



## 【目 次】

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| <a href="#">海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来</a> .....   | 1  |
| PM：小槻峻司（千葉大学 教授）                                   |    |
| <a href="#">フィードバック制御手法の開発</a> .....               | 3  |
| 課題推進者：大塚敏之（京都大学 教授）                                |    |
| <a href="#">データ駆動手法を用いた制御手法の開発</a> .....           | 5  |
| 課題推進者：小蔵正輝（広島大学 教授）                                |    |
| <a href="#">潜在変数モデルによる気象予測計算</a> .....             | 7  |
| 課題推進者：松岡大祐（海洋研究開発機構 グループリーダー）                      |    |
| <a href="#">注意機構をもつ気象予測学習器の開発</a> .....            | 9  |
| 課題推進者：計良宥志（千葉大学 准教授）                               |    |
| <a href="#">レザバー計算を用いた気象情報の潜在空間表現</a> .....        | 11 |
| 課題推進者：徳田慶太（順天堂大学 准教授）                              |    |
| <a href="#">クープマンモード分解による低次元化</a> .....            | 13 |
| 課題推進者：薄良彦（京都大学 教授）                                 |    |
| <a href="#">気象情報のランドスケープ解析</a> .....               | 15 |
| 課題推進者：井元佑介（京都大学 特定准教授）                             |    |
| <a href="#">気象制御計算システムの開発</a> .....                | 17 |
| 課題推進者：岡崎淳史（千葉大学 准教授）                               |    |
| <a href="#">気象制御計算の計算量削減</a> .....                 | 19 |
| 課題推進者：小槻峻司（千葉大学 教授）                                |    |
| <a href="#">海上豪雨形成のモニタリングに向けた観測シミュレータの開発</a> ..... | 21 |
| 課題推進者：金丸佳矢（情報通信研究機構 研究員）                           |    |
| <a href="#">気象モデルを用いた介入操作の有効性評価</a> .....          | 23 |
| 課題推進者：安永数明（富山大学 教授）                                |    |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| <a href="#">海上豪雨形成の可能性がある事例選定</a> .....       | 25 |
| 課題推進者：濱田篤（富山大学 准教授）                           |    |
| <a href="#">アンサンブル気象予測実験</a> .....            | 27 |
| 課題推進者：平賀優介（東北大学 助教）                           |    |
| <a href="#">クラウドシーディングの物理的な理解と有効性評価</a> ..... | 29 |
| 課題推進者：端野典平（高知工科大学 教授）                         |    |
| <a href="#">介入効果の地上観測検証</a> .....             | 31 |
| 課題推進者：吉見和紘（富山県立大学 講師）                         |    |
| <a href="#">気象制御への社会制度設計の検討</a> .....         | 33 |
| 課題推進者：重本達哉（同志社大学 准教授）                         |    |
| <a href="#">気象制御における国家補償</a> .....            | 35 |
| 課題推進者：近藤卓也（北九州市立大学 准教授）                       |    |
| <a href="#">気象制御実施に関するルール策定</a> .....         | 37 |
| 課題推進者：福重さと子（岡山大学 教授）                          |    |
| <a href="#">気象制御への保険制度</a> .....              | 39 |
| 課題推進者：嘉村雄司（島根大学 教授）                           |    |
| <a href="#">水害リスク管理における気象制御の位置づけ</a> .....    | 41 |
| 課題推進者：堀智晴（京都大学 教授）                            |    |
| <a href="#">洪水リスクの定量化</a> .....               | 43 |
| 課題推進者：山田真史（京都大学 助教）                           |    |
| <a href="#">水害被害推定モデルの開発</a> .....            | 45 |
| 課題推進者：山田進二（SOMPO リスクマネジメント株式会社 執行役員）          |    |
| <a href="#">斜面崩壊リスク評価と国際展開</a> .....          | 47 |
| 課題推進者：風間聡（東北大学 教授）                            |    |
| <a href="#">社会実装シナリオの策定</a> .....             | 49 |
| 課題推進者：小野桂介（東北工業大学 講師）                         |    |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| <a href="#">気象制御への RRI の推進</a> .....              | 51 |
| 課題推進者：立花幸司（千葉大学 准教授）                              |    |
| <a href="#">気象制御の社会的価値を最大化する科学コミュニケーション</a> ..... | 53 |
| 課題推進者：一方井祐子（金沢大学 准教授）                             |    |
| <a href="#">市民対話による気象制御への不安解消</a> .....           | 55 |
| 課題推進者：北崎允子（武蔵野美術大学 教授）                            |    |
| <a href="#">深層ニューラル場等による移流モデリング</a> .....         | 57 |
| 課題推進者：船富卓哉（京都大学 教授）                               |    |
| <a href="#">介入効果を評価する可視化手法の開発</a> .....           | 59 |
| 課題推進者：久保尋之（千葉大学 准教授）                              |    |

## 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

PM： 小槻峻司（千葉大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

年度初めに設定した 2025 年度のマイルストーンは全て達成し、2026 年度のマイルストーン達成に向けた見通しも良好である。さらに、2024 年度に開催された JST 主催の MS 目標 8 コアプロジェクト合宿（2025 年 3 月 27 日、28 日）を踏まえて、富山湾近傍において冬季の航空機シーディング予備実験を実施した。また、タイムライン策定など、プログラムの状況を踏まえた取り組みを拡張した。特にシーディング予備実験の実施は、研究開始時の 10 年目の目標を大幅に前倒し達成したもので、当初の想定以上の成果および進捗が得られた。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

主要な成果は、以下のとおりである。

- ① 気象制御のための介入の位置・強度・タイミングを最適化する数理手法として、SCALE-LETKF-MPC を提案し、数値計算プログラム（システム）を構築した
- ② シーディングの基本的な効果を調査するために、富山湾近傍において気象制御にかかる小規模な予備実験を行い、シーディングの基本的な効果を調査した
- ③ 気象制御による被害低減効果の推定を、2014 年広島豪雨での斜面崩壊被害、2015 年関東東北豪雨での洪水被害、2022 年九州豪雨での洪水・斜面崩壊被害について実施し、既存手法と比べて改善された結果が得られた

### 2) 代表的な論文

Hiraga, Y., Mbugua, J., Kotsuki, S., Suzuki, Y., Chen, S.H., Hamada, A., Yasunaga, K. and Funatomi, T. (2026): Numerical experiments of cloud seeding for mitigating localization of heavy rainfall: a case study of Mesoscale Convective System in Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26, 1287-1303.

本研究では、オーバーシーディングと呼ばれる人工降雨戦略を用いて、中規模対流系に伴う極端な降雨の局所化を緩和する可能性を探った。人工降雨の高度と地理的範囲の変化が降雨パターンに及ぼす影響を詳細に調べた結果、豪雨域の上流側で播種範囲を水平方向に拡大する方が、垂直方向に拡大するよりも効果的であることがわかった。

Kurosawa, K., Okazaki, A., Kawasaki, F. and Kotsuki, S. (2025): Ensemble-based model predictive control using data assimilation techniques. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 32, 293-307.

本研究では、モデル予測制御（MPC）とアンサンブルデータ同化を組み合わせた非線形制御のための新しいフレームワークであるアンサンブルモデル予測制御（EnMPC）を開発した。さらに、制御目標を定義するための 2 つの異なるアプローチを提示した。ペナルティ項アプローチでは、モデル予測が事前に定義された制約に違反した場合に、制約情報を擬似観測値として同化することでペナルティを適用する。一方、軌道追跡アプローチでは、参照軌道から得られた擬似観測値を同化することで、システムを目標状態の方向に導く。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

フィードバック制御手法の開発

課題推進者： 大塚敏之（京都大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

本課題では、各時刻の大気状態に基づいて介入量を決定し未来の降水量を望ましい値に制御するフィードバック制御手法を開発している。介入による降水量の変化を予測するために数値気象予測モデルの感度解析を行い、感度を用いた逆問題を解くことで介入量を決定する。近似的に凸最適化問題として定式化することで、最適な介入量を効率よく計算できる。一方、介入の場所を特定しない広範囲の感度解析には大きな計算量を要する。そこで、数値気象予測モデルの全グリッドで状態を摂動させる代わりに、いくつかのグリッドをまとめたブロックごとに状態を摂動させることで感度解析の計算量を削減する手法を開発した。これは、ブロックごとに均一な介入を行うよう自由度を制限することに相当する。この手法により、90%以上の計算量削減が達成できた。

さらに、各時刻の大気状態に基づくフィードバック制御を実現するために、新しい介入最適化手法を開発した。計算量削減の観点からは、未来の複数時刻における介入時系列よりも各時刻1回のみの介入を最適化の方が望ましい。しかし、シミュレーション終端時刻での積算降水量を大きく減らす介入量を初期時刻のみで決定した場合、大きな介入が必要になり、感度解析が有効な線形近似が有効な範囲から逸脱してしまう。そして、感度解析の有効範囲外では、最適化した介入を加えたとしても目標通りの積算降水量が達成できるとは限らない。これに対して、小さな介入を複数時刻に分散させることで、線形近似が有効な範囲から逸脱することなく最終的な積算降水量を大きく減らすことが望ましい。そこで、目標値をすべての時刻で一定にするのではなく、時刻が進むにつれ徐々に減らしていくことで、介入量を各時刻に分散させる手法を開発した。そして、各時刻で最適化し直すフィードバック制御の方が、初期時刻のみでの最適化によるフィードフォワード制御より目標値によく一致する降水量を達成した。

その他、アンサンブル近似による感度解析手法と介入最適化手法も開発し 90%以上の計算量削減を達成した。また、感度解析と最適化の反復によって非線形性が無視できない場合でも有効な介入最適化手法を開発し、線形性を仮定した最適化と比べて 2.5 倍の降水量削減を実現した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

介入自由度を制限することで、降水量低減効果を劣化させずに感度解析の計算量を従来から 90%以上削減し、各時刻で介入量を最適化するフィードバック制御の手法を開発した。

### 2) 代表的な論文

谷川雄大, 大塚敏之 (2025): 降水量低減のための固定評価区間最適フィードバック制御, 第 68 回自動制御連合講演会講演論文集, 1518-1524 頁.

