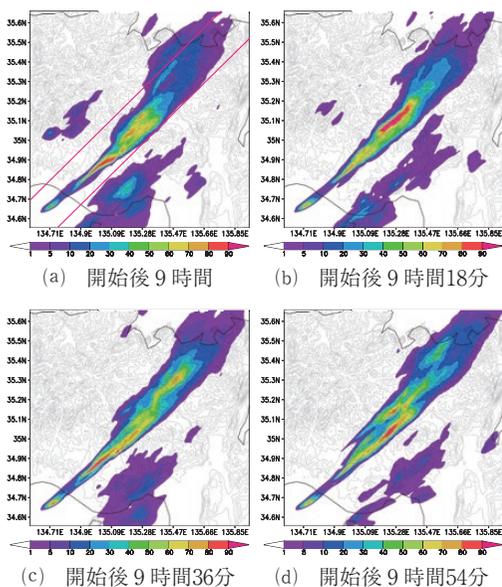


図2 ピーク時における1時間換算降水量 (mm/h) の推移

の概ね再現が行えている。ピーク時における1時間換算降水量の推移を図2に示す。90 mm/hの強雨が移動しながら繰り返し発生しており、本研究の対象である線状対流系としての特徴を有している。しかし起点となる六甲山より西側から降水帯が形成される点や、降雨継続時間が実事例よりも長い点において、再現性はやや不十分である。本研究の目的であるシーディングによる降水抑制効果を評価するにあたって特筆すべき問題はないと判断した。

解析時間については、降雨継続時間と助走時間を考慮して決定した。図2(a)の降水帯全域を含む二直線の内側領域の平均降水量の推移と解析時間

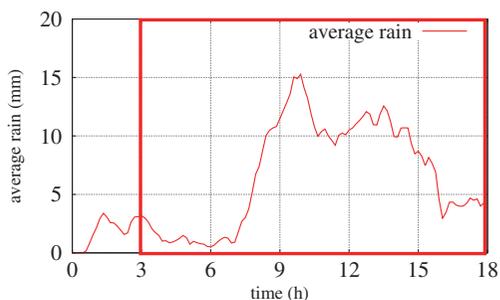


図3 領域平均降水量の推移と解析時間

を図3に示す。シミュレーション時間18時間の内、シミュレーション開始から助走時間の3時間を除く15時間を設定した。

### 2.3 シーディングの表現方法

本研究では、シーディングに使用する物質としてドライアイス进行想定している<sup>23,24</sup>が数値モデル上で物質散布を直接的に表現するのは現時点では困難であるため、鈴木ら<sup>13</sup>・横山ら<sup>14</sup>と同様に、モデル内の雲微物理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  $\alpha$  を乗ず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)の数濃度は以下に示す Meyers の式によって計算される。

$$n_c = \exp(-2.80 + 0.262 \times (273.15 - T)) \times 1000 \times \alpha \quad (1)$$

$n_c$  は氷晶核の数濃度 ( $\text{kg}^{-1}$ )、 $T$  は気温 (K)、 $\alpha$  は操作倍率を表す。1 g のドライアイスから  $10^{13}$  個の氷晶が生成する<sup>18</sup>)とされており、八木<sup>15</sup>)の研究では操作倍率に  $10^3$  倍や  $10^9$  倍を用いて降水抑制効果を検討したところ、操作倍率の違いと抑制効果の間に相関は確認されなかったと述べている。これらの知見を踏まえ本研究でも確認したが大きな違いは得られなかったため、操作倍率は  $10^9$  倍のみを設定した。

## 3. 上昇気流に着目したシーディング手法における条件設定

### 3.1 実施高度の設定

本研究では、上昇気流を考慮した「Updraft

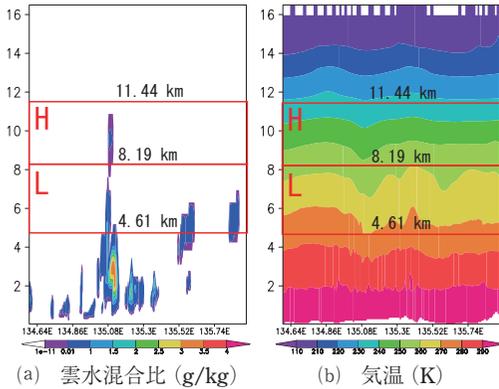


図4 シーディング実施高度設定に関する要素の鉛直断面の一例(北緯34.84度, シミュレーション開始から3時間後18分後)

Seeding」と「Pinpoint Seeding」をシーディング手法として選択した。本節では両者に共通する条件設定である実施高度について述べる。

操作倍率を与えている Meyers の式は、雲水混合比が $10^{-14}$  (kg/kg) 以上かつ気温が $-4^{\circ}\text{C}$  以下のグリッドで適用される。雲水混合比と気温の鉛直断面の一例を図4に示す。それぞれ横軸は経度、縦軸は高度 (km) を示しており、北緯34.84度におけるシミュレーション開始から3時間後18分後の鉛直断面である。シミュレーション結果全体を通じて雲水混合比は高度約11 km 以上では必要数 $10^{-11}$  (g/kg) 以上存在しておらず、気温は高度約5 km 以下では $-4^{\circ}\text{C}$  以上である。条件を満たす高度を2パターンに分割し、高層H・低層Lを設定した。それぞれ高度幅は高層Hが3.25 km、低層Lが3.58 km であり、散布したドライアイスが落下することを考慮して幅を持たせている。落下の影響がどの程度下方の高度に及ぶのかについては、ドライアイスの落下速度や昇華速度を考慮して計算する必要があるが現時点では考慮していない。

