

研究開発プロジェクト概要

本プロジェクトでは、台風の脅威から解放された安全豊かな社会の実現を目指し、台風制御によって被害を軽減することを計算機上で実証するとともに、広く社会との対話・協調を図りつつ、台風制御に結びつく屋外実験を行い、台風への介入方法の効果および安全性を確認します。それにより、2050 年までに台風制御技術により台風は人類にとっての脅威ではなくなり、安全で豊かな社会を実現します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal8/82_fudeyasu.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
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
佐藤 正樹	東京大学 大気海洋研究所	教授
筆保 弘徳	横浜国立大学 先端科学高等研究院 台風科学技術研究センター	センター長
吉田 龍二	横浜国立大学 大学院環境情報研究院 自然環境と情報部門	准教授
堀之内 武	北海道大学 地球環境科学研究院	教授
伊藤 耕介	琉球大学 理学部	准教授
森 信人	京都大学 防災研究所	副所長・教授
芳村 圭	東京大学 生産技術研究所	教授
加藤 大輔	株式会社東京海上研究所	主任研究員
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 雲解像モデル開発応用グループ	グループリーダー
笹岡 愛美	横浜国立大学 大学院国際社会科学研究院	准教授

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトは様々な視点からのアプローチにより、台風制御を可能とする手法を早期に見出すことが重要であるため、プロジェクトを開始する当該年度は、「気象学的アプローチ」「影響評価」「倫理的・法的・社会的課題(ELSI)」からの研究開発課題に重点的に取り組む。

研究開発項目1「気象学的アプローチ」の達成目標は、数値シミュレーション上で有効な台風制御を可能とする手法を数値的に提示することである。台風の内部構造を詳細に表現する高精度数値予測モデルの開発に着手し、高解像度モデルによる台風予測の高精度化、台風の内部構造の力学のメカニズムの解明を実施する。

研究開発項目3「影響評価」の達成目標は、台風の人為的介入によってもたらされる気象学的・社会的・経済的評価の検討の開始である。風外力が家計・企業・農林水産業に与える影響の分析を始めて、過去の台風が各経済主体(家計、企業、農林水産業)にもたらした影響を整理する。また、風災被害評価に向けた広域リスク評価モデルの開発にも既存の手法を整理して検討を始める。

研究開発項目4「倫理的・法的・社会的課題(ELSI)」の達成目標は、先端技術の研究開発プロセスにおけるELSI研究の機能と意義について整理することである。ELSIに関わる総論的な研究と、気象制御そのものの倫理的課題に関する研究を実施する。次年度に向けて、気象制御一般に関わるELSI/責任ある研究・イノベーション(RRI)検討項目をリストアップする。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1「気象学的アプローチ」の達成目標は、数値シミュレーション上で有効な台風制御を可能とする手法を数値的に提示することである。令和4年度は、台風の内部構造を詳細に表現する高精度数値予測モデルの開発に着手し、また高解像度モデルによる台風予測の高精度化、内部構造のメカニズム解明に向けての研究を開始しており、当初計画通り研究が進められた。

研究開発項目3「影響評価」の達成目標は、台風の人為的介入によってもたらされる気象学的・社会的・経済的評価の検討の開始である。統合的風水害被害評価モデル開発に関して、統合的評価モデル開発の要素である、強風・高潮高波・洪水の各々のエクスポージャモデル、ハザードモデル、脆弱性モデルを統合するためのインターフェースについて検討を始めるなど、計画通り研究を進めることができた。

研究開発項目4「倫理的・法的・社会的課題(ELSI)」の達成目標は、先端技術の研究開発プロセスにおけるELSI研究の機能と意義について整理することである。令和4年度は現時点での制御手法を前提としたELSIの抽出を順調に進めた。2回の課題推進者会議における情報共有やシンポジウムでのディスカッションなどを通じて、研究開発プロジェクト全体がELSIから見た研究開発の課題を具体的に認識することにつながった。

いずれの研究開発項目においても令和4年度のマイルストーンを達成する研究活動ができた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

プロジェクトのカバナンスという点では、PM 支援体制チームの構築ができた。具体的には、支援メンバーとして、PM 補佐 4 名、研究戦略企画マネージャー 2 名、事務補佐員 2 名が任命され、代表機関内外に所属する課題推進者の研究開発の進捗管理や研究開発機関間の提携等の様々な PM 活動の支援を開始した。

運営会議としては、PM を議長とするチーム運営会議を毎月 1 回、動向調査委員会、知財運用会議を隔月の頻度で開催し、通年で 19 回の運営会議の開催で本プロジェクトの重点事項の連絡・調整・議論等を実施した。また、PM、課題推進者、研究参加者が一堂に会し、プロジェクト全体について議論する課題推進者会議を2度開催し(第1回を 2022 年 9 月 28-29 日、第2回を 2022 年 11 月 30 日)、各課題の具体的な進め方の共有、各課題間の連携・調整、また新たな課題の参入の必要性などについて議論を行った。

広報・アウトリーチについては、年間 55 件のイベントを開催し、研究テーマの内容や進め方について広く一般の人々への説明を行った。また本研究開発プロジェクトを広く告知、宣伝するオンライン上の場として、本研究開発プロジェクトの活動拠点になる台風科学技術研究センターが独理に運営する Web ページに本研究プロジェクトを紹介するページを開設し、また、ツイッターによるリアルタイムの情報発信を行った。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:(気象学的アプローチ)

