

複数の実施条件を考慮した SCALE-RM による豪雨抑制シーディングに関する数 値実験

埜崎信佑¹・鈴木善晴²・西山浩司³・相馬一義⁴

Numerical Experiments Using SCALE-RM on the Cloud-Seeding Method for Heavy Rain Mitigation Considering Multiple Implementation Conditions

Shinsuke NOZAKI¹, Yoshiharu SUZUKI²,
Koji NISHIYAMA³ and Kazuyoshi SOUMA⁴

Abstract

In this study, numerical experiments using SCALE-RM on the cloud-seeding method for heavy rain mitigation considering multiple implementation conditions were conducted. The effects of heavy rain mitigation under various conditions such as seeding implementation time, altitude, and area were evaluated, and comparisons were made with previous studies using WRF regarding the heavy rain mitigation effects by cloud seeding. As a result, it was confirmed that both the accumulated maximum and time maximum precipitation decreased due to seeding implementation, and the mitigation effect at peak times was observed. Particularly, the largest mitigation effect was obtained when two steps seeding, and an analysis of the mitigation mechanism confirmed that the combination of two different mechanisms, the weakening of updrafts and the suppression of graupel growth, enhanced the heavy rain mitigation effect. These mitigation effects generally matched the results of previous studies using WRF, indicating a reliability improvement of heavy rain mitigation effects through cloud seeding.

キーワード：クラウド・シーディング, 線状対流系豪雨, 気象制御, メソ気象モデル, ムーン
ショット型研究開発制度

Key words: cloud seeding, band-shaped convective heavy rainfall, weather modification, meso-scale
meteorological model, moonshot R&D project

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

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

³ 九州大学大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Kyusyu University

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

1. はじめに

近年、世界各地で地球温暖化に伴うゲリラ豪雨や線状降水帯、線状対流系などによる気象災害が問題となっている（本稿では、時空間スケールが比較的小さい線状降水帯を線状対流系と呼ぶ¹⁾）。特に日本では、地形・地質等の脆弱性に起因する土砂災害や、複雑な地下構造物が引き起こす都市の浸水被害、それらに伴う交通網や社会基盤への影響の深刻化が懸念されている。平成30年7月豪雨²⁾では、前線や台風第7号の影響により日本付近に温かく非常に湿った空気が供給され続け、西日本を中心に記録的な大雨となった。6月18日から7月8日までの総降水量が四国地方で1,800 mm、東海地方で1,200 mm を超え、その影響により河川の氾濫、浸水害、土砂災害等が発生し、死者、行方不明者が多数となる甚大な災害であった。その結果、平成30年7月豪雨の水害被害額は約1兆2150億円に上り、統計開始以来最大の経済的被害額となった。

このような気象災害による社会的・経済的被害を軽減するための方策として、気象制御の代表的な手法であるクラウド・シーディング（以下シーディングとする）の利用可能性が検討されている。シーディングとは、航空機、気球、発煙筒を用いて自然の雲に対して物質を散布することで雲の内部構造を変化させ、降水現象を人為的に操作する気象制御手法の一つである。雲内が0℃以下の冷たい雲に対して、ドライアイスや液体炭酸、ヨウ化銀を散布することで、氷晶を生成および成長させ降水を促すあるいは降雪を抑制すると考えられている³⁻⁶⁾。

内閣府が主導する「ムーンショット型研究開発制度 (MS)」⁷⁾では、目標8において「2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を抑制し極端風水害の脅威から解放された安心安全な社会を実現」と掲げられている。具体的には2030年までに現実的なシーディング操作を前提とした台風や豪雨の制御によって被害を軽減させることが可能であることを計算機上で実施し、屋外実験を開始すること、そして2050年までに実用化することを目指しており、シーディングを含む気象制御手法

への注目が高まっている。

シーディング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40カ国において、毎年100件以上のプロジェクトが実施⁸⁾されているが、これらのプロジェクトのほとんどが渇水対策⁹⁾として降雨を促進するための人工降雨の研究である。日本においても、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イスを散布する人工降雨実験がはじめて行われてから各地で実験が実施され¹⁰⁾、その実用化に向けた検討が行われてきた。村上ら¹¹⁻¹³⁾は、実験・観測データを用いた数値シミュレーションを実施し、安定した水資源確保や渇水対策を目的とした人工降雨技術の実用化に向けた研究が進められた。また、Maki ら¹⁴⁾の研究では、2012年から2013年にかけて航空機を用いた液体炭酸の散布実験が実際に行われ、降水促進効果が確認された。さらに、Saito ら¹⁵⁾の研究では、オーバーシーディング（氷晶や雪自身が成長するための水物質がなくなり、成長が抑制される競合的成長状態）による降雪抑制に関する実験が行われており、日本海の特定の領域でシーディングを実施することで降雪を人為的に操作できる可能性が示唆された。

一方、降水抑制効果を目的としたドライアイスシーディングの研究では、鈴木ら¹⁶⁾・尾中ら¹⁷⁾の研究により線状対流系豪雨における積雲発達期にシーディングを実施することで降水抑制効果が得られることが確認された。また、横山ら¹⁸⁾は積雲発生初期におけるシーディングを実施することで積雲発生初期と積雲発達期の抑制効果がどの程度異なるか検討を行い、両者の抑制メカニズムの違いについて解析を実施した。なお、横山らの研究は領域気象モデル WRF による数値実験であり、他の気象モデルでの豪雨抑制効果は検証されていない。

そこで本研究では、複数の実施条件を考慮した SCALE-RM による豪雨抑制シーディングに関する数値実験を実施した。先行研究で得られた知見をもとにシーディング実施時間や高度、領域等において様々な条件下での豪雨抑制効果について評価を行い、領域気象モデル WRF とは異なる気象

