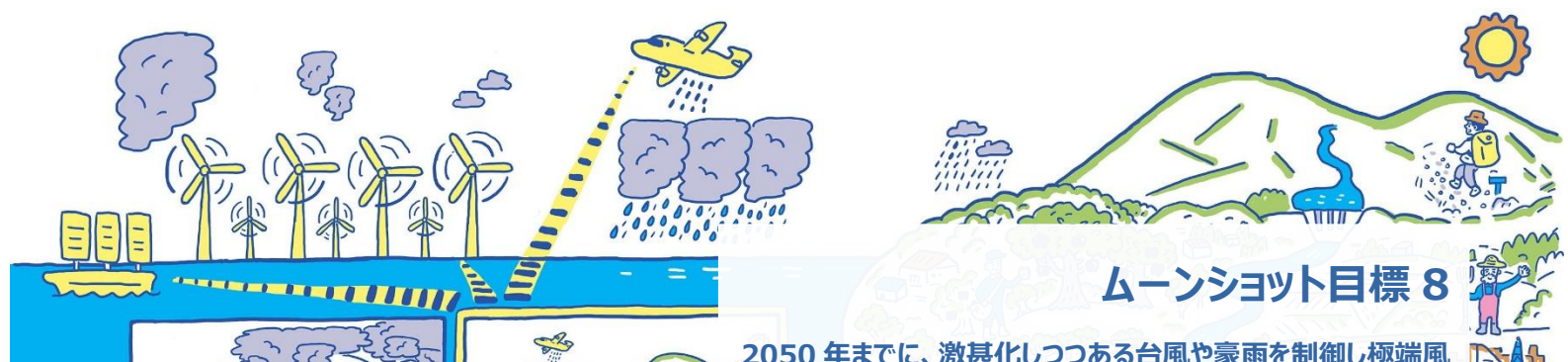




2050 年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現

実施状況報告書

2025 年度版

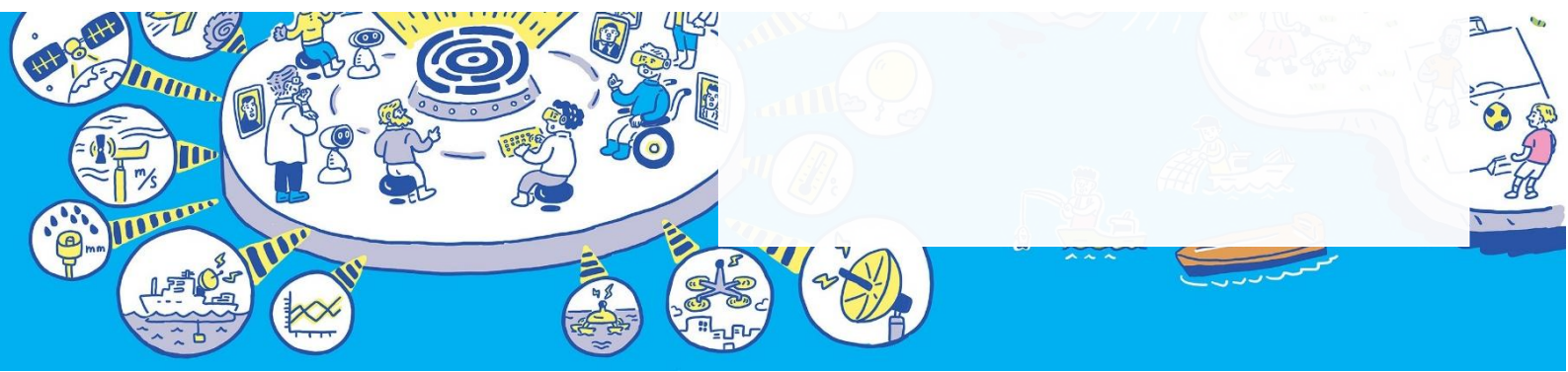
ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる

気象制御



山口 弘誠

京都大学 防災研究所



【目 次】

<u>ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御</u>	1
PM：山口弘誠（京都大学防災研究所 教授）	
<u>熱に対する操作手法の開発</u>	3
課題推進者：竹見哲也（京都大学防災研究所 教授）	
<u>気流・水蒸気に対する操作手法の開発</u>	5
課題推進者：山口弘誠（京都大学防災研究所 教授）	
<u>室内実験による工学的手法に対する要求性能の特定</u>	7
課題推進者：西嶋一欽（京都大学防災研究所 教授）	
<u>気流収束に対する操作手法の開発(風車群)</u>	9
課題推進者：内田孝紀（九州大学 教授）	
<u>雲粒子形成に対する操作手法の開発(シーディング)</u>	11
課題推進者：鈴木善晴（法政大学 教授）	
<u>超水滴法によるラグランジュ粒子ベース雲モデルの研究開発</u>	13
課題推進者：島伸一郎（兵庫県立大学 教授）	
<u>多時点・多段階操作による意思決定支援手法の開発</u>	15
課題推進者：西嶋一欽（京都大学防災研究所 教授）	
<u>制御効果モニタリング手法の構築</u>	17
課題推進者：大東忠保（防災科学技術研究所 特別研究員）	
<u>偶然性・必然性概念の制御システムへの利用</u>	19
課題推進者：仲ゆかり（京都大学防災研究所 助教）	
<u>アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの高度化とモデル問題および気象問題での実証</u>	21
課題推進者：野々村拓（名古屋大学 教授）	
<u>流出・水資源への短期的・長期的影響評価</u>	23
課題推進者：萬和明（京都大学防災研究所 准教授）	
<u>豪雨制御による浸水リスク変化の水文社会経済分析</u>	25
課題推進者：田中智大（京都大学防災研究所 准教授）	

