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

安全で豊かな社会を目指す

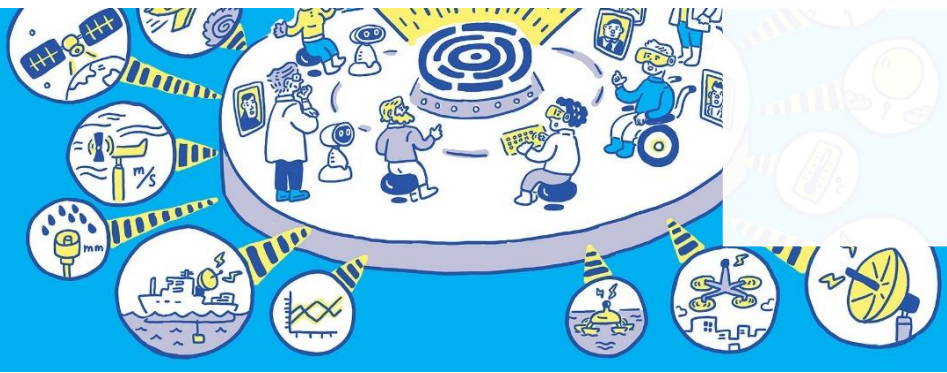
台風制御研究

筆保 弘徳

横浜国立大学 総合学術高等研究院

台風科学技術研究センター

MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



【目　次】

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究 1
PM：筆保弘徳（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　センター長）

領域数値実験による台風への介入模擬実験..... 3
課題推進者：坪木和久（名古屋大学 宇宙地球環境研究所 附属統合データサイエンスセンター　教授）

高精度予測モデルの開発と効率的な人為制御法のメカニズム解析..... 5
課題推進者：佐藤正樹（東京大学 大気海洋研究所　教授）

数値シミュレーションを用いた人為的な台風制御方法の定量的検証..... 7
課題推進者：筆保弘徳（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　センター長）

室内実験による Microphysics スキームの精緻化..... 9
課題推進者：吉田龍二（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　教授）

衛星観測データを用いた台風の物理的診断法の開発..... 11
課題推進者：堀之内武（北海道大学 地球環境科学研究院　教授）

数値実験データを用いた台風変化の地球規模の影響を診断する手法の開発..... 13
課題推進者：那須野智江（海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター　グループリーダー）

船舶を利用した台風制御研究 15
課題推進者：満行泰河（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　准教授）

海洋構造物を利用した台風制御研究 17
課題推進者：藤本康孝（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　教授）

ロケット・航空機を利用した台風制御研究..... 19
課題推進者：樋口丈浩（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　准教授）

台風制御による被害軽減の推計 21
課題推進者：森信人（京都大学 防災研究所　教授）

台風水災害影響評価モデルの開発 23
課題推進者：芳村圭（東京大学 生産技術研究所　教授）

台風制御による風害の被害軽減の推計 25
課題推進者：加藤大輔（株式会社東京海上研究所　主任研究員）

台風制御に関わる ELSI の分析と検討 27
課題推進者：笹岡愛美（横浜国立大学 総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター　教授）

随伴演算子の高度な活用法に基づく制御に最適な摂動の導出..... 29
課題推進者：伊藤耕介（京都大学 防災研究所　准教授）

小さな入力で大きな制御効果をもたらす数理構造の解明..... 31
課題推進者：齊木吉隆（一橋大学 大学院経営管理研究科　教授）

階層間相互作用に基づく大域運動の制御可能性..... 33
課題推進者：佐藤譲（北海道大学 電子科学研究所　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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

PM：
筆保弘徳（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　センター長）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発 5 項目では、気象学・工学・影響評価・ELSI・数理研究を連携させ、台風制御技術の実現可能性検証を推進した。気象学的アプローチでは、高解像度モデルによるシーディングシミュレーションや雲生成チャンバー実験、衛星データ同化を通じて、台風内部コア散布時の応答特性や過冷却水滴の分布特性に関する知見を得た。工学的アプローチでは、船舶・航空機・飛翔体を活用したクラウドシーディング技術や海上制御プラットフォームに関する基礎設計の検討を行った。影響評価では、風害・水害・高潮を対象とした統合モデルにより、全国規模から都市スケールまでの被害低減効果の試算を行うとともに、社会的意思決定支援モデルの構築を進めた。ELSI では、RRI 原則案や屋外実験ガイドライン原案を整備し、市民・関係者との対話を進めながら社会実装に向けたガバナンス枠組の方向性を検討した。さらに数理研究では、随伴モデルや非線形最適化を活用し、対流抑制に寄与する介入条件に関する検討を行った。

2. 代表的な成果事例

1）目標達成に最も寄与する成果

台風発生前への介入実験により、台風の強度や進路に影響を与える可能性を示し、発達期よりも発生期において介入効果が相対的に大きく現れる傾向を確認した。さらに、発生後の台風に対しても、過冷却水滴凍結や凝結核散布によるシーディングが強度変化を引き起こす可能性を示した。また、航空機による台風内部の直接観測から、効果的な介入対象となり得る過冷却水滴が存在する可能性を観測的に示した。これらの成果は、台風制御の実現可能性評価に向けた重要な知見となる。

2）代表的な論文

Satoh, M., S. Nakai, S. Matsugishi, 2025: Response of convection to forcing that creates a cold pool. *SOLA*, 21, 381-387.

コールドプールを形成する外力に対する対流の応答を、一様な海面水温条件下での放射対流平衡に基づく理想化数値実験により調べた。海水散布を念頭に、大気境界層の km スケールの狭い領域に冷気強制を与えた結果、生成されたコールドプールが、強制域の約 10 倍に及ぶ広域で対流を抑制することを示した。本研究により、海水散布による局所的な km スケールの強制が、台風を形成する対流雲に対して効率的な変形効果を及ぼし得る可能性が示された。

Li, H., W. Xie, X. Li, and K. Yoshimura, 2025: Improvement of simulating gross primary production and evapotranspiration in the land surface model based on parameter calibration. *Hydrological Research Letters*, 19(4).