表 1 本研究 (SCALE-RM) および先行研究 (WRF) における物理過程の比較一覧

領域気象モデル	SCALE-RM	WRF
雲微物理	SN14 (6-class2 モーメントバルク法) ²¹⁾	Morrison double-moment ²²⁾
積雲パラメタリゼーション	KF (Kain-Fritsch 対流パラメタリゼーション) ^{23,24)}	Grell-3 (Domain1), OFF (Domain2,3,4) ²⁵⁾
地表面フラックス	COUPLE (海面・陸面・都市を考慮したフラックス) ^{26,27)}	Noah land-surface model ²⁸⁾
放射	MSTRNX (相関 k 分布法ブロードバンド大気放射伝達)	RRTM ³⁰⁾ , Goddard ³¹⁾
惑星境界層	MYNN (MYNN level 2.5 boundary scheme) ^{32,33)}	MYJ PBL ^{34,35)}

モデルを用いて抑制効果を確認することで、シーディングによる豪雨抑制効果の信頼性の検証に寄与するため、領域気象モデル SCALE-RM による数値実験を実施した。

2. 使用モデルとその計算条件

2.1 モデルの特徴とその計算条件

本研究で使用する SCALE-RM (Scalable Computing for Advanced Library and Environment-Regional Model, ver5.4.5)^{19,20)} は、理化学研究所 (RIKEN) の主導により開発された領域気象モデルであり、気象に関する研究や天気予報を目的として様々なシミュレーションが実行可能な計算ライブラリである。前処理からシミュレーション、後処理、解析に至るまでの全ての過程が網羅されており、雲微物理スキーム、積雲パラメタリゼーション、放射スキーム、地表面フラックススキーム、惑星境界層スキームなど、多数の物理過程に関する計算スキームが提供されている。

降水現象に影響を及ぼす雲微物理スキームでは、凝結過程、衝突併合過程、融合過程などの微物理過程の条件を設定しており、氷晶核の生成・蒸発・昇華、氷の融解・凝結などが規定されている。本研究では、雲粒、雨粒、氷晶、雪片、霰の粒径分布関数を考慮してそれらの混合比と数濃度を算出する SN14 (6-class 2 モーメントバルク法)²¹⁾ を用いた。なお、横山らの先行研究 (WRF) では同様に雲粒、氷晶、雪、雨、霰の混合比と数濃度を予測する Morrison double-moment Scheme²²⁾ が用いられている。同スキームもまた 2 モーメントのバルク法であり、算出される降水粒子の種類も SN14 と同様であることから、雲微物理に関しては先行研究と概ね類似した計算スキームが使用さ

れている。その他の物理過程に関する計算スキームの比較一覧を表 1 に示す。

2.2 初期・境界条件および計算領域の設定

本研究の対象事例には、2009年7月24日に発生した中国九州北部豪雨を選定した。九州北部地方において1時間100ミリを超える雨が繰り返し発生するなど記録的な大雨となり、福岡県を中心に土砂災害や浸水災害など大きな被害がもたらされた事例である³⁶⁾。同事例は日本で豪雨をもたらす主な要因となっている「線状対流系豪雨」が確認されている。

2009年7月豪雨に関する各ドメインの領域設定を表 2 に、計算領域とその地形標高を図 1 に示す。Domain4 に線状の雨域全体が含まれるように、格子間隔がそれぞれ 9 km (Domain1), 3 km (Domain2), 1 km (Domain3), 0.333 km (Domain4) の 4 段階でネステイングを行い、計算タイムステップはそれぞれ 27 秒 (Domain1), 9 秒 (Domain2), 3 秒 (Domain3), 1 秒 (Domain4) とした。解析対象期間は助走時間の 3 時間を除く 21 時間とした。

初期値および境界条件として大気場、海面水温、土壌温度等のデータには NCEP (アメリカ国立環境界予測センター) 提供の 1 度×1 度の FNL データを使用し、地形標高データには USGS (米国地質調査所) 提供の緯度経度 30 秒×30 秒 (約 1 km メッシュ四方) のデータを使用した。

表 2 2009年7月豪雨に関する各ドメインの解析設定

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
格子数	128×128	100×100	100×100	140×140
格子間隔	9 km	3 km	1 km	0.333 km
鉛直層数	50	50	50	50

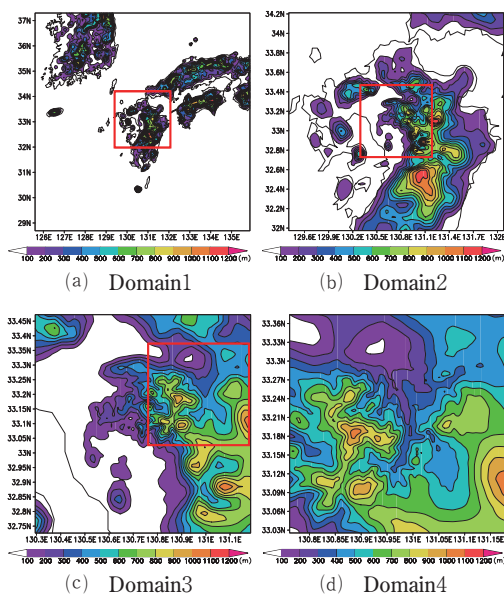


図1 2009年7月豪雨に関する計算領域とその地形標高

以下では、シーディングを実施しないケース名を CTRL ラン (Case-0) とする。

2.3 CTRL ラン (Case-0) のシミュレーション結果

2009年7月豪雨に関する CTRL ラン (Case-0) Domain4 の21時間積算降水量を図2に示す。また、CTRL ラン (Case-0) における降水量 (9分積算) の時間変化を図3に示す。図3より、計算開始