豪雨制御の社会実装に向けた地域協働に関する総合研究.....	27
--------------------------------	----

課題推進者：羽鳥剛史（愛媛大学 教授）

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

PM：山口 弘誠（京都大学防災研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本プロジェクトは、気象学的・工学的な両面から介入操作による豪雨災害軽減を目指している。現在、当初の想定を上回るペースで実証に向けたデータセットが整いつつある。具体的には、4つの操作デバイス（風車、シーディング、洋上カーテン、増風機）の検討において、介入効果を模擬した気象シミュレーションにより、ゲリラ豪雨および線状対流系の雨量を最大10～20%抑制できることを示した。多段階・多地点での効率的な介入手法の獲得に向け、順調な進捗が得られている。特筆すべき成果として、アンサンブル平均随伴法が、従来手法に比べ1桁大きい最大積算降水量の抑制効果をもたらすことを突き止めた。予測に数十kmの誤差がある現状の精度でも、確率論的アプローチにより意思決定と抑制操作が十分に可能であることを明らかにし、理論段階から実運用を見据えたフェーズへの大きな進展があった。3年目評価を受け、運用面と経済合理性を重視した「現実的な実現可能性」を再定義した。現状の予測精度下でも、意思決定と効果的な操作の実現可能性があることを実証した。また、航空機の移動制約等を考慮した運用タイムラインを構築した。豪雨抑制シミュレーションから経済価値算出までの一連の接続方法を確立したことにより、5年目の目標達成に向けた道筋は極めて明確である。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

通常の随伴方程式を用いた感度に基づきインパルス入力を行った解析と、新たに提案するアンサンブル平均随伴法による感度に基づきインパルス入力を与えた解析を比較した結果、提案手法の方が1桁大きい最大積算降水量の抑制効果を示した。この手法は大変有望であると判断しており、今後、具体的な操作デバイスを想定して定量評価を進める計画である。

2) 代表的な論文

- Hatori, T., C. Rupprecht et al. (2025): Commoning the weather: weather commons for a post-1.5° C world. *npj Clim. Action*, Vol.4, 105.

気候変動による極端気象の深刻化を背景に、地域的な気象改変技術への関心が高まる中で、それらが人間と気象の関係性を社会的・政治的に変化させると論じている。さらに、気象を共有資源（コモンズ）として捉え、地域社会が民主的かつ公平に気象改変の意思決定に参加する「weather commons（気象コモンズ）」という新たなガバナンスの枠組みを提案している。

- 御牧舞、鈴木善晴、西山浩司、相馬一義 (2026): ドライアイスの昇華・落下・移流を考慮した豪雨抑制シーディングに関する数値実験、*土木学会論文集特集号（水工学）*、82巻、16号。

線状降水帯へのドライアイスを用いたシーディングを対象として、昇華・落下・移流といった実際のドライアイスの挙動を考慮した数値実験を領域気象モデル WRF で行ったものである。特に大きなドライアイス粒子を用いることで、より低高度で効果的に作用し、豪雨抑制効果が強まることが示された。

- Watanabe, M. et al. (2025): Actuator placement optimization in a linear impulsive control system by determinant-based greedy algorithm, *IEEE Access*, Vol.13.

線形インパルス制御システムにおける最適なアクチュエータ配置を、行列式ベースのグリーディアルゴリズムによって効率的に求める手法を提案し、少ない制御入力で高い制御性能があることを示した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

熱に対する操作手法の開発

課題推進者：竹見 哲也（京都大学防災研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

当該年度では、都市の建物配置・建物高さ・建物立地密度や都市からの排熱量を定量化するパラメータにより類型化された気流や熱輸送のパターンに基づき、メソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) から建物解像 LES モデルへと連結した数値シミュレーションによって、ゲリラ豪雨の発生や発達への影響について分析した。建物解像 LES モデルを用いて増風機による都市表面から大気にわたる排熱量の削減効果を定量的に評価し、メソ気象モデル WRF を用いて地表面から大気への熱輸送量を削減することで局地降水の強度や積算量を減少させることができることを数値モデルにより定量的に示した。建物解像 LES モデルによる増風機設置実験から、大型増風機で 20% 前後、小型増風機を多地点展開すれば 10~30% 程度にまで都市からの排熱量を削減可能であると評価した。このような定量的な評価に基づき、メソ気象モデルで都市からの顕熱輸送量を削減する様々な感度実験を行うことで、降水強化の直前の 1 時間の間に顕熱輸送量を削減することが効果的であること、10%、20%、30% と削減率を大きくするほど、より効果的に降水を制御することが可能であることを示した。さらに、建物解像 LES モデルによる増風機を設置した効果については小型増風機を多地点で展開した場合の増速効果による排熱量削減効果を量的に評価し、メソ気象モデルによる顕熱輸送量削減実験では削減時間開始時刻・削減時間間隔・削減率を様々に変えるなど多角的に降水への影響を定量的に評価した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

動的に気流を生成する増風機を排熱量改変の装置として、建物解像 LES モデルに増風機効果をパラメタライズし、増風機による気流改変により排熱量がどのように変化するかを多数の数値実験により調べた。最初に、大型の増風機を想定し、動的に気流を生成することで排熱量の改変効果を調べた結果、風速 5 m/s・角度 45 度の場合で、熱フラックス量を 2 割削減しつつ最大瞬間風速を 10 m/s 未満に抑えられるといったように、効果的に改変できることが分かった。次に、増風機を小型化・多点展開した数値実験を行った結果、増風速度や吹きおろし角度の設定によって 10~30% 程度の削減が見込めることを示した。小型増風機の多点展開により突風という悪影響を抑止しつつ効果的に熱輸送量を削減可能なことを示した。

2) 代表的な論文

- Irie, K., and T. Takemi, (2025): Effects of modifying surface sensible heat flux on summertime local precipitation in urban areas of Osaka, Japan. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 308

大阪市で発生した局地降水事例を対象に、WRF モデルにより地表面顕熱輸送量の削減による降水強度・降水量の改変効果を定量的に評価した。

- Tanji, S., and T. Takemi, (2025): Relationship between upward heat transport and building arrangement in urban districts of Osaka as revealed by large-eddy simulations. *Urban Climate*, 61, 102441

大阪市の実在街区を対象に建物解像 LES モデルによる数値実験を行い、都市の幾何学的形状と境界層中の熱輸送量との関係を導出した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