大気状態摂動による降水量の最適フィードバック制御手法を開発した。各時刻において、数値気象予測モデルを用いた感度解析を行い、所定の降水量目標を達成する介入（大気状態摂動）を凸最適化によって決定する。また、介入自由度を制限することで、感度解析の計算量を従来の 90%以上削減した。warm-bubble 実験で温位への介入を想定した場合、フィードバック制御によって従来よりも大きな降水量低減を精度良く達成できた。初期時刻のみで未来の介入時系列を最適化するフィードフォワード制御とは異なり、各時刻で実際の降水量変化に基づいて介入量を最適化し直すフィードバック制御の効果を示すことができた。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

データ駆動手法を用いた制御手法の開発

課題推進者： 小蔵正輝（広島大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

本年度は、2026 年度以降の陸域豪雨緩和可能性の確認に向け、海上豪雨生成で開発したデータ駆動型制御手法を制御数理の観点から再整理し、ブラックボックス最適化やモデル予測制御に基づく介入設計の有効性、計算効率、ロバスト性を評価した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

大規模気象モデルに対する介入入力を効率的に探索するため、ベイズ最適化を用いたブラックボックス最適化型の気象介入設計手法を開発および評価した。単発介入および逐次介入の検証により、陸域豪雨緩和へ展開可能な制御計算基盤を整備した。

### 2) 代表的な論文

Nagai, R., Bai, Y., Ogura, M., Kotsuki, S., and Wakamiya, N. (2025): Evaluation of the effectiveness of an intervention strategy in a control simulation experiment through comparison with model predictive control, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 32, 281-292. 気候変動により気象災害が激化する中、従来の気象予測を超えた新たな緩和戦略の構築が求められている。本研究では、小さな摂動によって気象システムを変化させる制御シミュレーション実験(CSE)の有効性を、制御工学で確立されたモデル予測制御(MPC)と比較して評価した。特に、カオスシステム制御の課題に対処するため、Lorenz-63 モデルに特化し、時間的深層展開を組み込んだ MPC アルゴリズムを開発した。数値実験の結果、特定条件下、特に予測期間が短い場合に、MPC はより少ない制御努力で高い成功率を達成することが示された。本研究は、気象制御可能性の理解を深め、今後の気象制御手法の設計に有用な知見を与えるものである。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

潜在変数モデルによる気象予測計算

課題推進者： 松岡大祐（海洋研究開発機構 グループリーダー）

## 1. 研究進捗状況と成果

前年度までに開発した Swin-Unet ベースの決定論的な気象予測モデルを改良し、予測モデルへの入力変数またはモデル内の潜在変数に摂動を付与することでアンサンブル予測が可能な確率論的気象予測モデルとして、Swin-Unet-BV と Probabilistic Swin-Unet の 2 つを開発した。Swin-Unet-BV は数値気象予測モデルによるアンサンブル予測でも用いられる Bred Vector (BV) 法をデータ駆動型予測モデルに実装したモデルであり、Probabilistic Swin-Unet は、Unet における 4 ヶ所のデコーダ部の任意箇所に摂動付与するモデルである。特に Probabilistic Swin-Unet においては、予測結果と真値との誤差を定義する損失関数として確率的予測における出力結果の確率分布と真値の確率分布の一致度を評価する指標である Continuous Ranked Probability Score (CRPS) を採用した。両モデルともに初期値にガウシアンノイズによる摂動を与えた場合と比較して、いずれの物理量においてもアンサンブルのスプレッドが大きく成長を示すという結果が得られた。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

評価データ中の期間（2019～2020 年）に九州地方で発生した全ての集中豪雨イベントを対象とした雨量の確率密度の比較において、予測時間 3 時間から 24 時間までの全てにおいて確率論的モデルによる予測結果は決定論的モデルによる予測結果と比較して、雨量の確率分布が大幅に改善された。現業モデル (MSM) と比較した場合、一部の予測時間における結果を除いて、雨量を過小推定する傾向にあるがバイアス補正や後処理によって改善の可能性が示唆された。

### 2) 代表的な論文

Hirabayashi, Y., Matsuoka, D. (2025): Data-driven Mesoscale Weather forecasting Combining Swin-Unet and Diffusion Models. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 21, 516–524. データ駆動型の気象予測モデルが進化を続ける中、特に「拡散モデル」は空間的な平滑化を抑え、集中豪雨などのメソスケール現象に不可欠な微細構造を再現できる点で注目されている。しかし、同モデルのメソスケール予測への応用は未だ限定的である。本研究では、決定論的モデルである Swin-Unet と拡散モデルを組み合わせた新たなアーキテクチャを提案した。最大の特徴は、両モデルを独立して学習させる点にある。これにより、決定論的モデルを更新しても拡散モデルを変更せずに済む柔軟な運用を可能とした。検証の結果、拡散モデルの導入により予測精度が向上することが示された。本手法は、柔軟性を維持しつつ豪雨予測等の精度を高める有効な手段として期待される。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

注意機構をもつ気象予測学習器の開発

課題推進者： 計良宥志（千葉大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

データ駆動型気象予測モデルに基づく降水制御の新たな手法を開発および評価することができた。データ駆動型気象予測モデルに対して現実における介入を目指した摂動に関する研究は著者らの知る限り、初めてである。特に、評価に関しては、WeatherBench2 で豪雨ケースに絞ってデータを収集し、GenCast モデルを用いて計算した介入の物理的妥当性を評価した。データ駆動型気象予測モデルの誤作動を狙った意図的に誤作動を誘発する介入を与える既存手法は、気圧レベルごとの介入量や潜在空間モデルの特徴空間での分布などの観点から物理的妥当性が低いことが明らかになった。介入手法のみならず、本研究で提案した評価フレームワークは今後新たな介入手法を開発する上で重要な基盤となる。今後は、介入手法の物理的妥当性をさらに高める予定である。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

データ駆動型気象予測モデルに基づく降水制御において、拡散モデルのサンプリング過程を勾配により誘導する新たな介入枠組みを提案した。従来のように大気状態へ直接摂動を与えるのではなく、生成過程（拡散過程）の軌道を制御することで、大気分布との整合性を保った介入を実現した点が本質的な貢献である。さらに、鉛直構造・潜在空間ダイナミクス・モデル間転移性の観点から物理的妥当性を体系的に評価し、敵対的摂動に比べて現実的な気象変化を誘導できることを実証した。

### 2) 代表的な論文

上山渉, 川本一彦, 計良宥志 (2025): 気象制御のための反実仮想説明法, 第 28 回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2025, IS3-085.

本研究では、拡散型気象予測モデルに対する降水量低減のための介入手法として、勾配に基づくガイドドサンプリングを提案する。従来の敵対的摂動と異なり、大気状態を直接操作せず、拡散過程の軌道を制御することで、物理的整合性を保ったまま降水の抑制を実現する。さらに、鉛直構造・変数別摂動、潜在空間での軌道逸脱、モデル間転移性の観点から評価を行い、WeatherBench2 の極端降水事例において、有効性と物理的妥当性の両立を示した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

レザバー計算を用いた気象情報の潜在空間表現

課題推進者： 徳田慶太（順天堂大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

本課題の目的は、低次元化技術とレザバー計算を組み合わせ、カオス力学系を精度よく時間発展させる方法を開拓することである。また本年度より、アトラクタ共存におけるフラクタル・ベイスンバウンダリーのような、相空間における入り組んだ運命境界の有無を気象現象において明らかにすることも目標とした。

当該年度において、まず、レザバー計算を用いた予測・制御手法の構築に取り組んだ。カオス力学系の特性により、アンサンブルの時間発展が一時的に低次元な分布を形成することに着目し、この低次元表現に対してレザバー計算による回帰予測を適用する制御手法を考案・実装した。Lorenz-96 モデルを用いた数値実験の結果、本手法で算出した制御入力によって極端イベントを効果的に回避できることを示した。

次に、気象モデル SCALE-RM を用いた 2015 年 9 月関東・東北豪雨の再現実験において、介入操作に対する降水量の応答特性を解析し、フラクタル的な運命境界の有無を検討した。洋上へのシート設置を模擬したグリッドスケールの風への抵抗を介入とし、シート（幅 200m×高さ 500m のシート；凧）の幅を 1mm 単位で変化させた際の降水量変化を調べた結果、最大降水量が一見ランダムに変化する強い鋭敏性と、統計的な長距離相関（フラクタル性）が存在することを明らかにした。これは、気象システムにおいて複雑に入り組んだ運命境界が存在することを示唆している。

さらに、限られた局所的介入を用いて極端イベントを減少させるボトムアップ型制御手法を開発し、Lorenz-96 モデルにおいて有効性を確認した。これは現実的な制約下を想定し、限られた介入候補の中から動的に最適解を選択する手法である。Lorenz-96 モデルを用いた検証では、わずか 1~2 地点の局所的な介入によって極端イベントを極めて高い確率で回避できることを実証した。以上の成果により、当該年度のマイルストーンを達成した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

低次元化された表現に対してレザバー計算を適用し、極端イベントを回避する制御枠組みを構築したこと、および気象モデル SCALE-RM において介入量に対する降水量の応答にフラクタル的な鋭敏性が存在することを明らかにしたことである。また、ボトムアップ型制御手法により、限られた介入オプション下でも極端イベントを高い確率で回避できることを数値実験で実証した。これらは、将来の気象制御における理論的基盤となる成果である。

### 2) 代表的な論文

Mitsui, T., Kotsuki, S., Fujiwara, N., Okazaki, A., and Tokuda, K. (2025): Bottom-up approach for mitigating extreme events with limited intervention options: a case study with Lorenz 96 model, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 32, 457-469.

本論文では、気象制御における現実的な制約を想定し、限られた介入候補の中から動的に最適解を選択する「ボトムアップ的制御手法」を提案した。カオス力学系の代表例である Lorenz-96 モデルを用いた検証において、わずか 1~2 地点の局所的な介入のみで、極端イベントを 94%から 99%以上の極めて高い確率で回避できることを示した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

クープマンモード分解による低次元化

課題推進者： 薄 良彦（京都大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

気象制御に必要となるデータ分析の難しさは、気象ダイナミクスの超大規模・強非線形系から生成される時系列データに内在する力学的特徴量をいかに抽出するかにある。本課題では、非線形時系列解析技法であるクープマンモード分解に着目し、気象予測の時系列データを観測量と呼ばれる関数の線形発展として捉えることで、気象制御に必要となる力学的情報 ―ここでは、時系列データを近似表現する線形サロゲートモデル― を抽出する技法を考案した。そして、SCALE-RM による warm-bubble シミュレーションを用いた実験により、提案技法が良好に動作することを示し、近似精度とモデル次元とのトレードオフを陽に考慮したサロゲートモデルが抽出され得ることを実証した。この実証を踏まえて、提案技法を現実の気象制御に必要となるデータ分析に発展させるために、①提案技法のアンサンブル予測データへの適用とその数理基盤の開発、②低次元サロゲートモデルを用いた非線形・非ガウスデータ同化技法の開発、③低次元サロゲートモデルによる豪雨形成メカニズムの解明について研究を進めている。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

非線形時系列解析技法であるクープマンモード分解に着目し、気象制御に必要となる力学的情報 ―時系列データを近似表現する線形サロゲートモデル― を抽出する技法を考案し、SCALE-RM による warm-bubble シミュレーションを用いた実験により、提案技法が良好に動作し、近似精度とモデル次元とのトレードオフを陽に考慮したサロゲートモデルが抽出されることを実証した。

### 2) 代表的な論文

三輪雄太, 薄良彦, 小槻峻司 (2026): ペロン-フロベニウス作用素を用いた非線形系の状態推定に関する一検討, 第13回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム講演論文集, 2M8-1.