### 3.2 Updraft Seeding の設定

本研究では、八木<sup>15)</sup>が提案した、上昇気流が卓越する小規模な四角形領域にシーディングを実施する気流シーディングを「Updraft Seeding」と呼ぶ。同手法では実施領域内全ての格子点において

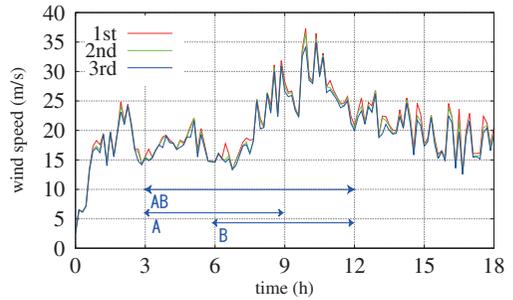


図5 上昇気流上位3グリッドの強さ (Case-0) と Updraft Seeding の実施時間

的に氷晶数濃度を変化させる。

シーディングを実施しないケース (以下、Case-0 とする) のシミュレーション結果 (CTRL ラン) から、上昇気流の強い上位3グリッドの座標とその時の強さを座標の被りがないように9分ごとに出力した。横軸にシミュレーション開始からの時刻、縦軸に上昇気流の強さをとったグラフを図5に示す。先行研究<sup>15)</sup>と同様にシーディング開始時刻は上昇気流の発達に着目して決定し、シミュレーション開始から3時間後を上昇気流発生初期A、6時間後を上昇気流発達期Bの開始時刻としてそれぞれ6時間継続のUpdraft Seedingを実施した。また、両者の実施時間を併せ持つABは9時間継続の実施時間を設定した。実施時間は後述するPinpoint Seedingと比較するために同程度の時間を設定した。Pinpoint Seedingのケース全てを網羅出来ていないが、継続時間180分のケースがUpdraft Seedingの実施時間に相当する。

実施領域については、実施時間を決定するために用いた9分ごとの上位3グリッドのデータをXY平面に散布図として出力することで上昇気流が卓越している領域を確認し、そのグリッドを多数含むような四角形領域を設定した。横軸に東西方向の距離、縦軸に南北方向の距離をとった散布図を図6に示す。赤枠内がUpdraft Seedingの実施領域であり、その大きさは60グリッド×60グリッドで20 km×20 kmの領域に相当する。後述するPinpoint Seedingでは、赤枠内の領域ではなく散布図上に示すグリッドが実施領域である。実施高度については前述の通り、散布したドライア

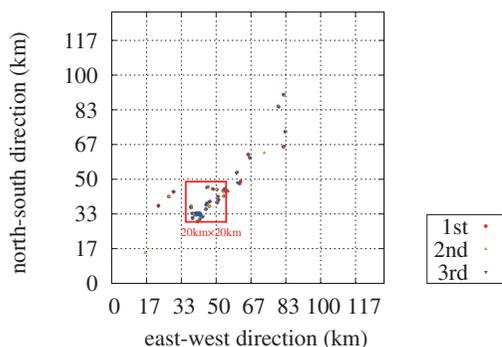


図6 上昇気流上位3グリッドの散布図 (Case-0) と Updraft Seeding の実施領域

イスが落下することを考慮して幅を持たせている。

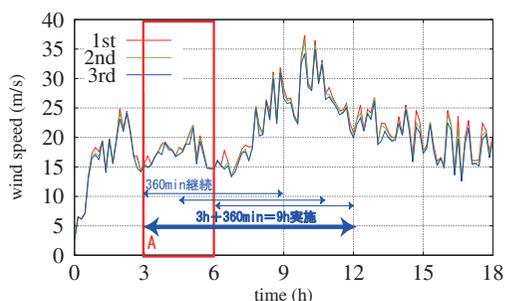
以上の実施時間・実施高度の設定より、計6ケースのシミュレーションを行った。シーディングを実施したケースは、Case-updraft- (実施時間) - (実施高度) と表記する。

### 3.3 Pinpoint Seeding の設定

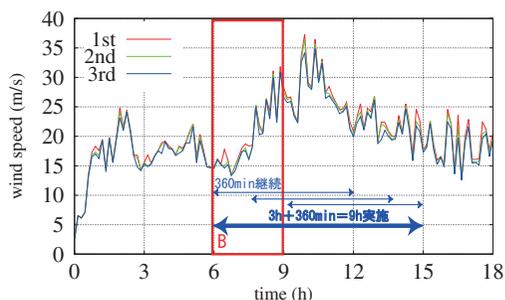
Updraft Seeding のような面的な手法では実施領域を四角形領域で設定していたため、必ずしも上昇気流が卓越するグリッドにシーディングを実施出来ていない可能性がある。また、実施領域が広範囲になってしまうといった課題もある。そこで本研究では、四角形領域ではなく上昇気流の強いグリッドのみを実施領域とする「Pinpoint Seeding」を検討した。

Updraft Seeding と同様に横軸にシミュレーション開始からの時刻、縦軸に上昇気流の強さをとったグラフを図7に示す。シミュレーション開始から3時間後を上昇気流発生初期、6時間後を上昇気流発達期の開始時間とし、それぞれの開始時間から3時間後までの抽出した上昇気流の強いグリッドを調査期間 A・B とした。また、両者のグリッドを併せ持つ6時間分の実施グリッドを調査期間 AB と設定した。

中村<sup>16)</sup>の研究では、10分ごとに上昇気流の強い上位3グリッドを抽出しそのグリッドのみにシーディングを実施することで抑制効果が確認されている。抑制効果の更なる向上のため、本研究では、上位3グリッドに加えて上位9グリッドと上位36