MATSIRO 陸面モデルに対し、感度解析と進化的最適化を組み合わせた体系的なパラメータ較正を適用し、GPP（総一次生産量） と ET（蒸発散量） の再現性を大幅に向上させた優れた研究である。多様な生態系を対象に、支配的パラメータを定量的に特定するとともに、農地では LAI（葉面積指数） の不確実性、とくに多期作に伴う急激な変化がモデル性能に大きく影響することを明らかにした点も重要である。MATSIRO が気候モデルや洪水予測システムの基盤であることを踏まえると、本成果は陸面過程の理解深化に加え、将来的な水資源予測や気候予測の高度化にも大きく貢献する。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

領域数値実験による台風への介入模擬実験

課題推進者：
坪木和久（名古屋大学　宇宙地球環境研究所 附属統合データサイエンスセンター　教授）

1. 研究進捗状況と成果

理想実験台風における雲物理学的インパクト実験として、内部コア領域の過冷却雲粒を凍結させる方法を実施した。対流バーストの雲内の過冷却雲粒の凍結を 1 時間程度行うだけで中心気圧が、最大で 43 hPa 上昇するという減勢が得られた。さらにこの凍結介入をさまざまな時刻で行うことで、多くの介入事例で中心気圧上昇（強度低下）の結果が得られた。この方法を実際に観測された顕著な台風に適用した。2022 年台風 Nanmadol の初期に過冷却雲粒の凍結介入を行ったところ、理想実験の台風と同様に顕著な減勢（最大地上風速の低下と中心気圧の上昇）がみられた。また、航空機による介入を想定して、雲解像モデル CReSS に航空機の数値プロセスを新規に導入した。航空機からエアロゾルを数値的に散布し、それに応答して過冷却水滴が凍結するプロセスを開発し、そのテスト実験を行った。さらに、理想実験台風の過冷却雲粒の凍結による台風の減勢について、軸対称構造の崩れによる台風の強度抑制の仮説を提案した。対流バースト内の過冷却雲粒凍結による加熱が局所的な上昇流とインフローの強化を起こし、その微小な非軸対称構造が成長することで、発達が抑制されると考えられる。現在、詳細な解析を行っている。

実際に観測された 2022 年台風 Nanmadol を対象として、大規模アンサンブル実験を実施し、今年度は摂動の与え方を検討し、小規模アンサンブル実験を実施することで、スプレッドの大きさなどが適切に得られるかを検討した。これらの介入のカギとなるのが、台風の内部コア領域の過冷却雲粒で、その直接的観測を可能とするドロップ型雲粒子ゾンデの開発を進めた。これは予想以上に時間がかかる開発であることが分かり、次年度への継続課題とした。この開発では、CPS（Cloud Particle Imager）ゾンデがベースとなるので、その特性把握が重要である。そこで既存の CPS ゾンデを用いた高層観測実験を実施した。

MS8 の小槻 PM の実施する冬季の日本海沿岸の雪雲に対するシーディング実験に参加し、雪雲内の過冷却雲粒を、雲粒子ゾンデを用いて観測し、氷点下において十分な過冷却雲粒が存在することを示した。さらに粒子数をカウントするための CPS ゾンデを雲粒子ゾンデに連結して放球し、上昇時と下降時の両方で過冷却雲粒の観測に成功した。これにより CPS ゾンデが観測する過冷却雲粒のデータ特性を調べ、ドロップ型 CPS ゾンデの開発の基礎データを取得した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

数値モデルを用いた台風の減勢研究として過冷却雲粒子の凍結は、雲物理学的方法として期待できる方法であり、目標達成に最も大きく寄与している。微小な雲粒子が過冷却状態にあることは、不安定な状態にあると考えることができる。不安定状態は小さな介入で大きな応答が期待される。この雲物理学的方法は小さな介入であるが、応答としての台風強度の大きな減少が起こることを利用している。これに加えて数値的に航空機を飛行させる実験で、より現実的な台風制御の実験を実施できることが期待される。これを観測からサポートする実験を開始した。これらの数値実験と観測の両方が連携して発展することで目標を達成できると考えられる。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

高精度予測モデルの開発と効率的な人為制御法のメカニズム解析

課題推進者：
佐藤正樹（東京大学　大気海洋研究所　教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、以下の達成目標を令和 8 年度のマイルストーンとする。①1 ㎞格子の高解像度数値予測モデルを開発し、現業数値モデルに比べた台風予測精度について優位性を示す。②台風の内部構造の変化のメカニズムの理解の進展を通じて、台風の内部構造を高精度に予測可能な数値モデルの開発に資する。特に、壁雲交換等の壁雲の変化機構を明らかにする。③台風の強度に変化を与える有効な人為的制御法を解明する。人為的制御法を想定した外力により、台風の強度の変化を定量的に評価する。

まず①については、気象庁において 1 ㎞格子の高解像度数値予測モデルによる局地予測が令和 7 年度末に現業化予定であることを踏まえ、2 ㎞格子モデルと 1 ㎞格子モデルによる台風予測の比較解析を進めた。1 ㎞格子モデルでは、より詳細な台風内部構造を表現できるなどの利点が示されている一方で、現時点では台風中心位置や強度の予測精度について有意な改善は確認されていない。今後改善に向けた取り組みを行う。

次に②については、壁雲交換過程を含む台風壁雲の変化機構の解明を目的として研究を継続している。2024 年台風 Shanshan の日本接近時を対象とした数値実験を実施した。感度実験の結果、レインバンド加熱が強いほど強いインフローが形成され、正味の接線風が増加する傾向があることが示された。また、内向きの運動量輸送が外側壁雲における接線風極大の形成をもたらし、外側壁雲形成に寄与することが明らかとなった。さらに、EarthCARE 衛星データを解析し、台風内の対流性上昇流および雲粒子種の分布特性を調査した。特に、シーディングに関連する情報として、過冷却水の分布特性が得られた。

最後に③については、台風の最盛期および台風の発生段階において、人工的な海水散布法によるコールドプールを生成する最適な位置の特定に注力した。強制を設定した位置によって結果に差が生じることが明らかとなり、有益な知見が得られた。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

本研究では、海水散布による人工的なコールドプール生成を通じた台風制御の可能性について検討を進めた。強制の強度・位置・数に対する依存性を系統的に解析した結果、局所的な冷気強制が台風構造に変化を与え得ることを示した。特に、半径数 10 ㎞の台風の眼の高度 1 ㎞までの下層領域を冷却することにより、台風の強度を 10 hPa、5 m/s 程度弱化する可能性が示された。

２）代表的な論文

Satoh, M., S. Nakai, and S. Matsugishi, 2025: Response of convection to forcing that creates a cold pool. *SOLA*, 21, 381-387.