クープマンモード分解により抽出される低次元サロゲートモデルの(ある種の)双対として近似表現される線形作用素がペロン-フロベニウス作用素である。この作用素が状態空間における密度の線形発展を与えることに着目することで、非線形・非ガウス系の状態推定に関する数値技法を考案した。ここでは、ダuffing系から誘導される二次元離散力学系の定常カオスを用いた実験により、提案技法が良好に動作することを実証した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象情報のランドスケープ解析

課題推進者： 井元佑介（京都大学 特定准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、当初計画に基づき、豪雨形成の実データに対してランドスケープ解析手法を適用し、組織化・非組織化シナリオの分岐図作成を進めた。特に、高次元かつ複雑なアンサンブル気象予測データを解析可能にするため、主成分分析や多様体埋め込みなどの低次元化手法に加え、データ分布や軌道構造を評価する幾何学的評価指標を組み合わせたランドスケープ解析ワークフローを確立した。これにより、豪雨形成過程における状態遷移や分岐構造を、可視化・定量評価の両面から解析する基盤を整備した。加えて、埼玉大学の横山知郎教授との共同研究において、豪雨現象の制御可能性評価を目的とした研究を進める過程で、現実的な制御入力に基づき対象気象現象が制御可能か否かを判定する新しい数学理論 ( $\varepsilon$ -attracting basin) を確立した。この理論は、豪雨制御という応用的課題から着想を得て構築されたものであり、非線形力学系に対する制御可能性を実用的な条件下で評価する枠組みを与える点に特徴がある。理論的な新規性に加えて、計算コストが低く、実データ解析へ展開可能な実用的有用性も兼ね備えている。同理論の成果はプレプリントサーバーに公開されており、現在は 2015 年関東・東北豪雨のアンサンブル気象予測データへの適用を開始している。これにより、分岐図作成と制御可能性評価を統合した解析基盤が整備されつつあり、当初計画のマイルストーンは順調に達成されている。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

横山知郎教授との共同研究において、豪雨現象の制御可能性評価を目的として、新しい数学理論「 $\varepsilon$ -attracting basin」を構築した。本理論は、現実的な制御入力の下で対象とする気象現象が制御可能か否かを判定する枠組みを与えるものであり、豪雨制御という応用的課題から着想を得て発展した点に特徴がある。従来のランドスケープ解析による分岐構造の可視化に加えて、どの状態遷移が制御入力によって実現可能であるかを定量的に評価できるようになり、豪雨形成過程の理解から制御戦略設計へと研究を大きく発展させた。また、本理論は気象現象に限らず、制約付き制御入力の下での非線形力学系の到達可能性・安定性解析へ拡張可能であり、数学理論としても今後の発展性を有している。本成果は理論的な新規性と実データ解析への適用可能性を兼ね備えており、プレプリントサーバーへの公開および 2015 年関東・東北豪雨データへの適用を開始している。

### 2) 代表的な論文

井元佑介, 横山知郎 (2025): 力学系の粗い吸引領域による制御可能状態の判定, *2025 年度応用数学合同研究集会*, A5-2.

気象現象などのリアルタイム大規模制御において、現時点の状態が現実的な制御入力によって望ましい未来状態に到達可能かを判定すること、また制御可能な場合に必要な制御入力の見積もることは、大規模制御の実施判断において重要である。本研究では、一般の力学系に対し、制御入力や有限誤差を考慮した  $\varepsilon$ -吸引領域 ( $\varepsilon$ -attracting basin) を導入する。この概念により、状態空間上の点が  $\varepsilon$  以下の制御入力や有限誤差によって望ましい未来状態に到達可能か否かを判定できる。また、 $\varepsilon$ -吸引領域がフィルトレーションを構成するという性質を用いることで、必要な制御入力の見積もることも可能となる。さらに、この概念を過去の気象事例のアンサンブル予測データに応用し、さまざまな時点や状態において気象現象が制御可能かどうかを議論する。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御計算システムの開発

課題推進者： 岡崎淳史（千葉大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、Lorenz-96 モデルより複雑な簡易気象モデルである SPEEDY および SCALE を対象として、モデル予測制御(MPC)を用いた極端現象の予測・制御実験を行った。さらに、SCALE を対象とした SCALE-LETKF-MPC システムを開発し、予測と制御を統合した実験環境を構築した。

SCALE-LETKF-MPC システムでは、アンサンブル予測のうち一定数のメンバーが豪雨を予測した段階で制御入力推定を開始するものとした。また、予測系と制御入力推定系を独立して実行可能な設計とし、大型計算機上で安定的に動作することを確認した。制御入力には実現可能性を考慮した制約条件を設定し、複数の事例に対して制御実験を実施した結果、対象領域を望ましい状態へ誘導できることを確認した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

アンサンブル予測とデータ同化を組み合わせた「EnMPC」を提案し、不確実性を考慮したロバストな気象制御手法を構築した。2021 年 8 月の九州豪雨事例を対象に、非静力学気象モデル SCALE-RM を用いて検証を行った。制御手法として、海上の仮想障害物による摩擦強制を適用した結果、目標領域における累積降水量を平均 23.4%削減することに成功した。また、観測ノイズを考慮した条件下でも安定した効果を確認した。降水分布や鉛直流の変化を解析した結果、障害物によって対流活動の組織構造そのものが再編成されることで気象が望ましい方向へ制御されていることを明らかにした。

気象制御における制御位置の最適化に着目し、極端現象と最も相関の高い地点を推定する手法を提案した。力学系モデルである Lorenz-96 モデルを用いた実験では、感度最大地点の 1 地点のみに制御を加えた場合でも、平均 99.60%の高い制御成功率を達成し、従来法と比較して制御コストを低減できることを示した。この手法を、簡易気象モデルである SPEEDY に適用した降水量制御実験では、一部で降水量低減効果を確認したものの、一方で、降水量が増加する事例も見られた。実大気モデルにおいて十分な制御効果を得るには至らなかったが、本手法の実大気への適用可能性を示した。

### 2) 代表的な論文

Kurosawa, K., Okazaki, A., Kawasaki, F., Kotsuki, S. (2025): Ensemble-based model predictive control using data assimilation techniques, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 32, 293-307.

本研究は、非線形システム向けの新しい制御手法「EnMPC」を提案した。これはモデル予測制御(MPC)とアンサンブルデータ同化を組み合わせたもので、アンサンブルカルマン smoother などを用いて制御入力を効率的に推定する手法であり、従来の MPC に比べ、高次元・非線形問題での計算負荷を低減しつつ、不確実性や制約条件への対応性能を向上させることができる。本手法では、2 通りの方法(参照軌道への追従、制約違反へのペナルティ付与)で、望ましい状態へシステムを導くことができる。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御計算の計算量削減

課題推進者： 小槻峻司（千葉大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

気象制御の難しさは、「ある介入が望ましい変化をもたらすと想定できる接線形近似の範囲内」では、大きな気象変化を起こせないことにある。そこで、より長時間のアンサンブル予測を実施して、望ましい気象場とそこに至るトラジェクトリー（軌跡）を発見し、そのトラジェクトリーに対してモデル予測制御をかける手法を考案した。2024 年度に概念提案したこの手法を、低次元力学系モデル Lorenz-96 モデル（特定のパラメーター値と初期条件に対してカオス的な解を持つ）を用いた実験で、提案手法が良好に動作し、十分に小さい入力で制御可能であることを実証した。この概念実証が成功したことにより、この提案手法を現実の気象制御に発展させていくために、①望ましいトラジェクトリーを発見するための AI によるアンサンブル生成、②深層学習器を用いたアンサンブル降水予測情報の超解像、③望ましいトラジェクトリーを解釈する手法の開発、④データ同化計算の高度化・高速化を研究している。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

望ましい気象場とそこに至るトラジェクトリーを発見し、そのトラジェクトリーに対してモデル予測制御をかける手法について、Lorenz-96 モデルを用いた実験で提案手法が良好に動作し、十分に小さい制御入力で気象場の制御が可能であることを実証した。

### 2) 代表的な論文

Kotsuki, S., Shiraishi, K. and Okazaki, A. (2025): Ensemble data assimilation to diagnose AI-based weather prediction models: a case with ClimaX version 0.3.1., *Geoscientific Model Development*, 18, 7215–7225.

人工知能（AI）に基づく気象予測の研究は急速に発展しており、高度な動的数値気象予報（NWP）モデルと遜色ない性能を示している。しかし、AI ベースの気象予測モデルとデータ同化を組み合わせた研究は、データ同化システムの評価に長期にわたる連続的なデータ同化サイクルが必要となるため、依然として限られている。本研究では、AI ベースの気象予測モデル ClimaX にデータ同化法の一つであるアンサンブルカルマンフィルターを初めて適用することに成功し、安定したデータ同化サイクルが可能であることを実証した。AI ベースのアンサンブル予測は、観測データが少ない領域において妥当かつ有益な誤差共分散を提供した。

武藤裕花，重本達哉，近藤卓也，福重さと子，嘉村雄司，堀智晴，小槻峻司（2026）：気象制御の実現に向けた法的課題の検討，*水文・水資源学会誌*，39 巻，1 号，22–36 頁。

気象制御技術が適切に実社会に導入されるためには、工学・理学的な技術開発に加え、当技術の導入に関わる倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues; ELSI）の解決が極めて重要である。そこで本論文では、気象制御技術に関連する ELSI の中でも特に法的課題に着目し、まず防災学者・気象学者・法学者らを交えて気象制御における法的課題を洗い出すとともに、それらの位置付けを整理した。さらに、気象制御のための法制度設計に向けて基盤となりうる既存の法制度の調査や新しい法的枠組の必要性の検討を行った。本論は、新たな試みである気象制御技術の開発・社会実装を行うための法的課題の検討の肝心な第一歩であると考えている。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

海上豪雨形成のモニタリングに向けた観測シミュレータの開発

課題推進者： 金丸佳矢（情報通信研究機構 研究員）

## 1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、①観測シミュレータの開発、②静止/小型衛星群による高頻度観測の利用検討、③モニタリング・屋外小規模実験の実現性検討を進めた。①については、屋外小規模（シーディング）実験の実施において過冷却水滴雲の把握が重要となったため、観測シミュレータを用いて様々な観測プラットフォームでの検討が可能となるように機能拡張を行った。また、正確な放射計算・散乱計算を行えるよう既存の衛星シミュレータの機能を流用した機能拡張を行った。②については、小型衛星搭載の水蒸気サウンダー観測データを、海上豪雨予測や制御計算に inputs する環境場データとして（データ同化）利用することを目指して、データ品質の調査を行った。また、静止気象衛星ひまわりのデータを利用して晴天域は水蒸気観測を、曇天域は豪雨や過冷却水滴雲のモニタリングを目指した手法検討を行った。③については、屋外小規模実験の実施に向けた計画準備を進め、観測システムや実施のオペレーションについて検討を行った。これらを行うことで、介入の実施や効果に必要な観測対象を具体化し、海上豪雨のモニタリングシステムの具体化につながった。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