研究開発課題1:(領域数値実験による台風への介入模擬実験)

当該年度実施内容: 巻雲のプロセスが放射過程を通して、台風の強度に大きなインパクトが与えられることが示された。一方で進路はほとんど変化しないことが示された。この結果は台風制御について次のことを示している。台風の強度のコントロールには、台風のアウトフローレイヤーの巻雲の粒径と形状が重要で、それが形成される領域に物質を散布することで、氷晶の不均質核形成を促し、氷晶の数濃度を増加させ粒径を小さくすることで、落下速度を小さくすることで、台風の強度を低下させることができる。

当該年度実施内容: 本年度は雲解像モデル CReSS へのインパクト物質として、エアロゾルだけでなく水蒸気を散布するプロセスを導入した。

当該年度実施内容: 本年度は雲解像モデル CReSS について、台風を 1 点に固定して様々な理想実験を実施するための開発を行い、実際に理想実験の台風がシミュレーションできることを示した。今後、これを用いて、外力項を利用したインパクト実験を実施する。

課題推進者:坪木 和久(国立大学法人 東海国立大学機構名古屋大学)

研究開発課題2:(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)

当該年度実施内容： 気象庁メソモデル(MSM)の台風予測精度を検証評価したところ、観測データが多い日本付近に限定しても、他の全事例と比較して誤差特性は大きく変わらないことがわかった。 台風強度・構造の課題として、過発達傾向があり、壁雲での対流が集中化し過ぎている可能性がある。一般に MSM では急発達・衰弱の表現が不十分であるが、急発達を表現し過ぎる事例もあり、台風の水平スケールに依存する可能性がある。 台風に伴う雨量予測の課題として壁雲での雨量過大、台風進路の課題として日本に接近する台風に絞っても全事例と同等の 300km/72h の誤差がある。 過発達の軽減に向けた開発の課題として、雲物理や対流、境界層スキームの見直しによる降水(対流)集中化の緩和、海面過程の見直し：鉛直混合・湧昇による SST 低下をより適切に表現できるような改良があげられる。 強度不足の改善に向けた開発の課題として、海面過程の見直し：強風速下での大気海面間の運動量・熱交換係数の改良、有効解像度を高める移流スキームの導入があげられる。 また、初期値の改善として、新規観測(プロダクト)の利用、台風ボーガス見直し(あるいは撤廃)、海面水温見直しなどの課題についても検討する必要がある。 解像度依存性の取り組みとして、asuca、NICAM 等の複数の数値モデル比較・解像度依存性等を開始した。2019 年台風 15 号(FAXAI)を対象とした数値実験として、stretch-NICAM による解像度依存性の実験)を実施するとともに、レーダー等と比較し雲物理過程・乱流過程等の評価を行った。

当該年度実施内容： 台風ではしばしば壁雲が二重になる現象が見られる。二重壁雲の成因のメカニズムとして、下層インフローに伴う接線風強化によって中心から離れた位置に外側壁雲が形成することが指摘されている。また、層状性降水域の非断熱冷却によって形成される対流圏中層から下層への流れと、二重壁雲との関連が指摘されている。しかし、対流圏中層からの流れが外側壁雲の形成に影響を及ぼす詳細な過程については十分に理解されているとは言えない。そこで、本課題では外側壁雲の形成における対流圏中上層からの乾燥空気の流入と蒸発・昇華による冷却の役割を数値実験によって調べた。まず、NICAM の平面版(plane NICAM)の設定を用いて計算した。コントロール実験では、対流圏中上層の乾燥空気流入の存在と非断熱冷却による下降流の形成、超傾度風による外側壁雲形成メカニズムが働いていることを確認した。感度実験では、外側壁雲が形成する直前に台風外側の対流圏中上層の水蒸気量を増やす実験を行った。その結果、対流圏中上層の水蒸気量が少ないほど外側壁雲の形成に有利であることがわかった。

当該年度実施内容： コールドプールが対流に及ぼす影響を調べるため、理想的な条件下(放射対流平衡実験)および現実的な台風条件下での人為的制御法を想定した外力を付加した実験を設計し、予備実験を行った。大気の積雲対流の励起には、大気混合層内において雨滴の蒸発によって生成されるコールドプールの力学が重要な役割を果たしていることが知られている。本研究では、雨滴の蒸発による非断熱冷却を想定し、混合層に冷却源を強制として与えた場合の対流の応答について、数値シミュレーションによって調べる。数値モデル SCALE を用いて放射対流平衡状態を駆動し、冷却源の効果を調べた。その結果、対流の抑制域は、概ね強制の大きさの 5-10 倍に及ぶことがわかった。強制域での大気下端の温度低下は数度程度であり、強制による質量輸送と海面からの顕熱供給によりコールドプール内温度分布が定まる。強制の強度と海面からの熱供給のバランスにより、コールドプールの広がる領域が定まる。同様な強制を 2019 年台風第 15 号 FAXAI 等の実際の台風に適用する実験を実施するため stretch-NICAM を用いた実験の設計を行った。強制の領域の大きさ、位置に対する台風の内部構造の変化を調べるための実験ツールを開発した。台風の下層の冷却による対流の抑制効果の実験に取り組み、十分に強制が大きい場合には、台風強度に影響を与えることが確認できた。今後、台風の壁雲やスパイラルバンドに有効に影響する強制の性質について調べるため、強制の強度、大きさ、位置に対する依存性を検討する。