気流・水蒸気に対する操作手法の開発

課題推進者：山口 弘誠（京都大学防災研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

昨年度までに、気流を操作することで豪雨抑制効果があることを数値シミュレーション上で評価し、効果的な操作位置に関する傾向を把握しつつある。そこで、他の事例についても評価し、同様の知見が得られるかを検証した。できるだけ異なる大気環境場で検証するため、自己組織化マップを用いて過去の京阪神域の都市豪雨事例（420 事例）を分類した。過去の Top5 事例の内、2 事例がマップ上の同じ位置に分類され、また、都賀川事例もその 2 事例と同じ分類であったことから、すでに検証を進めてきた都賀川事例は顕著事例として典型的なものであったことが分かった。他の 3 事例のうち、2 事例について風車による豪雨抑制シミュレーションに取り組んだ。都賀川事例の結果に基づき、対流コアに対して風上側のいろいろな位置に風車を設置したときの感度を調べた。都賀川も含めて 3 事例を総合的に考えると、巨大風車（240m 四方の大きさ）2 台をゲリラ豪雨の対流コアの風上側に設置すると、(i) 最大で 15%前後の豪雨抑制効果があること、(ii) 風上方向の距離のズレとして、対流コアから離れるに従って抑制効果は単調減少するが、対流コアから 3km 圏内であれば 5%以上の抑制効果があることがわかった。その範囲内であれば空間的に多少ずれても少なくとも抑制効果を示すことがわかった。

さらに、リアルタイム運用時に重要となる降雨予測精度を考慮しても、操作による豪雨抑制の可能性があるかどうかを検証した。まず 2012 年の亀岡豪雨事例についてアンサンブル予測実験を行い、予測ズレの最大距離が 35km であったことを調べた。そして最も効果を示した操作位置から 35km 圏内の抑制効果を調べたところ、20km 圏内であればほとんどで抑制効果があったことから、現状の予測精度よりも改善が必要であるものの、今後の可能性を示唆する結果を示した。また、洋上カーテン船の移動速度を考慮し、気象庁 MEPS を用いて洋上カーテンのタイムライン（暫定）を構築した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

豪雨 3 事例において、風車を想定した多数のアンサンブル計算を実施し、操作の勘所がわかってきた。具体的には、対流コアの風上側に設置することが効果的な位置であることがわかった。

2) 代表的な論文

- Ono, A., and K., Yamaguchi, (2025): Estimating maximum precipitation for an extreme rainfall event in Japan using lower-level shifts of atmospheric initial and boundary conditions, *Journal of Hydrometeorology*, 26(12), 1919-1937.

大気下層の気温や湿度の状態を変化させることで、降水量がどのように変化するかを数値計算的に調べたものである。

- 山口弘誠、鈴木克進、西嶋一欽、中北英一（2025）：正方形ネットの背後に生じる風速場の風洞実験－洋上カーテンを想定した気象制御シミュレーションの精度向上に向けて－、*京都大学防災研究所年報*、第 68 号 B、206-212。

洋上カーテンを見立てたネットを作成し、風洞実験により、カーテン後流の減速効果を示した。

- 山口弘誠、永田惇、中北英一（2025）：線状対流系の偶発的な発生・不発生の分岐点に関する基礎的検討、*京都大学防災研究所年報*、第 68 号 B、213-220。

線状対流系事例のアンサンブル計算を行い、線状対流系の発生・不発生を左右する因子を示した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

室内実験による工学的手法に対する要求性能の特定

課題推進者：西嶋 一欽（京都大学防災研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、豪雨現象の工学的制御に関して、デバイス運転を含む動的な系における縮尺模型実験の相似則・実験方法・計測方法・実験結果の解釈に関する手法を確立すること、数値実験モデルの妥当性を相互検証するための風洞実験データを創出することを目的として研究を実施する。また、ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨に対する工学的手法のうち、熱・気流渦に関する制御デバイスに関して数値実験で必要な制御デバイス効果を定量化するとともに、特に豪雨抑制の期待値が高いと見込まれる手法について評価検証を実施する。本年度は、数値実験との相互検証のための縮尺模型実験に関して、アルミ塊およびアルミ板を用いて温度制御可能な都市模型を製作した。制御デバイスの効果の定量化に関して、増風機の運転による増風機周りの気流の定量化に関する縮尺模型実験を行った。工学的制御デバイスに対する要求性能に関して、他研究開発課題での現時点までに得られている数値シミュレーションの結果に基づいて、洋上カーテンおよび増風機に要求される性能を整理するとともに、建築・都市計画的な観点から、現実的な洋上カーテンおよび増風機の設置方法、利活用について検討を進めた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

制御デバイスの効果の定量化に関する縮尺模型実験を京都大学防災研究所が保有する境界層風洞を用いて実施した（図1左）。気流は2次元3成分気流計測手法を用いて計測した。実験条件は、風洞内風速は0m/s、0.5m/s、1m/s、増風機の向きは0度（水平）、45度（斜め上向き）、増風機模型のファンのデューティー比は0%（無回転）から80%まで20%刻みである。ただし、すべての組み合わせで実験を実施したわけではなく、必要な組み合わせのみで実験を行った。計測結果の一例として、風速0m/s、増風機の向き45度、デューティー比20%のZ=0mm断面での平均風速場を図1右に示す。以上により、これらの実験により、数値シミュレーションで陽に再現しないグリッドスケール以下の増風機回りの流れの性状を把握するとともに、増風機に関する数値シミュレーションと相互比較するためのデータを得た。