屋外小規模実験を実施するにあたって、有望な観測対象の一つが過冷却水滴雲と具体化されたため、観測要求そのものも具体化が進んだ。介入のための判断や介入の効果によって起こる雲微物理特性の変化を把握するためには、より正確な放射計算・散乱計算を行う必要がある。既存の衛星シミュレータの機能を流用し、機能呼び出しを可能とする拡張を行ったことで、精緻な散乱計算が容易になった。また、その機能を用いて静止気象衛星の可視赤外放射計の観測値と低軌道衛星搭載雲レーダー・ライダー観測値を組み合わせた過冷却水滴雲の検出手法の検討にもつながった。

### 2) 代表的な論文

**Kaya Kanemaru (2025): Development of an observation simulator for monitoring heavy precipitation over oceans, *AOGS 2025*, AS34-A014, Poster.**

本研究では、海上で発生・発達する豪雨を監視するための観測シミュレータを開発した。数値気象シミュレーションの結果を用いて、新しい観測機器（雲内の水蒸気分布を測定するレーダーなど）の実現可能性を調査し、海上豪雨の発達を監視するための観測システムへの有効性や実現可能性（方法、コスト、機器数など）を検討した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象モデルを用いた介入操作の有効性評価

課題推進者： 安永数明（富山大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

当該年度のマイルストーンは、(1) 5 つ以上の豪雨事例を対象として、初期場を変えた再現実験および介入実験を 20 セット以上実施すること、(2) 介入効果を定量的に評価すること、(3) 実際の気象を対象とした試験的な気象介入を計画すること、の 3 点である。

(1) については、2021 年 8 月 12～13 日に九州地域で発生した豪雨事例に加え、同年 8 月 14～15 日に九州北部で発生した豪雨、2017 年 7 月に福岡県朝倉市で発生した豪雨、2020 年 7 月に熊本県球磨川流域で発生した豪雨、2025 年 8 月に長崎県から熊本県付近で発生した豪雨を対象として、再現実験および介入実験を実施した。

(2) については、2021 年 8 月 12～13 日に九州地域で発生した豪雨事例を対象として、介入効果の定量的評価を行った。具体的には、標準実験の開始後 12 時間の時点で、各格子点の高度 300m 以下の水蒸気混合比に振幅 0.6 g/kg のランダム摂動を付与し、48 時間積分のアンサンブル実験を 100 通り実施した。さらに、標準実験の各メンバーについて、積分開始から 6、12、18、24 時間後に、摂動を与えず介入のみを付与する追加実験を実施し、その変化を主成分分析により評価した。その結果、課題 5-2 で実施した感度解析に基づいて介入を行った場合、5～8%程度の豪雨低減効果が確認された。

(3) については、2026 年 1 月に 4 日間、航空機を用いたシーディング実験を実施した。これにより、航空機の手配・調整、シーディング手法の検討、対象事例の選定など、実際のオペレーションに関わる課題の洗い出しを行った。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

気象介入に関する技術の蓄積、人材育成、さらには社会的理解の促進を図ることは、2030 年頃の実際の気象制御実験の実施に向けて極めて重要である。その第一歩として、2025 年度には航空機を用いたシーディング実験を実施した。本課題では、航空機の手配・調整、シーディング手法の検討などを担い、実験の実施を通じて、実際のオペレーション上の課題を洗い出した。

### 2) 代表的な論文

安永数明, 濱田篤, Houtian He, Fira Syarif (2025): 豪雨の抑制効果の抵抗物の設置位置に対する依存性, *日本気象学会 2025 年度秋季大会*, A563.

本ムーンショット目標 8 の小槻プロジェクトの現時点での進捗を広く発信し、気象制御の可能性に対する理解と関心を喚起することを目的に、日本気象学会 2025 年度秋季大会の専門分科会「予測可能性から制御可能性へ」において、「豪雨の抑制効果の抵抗物の設置位置に対する依存性」という題目で、気象制御研究の背景および当該プロジェクトで得られた成果について発表を行った。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

海上豪雨形成の可能性がある事例選定

課題推進者： 濱田 篤（富山大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

本課題の当該年度マイルストーンは、(1)介入操作の効果を表すインデックスを1つ以上提案し、2024年度に絞り込んだ介入候補事例について介入操作の効果を定量化する、(2)介入操作候補事例の年間あたりの数を見積もる、および、(3)小規模観測を実施し、その結果を定量的に評価するとともに、小規模屋外実験が実施された場合には、実験結果を定量的に評価する、である。

(1)については、課題5-1が実施した高解像度 ( $\Delta x = 800 \text{ m}$ ) アンサンブル数値実験を用いた感度解析を実施し、ターゲット降水量とモデル各格子点における6時間平均降水量とのラグ回帰係数と、降水量差(介入実験-非介入実験)との内積値が、介入効果を表す指標になり得ることを示した。(2)については、気象庁「線状降水帯の事例」データを用いて、九州7県+山口県の計8県における都道府県単位の線状降水帯検出数を集計し、介入候補事例が1年あたり約4事例であることを示した。(3)については、2025~2026年冬季に富山湾において実施された雲シーディング実験に関連して、課題5-1、5-5、PM班らと緊密に連携し、富山県入善町に観測サイトを整備し、偏光ライダー・ドップラーライダー・マイクロ波放射計等を用いた観測を実施した。

次年度は、本年度までに選定・解析した事例に加えて、再解析データや衛星降雨観測データから10例以上の豪雨事例を抽出し、開発を進めている介入効果インデックスを適用した統計解析を実施するとともに、本年度に実施した観測の結果を踏まえて、2026~2027年冬季の屋外実験に関連する観測を計画する。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

高解像度アンサンブル数値実験に基づいて、気象介入効果を定量化し、介入候補地点をピンポイントに絞り込める可能性を示した。当初計画では2027年度以降に実施する予定であった小規模屋外実験を、前倒して実施した。

### 2) 代表的な論文

Hamada, A., K. Yasunaga, H. He, and M. Syarifuddin (2025): Feasibility of upstream weather intervention for downstream heavy rainfall mitigation based on ensemble sensitivity analysis, *AOGS 2025*, AS34-A009, Oral.

地球温暖化に伴う豪雨災害の軽減を目的として、上流海上で人工的に降水を促進し、下流陸域の降水を抑制する可能性を検討した。2021年8月の九州豪雨を対象に、SCALE-RMによる100メンバーアンサンブル実験を実施し、目標領域降水量との感度解析を行った。その結果、目標領域の南西100~200kmの海上において、12~24時間前の降水と有意な負の相関が認められ、この領域での介入が後の豪雨軽減につながる可能性が示唆された。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

アンサンブル気象予測実験

課題推進者： 平賀優介（東北大学 助教）

## 1. 研究進捗状況と成果

本課題の当該年度のマイルストーンは、(1)数値気象モデル WRF による 5 事例以上の豪雨イベントの再現計算の実施、(2)そのうち精度良く再現された事例を対象とした気象介入効果の定量化である。これまでに、近年発生した線状降水帯の 5 事例を対象として、数値気象モデル WRF v4.1.2 を用いた再現実験を実施した。対象とした事例は、2014 年広島豪雨、2017 年九州北部豪雨、2020 年球磨川豪雨（令和 2 年 7 月豪雨）、2021 年九州北部豪雨、2022 年東北・北陸豪雨である。そのうち、WRF による再現性が高い 2014 年広島豪雨、2017 年九州北部豪雨、2021 年九州北部豪雨を対象に、オーバーシーディングによる集中豪雨の局所化の緩和を狙った数値実験を実施した。シーディングは、2 モーメントの雲微物理スキームにおける氷晶核数の操作により再現した。結果として、3 つの事例すべてにおいて、豪雨域の降水が風下へ分散される効果を確認した。このメカニズムを解明するため、主に凝結物や熱環境場の変化に着目した分析を実施し、オーバーシーディングとして期待する効果が働いていることを確認した。

また、気象介入手段として、シーディングだけではなく加熱や加水を想定し、数値気象モデル上でそれらを精緻に再現する手法を開発した。2014 年広島豪雨を対象に、加熱・加水実験を実施し、豪雨の改変に一定の効果が得られた。さらに、数値気象モデルにおけるシーディングの表現の精緻化を狙い、エアロゾルの予報変数化が可能な雲微物理スキームを実装した。この雲微物理スキームを改変することにより、シーディング数値実験を実現する手法も併せて開発した。次年度は、この新たに開発した手法により、より現実的なオーバーシーディング数値実験に取り組む。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

複数の線状降水帯事例に対し、オーバーシーディングによる集中豪雨の緩和を定量的に示した。数値気象モデルにおいて加熱・加水・シーディングなどの気象介入を再現する手法を開発し、シーディング手法の精緻化にも成功した。これにより、次年度以降の数値実験に適用可能な基盤を構築した。

### 2) 代表的な論文

Hiraga, Y., Mbugua, J. M., Kotsuki, S., Suzuki, Y., Chen, S. H., Hamada, A., Yasunaga, K., Funatomi, T. (2026): Numerical experiments of cloud seeding for mitigating localization of heavy rainfall: a case study of Mesoscale Convective System in Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26, 1287-1303.

本研究は、2014 年 8 月の広島豪雨を対象に、数値気象モデルを用いてオーバーシーディングによる集中豪雨の局所化の抑制効果を検証したものである。雲微物理スキームにおける氷晶核数の操作によりオーバーシーディングを再現し、気温-22℃~-12℃の中上層対流圏へのオーバーシーディングが最も効果的であることを示した。不均質凍結の促進により水蒸気が消費され、雨粒の成長が抑制されることで、豪雨域の降水が風下へ分散された。実験では、オーバーシーディングを実施する鉛直層を厚くするよりも、上流側に水平面積を広げる効果が高いことが示され、最大で 3 時間降水量を 32%減少させた。今後はオーバーシーディングのモデル精緻化や、他事例への適用性の検討が必要である。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

クラウドシーディングの物理的な理解と有効性評価

課題推進者： 端野典平（高知工科大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

先行研究に基づき、ドライアイスによる氷粒子の形成機構を気象モデルの雲降水スキーム（Advanced Microphysical Prediction Scheme, AMPS）に導入した。理想化された冬季の層状過冷却雲に擬似シーディングを行い、先行研究と同様に氷粒子が形成されることを確認した。しかし、氷粒子の鉛直積分量の時間変化に違いがあり、降雪量は先行研究より減少する結果となった。

AMPS の積乱雲の再現性は良好である一方、雲凝結核の数濃度の変化に対する降水量の変化が先行研究と定性的に異なることがわかった。対象とした CAIPEEX 観測実験の積乱雲事例については、雲凝結核の観測や飛行機による雲水や氷粒子の観測とともに、定評のある雲降水スキーム（Spectral Bin Microphysics, SBM）の結果が報告されている。AMPS は概ね、SBM と同様の過冷却水滴の鉛直分布や数密度を再現し、氷含水量については観測により近い再現結果となった。SBM の場合、雲凝結核が多い状況（Polluted）には、少ない場合（Clean）に比べて降水量を多く再現することが報告されている。しかし、AMPS の場合、Polluted の実験の方が Clean よりも降水量が小さくなった。また、水蒸気を 20%増やす実験の場合、SBM と異なり、AMPS では Polluted と Clean とともに降水量は増加する一方で、これらの降水量に大きな違いは見られなかった。上記の事例でも見られたスキーム間の違いは、氷粒子の多様性の表現や氷晶核形成過程の定式化の違いに起因すると考えられる。