(a) 調査期間 A + 継続時間360分の場合



(b) 調査期間 B + 継続時間360分の場合

図7 Pinpoint Seeding の調査期間 (赤枠) 及び実施時間 (青矢印) の一例

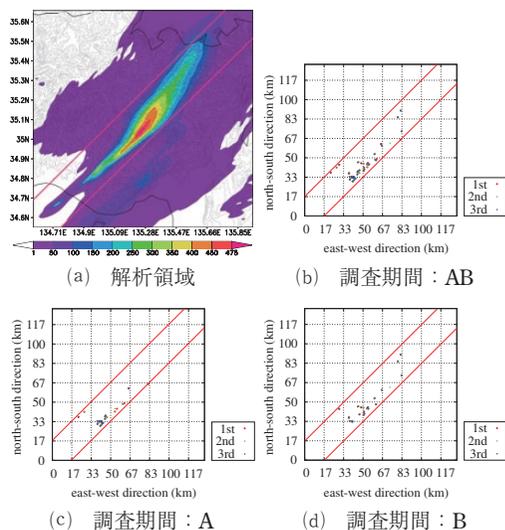


図8 解析領域と Pinpoint Seeding の実施グリッド (上位3グリッドの場合)

グリッドを9分ごとに抽出し実施グリッドを設定した。上昇気流を抜き出した解析領域と各調査期間における実施グリッド (上位3グリッドの場合)

を 図 8 に 示 す。同 図(a)に 示 す よう に、解 析 領 域 は 対 象 と す る 降 水 帯 全 域 を 含 む 二 直 線 の 内 側 領 域 と す る。調 査 期 間 A は シミュレーション 開 始 3 時 間 後 から 6 時 間 後 ま だ の 63 グリッド、調 査 期 間 B は シミュレーション 開 始 6 時 間 後 から 9 時 間 後 ま だ の 63 グリッド、調 査 期 間 AB は シミュレーション 開 始 3 時 間 後 から 9 時 間 後 ま だ の 123 グリッド を 示 し て い る。実 施 グリッド 数 は Updraft Seeding の 四 角 形 領 域 で あ る 60 グリッド×60 グリッド (3600 グリッド) と 比 べ る と 大 き く 減 少 し て い る。そ れ ぞ れ の グリッド の 上 空 (高 度 H ま た は L) で Pinpoint Seeding を 実 施 し た。

継 続 時 間 に つ い て は、中 村<sup>16)</sup>が 設 定 し て い た 60 分 に 加 え て 360 分 と 180 分 を 設 定 し た。9 分 ご と に 抽 出 さ れ た 上 昇 気 流 の 強 い グリッド そ れ ぞ れ に 対 し て 継 続 し て シーディング を 実 施 す る。例 え ば 図 7 (a)に 示 す よう に、継 続 時 間 360 分 の 場 合、調 査 期 間 A で は 3 時 間 分 の グリッド に 対 し て シーディング を 実 施 す る が トータル の シーディング 実 施 時 間 と し て は 9 時 間 (3 時 間 + 360 分) と な る (調 査 期 間 B も 同 様)。実 施 高 度 に つ い て は 前 述 の 通 り、散 布 し た ドライアイス が 落 下 す る こ と を 考 慮 し て 幅 を 持 た せ て い る。

以 上 の 上 位 グリッド 数・調 査 期 間・継 続 時 間・実 施 高 度 の 設 定 よ り、計 54 ケース の シミュレーション を 行 っ た。シーディング を 実 施 し た ケース は、Case- (上 位 グリッド 数) - (調 査 期 間) (継 続 時 間) - (実 施 高 度) と 表 記 す る。

#### 4. 各シーディング手法の降水抑制効果と抑制メカニズム

本 研 究 で は、シーディング の 有 無 が 降 水 抑 制 効 果 の 大 小 に ど れ ほど の 影 響 を 与 え る の か に つ い て 定 量 的 に 評 価 す る た め、最 大 積 算 降 水 量・領 域 平 均 降 水 量・時 間 最 大 降 水 量 な ど の 指 標 を 用 い て 評 価 を 行 っ た。な お、い ず れ の 指 標 に お い て も、降 水 量 の 少 な い 領 域 を 解 析 に 含 め て 平 均 化 す る と 降 水 や 降 水 粒 子 の 変 化 を 過 小 評 価 し て し ま う た め、前 述 の 降 水 帯 全 域 を 含 む 二 直 線 の 内 側 領 域 を 解 析 領 域 と し て い る。

最 大 積 算 降 水 量 と は 積 算 雨 量 の 値 が 最 も 大 き い

グリッド での 降 水 量、領 域 平 均 降 水 量 と は 積 算 雨 量 の 解 析 領 域 内 の 平 均 値、時 間 最 大 降 水 量 と は 9 分 ご と の 解 析 領 域 内 の 平 均 雨 量 を 1 時 間 単 位 で 計 上 し た と き の 最 大 値 を 指 す。そ れ ら の 値 を Case-0 から の 変 化 率 と し て 算 出 し た。

#### 4.1 Updraft Seeding のシミュレーション結果

次 に、Updraft Seeding 実 施 後 の 15 時 間 積 算 降 水 量 の 分 布 を 図 9 に、各 降 水 量 の 変 化 率 を 表 1 に 示 す。積 算 降 水 量 の 分 布 に つ い て、Case-0 で 400 mm 以 上 の 積 算 降 水 量 が 確 認 さ れ た 領 域 が、低 層 L に 実 施 し た Case-updraft-AB-L と Case-updraft-A-L で は 大 き く 減 少 し て い る こ と が 見 て 取 れ る。対 し て Case-updraft-B-L で は 減 少 は し て い る が ご く 僅