本研究では、コールドプールを形成する外力に対する対流の応答を、一様な海面水温条件下での放射対流平衡に基づく理想化数値実験により調べた。海水散布を念頭に、大気境界層の ㎞スケールの狭い領域に冷気強制を与えた結果、生成されたコールドプールが、強制域の約 10 倍に及ぶ広域で対流を抑制することを示した。本研究により、海水散布による局所的な ㎞スケールの強制が、台風を形成する対流雲に対して効率的な変形効果を及ぼし得る可能性が示された。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

数値シミュレーションを用いた人為的な台風制御方法の定量的検証

課題推進者：
筆保弘徳（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　センター長）

1. 研究進捗状況と成果

高解像度数値モデルおよび観測を組み合わせ、台風強度の人為的制御手法の実現可能性を検討している。主な介入手法として①クラウドシーディング、②海上における抵抗体（船舶・構造物）の設置、③湾口での波浪・高潮制御、④航空機観測による微物理過程の検証の 4 チーム体制で研究を推進している。

チーム A では、NHM-Chem を用いた数値実験により、エアロゾル散布が台風構造・強度に与える影響を解析した。2019 年台風 Hagibis では、シーディング後 24 時間程度までは強化傾向、その後 48 時間以降には弱化傾向へ転じるなど、時間依存的な応答が確認された。また、粒子の大部分が早期に沈着し、効率的な影響発現には中心付近への持続的散布が重要であることが示唆された。2019 年台風 Faxai を対象とした発生期の実験では、強度・進路への影響は限定的であり、親ドメインの影響や解像度制約が課題として明らかとなった。超水滴法（SDM）による理想実験では、過冷却水滴の強制凍結により降水量・降水強度の低下が確認された。

チーム B では、LES を用いた超高解像度シミュレーションにより、台風内部の乱流構造およびスケール間相互作用を解析した。特に壁雲直下での短時間スケールの風速変動や、数百 m スケールの擾乱が台風スケールへ与える影響（アップスケール過程）について評価を進めており、抵抗体設置による風場制御の基礎的知見を得ている。

チーム C では、湾口に抵抗体を設置することで高潮・高波を軽減する手法の検討を行っている。伊勢湾台風を対象とした数値実験では、進路・強度の再現性向上に向けた初期値設定の調整を進めており、将来的には温暖化環境下での極端台風に対する防災効果の評価を目指している。

チーム D では、航空機観測により台風内部の過冷却水滴の存在を検証した。2025 年台風 Halong に対する観測では、氷点下環境下で水に対する過飽和状態が確認され、過冷却水滴の存在を示唆する結果が得られた。これは、数値実験で仮定されてきた微物理過程に観測的裏付けを与えるものであり、相変化を利用した台風制御手法の現実性を検討する上で重要な成果である。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

チーム A での結果が有用であった。該当年度より SDM 基盤ユニットと連携して、SDM を用いた台風環境場における積乱雲内の過冷却水滴を対象とした強制凍結の理想数値実験を実施した。水平解像度 100 m の理想実験において、積乱雲を再現しつつ、感度実験として対流圏中層 1 km の層に存在する過冷却水滴を強制的に凍結させた。基準実験に比べて、感度実験では総降水量が減少し、降水強度についてもピーク時に低下する傾向が確認された。これらの結果は、過冷却水滴の相変化を介した降水抑制効果を示唆するものであり、台風強度制御に向けた微物理過程の理解に重要な知見を与える。

また、2019 年台風 Hagibis を対象に NHM-Chem を用いて、台風発達期に合計 32 トン程度の Sulfate を散布する想定の仮想シーディング実験を実施した。20 のアンサンブル実験いずれも、台風の強度に変化が表れた。特に中心から半径 200 km の北東領域へ散布を行った実験では、CTL と比較して中心気圧が最大で約 5 hPa 高く、最大風速が約 4 m/s 減少した。これにより、人為的に実施可能な散布量条件下においても、最大で 10%程度の台風弱化応答が生じる可能性が示唆された。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

室内実験による Microphysics スキームの精緻化

課題推進者：
吉田龍二（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　教授）

1. 研究進捗状況と成果

シーディングによる台風制御手法開発に向けた台風を構成する対流雲を対象とした室内実験

本研究では、高温多湿環境下で背景エアロゾルとシーディングエアロゾルの競合を調べるため、条件を変えた 13 通りの室内実験を実施した。実験する大気に NaCl 粒子のみの場合は雲粒数が数百個/㎤程度であったが、硫酸アンモニウム粒子を数千個/㎤加えると雲粒数は千個/㎤規模に増加し、競合条件下でもシーディングによる雲粒数の増加効果が確認された。これらの結果は台風シーディングの有効性評価に資する基礎的知見を提供するものであり、今後論文化を進める予定である。

台風制御実験に用いる数値モデル（エアロゾルパラメタリゼーション）の検証・改良

領域数値モデルを用いた吸湿性シーディング研究では、複数台風事例のシミュレーションから台風応答に大きなばらつきがあることが確認され、2024 年台風 Nanmadol 事例ではシーディングにより最大約 5 hPa の弱化と内部コア構造の変化が示された。さらに、SCALE-SPRINTARS による実験では、半径 100 km 以内の内部域でのエアロゾル増加が雲水増加・降雨減少をもたらす一方、半径 200 km 以外の外部域での影響は限定的であることが分かった。加えて、雲微物理モデルの精緻化に向けた感度実験や観測比較から、雲粒数濃度の過大評価と自己変換過小評価の可能性が示され、背景エアロゾル場の解析とともに今後の研究進展が期待される。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

室内実験で背景エアロゾル存在の下で硫酸塩散布の有効性が確認できたこと、および数値モデルを用いた硫酸塩の仮想シーディング実験にて台風弱化応答が確認できたことの 2 点である。この 2 点から吸湿性シーディングによる介入手法に期待できると考えられる。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

衛星観測データを用いた台風の物理的診断法の開発

課題推進者：
堀之内武（北海道大学　地球環境科学研究院　教授）

1. 研究進捗状況と成果

台風の強度・構造の診断を改善するため、ひまわり 8・9 号による台風の機動観測を活用し、気象衛星画像に写る雲を追跡することで風速を高密度に取得するための手法を開発している。それをデータ同化システムに同化することで、台風の強度推定を改善する。本年度は、観測システムシミュレーション実験により、得られた風速を同化することで台風の強度推定が改善し得ることを示した（Tsujino and Horinouchi 2025)。さらに、実際のデータを同化する実験でも改善がみられるという結果を得た。また、衛星搭載マイクロ波放射計データの新たな高度利用法として、台風を特徴づける重要なパラメータである最大風速半径を推定する方法を開発し、高い精度を持つことを示した。

海面高度が面的に測定できる初めての衛星搭載海面高度計を用いて、台風が海洋に及ぼす影響と、それがロスビー波として伝搬する様を観測・理論両面から明らかにした。また、衛星搭載合成開口レーダー（SAR）による台風観測に見られる筋状構造の成因を明らかにするため、LES によるシミュレーション結果から同様な構造の発生過程を検討した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

Tsujino and Horinouchi (2025)として発表した下記の論文が、目標達成に最も寄与する成果である。その後の実データを用いた実験でも良好な結果を得た。

２）代表的な論文

Tsujino, S., and T. Horinouchi, 2025: A feasibility study on improving tropical‐cyclone inner-core structure based on data assimilation of inner-core atmospheric motion vectors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(19), e2025JD043978.