海洋性の層積雲について、2 次元擬似シーディング実験を行い、降水量の変化量はシーディング対象の雲の水の混相状態に大きく依存する結果を得た。この実験は実際のシーディング実験に向けた調査の一環である。擬似シーディングをする雲として、過冷却水滴のみ存在すると仮定した雲（Exp1）と過冷却水滴と氷粒子が混在する雲（Exp2）を設定した。シーディングの影響領域における 4 時間の平均降水強度は 0.2mm/hr である。シーディングをすることで 0.68~0.72mm/hr の降水増加が得られた。一方、Exp2 においてはシーディングの効果は限定的である。降水強度の変化は Exp1 に比べ 100 分の 1 と小さい変化となっている。このため、観測からシーディング効果を測るには工夫が必要であること、シーディング前に雲の混相状態を推定する必要があることがわかる。この結果は過去の研究と定性的に一致するものである。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

ドライアイスシーディングスキームの AMPS への導入と、積乱雲の事例に対する AMPS 再現性の検証、日本海上の層積雲を想定した擬似シーディング実験の実施を行った。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

介入効果の地上観測検証

課題推進者： 吉見和紘（富山県立大学 講師）

## 1. 研究進捗状況と成果

当該年度のマイルストーンは、(1) 主要観測機器による初期観測体制を構築すること、(2) シーディング効果可視化のための処理アルゴリズムの初期検証を完了すること、の2点である。(1) については、富山県入善町の園家山キャンプ場を拠点として、AWS（自動気象観測装置）およびLPM（レーザー降水量モニター）を中核とする地上観測網を整備し、観測地点選定、電源・通信、時刻同期、データ収集・保存フローを整理したうえで、2026年1月5日から15日にかけて予備実験を実施した。その結果、期間を通じて安定的かつ連続的なデータ取得に成功し、構築した初期観測体制が実運用に耐え得ることを確認した。(2) については、国土交通省気象レーダーを活用し、仰角・高度・方位角を可変とする三次元降水構造の可視化アルゴリズムを開発した。反射強度および偏波パラメーターを共通地理座標系に統合し、任意鉛直断面や時系列変化を把握可能な解析基盤を整備した。予備実験期間中は富山県水橋にある国土交通省X帯MP気象レーダーが機器メンテナンス中であったため、実験データを用いた十分な検証は次年度課題となったが、初期検証として必要な処理フローと可視化基盤は確立できた。さらに、可搬型気象レーダーの導入検討についても当初計画を前倒しして着手し、設置候補地、必要電源容量、通信方式、運用シーケンス等を整理した。これにより、翌年度に予定するドローン等による鉛直観測の試行および静的観測データとの統合解析フロー構築に向けた準備を大きく前進させた。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

本年度において目標達成に最も寄与した成果は、シーディング実験を地上から科学的に検証するための観測体制と解析基盤を、一体的に整備できた点である。具体的には、富山県入善町の園家山キャンプ場にAWSおよびLPMを設置し、LTE回線を介したリアルタイム監視を含む安定的な観測運用を実現した。その結果、AWSデータから冬季日本海側に特徴的な気象場を把握できること、LPMデータから降水粒子の粒径・落下速度分布を取得し、降水微物理特性の把握に活用できることを確認した。あわせて、既存のX帯・C帯レーダーのデータを用いた任意断面可視化ツールを整備し、降水セルの鉛直構造や時間変化を即時に把握できる解析基盤を構築した。これにより、介入操作の有無と対応づけて観測情報を比較・検証するための土台が整い、翌年度に予定するドローン+降水粒子撮像ゾンデによる鉛直観測や、可搬型レーダーを含む観測システムの試行へ円滑に接続できる見通しを得た。本成果は、本課題の本年度（4年目）マイルストーン達成に直接寄与しただけでなく、次年度以降の観測高度化と介入効果検証の実効性を高めるうえで中核的な役割を果たすものである。

### 2) 代表的な論文

藪田哲基，馬淵慎也，吉見和紘（2026）：ドローン搭載と地上設置したRainscopeの粒径分布と落下速度の比較，令和7年度土木学会中部支部研究発表会，II-05.

上空の降水粒子観測は気象レーダーなどによって行われているが、平均的に高度500m以下の観測を定量化するには、いくつかの課題がある。本研究では、この高度帯における降水粒子観測に全天候型ドローンを用いる手法について検討した。具体的には、ドローンのフライトデータおよび、Rainscopeと呼ばれる降水粒子撮像ゾンデによる観測結果を整理し、その有効性と課題を評価した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御への社会制度設計の検討

課題推進者： 重本達哉（同志社大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

現行法制度を前提にして海上における豪雨制御の実施主体を検討したところ、国土交通省の外局である海上保安庁が有力な実施主体候補の1つであることが分かった。すなわち、同庁の組織法上の根拠である海上保安庁法では、「天災事変その他救済を必要とする場合における援助に関すること」「船舶交通の障害の除去に関すること」「海上災害の防止に関すること」などを同庁の所掌事務として明確に規律している（同法5条参照）。また、同庁の防災業務計画（2021年9月）において、同庁による災害応急対策が多様に予定されているところ、大規模災害発生の懸念を踏まえた「海上保安能力強化に関する方針」（2022年12月16日海上保安体制強化に関する関係閣僚会議決定）を受けて、同庁の大規模自然災害対策能力は随時増強中でもある。さらに、防衛省内部のいわゆる3要件（①緊急性、②公共性、③非代替性）などに照らせば、海上における豪雨制御の有力な実施主体候補の1つとして海上保安庁を挙げることは十分可能である。ただし、災害対応における海上保安庁と地方公共団体との連携に係る法的規律の具体化などが、（TEC-FORCE のリエゾン派遣等による実例が、解決の糸口になり得るものの）その要否を含めて課題として残っている。なお、たとえ人工降雨による豪雨制御であっても、異常気象時における航行制限等を適時適切に行うべき海上保安庁（厳密に言えば、当該管区海上保安部長：海上交通安全法32条以下など）自体に資するところは一定程度あるように思われる。その他、気象制御の実装に向けた実験段階で人的被害の発生しにくい僻地や島しょ部を選択する場合には、水循環に係るリスクに強い関心を抱かざるを得ない市町村との密なリスクコミュニケーションがかえって重要になり得ることを裁判例の分析等を通じて明らかにするとともに、ELSI基盤ユニットの一員として、「MS8における気象制御の研究開発に関する責任ある研究・イノベーションのための原則」（RRI原則〔旧倫理原則〕）の暫定案を策定・公表した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

現行法制度の検討を踏まえて、海上保安庁が海上における豪雨制御の有力な実施主体候補の1つであることを明らかにした。

### 2) 代表的な論文

**武藤裕花，重本達哉，近藤卓也，福重さと子，嘉村雄司，堀智晴，小槻峻司（2026）：気象制御の実現に向けた法的課題の検討，水文・水資源学会誌，39巻，1号，22-36頁．**

気象制御技術に関連する倫理的・法的・社会的課題（ELSI）の中でも、特に法的課題に着目し、防災学者・気象学者・法学者らを交えてKJ法により気象制御における法的課題の洗い出しを行った。さらに、それらの位置付けを整理・議論することにより、重要な論点として、①気象制御の実施主体および実施基準、②気象制御に関わる補償のあり方が抽出されたため、これらに着目し、気象制御のための法制度設計に向けて基盤となりうる既存の法制度の調査や新しい法的枠組の必要性を検討した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御における国家補償

課題推進者： 近藤卓也（北九州市立大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

気象制御に固有の法的障壁をリスト化することを目的に、これまで予防接種法、公害健康被害補償法、原子力損害賠償法の仕組みを分析してきたが、本年度は新たに宇宙活動法を比較対象に選定した。ロケット打上げが最先端の科学技術を利用するものであることから、宇宙活動法は事業者が無過失かつ無限の賠償責任を課しており、この点は気象制御の法制化においても参照に値すると思われる。

また本年度は、補償制度を設けずに気象制御を実施した場合の被害対応についての思考実験も行った。我が国の国家補償制度は、国家賠償と損失補償に二分される。前者の場合、職務上の注意義務を果たしている限り、賠償責任は認められない。後者の場合、気象制御による損失は「特別の犠牲」に該当しないと解されうるし、財産権以外は補償されない。そうすると、既存の国家補償制度で十分な救済を図ることは難しく、気象制御に係る補償制度を創設する必要性は否定しがたい。

さらに、気象制御に係る補償制度の対象範囲の画定作業にも着手した。具体的には、気象制御によって生じうる被害として、豪雨による身体的・財産的損害、渇水被害、農林水産業への影響などを想定したうえで、気象制御によって雨量が増加/減少した場合、奏功した/しなかった場合にケースを分類して、補償対象となる被害の洗い出しを行った。

以上のように、宇宙活動法の参照点および補償制度の創設を検討する必要性を明らかにしたこと、補償対象となる被害の特定化に着手できたことを、本年度の成果として挙げることができる。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

これまでの研究は、気象制御に関する法律が制定されることを前提に、関連法との比較検討を通じて、補償制度を創設する際の留意事項を洗い出してきた。しかし、その前提として、仮に補償制度を設けずに気象制御を実施し、何らかの被害が発生した場合、既存の国家補償制度では対応できないのかという問題を検討する必要がある。既存の国家補償制度は、違法な行政活動によって生じた損害を賠償する国家賠償と適法な行政活動によって生じた損失を補償する損失補償に分かれるが、気象制御による被害についてはいずれによっても十分な救済を図ることは難しい。そのため、気象制御に係る補償制度の創設を検討する必要性は否定しがたく、またその場合の方向性としては「国家補償的精神に基づく法的措置」という位置付けが相当であるとの試論を提示することができた。

### 2) 代表的な論文

**武藤裕花，重本達哉，近藤卓也，福重さと子，嘉村雄司，堀智晴，小槻峻司（2026）：気象制御の実現に向けた法的課題の検討，水文・水資源学会誌，39 巻，1 号，22-36 頁．**

本研究では、気象制御技術に関連する倫理的・法的・社会的課題(Ethical, Legal and Social Issues; ELSI)の中でも、特に法的課題に着目し、KJ(カード分類による発想整理)法により気象制御における法的課題の洗い出しを行った。さらに、それらの位置付けを整理・議論することにより、重要な論点として、①気象制御の実施主体および実施基準、②気象制御に関わる補償のあり方が抽出されたため、これらに着目し、気象制御のための法制度設計に向けて基盤となりうる既存の法制度の調査や新しい法的枠組の必要性を検討した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御実施に関するルール策定

