

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する。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、安全で豊かな社会の実現を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

台風制御のための介入の有効性を明らかにするため、数値シミュレーション実験に基づき、複数の手法について、介入強度に対する変化量および変化量に対するベネフィットやコスト等についての評価グラフの作成を行っており、各課題の結果を待つシリアルな進め方ではなく、各課題が介入強度に対する変化量、変化量に対するベネフィットやコストといった統一した評価グラフの作成など、コンカレントに研究を進めた。

研究開発項目 1「気象学的アプローチ」では、台風に対する介入手法の効果を風速や気圧の変化で評価している。最適な台風シミュレーションモデルを選定し、10 種類の介入手法を用いて数値シミュレーションを行った。また、1 km 格子間隔モデルの改良と複数の台風事例を用いた研究を通じて、台風の内部構造変化のメカニズムを解析し、外力実験を用いた人為的制御の効果を評価した。感度解析により、台風の運動エネルギーに影響を与える重要な物理量を明らかにするとともに、高解像度化にともなう困難さの知見を得た。さらに、海塩粒子を背景エアロゾルとした雲生成実験を成功させ、エアロゾル濃度を変えた実験で降雨域の減少効果を確認した。

研究開発項目 2「工学的アプローチ」は令和 5 年度から開始し、今年度は 7 手段の介入装置とオペレーションのデザインとコスト見積もりを行った。具体的には、横浜国立大学の大型実験水槽を使い、台風環境下での船舶安全性を評価する水槽実験を実施。過去の台風データを基に、介入船のコストと効果の関係を概算した。また、大型帆船の操作安定性を担保する実験を完了し、経済合理性を考慮した台風発電船の仕様を検討した。海面蒸発抑制のための工学的な手法の検討も行った。

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・経済的な評価を行うことであり、上記変化量に対するベネフィットの見積もりを行い、ベネフィットから上記コストを差し引いた値が最大になる介入手法を探った。具体的には、台風特性変化に対するマクロ的沿岸部被害軽減推計のプロトタイプ作成と沿岸部および強風災害についての詳細モデル開発を進めた。

研究開発項目 4「倫理的・法的・社会的課題(ELSI)」では、先端技術の研究開発における ELSI の機能と意義を整理し、各 PI からのインタビューとシナリオ研究を通じて具体的な ELSI をリストアップした。このプロセスは、プロジェクト内のコミュニケーションハブとしても機能し、情報共有を促進した。また、3 年目のマイルストーン達成に向け、数値シミュレーションや工学的見積りを基に介入手法の影響を詳細に分析し、7 候補に絞り込んだ。これにより、介入手法の選定が可能となり、統一された評価グラフで 14 候補を評価した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

運営/体制について一昨年度より月度のチーム運営会議をマイルストーン達成状況および台風介入方法とその評価結果を見える化し、かつ課題推進者(以下 PI と略す)全員が他 PI の研究状況を把握できる場とした。その結果、2 件の知財取得を検討し、内 1 件について特許申請を行った。また、動向調査会議から得られた情報をもとに、OceanTherm 社(本社ノルウェー)のバブルカーテンテクノロジーの技術情報の交換およびシミュレーションスタディをするまでに至った。データマネジメント登録は、令和7年3月までに101件となった。筆保PJの強みであるアウトリーチ活動では、メディア報道64件、アウトリーチ63件など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。令和5年度、令和6年度の特筆すべき点として、国際連携の取り組みが挙げられる。筆保PJの推進母体である横浜国立大学台風科学技術研究センターは、海外13機関との国際連携協定を締結し、台風制御研究を含め各国の台風研究の情報交換ができる環境を構築した。令和5年11月からスタートした International Workshop of TRC ではアジア各国の台風科学研究者とのリレーションを強化し、令和6年度も更に台風科学のリレーションシップを拡大した(令和6年度は19か国から131名が参加した)。同様に、筆保プロジェクト研究者と海外著名な台風研究者と台風制御に特化した国際ワークショップ International Workshop for TyphoonShot を令和5年、令和6年と実施。PI 内では、海外から研究者を向かって研究活動を推進するPIも出ている。

令和7年1月より数理研究を強化するために、齊木 吉隆氏(一橋大学・教授)が数理研究チームのPIとして加わり、令和7年度の気象学的アプローチチームと数理研究チームでコラボ研究を目指す。また、令和7年8月15日から8月31日までの日程で大阪・関西万博へ出展し、日本のみならず世界へ、未来の研究者へ台風制御の活動および必要性をアピールする。

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:

- (1) 観測された台風および理想実験台風について、雲物理学的インパクトとして、巻雲高度を調整する方法と内部コア領域の過冷却水滴を凍結させる方法により、台風の強度低下事例を示した。理想化台風について、壁雲を含む内部コアだけの過冷却水滴凍結を行えるように CReSS を改良し、内部コアの過冷却水滴凍結についての台風強度の応答をあきらかにした。

巻雲高度調整による台風制御:

実際に観測された台風について、その再現シミュレーションを行い、巻雲を構成する氷晶の落下速度を人為的に調整することで、台風の強度についての応答を調べた。その結果、氷晶の落下速度が0の場合と、落下速度10 cm/s の場合では、後者の方が、25 hPa ほど中心気圧が低くなるという顕著な違いが見られた。ほかの台風についても同様の傾向が見られる場合があった。これについて、考えられるプロセスとしては二つある。一つは、巻雲粒子の落下速度によって、上層巻雲の広がり方が変わり、短波放射による海面水温が変わる。巻雲が広がるほど、短波加熱の減少で、海

面水温は相対的に低下するので、台風は弱まるというプロセスである。もう一つは、対流圏上部の非断熱加熱(雲物理過程と放射過程)により、内部コア領域の温度分布の変化により、二次循環のインフローが変わることである。これらの結果から、台風の強度は巻雲粒子の落下速度に影響を受けることは分かるが、統一的な傾向の発見には至っていない。また、巻雲に対して広域に介入することは現実的でないので、この方法については、いったん保留とする方針である。

過冷却水滴の凍結による台風制御:

氷晶核の散布による介入を想定して、過冷却水滴を人為的に凍結させる介入を行い、台風の強度を制御する実験を実施した。対象とした台風は理想化台風で、環境場の風や鉛直シアーはなしとした。介入領域は中心から半径 50 km 以内(介入領域半径を様々に変更した実験も実施した)とし、介入時間は 1 時間~48 時間、過冷却水滴の凍結は 0℃~-40℃(-40℃は通常の均質核形成)、凍結割合(過冷却水滴を各時間ステップで氷晶に変換する割合)を 100, 50, 10, 1%として実験を実施した。これらの結果より、内部コア領域(中心から半径 50km 以内)に 1 時間程度の人為的凍結を行うだけで、台風強度に顕著な変化が見られる場合があることが示された。多数の実験を行ったところ、最大で 43 hPa もコントロール実験(過冷却水滴凍結の介入をしない場合)に対して気圧が上昇(台風が弱まる)する事例も見られた。

台風の発達時に内部コア領域で発生する対流バーストと呼ばれる活発な対流が、一つの重要な要素と考えられる。そこで対流バースト内の過冷却水滴を凍結させる実験を実施した。これについても多数の実験を実施したところ、そのいくつかでは中心気圧が 15~20 hPa も上昇する場合があることが示された。これらの結果より、台風内部コアの対流バーストについて、過冷却水滴を人為的に凍結させる方法が、台風強度を低下させるのに有効である可能性が示された。

理想化台風実験で 1 時間の擬似的不均質核形成により発生した氷晶の数は、全域の大気全層で 10^{19} 個のオーダー、これを不均質核形成で生成するために必要な氷晶核の量は、10 t~10 kg 程度と見積もられた。これは人間が介入可能な量である。

- (2) 数値実験において航空機を台風内に飛行させられるように CReSS を改良した。マイルストーンとして立てた、「雲物理過程およびエアロゾルに対する台風の応答とその感度があきらかにされる。CReSS を用いてインパクト物質散布実験が行われ、台風の強度低下事例が示される。」については、エアロゾルそのものは特定していないが、過冷却水滴を凍結させることで、台風強度の低下が起こることを示したことは大きな前進である。

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:

- (1) 解像度モデルによる台風予測の高精度化の実施:台風の内部構造を詳細に表現し、台風に伴う暴風雨の詳細分布を予測可能とする数値予報モデルの技術開発を行う。観測データによる数値モデル結果の検証により精度評価を行った。

令和6年度は、気象庁における数値モデルメソモデル(MSM、格子間隔5km)、局地モデル(LFM2km、格子間隔2km)、および富岳リアルタイム実験(LFM1km、格子間隔1km)における台風の予測結果を比較した。また、LFM1kmについて、主として計算効率の観点から開発を進めた。現在、気象庁ではMSM、LFM2kmを現業運用しており、またLFM1kmは「富岳」を利用した出水期のためのリアルタイム実験としての運用であり、現業運用に向けて開発を進めている。MSM、LFM2km、LFM1kmの各モデルによる台風の予測結果を比較したところ、中心位置および台風強度に関しては、いずれも18時間予報まで顕著な差は見られなかった。また、いずれのモデルも台風を過発達させる傾向が認められたが、高解像度モデルであるほど誤差が必ずしも小さいというわけではなかった。風速分布については、予測時間の経過とともに壁雲付近の風速が強まる傾向があり、予測初期段階ではSARによる観測とは異なる楕円状の壁雲構造が表れる事例も確認された(図1)。一方、LFM2kmおよびLFM1kmは、シャープな壁雲構造や降水分布の特徴をより明瞭に表現していたが、降水量に関しては予測時間が長くなるにつれ増加し、全球降水観測衛星GPMにおけるDPRによる降水量の観測と比較するとやや過剰となる傾向があった。

