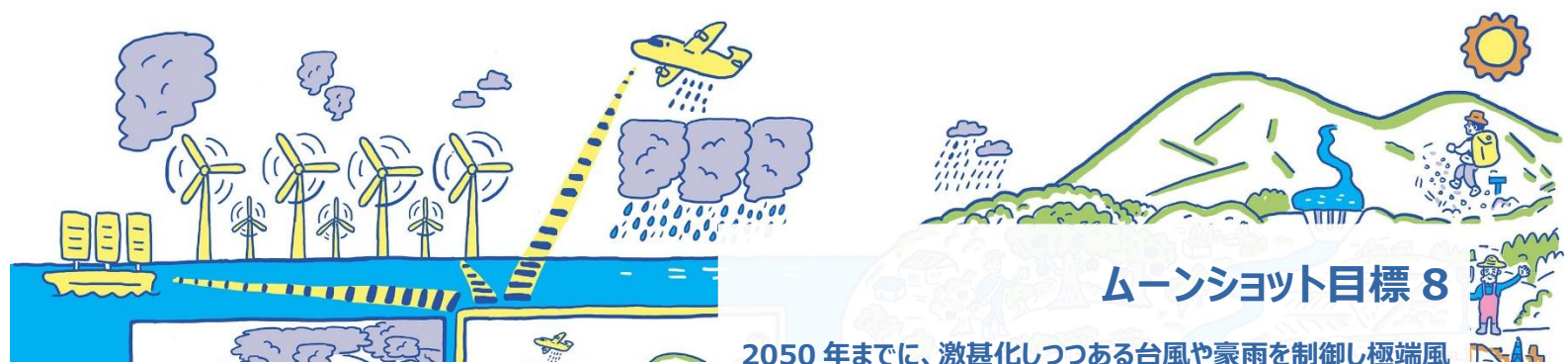




ムーンショット目標 8

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

実施状況報告書

2025 年度版

社会的意思決定を支援する気象

－社会結合系の制御理論

澤田 洋平

東京大学 大学院工学系研究科



【目 次】

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論	1
PM：澤田洋平（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）	
大規模アンサンブル気象再解析/再予報データの構築と気象学的解析	3
課題推進者：南出将志（東京大学 大学院工学系研究科 特任准教授）	
データ駆動型気象制御器の設計	5
課題推進者：橋本和宗（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）	
気象－社会結合系の不確実性定量化	7
課題推進者：澤田洋平（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）	
気象物理過程の不確実性の解析	9
課題推進者：鈴木健太郎（東京大学 大気海洋研究所 教授）	
植物・菌類等由来の氷核活性による降雨制御	11
課題推進者：石川雅也（東京大学 大学院農学生命科学研究科 特任研究員）	
洪水氾濫ハザード確率予測	13
課題推進者：山崎大（東京大学 生産技術研究所 准教授）	
高波・高潮ハザード確率予測	15
課題推進者：田島芳満（東京大学 大学院工学系研究科 教授）	
災害社会ダイナミクスの予測・制御	17
課題推進者：小谷仁務（東京科学大学 環境・社会理工学院 准教授）	
水害経済被害額予測と意思決定のための不確実性推定	19
課題推進者：藤見俊夫（京都大学 防災研究所 准教授）	
気象制御の社会的意思決定可能性の検討	21
課題推進者：松山桃世（東京大学 生産技術研究所 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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

PM：

澤田洋平（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

気象制御に関しては、アンサンブルカルマン制御(Ensemble Kalman Control: EnKC)を用いて、世界初のデータ駆動型気象制御のシミュレーションを示すことに成功した。またこのような制御の社会インパクトを推定するためのハザードモデルや、社会ダイナミクスモデルの高度化を行った。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

EnKC を台風に応用した数値シミュレーションを行い、①カオスを活用し、②時々刻々と変化する状況に応じて適応的に、③有限な予測可能性の下で、台風の勢力を弱める介入をデータ駆動的に探索することに世界で初めて成功した。大気下層に水蒸気の介入で、米国などで議論されている既往研究の水準よりも大幅に小さい介入外力を見出すことができた。

2) 代表的な論文

Islam, M. R., and Y. Sawada, 2025: Multidimensional Risk Ranking of Historical Tropical Cyclones. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 106, E1276-E1294.