課題推進者： 福重さと子（岡山大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

### (1) 気象制御に関する法的課題のうち、実施のルールを策定する意義の整理

気象制御を実装するなら、それをいつ、どこで、どのように、誰が実施するか（実施判断基準）が必要になる。その理由を整理したところ、①気象制御を有効に実施するため（これだけなら、内部基準でよく、法としてルールをつくる必要はないかもしれない。）、②地域的・国際的リスクが現実化するのを防止するため、③公平性のため（国が実施主体となるなら、気象制御がある場合には実施し、ある場合には実施しないことについて説明ができなければならない）、④実施過程を透明化して事後的な検証に開いておく、といった意義を見いだすことができた。

### (2) 実施判断基準に関する目標

実施判断基準の策定にあたっては、できるかぎり明確な基準を定めることが望ましい。たとえば、数値的な基準をつくるといった方法が考えられる。抽象的な基準（例えば、「甚大な被害が生じるおそれがあるときに」といった基準）では、実際の判断を行う者に負担がかかる可能性があり、公平性を確保する、また事後的な検証を行うにあたって支障がある。

数値的な基準などの明確な基準の設定が困難な場合には、実施決定手続を公正なものとするところによる方法も考えられる。しかし、可能な限り、明確な実施判断基準を設ける方が望ましい。

### (3) 具体的なルール案作成のための調査：ダム操作規則の調査

明確で、とくに数値を用いた判断基準の設定のために、ダム操作規則の調査を参考にすることとした。木曽川水系の横山ダムの操作規則を一例として取り上げた。

①このダムは、原則として洪水になったときに洪水調節を行うこととし、「洪水」の定義を1,150立方メートルとしている。この定義は、下流の状況によって決まるものと考えられる。②洪水調節に利用できる容量を決めている。洪水期間、かんがい期間、それ以外の期間に分け、かんがい期間は、水位を一定に保ってかんがいへの影響が少ないようにしている。それ以外の時期においては、満水位まで貯め、洪水が予測されるときに予備放流を行って調節容量を確保することになっている。③洪水調節の実施の決定は、気象台から降雨に関する注意報・警報が発せられたときに行うこととなっている。実際に洪水が発生した段階で、洪水調節を行う。このダムはピークカット方式によって調節を行う。洪水調節の開始の決定を気象予報等によって行うこと、調節の方法を決めておくこと、また、かんがいの必要性を考慮していることなどは、気象制御の実施判断基準を策定するにあたって直接に参考になるものと考えられる。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

気象制御の実施判断基準において策定されるべき事項を、ダム操作規則を参考にしていくつか列挙した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御への保険制度

課題推進者： 嘉村雄司（島根大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

わが国の水害保険の「リスク・コントロール（減災インセンティブ）」機能に着目し、アメリカ連邦洪水保険制度（NFIP）の仕組み（氾濫原管理や割引制度）の現状と課題を整理した。第一に、2023 年導入のわが国の水災保険料率の細分化について分析した。高リスク者の加入しやすさに配慮して料率較差が圧縮されているため、現状では減災インセンティブ機能が十分に発揮されていないことを明らかにした。第二に、財政難と負担可能性のジレンマを抱えていた NFIP が、真のリスクを料率に反映させつつ激変緩和措置を併用する新手法「Risk Rating 2.0」へ移行した実態を解明した。そのうえで、今後の方向性として、市場原理に基づくリスク反映型へと転換したアメリカの事例が、今後のわが国の制度設計において重要なモデルケースとなることを提示した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

わが国の「水災保険料率の細分化」が、高リスク者の保護を重視するあまり、水害リスクを正確に伝達し防災行動を促す「リスクアナウンスメント効果」を十分に発揮できていないという構造的な限界を明確にした点である。さらに、NFIP が長年の財政難とリスク誤認という同様の失敗を経て、個別の洪水リスクを正確に料率に反映させる「Risk Rating 2.0」へ大きく舵を切ったことを分析・提示したことは重要である。「リスクの反映」と「保険料上昇を抑える緩和措置」を組み合わせたアメリカの移行プロセスは、わが国が直面している「減災インセンティブの確保」と「保険の購入可能性」のジレンマを乗り越え、今後の水害保険制度を再設計するための具体的かつ実践的な示唆を与えるものである。

### 2) 代表的な論文

武藤裕花，重本達哉，近藤卓也，福重さと子，嘉村雄司，堀智晴，小槻峻司（2026）：気象制御の実現に向けた法的課題の検討，*水文・水資源学会誌*，39 巻，1 号，22-36 頁．

気象制御技術が適切に実社会に導入されるためには、工学・理学的な技術開発に加え、当技術の導入に関わる倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues; ELSI）の解決が極めて重要となる。本研究では、気象制御技術に関連する ELSI の中でも、特に法的課題に着目し、KJ 法により気象制御における法的課題の洗い出しを行った。さらに、それらの位置付けを整理・議論することにより、重要な論点として、① 気象制御の実施主体および実施基準、② 気象制御に関わる補償のあり方が抽出されたため、これらに着目し、気象制御のための法制度設計に向けて基盤となりうる既存の法制度の調査や新しい法的枠組の必要性を検討した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

水害リスク管理における気象制御の位置づけ

課題推進者： 堀 智晴（京都大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

本年度の計画は、水害に関する損害賠償請求訴訟の事例を収集し、そこで用いられた賠償請求の根拠となる論理や判決で用いられた論理の整理を行うことであった。いわゆる大東水害訴訟最高裁判決以降に、最高裁判所で判決が下された水害訴訟事件 5 件を取り上げて、その争点、特に損害賠償を求めた住民側の論点に着目してその特徴を探った。その結果、最高裁で直接検討の対象となった内容については、大別して 2 つの類型が存在することが明らかとなった。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

いわゆる大東水害訴訟最高裁判決(昭和 59 年 1 月 26 日、事件番号：昭和 53(オ)492)以降に、最高裁判所で判決が下された水害訴訟事件は以下に示す 5 件であった。

- ① 平作川・吉井川水害訴訟(平成 8 年 7 月 12 日、平成 3(オ)1534)
- ② 志登茂川水害訴訟(平成 5 年 3 月 26 日、平成 1(オ)1628)
- ③ 多摩川水害訴訟(平成 2 年 12 月 13 日、昭和 63(オ)791)
- ④ 加治川水害訴訟(昭和 60 年 3 月 28 日、昭和 57(オ)560)
- ⑤ 長良川・安八水害訴訟(平成 6 年 10 月 27 日、平成 2(オ)1650)

上記の事件について、その争点、特に損害賠償を求めた住民側の論点に着目してその特徴を探った。各事件とも原告側の主張は様々な項目、観点からなされているが、最高裁で直接検討の対象となった内容については、大別して

a) 河川の改修の遅れ、未実施を管理上の瑕疵と主張するもの

b) 現に存在する河川構造物がその予定する安全性を有していなかったことを主張するものの二種類がみられることを示した。上記のうち、a)に属するタイプの訴訟は、①及び②であって、予算的・社会的制約の存在は認めつつも、現実に浸水被害が発生していることを根拠にその緊急性を指摘している。b)に分類できるものは、③、④および⑤であり、改修が完了したとみなせる区間を構成する施設は、計画が対象とする規模の洪水に対して安全でなければならないことを主張している。また、越流を伴わない破堤、計画洪水位以下の水量での破堤が起こった場合、その堤防は通常有すべき安全性を備えていたとは言えないとの主張も展開されていた。

### 2) 代表的な論文

武藤裕花，重本達哉，近藤卓也，福重さと子，嘉村雄司，堀智晴，小槻峻司（2026）：気象制御の実現に向けた法的課題の検討，*水文・水資源学会誌*，39 巻，1 号，22-36 頁。

気象制御技術に関連する ELSI の中でも、特に法的課題に着目し、防災学者・気象学者・法学者らと交えて KJ 法により気象制御における法的課題の洗い出しを行った。さらに、それらの位置付けを整理・議論することにより、重要な論点として、①気象制御の実施主体および実施基準、②気象制御に関わる補償のあり方が抽出されたため、これらに着目し、気象制御のための法制度設計に向けて基盤となりうる既存の法制度の調査や新しい法的枠組の必要性を検討した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

洪水リスクの定量化

課題推進者： 山田真史（京都大学 助教）

## 1. 研究進捗状況と成果

当該年度はモデル地域として選択した九州地方を対象に、過去の水害事例に関する再現計算のためのデータ収集・整理、浸水再現計算、および気象介入実験による降雨変化が洪水氾濫現象に与える影響に関する事例解析を実施した。

まず、国土交通省の集計する水害統計において 1993 年以降の基本表を整理・統合し、原因となる各豪雨事象における破堤・越水・溢水等の氾濫発生メカニズムごとの氾濫事象および被害額をデータとして整理することで、九州地方の各自治体における 1993 年以降の氾濫発生メカニズム別の氾濫発生件数・被害額を参照可能とした。同データから九州地方の各一級水系における顕著な災害事例を抽出した。

並行して、国土地理院・国土交通省等の公的資料に基づき、浸水領域データの収集を行った。GIS データ化された領域データについては原因となる各豪雨事象と紐づけて整理し、GIS 化されていない領域データについてはメタデータを整理した上で、顕著な災害事例についてはデジタイズを実施した。本データ収集から得られた浸水領域データと、水害統計における各災害事例における氾濫面積データを比較し、値に乖離のある災害事例・領域に関しては追加のデータ収集による補完を実施した。各種データの網羅性に基づき、2020 年梅雨前線豪雨（気象庁命名：令和 2 年 7 月豪雨）をはじめとした再現解析対象災害を選定し、各事例について再現解析・検証を実施している。

また、課題 4-1 および 8-2 との協働として、2021 年 8 月の九州豪雨事例を対象とし、SCALE モデルでの気象介入実験の結果を入力とした、九州全域での流出氾濫解析と介入の有無による被害額変化の試算を実施した。流域における降雨量の変化と浸水領域変化は整合的である一方、降雨量の増加により浸水が増大した領域も見られるなど、適切な気象介入の必要性を示唆する結果となった。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

広域かつ多イベントでの災害事例の再現計算に必要となる氾濫発生メカニズムごとの氾濫事象・被害額・浸水領域データを、水害統計に基づく広域かつ網羅的なデータ整理と、浸水領域データとの比較・統合により整備し、網羅性に基づく再現解析・検証の実施を可能とした。また、全河川を網羅する広域モデルとしての特長を活用し、気象介入実験での降雨量変化を広域の浸水領域変化として解析・図示することが可能であることを示した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