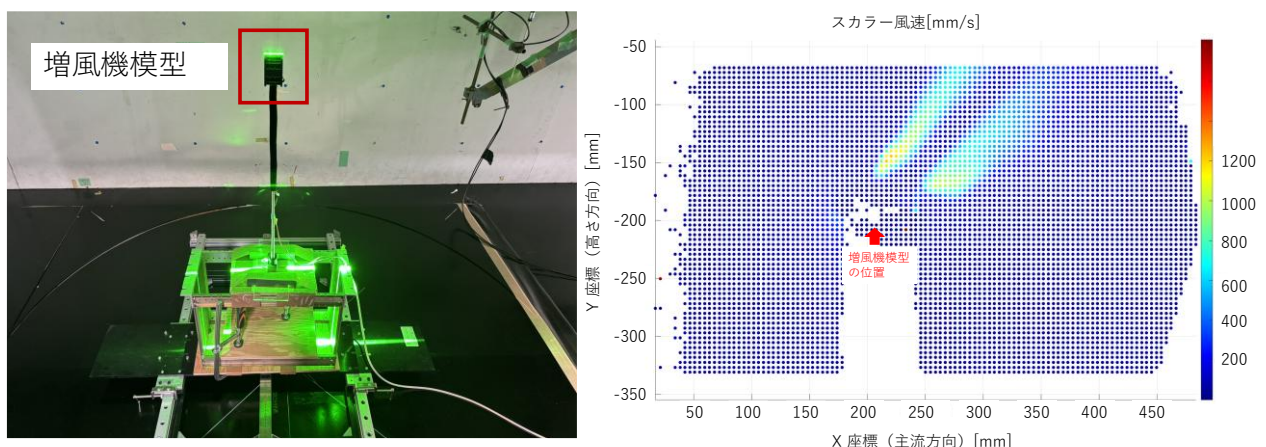


図1. 増風機に関する縮尺実験模型（左）、計測された平均風速場（右）

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

気流収束に対する操作手法の開発(風車群)

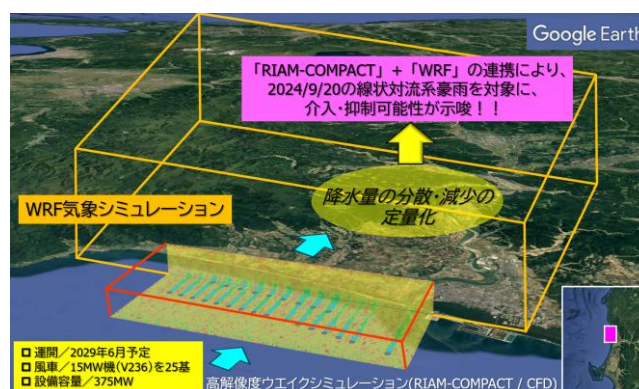
課題推進者：内田 孝紀（九州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025年4月より、大手風力事業者の一つであるENEOSリニューアブル・エネルギー株式会社に内田PIグループに加入頂いた。ENEOSリニューアブル・エネルギー株式会社は、「秋田県八峰町及び能代市沖」における洋上風力発電事業者に選定されている。本事業内容は、発電設備：着床式洋上風力発電、発電設備出力：37.5万kW（1.5万kW×25基、Vestas製）、運転開始予定時期：2029年6月である。本年度より、上記の大規模洋上ウィンドファームを対象に風車ウエイク現象を活用した気象制御の実現可能性検討に着手した。大阪大学D3センターの曾我 隆特任准教授には、大規模ウエイクCFDのチューニングとAIを用いた発散予測、スパコン上でのオンタイム可視化に着手頂いた。鉄道総合技術研究所の荒木 啓司氏と福原隆彰氏には、メソ気象モデルWRFシミュレーションにより、気流収束および線状対流系豪雨抑制の実現可能性検討を前倒しで実施頂いた。九州大学の渡邊康一特任准教授には、洋上ウィンドファームによる豪雨抑制効果の感度に関するラフエスティメーションの検討に着手頂いた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果



風車ウエイク現象に起因した風速欠損量を気象シミュレーション(WRFモデル)の境界条件に設定する手法を開発し、2024年9月20日に「秋田県八峰町及び能代市沖」周辺で発生した線状降水帯事例の解析を実施した。その結果、3時間雨量が5%程度、増加／減少することを示し、風車ウエイク効果を考慮したWRF気象シミュレーションにおいて降水量に有意な変化が生じることを定量的に示すことに成功した。

2) 代表的な論文

- 内田 孝紀 (2026) : ウィンドファームウエイク現象による豪雨制御の数値的検討、*九州大学西部地区自然災害センターニュース*、No.73号、3-6。

風車ウエイク現象に起因した風速欠損量を気象シミュレーション(WRFモデル)の境界条件に設定する手法を開発し、2024年9月20日に「秋田県八峰町及び能代市沖」周辺で発生した線状降水帯事例を対象として解析を実施した。その結果、3時間雨量が5%程度、増加／減少することを示し、風車ウエイク効果を考慮したWRF気象シミュレーションの有効性を明らかにした。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

雲粒子形成に対する操作手法の開発(シーディング)

課題推進者：鈴木 善晴（法政大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

WRF-ARW 及び SCALE-RM と雲微物理スキーム「バルク法」「ビン法」及び「超水滴法」を組み合わせ様々な条件下でのシーディング操作に関する数値実験・感度実験を行い、豪雨抑制効果やそのメカニズムに関する妥当性や信頼性の検証を実施するとともに、粒径分布の変化に着目した詳細な抑制メカニズムの解明、航空機の飛行経路等を考慮した現実的な操作手法の導入、ドライアイスの落下・昇華等のプロセスを陽に表現可能なモデルの構築を行った。また、航空機の使用を想定したドライアイスシーディングに関する仮想オペレーションモデルを構築することで実現可能性の検証を行うとともに、ドライアイス散布に必要なデバイスの試作に着手し、簡易散布実験による検証試験を実施した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

2025 年度は、領域気象モデル SCALE-RM を用いてビン法による降水粒子の粒径分布に着目したシーディングによる豪雨抑制効果に関する数値実験・感度実験を実施した。シーディング操作の実施により粒径の大きな氷晶及び雪の混合比が抑制され、代わりに粒径の小さな氷晶・雪が大幅に増加していることが確認された。また、霰混合に関しても粒径の大きな霰が抑制され、小粒径の霰が増加する結果となった。各降水粒子の数濃度に着目するといずれの粒子においても数濃度が全体的に増加しており、粒径分布において粒径の小さな固体粒子が増加したことで整合する結果となっている。これらの結果は、シーディング操作の実施によって増加した粒径の小さな固体粒子（氷晶や雪）が、大気中の水成分を奪い合う競合的成長（オーバーシーディング）状態を引き起こし、強雨域における雪や霰といった固体粒子の成長を抑制させたことを示しており、従来の知見をより詳細かつ定量的に補強するものであるとともに、シーディングによる豪雨抑制メカニズムの信頼性向上に寄与する成果である。