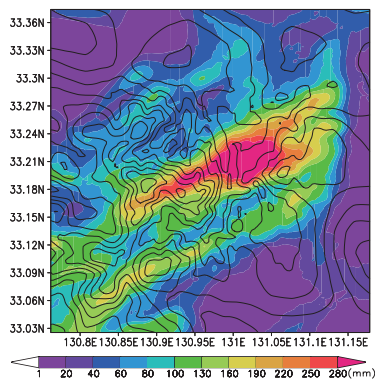


図2 2009年7月豪雨に関する CTRL ラン (Case-0) Domain4 の21時間積算降水量

180分から弱めの線状の降水が見て取れる。開始540分からは強めの降水が線状を維持しながら南北に移動しており、雨域が一定の場所に留まっていないことが確認された。また、図2より、線状の雨域において280 mm以上の強い降水が確認された。

3. シーディングの設定

3.1 シーディングの表現方法

本研究では、横山らと同様に、ドライアイスの散布を想定したシーディングによって雲内の氷晶核数が変化することに着目し、雲微物理スキームにおける氷晶核の数濃度の値に操作倍率をかけることで間接的にシーディングを表現した。氷晶核の数濃度は、以下に示す Phillips の式³⁷⁾によって計算される。

$$N_{IN} = 1000 \exp(12.96(S_f - 1) - 0.639) \times \alpha$$

ここで、 N_{IN} は氷晶核の数濃度 (m^{-3})、 S_f は水に対する飽和比、 α は氷晶数濃度の操作倍率である。

3.2 シーディングの実施条件

本研究では、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」を採用した。2009年7月豪雨に関する CTRL ラン (Case-0) Domain4 の計算結果を図4に示す。

(i)はじめに、図4(a) (21時間積算降水量) に示すように、雨域の風上に位置する積雲発生領域をシーディング実施領域 (赤枠 A) として設定した。また、シーディング実施時間は、図4(b)の領域平均時間降水量に示すような積雲発生初期において降水量が増加し始める直前の3時間 (黄枠 a1) とした。実施高度は、図4(c)の氷晶数濃度の鉛直分布 (Z断面)、図4(d)の絶対温度の鉛直分布 (Z断面) に示すように、Case-0において気温 $0^\circ C$ 以下で氷晶の数濃度が大きかった12.38 km (高度番号40) と16.00 km (高度番号44) の2パターン、氷晶数濃度の操作倍率 α は、村上ら³⁸⁾の数値実験を参考に 10^5 と 10^9 の2パターン設定し、計4ケース