本研究では、台風の機動観測から得られる高密度な雲追跡風を同化することで、台風の強度推定が改善し得るかを調べた。非静力学領域気象モデルと局所アンサンブル変換カルマンフィルターを用いるデータ同化システム SCALE-LETKF を用い、雲追跡風を疑似的に同化する、観測システムシミュレーション実験を行った。その結果、台風の目の中の下層の風速を同化すると、正解として指定されたシミュレーション中の台風の風速分布と強度を良く再現できることが示された。

Shimada, U., 2025: Estimation of the Radius of Maximum Wind Using Passive Microwave Satellite Data. *SOLA*, 21, 265-272.

台風などの熱帯低気圧のモニタリングでは、最大風速半径の推定が重要である。合成開口レーダー（SAR）を使えばそれが可能であるが、観測頻度が低いという問題がある。そこで、本研究では、89 GHz パッシブマイクロ波衛星データから、熱帯低気圧の最大風速半径を推定するための方法を開発した。検証した結果、同心円状の眼壁やリング構造のないケースを客観的に除外すると平均絶対誤差が 5 km 未満と、高い精度を持つことが確認された。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

数値実験データを用いた台風変化の地球規模の影響を診断する手法の開発

課題推進者：
那須野智江（海洋研究開発機構　地球環境部門　環境変動予測研究センター　グループリーダー）

1. 研究進捗状況と成果

台風勢力の介入による変化が、周辺環境場に及ぼす影響を定量的に評価することは、台風への介入の実現において不可欠である。当該研究課題では、全球非静力学モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model(NICAM)を用いた大アンサンブル数値実験データを用いて、台風の強度と日本域や北西太平洋広域における大気場や降水との関係を数値的に示す手法を構築し、その気候的特性や、プロジェクトの共通対象である複数の台風事例について有意な影響範囲の定量化を行った。成果として以下に記す知見が得られた。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

NICAM を用いて、プロジェクトの共通の対象事例について数値実験（全く同じ条件から台風の中心核付近のみに操作を施した／施さない実験）を行い、大気運動の代表的な指標として、広域の気圧場に注目して広域を対象とする台風強度を変えた影響の定量化を行った。回帰分析の結果、介入後数日内は介入度合いに対応する有意な影響がみられ、その範囲は台風周辺域から波動応答の変化へと拡大するが、有意な影響の振幅は台風自身に対する大気応答に比して約 1 桁小さい傾向があること、5～6 日を過ぎると応答の振幅は拡大するが有意ではなくなることを確認した（Nasuno et al., AAS01-P09, JpGU meeting)。また、台風による風水害に直結する変数として、降水についてアンサンブル多年数値実験データを活用し、台風活動度との間に有意な気候的関係があることを示した（Yamada et al.: 2025: *SOLA*)。

２）代表的な論文

Yamada, Y., T. Nasuno, M. Nakano, C. Kodama, M. Hishinuma, T. Miyakawa, and M. Fujita, 2025: Evaluation of the relationship between seasonal tropical cyclone activity and rainfall in Japan using a large-ensemble simulation. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 21B, 8-17.

日本域における台風の活動度と降水の気候的関係について、熱帯低気圧積算エネルギー（Accumulated Cyclone Energy, ACE)を指標とした台風活動度と台風に伴う直接降水の間に、強い正の線形相関があり、この関係は海面水温分布等の年々変動に依らず成り立つことを示した。台風に伴う間接降水についても、台風活動度との間に有意な線形相関が検出された。ただし、相関の度合いは直接降水ほど一意的ではなく間接降水の対象範囲に対する感度がみられた。モデルのバイアスの問題はあるものの、従来型の気候モデルに比べ台風の構造を高解像度で表現することができ、同一年について多数のデータが利用できるため、観測データのみでは難しい統計的な関係が明確になった。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

船舶を利用した台風制御研究

課題推進者：
満行泰河（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、船舶を用いた台風制御の実現可能性評価を目的として、台風下層における海上オペレーションの成立性および各種介入手段の工学的成立性について検討を進めた。特に、クラウドシーディングの実施を見据え、荒天環境下における船舶運用の安全性評価および安定化技術の検討を中心に実施した。

まず、台風環境を模擬した水槽実験と数値解析を組み合わせ、強風・高波条件下における船舶運動の定量評価手法を構築した。これにより、台風下においても所定のミッションを実施可能な運用条件や設計要件に関する知見を得た。また、船体下部に設置したタービンが、発電機能に加えて動揺低減に寄与する可能性を示し、船舶の運用安定性向上に向けた有効な手段となり得ることを確認した。さらに、硬翼帆の設計および制御が船速や動揺特性に与える影響についても検討を行った。

加えて、台風への介入手段として、①船舶抵抗体、②水散布手法、③防風障壁、④クラウドシーディング実施プラットフォームの 4 手法について、具体的な装置コンセプトの設計およびコスト・技術的難易度の試算を実施した。また、各種介入手段の検討を通じて、気象学的アプローチにおいて有望とされているクラウドシーディングに着目し、その実装に向けた海上プラットフォームの設計および運用要件の具体化に取り組んだ。

さらに、気象学的アプローチとの連携により、研究後半ではクラウドシーディングに特化した検討へと発展し、海上からのシーディング手法についても検討を開始した。これにより、台風制御に向けた海上プラットフォームの多様な実現形態と、その技術的成立性に関する基礎的知見を体系的に整理し、台風制御に向けた海上プラットフォーム設計の方向性を提示した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

台風環境下における船舶オペレーションの安全性評価手法を、水槽実験と数値解析を統合した形で構築した点が最も重要な成果である。これにより、台風下層における海上活動の成立性を定量的に評価可能となり、クラウドシーディング等の各種介入手段の実現可能性を工学的に判断する基盤を確立した。

２）代表的な論文

Trang, N. T. H., T. Mitsuyuki, Y. Hirakawa, T. Pham-Truong, and S. Yokota, 2026: Integrated Sail-Hull-Turbine Assessment for Wind Power Generation Ship Using Experiment and CFD. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(2), 111.