2) 代表的な論文

- 埜崎信佑、鈴木善晴、西山浩司、相馬一義（2026）：ビン法による雲微物理過程を考慮したシーディングによる豪雨抑制効果に関する研究、*土木学会論文集 B1（水工学）*、82 巻、16 号。

本研究では、領域気象モデル SCALE-RM を用いて、ビン法による雲微物理過程を考慮したクラウド・シーディングによる豪雨抑制効果に関する研究を実施した。降水粒子の粒径分布に基づいた豪雨抑制メカニズムの解析が可能となり、豪雨抑制効果の信頼性に寄与する結果が得られた。

- 御牧舞、鈴木善晴、西山浩司、相馬一義（2026）：ドライアイスの昇華・落下・移流を考慮した豪雨抑制シーディングに関する数値実験、*土木学会論文集特集号（水工学）*、82 巻、16 号。

本研究では、散布するドライアイスの昇華・落下・移流等を直接的に表現することで、クラウド・シーディングに関する詳細な数値実験を行った。豪雨抑制効果について、従来の間接的手法との比較を行うとともに、ドライアイスの粒径や散布量を変化させてその効果の違いを解析した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

超水滴法によるラグランジュ粒子ベース雲モデルの研究開発

課題推進者：島 伸一郎（兵庫県立大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

超水滴法に基づくラグランジュ粒子ベース雲モデル SCALE-SDM のさらなる改良と拡張を進めた。2025年度はエアロゾル過程の精緻化を実施した。特に、エアロゾルの粒径分布・鉛直分布・化学組成・吸湿度・氷晶核能を容易に設定できるよう、ユーザーインターフェースを整備した。シーディング機能の追加についても実装を進めている。また、実際に SCALE-SDM を使ってシーディング等による介入の効果を調べる準備として、山口 PJ の想定する環境における孤立積乱雲の理想計算を SCALE-SDM で実施した。粒子ベース雲モデルによるゲリラ豪雨の現実事例の計算にも世界で初めて成功した。対象としたのは 2024 年 8 月 21 日の東京の事例である。従来の雲微物理モデルと比較し、現象をより正確に再現することができた。これが、超水滴法によって雲微物理の表現を精緻化したことによるものなのか、あるいは偶然そうだったのか、他の事例にも適用し慎重に評価する。他 PJ に対しても情報共有や成果移転をするため、山口 PJ 内での研究開発に加えて超水滴法基盤ユニットとしても活動した。講習会や研究会、集中講義を実施した他、他 PJ と様々な共同研究を推進した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

粒子ベース雲モデルによるゲリラ豪雨の現実事例の計算に世界で初めて成功したこと。

2) 代表的な論文

- Yang, F., Choi, K. O., Chandrakar, K. K., Hoffmann, F., Hou, P., Krueger, S., et al. (2026): A model intercomparison study to investigate mixing characteristics in non-precipitating stratocumulus clouds. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 18.

海洋性層積雲において、雲の頂上付近では「不均一な混合」が、雲の内部では「均一な混合」が起きるという観測結果について、それが雲頂から取り込まれた空気の鉛直循環によって引き起こされるという仮説を、SCALE-SDM を含めた 12 種類の計算モデルを用いて検証した。

- Yin, C., Shima, Si., Lu, C. et al. Resolving Entrainment-Mixing in Marine Stratocumulus: The Role of LES Grid Resolution and Super-Droplet Number. *Adv. Atmos. Sci.* 43, 845-860 (2026).

数値シミュレーションにより海洋性層積雲におけるエントレインメントと混合プロセスを正確に再現するために必要な、格子解像度と超水滴数の条件を調べた。力学的な混合の指標であるダムケラー数 (Da) は粗い格子や少数の超水滴 (16 個超) で数値収束する一方、雲微物理の詳細に依存する均質混合度 (HMD) は、より高い空間解像度と大量の超水滴 (128 個超) を必要とすることが示された。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

多時点・多段階操作による意思決定支援手法の開発

課題推進者：西嶋 一欽（京都大学防災研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題は、(1)意思決定最適化に必要な十分な解像度で豪雨現象を模擬する数値解析モデルの開発、(2)多時点・多段階で操作手法の最適解を導出する手法の開発、(3)それらを統合した実時間意思決定支援システムのプロトタイプの開発を実施する。本年度は、最適化のためのサロゲートモデルとして、ResNet (Residual Network)の利点を用いた FNO(Fourier Neural Operator)の改良モデルを構築し、本モデルが先行モデルに関して予測精度に勝ることを確認した。多時点・多段階で操作手法の最適解を導出する手法の開発に関して、リアルタイム意思決定最適化問題の解法として、前年度までに開発した LSM (Least-Squares Monte Carlo) 法に基づく最適化手法の計算効率を向上させるため、重点サンプリング法の導入を試みた。また、実時間意思決定支援システムのデモンストレーションの作成に関して、実現可能性を踏まえた一つの豪雨制御シナリオを想定しデモンストレーション映像を製作した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

プロジェクト内の他研究開発課題グループと連携して、現時点までに得られている成果と得られていない情報を明確にしたうえで、得られている成果については実際の数値シミュレーション等の結果を用い、得られていない情報については想定される仮の情報に基づいて、時々刻々の大気の状態および河川の状態を 3 次元仮想空間に再現した (図 1)。



図 1. 数値計算で得られた河川の水位を地表面データ上にマッピング (左)、数値計算で得られた霰量およびシーディングのための航空機の位置を 3 次元空間上にマッピング (右)。