経済被害額のみによらない、多次元な台風の社会インパクトランキングを作成した。社会インパクトの大きい台風が必ずしも勢力が強大なわけではないことや、既存の台風研究は経済被害額の大きい台風に偏りがちであることを明らかにした。本プログラムにおける台風研究および制御対象選定の考え方に指針を与える研究である。

Zhao, G., D. Yamazaki, Y. Tanaka, X. Zhou, S. Li, Y. Hu, et al., 2025: Developing a Levee Module for Global Flood Modeling With a Reach-Level Parameterization Approach. *Water Resources Research*, 61, e2024WR039790.

全球河川モデルにおいて、全球の河川に対して堤防の影響を直接考慮するスキームを開発した。本スキームは 2 つのパラメータから構成されるが、これを全球データから推定することで、世界のどこでも堤防の効果を再現することができるようになった。気象制御の洪水ハザードへの影響を測る基幹技術になる成果である。

Sawada, Y., M. Minamide, Y. Yan, K. Hashimoto, and L. Duc, 2026: Data-Driven Exploration of Tropical Cyclone's Controllability. *Geophysical Research Letters*, 53, e2025GL120393.

上記の「目標達成に最も寄与する成果」として挙げた研究をまとめた論文。世界初のデータ駆動型（アルゴリズムが自動で介入の位置と大きさを決める）気象制御のシミュレーション論文。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

大規模アンサンブル気象再解析/再予報データの構築と気象学的解析

課題推進者：

南出将志（東京大学 大学院工学系研究科 特任准教授）

1. 研究進捗状況と成果

これまでの進捗・成果として、カオス的な発生プロセスを持つために個々の検証が難しかった積雲対流の影響について、抽出・可視化できるような数値実験のデザインを開発・提案・検証した。その上で、それらの数値実験手法を用いて、“台風初期において積雲対流の制御が可能となった場合”における台風初期の発生・発達への影響について、概念実証のための数値シミュレーションを実施し、論文にまとめ投稿した（現在査読中）。詳細には、個々の深い湿潤対流が台風初期の発生・発達に及ぼす影響を定量的に評価するため、第一段階として、渦スケールの構造を保持したまま特定の積雲対流イベントのみを選択的に活性化または抑制する感度実験手法を構築した。次に、開発した数値実験手法を用いることで、台風発達開始プロセスにおいて生じる対流がそれぞれどのような影響を与えているのか、個別に検証することが可能となった。概念実証実験として、渦構造の中心付近の対流活動が台風発達開始において基幹的役割を果たすという仮説を立て、台風内部 75 km 半径以内の対流活動の挙動を変容させ、台風初期の歳差運動やその後の台風発達プロセスに与え得る影響を検証した。結果、台風スケールの風速場や水蒸気量などに一切変化を与えていないにも関わらず、個々の積雲対流をターゲットとした対流スケールの介入の影響がスケールアップし、台風の強度変化に影響を及ぼす様子が確認できた。介入無しではカテゴリー4 まで発達するハリケーンが、介入によってカテゴリー1 のハリケーンにすら発達しない（トロピカルストームに留まる）という、期待できる結果を複数の熱帯低気圧事例で示した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

極端気象のカオス制御可能性の有無という自明ではない課題に対し、台風を制御できるかという問題を、内部で生じる（数百 km スケールの現象である台風に比べて二桁スケールも小さい数 km スケールの現象である）個別の対流を制御できるかという問題に帰着することができ、問題の低次元化を実現した。台風の中心の深い対流活動を用いて、複雑な発達開始プロセスの生じやすさを秩序立てられる可能性を示すことができた。