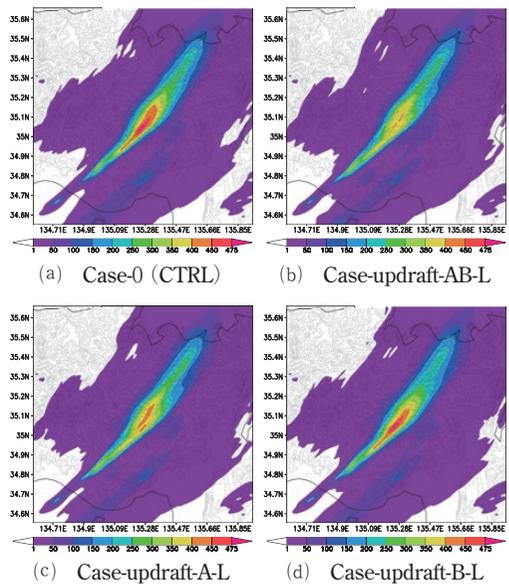


図 9 Updraft Seeding 実 施 後 の 15 時 間 積 算 降 水 量 (mm)

表 1 Updraft Seeding に お け る 各 降 水 量 の 変 化 率 (%)

		最大積算	領域平均	時間最大
AB	H	2.20	0.21	2.62
	L	-18.83	-3.52	-16.76
A	H	2.51	-0.94	3.67
	L	-16.53	-1.82	-13.04
B	H	-6.45	-2.28	3.45
	L	-0.51	-0.71	-0.84

かであり、雨域はほとんど変化していない。各降水量の変化率についても同様の傾向が見られ、特に Case-updraft-AB-L では全ての指標で抑制効果が得られた。上昇気流発生初期からシーディングを実施することが強雨域の減少や各降水量の指標の減少に影響を与えていると考えられる。

実施高度別に比較すると、実施高度の違いが抑制効果の有無に大きく寄与することが確認できる。前述の低層 L に実施して抑制効果が得られたケースと高層 H に実施したケースの間には顕著な差が見られ、高層 H に実施することで抑制効果は得られなかった。図 4(a)より、高層 H には氷晶の生成に必要な過冷却水（雲水）があまり存在していないことでシーディング操作による影響が現れにくいことが考えられる。

4.2 Pinpoint Seeding のシミュレーション結果

続いて、Pinpoint Seeding 実施後の15時間積算降水量の分布を図10に、上位3グリッドに実施したケースの各降水量の変化率を表2に、上位36グリッドに実施したケースの各降水量の変化率を表3に示す。紙面の都合上、上位9グリッドに実施したケースは省略する。

図10は上位3グリッド・9グリッド・36グリッドに実施したケースの内、積算降水量が大きく抑制されたケースの一例で、調査期間・継続時間・実施高度は共通である。Case-0で暖色系の400 mm以上の積算降水量が確認された領域が、シーディ

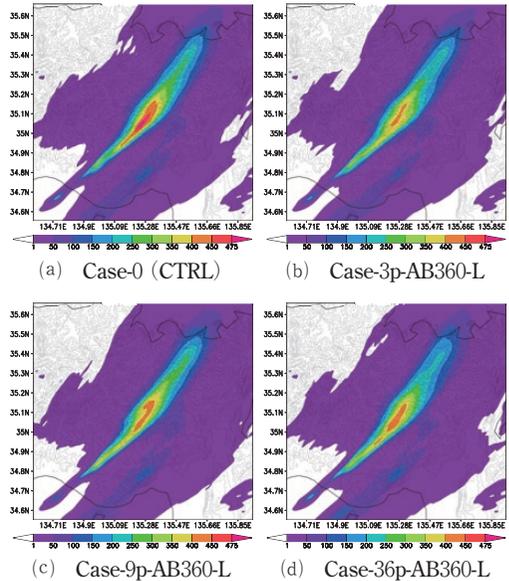


図10 Pinpoint Seeding 実施後の15時間積算降水量 (mm)

表2 Pinpoint Seeding (上位3グリッド) における各降水量の変化率 (%)

		最大積算降水量			領域平均降水量			時間最大降水量		
		360 min	180 min	60 min	360 min	180 min	60 min	360 min	180 min	60 min
AB	H	-1.11	-6.29	-3.60	1.30	0.94	0.78	-1.45	-1.45	-7.59
	L	-16.53	-6.27	-5.83	-2.66	-1.79	-2.56	-15.22	-14.88	-5.53
A	H	-4.18	-1.32	-5.54	0.81	0.82	-0.47	-2.84	-0.95	-4.42
	L	-11.39	-5.46	-6.51	-2.07	-2.98	-3.13	-16.99	-12.51	-5.18
B	H	-2.60	-1.93	4.10	-3.02	-0.67	-1.06	0.47	0.47	2.20
	L	2.66	-1.16	-5.77	-3.35	-1.49	-2.41	0.63	0.63	3.05

表3 Pinpoint Seeding (上位36グリッド) における各降水量の変化率 (%)