課題推進者： 佐藤 正樹(国立大学法人 東京大学)

研究開発課題 3: (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)

当該年度実施内容： 大気モデル WRF、SCALE、JMA-NHM、そして東日本太平洋沿岸の高解像度モデル MRI.COMver4.7 を用いて、理想実験や台風 Faxai を対象として人為的な介入を想定した数値シミュレーションを実施した。チーム A では、海洋温度差発電(OTEC)を想定した海面水温低下と、それを境界値とした台風 Faxai の介入シミュレーションを行っている。まず、東日本太平洋沿岸の高解像度モデル MRI.COMver4.7 を用いて、相模湾沖に 18 基の OTEC を配置して深層水を放出する海洋シミュレーションを行った。その結果、海面水温が約 0.1~0.3℃低下した領域が黒潮にのって東に広がっている。この海面水温分布を境界値とした WRF を用いたシミュレーションを行ったが、Faxai のトラックは CTL と比べてほとんど変わらなかった。しかし、その海面水温低下の海域を通過した Faxai の中心気圧と最大風速では、最大風速は時間平均で 1.0m/s 低下していた。チーム B では、多数の大型帆船を想定して、NHM-LES を用いて一定の理想的な強風化の中で障害物を複数設置したシミュレーションを行っている。

その前段階として、Horinouchi and Mitsuyuki (2023)では、帆船が大気に及ぼす効果を定量的に評価した。様々な理想的な仮定の下、地表面が大気に及ぼす抵抗から帆船の船団が大気に及ぼす抗力などを見積り、例えば大型硬帆船を 100 km 四方の海域に 400 隻展開すると Emanuel の最大潜在強度(MPI)で約 10%の低下が期待できることを示した。多数の大型帆船を想定した介入は同じだが、チーム C は SCALE を用いて台風 Faxai を対象に摩擦係数を変化させた実験を行っている。JMA-NHM の結果と同様、摩擦係数の大小と風速低下は見られたが、中心気圧には変化がなかった。

当該年度実施内容： チーム A では、今後 OTEC の量と台風強度変化の関係を示すとともに、どのような構造変化が起きて勢力が低下したのかのメカニズムの解明を目指す。チーム B も、NHM-LES を用いた高解像度シミュレーションを引き続き行い、構造物の効果を定量的に示す。チーム C では、台風のサイズに大きく影響されていることが推測されるため、今後条件を変えた様々な実験を行っている。各チームの成果では、不測の計算資源不足によるシミュレーション実施の遅れはあるが、基礎的な解析などは成果が得られた。現時点で、同条件での複数モデルによる実験は行っていないため、モデル間の比較には至っていない。さらに、アンサンブルデータを作成して感度解析を行う予定だが、これもアプリケーションの実装に時間を要し、既存のデータセットの感度解析にとどまっている。

課題推進者： 筆保 弘徳(国立大学法人 横浜国立大学)

研究開発課題 4: (室内実験による Microphysics スキームの精緻化)

当該年度実施内容： 日本域の大気条件を与えた予備実験によって雲生成チェンバーが正常に動作し、雲生成チェンバーを用いたエアロゾルと雲生成過程に関する室内実験が実施可能であることを確認し、実験を実施できることがわかったが、同時に台風周辺の環境条件を与えて正しく実験を行うには施設の改良が必須であることが明らかになった。

当該年度実施内容： SCALE 領域大気モデル(SCALE-RM)を用いてパーセル数値実験(3次元の Warm bubble 実験)を実施した。また複数の Microphysics スキームで同実験が可能であることを確認した。加えて、理想化台風数値実験を実施し、雲微物理スキーム内で仮定されている雲粒数濃度を変更させる感度実験を実施し、台風の勢力への影響を調べた。

課題推進者： 吉田 龍二(国立大学法人 横浜国立大学)

研究開発課題 5: (衛星観測データを用いた台風の物理的診断法の開発)