本論文では、硬翼帆・船体・水中タービンを統合した風力発電船の性能評価手法を提案し、水槽実験および CFD 解析を組み合わせてシステムレベルでの挙動を明らかにした。特に、帆推力と船体抵抗、タービン負荷の相互作用を統合的に評価することで、実運用における最適な運用速度帯およびタービン構成を導出した。また、タービン配置が運用可能範囲および発電性能に大きく影響することを示し、複合システムとしての船舶設計の重要性を明確化した。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

海洋構造物を利用した台風制御研究

課題推進者：
藤本康孝（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、各サブテーマに基づき研究開発を着実に進め、数値解析および実現可能性の検証において有意な成果を得ている。サブテーマ(1)では、電磁力により散布物質を投射するレールガン型装置のモデルを構築し、電磁界有限要素解析により、固定子長 25 m で約 600 kN の推力を示した。さらに、固定子長 100 m の装置では射出速度 2 km/s を達成可能であり、200 km 先への物質投射が実現可能であることを示した。サブテーマ(2)では、メガフロートへの設置を想定した大型永久磁石リニアモータによる電磁カタパルト装置を検討し、固定子長 3.6 km のモデルにおいて約 2.2 MN の推力と 2 km/s の射出速度を確認した。また、投射体について空力解析を行い、250 km 先へ約 8 分で到達可能であることを明らかにした。サブテーマ(3)では、船舶搭載型ヒートポンプのモデル化と最適設計を行い、冷媒 R134a を用いた系で成績係数 10.2 を達成した。5 MW 級ユニットを多数搭載した船団により、合計 3 GW 規模の冷却能力を実現し、大気境界層の冷却に必要な熱流束を確保できる見通しを得た。サブテーマ(4)では、エネルギー輸送に適した高入出力特性を有する電池として、ナトリウムイオン電池およびプロトン系電池の研究を推進し、いずれも急速充放電や高出力特性において優位性を実証した。これらの成果は、散布物質の輸送・投射および大規模冷却システムの実現に向けた基盤技術として重要な進展である。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

船舶搭載型ヒートポンプのモデル化と最適設計により高効率な冷却システムの成立性を示し、5 MW 級ユニットを多数搭載した船団により、総計 3 GW 規模の冷却能力を実現可能である見通しを得た。これにより、大気境界層に対して有効な約 50 W/m2 の熱流束を供給し、台風制御への応用可能性を示した。

２）代表的な論文

Zafar, Saad., S. Furuhata, Y. Ugata, T. Komagata, and N. Yabuuchi, 2025: Meta-aramid resin as functional binder and its applications for bipolar-type aqueous batteries. *Materials Today Energy*, vol. 52, 101962.

豊富な元素を用いる水系プロトン電池が注目されている。本研究では、メタアラミド樹脂を非水溶性バインダーとして用い、$Ni(OH)_2$および$La_{0.5}Nd_{0.5}Ni_5$のシート型複合電極をスラリー塗工で作製した。両電極は水系電解液中で可逆的なプロトン挿入・脱離と高い出力特性を示し、3 V 超の双極型プロトン電池の組立にも成功した。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

ロケット・航空機を利用した台風制御研究

課題推進者：
樋口丈浩（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、飛行体を用いて、台風上層ないし中層におけるクラウドシーディングを実現するための誘導制御、オペレーションを工学的な視点で検証している。2025 年度は研究活動初年度のため、特にシステム要求や現状などの情報収集を始めながら、台風環境下における飛行体の運動を再現するための飛行シミュレータの開発を中心に実施した。

まず、台風のクラウドシーディングの要求に関し、現状で構想されているクラウドシーディング手法に関する整理を行った。また、既存の飛行体を中心にその積載量や応用性を含めクラウドシーディングに適不適である情報を整理した。現状、既存の航空機の中では川崎 C-2 が飛行距離、積載量、応用性の観点から最も適していることが見積もられた。

これまで台風環境を模擬した飛行体のシミュレーションは十分に行われていなかったため、新規で調査開発する必要性があったため、固定翼機および飛翔体モデルの 6 自由度運動モデルを新たに構築した。大まかな台風環境をシミュレータ内に再現し、飛行体の台風内での運動解析を行った。研究当初、台風の風速に関する飛行体の運動応答に着目していたが、解析の結果、風速の空間勾配が飛行体の姿勢安定性の支配要因であることを示した。これは、台風の目などを通過する時に強風域から弱風域へ移行する際、また強風の空域に侵入するときなどに、飛行体の姿勢、運動に大きな影響が出ることを示している。また、ピンポイントでの配送を考慮した場合、台風内の強風速による飛行体への影響はやはり大きく、ターゲットとする地点を地球固定座標系と台風相対座標系のどちらで評価するかなど、多くの要素が絡むことが理解できた。

さらにはシーディングのオペレーションに関係して、クラウドシーディングに向けた規模の調査、既存機体の性能と適用性の評価、地上インフラの適用性の評価、過去の台風軌道に合わせた各種飛行体を利用した時の配送シミュレーションなどを実施した。固定翼機では機体の飛行距離と空港の位置により台風初期からのアプローチの可否、結果的にクラウドシーディング量に大きな影響を及ぼすことが分かった。飛翔体を用いたシーディングではピンポイント制は高いシーディングができる一方、積載量の制限が大きいことが分かった。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

台風環境下において飛行体が台風内へアプローチする際、実際の風速よりも空間的な風速勾配が飛行安全性・ピンポイント配送に支配的な影響を及ぼすことを導き出した。得られた成果により、実際の飛行体によるクラウドシーディングを実施する際の経路計画等の指標の一つを見出した。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

台風制御による被害軽減の推計

課題推進者：
森信人（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、他課題と協力し、台風に関連する風水害についての総合的な被害評価を行う。このため統合的風水害被害評価モデルを開発し、台風制御による経済被害を推計する。本課題では、個別の風水害推計モデル開発の中で、特に、強風および高潮による沿岸浸水による建物レベルの経済影響を評価するミクロモデル（建物単位）の開発を行い、台風制御による経済的影響の近似解を提案する。また、台風制御が避難行動や中長期的な社会経済活動へもたらす影響の分析も実施する。本年度は、マイルストーンである、台風経路アンサンブルデータによる全国の風水害の被害をマクロ的に推計し、経路と被害額の関係を導出、統合影響評価モデルのプロトタイプを完成した。