		最大積算降水量			領域平均降水量			時間最大降水量		
		360 min	180 min	60 min	360 min	180 min	60 min	360 min	180 min	60 min
AB	H	-3.15	-5.38	-4.06	-0.69	-0.34	-1.69	-13.49	-13.66	-11.27
	L	-9.75	-11.85	-8.67	-4.20	-3.00	-1.11	-12.65	-16.28	-4.87
A	H	-1.71	-8.89	-3.02	1.05	0.51	0.22	-10.96	-12.91	-8.57
	L	0.16	-9.49	-2.27	-0.73	-1.40	-1.00	-12.43	-11.90	-7.93
B	H	3.66	1.02	1.65	-1.54	-2.01	-1.70	-0.06	0.05	-1.20
	L	-2.78	-0.67	0.33	-4.71	-3.44	-2.21	-1.97	-2.00	-2.56

ングを実施したケースでは大きく減少している。特に Case-3p-AB360-L (上位3グリッド) が最も減少し、これよりも実施グリッドの多い Case-9p-AB360-L (上位9グリッド) と Case-36p-AB360-L (上位36グリッド) を上回る抑制効果が得られた。このことから実施グリッドの増加と抑制効果には相関があるわけではなく、シーディング領域の拡大は抑制効果の向上に必ずしも繋がらないと考えられる。また、各降水量の変化率は Updraft Seeding と同様に調査期間 B と高層 H を含むケースでは抑制効果が現れにくい傾向にある。以下に変化率別の評価を述べるが本研究では主に調査期間 AB・A と低層 L に実施したケースに着目する。

最大積算降水量の変化率 (表 2, 表 3) は、上位3グリッドに実施したケースでは継続時間の増加により抑制割合が高くなる傾向にある。特に Case-3p-AB360-L で最も抑制効果が高く約16.5%抑制された。前述と同様にグリッド数が増加しても抑制効果の向上に必ずしも繋がらないことが確認でき、高層 H に実施したケースでも抑制効果が現れにくいことがわかる。上位36グリッドよりも上位3グリッドで長時間実施することで抑制効果が高くなり、空間的かつ時間的に実施規模を拡大したことで不必要な領域・時間が含まれた可能性がある。

時間最大降水量の変化率 (表 2, 表 3) は、継続時間の増加で抑制割合が高くなる傾向にあり Case-3p-A360-L で約16.9%抑制された。また、前述の指標と異なり、実施グリッドの増加によって高層 H においても低層 L と同程度の抑制効果が得られた。空間的な実施規模が増加したことで雲水があまり存在していない高層 H でもシーディングの影響が現れるようになったと考えられる。調査期間 AB・A で同程度の抑制効果が得られたが調査期間 B では抑制効果が得られなかったことから、上昇気流発生初期から実施することがピーク降水量の減少に繋がったと考えられる。

領域平均降水量の変化率 (表 2, 表 3) は、±5%を上回る結果は確認できず、また条件の違いによる抑制効果の大きな差は得られなかったが、実施グリッドと継続時間の増加で抑制割合が高く

なる傾向にある。特に調査期間 B から360分継続のケースでは全実施ケースの中でも高い値が得られ、Case-36p-B360-L では約4.7%抑制された。抑制割合が小さいことから全体の雨量は大きく変化していないことが示唆されるが、前述の2つの指標による抑制効果から時間的・空間的に雨量が分散したと考えられる。

Updraft Seeding の結果と比較すると、両者とも調査期間 AB・A から低層 L で実施したケースで高い抑制効果が得られ、同程度の抑制割合であることが確認できる。このことから、実施領域を縮小しても抑制効果は十分得ることが出来るといえる。一方、継続時間の延長は抑制効果に寄与することが Pinpoint Seeding の結果から確認できる。現実での散布を想定した場合、空間的な実施規模が小さくて済むことは好ましい結果であり、効果的な制御手法であると言える。実施規模や評価指標の抑制割合を踏まえて、本研究で総合的に最も抑制効果が得られたケースは Case-3p-AB360-L とする。

### 4.3 断続的シーディングのシミュレーション結果

さらに、Case-3p-AB360-L に対して時間的な実施規模の縮小による降水抑制効果の変化を確認するため断続的なシーディングシミュレーションを行った。360分の継続時間を60分、30分、15分に分割し、順に60分・30分・15分、30分・15分、15分の休止時間を設定した。

各降水量の変化率を表 4 に示す。継続時間を分割したことで抑制効果は小さくなったが60分と30分に分割したケースではある程度の抑制効果が得

表 4 断続的シーディングにおける各降水量の変化率 (Case-3p-AB360-L) (%)

継続	休止	最大積算	領域平均	時間最大
60 min	60 min	-9.25	-5.22	-13.54
	30 min	-8.66	-2.27	-3.88
	15 min	-11.36	-4.70	-7.90
30 min	30 min	-8.53	-1.70	-5.71
	15 min	-12.61	-1.28	-5.02
15 mm	15 min	-0.22	1.22	-5.96