水害被害推定モデルの開発

課題推進者： 山田進二（SOMPO リスクマネジメント株式会社 執行役員）

## 1. 研究進捗状況と成果

【経済被害推計手法の確立】 経済被害推計モデルの評価可能項目、ロジックの全体構成（フレームワーク）を確定したうえで、コーディング・階層化・データフォーマットの統一を実施した。現状、人的被害、民間固定資産および営業停止（利益損失）などの間接被害をワンストップで算出可能な統合版モデルを作成し、目標としていた経済被害推計のワークフローの構築は完了した。また、構築したモデルを用いて 2015 年に発生した鬼怒川洪水事例について過去再現計算を実施したところ、被害推計額は実績額（水害統計）の 70～90%の範囲に入っており、今後パラメータチューニングなどの調整が必要ではあるが、ベンチマークテストとしては非常に良好な結果と判断した。

【評価可能項目の拡充】 経済被害推計モデルによる評価可能項目は当初住宅建物被害および利益損失のみであったが、2025 年度第 2 四半期には企業建物被害、同年度第 3 四半期には自動車被害、家財被害、清掃費用の算定機能を追加した。これらの追加項目についても鬼怒川洪水事例を対象に水害統計調査との比較を行ったところ、再現状況は良好と判断された。併せて、利益損失の一種である波及損害（被災地での生産活動の低下がサプライチェーンを通じ他地域に波及することで生じる経済損失）についても、産業連関表を用いた標準的な分析手法（I/O 分析）を実装した。本モデルを用いた鬼怒川洪水事例における試算によると、波及損害は被災地内の利益損失額の概ね半額程度となったが、これは 2018 年に発生した西日本豪雨時を対象に内閣府が試算した結果と整合している。

【不確実性の推定】 モデルの不確実性の発生源として入力浸水深ならびに脆弱性カーブの不確実性を仮定したうえで、保険支払実績データの解析結果や損害保険業界で一般的に使用されている自然災害リスク分析手法等を参考に、モンテカルロシミュレーションに基づく不確実性の定量評価手法を策定した。入力浸水深の不確実性は鬼怒川洪水を対象とした 100 アンサンブルの洪水浸水計算結果を使用することで表現し、脆弱性カーブの不確実性は最も被害額の構成割合が大きい建物、並びに間接被害の代表例である利益損失について、公的資料の収集整理結果を基に不確実性の程度（2 次の不確実性）を試算した。これらのモデルコンポーネントで発生する不確実性が最終的な経済被害額の推計値に与える影響は、被害額計算時にあらかじめ設定した入力浸水深と脆弱性カーブの不確実性の度合いに応じたランダムサンプリングを多数実施する（モンテカルロシミュレーション）ことで推計した。

【その他】 2021 年の九州北部豪雨事例について介入有無による被害額の変化を試算した。課題 8-1 で計算された介入あり・なしそれぞれの浸水計算結果に対し、人的被害、経済被害額の算出を行い、いずれも洪水浸水範囲の変化と整合的であることを確認した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

経済被害推計の全体的なフレームワークおよびワークフローを構築し、ワンストップで計算可能な経済被害推計モデルの環境を構築した。また、当該モデルによる過去の洪水事例の再現性を評価し、（特定の事例ではあるものの）良好な精度での予測が可能であることを確認した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

斜面崩壊リスク評価と国際展開

課題推進者： 風間 聡（東北大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

開発すべき 2 つの斜面災害モデルの性能評価が終了した。統計確率モデルならびに力学モデルは、広島豪雨に適用し、検証を実施した。また、被害額の推定も可能とした。加えて気象介入による被害額の差異を求めた。

2018 年広島豪雨の降雨分布ならびに斜面災害実績からロジスティック関数確率モデルのパラメーターを考察した。いくつかのパラメーター推定を改善し、精度を高めた。パラメーターが寄与する変数は降雨（浸透後の動水勾配）と起伏量である。モデルは地質ごとに与えた。その結果、ROC-AUC=0.73（1 に近いほど精度が高く、ランダム推定では 0.5）の精度を得た。このモデルを用いて、シーディングによる気象制御で生じる降雨変化に伴う斜面災害発生確率を求めた。この確率に資産額を乗じることで、斜面災害被害額軽減を求めた。

同様に 2018 年広島豪雨を対象に、地理情報から推定された物理パラメーターによる斜面の安定性を求める力学モデルの SLIP モデルを適用した。パラメーターの感度分析から土壌、地質情報の影響が大きいことを特定し、データ区分を改めることによって推定を改善し、精度を高めた。

これらの一部は、次年度以降の目標であったが、早期に達成することができた。また、力学モデルの出力値である安全係数と確率モデルの出力値である確率（ハザード）の関係を分析、関係式の確立を実施し、ハイブリッド化を順調に進めた。これらにより斜面災害の実績データがない地域においても、数値地理データから被害額の推定が可能となった。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

力学モデルと確率モデルを組み合わせた新しい斜面崩壊モデルを開発し、検証した。このハイブリッドモデルは豪雨の空間分布と斜面崩壊ハザードとリスクの関係を定量的に示しており、日本国内において従来のモデルより高精度の斜面崩壊ハザード推定を達成した。

### 2) 代表的な論文

Wang Yiwei, 小野桂介, 平賀優介, 風間聡 (2025): Assessing the Impact of Weather Control on Regional Landslide Risk Using an Integrated Physical-Statistical Model in Kyushu, Japan, 令和 7 年度土木学会東北支部技術研究発表会, INT-2-02.

斜面ハザード推定のロジスティック関数による確率推定法と物理モデル SLIP モデルを併せたハイブリッドモデルを九州豪雨に適用して、検証を行った。広島豪雨への適用も併せてモデルの検証を行った。また、課題 5-3 の平賀らによって得られた豪雨制御を入力して、ハザードの変化を考察した。ムーンショット目標 8 が目指す豪雨制御による減災効果を知るための斜面災害ハザードを求める手法の異なる 2 か所での実施内容である。今後は事例解析を増やすとともに経済損失を推定し、リスク推定精度向上を目指す予定である。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

社会実装シナリオの策定

課題推進者： 小野桂介（東北工業大学 講師）

## 1. 研究進捗状況と成果

本課題において設定された今年度のマイルストーンである「自然災害に係るタイムライン事例の収集と整理」および「気象制御を実施する場合の住民・行政・気象制御主体タイムラインの概略策定」を概ね達成した。

まず、日本国内の既往の自然災害（洪水、土砂災害、高潮など）に関するタイムライン事例を収集し、災害種および地域性（東北、関東、九州など）や気象特性（台風による降雨、前線性の降雨など）を考慮して整理した。この情報収集および整理にあたっては、実務でタイムラインを作成するコンサルタントに対する意見照会を実施し、実務的な視点を取り入れることができた。

次に、収集・整理された事例に基づき、行政による既往の予警報の枠組みを前提として、住民タイムライン、行政タイムライン、気象制御主体タイムラインの概略を策定した。タイムラインの策定においては、ゼロベースからの検討ではなく、行政による既往の予警報の枠組みの上に設計した。さらに、気象制御主体タイムラインでは、シーディングによる気象制御を対象として、他項目の検討を踏まえた上で、事前の数値計算（介入効果の評価）、介入実施の判断、介入装置の展開などのタイミングを例示した。これにより、気象制御の介入が既存の防災体制にいかに関与されるかという、社会実装に向けた重要な情報を提示した。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

本研究の最大の成果は、単なる災害対応の時系列整理に留まらず、気象制御（シーディング）を組み込んだ多主体連携タイムラインを構築し、その概略を可視化した点にある。このタイムラインにおいては、自然災害発生までのプロセスを、住民、行政、そして気象制御主体という3つの視点から時系列で可視化している。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御への RRI の推進

課題推進者： 立花幸司（千葉大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

気象制御の ELSI では、気象介入に対する人々の不安や懸念と同時に、「気象」という自然そのものに対する見方（自然に対する価値観）も可視化し、考慮すべき ELSI 項目を同定する必要がある。この認識のもと、課題 9-1 では、環境倫理学分野における ELSI 項目の理論的な整理（マッピング）を行ってきた。本年度は、この整理を踏まえ実際に市民の思いを捉えるために、国内外でワークショップを実施し、理論的な整理との突き合わせに着手する方法を検討した。来年度は、この成果をもとに、理論的な整理とボトムアップでの声を統合的に捉えた ELSI 項目の作成に着手する。

## 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、気象制御技術の ELSI のボトムアップの検討の一環として、市民を対象とするワークショップを国内外で実施した。なかでも、2025 年 5 月 22 日にロンドンで行われたものと、同年 11 月 23 日に千葉市で行われたものは本目標達成に最も寄与する成果である。(1) ロンドンのワークショップでは、エジンバラ大学（英国）の環境倫理学者とセルジベ連邦大学（ブラジル）の気候倫理学者による、各地域性や経済状況等を踏まえた ELSI の検討課題が紹介され、立花は本プロジェクトを紹介しながら日本における気象制御の ELSI と文化差の問題を述べた。これを受けて、ロンドン市民との間で、気象制御の社会実装と倫理的・文化的課題について熱心な意見交換が行われた。(2) 千葉大学のワークショップでは、千葉市内を中心に中高生、大学生、成人等、68 名の参加者を得て、合計 4 時間を超える市民参加型ワークショップ「天気のコントロール？始まる？」を、立花幸司を企画責任者とし項目 9 全体として実施した。本プロジェクトを小槻峻司（千葉大学）、気候倫理の概要を藤木篤（関西大学）、欧州の気象倫理をミッコ・プーマラ（トゥルク大学）の各氏が紹介した後、課題 9-2 の一方井裕子 PI と課題 9-3 の北崎充子 PI による差配で、市民の方々と気象制御の ELSI について議論した。その成果については、現在、分析中である。また、そうした直接的な成果とは別に、千葉市内全ての公立中学校・高等学校に本ワークショップのチラシを配付したことで、本プロジェクトについて次世代の認知向上に寄与したことも、市民と共に考える ELSI の理念からは重要な成果となった。

### 2) 代表的な論文

立花幸司（2025）：グローバルな環境問題における規制と倫理，*日本学術会議公開シンポジウム「複合的地球環境問題へのヒューマンデイメンジョンからの問い」*，講演。

本プロジェクトを紹介しながら、気象制御技術の社会実装には規制のみならず ELSI が必要であることを国内外の事例を踏まえて話題提供を行った。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

気象制御の社会的価値を最大化する科学コミュニケーション

課題推進者： 一方井祐子（金沢大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

成果1：気象制御に対する市民の懸念や期待を探索的に調査することを目的とし、2025年8月から9月にかけて、13名のステークホルダー（行政・農業関係者、防災・環境活動家、子育て世代など）を対象に、オンラインのインタビュー調査を実施した。冒頭に資料を用いて気象制御の概要を10分程度で説明した後、「気象制御の印象」、「気象制御が自身の仕事に与える影響（正負両面）」、「気象制御に対して自身の仕事の同僚はどのような意見を持つと思うか」などを尋ねた。発言内容を分析し、6つの論点（expectations, anxieties, suspicions, action desired, other speculations, uninterested/no opinion）に整理した。あわせて、職業や立場（属性）ごとに見られた特徴的な意見も抽出した。なお、当調査の実施・分析は課題9-3（北崎PI）と連携して行った。