2) 代表的な論文

該当なし

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

データ駆動型気象制御器の設計

課題推進者：

橋本和宗（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

当該年度は、気象制御に必要な「いつ、どこに、どの程度の微小摂動を与えるか」を自動設計するデータ駆動型制御器として、Ensemble Kalman Control (EnKC) と Model Predictive Path Integral Control (MPPI) を統合した EKG-MPPI を考案・定式化した。Ensemble Kalman Filter (EnKF) で状態推定を行い、EnKC で制御目標を疑似観測として同化したうえで、疎な候補介入点を抽出し、その位置および強度情報を MPPI の探索分布に埋め込むことで、非線形ロールアウトに基づき候補摂動を精密化する枠組みを構築した。Lorenz-96 モデルでは、閾値 12 以上の極端値発生数は、EnKC も MPPI も適用しない場合の 8871 ± 184 回に対し、EnKC では 7820 ± 142 回、MPPI では 7622 ± 146 回まで低減した。また、MPPI は EnKC と比較して介入エネルギーを約 14% 低減した。さらに Surface Quasi-Geostrophic model (128×128 格子、8 対象領域) でも、目標領域の最大風速を EnKC より低く抑えつつ介入量を小さく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

小さく局所的な介入を前提とした制御入力設計を、データ同化とサンプルベースのモデル予測制御の接続により具体化した点が、本課題の目標に最も寄与する成果である。従来の EnKC がもつ線形近似の制約を補い、最適な介入位置と強度を同時に探索できる枠組みとして、理想化された地球流体モデル上で局所介入戦略を評価する手法的な足がかりを得た。

2) 代表的な論文

黒木 波瑠, 橋本 和宗, 澤田 洋平, 高井 重昌, 2025 : モデル予測経路積分制御を用いた気象制御手法, 第 68 回自動制御連合講演会講演論文集.

本論文では、EnKC で得た疎な制御摂動を MPPI の探索分布に埋め込む EKG-MPPI を提案した。EnKF による状態推定、疑似観測同化による候補介入点の抽出、非線形ロールアウトによる摂動精密化を一体化し、理想化された地球流体モデル上でサンプル効率の高い局所制御を実現した。Lorenz-96 および SQG モデルで、従来の EnKC より小さい入力で極端値・局所風速を抑制できることを示した。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

気象－社会結合系の不確実性定量化

課題推進者：

澤田洋平（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

気象制御の数理解、および頑健な制御のために重要な気象予測の精緻な不確実性定量化手法の開発の双方に対して進捗が得られた。

気象制御の数理解に関しては、アンサンブルカルマン制御(Ensemble Kalman Control: EnKC)を台風に応用した数値シミュレーションを行い、世界初のデータ駆動型の適応的な気象制御のシミュレーションを提示した。不確実性定量化手法に関しては、ベトナム水文気象庁のメソアンサンブル予測システムを改良する形で物理スキーム選択の不確実性を考慮しつつ、予測性能を高める開発を行った。ほかにも気象制御がもたらさうる多様なセクターへの影響を、その推定の不確実性も考慮しつつ網羅的に探索するためのシステム構築を完了した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

EnKC を台風に応用した数値シミュレーションを行い、①カオスを活用し、②時々刻々と変化する状況に応じて適応的に、③有限な予測可能性の下で、台風の勢力を弱める介入をデータ駆動的に探索することに世界で初めて成功した。大気下層の水蒸気への介入で、米国などで議論されている既往研究の水準よりも大幅に小さい介入外力を見出すことができた。

2) 代表的な論文

Sawada, Y., M. Minamide, Y. Yan, K. Hashimoto, and L. Duc, 2026: Data-driven exploration of tropical cyclones' controllability. *Geophysical Research Letters*, 53, e2025GL120393.

上記の「目標達成に最も寄与する成果」として挙げた研究をまとめた論文。世界初のデータ駆動型（アルゴリズムが自動で介入の位置と大きさを決める）の気象制御器の可能性を示した論文。

Hung, M. K., L. Duc, K. Saito, F. Tomizawa, and Y. Sawada, 2026: Blended parameterization in an atmospheric model: Improving severe storm ensemble prediction by considering uncertainties in model physics. *Weather and Forecasting*, 41, 23-39.

メソアンサンブル気象予測において、モデルの物理パラメタリゼーション選択の不確実性を陽に扱うために、ブレンドパラメタリゼーションという新しい概念を導入し、気象モデルの不確実性を定量化しつつ、豪雨や異常低温などの予測性能を飛躍的に高めることに成功した論文。

Islam, R., and Y. Sawada, 2025: Multi-dimensional risk ranking of historical tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106, E1276-E1294.