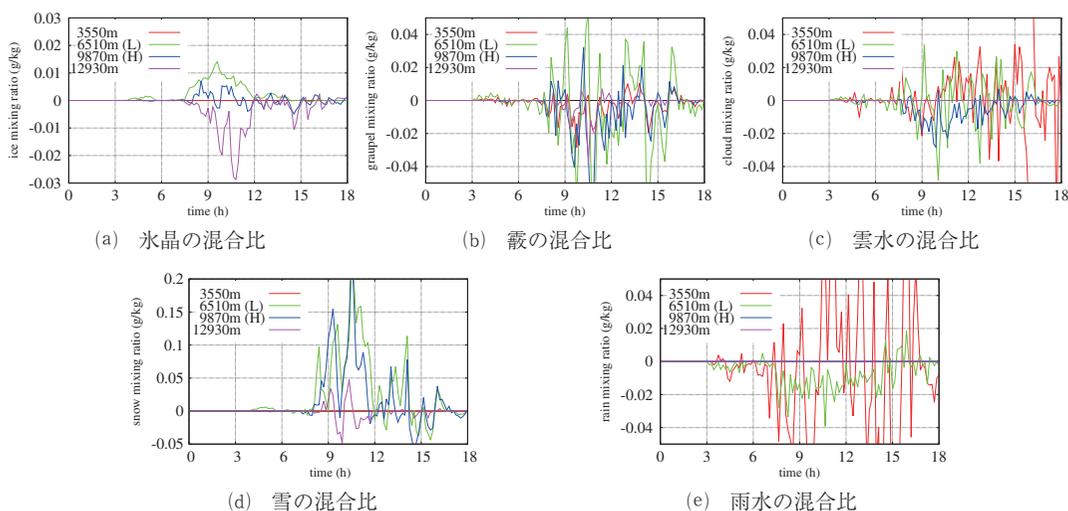


図11 Case-3p-AB360-Lにおける各降水粒子の高度別平均混合比の時間変化 (Case-0との偏差, 緑線: 6,510 m (低層 L), 青線: 9,870 m (高層 H))

られた。一方、15分に分割したケースでは時間最大降水量は5%以上抑制されたものの他の2つの指標は変化が小さく十分な抑制効果は得られなかった。このことから、短い休止時間で短時間継続して実施するよりも、長い休止時間であっても長時間継続して実施する方が抑制効果を高めることができると考えられる。

休止時間別に比較すると、最大積算降水量は休止時間を短くすることで抑制割合が高くなる傾向にあるが時間最大降水量はそうならず、休止時間を短くしたことで実施時間が増加しても抑制効果の向上には繋がらない可能性があると考えられる。しかしながら、休止時間が変化することで実施する時間も変化するため相応しくない時間に実施している可能性があり、直接的な比較をすることは難しい。本研究では、機械的に継続時間と休止時間を設定しているが、今後は降水の増減を見ながら実施条件を設定していく必要がある。

#### 4.4 降水抑制メカニズムの解析

最後に、降水抑制メカニズムを明らかにするため Case-3p-AB360-L ではどのように降水が抑制されたのかについて解析を行った。各降水粒子の高度別平均混合比の時間変化 (Case-0との偏差) を

図11に、各降水粒子の高度別平均数濃度と高度別鉛直風速の時間変化 (Case-0との偏差) を図12に示す。前述の通り降水帯全域を含む二直線の内側領域を解析領域としている。横軸はシミュレーション開始からの時刻、縦軸はCase-0との偏差であり高度別に色分けしている。6,510 m (緑色) は低層 L 内の中間、9,870 m (青色) は高層 H 内の中間に対応し、シーディング実施高度の下方と上方の高度に与える影響を確認するため3,550 m (赤色)、12,930 m (桃色) をグラフ化した。また氷晶混合比が増加した時刻の各降水粒子の3次元分布を図13に、霰混合比が減少した時刻の各降水粒子の3次元分布を図14に示す。液体降水粒子は粒径、固体降水粒子は落下速度で通常分類される (雲水: 粒径 $100\mu\text{m}$  未満, 雨水: 粒径 $100\mu\text{m}$  以上)<sup>25)</sup>。

いずれの図においても、シーディング開始時刻であるシミュレーション開始3時間後から各降水粒子と鉛直風速に変動が生じている。シミュレーション開始9時間45分後では実施高度である低層 L で氷晶が最も生成されており (図11(a)), 3次元分布 (図13) からも確かに増加していることが確認できる。低層 L で氷晶が増加する開始約7時間後～約12時間後において、高層 H では氷晶混合比は大きな増減が見られない (図11(a)) のに

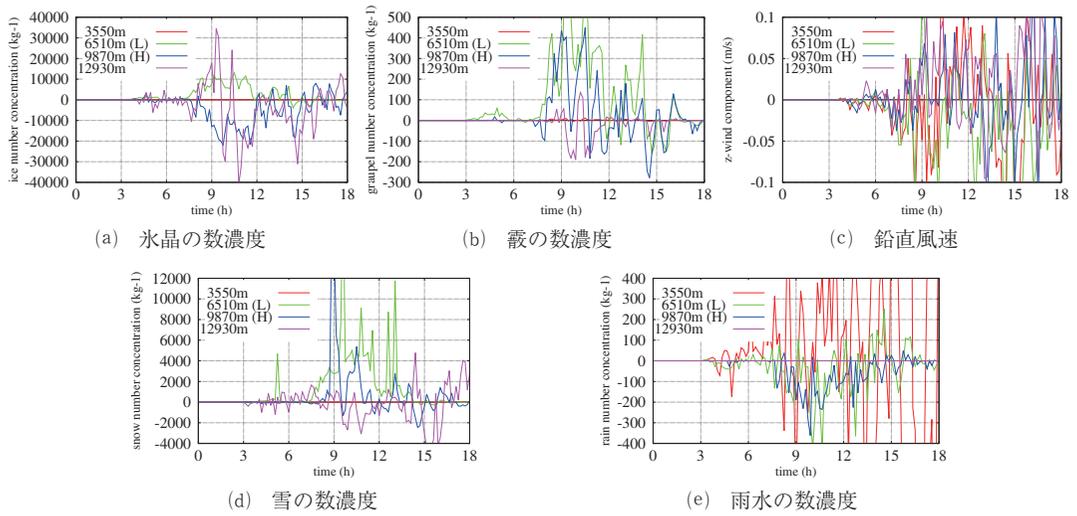
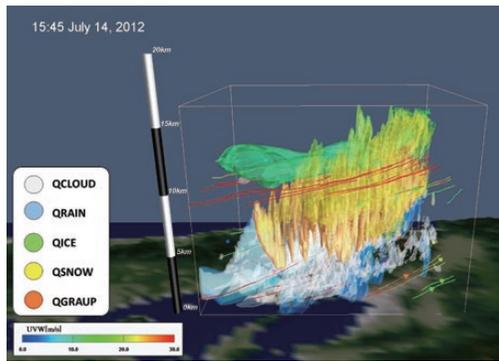
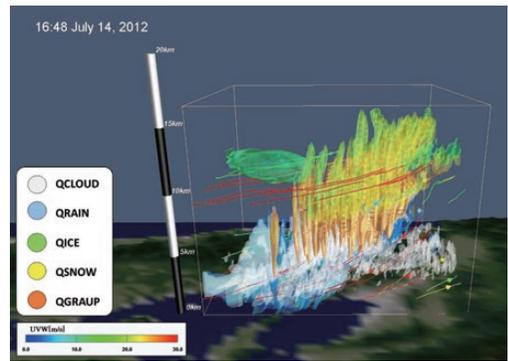