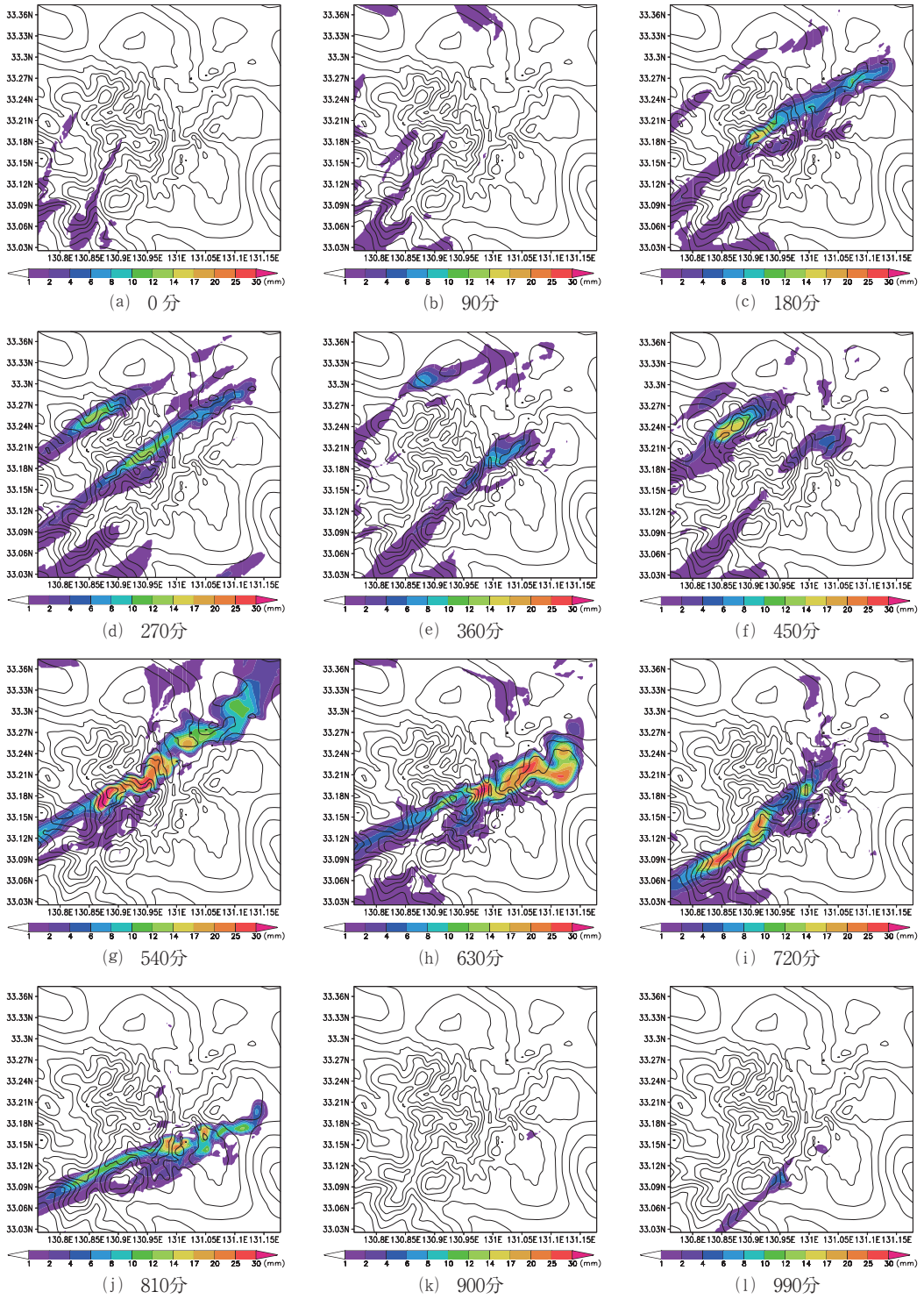


図3 CTRL ラン (Case-0) における降水量 (9分積算) の時間変化

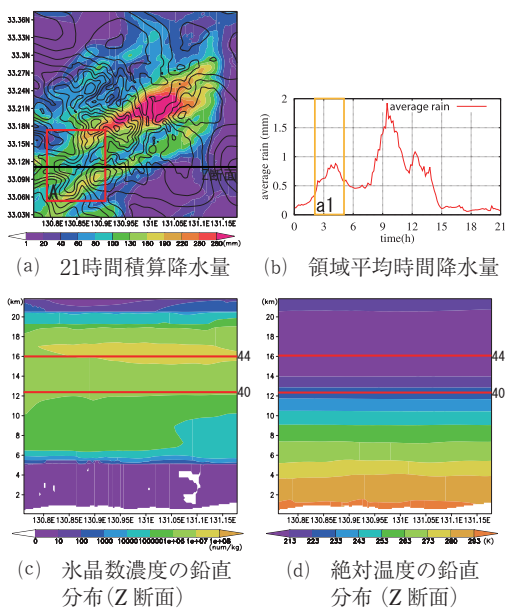


図4 2009年7月豪雨に関するCTRLラン (Case-0) Domain4の計算結果

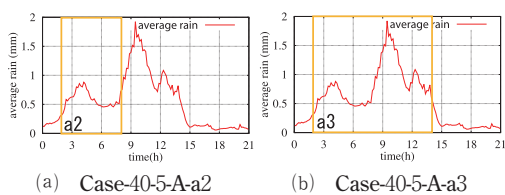


図5 時間延長における実施条件

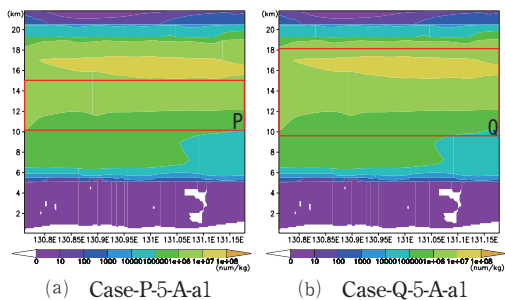


図6 高度幅延長における実施条件

でシミュレーションを実施した。以下では、シーディング後のケース名を Case- (高度番号) - (操作倍率の冪指数) - (実施領域) - (実施時間) と表記する。なお、SCALE-RM のシミュレーション

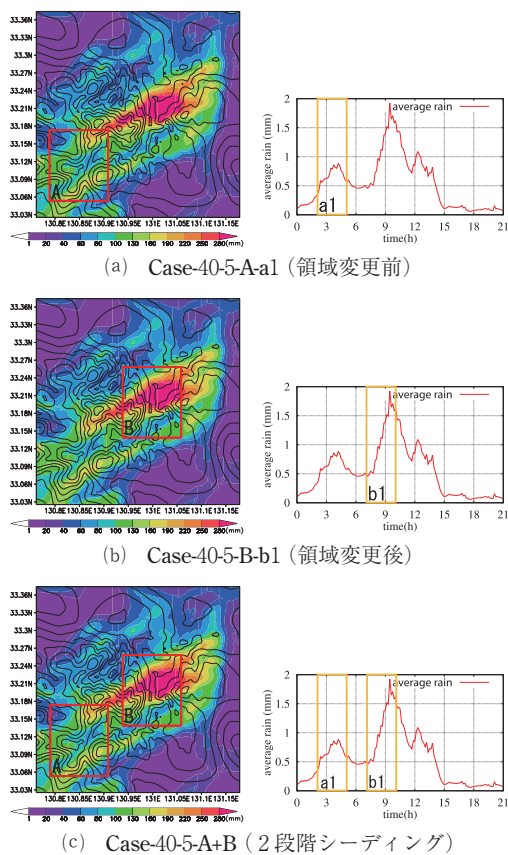


図7 領域変更における実施条件

においては、雲の発達高度や対流圏界面がWRFの場合と比較して高くなる傾向があることが確認されている。

(ii)次に、Case-40-5-A-a1を基本条件とし、シーディング継続時間および高度幅を延長させ、新たにシミュレーションを実施した。シーディング継続時間は、図5(a)に示す6時間(黄棒a2)、同図(b)に示す12時間(黄棒a3)の2パターン、シーディング実施高度は、図6(a)に示す10.18 km ~ 15.00 km (赤棒P、高度番号37~43)、同図(b)に示す9.53 km ~ 18.12 km (赤棒Q、高度番号36~46)の2パターン設定した。なお、実施時間6時間のケースをCase-40-5-A-a2、12時間のケースをCase-40-5-A-a3、実施高度10.18 km ~ 15.00 km (赤棒P、高度番号37~43)のケースをCase-P-5-A-a1、9.53 km ~ 18.12 km (赤棒Q、高度番号36~46)の

ケースを Case-Q-5-A-a1 と表記する。

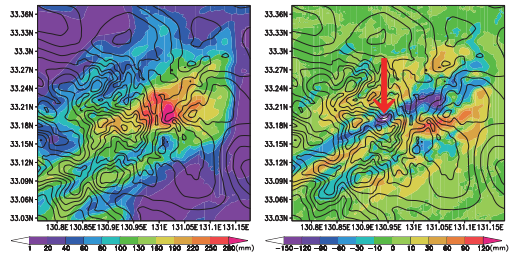
(iii)さらに、尾中らの先行研究で得られた結果を参考に、シーディング実施領域をピークの雨域に、それに伴いシーディング実施時間を積雲発達期に設定した場合でも十分な抑制効果が得られるか検討を行った。領域変更における実施条件を図 7(b)に示す。シーディング領域は、図 7(b)に示すピークの雨域(赤枠 B)、シーディング実施時間は、図 7(b)に示す180分間(黄枠 b1)とした。なお、領域変更後のケースを Case-40-5-B-b1 と表記する。