どのような台風に介入を行うことが社会的に望ましいか、という ELSI 的な課題に対応するため、過去 30 年ほどの日本に上陸した台風のリスクを見直し整理を行った。経済被害で見ればあまりインパクトのないように見える台風の中にも、多数の人的被害をもたらすものなどが含まれ、多角的なリスク評価が重要であることを強調した。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

気象物理過程の不確実性の解析

課題推進者：

鈴木健太郎（東京大学 大気海洋研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

今年度は、(1)極端気象の制御の基盤となる数値シミュレーションにおいて主要な不確実要因である雲微物理過程のモデル表現について、人工衛星による観測情報との比較による評価・検証に取り組むとともに、(2)生物由来の新規シーディング素材の降水生成への影響を調べるシミュレーション実験を実施した。(1)では、研究開発課題1および3で実施された数値モデルアンサンブル実験の出力データに衛星シグナルシミュレータを適用して、雲・降水に関する擬似的な衛星観測パラメータをシミュレートした。この計算から得られたレーダー反射因子などの衛星観測パラメータを統計的に解析し、雲の鉛直微物理構造の特徴を調べた。特に、研究開発課題3で実施された「物理スキーム混合アンサンブル実験」のデータに対してこの解析を実施し、スキームを様々な重みで混合した結果について、雲の鉛直微物理構造の統計を衛星観測データと比較した。その結果、二つの代表的な雲微物理計算スキームをある重みで混合した場合には各々の誤差が相殺されて、衛星観測により整合する鉛直微物理構造が表現された。(2)では、研究開発課題10と連携して、氷晶核能を有する生物由来エアロゾルの新規シーディング物質としての効果を、従来のシーディングに用いられてきたヨウ化銀を含む他の氷晶核粒子とシミュレーション上で比較評価した。このために、孤立積乱雲において氷晶核の温度依存性の関数を当該シーディング物質に差し替える感度実験を領域気象モデルによって実施した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

上記の(1)では、従来の数値気象モデルにおいて個々の物理計算スキームが持つ誤差特性がそれらを適切に混合することで補償され、現実をより良く表現できる計算スキームを構築できる可能性が素過程レベルで示唆された。(2)では、数値実験データを詳細に解析し、生物由来の新規シーディング物質の降水生成への効果を孤立積乱雲の場合について明らかにした。

2) 代表的な論文

Yamasaki, K., and K. Suzuki, 2026: Large eddy simulation of mixed-phase clouds with aerosol perturbation: Importance of effective radius. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **131**, e2025JD045671.

水と氷が共存する混合相雲に対するエアロゾル排出の影響を Large Eddy Simulation モデルの数値実験によって調べた研究である。水蒸気濃度が異なる複数の環境条件下で氷晶核粒子の数濃度を様々な仮定して水と氷の比率が様々な異なる混合相雲を再現し、エアロゾル排出に対するそれらの雲の応答メカニズムを解析した。その結果、本論文が対象とした降雨が少ない雲の事例では、エアロゾル排出による雲のアルベドの変化は主に雲粒有効半径の減少によってもたらされていることが見出された。さらに、このような雲アルベドの応答は、雲粒の半径に影響するモデルパラメータの不確実性に敏感に依存することがわかった。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

植物・菌類等由来の氷核活性による降雨制御

課題推進者：

石川雅也（東京大学 大学院農学生命科学研究科 特任研究員）

1. 研究進捗状況と成果

地球に優しいサステイナブルな湿潤対流制御用クラウドシーディング素材を見出すため、自然界に大量に存在する植物や微生物由来の氷核活性素材を試験管法やマイクロプレート法を用いて引き続き探索した。見出した氷核活性素材の機能、性能向上を目指すため、氷核活性機構や詳細特性、多様性の研究、ヨウ化銀との比較研究も進めた。シーディング素材の氷核活性スペクトラムなどの特性を解明し、研究開発課題 4 や超水滴法基盤ユニットとの連携により、計算機シミュレーションや雲チャンバー試験を行い、湿潤対流制御性能の解析を開始した。