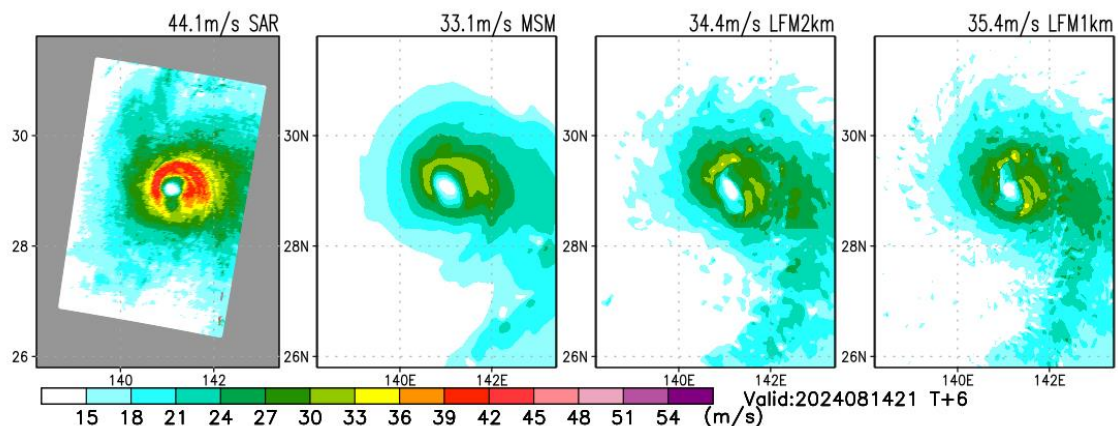


図1:海上風 SAR との水平風速の比較、2024 年台風第 7 号、8 月 14 日 20:32UTC。
左から、SARによる観測、MSM、LFM2km、LFM1km による海上風。

- (2) 台風の内部構造の力学解析の実施:台風の内部構造の力学のメカニズムの理解を進め、初期値や境界条件等の摂動に対する台風の強度の変化の依存性の解明を進めた。

令和6年度は、摂動等に対する台風の内部構造の変化解析を実施する。乱流等の物理過程の依存性や解像度依存性、初期摂動等による台風の内部構造の変化の依存性を解析する。2024年8月に九州に上陸した台風Shanshanを対象都市における外側壁雲の形成過程を対象として、格子間隔1kmの数値モデルASUCAを用いた

実験を実施する。二種類の初期値、全球解析とメソ解析を利用し、初期値における台風構造の違いが再現性に与える影響についても評価し、環境場におけるシアーを指標とした外側壁雲の形成メカニズムについて解析した。

両実験ともに台風 Shanshan の外側壁雲の形成過程が再現された(図 2)。初期値に全球解析を用いた場合には、観測に類似した外側壁雲が 6~12 時間ほど早く形成され、メソ解析を用いた場合には、約 1 日遅れて形成された。ドップラーレーダー観測との比較により、環境場のシアーベクトルに対して、ダウンシアー左側で形成された降水および渦度のスパイラルバンドが、時間の経過とともにリング状へと変化する様子が捉えられた。また、全球・メソの両解析初期値による実験において、対流渦の指標である Mesoscale Descending Inflow (MDI) はともに形成されたが、スパイラルバンドからリングへの構造変化は、MDI とは異なる内部渦構造による別の物理過程に起因している可能性が示唆された。

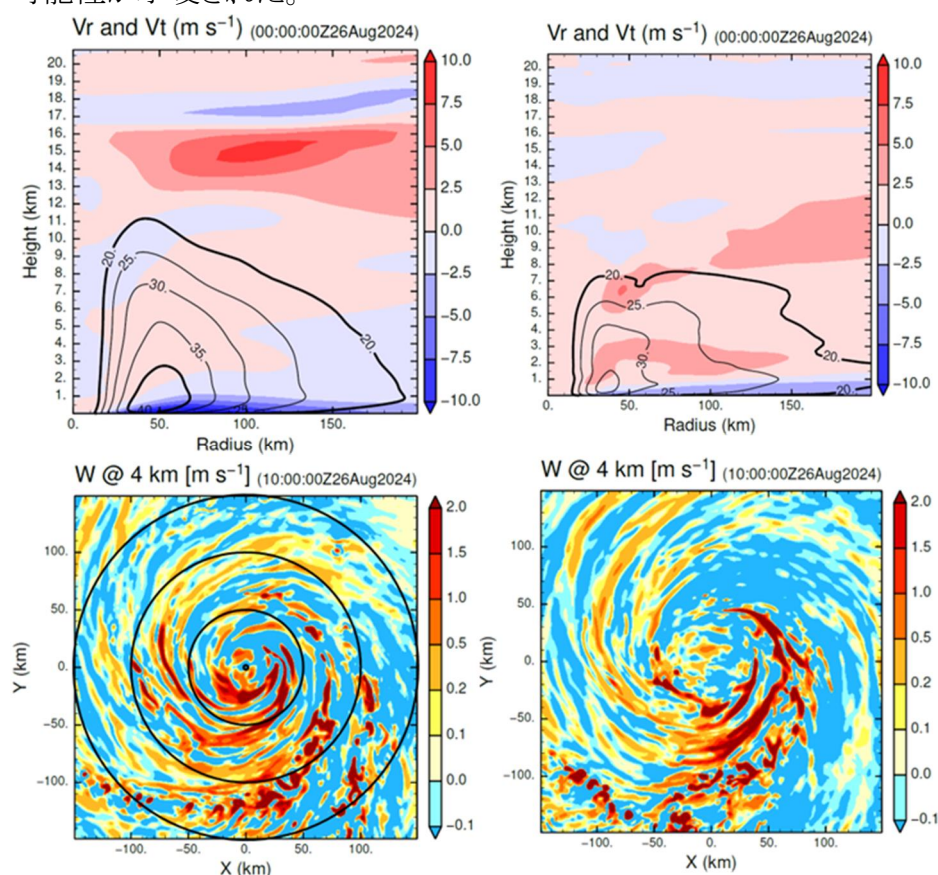


図2: 上図:左、全球解析(左)とメソ解析(右)の初期渦の違い。下図:高度 4 km における鉛直風の水平分布:全球解析(左)とメソ解析(右)を初期値に用いた結果。2024 年 8 月 26 日 10UTC。

- (3) 台風人為制御手法のメカニズム解明の実施:人為的な制御手段を想定した摂動により、台風の強度等の性質がどのように変化するか解明する。小さい外力で台風強度に大きな変化を生む手法や、持続的な弱い介入によって台風に変化を与える手法を数理的に開発する。

令和 6 年度は、有効な人為的制御法を見出すために、様々な外力と台風強度変化との関係を解析した。制御による結果に対する不確定性を評価する手法を開発し、特

に、現実の台風(T1821、T1915、T1919 等)を対象とした介入模擬実験および理想化実験を実施し、介入と台風変化との関係のメカニズム解明のための解析を実施した。

本課題では、「人為的にコールドプールの生成する装置」を考案して、台風中心付近の対流を抑制することで、台風の強度を効率よく弱化させる手法について研究を進めた。令和 6 年度は、本装置を台風中心に配置することにより、台風に伴う対流雲に変化を与え、台風の強度を弱化させることを目標とする。対流の抑制と励起を人為的に制御し、眼壁の変化、二重壁雲の形成や壁雲の入れ替わりによる台風の弱化、外側の壁雲の形成、スパイラルバンドの形成などの効果の可能性を検討した。2018 年台風第 21 号(Jebi)、2019 年台風第 15 号(Faxai)、第 19 号(Hagibis)を対象に、人為的な強制の効果調べた。雲底以下の乾燥した高度 1km 以下の範囲に、半径 R [km]の一定の強制を与える。強制の形態としては、一定の冷却率を与える実験の他、一定の水の注入を想定した雨粒子の強制実験を検討する。強制の大きさは、半径 $R=5, 50$ km について依存性を検討する。また、強制として一定の位置に定在的な強制を与える場合の他、動的に台風の眼内に沿って強制を与える方法などを検討する。以下は、動的に台風の眼内に沿って雨粒子の強制を与えた場合の結果を示す。

図 3 は各実験の計算開始後 24 時間後の海面気圧、2 m 高度気温、10 m 高度風速の水平分布と、海面気圧と 10 m 高度風速の強制を与えない実験に対する差の水平分布を示す。2m 高度気温に示すように、 $dT=10K$, $R=50$ km 実験において、顕著なコールドプールが形成されていることがわかる。海面気圧の変化量は $dT=10K$, $R=50$ km 実験で最も顕著なパターンが形成されているが、いずれの実験でも中心から東側にかけて気圧の上昇、南西象限で気圧の低下が見られ、似たような変化傾向が現れている。10 m 高度風速に関しては、南西象限でいずれの実験でも風速の低下が見られる。 $dT=10K$, $R=50$ km 実験においては中心付近および周辺域で風速の強化が見られる。本実験の結果から、以下の二点の特徴的な効果が得られることが示された。第一に、強制の大きさによらずに同様なパターンの変化傾向が見られ、パターン対応して顕著な風速の減少域が現れることがわかった。これは台風周辺のレインバンドに伴う対流に、小さな強制でも効果的な影響を与えることを示している。第二に、強制の大きさに応じた中心気圧の弱化が得られた。強制が大きい場合に、中心域で温度低下が顕著であり、それに対して気圧が静水圧平衡を満たすように変化していると考えられる。冷却による強制が台風の中心において効果的であることを示している。