当該年度実施内容: ひまわり8号の特別観測である 30 秒間隔での台風の可視画像をもとに、気追跡風(AMV)を導出する手法を開発した。既存の AMV 導出アルゴリズムでは、時刻(2枚)または3時刻(3枚)の画像が用いられてきたが、本研究では、多数の画像を用いることで、高時間分解能に伴う離散化誤差の影響を抑えつつ、高頻度撮像の利点を生かす新しい手法を開発した。具体的には、規則正しい格子点を中心に設定した矩形のテンプレート画像をもとに、時間的に前方および後方(30 秒後および 30 秒前)に相関の最も高い「移動先」を判定し、テンプレートを更新してさらに前方および「移動先」を判定するということを数(N とする)ステップ繰り返し、両方向の追跡の最終的な移動先から速度を導出する。本手法を最初に適用した 2020 年の台風 Haishen については、いくつかのテストの後、台風中心付近(約 30 km であった目の半径の2倍程度まで)では $5\text{km} \times 5\text{km}$ 、より外側では $9\text{km} \times 9\text{km}$ 程度のテンプレートサイズを採用した。ステップ数 N は 2 とした。即ち、計 2 分にわたる $2N+1=5$ 枚の画像を用いて速度推定(AMV 導出)を行った。洋上の台風目の中には、高度数 100~2km 程度までの大気境界層に雲が存在する。このため、台風の強度に直結する下層の風が雲の動きから推定できる。Haishen の 30 秒観測を用いて、前例がない高頻度・高密度で風速分布推定が可能であることを示した。求めた風速分布を詳細に分析し、その物理的一貫性を調べることは、結果の検証になるのみならず、台風の強度変動過程の理解をもたらし、さらに予測の改良への知見が得られることが期待される。Haishen の目の中の風速の時空間変動より、中心付近では8時間ほどで回転角速度が2倍近くに増大したこと、それはエネルギーが線形に成長する波数1の擾乱(ある種の不安定波動)で説明できることを明らかにした(Horinouchi et al., 2023)。Haishen より得られたさらなる知見(壁雲から外にかけての運動と2次循環への示唆など)については投稿準備中である。台風の中心付近の AMV 導出においては、望ましいテンプレートサイズは目の大きさに依存すると予想される。複数の台風について手法を適用して検討したところ、目が非常に小さい台風については $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 程度にするとよいことが分かった(投稿準備中)。以上の一連の研究により、本年度のマイルストーンは達成された。本課題の目標である台風の実況把握の改善は、長期的には、現在の主観解析から、データ同化による客観解析に移行することで実現されるべきものである。その過渡段階として、衛星データの新たな利用法による主観解析の改善が望まれる。主観解析の中心的な手法は、静止衛星に赤外画像の「見た目」をもとに予報官が

行うドボラック法である。そこで、本研究では、ドボラック解析が難しく、大きな誤差を産む台風はどのようなものであるかを明らかにすることで、主観解析を効果的に改善することを目指す。本年度は、ドボラック法において仮定される、最大風速と中心気圧の間の一意な関係がどの程度成り立つかを調べた。航空機観測された大西洋のハリケーンについて、最大風速と中心気圧それぞれに対応する「CI 数」を調べたところ、両者の一致が悪い(一意な関係からずれている)ケースが少なくないことが明らかになった。

課題推進者：堀之内 武(国立大学法人 北海道大学)

研究開発課題 6: (データ同化システムを用いた航空機・船舶による改変影響の最適化と評価)

当該年度実施内容： 気象モデル WRF 及びそれを基礎とするデータ同化システム WRFDA を東京大学情報基盤センターの大型計算機 Wisteria/BDEC-01 に移植し、データ同化システムを運用する環境を構築することを試みた。しかし、コンパイラ脆弱性により、それまでに構築されたアプリケーションやライブラリが 2023 年 2 月および 3 月に相次いで利用不可となったため、WRFDA を用いた感度解析システム構築の完了には至らなかった。順圧非発散モデルの特異ベクトル計算システム、データ同化システム JNoVA および ASUCA-Var を現有する資源で駆動し、可能な範囲で当該年度分の研究を実施することはできたが、令和 5 年度に改めて大型計算機上に WRFDA ベースのシステム構築をする予定である。

当該年度実施内容： JNoVA を用いて、2012 年台風第 15 号の外側壁雲の形成に関わる感度解析結果を解析した。格子点間隔は気象庁メソモデルと同様に、アウターループ 5 km メッシュ、インナーループ 15 km メッシュとした。その結果、外側壁雲が形成される領域において、対流不安定の条件が満たされている箇所があり、そのような場所で水蒸気を増加させると外側壁雲の形成につながることを示された。また、別途、単純化された順圧非発散モデルの特異ベクトル解析を行い、2 つの台風が接近する場合、運動エネルギーベースで摂動が 5 日間で約 50 万倍に拡大することを見出した。

当該年度実施内容： ASUCA-Var を用いて、2022 年台風第 14 号のデータ同化を行った。これにより、台風ボーガスの影響が大きいことが確認された。本研究においては、現状の気象庁の 4 次元変分法システムでは、後方時間積分で情報伝搬を行う際に用いるインナーモデルの格子点間隔が 15 km、観測値と第一推定値の残差の計算を行う際に用いるアウターモデルの格子点間隔が 5 km となっている。このうち、インナーモデル

の格子点間隔を5 kmに高解像度化する実験を実施した。その結果、台風の位置・強度・降水量がわずかに変化するものの総じて影響は小さいことが示された。また、民間航空機により記録されている気温のデータが中程度の強さまでの台風の強度の良い指標として活用しうることが明らかとなった。

課題推進者：伊藤 耕介(国立大学法人 琉球大学)

(2) 研究開発項目 3:(影響評価)

研究開発課題1:(台風制御による被害軽減の推計)

当該年度実施内容： 強風・高潮高波・洪水の各々のエクスポージャモデル、ハザードモデル、脆弱性モデルのインターフェース統合に向けて、関係者でミーティングを行い、次年度以降のスケジュールおよびデータ形式について議論を行った。

当該年度実施内容： 強風被害評価ならびに沿岸浸水被害評価双方に利用可能なエクスポージャデータの仕様を策定した。

当該年度実施内容： 多ジャンルの防災研究者によるキックオフミーティングを開催した。台風制御による防災対策や経済影響について議論を行い、取りまとめを行うと共に、次年度に実施する専門家へのリアリング内容およびヒアリング対象者を決定した。

課題推進者：森 信人(国立大学法人 京都大学)

研究開発課題 2:(台風水災害影響評価モデルの開発)