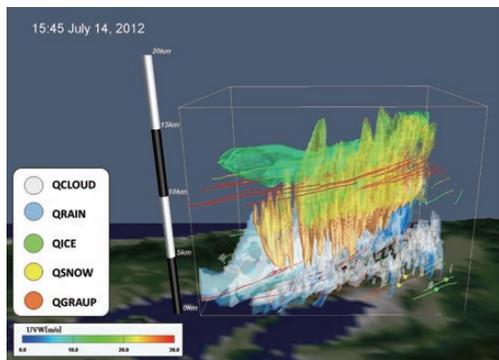
図12 Case-3p-AB360-Lにおける各降水粒子の高度別平均数濃度と高度別平均鉛直風速の時間変化 (Case-0との偏差, 緑線: 6,510 m (低層 L), 青線: 9,870 m (高層 H))



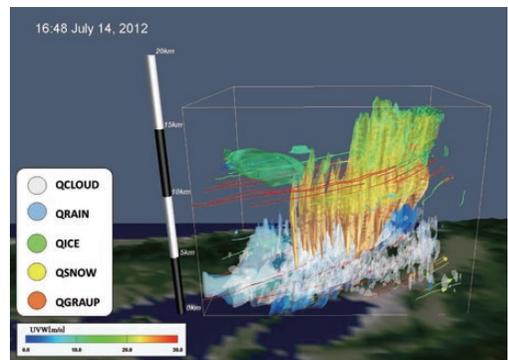
(a) Case-0



(a) Case-0



(b) Case-3p-AB360-L



(b) Case-3p-AB360-L

図13 氷晶混合比が増加した時刻の各降水粒子の3次元分布

図14 霰混合比が減少した時刻の各降水粒子の3次元分布

対して氷晶数濃度は明らかに減少しており(図12(a)), 高層 H で氷晶は成長していると考えられる。同時区内で鉛直風速が増加していることから(図12(c)), 氷晶生成時の凝固・昇華により潜熱が発生した影響で氷晶は低層 L から高層 H に舞い上がったことが氷晶の成長に寄与したと考えられる。続いて低層 L・高層 H で雪混合比(図11(d))と雪数濃度(図12(d))が増加しており, 氷晶は雪へと成長したと考えられ大きく雪は増加した。氷晶の生成や氷晶・雪の成長に伴って過冷却水滴が消費され, 同高度における雨水(図12(e))や雲水(図11(c))が減少したと考えられる。3,550 m で雨水混合比(図11(e))と数濃度(図12(e))の増減が激しいのは, 高度が低いことで鉛直風速の影響を受けやすく変動しやすいことが原因と考えられる。そして低層 L・高層 H で霰数濃度(図12(b))は増加しているが霰混合比(図11(b))は概ね減少しており, これは粒径の小さい軽量の霰の数が増加したことを意味している。シミュレーション開始10時間48分後に霰混合比は最も減少し, 3次元分布(図14)からも同高度において確かに減少していることが確認できる。

以上より, 落下速度が小さい粒子(氷晶や雪)が増加して落下速度が大きい粒子(霰)が減少する「オーバーシーディング」<sup>11)</sup>と呼ばれる競合的成長状態が生じたことで, 地上に落下する降水粒子が減少したことが抑制効果に影響したと考えられる。既往研究では降水粒子の落下が鉛直風速を抑えることによる抑制メカニズムも示されており, 本研究でも解析を行ったものの, 鉛直風速の変化と抑制効果の関係性は判断出来なかった。今後は力学的な効果で鉛直風速が減少する抑制メカニズムを得るためにも更に詳細な解析方法を検討していく。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では, 領域気象モデル WRF を用いて小規模なシーディング手法である「Pinpoint Seeding」の有効性を検証するための数値実験を行った。面的な手法である Updraft Seeding を含めて複数の実施条件を設定し, 強雨域の減少や評価指標に着

目して定量的に評価を行った。その結果, どちらの手法においても上昇気流発生初期からシーディングを実施するケースにおいて抑制効果が得られ, Pinpoint Seeding では継続時間の延長によって更に抑制効果が向上する傾向が確認された。また, 手法別で最も抑制したケースではそれぞれ同程度の降水抑制効果が得られ, 実施領域を縮小しても十分な抑制効果が得られる可能性が示唆された。空間的に小規模な実施領域に長時間実施することで抑制効果が得られることは, 現実での散布を想定する上で好ましく効果的な制御手法であると言える。