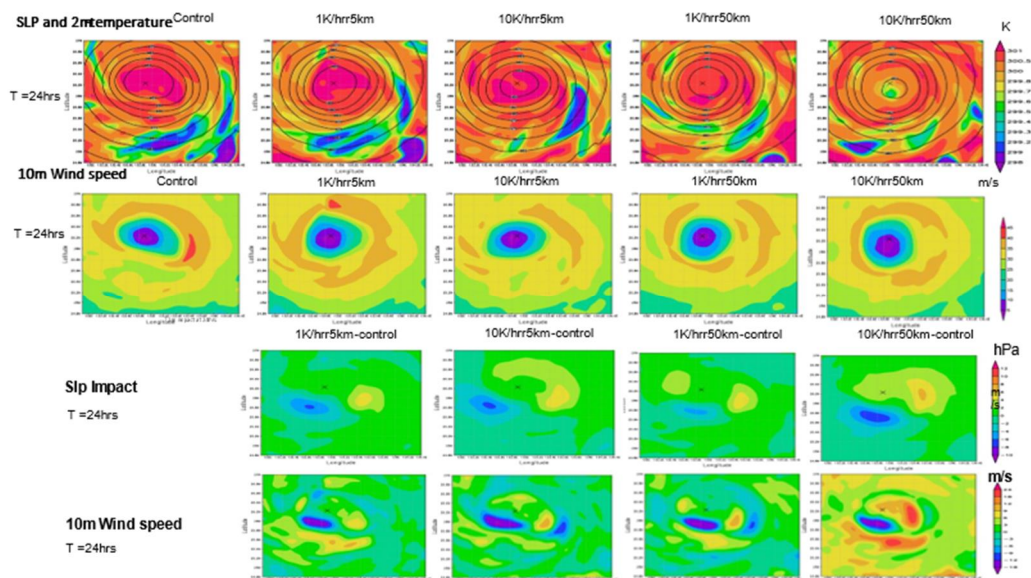


図 3. 各実験の 24 時間後の海面気圧および 2 m 高度気温(1 段目)、および 10 m 高度風速(2 段目)、海面気圧の変化量(3 段目)、10 m 高度風速の変化量(4 段目)。

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:

当該年度は、台風制御方法の検証について、海面水温、摩擦係数、水蒸気蒸発量の改変と台風の強度変化の関係を示す予定であった。しかし、年度中に海洋温度差発電(OTEC)や界面活性剤の蒸発抑制が現実にも介入しても大きな海面蒸発の抑制を起こすことが難しいことがわかった。そのため、まずは防災に資するほどの台風の強度・構造変化をもたらすのにどの程度の海面水蒸気フラックス低下が求められるかを、理想場の台風シミュレーションにより調べた。

また、SCALE を用いて台風スケールでの介入を検討するチームと、LES を用いて人為的な介入スケールで台風環境場に影響するかを検討するチームに分けて研究をした。高潮低減を目指した東京湾口に海上風を弱める研究チームは、その成果を方法学術論文にまとめただけでなく、工学的アプローチへの検討材料となった。大型計算機の計算資源不足などにより遅れがあるが、十分に成果は出していると考ええる。

(1) 海面水温の低下による台風制御方法の検証

今年度は、人為的介入により海面水温低下や蒸発抑制ができたと想定し、SCALE を用いた海面水蒸気フラックスが低下した場合に台風の強度や構造はどう変化するかを調べた。実験設定では、海面水蒸気フラックスの介入半径(25~200km)と減少率(100~20%)を設定し、理想的な環境下での台風発達を比較した。その結果、介入によって多くのケースで台風の中心気圧が上昇し、特に減少率が高い 200 km半径内の100%・80%減では台風が発達しなかった。60%減では発達が遅れたが、40%・20%では基準実験と同様に発達した。比湿の分析では、60%減までの実験で台風中心の比湿が減少したが、40%では顕著な減少が見られず、潜熱放出により発達したと考えられる。また、介入半径が 25km・50km と狭い場合は、比湿の減少やパーセルの侵入が少なく、介入効果が限定的であることが示された。

(2) LES を用いた大型帆船による台風制御方法の検証

領域気象モデル JMA-NHM を LES 化し、台風全域を計算領域に収める計算において、多数の大型帆船(障壁)の配置を想定したシミュレーションを行っている。縦 200 m × 横 200 m × 高さ 50 m の抵抗体を中心から 200 km の範囲で、5 km 四方ごとに設置した場合に相当する抗力を導入し、成熟した台風中での LES を実現した。船舶の後流で蛇行する弱風域がみられ、短期的な境界層中での風速変動が合理的に計算されていることを検証した。詳細な構造の解析を行うと、東西風と南北風の極大軸のずれが下層で大きくなっていた。また、台風の中心位置もずれていくことがわかった。

(3) SCALE を用いた海面摩擦低下と台風強度変化による検証

本チームでは、台風スケールの介入の影響を見るために、気象モデル SCALE を用いて台風の中心からある領域の摩擦係数(Cd)を増加させる数値シミュレーションにより、風速の軽減効果を評価した。感度実験としては、台風の中心から介入半径(25~200 km)と Cd(1.1~3.0 倍)を設定する実験を行った。その結果、半径 50 km の領域の Cd

を3倍にすると約 20 ms^{-1} 最大風速が低下する結果が得られた。一方で、半径 50 km までは台風強度の低下量が大きい、半径 100 km 以上では、ほぼ同程度の結果となった。これらのメカニズムを詳細に理解するために、前方流跡線解析を行った。その結果、台風の外側にあった空気塊が二次循環に乗り上層のアウトフローに乗るまでに違いがあることが分かった。摩擦係数の増加により空気塊の移動速度が低下することにより、壁雲に供給される水蒸気量が減り、それが台風の強度弱화에繋がっていることが示唆された。

(4) 東京湾口に抵抗体設置を想定した高潮低減方法の検証

本チームでは、東京湾口に抵抗体を設置することを想定し、気象モデル WRF および高潮モデル JAGURS を用いた海面粗度係数(Cd)を人工的に増加させるシミュレーションにより、高潮の軽減効果を評価した。数値シミュレーションでは、Cd を 0.005～0.025 の範囲で変化させ、摩擦を強化する範囲で調整した。その結果、東京湾入口で摩擦を増加させることで風速が低下し、とくに東京での高潮高が大幅に低減することが示された。摩擦を最大に増加させた場合、東京での高潮高は最大 24%低下した。効果は Cd を 0.010 まで上げたときに最も高く、それ以上の Cd 増加や摩擦範囲の拡大は効果が低減した。この手法は、防風林のような従来の沿岸保全策に類似しており、湾内の都市域を高潮から守る新たな減災手段としての可能性を示している。

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

(1)「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」の実施

当該年度実施内容:

ア:当該年度中に、高温高湿条件下における実験を再現するための雲生成チャンバーの改修と調整を予定どおり達成できた。実験設備の継続運用のためにいくつかの整備・調整を行った。大きな実験設備上の変更や改造はない。

イ:台風環境下を想定した室内実験のため、昨年よりも高い 33 °C の温度下で、昨年よりも多湿な 23 °C の露点温度を初期設定とした、高温・多湿環境下における室内実験を成功させた。上昇流速度については、これまで中緯度陸域を対象とした集水域周辺に発生する雲シーディングに適した雲(有効雲)を仮定した室内実験では 3 ms⁻¹ と 5 ms⁻¹ を設定してきたが、熱帯海洋上を対象とした本実験では台風周辺域に発生する深い対流に至っていない積雲で構成される雲域を雲シーディング(のシナリオ)に適した典型的な環境場であると仮定しているため、上昇流速度を設定として昨年度より実施している 3 ms⁻¹ に加え 2 ms⁻¹ についても実施した。複数通りの上昇速度を設定することで、上昇流がシーディングによる雲核活性化へ及ぼす影響を比較解析できるとともに、パーセルモデルによる低緯度の雲に対する数値実験との、より精確な比較検証が期待できる。雲生成チャンバー実験には、背景エアロゾルである海塩粒子を想定した NaCl のマイクロパウダー(MP)、および主に航空機から煙の形で播種する吸湿性フレアに近い粒径分布をもつ硫酸アンモニウム(Ammo)を使用した。今年度はこれらの粒子の混合割合や粒径分布は可能な限り一定とし、環境条件の異なる3通りの実験を実施し、活性化特性の違いを調べた(試行した実験は多数あるが、ここではパーセルモデルとの比較検証のため抽出したシーディング実験の結果のみを示す(図1))。

これらの実験から、上昇速度が速くなると雲粒核の活性化数(活性化比)が増える傾向にあり、また高温・高湿環境の効果は活性化後の雲粒の成長を促す作用があることがわかった。そして重要なことは、どちらの条件においても、注入した硫酸塩の微粒子は、NaCl 粒子が背景エアロゾルとして存在する競合的雲生成環境のもとで、十分に雲核として働き、桁違いに高濃度に散布すれば背景エアロゾルによって発生する雲粒よりもシーディング物質により生成した雲粒の数濃度が支配的となることが期待できるという結果を得たことである。これはシーディング手法の可能性を後押しする結果である。台風環境下での最適なシーディング手法の検討には、有効雲へ散布する数濃度だけではなく、競合的雲生成環境のもとで有効に雲核として働くシーディング粒子の吸湿度や粒径分布といった特性の情報も不可欠である。室内実験を効率的に実施するため、パーセルモデルによる数値実験との比較検証を促進する必要がある。