- (1) 耐寒性植物約 200 種（ツツジ属、バラ属等）を野外から採取し、これらの組織の氷核活性を調査し、組織、種による違い、熱耐性などの特性、凍結様式や系統との関連を明らかにした。国内で育てられた越冬中のツツジ属の花芽鱗片の氷核活性は、分類群によって耐熱性が異なることが判った。レンゲツツジ亜属は、耐熱性が高く、氷核活性素材として優れていることが判った。
- (2) 植物から単離された熱耐性氷核活性物質であるシュウ酸カルシウムの合成法についても結晶の種類、結晶面などに着目して、合成温度、pH などを検討し、氷核活性の高い微結晶の合成ができるようになった。結晶サイズについてはさらに検討する必要がある。
- (3) ヨウ化銀の氷核活性を水系 Immersion mode で正確に測定するのは、容易ではないことが知られている。このため、ヨウ化銀氷核活性を菌と同じ水系 Microplate Assay 法で測定する方法についても検証した。様々な方法で調整したヨウ化銀微粒子について活性測定し、再現性よく高い氷核活性を得る方法を見出した。これにより、菌類と AgI の水系での氷核活性比較が可能になった。
- (4) 寒冷地土壌などより分離した複数菌類から抽出した氷核活性画分について、様々な特性を解析し、比較した。また、氷核活性 Vali spectrum を作成し、ヨウ化銀と比較した。
- (5) これらの氷核活性素材候補の情報を研究開発課題 4、島基盤ユニットに提供して、湿潤対流制御効果に関してシミュレーション研究を開始した。
- (6) 気象研施設を超水滴法基盤ユニットと共同で現地施設見学し、実験打合わせを行ったのち、2～3 月にこれらの氷核活性素材の雲チャンバー 実験を開始し、解析中である。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

見出したシーディング素材の氷核活性スペクトラムなどの特性概容が解明された。ヨウ化銀との比較を行い、性能の特性の違い、有用性などが分かった。

2) 代表的な論文

該当なし

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

洪水氾濫ハザード確率予測

課題推進者：

山崎大（東京大学 生産技術研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

令和 7 年度は、前年度までに整備したダム・堤防を考慮した洪水氾濫モデルを基盤として、主に計算効率改善と、堤防を考慮した高解像度浸水域・浸水深ダウンスケール手法の高度化に取り組んだ。

計算効率の改善では、河川流下計算において計算負荷の要因となっていた OpenMP atomic 処理を見直し、上流グリッド情報を事前に整理する準スパース行列型の計算手法を導入した。これにより、複数の上流グリッドから同一下流グリッドへの流入量加算時の競合を回避し、計算速度を向上させた。さらに、OpenMP ループ内で SIMD ベクトル化を明示的に活用するよう主要物理計算ループを改良し、計算時間を 30~40%程度も削減した。さらに、次世代の大規模アンサンブル計算を見据え、GPU 版 CaMa-Flood の開発にも着手した。GPU 版では、不規則な河川ネットワーク上の流量更新や流出入力の集約を、疎行列演算や scatter-add 演算として再設計し、さらなる高速化の見通しを得た。

また、前年度に査読中であった堤防スキームおよび全球堤防パラメータ推定手法に関する論文が国際学術誌に出版された。CaMa-Flood に堤防による洪水防護機能と河道・堤防間の貯留効果を表現する堤防モジュールを実装し、堤防で保護された河道区間、未防護領域割合、堤防高を公開データから推定する手法を提示した。堤防を考慮することで、水位再現性および洪水ハザードマップ精度が改善した。さらに、この堤防スキームと、任意の CaMa-Flood マップ・解像度に対して堤防入力パラメータを作成するツール群を CaMa-Flood v4.30 に統合して公開した。

また、洪水リスク評価に必要な高解像度浸水域・浸水深情報を作成するため、堤防を考慮したダウンスケール手法を開発し、その成果が国際学術誌 *Geoscientific Model Development* に受理・出版された。本手法では、CaMa-Flood が計算した粗解像度の洪水ボリュームを、高解像度地形データ、堤防高、堤防内外の貯留容量に基づいて高解像度の浸水深マップへ変換する。以上により、令和 7 年度は、リアルタイム確率的洪水氾濫予測に向けた計算基盤を強化するとともに、洪水インパクト評価に必要な高解像度浸水ハザード情報を効率的に作成するための技術基盤を確立した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