2) 代表的な論文

- 李栄茂、西嶋一欽 (2026) : 豪雨制御の意思決定支援に向けたサロゲートモデル : 渦構造の再現に着目し FNO による 3D 乱流予測、令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概。

FNO に基づく先行サロゲートモデルの課題であった小さいスケールの乱流構造の再現性向上を目的として、FNO に基づくモデルにおける高周波フーリエモードの情報損失を抑制し、小さいスケールの乱流構造の再現精度を向上させるために、ResNet の利点を用いた FNO の改良モデルを構築し、本モデルが予測精度に勝ることを確認した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

制御効果モニタリング手法の構築

課題推進者：大東 忠保（防災科学技術研究所 特別研究員）

1. 研究進捗状況と成果

豪雨制御を行うためには、豪雨の発生、発達、維持、衰退のキーとなる構造・物理量を観測し、制御実施の意思決定を行う必要がある。このために、2年度目（2023年度）から豪雨のキーマカニズムの解明のための研究を進めてきた。この一環として、当該年度は、ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨に関わる過去の研究の調査を行った。本研究では、ゲリラ豪雨については積乱雲、線状対流系については線状降水帯を含む停滞性の降水系を対象とした。

日本でゲリラ豪雨を引き起こす積乱雲が発生する夏季においては、水平風の鉛直変化（鉛直シア）が小さいことが多く、また、中層の乾燥層が米国ほど顕著ではないため、組織化の形態や寿命などが異なると考えられる。米国では、竜巻やダウンバーストに代表される強風が大きな被害をもたらすため注目される一方で、日本では夏季の積乱雲に伴う都市部への非常に強い雨が注目されてきた。弱い鉛直シアのため、ランダムな方向に新しい対流セルができながらも、一定時間全体として維持されて強雨となることが多い。我々の解析では、強雨をもたらす積乱雲の発生を、環境場のみによって予測することは難しいことが示された。一方で、強雨となる時は雨域が一定の広がりをもつことがわかった。雨域の水平スケールが大きくなることによって、周辺の乾燥空気との混合が減少し、浮力が阻害されないためと考えられる。また、他の研究においては、発達する積乱雲は下層に強い鉛直渦度をもつことがわかってきた。したがって、リードタイムは15～30分程度と長くはないが、激しい雨をもたらす積乱雲を早期に特定するためには、環境場によって強い雨をもたらす状況を特定するだけでなく、雲・雨域の広がりや、下層の鉛直渦度に注目した雲の時間発展の詳細な観測も有効である。

線状対流系においても、上流となる海上下層の水蒸気量の観測などを充実させることが予測のために重要であるが、それだけでは十分ではない。積乱雲が1つ発生した場合に、その周囲に積乱雲が発生し降水帯が停滞するかどうかについては、積乱雲同様、環境場だけではない情報を組み合わせて予測する必要がある。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

2024年度に行った、過去10年分の夏季の環境場の解析から、環境場によって豪雨が起こりうる場を絞り込めることはわかったものの、同じ範囲で見ると豪雨が起こらない方が圧倒的に多く、このまま環境場を豪雨発生の指標として適用すれば空振りが非常に多くなることが予想される。一方で、2023年度に行ったレーダーの解析から、降水域の水平スケールと降水強度には関係性がみられた。環境場によって得られた情報からある程度の発生可能性の絞り込みを行い、そこからさらに空振りを減らすために、リードタイムはかなり短くなるが、雲レーダー等の先端機器や、その同化を利用した極短時間予測方法を改善する方法など、他の方法を組み合わせる必要があると考えられる。制御の意思決定を行うために、短時間の予測となっても、一般的な数値シミュレーションと並行して、物理的なメカニズムを介した方法で発生予測精度を向上させる研究が必要とされる。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

偶然性・必然性概念の制御システムへの利用

課題推進者：仲 ゆかり（京都大学防災研究所 助教）

1. 研究進捗状況と成果

当該年度では以下のマイルストーン達成に向けて、以下の小課題（１）（２）を実施した。

当該年度のマイルストーン：気象制御装置設置場所の最適化および気象制御効果の検証

気象制御装置及び操作手法に利用可能な一般化情報の創出

偶然性の定量化および偶然性評価指標の構築

（１）様々な大気環境場での必然性の分析及び気象制御の有効性の検討

（i）線状対流系データベースの作成

5km 解像度の大量アンサンブルデータベースである d4PDF を用いて、線状対流系データベースを作成した。温暖化進行に伴う、地域ごとの線状対流系の頻度増加率や雨量増加率などを解析し、特にこれまで線状対流系がほとんど発生してこなかった地域でも今後発生し始めることが明らかになった。

（ii）洋上カーテンによる線状対流系の制御シミュレーション

研究開発項目 1-2 と連携し、近畿地方で過去に発生した線状対流系豪雨を対象に、メソ気象モデル CReSS を用いて洋上カーテンによる気象制御シミュレーションを実施した。再現実験に対しては、より最適な設置位置およびその制御効果を検証し、最大降雨強度において、最大で約 30% の抑制効果を確認した。

また、2050 年における温暖化条件下で同様の洋上カーテン設置シミュレーションを行った。その結果、現在気候条件における再現実験と同様、最大降雨強度に関しては約 20% の抑制効果を確認し、将来気候における環境場条件でも洋上カーテンの気象制御効果を検証できた。

（２）偶然性を考慮した気象制御実施の有無の判断基準構築

気象庁のメソアンサンブル予報データ MEPS を用いて偶然性の解析を開始した。アンサンブルの幅の更新履歴に着目し、初期値が更新されると予測のばらつき（予測の幅）が大きくなる度合いの指標 GFU（Growing Forecast Uncertainty）を解析することで偶然性を定量化することを試みた。その結果、MEPS で予測ができなかった線状対流系事例では GFU が増大、すなわち予測が更新されても予測の幅が小さくならず、予測の困難さ（≡現象の偶然性の高さ）とおおむね対応していることを示すことができた。