4. 複数の実施条件による豪雨抑制効果

4.1 シーディングに関するシミュレーション結果

本研究では、シーディングのシミュレーション結果から降水抑制効果の有無や大きさを定量的に評価するため、最大積算降水量、領域平均降水量、時間最大降水量の3つの指標を用いて評価を行った。ここで、最大積算降水量とは解析領域内で積算降水量の値が最も大きい格子での降水量を表し、領域平均降水量とは解析領域全体の積算降水量を平均化した降水量を表す。また、積算降水量を9分毎に算出し、その値が最も大きい時刻での降水量を時間最大降水量とする。それらの値がシーディングの前後でどのように変化するかを Case-0 からの変化率として比較する。なお、Domain1 における計算タイムステップが27秒であることから積算降水量の算出間隔を9分(27×20秒)とした。

シミュレーション結果の一例として Case-40-5-A-a1 における21時間積算降水量と Case-0 からの変化率を図 8 に、降水変化率を表 3 に示す。図 8(a)を確認すると、Case-0 において190 mm 以上の積算降水量が見られた暖色系の領域が、シーディングを実施することで縮小していることが見て取れる。また、図 8(b)を確認すると、赤矢印で示された領域において変化量が-150 mm 以上と最も高い抑制効果が得られていることがわかる。さらに、Case-0 において激しい降水が確認された雨域では著しい減少傾向が見て取れるのに対し、その周辺では降水量が増加していることから、雨域が分散されていることがわかる。



(a) 21時間積算降水量 (b) Case-0 からの変化量

図 8 Case-40-5-A-a1 における21時間積算降水量と Case-0 からの変化量

表 3 CTRL ランを基準としたシーディング層の高度、操作倍率別の降水量変化率(%)

	最大積算	領域平均	時間最大
Case-40-5-A-a1	-9.03	-0.49	-12.86
Case-40-9-A-a1	-12.11	-0.71	-12.18
Case-44-5-A-a1	-10.66	-0.53	-11.03
Case-44-9-A-a1	-6.03	-0.41	-12.25

表 3 の降水量変化率に着目しても、領域平均降水量の変化率は小さいのに対し、最大積算・時間最大降水量では10%前後の抑制効果が確認できることから、シーディングの実施により、降水のタイミングや雨域が分散されピーク時の降水量が抑制されたと考えられる。

一方で、氷晶数濃度の操作倍率や実施高度の違いによる抑制効果の変化はほとんどなく、小さい数濃度の操作倍率または低高度におけるシーディングの実施でも一定の抑制効果が得られることが確認できた。

横山ら¹⁸⁾の先行研究では、領域気象モデル WRF を用いて同事例の積雲発生初期のシーディングに関するシミュレーションが実施されているが、その結果において最大で約12%程度の抑制効果が得られている。本研究で領域気象モデル SCALE-RM により得られた結果においても最大で約12%と、同程度の抑制効果が得られていることから、積雲発生初期におけるシーディングの豪雨抑制効果の信頼性が高まったといえる。

4.2 シーディング実施時間および高度の延長

シーディング実施時間および高度幅延長にお

表4 シーディング実施時間および高度幅延長における降水量変化率(%)

	最大積算	領域平均	時間最大
Case-40-5-A-a1	-9.03	-0.49	-12.86
Case-40-5-A-a2	-12.41	-1.01	-12.26
Case-40-5-A-a3	-12.83	-0.54	-11.47
Case-P-5-A-a1	-10.77	-0.88	-11.91
Case-Q-5-A-a1	-14.73	-0.84	-13.49

る降水量変化率を表4に示す。シーディング継続時間を3時間から6時間に延長させたケース(Case-40-5-A-a2)では、最大積算降水量において抑制効果が向上していることが確認できる。しかし、継続時間を12時間に延長させたケース(Case-40-5-A-a3)ではそれ以上の抑制効果は得られていない。これは、実施時間に対し実施領域が雨域の風上側で固定されていることが原因であり、積雲発生初期にはシーディングの抑制効果が得られていたが、時間が経過するにつれ積雲発生領域が移動し、シーディングによる抑制効果が低減していった可能性が考えられる。

一方で、高度幅を延長させたケースでは、高度幅を延長させるほど降水抑制効果が高まっている傾向が見て取れる。高度幅が7層(Case-P-5-A-a1)のケースでは、最大積算降水量において若干の抑制効果の増加に留まったが、高度幅を11層(Case-Q-5-A-a1)にさらに延長させたケースでは、最大積算・時間最大降水量において格段に抑制される結果となった。このことから、一定以上の高度幅を持たせることで抑制効果の向上が期待できることがわかった。また、これは基本条件と比較して、より広範囲に氷晶および雪が生成されることでピーク時の降水粒子の成長をさらに抑制させたと考えられる。

4.3 シーディング実施領域の変更

シーディング実施領域変更における降水量変化率を表5に示す。積雲発達期にシーディングを実施したケース(Case-40-5-B-b1)において、最大積算・時間最大降水量は15%程度抑制されており、積雲発生初期にシーディングを実施するよりも高い抑制効果が得られる結果となった。

表5 シーディング実施領域変更における降水量変化率(%)

	最大積算	領域平均	時間最大
Case-40-5-A-a1	-9.03	-0.49	-12.86
Case-40-5-B-b1	-15.83	-0.70	-14.50
Case-40-5-A+B	-18.98	-0.62	-11.43