まず、都道府県単位の高潮被害推計のマクロモデルのため、海水位と浸水面積の関係を関数化した。海抜 0m 地帯を持つ東京および大阪については、高潮浸水モデルを用いてアンサンブル浸水シミュレーションを実施し、資産データを利用して被害額を求め、マクロ的な被害予測を可能とした。これにより、台風経路に対する高潮偏差と被害額の関係を明らかにした。

統合影響評価モデルのコンポーネントである建物単位の被害額を推定する強風被害推計のミクロモデルのプロトタイプを完成した。前年度までに開発された建物形状等のエクスポージャーおよびその周辺の特徴を考慮した耐力モデルおよび風圧力モデルを統合した工学的被害予測手法をもとに、ミクロ的被害予測のプロトタイプを完成した。最後に、強風被害、洪水被害、高潮被害を統合した評価を実施した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

過去の台風特性、水位、被害額が定量化できている 2019 年台風 Hagibis および Faxai を対象に、東京湾における台風強度の変化から高潮偏差、浸水面積および被害額の関係を推計した。その結果、ハザード・被害関係は、台風強度の減少に対しては線形な現象、台風強度増加については非線形な増加が成り立つことを示した。

また、建物単位の被害額を推定する強風被害推計では、住宅が密集している大阪府南部の一部領域 400 m×800 m にある住宅群を対象に、個々の住宅の特徴を推定し、構築した工学的被害関数を用いて、風速ごとの風圧および飛散物衝突による屋根被害を予測した。例えば、屋根ふき材の被害割合の期待値、罹災率の期待値に対して、2018 年台風 Jebi のケースでは、現時点で構築している工学的被害関数および検討条件においては、もとの風速ごとに効果は異なるものの、おおむね風速 1 m/s 減じるごとに屋根被害率の期待値は約 1.3%、罹災率の期待値は約 3.2%減じる結果を得た。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

台風水災害影響評価モデルの開発

課題推進者：
芳村圭（東京大学　生産技術研究所　教授）

1. 研究進捗状況と成果

１） 台風水災害影響評価モデルの開発

河川流量や河川水位の推計だけではなく、それによってもたらされる冠水・氾濫による被害額も推計可能なモデルシステムになるよう大幅に改良した。また、その被害額推計値を、実際の災害で生じた被害額と比較検証し、モデルパラメータを較正することで精度を高めた。

２）気象水文被害連成予測システムの開発

1)で開発した台風水災害影響評価モデルに対して、本コア研究で行われる気象モデルを用いた台風への人為介入シミュレーション結果を大気フォーシングとして与え、台風に対して人為介入を行った場合の洪水被害額推計を可能とする「気象水文被害連成予測システム」を開発した。これにより、ある台風による人為介入あり・なしの気象シミュレーション結果がそれぞれの水災害を推計可能となった。

３） 被害最小化をもたらす人為介入の逆推計

開発した 1)の台風水災害影響評価モデルと 2)の気象水文被害連成予測システムを用いて、水災害の被害が最小となる人為介入の仕方を逆推計する。そのためには、非常に多くのアンサンブルランが必要になる。そのため、統計的な関係性をより簡素で高速なアルゴリズムで再現する代理モデル（エミュレータ）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

特に課題 2)にて、降水強度が人為介入によって増減した場合に、浸水被害額がどの程度変化するのかのシミュレーションができるようになった。具体的には、2019 年台風 Hagibis について、降水強度が 10%減少すると被害額が 35%（4500 億円）減少、10%増加すると 22%（2800 億円）増加し、非線形応答が確認された。また、そうした変化は県ごとに大きく異なることが明らかとなった。

２）代表的な論文

Li, H., W. Xie, X. Li, and K. Yoshimura. 2025: Improvement of simulating gross primary production and evapotranspiration in the land surface model based on parameter calibration. *Hydrological Research Letters*, 19(4), 252-259.

本研究は、MATSIRO 陸面モデルに対し、感度解析と進化的最適化を組み合わせた体系的なパラメータ較正を適用し、GPP（純一次生産量） と ET（蒸発散量） の再現性を大幅に向上させた優れた研究である。多様な生態系を対象に、支配的パラメータを定量的に特定するとともに、農地では LAI（葉面積指数） の不確実性、とくに多期作に伴う急激な変化がモデル性能に大きく影響することを明らかにした点も重要である。MATSIRO が気候モデルや洪水予測システムの基盤であることを踏まえると、本成果は陸面過程の理解深化に加え、将来的な水資源予測や気候予測の高度化にも大きく貢献する。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

台風制御による風害の被害軽減の推計

課題推進者：
加藤大輔（株式会社東京海上研究所　主任研究員）

1. 研究進捗状況と成果

本研究の主たる目的は、台風制御による風害の軽減効果を定量的に評価し、その成果を台風制御の社会受容性向上に資する科学的根拠として整備するとともに、台風への効果的な介入手法の検討に資する知見を提供することである。

本年度は、これまで開発を進めてきたマクロレベルの風害リスク評価モデルのプロトタイプを完成させた。また、建物被害は台風経路への依存が大きいことから、複数の台風事例（2019 年台風 Faxai、2018 年台風 Jebi、2019 年台風 Hagibis ）を対象として、実際の台風経路を東西方向に変位させた複数シナリオから構成される台風経路アンサンブルデータ（TPES）を用いた評価を実施し、経路変化が被害に及ぼす影響を評価した。

さらに、定量的評価の補完として、国民の台風制御の効果に関する意識調査を実施した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

TPES による複数アンサンブル評価：

3 つの台風事例（2019 年台風 Faxai、2018 年台風 Jebi、2019 年台風 Hagibis）を対象として、TPES を用いた評価を実施し、台風経路の変化が建物被害に及ぼす影響を分析した。TPES とは、既存の台風を数値シミュレーションにより再現した後、大気場を固定したまま、陸面条件や海陸分布等を東西に移動させて再計算することで、多様な経路をとる台風を生成したデータである（山崎ら，2017)。分析の結果、台風経路の違いが建物被害に与える影響を定量的に評価することができた。特に、九州地方へ来襲するシナリオでは、被害が大きくなる傾向が確認された。

一方で、地域によっては被害が過大または過小に評価される傾向も見られた。現状では、資産分布データの解像度に合わせて都道府県単位で風速評価を行っているため、より詳細な地域ごとの風速分布と資産分布の違いを十分に反映できていない、都道府県全体の被害が適切に評価されない場合がある。以上を踏まえ、今後は資産分布データの空間解像度を向上させるとともに、より詳細な空間単位で風災評価を実施する必要があることが課題として明らかとなった。