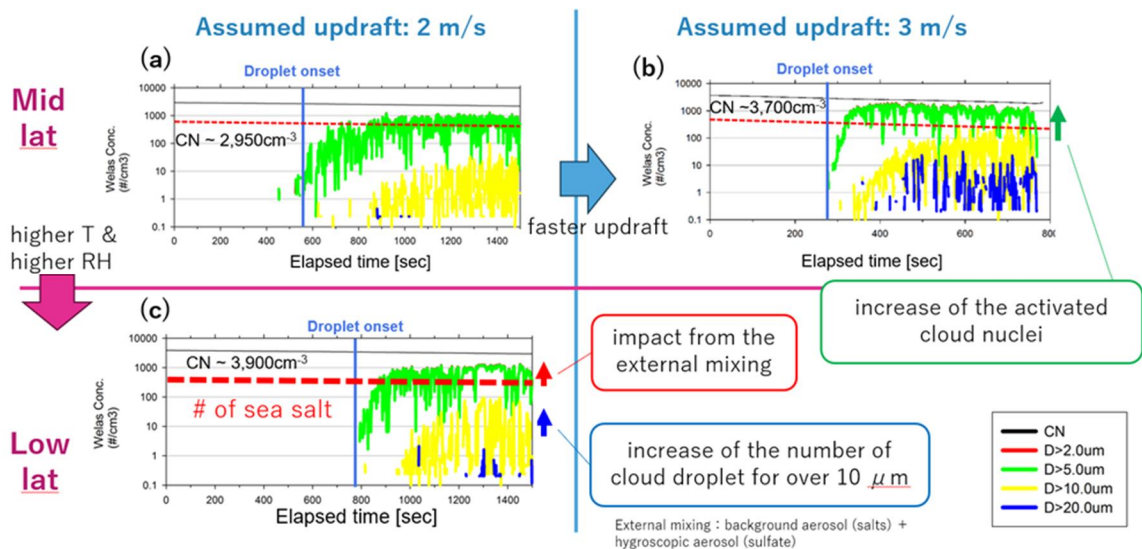


図 1: 室内実験の結果。測定された各種粒子数の時間変化を示す。(a) 中緯度想定
の温度・湿度で上昇流 2 ms^{-1} 、(b) 中緯度想定 of 温度・湿度で上昇流 3 ms^{-1} 、(c) 熱帯
域想定 of 温度・湿度で上昇流 2 ms^{-1} の実験。黒実線は注入したエアロゾルの粒子数
を表し、赤破線はそのうちの NaCl 粒子の数を示す。

ウ: 室内実験の可用性向上を目的とした実験初期化の自動化については実施にあたっ
て事務的手続きの検討が必要となったため、当該年度の実施を中止した。また実
施可能性を検討したが事務手続き上難しく、本件は今後実施しないとの判断をつ
けた。

エ: CCN/INP として働くエアロゾルを陽に扱うパーセルモデルについて、昨年度、開発
できた詳細雲物理モデルを用いて、今年度は比較実験に着手した。これまでに、
図 2 に示すように室内実験の結果を模擬できた。今年度は海塩粒子を用いた実験
事例の試行までにとどまったが、他の事例との比較や必要な調整を進めるなかで
数値計算の設定や実験設定追加を検討していき、R7 年度は、このパーセルモデル
を用いて低緯度の雲に対する数値実験を継続的にを行い、雲生成チェンバー実
験結果の比較検証を進める。

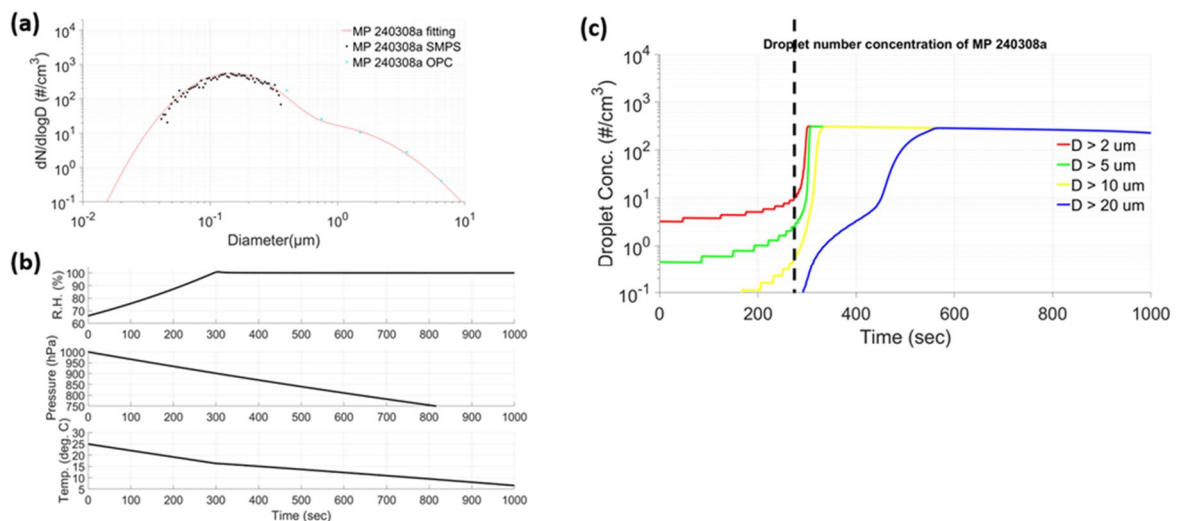


図 2：パーセルモデルで再現された空気塊持ち上げ過程に伴う雲粒の凝結数。(a) 室内実験で計測した試料粒子の粒径分布、(b) 相対湿度・気圧・気温の時間変化、(c) 粒子数濃度の時間変化。黒の破線は雲粒発生開始時刻を示す。

(2)「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」の実施

当該年度実施内容：

ダブルモーメントのバルク法雲微物理過程を用いた CReSS-4ICE-CCN で、2022 年台風第14号(Nanmadol)の事例を対象として数値シミュレーション実施した。モデル設定は、水平格子間隔 2 km、鉛直 32 層(モデルトップ 18 km)、液相・固相ともに 2-モーメントの雲微物理スキーム、乱流拡散過程は TKE1.5 次クロージャー、地表面過程はバルク式、対流パラメタリゼーションは無しとした。気象庁 GSM の初期値をシミュレーションの初期および境界条件として使用し、2022 年 9 月 15 日 00UTC から 3 日間の積分を行った。SST は 2022 年 9 月 15 日の MGDSSST を初期値として、1 次元熱拡散方程式を用いて予報した。雲微物理スキームの標準設定を使用した計算(コントロール実験:CTL)に加えて、計算開始6時間以降に連続して特定の領域で CCN 濃度を増加させた計算を実施した。特定の領域とは高度 1 km におけるシステム相対風速が 25 ms^{-1} 以上で、その東西成分が -20 ms^{-1} 以下の領域で高度 3km 以下を対象とした。この領域内では過飽和度が 1%において CCN 濃度が地上付近で 3000 個/cc(デフォルト値は 50 個/cc)となる形で CCN 濃度を増やし、吸湿性粒子シーディングを模擬した($N_{ccn} = 3000.e6 \times SSw0.63$)。この計算を、以降はシーディング実験(Seed)と呼ぶ。図 3 にシーディングなしの場合とシーディングありの場合の 1.8 km 高度における雲粒数濃度を示す。台風中心の北象限では、 1 cm^3 あたり数百個以上の高濃度が見られる。

図 4は CTL 実験と Seed 実験のトラックと中心気圧をベストトラックとの比較として示す。シミュレーションはベストトラックデータと比較して中心気圧を過小評価しているものの、トラックは概ね良好に再現しており、トラックについては CTL 実験と Seed 実験の間に大きな差はない。

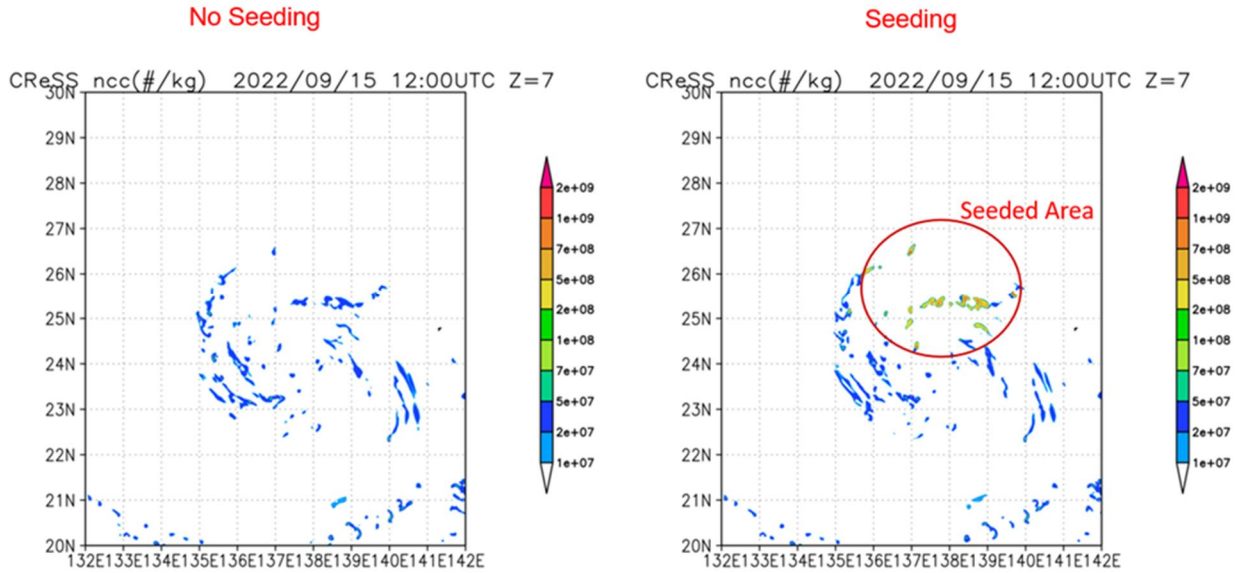


図 3: 計算開始後 12 時間におけるシーディングなしの場合とシーディングありの場合の高度 1.8 km における雲粒数濃度。

中心気圧については、最初の 20 時間は CTL 実験と Seed 実験の間に大きな差は見られないが、その後の 12 時間 (16 日～17 日の間) で Seed 実験は急激に増加し、最大 5 hPa の差が見られた。その中でも特に差が大きい、図中 B で示した時刻について以下で構造上の違いを説明する。なお、他時刻 A、C、および D の期間についても調べたが詳細は割愛する。概略としては、A 時刻では構造上も差は顕著でなく、C 時刻は B 時刻と同様の結果、D 時刻では再び構造上の差が小さくなった。