成果2：2025年11月23日に、市民参加型ワークショップ「天気のコントロール？始まる？」を開催し、第2部の参加者34名から気象制御に対する意見を収集した。参加者を5チームに分け、特定の属性になりきるロールプレイング形式を用いて、チームごとに気象制御の導入に関する話し合いを実施した。その結果、気象制御の導入に対するチームとしての最終判断がチームごとに分かれることを確認した（賛成4、反対1）。なお、当調査の実施・分析は課題9-3（北崎PI）と連携して行った。

成果3：気象制御に関する市民の認識や懸念、期待などを広く把握することを目的として、オンラインの質問紙調査を実施した。質問紙は、上記の成果1・2で得られたデータに基づき設計した。日本に住む成人男女約3,000名から回答を得た。その結果、「気象制御技術」を「よく知っている」または「少し知っている」と回答した人は約2割程度であり、そのうちの5割程度は「テレビ・新聞などの報道」で知ったと回答した。また、「気象制御技術」が重要になる時期については、「すでに重要である」と回答した人の割合が約4割を占めた。さらに、被災経験がある者ほど「すでに重要である」と回答する傾向が見られた。一方で、回答者は「気象制御技術」に一律に賛成しているわけではなく、技術が使われる文脈によって受容や抵抗の程度が異なることが確認された。これらの結果を踏まえ、今後のワークショップの開催地や内容、フレーミングなどについて検討を進める。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

市民参加型ワークショップ「天気のコントロール？始まる？」（上記「成果2」）において、気象制御導入に関するチームの最終判断と個人の判断が一致しない事例を全参加者の約3割に確認した。この結果は、集団での合意形成プロセスが、必ずしも個人の意見の単純な集約ではないことを示唆している。この乖離は、議論過程における同調圧力や他者の影響、合意形成における役割分担など、複数の要因によって生じた可能性がある。これらの知見は、市民との合意形成プロセスの設計において、単に最終的な合意内容だけでなく、そこに至るまでの個人の意見との関係性や変容過程を考慮する必要があることを示す。特に、本結果には気象制御という対象の特性が影響している可能性があり、この点を明らかにすることは、同種の技術における合意形成の在り方を検討する上で重要である。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

市民対話による気象制御への不安解消

課題推進者： 北崎允子（武蔵野美術大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は、気象制御技術に対する市民の不安や期待を可視化することを目的に、日本人の文化的特性に配慮した市民対話ワークショップ（市民 WS）の立案・実施を行った。特に、専門知識を持たない市民でも自らの意見を発言・表出できるよう、「ロールプレイ」を基盤とした 150 分程度の WS プログラムを開発し、ペルソナカード、瓦版、結論シートの 3 種類の対話ツールを制作した。ツール開発にあたっては、行政、農業、環境活動、防災など多様な立場のステークホルダー 13 名へのインタビューを実施し、ロールプレイでありながら、参加者がリアルな現実を体験できることを目指した。

2025 年 11 月に千葉大学でシンポジウムおよび市民 WS を開催し、市民 WS には高校生から 60 代までの 34 名が参加した。市民 WS では、「村の会議」というロールプレイ形式を用い、市民が気象制御技術について対話・意思決定を行った。ペルソナカードや瓦版を活用しながら、多様な立場から議論を行った点が大きな特徴である。市民 WS の記録の分析結果、災害軽減や生命保護への期待がある一方、生態系破壊や未知のリスク、合意形成の難しさなど多面的な懸念が抽出された。また、市民は技術そのものに加えて、「情報公開」「専門家との対話」「社会的ガイドライン」を強く求めていることが明らかになった。さらに、個人意見と班の結論が異なるケースも見られ、「意思決定への関与」が納得感に影響する可能性が示唆された。加えて、参加者アンケートでは、市民 WS 後に理解度や満足度の向上が確認され、この市民 WS プログラムの一定の妥当性が示された。

本研究は 1 年目であるため、未だ論文文化には至っていないが、国際会議で方法論とツールを報告し、市民参加型デザイン研究として注目を集めた。今後は、得られた知見を基にボトムアップ型 ELSI 項目の整理と WS 手法の改善を進め、2026 年度の本格的な市民対話実践へと発展させる予定である。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

本研究では、気象制御技術の導入に対して市民が感じるメリット・リスク・要求について、多様な立場からの生の声を収集することができた。特に、市民が抱える不安の解消に向けて、2 つの重要な方向性が見えてきた。

第一に、「情報公開」や「研究者との対話」、「市民の理解を得ること」が重要であるという点である。市民が技術の仕組みや導入状況、社会・環境への影響について十分に理解できる状態をつくることで、不安軽減につながる可能性が示された。一方で、「市民の理解を得た状態」とは具体的にどのような状態を指すのかについては、市民・研究者双方の間で明確な共通認識が存在していないことも明らかになった。第二に、技術導入をめぐる合意形成の難しさに対して、「議論への関与」そのものが納得感を生み出す可能性が示唆された点である。市民 WS では、たとえ最終的な集団の意思決定が個人の意見と一致しない場合でも、議論のプロセスに参加したことで一定の納得感を持つ参加者が見られた。この結果から、今後は「関与の効果」が市民の受容や不安軽減にどのような影響を与えるのかを、さらに検討していく必要性が見えてきた。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

深層ニューラル場等による移流モデリング

課題推進者： 船富卓哉（京都大学 教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

課題 10-2 の課題推進者と協働し、2024 年度までに作成した移流モデリング結果を組み込んだ可視化を実現した。空間座標・時刻を入力すると移流に対応する幾何変換を出力する移流モデリング結果を用いて、混合比の時間変化を時間高解像度化し、時間変化の滑らかな可視化を実現した。また、深層ニューラル場、および混合ガウスモデルを幾何変換の合成に拡張し、データ駆動型での移流モデリングに取り組んだ。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

数値気象モデルが生成する大規模な 4 次元移流データを「時空間に連続な幾何変換場」として表現する新たなモデリング手法を確立した。特に、ニューラル場と幾何変換の組み合わせにより、移流をコンパクトな連続関数として表現する枠組みを提案し、補間精度を維持しつつ、大幅なデータ圧縮を実現した。具体的には、元データに対して約 1% のデータサイズに圧縮しつつ、線形補間や従来のニューラルネットワーク手法を上回る精度で移流構造を再現可能であることを示した。さらに、学習した移流場を用いることで、任意の時空間座標における物理量の推定および滑らかな時間発展の可視化を実現し、豪雨形成に関わる混合比の輸送過程を高時間分解能で可視化した。

### 2) 代表的な論文

柳龍哉, 藤村友貴, 向川康博, 安永数明, 久保尋之, 岡崎淳史, 小槻峻司, 船富卓哉 (2025): 数値気象モデルにおける移流のニューラル場表現, *電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU)*, 125 巻, 229 号, 68-73 頁.

本研究は、数値気象モデルの膨大な 4 次元移流データを幾何変換として表現するニューラル場モデルを提案するものである。空間座標と時刻を入力として連続的な移流場を推定し、高精度補間とデータ圧縮の両立を実現した。実験では、データサイズを約 1% に圧縮しつつ、線形補間や従来のニューラルネットワークを上回る精度と優れた汎化性能を確認した。本手法により、気象現象の連続的理解と可視化の高度化が期待される。

衣川昌孝, 船富卓哉, 藤村友貴, 向川康博, 佐藤慎太郎 (2025): 混合ガウスモデルに基づいた幾何変換場による流れ場の表現, *電子情報通信学会論文誌 D*, J108 巻, 10 号, 586-592 頁.

本研究は、流れ場における局所的な渦構造の時間発展を解析するため、混合ガウスモデルに基づく幾何変換場を提案する。渦を幾何変換のガウス分布としてモデル化し、それらの合成により流れ場全体を表現することで、移流を伴う時空間ダイナミクスを解釈可能な形で記述する。実験では渦の移動や局所構造の変化を直感的に捉えられることを示した。

### 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、激甚化す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

海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来

介入効果を評価する可視化手法の開発

課題推進者： 久保尋之（千葉大学 准教授）

## 1. 研究進捗状況と成果

前年度に開発したプロトタイプ・アプリケーションを用いて可視化を実施し、レンダリングアルゴリズムにレイマーチング法を導入することにより、表示の不連続性の解消に目処が立った。また、大規模な 4 次元ボリュームデータを扱うため、課題 10-1 と連携して効率的なデータ処理を実現する新しいデータ構造とアルゴリズムの開発を進めており、基礎的な技術開発に目処が立ちつつある状況である。

## 2. 代表的な成果事例

### 1) 目標達成に最も寄与する成果

前年度に開発したプロトタイプ・アプリケーションを用いて、空間再現ディスプレイを用いた可視化を実施した。プロトタイプ・アプリケーションは、表示にかかるパフォーマンスの向上のためボリュームデータを空間的に離散化して表示したため、映像に僅かな不連続性が見られた。これに関し、レイマーチングなどの表示手法を導入することにより、この映像の不連続性の解消に取り組んだ。なお、レイマーチングとは、画面の各画素から仮想的に視線を伸ばし、その経路上でデータを連続的にサンプリングして色や透明度を積み重ねることで、空間内の情報を滑らかに描画する手法であり、ボリュームデータをより連続的に表現できる特徴を持つ。プログラムは Unity のカスタムシェーダを利用して実装した。カスタムシェーダを用いて実装することで、より柔軟な表現が可能になり、実際の気象現象の理解がさらに深化されることが期待できる。ポイントクラウド（点群）ではなくボリュームデータとして表示が可能になったことにより、様々な圧縮アルゴリズムが適用可能になり、大規模ボリュームデータの効率化が期待される。実際、検証中のシミュレーションデータでは 288.0 MB のボリュームデータが 36.0 MB へと 1/8 に圧縮された。また、実行時に再量子化を実行して 32 bit 浮動小数点から 8 bit 正数形式のテクスチャ形式で VRAM に転送することで、メモリ使用量をさらに 1/4 に抑えることが可能となり、結果的に 30 倍以上の効率化を達成した。

### 2) 代表的な論文

H. Kubo, S. Baolai, T. Funatomi, K. Kanemaru, K. Yoshimi, A. Hamada and S. Kotsuki (2026): "Easy4DView: A Browser-Based Interactive 4D Volume Visualization Tool", In proc. *Image Electronics and Visual Computing (IEVC) 2026*, IEVC2026\_CR\_97.pdf.

本研究では、時間変化するボリュームデータをインタラクティブに可視化するための軽量のブラウザベース可視化ツール「Easy4DView」を開発した。本ツールは Three.js および WebGL2 を用いてクライアントサイドの JavaScript のみで実装されており、サーバーサイドでの前処理を行うことなく NumPy 形式 (\*.npy) のボリュームファイルを直接読み込むことができる。これにより、標準的な Web ブラウザ上で、リアルタイムなボリュームレンダリング、時系列再生、およびパラメーターのインタラクティブな制御を実現した。

### 3) 代表的な特許

なし