2. 代表的な成果事例

1）目標達成に最も寄与する成果

気象制御の実現を目指す 2050 年における地球温暖化の影響を考慮し、温暖化実験において線状対流系に対する洋上カーテン設置シミュレーションを行った結果、最大降雨強度に関しては約 20% の減少効果を確認し、将来気候における環境場条件でも洋上カーテンの気象制御効果を検証できた。当成果は 2025 年のアメリカ地球物理学連合学会（AGU）にて発表済みである。

2）代表的な論文

成果は 2026 年度に論文として投稿予定。

3）代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの高度化とモデル問題および気象問題での実証

課題推進者：野々村 拓（名古屋大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

数理モデル問題において、アクチュエータ位置最適化の目的関数を終端出力に対するインパルス入力の感度から時系列出力に対する時系列入力の感度に変更し、連続入出力を考慮した最適化手法を開発した。また、随伴モデルを持たないシミュレータに対してアンサンブル接線形モデル (CLETLM) を構築し、流体問題でその精度を検証した。さらに、当初計画にはなかったアンサンブル平均随伴法の有効性検証および多段階勾配降下最適化への拡張にも取り組み、西日本豪雨の WRF シミュレーションにおいて従来法を上回る制御効果を確認しつつある。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

時系列出力に対する時系列入力の感度を目的関数に設定し、連続入出力を考慮したアクチュエータ位置最適化手法を開発した。流体現象の単純なモデルとして知られる線形化 Ginzburg-Landau モデルに適用し、得られたアクチュエータ配置では、ランダム配置や直感的配置よりも高い制御効果が得られることを示した。図 1 に、得られた感度モードと最適化アクチュエータ位置を示す。提案手法では、様々なモードを考慮して、アクチュエータがバランス良く配置されることがわかった。

また、CLETLM (Continuous Local Ensemble Trained Linear Model) と呼ばれるフレームワークを構築し、随伴モデルを持たないシミュレータにおいても、アンサンブル接線形モデルを用いて随伴モードを推定する方法を開発した。提案手法を円柱周りの 2 次元流れ場に適用し、随伴モデルを使用せずに、不安定な固有値や随伴モードを比較的高精度に推定できることを示した。図 2 に得られた随伴モードを示す。

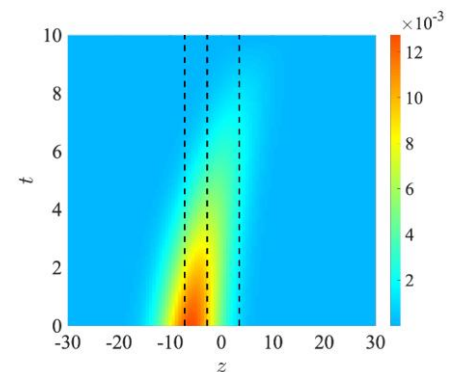


図 1 感度モード (カラーコンター) と最適化アクチュエータ位置 (黒破線)

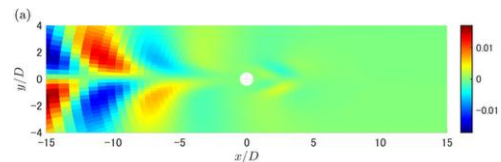


図 2 円柱周り流れの随伴モード

2) 代表的な論文

- M. Watanabe, Y. Sasaki, T. Nagata, K. Yamada, D. Tsubakino, J. Ito, and T. Nonomura, (2025): Actuator placement optimization in a linear impulsive control system by determinant-based greedy algorithm, *IEEE Access*, Vol. 13, 207581–207595.

終端状態に対するインパルス入力の感度に注目することにより、多様な初期条件の下、線形システムを効率的に制御することが可能なアクチュエータ配置を求める手法を、特異値分解及び貪欲法に基づいて提案した。その上で、流体現象の単純なモデルとして知られる線形化 Ginzburg-Landau モデルに対して提案手法を適用し、その有効性を数値的に示した。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

流出・水資源への短期的・長期的影響評価

課題推進者：萬 和明（京都大学防災研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

これまでに陸面過程モデル・河道流追跡モデル・流出モデルから構成される流出・水資源評価モデルを開発してきた。同モデルにより、河川流量や氾濫浸水深および氾濫面積の推計が得られる。当該年度には、さらに、豪雨災害の顕著事象である斜面崩壊に着目して、豪雨制御による斜面崩壊リスクの低減効果の評価モデル開発に着手した。

豪雨制御が実現した場合の流出・水資源への変化を推定するため、研究開発項目 1 で開発している気象モデルによる豪雨制御実験結果から、豪雨制御によって降雨波形がどのように変化するか、その情報を抽出した。抽出された降雨波形の変化情報に基づき、九州地方黒川流域で平成 24 年に発生した豪雨イベントに対して豪雨制御が実現したと仮定した場合の流出への影響評価を実施した。その結果、仮定した豪雨制御によって、流域総降水量は約 7%抑制され、流域下端でピーク河川流量が約 12%低減することが明らかとなった。さらに、氾濫シミュレーションを実施し氾濫浸水面積の変化を分析したところ、大きな被害が予想される浸水深 1m 以上の面積が約 17%縮小することがわかった。加えて、「治水経済評価マニュアル（案）」に従い、地先の浸水深と土地利用、資産に基づいて、直接的物的経済被害額を推定した。経済被害額を推計したところ、豪雨制御によって経済被害額を約 90 億円（元の推定額の約 7%に相当する）減額できるとの結果が得られた。この結果は豪雨制御による便益の一部を明らかにしたものであり、豪雨制御の経済合理性の議論に資する重要な知見となる。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