準スパース行列型の計算手法と OpenMP+SIMD 最適化を導入し、大規模アンサンブル計算に向けた計算効率を改善した。堤防スキームと堤防パラメータ作成ツールを CaMa-Flood v4.30 として公開した。

2) 代表的な論文

Zhao, G., D. Yamazaki, Y. Tanaka, X. Zhou, S. Li, Y. Hu, Y. Hirabayashi, J. Neal, and P. Bates, 2025: Developing a Levee Module for Global Flood Modeling With a Reach-Level Parameterization Approach. *Water Resources Research*, 61, e2024WR039790.

全球河川モデル CaMa-Flood に堤防モジュールを実装し、堤防で保護された河道区間、未防護領域割合、等価堤防高を公開データから推定する手法を開発した。堤防を考慮することで、水位再現性と洪水ハザードマップ精度が改善し、従来モデルで課題となっていた浸水域の過大評価を抑制できることを示した。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

高波・高潮ハザード確率予測

課題推進者：

田島芳満（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度までの研究において、Long-Short Term Memory (LSTM) に基づく時々刻々の高潮を推定するモデル、さらに一点法に基づく波浪場の推定モデルをそれぞれ開発し、任意の台風条件に対して対象地点における高潮偏差および対象地点沖合での波浪場を高速に推定できる手法を構築した。

2025 年度は、上記の高波推定手法の検証を継続するとともに、推定した沖合における波浪諸元と、前々年度に構築した LSTM 高潮推定モデルに基づく高潮を組み合わせて沿岸域における砕波に伴う setup に加え、打ち上げ高を算定する手法を構築した。モデルは、風波成分の浅水・砕波変形にはエネルギー平衡方程式に基づく波浪モデルを適用し、波によるラディエーション応力の変化による水位変動を非線形長波方程式に基づき算定するモデルとした。さらに、既往の打ち上げ高算定式および越波量算定式を組み込み、対象地点における打ち上げ高および越波量を算定可能なモデルへと拡張した。構築したモデルを 2019 年台風 Hagibis に適用し、研究分担者らが実施した災害調査で得た相模湾沿岸域における打ち上げ高の観測結果と比較し、妥当な再現性が得られることを確認した。さらに、課題 3 による台風 Hagibis を対象としたアンサンブルシミュレーションから抽出した 1000 組の台風経路および中心気圧のデータに基づき、相模湾、駿河湾および東京湾の各代表地点における打ち上げ高の確率分布を推定して比較した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

上記のように、多数の台風アンサンブル計算結果に対して、効率的に高波および高潮を推定し、打ち上げ高や越波量などの沿岸浸水ハザードの確率予測を行うための手法を構築できた。

2) 代表的な論文

Zhang, Z., L. Wu, and Y. Tajima, 2025: A probabilistic rapid forecast system of time-varying storm surge combining stochastic typhoon model and recurrent neural network, *Int. Conf. on Asian and Pacific Coast*.

本研究では、任意の対象地点近傍に来襲する可能性のある台風に対して、時々刻々の高潮偏差を確率別に予測する手法を構築した。来襲する台風の予測には自己回帰型の確率台風モデルを用いて、予測開始時までの台風の移動経路や中心気圧の時間変化から、将来の台風経路および中心気圧を予測し、生成した多数の台風に対してそれぞれニューラルネットワーク LSTM に基づく高潮推算モデルで時々刻々の高潮偏差を推定することで、高潮偏差時間波形の確率分布を推定した。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

災害社会ダイナミクスの予測・制御

課題推進者：

小谷仁務（東京科学大学 環境・社会理工学院 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

1) 家計間相互作用を考慮したエージェントベースドモデルによるシナリオ分析

家計間の情報伝搬（社会ネットワーク）を考慮した発災前の減災行動に関するエージェントベースドモデルに用いるシナリオ設定のために国内の水害警報の空振りに関する時空間的特徴を整理した。具体的には、気象庁の過去の警報履歴と実際の水害発生履歴を参照しあうことで、国内の全市町村 20 年間の洪水警報の空振り率を算出した。基礎分析から、空振り率が高い時空間的クラスターが存在すること等が明らかになった。本知見を利用し、隣接地域で空振り率が高いケースなどを反映したシナリオ分析を行っている状況である。