尾中ら¹⁷⁾の先行研究では、領域気象モデルWRFを用いて同事例の積雲発達期のシーディングに関するシミュレーションが実施されているが、その結果において最大で10%程度の抑制効果が得られている。本研究で領域気象モデルSCALE-RMにより得られた結果は最大で約15%であり、比較するとやや抑制効果が高まっていることが確認できる。これはモデルによる雨域の形状やシーディング条件の違いに起因するものだと考えられる。しかし、両モデルにおいて抑制効果は確実に得られていることから、積雲発生初期におけるシーディングの豪雨抑制効果と同様に、積雲発達期におけるシーディングの豪雨抑制効果についても信頼性が高まったといえる。

さらに、前述した結果から、積雲発生初期と積雲発達期にそれぞれシーディングを実施する2段階シーディングの検討を行った。2段階シーディングにおける実施条件を図7(c)に示す。なお、2段階シーディングのケースは例外的にCase-40-5-A+Bと表記する。表5に示す2段階シーディングを実施したケース(Case-40-5-A+B)において、時間最大降水量については、抑制効果がやや低減しているものの、最大積算降水量の変化率に着目すると、2段階シーディングを実施することで約-19%と最も高い抑制効果が得られる結果となった。このことから、積雲発生初期と積雲発達期のシーディングを併用することでさらなる抑制効果が期待できることが確認できた。

5. メカニズムの解析

5.1 積雲発生初期のシーディングに関するメカニズム

雨域の風上に位置する積雲発生初期に対してシーディングを実施したCase-40-5-A-a1に対して

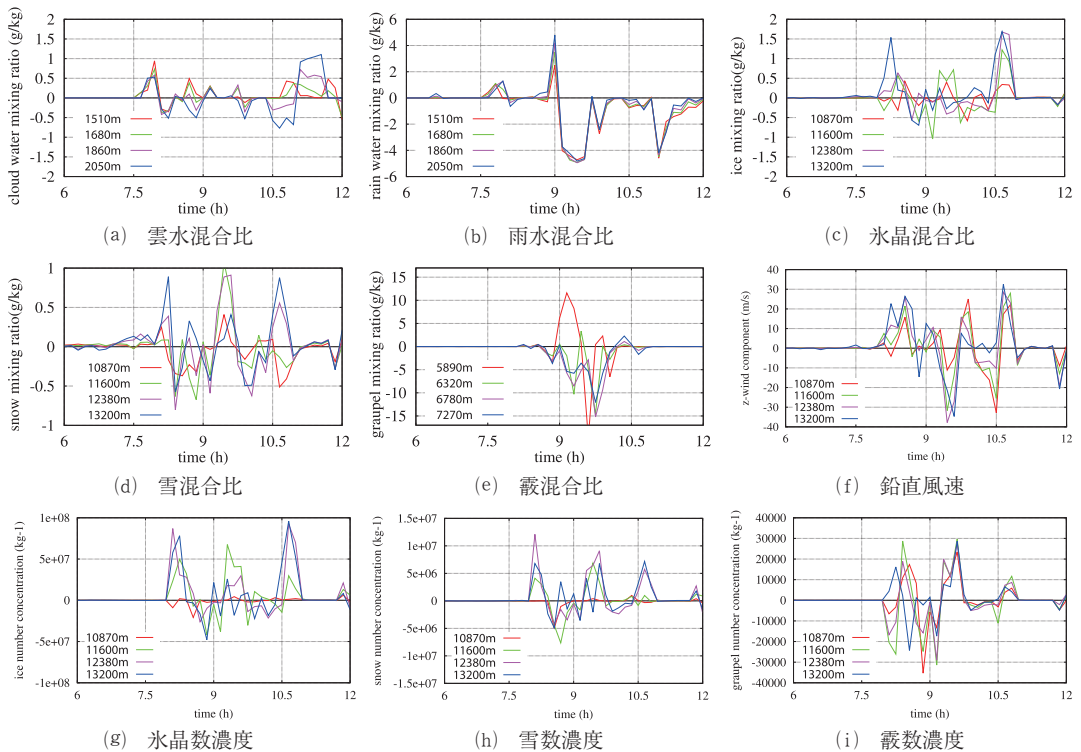


図9 Case-40-5-A-a1 (積雲発生初期)における混合比・鉛直風速・数濃度の高度別時間変化 (Case-0からの偏差)

メカニズムの解析を行った。メカニズムの解析対象は、Case-40-5-A-a1において最も抑制効果が得られた1つの格子 (格子サイズ333×333 m)とした。また、解析対象時間は降水のピークの時間を含む計算開始6時間から12時間の360分間とした。図9にCase-40-5-A-a1における混合比・鉛直風速・数濃度の高度別時間変化 (Case-0からの偏差)を示す。図9(f)を確認すると、Case-0において降水のピークの時間帯であった計算開始9時間過ぎにおいて、上昇流が弱まっていることがわかる。これは、同図(i)の霰数濃度の時間変化を見てわかるように、シーディングの実施により、降水のピークの直前に霰が急激に増加し、それが降水粒子として落下する際に下向きの力が生じることで上昇流が弱まったと考えられる。これにより、降水ピーク時の上昇流を弱め、積雲の発達を妨げたことで、同図(b)に示す雨水が抑制され、ピーク時の豪雨抑制効果につながったと考えられる。