また, 顕著に抑制したケースに対して降水抑制メカニズムの解析を行った結果, 落下速度が小さい降水粒子の成長に過冷却水滴が使われ, 落下速度が大きい降水粒子の成長が抑制されたことが降水のピーク時間の雨量を抑制したと考えられる「オーバーシーディング」が主な抑制メカニズムに当てはまることが確認された。

今後の課題として, 多くの事例で「Pinpoint Seeding」を実施し, 降水抑制効果の有効性に加えて信頼性を向上させるとともに, 条件設定を改良することでより効果的な実施領域や継続時間, 実施高度を明確にする必要がある。特に継続時間に関しては, 本研究では休止時間を設定した断続的シーディングを行うことで時間的な規模を縮小することを試みた。一定の抑制効果が得られたが詳細な評価のためには更なる検証が必要である。また, 領域平均値を用いた現状の抑制メカニズムの解析方法では詳細な解析には至らないため, 新たに解析方法を検討する必要がある。そして, 航空機などを用いたドライアイス散布の現実的な実施時間や実施高度などを考慮して条件設定を行うことで Pinpoint Seeding の改良を行うとともに, 上昇気流以外の要素も考慮した新たな手法の検討などを行うことを通して実用化に向けて取り組んでいく。

## 謝辞

本研究は, JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2283)の支援を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート2023, pp.34-83, 2023.
- 2) 世界気象機関 WMO：State of the Global Climate 2021, <https://library.wmo.int/>, 2024年4月5日.
- 3) 国土交通省：国土交通白書2023, pp.189-234, 2023.
- 4) 内閣府：ムーンショット目標8, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub8.html>, 2024年4月5日.
- 5) 福田矩彦：気象研究ノート, 第164号, 日本気象学会, pp.160-195, 1988.
- 6) 村上正隆：JCSEPA 以前の人工降雨・降雪研究, 気象研究ノート, 第231号, 日本気象学会, pp.1-25, 2015.
- 7) 折笠成宏・村上正隆：寒候期ドライアイスシーディングに関する航空機観測(統計観測), 気象研究ノート, 第231号, 日本気象学会, pp.133-140, 2015.
- 8) 橋本明弘・村上正隆：NHM を用いた吸湿性粒子シーディング実験, 気象研究ノート, 第231号, 日本気象学会, pp.190-192, 2015.
- 9) UAE 連邦気象・地震局：UAE 降水強化科学研究プログラム, <http://www.uaerep.ae/>, 2024年4月5日.
- 10) 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.200-206, 2005.
- 11) Saito, K., M. Murakami, T. Matsuo, and H. Mizuno: Sensitivity experiments on the orographic snowfall over the mountainous region of northern Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.74, pp.797-813, 1996.
- 12) 橋本明弘・村上正隆：NHM を用いたドライアイスシーディング実験, 気象研究ノート, 第231号, 日本気象学会, pp.149-163, 2015.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 八木柁一朗：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, 法政大学大学院デザイン工学研究科紀要, Vol.6, 2017.
- 16) 中村嶺太：降水抑制効果の向上を目的とした気流シーディングの高度化・精緻化に関する数値実験, 法政大学大学院デザイン工学研究科紀要, Vol.10, 2021.
- 17) Morrison, h., J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov: A new double-moment microphysics parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description, *J. Atmos. Sci.*, Vol.62, pp.1665-1677, 2005.
- 18) Fukuta, N., W. A. Schmeling, and L. F. Evans: Experimental determination of ice nucleation by falling dry ice pellets, *J. Appl. Meteor.*, Vol.10, pp.1174-1179, 1971.
- 19) 瀬古弘：中緯度のメソβスケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究, 気象庁研究時報, Vol.62, pp.1-74, 2010.
- 20) 小坂田ゆかり・中北英一：2012年亀岡豪雨の擬似温暖化実験における線状対流系の将来変化と解像度依存性に関する解析, 京都大学防災研究所年報, No.63 B, pp.233-240, 2020.
- 21) 京都地方気象台：平成24年7月15日の京都市, 亀岡市の大雨について, 気象速報, 2012.
- 22) 京都府：平成24年災害の記録, pp.11-19, 2012.
- 23) Kopp, F., H. D. Orville, R. D. Farley, and J. H. Hirsch: Numerical simulation of dry ice seeding experiments, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol.22, pp.1542-1556, 1983.
- 24) Hashimoto, A., and Murakami, M.: Numerical Simulations of Glaciogenic Cloud Seeding with Dry Ice Pellets and Liquid Carbon Dioxide under Simplified Conditions, *SOLA*, Vol.12, pp.22-26, 2016.
- 25) Morrison, h., and J. A. Milbrandt: Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests, *J. Atmos. Sci.*, pp.287-311, 2015.

(投稿受理：2024年4月5日  
訂正稿受理：2024年6月28日)

## 要 旨

本研究では、線状対流系豪雨に対する Pinpoint Seeding の有効性について検討するため、領域気象モデル WRF を用いて複数の実施条件における降水抑制効果に関する数値実験を行った。シーディング手法や実施条件の違いによる抑制効果の差異について検討を行った結果、上昇気流の強いグリッドを抽出しそのグリッドのみにピンポイントに実施することで最大積算降水量が約16.5%抑制されることや、シーディングの継続時間や実施高度が抑制効果に与える影響を明らかにした。また、シーディングによって氷晶や雪が成長することで過冷却水滴が減少し霰の成長が抑えられるオーバーシーディングにより降水が抑制されるメカニズムを確認した。