国民の台風制御の効果に関する意識調査：

台風を人為的に制御することで得られる効果に関するアンケートを行った。その結果、「大きな効果がある」と評価される傾向は、人命や社会インフラへの直接的な被害軽減に関する項目で高く、仕事や家事、レジャーへの影響軽減に関する項目では相対的に低かった。また、「最大風速●%弱める」といった気象現象自体への効果を示す表現よりも、「被害額を▲億円減らせる」「被害件数を●件減らせる」といった被害軽減を具体的に示す表現の方が、効果の認知が高い傾向がみられた。さらに、九州、首都圏、東北の各エリアを対象に比較を行った結果、調査全体を通じて顕著な地域差は認められず、台風被害経験の大小にかかわらず、各設問に対する評価傾向は概ね共通していることが確認された。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

台風制御に関わる ELSI の分析と検討

課題推進者：
笹岡愛美（横浜国立大学　総合学術高等研究院　台風科学技術研究センター　教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究課題は、台風制御に関わる ELSI を把握し、これを前提に、倫理や正義に関わる状況の分析や法的対応のあり方を検討し、必要な環境整備に向けた取組を実施することを目標とするものである。2025 年度は、4 年目のマイルストーンとして設定した 3 つの課題に取り組んだ。

マイルストーン①（ELSI 基盤ユニットと協力し、気象制御の小規模屋外実験の実施に係る自主規制文書案を作成する）に関する成果は次の通りである。まず、2024 年度までの成果として、気象制御研究における倫理原則および実証実験ガイドラインの素案を作成し、これを検討の基礎資料としてとして ELSI 基盤ユニットにおいて検討を進めてきた（基盤ユニットの活動には笹岡 PI が参加する）。本研究課題においては、歴史研究、国際法・各国国内法の調査・分析、社会調査、環境倫理等に関する基礎研究を進め、笹岡 PI を通じて、倫理原則案およびガイドライン案に関わる基盤ユニットでの検討に反映した。これにより、2025 年度の基盤ユニットの成果である「目標 8 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（暫定案）(MS8・RRI 原則)」の完成・公表に貢献した。マイルストーン②（クラウドシーディングによる台風制御を想定した社会実装シナリオを作成する）については、クラウドシーディングを想定した実装シナリオ（航空機の調達、GO/NO-GO 判断、成功・失敗の定義、制御以外の機体の活用方法）を整理し、台風制御の実装段階における検討事項を明らかにした。マイルストーン③（屋外実証実験に際して設けられる対話フォーラム等において活用するため、2050 年段階における台風制御のオペレーションをイメージすることができるような動画を制作する）に関しては、台風制御をテーマとしたアニメーション動画の制作を主導し、年度末に完成させた。動画は、2026 年 6 月に開催される台風科学技術研究センター（TRC）のイベントにおいて公開する予定である。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

2026 年 3 月の法哲学・社会哲学国際学会連合会（IVR）日本支部国際会議（IVRJ2026）における米村（Yonemura, K. “Moral Uncertainty and Typhoon Control Technology”）および山本（Yamamoto, N. “The Ethics of Intervening in Nature for Disaster Prevention”）の報告等を通じて、台風制御の倫理的な側面について、法哲学分野での研究が進展した。具体的には、台風制御の技術的可能性は、環境倫理の文脈で人間中心主義であると消極的に評価され得る一方、災害倫理の文脈では人命の保護につながるものとして積極的に評価され得るといった考察が示された。これらの分析は、MS8・RRI 原則第 2 原則（倫理及び正義への配慮）の実質的内容となる成果である。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

随伴演算子の高度な活用法に基づく制御に最適な摂動の導出

課題推進者：
伊藤耕介（京都大学　防災研究所　准教授）

1. 研究進捗状況と成果　伊藤

4 年度目となる 2025 年度は、第一に、随伴モデルを用いた感度解析介入サイクルを安定して動作させ、数日間にわたるシーディングを模した介入の最適化問題を解き、台風強度や台風に伴う激しい降水を弱体化させることを目的とする数値実験を行った。5 km メッシュの高解像度実験により、台風強度の弱体化を目指した実験においては、台風発生期から、毎時間、気相から液相への相変化で台風強度の弱体化が見込める箇所（全体の約 0.1%）で、実際に凝結を起こしたと仮定する数値実験を行った。その結果、毎時 10^{10} kg 程度の凝結を起こすことができれば 2〜3 日後の台風を中心気圧が約 10 hPa 低下することを定量的に示した。また、2025 年台風 Co-Way に南大東島で降った顕著な大雨について、1 km メッシュでの超高解像度モデルによる解析介入サイクルを実施した。この場合、数値実験を開始して数時間以内の降水量を低減させることには成功したものの、そのまま実験を継続した場合には、介入を加えたことで降水が増加し、3 日間での総降水量は多くなっていた。

第二に、振幅が有限であるような擾乱を考慮した非線形最適撹乱を導入し、小さな摂動からより大きな変化をもたらすための研究について進展を図った。これまで乾燥大気を仮定した境界層乱流における数値実験を行っていたが、2025 年は、降水を伴うシステムに適用する数値実験に適用し、30 分後の対流に大きな変化をもたらすことを目的とした数値実験を実施した。その結果、古典的な随伴モデルによって計算される摂動よりも、有限振幅を持つ非線形最適擾乱で成長率の大きな摂動を取り出すことに成功した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

2022 年台風 Nanmadol に対して、相変化を起こすことにより台風の弱体化が見込める箇所を、随伴モデルを用いた感度解析手法により特定し、毎時の介入を加える数値実験を行った。その結果として、期待した通りに、2〜3 日後に台風を弱体化させることができた。台風の弱体化につながる摂動の構造を解析したところ、台風の壁雲よりやや内側の対流発生域では水蒸気が多くなることで強くなり、逆に、やや外側の領域では水蒸気が多くなることで弱くなっていた。一方で、対流活動に繋がらない領域では、台風強度への感度はほとんど無かった。

２）代表的な論文

Yamaguchi, M., Y. IKUTA, K. ITO, M. SATOH, 2025: Tropical Cyclone Track and Intensity Predictions in the Western North Pacific Basin Using Pangu-Weather and JMA Initial Conditions. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 103(3), 137-150.