実現可能な豪雨制御を想定したシミュレーション結果に基づくと、九州地方黒川流域で平成 24 年に発生した豪雨イベントにおいて豪雨制御が実現したと仮定すると、流域総降水量は 7%程度抑制される。本研究課題において開発している流出・水資源評価モデルを用いて、この豪雨制御を仮定した場合の流出への影響評価を実施したところ、流域下端のピーク河川流量は約 12%低減する結果となり、豪雨制御の抑制割合と同程度の大きさの流量低減効果があることが明らかとなった。さらに、氾濫シミュレーションを実施し氾濫浸水面積の変化を分析したところ、大きな被害が予想される浸水深 1m 以上の面積において 17%程度縮小することがわかった。さらに、「治水経済評価マニュアル（案）」に従い、地先の浸水深と土地利用、資産に基づいて、直接的物的経済被害額を推定する手法を確立した。これらによって、豪雨制御による便益の推計が可能となり、豪雨制御の経済合理性の議論に資する重要な知見が得られる。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

豪雨制御による浸水リスク変化の水文社会経済分析

課題推進者：田中 智大（京都大学防災研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

(1) 災害曝露人口とその特性の解明

マイルストーン「将来に至るまでの災害曝露人口とその特性を分析する」に関して、将来気候に対応した豪雨制御シミュレーションによる制御効果分析を念頭に、2050年に掛けての人口および高齢者人口のデータを整備して特徴を分析した。九州地方を例に中山間地域の浸水想定区域における人口減少および高齢化を確認した。さらに、長期的な社会経済影響の大きい曝露情報として、新たに特許出願地データと浸水想定区域の関係性を分析し、地域的特徴を整理した。

(2) 将来の都市条件の予測およびシナリオ設定

マイルストーン「気象制御による対象地域の洪水リスク認知の変化を推定する」に関して、社会水文モデルを基礎として、洪水災害の発生によるリスク認知の上昇と時間経過による記憶の低減を表現するモデルをコード化した。

(3) 将来の都市変化による気象制御の効果への影響

マイルストーン「ゲリラ豪雨制御による洪水脆弱性の低減効果を評価する」に関して、3年目までに検討した神戸市都賀川を中心に、京阪神地区の河川親水空間を対象として人流データ解析によって大雨警報時の河川空間内の曝露人口およびその年齢構成を分析した。ゲリラ豪雨に対して河川に残された人口に対する死者数の減少効果を見込むことは難しいものの、リードタイムを稼ぐことによって残存する曝露人口に対して一定の低減効果が期待できることがわかった。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

(1) の成果である特許出願地データと浸水想定区域の関係性および地理的特徴の分析は、これまで減災の効果として十分に議論していない観点で気象制御による経済合理性を定量化しており、特に目標達成に寄与した。

2) 代表的な論文

- Hamada, K., Oba, T., Susaki, J., Ishii, Y., (2025): Nationwide analysis of innovation creation sites and flood inundation risk using Japan's patent application information from 1980 to 2018. *Urban and Regional Planning Review*, 12, 66-86.

本研究は、1980～2018年の日本の特許出願情報を用いて、発明者住所をもとにイノベーション創出拠点の全国的な分布と経年変化を把握し、洪水浸水想定区域との重ね合わせにより浸水リスクへの曝露状況を分析した。結果として、2018年時点で約4割の創出拠点が浸水リスクを有し、特に大阪圏や徳島県などで高い割合が確認された。また、三大都市圏だけでなく地方部でもリスクを有する拠点の割合が増加しており、洪水リスクが知的生産活動や産業・地域発展に与える影響を考慮した都市・地域計画、企業立地、防災政策の必要性を示している。

3) 代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

ムーンショット型研究開発事業・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

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と共に生きる気象制御

豪雨制御の社会実装に向けた地域協働に関する総合研究

課題推進者：羽鳥 剛史（愛媛大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、気象制御という新しい技術により、人々が気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための地域協働のしくみを総称して「気象コモンズ」と捉え、気象制御に対する受容意識や気象制御をめぐる市民対話を進めてきた。まず、Web アンケート調査により、気象制御に対する受容意識の実態やその受容条件を実証的に検討した。気象制御のシナリオを提示し、市民の受容意識を把握すると共に、各種の心理要因との統計的な関連性を調べた。その結果、気象との日常的な関わり合いや自然観と気象制御に対する受容意識との関連性が示された。

また、これまでに豪雨被害が頻発してきた福岡県久留米市を対象として、気象制御をめぐる市民ワークショップを全6回実施した。その中でも、現地関係者との共催により、市民と研究者が一同に介した市民対話を10月に実現させ、53名（久留米市民27人、研究者／学生26人）が参加した。これらのワークショップの実施にあたっては、久留米市の筑後川流域関係者との協議により、現地の当事者が主体的に市民対話を進める体制を構築した。以上の市民対話で議論された内容を分析し、気象制御に関する市民の意見や懸念点を整理・類型化した。併せて、全ワークショップの内容を基にして、当該エリアならではの気象コモンズのビジョン「そらまちマップ」を作成した。

さらに、国内外の専門家で行ったオンラインワークショップで、気象制御を中心に社会生態的関係図を作成し、取り組むべき研究課題や盲点の特定を行った。以上を踏まえ、「気象コモンズのマルチスピーシーズ相互作用モデルによる気象制御の社会生態的評価」を課題テーマに、課題マイルストーンとして1) 気象を通じた生物と技術の直接的と間接的な相互作用の把握、2) 気象制御・気象コモンズの実現に向けた可能性と課題の把握、3) 重要な社会生態的課題と気象制御の相互作用の把握、4) マルチスピーシーズ気象コモンズの地域協働の理論的・実践的検討を特定し、2026年度からの研究課題の立ち上げに至った。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

気象コモンズの理論構築を進めると共に、この考え方を基にして、気象制御をめぐる市民対話の枠組みや関係構築、検討体制を構築した。

2) 代表的な論文

- Hatori, T., C. Rupprecht et al. (2025): Commoning the weather: weather commons for a post-1.5° C world. *npj Clim. Action*, Vol.4, 105.

本論文は、気象制御のトップダウン的・技術主義的なアプローチとは一線を画し、地域コミュニティを中心とした民主的・ボトムアップ的なアプローチとして、「気象コモンズ」という新しい考え方を提起したものである。筆者らは、この考え方をベースとして、気象制御をめぐる幅広い市民的対話を進めていくことを呼びかけている。

3) 代表的な特許

なし