【非公開】当該年度マイルストーン 1: 2019 年台風 19 号などの近年の大きな台風について再現実験を実施し、浸水域の検証を行う。

当該年度実施内容： Today's Earth-Japan の一部を用いてシミュレートされた洪水のアラート(200 年に一度の再現確率以上の河川水位)と、「水害統計」にまとめられた実際の被害についての比較・検証を行った。浸水被害が出た341 市町村のうち、337 市町村で「アラート」が出されていたことが確認され、捕捉率は99%、空振り率は70%であった。加えて、浸水面積・浸水深について約1km 解像度から30m 解像度にダウンスケーリングする手法を適用し、浸水被害額を見積もる準備を行った。

当該年度実施内容： より現実的な降水を与えるため、予測された降水量を機械学習を用いて補正する手法(Yoshikane and Yoshimura, 2022)を適用した。本手法では、サポートベクターマシン(SVM)によって降水の空間分布を補

正し、累積分布関数(CDF)によって降水量の頻度分布を補正する、という二段構えの手法となっている。2020 年 7 月に球磨川での大洪水を発生させた豪雨について適用したところ、SVM の特徴によって、空振り率を少し増加させてしまうものの、的中率・相関係数・RMSD において改善がみられることを確認した。この降水量を用いた洪水シミュレーションを実施できるよう、システムを改善した。

課題推進者:芳村 圭(国立大学法人 東京大学)

研究開発課題 3: (被害軽減効果の社会的影響の分析)

当該年度実施内容: 大規模アンケート調査に向けたテキストマイニングによる台風被害の類型化のため、媒体の各サイトからダウンロードし、台風被害に関する記述を抜粋して一覧化することで、テキストマイニングに用いるテキストデータを整備した。テキストマイニングの試行として、過去の顕著台風(Jebi, Faxai, Hagibis)に関する新聞記事を対象に単語頻度解析と係り受け頻度解析を実施し、有効な分析が可能であることを確認し、あわせて各台風が社会にもたらした主要な影響を確認した。なお、令和 4 年度計画策定時は、過去の顕著台風の影響について公開情報をもとに主観的に類型化する計画であったが、より客観的な類型化の実現のためテキストマイニングを採用しており、計画策定時よりも実効性の高い手法へ進化している。

当該年度実施内容: 風災マクロモデル構築に向けた台風外力と建物被害の紐づけのため、風水害に関する既存の統計データから台風に起因する被害を抽出・整理した。主要なデータソースは消防庁消防統計であるが、被害額が掲載されていないことに加え、網羅性が不十分であることが難点であるため、一般社団法人日本損害保険協会が公表している「そんぽ風水害データベース」より抽出した損害保険金の支払額をあわせて活用した。これらのデータを都道府県単位で集計し、台風外力との紐づけに必要なデータを整備した。

課題推進者:加藤 大輔(株式会社東京海上研究所)

研究開発課題 4: (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)

当該年度実施内容: 当初計画に従い、研究参加者らが「富岳」成果創出加速プログラムにおいて行った 2019 年台風 15 号(Faxai)を対象とする大アンサンブル(1600)メンバーの実験データ(1.25 度格子に変換)および台風トラックデータを、海洋研究開発機構のサーバ上に転送した。このデータを用いて、台風のトラックが現実と近いサンプル(154 ケース)を抽出し、これ

らを東京付近通過時の強度によって分類した。台風が強い(最大風速 40m/s 以上)サンプル(55 ケース)と弱い(最大風速 25m/s 以下)サンプル(33 ケース)について、台風通過前後のアジア太平洋域の大気場に関する比較解析を行った。既往研究から有意な影響が予想される、力学場や水蒸気場について合成解析を行った結果、台風が強いケースでは、台風の通過時から通過後にかけて台風が弱いケースに比べて台風に隣接する太平洋高気圧が強く、また台風から太平洋高気圧の北縁に沿った帯状の湿潤傾向が現れることが確認された。この解析結果は、台風に対する気圧応答が太平洋高気圧を変調させ、これに伴う風速の変化が水蒸気の南北輸送をもたらすことを示唆する。臨時研究補助員の雇用により、実験データの解析作業を進め、得られた研究成果を学術研究集会において発表した。

当該年度実施内容： 前マイルストーン活動により得られた知見をより定量的に検証するため、台風の強度のみを変えた(他は同一条件の)数値実験(「双子実験」)によるインパクト調査を行う。当該年度は前マイルストーン活動で用いた数値実験データの中から、経路の再現性が高く、東京付近通過時の強度が強いケースを選別した。当初計画に従い、予測研究課題参加者との情報交換を行い(研究会、課題推進者会議等)、雨水の追加(人工的な降雨の促進を模擬)、海面水温の冷却(海水の汲み上げ等による冷却を模擬)、台風初期渦の平滑化等の方法を考案した。地球シミュレータ上に数値実験の実施環境を構築した。

課題推進者:那須野 智江(国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

(3) 研究開発項目 4: (ELSI)

研究開発課題1: (台風制御に関わる ELSI の分析と検討)

当該年度実施内容:

1.総論的研究は、①JST・俯瞰的 ELSI 検討会、②法学・政治学系研究者によって組織された新規技術と法研究会(横浜 ELSI 研究会)、③RISTEX の ELSI 関連事業(RInCA)に関わる研究と共同して、分野横断的・総合的な ELSI 論点の抽出に貢献した。また、コア研究全体の研究実施体制の見直し、台風研究者を対象とした専門家インタビュー調査を通じて、関連プロジェクトの連携を通じた動的な ELSI 研究の実施体制を構築した。