5.2 2段階シーディングに関するメカニズム

次に、最大積算降水量において最も高い抑制効果が得られたCase-40-5-A+B (2段階シーディング)に対して、前述した積雲発生初期におけるシーディングに関するメカニズムと比較しながら解析を行った。解析対象は、前項と同様にCase-40-5-A+Bにおいて最も抑制効果が得られた1つの格子とした。また、解析対象時間は計算開始6時間から12時間の360分間とした。図10にCase-40-5-A+Bにおける混合比・鉛直風速・数濃度の高度別時間変化 (Case-0からの偏差)を示す。図9、図10の(g)および(h)をそれぞれ比較すると、Case-40-5-A+Bの場合に、氷晶数濃度と雪数濃度の値が著しく増加していることが確認できる。しかし、図9、図10の(c)および(d)における氷晶混合比と雪混合比については顕著な変化が見られない。また、図9、図10の(e)を比較すると、Case-40-5-A+Bの場合に降水ピーク時(計算開始9時間過ぎ)

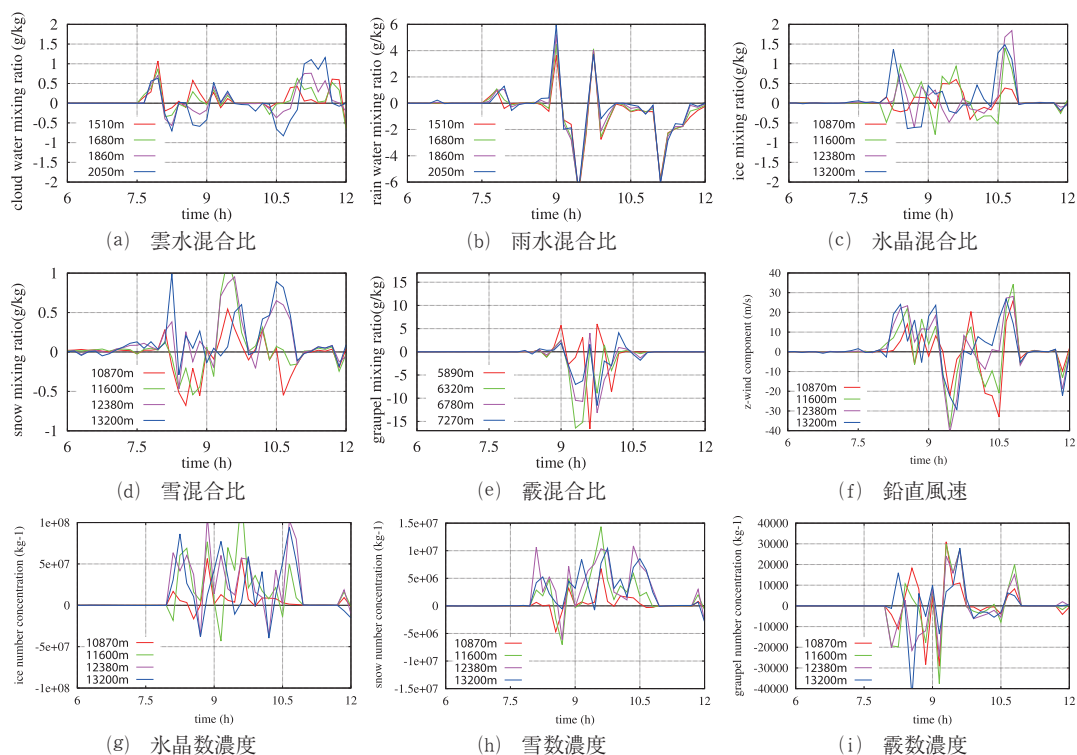


図10 Case-40-5-A+B (2段階シーディング)における混合比・鉛直風速・数濃度の高度別時間変化 (Case-0からの偏差)

の霰混合比がより抑制されていることがわかる。これらより、2段階シーディングの実施によって、降水ピーク時に氷晶や雪の数濃度が大量に増加することで、霰の成長が抑えられるオーバーシーディング状態になり、豪雨抑制効果がさらに高まったと考えられる。なお、図9、図10の(a)(b)(f)における雲水混合比、雨水混合比、鉛直風速については、シーディング手法による顕著な違いは見られなかった。

以上の Case-40-5-A-a1 と Case-40-5-A+B におけるメカニズムの解析より、前者における上昇流の弱化と後者における霰の成長抑制という2つの異なるメカニズムが組み合わさることで、2段階シーディングにおける豪雨抑制効果が向上したと考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、複数の実施条件を考慮した領域気

象モデル SCALE-RM による豪雨抑制シーディングに関する数値実験を実施した。先行研究で得られた知見をもとにシーディング実施時間や高度、領域等において様々な条件下での豪雨抑制効果について評価を行った。また、領域気象モデル SCALE-RM を用いてシーディングに関するシミュレーションを実施することで、領域気象モデル WRF を用いた先行研究とのシーディングによる豪雨抑制効果の比較を行った。

その結果、シーディングの実施によって最大積算および時間最大降水量が減少し、ピーク時の抑制効果が確認できた。また、その抑制効果は、先行研究において領域気象モデル WRF を用いたシミュレーションの結果と概ね一致しており、シーディングによる豪雨抑制効果に関する信頼性の向上に寄与する結果が得られたといえる。

さらに、各条件を変化させたケースでは抑制効果の向上が見られ、特に2段階でシーディングを

実施したケースにおいて最も大きな抑制効果を得ることができた。これについて抑制メカニズムの解析を行った結果、上昇流の弱化と霰の成長抑制という2つの異なるメカニズムが組み合わさることで、豪雨抑制効果が高まることが確認された。

今後の課題としては、得られたシミュレーション結果に対する評価指標やメカニズムの解析をより明確化させ、シーディングによる豪雨抑制効果の信頼性をさらに向上させていくべきである。また、より多くのシーディング条件および事例でシミュレーションを実施することで、豪雨抑制効果における最適な実施条件を検討していきたい。MS目標8において、シーディング操作によりピーク時の降水を20%抑制することが掲げられていることから、それを達成するために、2段階シーディングを含めた実施条件の検討を引き続き行っていくべきである。その際、実施規模および介入規模を小さくしても、高い抑制効果が得られるような検討を行うことで、実現可能性を高めていく必要がある。