北西太平洋における台風の進路や強度について、Pangu-Weather という機械学習モデルに気象庁の初期条件を与えた場合に予測精度を改善できるかどうかということに関する研究。1〜5 日先の進路予報に関しては、8〜19%の改善となった。進路が急激に変化する事例については、一定の改善傾向が認められたが、更なる改善が期待される。強度予報に関しては、ほとんど改善が認められなかった。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

小さな入力で大きな制御効果をもたらす数理構造の解明

課題推進者：
齊木吉隆（一橋大学　大学院経営管理研究科　教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、2026 年度のマイルストーンとして「低次元数理モデルの感度解析の結果に力学系理論に基づく解釈を与える」を設定している。マイルストーン達成のため、摂動ベクトルが不安定多様体方向に向く前に一時的に生じる不安定性、安定性の度合いと不安定性の度合いのバランス、摂動の影響が空間内を移動しながら拡大していくような不変集合を伴わない一時的な不安定性などを想定して研究を進めた。

はじめに、線形構造が常に支配的である場合における、最適摂動方向と安定多様体の関係に関する研究を進めた。その結果、最大摂動方向と安定多様体の関係性を記述する基礎的な数学的定理を得た。この結果は、不変構造に注目する従来の力学系理論と台風制御において重要となる一時的な摂動発展の関係を記述しており、直接応用することが難しいと考えられた従来の力学系の手法がこの関係性を通して適用できる可能性を示している。

次に、比較的低次元な対流トイモデルを用いて、必ずしも線形構造が支配的ではない場合における、最適摂動の空間パターンに関する研究を進めた。その結果、ターゲット時間後に目標状態に導く摂動を求めると、そのベクトルの空間パターンが、摂動量を大きくすることで、自発的に、秩序立ったパターンから複雑なパターンへ遷移することを発見した。介入量が少ない場合の秩序立ったパターンにおいては、上昇気流を冷却し、下降気流を加熱するという、物理的直感と整合的な結果が得られる。一方で、摂動量が多い場合の複雑なパターンは物理的直感による解釈は困難であり、これは台風への介入における効果の最大化余地が大きい可能性があることを示唆している。さらに、この遷移の背後にある数学的構造を力学系理論の観点で解明した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

対流トイモデルを用いた最適摂動パターンの空間パターン形成メカニズムの解明

目標状態が存在する時の最適摂動に関して、数学的な設定を行い、対流モデルに適用した。線形安定状態に対し、目標時刻における速度場を抑制するための最適な初期温度摂動を求めた。目標とする状態を設定したことで、従来の摂動最大化とは異なり、最適性は望まれる変化方向との整合性と摂動の増幅の両方によって決定されるため、摂動発展が最大でなくとも、目標状態に近づくことができるモードが支配的になり得ることを示した。また、初期摂動を大きくすると、離散ラプラシアンを用いて定量化される最適摂動の空間的複雑性が低いパターンから高いパターンへと急激に遷移することを示した。秩序だった領域では、最適パターンは線形化演算子の非主特異モードから生じるが、遷移を超えると、支配的な線形モードはもはや最適性を支配しなくなる。さらに、特定のパラメータ領域において、この有限時間問題と OGY 型無限時間制御の関連性も見出した。従来の摂動最大化手法ではなし得なかった、安全安心な理想状態に誘導する介入を設計するための基礎的な方法論を提供したこととなる。

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

安全で豊かな社会を目指す台風制御研究

階層間相互作用に基づく大域運動の制御可能性

課題推進者：
佐藤譲（北海道大学　電子科学研究所　准教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年 9 月から研究を開始し、2026 年 3 月まで階層間相互作用のモデル解析とその制御解析を行った。大規模大域結合写像系、および相互作用する異なる周波数の Stuart-Landau 振動子系において階層間相互作用を解析した。結果をまとめた論文を出版準備中である。その他に非線形フィードバック制御項をもつ高次元力学系の雑音誘起現象の研究、大規模気象イベントのモデリングの研究を行った。さらに那須野 PI（JAMSTEC)提供の全球非静力学モデル NICAM を用いた台風の強度変化（介入による中心気圧の上昇）による大規模大気場への影響の数値実験データの解析を行った。総観規模の波列に対応する気圧パタンの時間変化モードを検出し、介入量とモード振幅（影響）に線形的な関係が確認された。現在他の実験セット・他の台風事例について同様の解析を行い、結果の堅固性を確認中である。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

那須野 PI(JAMSTEC)提供の全球非静力学モデル NICAM を用いた台風の強度変化（介入による中心気圧の上昇）による大規模大気場への影響の数値実験データの解析を行った。中心気圧の上昇という介入によって生じる影響は、以下のように段階的に拡大する：

台風周辺（1～2 日内）→ 総観規模の波列（3～6 日）→ 偏西風帯に沿った波動（＞7 日）

したがって介入度合いに比例する有意な変化は 6 日頃までであるとみられる。この現象論に関して実験データの階層的 DMD 解析（Hierarchical dynamic mode decomposition)を行うことにより定量的に妥当性を示した。具体的には総観規模の波列に対応する気圧パタンの時間変化モードを検出し、介入量とモード振幅（影響）に線形的な関係を確認した。大規模大気場はカオス的であり本質的に軌道不安定性を持つため、その大域的な運動は介入がない場合でもそもそも誤差拡大を示す。このため、介入による影響のみを取り出して評価することは一般に困難である。我々は大気場の二番目に遅いモードに着目し、階層的 DMD 解析により他の階層から分離抽出することに成功した。その結果、このモードにおいて、介入による影響はある時間スケールで減衰することがわかった。このモードより速いモードはそもそもの初期値鋭敏性により、摂動の影響は継続して拡大していく。現在、他の実験セット・他の台風事例についても同様の解析を行って結果の堅固性を確認中である。この解析手法と結果の分析法は台風の発生時の詳細ダイナミクスにも同様に適用できることが期待される。

２）代表的な論文

Kojima, E., and Y. Sato, 2026: Chaotic stochastic resonance in Mackey-Glass equations. *Chaos*, 36, 031103.

確率ダイナミクスにおける共鳴とカオスの共存から生じる **カオス的確率共鳴** を発見した。最大リアプノフ指数が負であるランダム点アトラクタによって記述される古典的な確率共鳴とは対照的に、カオス的確率共鳴は、最大リアプノフ指数が正であるランダムストレンジアトラクターによって記述される。Mackey-Glass 方程式に加えて Duffing 方程式および FitzHugh-Nagumo 方程式においても同様の現象を確認し、普遍性を示した。Mackey-Glass 方程式は高次元の力学系に非線形フィードバック制御が加わった系であり、大規模系の時間遅延制御のモデルである。確率共鳴は大規模時間遅延制御系の制御効果に重大な影響を及ぼすと考えられる。

３）代表的な特許： 該当なし