専門家インタビュー調査(質的調査)は、コア研究に参加する研究者、先行プロジェクトであるミレニア・プログラム関係者、台風科学技術研究センター関係者、自治体の防災担当者を対象に実施している(令和 4 年度は、コア研究内台風研究者 7 名、ミレニア関係者 2 名、2 自治体)。

本調査は、①コア研究内部および目標8内部での情報の集約および交通整理(ハブとしての機能)、②非専門家(ELSI グループ)との対話を通じて、隠れた ELSI を発見し、課題をより明確にすること、③市民との間の科学技術コミュニケーションの前提として、研究者の思いや文脈(インプリケーション)を正確に把握すること、④対話や非言語的コミュニケーションを通じて、新たな着眼点や隠れた構造などを発見することを目的とする。たとえば、調査により、「制御」という言葉は、「自然に介入し、自然をコントロールする」という側面ではなく、科学技術の進歩(台風のメカニズムが明らかになり、その進路や介入の結果を正確に予測することができる)に重点を置いて用いられ始めたことが明らかとなり、この背景は、俯瞰的 ELSI 検討会のまとめにも反映している。

2. 各論的研究は、各論的研究は、次の(1)から(3)の観点から進められ、それぞれの成果が俯瞰的 ELSI 検討会等における情報のインプットにつながっている。

(1) 法哲学・倫理学の観点からの研究

①気象制御に関する倫理的課題の検討： 台風制御技術を含む気象制御手法の倫理的な課題について先行研究の整理を試みた。気象制御の是非をめぐる論点として、(a)気象制御自体への懸念(モラルハザード、傲慢さ、不確実性、研究開発の独立性、熱狂的な期待)、(b)気象制御の目的・用途に応じた評価(軍事・予防・開発等)、(c)第三者への負の影響といった論点を抽出し、各論点に対する倫理的な基礎づけを整理し、RRI の観点から対応のあり方を検討した。

②正義論からの検討： 災害一般が現代法・政治哲学の中でどのように扱われてきたかをサーヴェイし、概ね各理論枠組みの「例外」として考慮外に置かれてきたことを確認した。また、(a)台風制御技術に関わる類例として、いわゆるトロッコ問題について先行研究およびその類比としての適切性を検討した。さらに、(b)新規技術をめぐる規制のあり方に関する法哲学の先行研究を整理し、意思決定権者の動機から独立した影響評価の必要性、意思決定への公的参加の望ましさ等の論点の抽出を行った。

(2) 法学・安全工学の観点からの研究

①法制度的課題についての分析・検討： (a)想定されている工学的手法を前提に、船舶(遠隔操縦船)および無人航空機(大きさにより、航空法上の無人航空機または無操縦者航空機と性質決定)のそれぞれについて、飛行・航行に関する安全規制の状況を整理し、当てはめを実施した。(b)制御により第三者への負の影響(外部不経済)が生じる場面を場合分けし、それぞれについての法的な対応のあり方を検討した。(c)災害対策基本法をはじめとした関連法令を、気象予報・警報、防災、避難、災害発生時(応急期)、復旧・復興、軍事利用、再生可能エネルギーの各テーマに分類し、体系的に整

理した。

- ②リスク評価手法の確立に向けた研究： 台風制御技術に関して、リスク共生概念に基づいたリスク特定をするための基礎検討を実施した。過去に米国にて種まき法によるハリケーン制御に関する定量的リスクアセスメントが実施されていた先行事例について、そのリスク分析手法とリスク判断について調査した。安全工学的観点から台風制御の社会実装に至るまでの保安・防災リスクについて検討するために専門家ヒアリングを通して、台風制御の効果判定方法と要求精度、シミュレーションモデルの現状と今後の指針に関する調査を行った。

(3) 国際関係・基礎研究の観点からの研究

- ①気象制御・気候工学に関わる基礎研究： 気象制御における ELSI 検討の必要性和 RRI の重要性について、特に気象学コミュニティにおける理解促進の観点から、総論的な課題の整理等を試みた。(a)研究開発における ELSI 検討の持つ役割の確認(社会実装に向けた受容性向上や制度整備等とともに研究開発の方向性や目標設定にも寄与)、(b)気象制御に関する ELSI 研究のアプローチや様々な観 points の提示(政策目標・社会課題解決、制御対象の現象・利害関係者・実用化までの段階ごと、市民・社会の理解や予防原則等の観点)、(c)包括的・網羅的なアプローチの当面の試みとしての具体的な ELSI(台風の制御研究史を通じた国際的な課題を含む)の例示、(d)気象制御に類似する気候工学における手法評価や研究ガバナンスについての先行研究の概要紹介を行った。

- ②気象制御に関する歴史的調査： 過去の日米における気象制御研究について調査し、研究が推進された背景と衰退の要因を明らかにすることで、現代における台風制御の社会実装に向けた ELSI 検討の参考にすることを試みた。(a)米国のハリケーン制御プロジェクト(Project Stormfury)、(b)Project Stormfury の実験太平洋移転に関する国際的な議論、(c)日米の台風・ハリケーン研究者の議論、(d)日本における気象調節研究について、文献調査、インタビュー調査を通じて事実関係を整理した。