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

- 小倉義光：一般気象学 第2版，東京大学出版会，1999.
- 気象庁：平成30年7月豪雨（前線及び台風第7号による大雨等）平成30年（2018年）6月28日～7月8日，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/>，2024年4月4日.
- 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.
- 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.1-25，2014.
- 福田矩彦：気象制御の方法，気象研究ノート，第164号，日本気象学会，pp.738-745，1988.
- 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（統計解析），気象研究ノート，第231号，日本気象学会，pp.133-140，2014.
- 内閣府：ムーンショット目標8 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，<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub8.html>，2024年4月4日.
- 村上正隆：第8回 WMO 気象改変に関する科学会議出席報告，天気，50巻，pp.715-720，2003.
- 文部科学省：渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究，科学技術振興調整費プロジェクト，https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/chousei/1279451.htm，2024年4月4日.
- 村上正隆：人工降雨とは，Earozoru Kenkyu，30巻1号，pp.5-13，2015.
- 村上正隆：第36回メソ気象研究会報告－人工降雨・降雪研究の現状－，天気，59巻8号，pp.737-743，2012.
- 村上正隆・橋本明弘・石井琢哉：人工降雨の水資源確保・渇水対策としての有効性評価，気象研究ノート，第231号，日本気象学会，pp.201-204，2014.
- 村上正隆・武中英好・池田明弘：利根川上流のダム集水域を対象とした人工降雪の費用対効果，気象研究ノート，第231号，日本気象学会，pp.221-227，2014.
- T. Maki, O. Morita, Y. Suzuki, K. Wakimizu: Artificial Rainfall Technique Based on the Aircraft Seeding of Liquid Carbon Dioxide near Miyake and Mikura Islands, Tokyo, Japan. *J. Agric. Meteorol.*, Vol.69, No.3, pp.147-157, 2013.
- K. Saito, M. Murakami, T. Matsuo, H. Mizuno: Sensitivity Experiments on the Orographic Snowfall over the Mountainous Region of Northern Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.74, No.6, pp.797-813, 1996.
- 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, pp.I_391-I_396，2012.
- 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, pp.I_553-I_558，2014.
- 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, pp.I_499-I_504, 2015.
- 19) Y. Sato, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation?, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol.2, No.23, pp.1-16, 2015.
- 20) S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, Vol.8, pp.3393-3419, 2015.
- 21) T. Seiki, T. Nakajima: Aerosol Effects of the Condensation Process on a Convective Cloud Simulation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.71, No.2, pp.833-853, 2014.
- 22) H. Morrison, J. A. Curry, V. I. Khvorostyanov: A new double-moment microphysics parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.62, No.6, pp.1665-1677, 2005.
- 23) J. S. Kain and J. M. Fritsch: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.47, No.23, pp.2784-2802, 1990.
- 24) J. S. Kain: The kain-fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, Vol.43, No.1, 170-181, 2004.
- 25) G. A. Grell: Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations, *Monthly Weather Review*, Vol.121, No.3, pp.764-787, 1993.
- 26) H. Tomita: Analysis of spurious surface temperature at the atmosphere-land interface and a new method to solve the surface energy balance equation. *J. Hydrometeorology*, Vol.10, No.3, pp.833-844, 2009.
- 27) H. Kusaka, H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 101, pp.329-358, 2001.
- 28) G. Y. Niu, Z. L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari, and Y. Xia: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, D12109, 2011.
- 29) M. Sekiguchi and T. Nakajima: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.109, No.17-18, pp.2779-2793, 2008.
- 30) E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.102, No.14, pp.16663-16682, 1997.
- 31) T. Matsui, S. Q. Zhang, S. E. Lang, W. K. Tao, C. Ichoku, C. D. PetersLidard: Impact of radiation frequency, precipitation radiative forcing, and radiation column aggregation on convection-permitting West African monsoon simulations, *Climate Dynamics*, Vol.55, No.1-2, pp.193-213, 2020.
- 32) G. L. Mellor and T. Yamada: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.
- 33) M. Nakanishi and H. Niino: An improved mellor-yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound-Lay. Meteorol.*, Vol.112, pp.1-31, 2004.
- 34) Z. I. Janjic: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes, *Monthly Weather Review*, Vol.122, No.5, pp.927-945, 1994.
- 35) F. Mesinger: Forecasting Upper Tropospheric Turbulence within the Framework of the Mellor-Yamada 2.5 Closure, 1993.
- 36) 松本積：2009年7月の九州北部における豪雨の特徴。第8回都市水害に関するシンポジウム，2009年11月。
- 37) V. T. J. Phillips, L. J. Donner and S. T. Garner: Nucleation Processes in Deep Convection Simulated by a Cloud-System-Resolving Model with Double-Moment Bulk Microphysics, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.64, No.3, pp.738-761, 2007.

- 38) 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.

(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，複数の実施条件を考慮した SCALE-RM による豪雨抑制シーディングに関する数値実験を実施した。シーディング実施時間や高度，領域等において様々な条件下での豪雨抑制効果について評価を行い，WRF を用いた先行研究とのシーディングによる豪雨抑制効果の比較を行った。その結果，シーディングの実施によって最大積算および時間最大降水量が減少し，ピーク時の抑制効果が確認できた。特に2段階でシーディングを実施したケースで最も大きな抑制効果を得ることができ，抑制メカニズムの解析を行った結果，上昇流の弱化和霰の成長抑制という2つの異なるメカニズムが組み合わさることで豪雨抑制効果が高まることが確認された。また，それらの抑制効果は，WRF を用いた先行研究の結果と概ね一致しており，シーディングによる豪雨抑制効果の信頼性に寄与する結果が得られた。