積分開始後 34 時間の台風の水平構造を図 5 に示した。Seed 実験、CTL 実験のどちらも、降水量から眼が確認できること、中心から南東象限に降雨域が広く、南側から北西へかけてレインバンドが数本伸びていることがわかる。しかし、台風中心の北象限の壁雲域付近 (図 5c で赤丸で示した部分) で、CTL 実験に比べて Seed 実験では風速が弱まり軸対称性も崩れている。この場所は、図 3 で示した仮想シーディングを実施した領域にあたる。図 6 は、ほぼ同時刻の台風中心をとる南北鉛直断面図を示したものである。図 6(b)(c)と(d)(e)の比較から、CTL 実験に比べて Seed 実験では弱い下降流中に蒸発中の全凝結物の比較的大きな混合比が見られ、蒸発の潜熱によって眼の中の空気塊が冷却されていることを示唆している。

これらのシミュレーション結果から、台風に対する時空間的に限定的な吸湿性シーディングによって、台風の軸対称構造を崩し、その結果として台風の強度が最大 5 hPa 程度弱められる可能性が示唆された。シーディングにより顕在化した眼の壁雲内の風速の非対称性が、眼の中における凝結物の蒸発・空気塊の冷却を促進することが台風弱化につながったのではないかと考えているが、詳細なメカニズムの解明は現在進行中である。

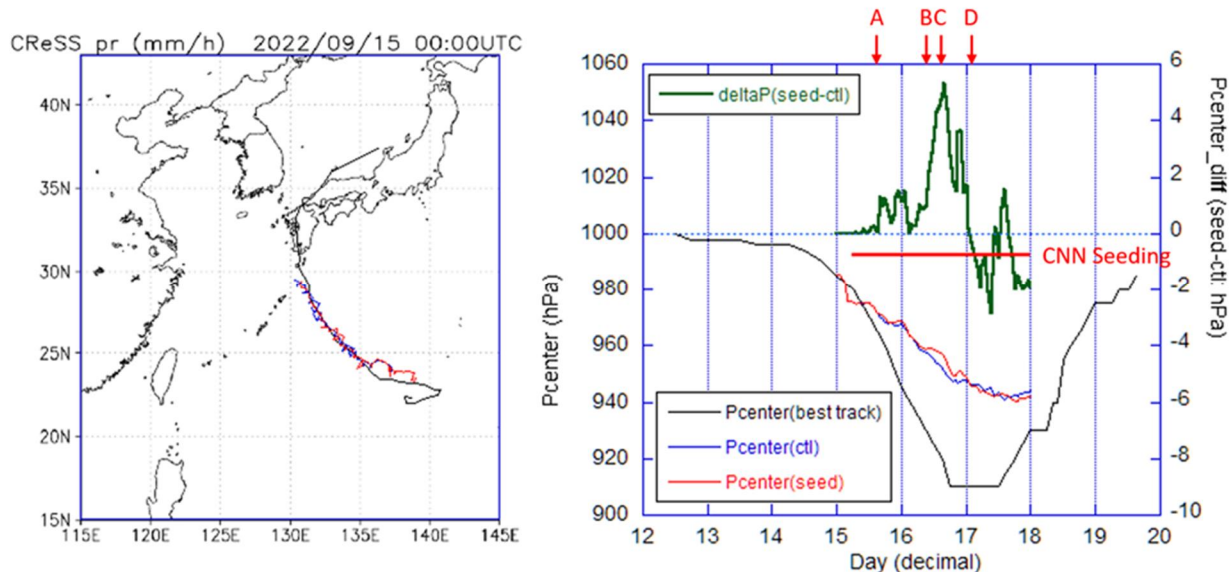


図 4: CTL 実験と Seed 実験のトラック(左図)と中心気圧(右図)。黒線は気象庁ベストトラックデータを示す。また右図の赤太線はシーディング効果を加えた期間を示す。

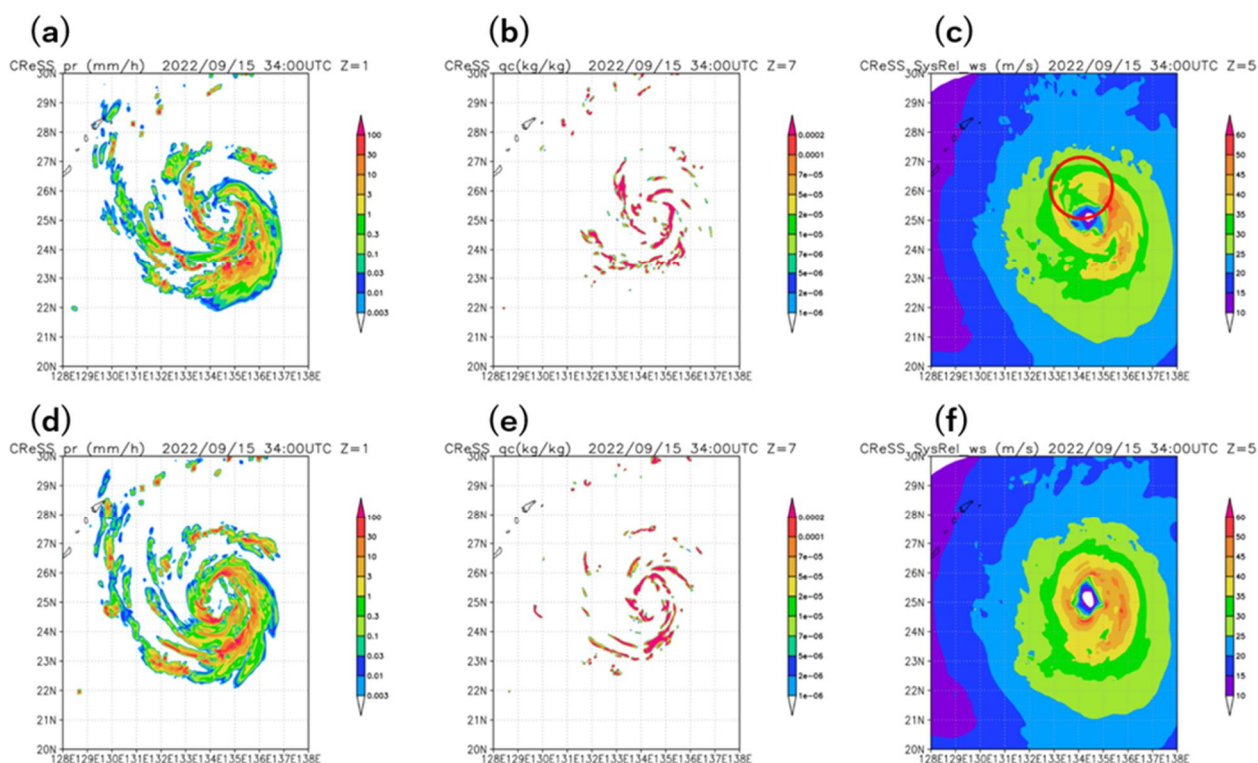


図 5: 計算開始後 34 時間における水平分布。(a-c)は Seed 実験、(d-f)は CTL 実験をそれぞれ示す。(a)・(d)は地上降水、(b)・(e)は高度 1.8 km における雲水混合比、(c)・(f)は高度 1 km の相対風である。この時刻において Seed 実験の中心気圧は 959.03 hPa、CTL 実験は 956.81 hPa で 2.21 hPa の差があった。(c)において赤丸で示した領域で(f)と比べて大きな風速差が見られ、Seed 実験では風速の軸対称性が崩れていることが確認できる。

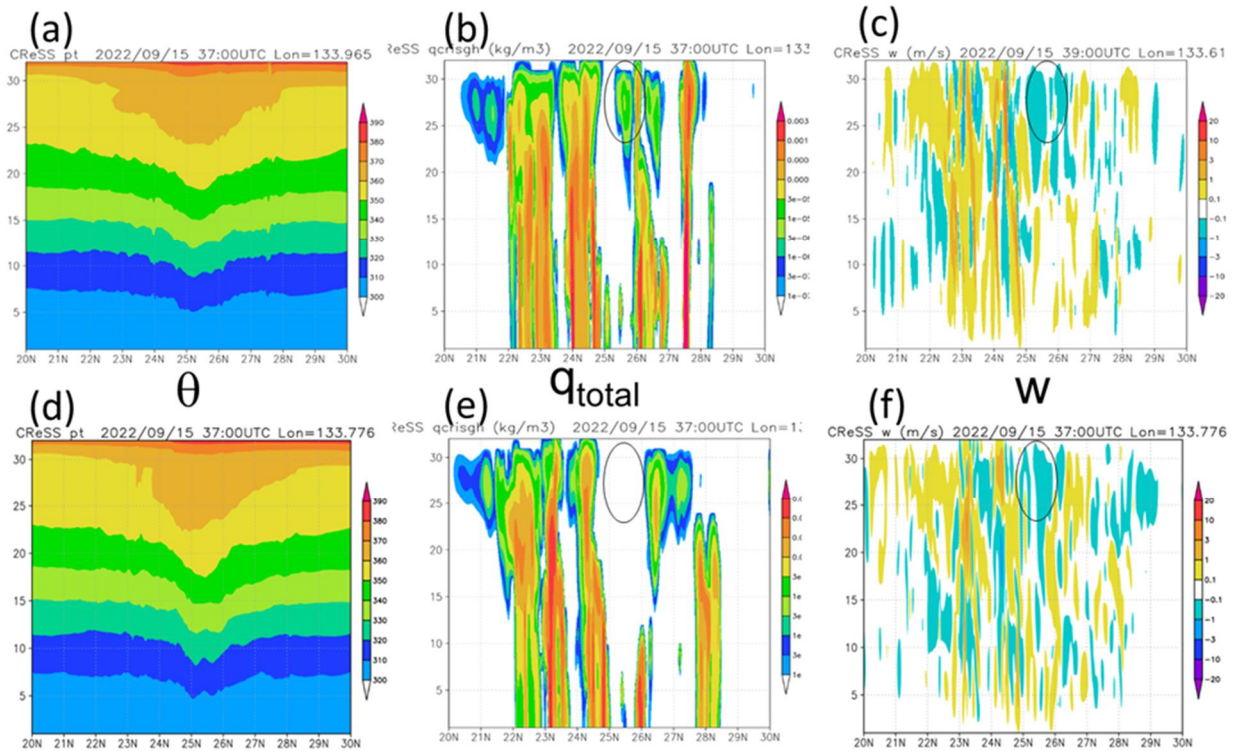


図 6: 計算開始後 37 時間における鉛直-水平断面図。(a-c)は Seed 実験、(d-f)は CTL 実験をそれぞれ示す。(a)・(d)は温位、(b)・(e)は全凝結物混合比、(c)・(f)は鉛直速度である。(b), (c), (e), および(f)で黒丸で示した眼の上層部において、CTL 実験に比べて Seed 実験では下降流域に蒸発中の凝結物量が見られる。