2) エージェントベースドモデルの構造・パラメータに関する推計

上記モデルに関し、水害警報の空振りに関して各家計の認識や感情、行動の点から分析した。具体的には、九州地方を対象としたオンラインアンケート調査で収集した人々の空振り率の認識（空振りと捉える事象や主観的空振り率）と、空振りに対して抱く感情、過去の警報発令時の減災行動有無のデータ（サンプルサイズ $n=997$ ）を用い、それら変数間の関連を因果推論の手法（一般化傾向スコア分析）により分析した。結果として、人々の主観的空振り率が減災行動にもたらす負の影響が明らかになったと共に、その影響は人々が空振りに対して抱く感情に応じて軽減されることが明らかになった。この結果はエージェントベースドモデルにおいて空振りに対して人々がどう反応するかという構造やパラメータの現実的な設定に利用される。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

各家計の水害警報の空振りに関する認識や感情、それらの行動への影響を明らかにしたこと（上記 2））は、国際的にも知見が少ない状況であったため、目標達成に最も寄与する成果であると考えられる。

2) 代表的な論文

Watanabe, M., H. Kotani, R. Yagi, Y. Sawada, and T. Kawabata, 2026: Emotional Responses and Perceptions of False Alarms in Flood Warnings and their Impact on Evacuation Action: *An Empirical Analysis of the Kyushu Region*, Japan. Available at SSRN.

本論文では、洪水警報の空振りに関する認識・感情・行動の関係を明らかにした。具体的には 1. 警報の適中に対する人々の定義、2. 空振りに対する感情、3. 居住地の空振り率（FAR）が主観的な空振り率に与える影響とその影響の警報の適中の定義による異質性、4. 空振り率の認識が避難行動の実行確率に与える影響とその影響の空振りに対して抱く感情による異質性を明らかにした。九州地方を対象に、独自に算出した各市町村の FAR データと居住者へのアンケート調査データ（ $n = 997$ ）を用いている。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

水害経済被害額予測と意思決定のための不確実性推定

課題推進者：

藤見俊夫（京都大学 防災研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

テーマ① 台風アンサンブル浸水解析に基づく被害リスクの不確実性評価

本年度は、台風アンサンブルに基づく浸水解析結果を用いて、三大湾における浸水被害および経済被害リスクの不確実性を比較評価する手法を発展させた。具体的には、100 個の台風アンサンブルを対象に、各台風ケースについて浸水シミュレーション結果と被害推計を接続し、大阪湾、伊勢湾および東京湾における被害分布を分析し、湾域ごとに浸水範囲や浸水深、被害規模が大きく異なることを確認した。また、パレート最適基準を用いた代表台風ケースの抽出手法を導入することで、大阪湾、伊勢湾および東京湾の地域間比較に加え、家計部門と産業部門の被害の関係を評価し、被害のトレードオフ構造を整理した。

テーマ② メタバース技術による災害情報伝達が減災行動に及ぼす影響の検証

本年度は、没入型 VR 実験を実施し、水害状況を体験的に提示することがリスク認知および減災行動に及ぼす影響を検証した。実験では、一般市民 99 名を対象とした。皮膚電気反応、2 週間後の備え行動、実験終了時の水害対策マニュアルの持ち帰り、防災食品の選択といった行動観察指標を用いることで、VR による情報伝達が実際の行動に及ぼす影響を多面的に評価した。分析の結果、水害 VR 体験は身体レベルでの覚醒反応を喚起することで実際の減災行動を有意に促進することが示された。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

テーマ①：三大湾を対象とした台風アンサンブル浸水・経済被害リスクの比較評価

目標達成に最も寄与する成果は、台風アンサンブルに基づく浸水解析と被害推計を接続し、三大湾を対象として被害リスクの不確実性を比較評価する枠組みを構築したことである。特に、パレート最適基準を用いて、複数地域または複数部門において同時に深刻な被害をもたらす台風ケースを抽出できるようにした。これにより、三大湾全体として注意すべき代表的な被害シナリオを把握できるようになった。

テーマ②：水害 VR が身体性認知を通じて減災行動を促進することの実証

目標達成に最も寄与する成果は、水害 VR が単にリスク認知や行動意図を高めるだけでなく、身体反応を介して実際の減災行動を促進することを実験的に示したことである。水害 VR は参加者の皮膚電気反応を有意に高め、この身体反応の上昇が、水害備え行動、資料の持ち帰り、防災食品の選択といった実際の行動に結びつくことが確認された。

2) 代表的な論文

Watanabe, M., and T. Fujimi, 2025: Causal effects of time-sensitive risk communication on disaster preparedness. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 126, 105598.