課題推進者: 笹岡 愛美(国立大学法人 横浜国立大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

代表機関である横浜国立大学内の先端科学高等研究院（以下 IAS）に、PM 支援体制を構築した。主たる支援メンバーとして、PM 補佐（全体管理担当、外部連携担当、アウトリーチ担当の 4 名）、研究戦略企画マネージャー（2 名）、事務職員及び事務補佐員（2 名）が、代表機関内外に所属する課題推進者の研究開発の進捗管理や研究開発機関間の連携等の様々な PM 活動を支援した。特に PM 補佐（全体管理担当）は、本プロジェクトに関わる総合的な渉外窓口として、プロジェクトの進捗把握や成果管理の面で PM の活動を補佐した。また、PM 補佐（外部連携担当）は、本プロジェクトの成果を社会実装する上での事業化戦略策定、その実行手段としての産学官連携活動の面から PM を補佐する他、知財権利化や知財戦略策定に主体的な役割を果たした。さらに PM 補佐（アウトリーチ担当）は、公開シンポジウムやセミナー等、気象関連の専門家のみならず、一般市民に向けて本プロジェクトの活動内容や成果を分かりやすく発信し、本プロジェクトへの関心、理解を深める活動を主導し、PM の活動を補佐した。また、IAS では高等研究院長を学長が兼任し、トップダウン型のガバナンス体制が整備されており、IAS 全体の研究マネジメントを担当する研究戦略企画マネージャーを介し、学内の研究環境整備や IAS と学内組織との協働を軸として、代表機関全体を巻き込む動きによって PM 活動を支援した。R4 年度の活動としては、まず、IAS として PM 補佐人材を正式に採用し、プロジェクトの作り込みに参画させた。作り込みにおいて PM 補佐（全体管理担当）は、PM が PD、SPD と合意した研究体制案や、研究の進捗を評価する各チェックポイントでのマイルストーンをベースに、課題推進者と密なコミュニケーションを取り、研究計画書のとりまとめを主導した。

(2) 研究開発プロジェクトの展開

PM を議長とする毎月開催するチーム運営会議を開始し、同会議にて本プロジェクトの重要事項の連絡・調整・議論等を行っている。チーム運営会議の事務局は IAS 内に 2021 年 10 月 1 日付で発足した台風科学技術研究センター内に置き、会議メンバーは議長である PM の他に PM 補佐、課題推進者、研究参加者等で構成される。

研究の進捗状況の把握は、会議体と成果報告書により行っている。会議体としては、PM と課題推進者との随時の打ち合わせに加え、プロジェクト関係者が一同に介する全体会議として課題推進者会議を年 2 回開催した。第 1 回目の課題推進者会議は、9 月 28、29 日に開催し、プロジェクト全体についてや課題間の連携・調整などについて、活発な議論を行った。第 2 回目の課題推進者会議は、11 月 30 日に開催し、今後のプロジェクトの進め方について議論した。

また、令和 4 年度の活動としては、月 1 回開催のチーム運営会議により、プロジェクト全体として研究の方向性を共有する機会の創出に積極的に努めた。また隔月開催の動向調査委員会で、プロジェクトに関連した内外の技術動向について議論を行っており、また知財運用会議を隔月に開催することにした。知財については、令和 4 年度は出願した知的財産は無かったが、令和 5 年度より工学的アプローチの研

究開発が開始されるので、多くの出願が予想され、知財運用会議で知的財産の運用についての議論を進めていく予定である。

(1) 広報、アウトリーチ

台風制御への社会の関心は高く、特に台風シーズンには、マスコミ側からの取材・出演依頼が多い。TV やラジオ、新聞等メディアでの露出は、一度の多くに国民にアプローチできる機会であるため、積極的に取材対応を行っている。現在まで、日本記者クラブでの記者会見や NHK ニュースでの特集など、ムーンショットに言及したものに限っても、プロジェクト開始時からテレビやラジオ・新聞で31件以上の放送や掲載がある。また、子ども向け科学雑誌などにも特集記事が載るなど、次世代へのアピールにも力をいれている。

各取材に関しては、筆保 PM だけでなく複数の課題推進者や PM 補佐で対応を行い、多くのメディア露出の機会を得ることができた。特にミレニアプログラムから作り込みに参加してきたメンバーを中心とすることで、PMと課題推進者とのコンセンサスを取りつつ、プロジェクトの内容を国民に正しく届けられるように取り組んでいる。それに加えて ELSI 問題の存在なども伝えることで、プロジェクトの実施にあたって、慎重に進めている姿勢も国民に伝えることができた。また、PM 補佐(アウトリーチ担当)が JST とも密に連携を取り、随時内容の修正も行った。一つの例として、当初は横浜国立大学台風科学技術研究センターが以前から使用している「タイフーンショット(台風制御+台風発電)」と「ムーンショット目標」が混同されている例も多く見受けられたが、JST 側からのフィードバックを元に、取材の段階で繰り返し説明を行うことや、内容に関する事前のチェックを丁寧に行うことにより、メディア側の誤解や誤認を無くすことができた。

また、PM や各課題推進者が行う講演などでも積極的に本プロジェクトについて紹介するとともに、台風科学技術研究センターが主催する市民講座(「世界一聞きたい台風の授業」協力:WeWork オーシャンゲートみなとみらい・2022年全6回開催で延べ1100名申し込み)の中でも毎回ムーンショット目標について触れ、理解の醸成にも努めている。