ここまでの実験で示した CCN 数濃度に対する応答がどの程度、台風に普遍的に見られる応答なのか調べるために、図 7 に示すように Nanmadol に、Jebi、Trami、Hagibis、Bualoi、および Mindulle の 5 事例を加えてシミュレーションを実施した。簡易化および事例間の操作の違いを無くすために、C_CCN のパラメータを変更する範囲は計算領域全体とし、水平格子間隔を約 3 km、鉛直 60 層、積分時間を 36 時間とした以外は、前述と同じモデルであり、以降で示す 6 事例は全て同じ実験設定で実施した。図 7 の中心気圧の時系列をみると、雲粒数が多い赤線は CTL 実験(緑線)よりも上側に見られることが多い。一方、雲粒数が少ない青線は、CTL 実験よりも下側に見られる傾向にある。ただし、同じ事例の中でも逆転している時間帯、つまり雲粒数が多い場合の方が少ない場合より気圧が低い時間帯(Jebi の事例)や、どの時間帯においても非常に差が小さい事例も見られ(Hagibis や Mindulle の事例)、雲粒数濃度に対する台風の応答性にはかなりばらつきがあることがわかった。

これらの事例の中で特に大きな気圧の上昇が見られた Bualoi の事例について積分開始後 14 時間から 20 時間の 6 時間を対象に、台風をトラッキングしながら軸対称平均をとり、その時間平均値を算出した(図 8)。壁雲域に対応する台風中心より 50 km-100 km の間における全凝結物混合比の 0.2 g/kg 値の出現高度は、1/10 倍実験で約 13km だが、10 倍実験では約 15km まで達している。同様に、台風中心から 50 km-100 km の間における強い上昇流が到達する高度が、CTL 実験では 12.5 km までだが、1/10 倍実験では

12.5 km 高度にまで達しておらず、一方で 10 倍実験ではその高度を超えてさらに上層にまで到達している。すなわち、雲粒数濃度が高い場合に、壁雲での上昇流の最速域がより高い高度に位置し、水物質はより上層まで運ばれる傾向がある。この原因は、非断熱加熱量の鉛直分布に違いがあることに起因していると考えており、現在詳細を調べている。

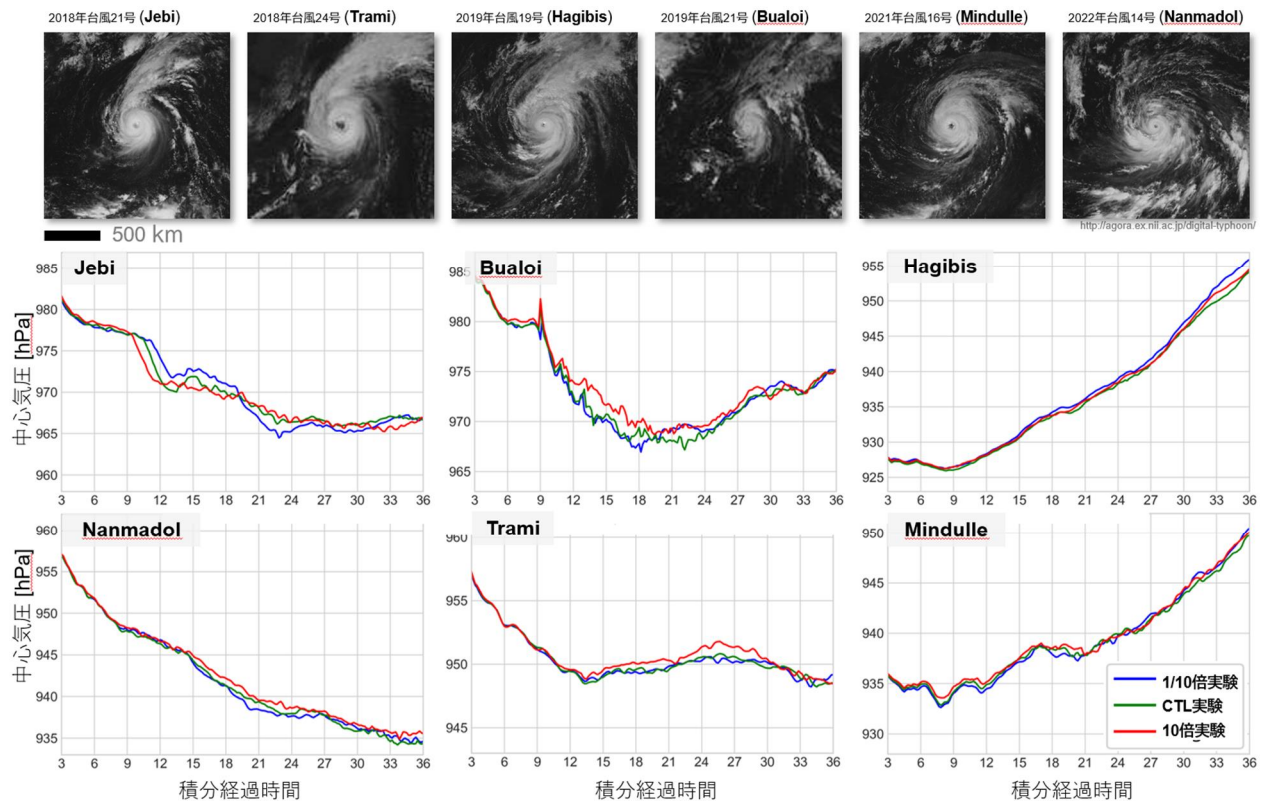


図 7 : CReSS-4ICE-CCN で実施した台風 6 事例とシミュレーション結果の中心気圧の時系列変化。上段の雲の分布は衛星画像である。6 事例それぞれについて CTL 実験 ($C_{CCN}=300$ 個/cc)、1/10 倍実験 ($C_{CCN}=30$ 個/cc)、および 10 倍実験 ($C_{CCN}=3000$ 個/cc) のそれぞれを示す。

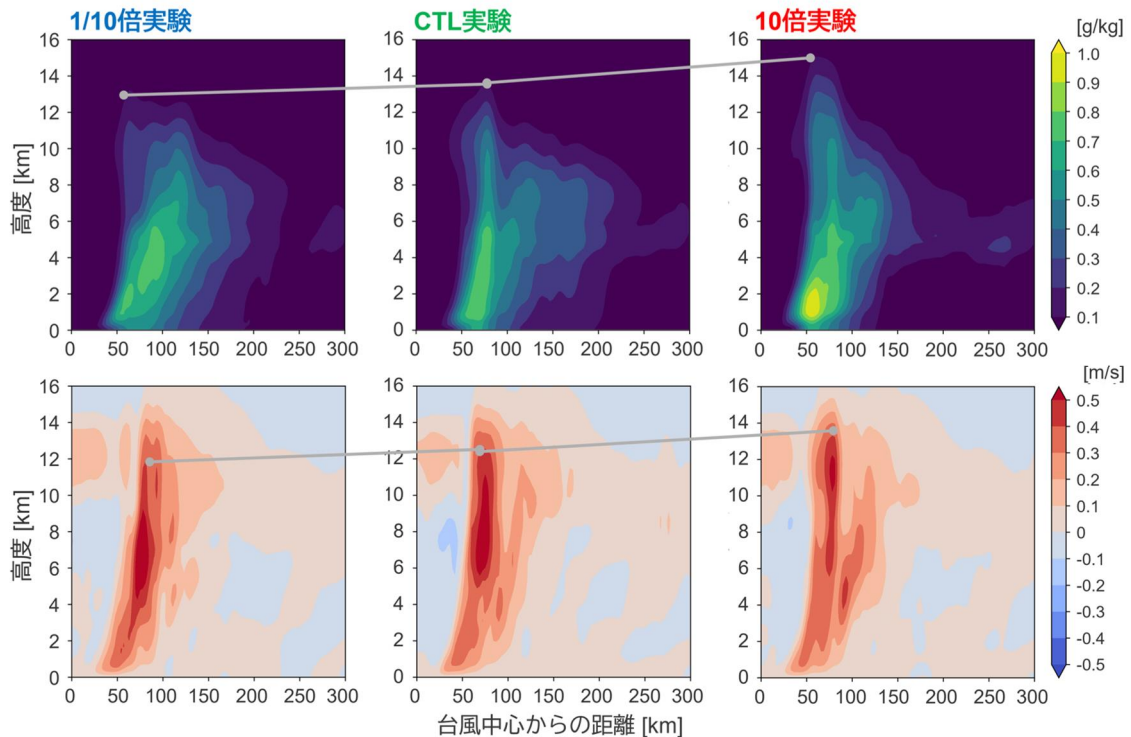


図8：Bualoi 事例（2019 年 21 号台風）の軸対称平均値（半径-鉛直断面図）。上段は全凝結物混合比、下段は鉛直速度を示す。CTL 実験に比べて 10 倍実験が高い気圧を示した 6 時間を対象に平均した。