災害予測情報が世帯の防災行動に及ぼす影響を、2024 年 8～9 月に大阪市民を対象に実施した Web 調査データにより検証した。361 名の有効回答を用いた分析の結果、災害予測情報の認知は備え行動を 21.7%増加させ、特に避難計画や非常用品の備蓄を促進した。適時かつ具体的な公的リスク情報が、災害への切迫感を高め、実際の備え行動を促すことを示した。

3) 代表的な特許

該当なし

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

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論

気象制御の社会的意思決定可能性の検討

課題推進者：

松山桃世（東京大学 生産技術研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

気象制御技術の研究開発が進展するなか、将来的に台風制御技術を社会に実装すべきか否かを判断するためには、技術的実現可能性だけでなく、社会的意思決定を支える議論の場を設計する必要がある。そのためには、議論に関与すべきステークホルダーの特定、人々が本技術を捉える認知構造の把握、適切な情報提供の内容と方法、さらに対話や熟議を促す手法の検討が必要である。

昨年度までに、台風が頻繁に上陸する地域において複数の市民対話を実施し、本技術に対する受容性に影響を与え得る要素の抽出を進めた。対話記録の質的分析を通じて、被害軽減への期待に加え、利益相反、責任の所在、地域格差、補償、環境・生態系への影響、自然観の変化、台風がもたらす恩恵の喪失など、多様な ELSI 論点が抽出された。また、文化的背景や台風被害経験の違いが、本技術の捉え方や、議論に関与すべき主体の認識に影響し得ることを示してきた。

本年度は、これらの質的知見を踏まえ、第一に、本技術への受容的態度が、どのようなリスクやベネフィットの理解・評価の上に成立するのかを量的に把握するため、全国 1,000 名を対象とした質問紙調査を実施した。調査では、台風上陸頻度が高い地域とその他地域を比較し、本技術の認知度、台風被害経験、台風への危機感、本技術への期待・懸念・利点評価・リスク評価、賛否、多様なステークホルダー関与の必要性を調査した。その結果、本技術の認知度が全体として低いこと、期待については、「社会的・国際的な広範な影響」「技術の実現と価値創出」に比べ「被害軽減」が高いこと、懸念は 6 群に整理され、特にコストや環境影響、不確実性とガバナンスへの懸念が顕著であることなどが示された。さらに、構造方程式モデリングにより、本技術の受容態度形成には、期待・懸念・利点評価・リスク評価が複合的に関与していることが示された。

第二に、台風制御をめぐる ELSI 論点を可視化し、社会的議論を支援する「ELSI マップ」の作成を目的に、哲学対話実践者を対象としたワークショップを実施した。「正しい情報とは何か」「誰が責任をとるか」「自然への介入はどこまで許されるか」「台風の恩恵を受けるのは誰か」という 4 つのテーマを設定し、問いを具体的な下位論点へと分解し、暗黙の前提や問い同士の関係を可視化するとともに、合意形成に必要な基礎的問いの抽出を進めた。今後は、多様な分野の専門家へのヒアリングと科学コミュニケーションの実践を通じ、ELSI マップの実用性を評価し、改善を進める。

加えて、プロジェクト横断型の ELSI 基盤ユニットに参加し、萌芽的な段階にある気象制御技術の研究開発において踏まえるべき責任ある研究・イノベーション（RRI）の考え方を示す「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」（MS8 RRI 原則 <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal8/rri.html>）の議論および作成に関与した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

台風制御技術に対する認知構造の分析および社会的意思決定の議論の基盤となる ELSI 論点の構造化を行った。

2) 代表的な論文

該当なし

3) 代表的な特許

該当なし