インターネットメディアを利用したアウトリーチに関しては、ホームページでの発信に加えて SNS、Youtube など動画チャンネルも活用し、幅広い層にリーチできるように努めている。公開シンポジウムでは、気象学、法学、行政など、多様な立場のメンバーで議論を行うことができた。

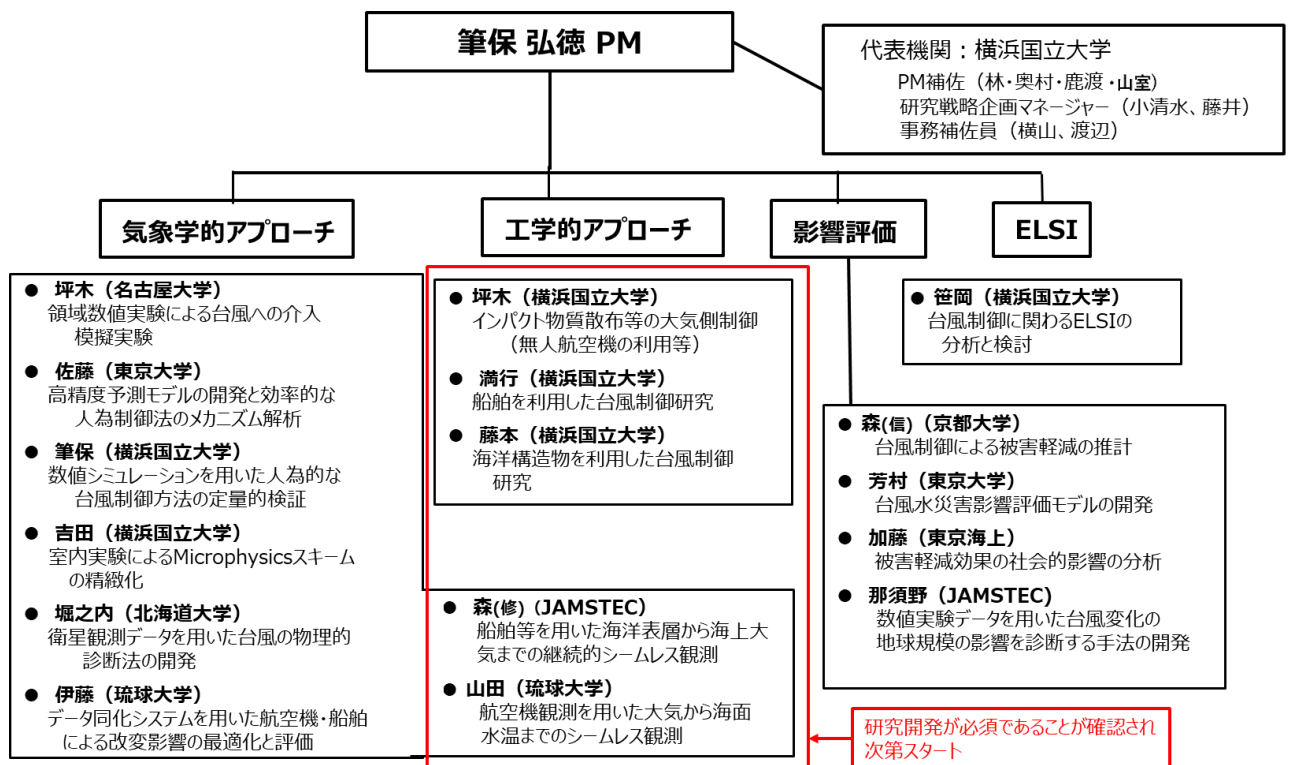
広義のアウトリーチとしても、日本気象学会や JpGU でも研究発表や議論が行われており、研究者に対してもプロジェクトの存在や内容を広く伝えている。

以上のことに加え、取材活動やシンポジウムなどを通じて得たプロジェクトに対する国民からの質問や疑問などを元に、リーフレットの作成・配布を検討している。

(4) データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトで扱うデータについては、課題推進者が定期的に PM に報告し、PM がデータマネジメントプラン(DMP)で管理することとしている。PJ 開始時に作成した DMP に対して、追加・更新がある場合には、月次で開催している課題推進者との会議の中で確認を実施し、適宜アップデートする運用をしたが、DMP の登録が1件もなく、次年度スタート時に DMP 登録の必要性を再徹底中である。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



プロジェクト推進会議

1. チーム運営会議

本プロジェクトの重要事項の連絡・調整・議論等を行う場として、7月度からスタートし、年間9回開催された。会議メンバーは議長であるPMの他にPM補佐、課題推進者、研究参加者等で構成される。

2. 知財運用会議

プロジェクトに参画する複数研究機関間における知的財産の基本的な取り扱いに関する協議を行い、必要に応じ合意書締結等を進める会として、12月度から隔月開催でスタートした。令和4年度は2回の開催となった。

3. 動向調査委員会

国内外の関連技術の動向調査、市場調査を目的に11月度から隔月で運営した。令和4年度は3回の開催となった。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際 (PCT 含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計 (出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	5	0	5
口頭発表	19	12	31
ポスター発表	8	6	14
合計	32	18	50

原著論文数 (※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	2	2
(うち、査読有)	0	2	2

その他著作物数 (総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
1

報道件数
31

ワークショップ等、アウトリーチ件数
23