当該年度実施内容：

SCALE-SPRINTARS を用いて 2019 年台風 Faxai の事例を対象に硫酸塩粒子をシーディングする実験を計画し、実施した。このモデルは現在、九州大学の竹村氏を中心に Description 論文が準備中である。ベースモデルは SCALE-RM v5.4.5 で、水平格子間隔は 3.5 km、鉛直 35 層（モデルトップ 20km）、エアロゾル過程は SPRINTARS (Takemura et al. 2000)、雲微物理過程は SN14 ダブルモーメントスキーム、乱流拡散過程は Smagorinsky モデル、境界層は MYNN、地表面フラックスはバルク式、放射過程は MSTRANX を用いた。MIROC-SPRINTARS の計算結果を初期値・境界値とすることで、エアロゾルの空間分布に対しても現実的な 3 次元分布を与えた。積分期間は 2019 年 9 月 6 日 12UTC から同月 7 日 12UTC までの 24 時間である。このモデルではエアロゾル過程が陽に表現されていることが特筆すべき点で、モデルの予報変数にエアロゾルも含んでおり、硫酸塩、カーボン、ダスト、海塩などが含まれている。エアロゾルは大気場で移流され、計算時刻において、格子点にあるエアロゾルを参照して CCN の分布を考え、飽和度に合わせて活性化させて、雲粒が生成される、というシミュレーションを実施できる。

○NHM-Chem モデルを用いた実台風数値実験

エアロゾル粒子が雲微物理過程を介して台風強度に及ぼす影響について雲構造や降水特性の観点から定量的評価をおこなうことを目的とし、領域気象化学モデル NHM-Chem (Kajino et al., 2019; Kajino et al., 2021) を用いてエアロゾル粒子の種類や数濃度が台風強度・降水特性・雲構造に与える影響を評価する研究も実施して

いる。水平格子間隔は 5 km (第 2 ドメイン)、鉛直 50 層 (モデルトップ 21 km)、6 カテゴリー 2 モーメントのバルク雲微物理スキームを用いた。特筆すべきは、バイオマス、海塩、鉱物ダスト、火山起源のガス、黒炭をあわせた 5 種のエアロゾルを取り扱い、化学過程を含めたエアロゾル微物理を陽に計算している点である。2018 年台風第 21 号 (アジア名: JEBI チェビー) を対象事例とし、JRA3Q、および気象庁メソ解析を初期値・境界値として 2018 年 8 月 28 日～9 月 6 日の期間の時間積分を行った。人為起源・自然起源の両方のエアロゾル排出を考慮し、これらのエアロゾルの排出量を 1/100 倍、1/10 倍、10 倍、100 倍に変化させる感度実験をおこなった。図 15 に示すようにシミュレーションは、現実の台風経路を良好に再現し、台風に伴う総観規模での循環場を捉えていることを確認できる。気温、風速ともに時間変動を良好に再現したことを確認したが、相対湿度は過大評価傾向にあり (図略)、エアロゾルの吸湿成長の計算誤差に影響あたえた可能性がある。

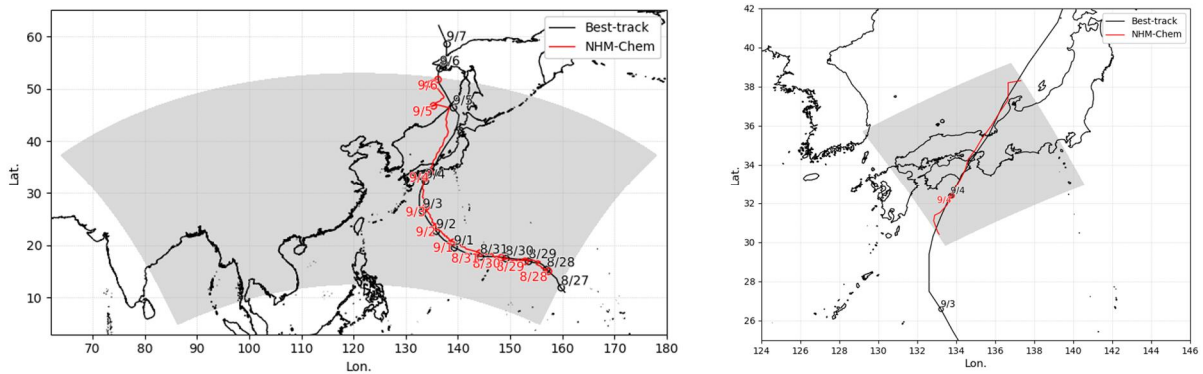


図 9 : NHM-Chem による台風 Jebi 事例の化学過程を含めた数値シミュレーション結果。左は第一ドメイン、右は第 2 ドメインのシミュレーションで得られた中心気圧の位置 (赤) とベストトラック (黒) を示す。

こうした台風が日本へ接近・上陸するとき、どのようにエアロゾルの分布を数値シミュレーションが再現できるか化学場の状態を検証したものが図 10 である。観測・モデルともに鉱物・球形粒子が雲底高度付近に輸送されていることがわかる。また、モデル結果において地上だけでなく 0 度高度より上空にも輸送がみられる。現実場とのさらなる検証が必要ではあるが、台風が接近・上陸する条件下では、下層だけでなくかなり高い高度にもこうした鉱物粒子や球形粒子 (エアロゾル) が分布していることを考慮しなければならない可能性を示唆している。

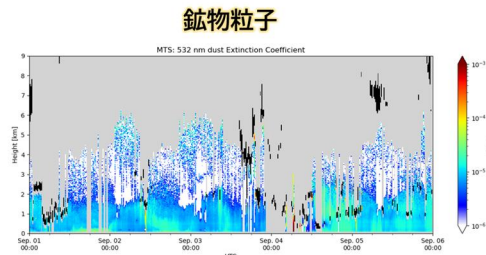


図. 松江に設置されたライダーによる鉱物粒子の532 nm消散係数 鉛直-時間断面 (/m)

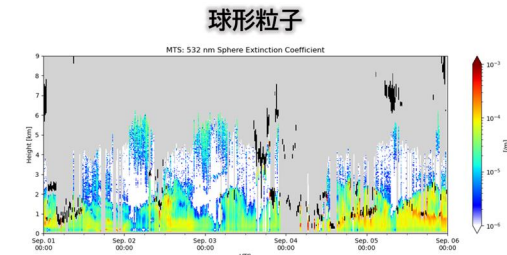


図. 松江に設置されたライダーによる球形粒子の532 nm消散係数 鉛直-時間断面 (/m)

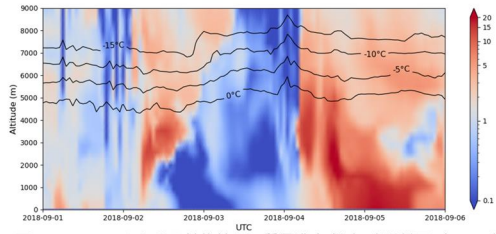


図. NHM-Chemにおける鉱物粒子の質量濃度 鉛直-時間断面 ($\mu\text{g m}^{-3}$)

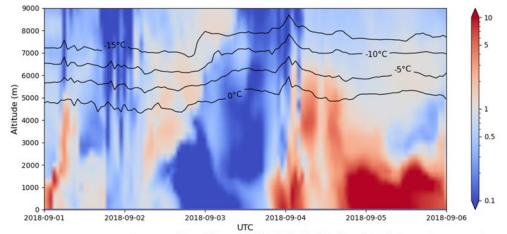


図. NHM-Chemにおける球形粒子の質量濃度 鉛直-時間断面 ($\mu\text{g m}^{-3}$)

図 10: 鉱物粒子と球形粒子の鉛直-時間断面図。上段はライダー観測結果 (松江)、下段はNHM-Chemによるシミュレーション結果を示す。

こうしたNature ラン (コントロール実験: CTL) をベースに、人為起源エアロゾル、鉱物粒子、および海塩粒子をそれぞれ 1/100 倍、1/10 倍、10 倍、および 100 倍とした感度実験を実施した (図 17)。CTL 実験からの差は 0 を中心に上下に変動しており、顕著な増加傾向や減少傾向は見受けられなかった。また、その変化量も最大で地上風速で 2 ms^{-1} 程度、地上気圧で 1 hPa 未満であり、人為・自然起源エアロゾル粒子の排出量を変えたことによる大きな変化は確認できなかった。

今後は、雲構造における人為・自然起源エアロゾル粒子の影響についての解析や、第 1 ドメインでの台風強度・降水特性に対する人為・自然起源エアロゾル粒子の影響の解析を進めていきたい。

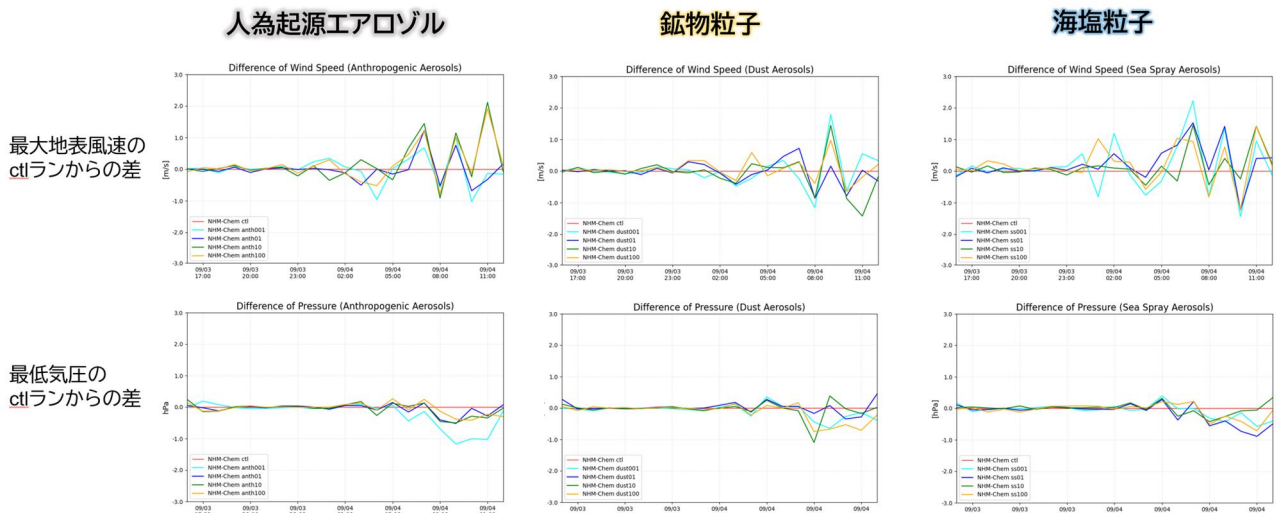


図 11: 最大地表風速と最低気圧の感度実験結果。それぞれの線は CTL 実験からの差を表し、1/100 倍: 水色、1/10 倍: 青色、10 倍: 緑、100 倍: オレンジをそれぞれ示す。縦軸のレンジは -3 ms^{-1} から $+3 \text{ ms}^{-1}$ 、および -3 hPa から $+3 \text{ hPa}$ である。

○理想化台風実験

現実事例の台風だけでなく、実験設定を変更しやすい理想化台風実験も並行して実施し、吸湿性シーディングに対する応答メカニズムの解明に努めている。SCALE-RM version 5.4.5 (Nishizawa et al., 2015, Sato et al., 2015) を用いて、水平格子間隔 3 km、鉛直 45 層の設定で、2 モーメントバルク式の微物理スキームを用いて理想化台風実験を実施した。初期鉛直プロファイルとして Jordan., (1958) の熱帯観測結果を使用して、SST は 27°C に一様として、計算時間中も固定値とした。計算領域は水平方向に 2 重周期境界としており、そのために水平方向に 3000 km の十分な計算領域を取った。

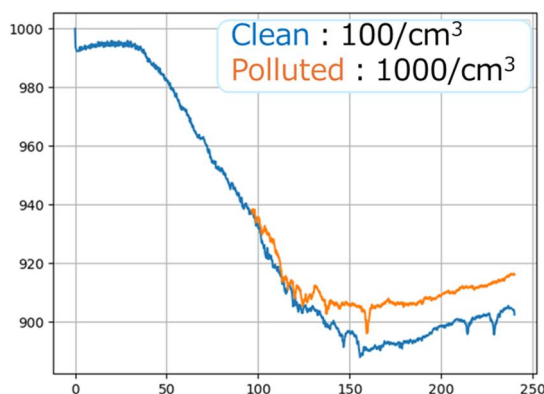


図 12 : SCALE-RM による理想化台風実験における CCN 濃度変化実験の結果。シミュレーションで得られた中心気圧の時系列変化を示す。縦軸は気圧 (hPa)、横軸は積分時間 (hour) である。

雲微物理スキーム内の凝結過程における N_c 数を決定する C_CCN のパラメータを 100 個/cc から、1000 個/cc へ計算途中で変更した実験を実施した。変更は計算領域全体で行った。その結果、図 12 のように N_c 数を増やすことで最低気圧は約 10 hPa 程度上がり、最大風速は 7 ms^{-1} 程度遅くなった。したがって、本文書内でここまで説明してきたように、理想化台風実験下でも現実事例と同じような吸湿性シーディングに対する応答傾向が見られた。図 13 のように、 N_c 数が多い場合の方が、軸対称構造でみた鉛直速度は遅く、少し半径方向に外側へ移動する傾向がある。また、非断熱加熱量も同様に外側で少々増加、内側で減少が見られ、 N_c 数が多い場合に上空で氷晶の量が減るという応答が見られた。これらの微物理的な応答は SCALE-SPRINTARS を用いた現実事例でみられたものに似ており、事例が異なっても応答の傾向に近い可能性を示唆すると考えている。

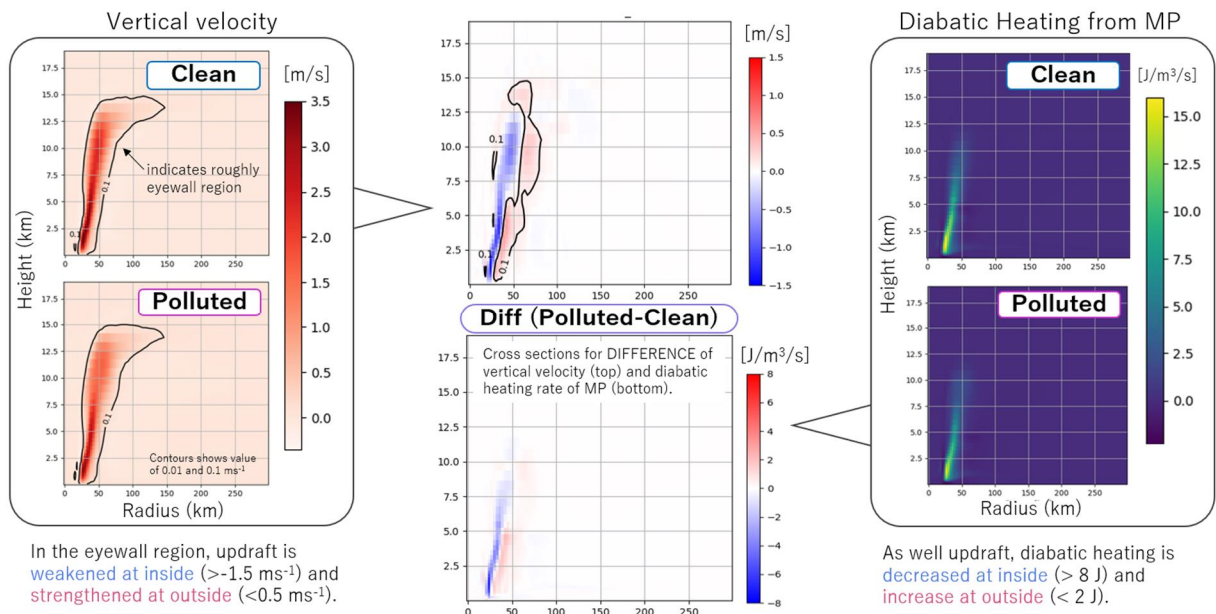


図 15 には海面校正気圧と最大風速の時系列変化を示した。黄色線の Polluted 実験は発達が始まる時刻が Standard 実験より遅いものの、最終的には Standard 実験と同様の強度まで発達した。しかし、青色線の Clean 実験は、発達率が他 2 事例に比べて顕著に小さく、計算終了までに海面校正気圧で 995 hPa のあたりまでしか発達しなかった。最初の 4 日間はケース間に大きな違いはないが、最後の 2 日間は Clean 実験で顕著に上昇流が弱いことがわかっている（図は省略）。台風発生過程において対流が境界層内を外から入ってくる空気塊を鉛直輸送することで自由大気に角運動量を供給することが大切だ (Kilroy, et al., 2017) とする先行研究があり、この視点で考えると渦を伴った熱帯擾乱における対流を弱めたことが、角運動量の鉛直輸送を抑え、熱帯低気圧の発生を鈍らせているのではないかと考えている。

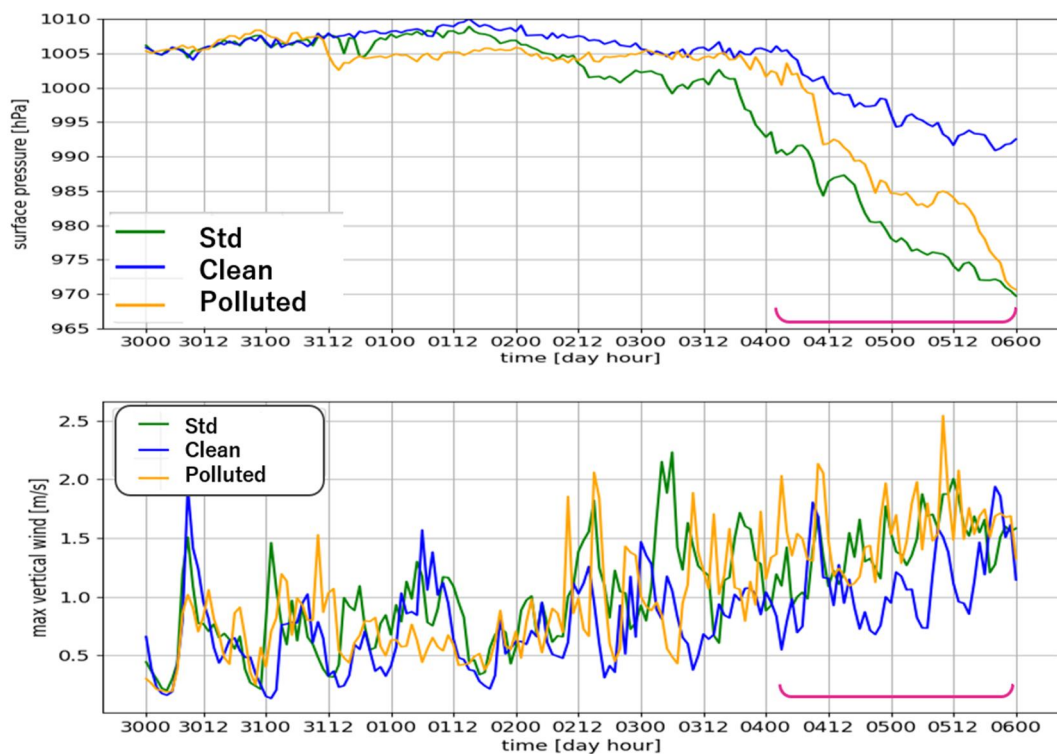


図 15：熱帯擾乱をトラッキングして得た海面校正気圧と最大風速の時系列変化。横軸の 4 桁は最初の 2 桁が日付、最後の 2 桁が時刻（UTC）を示す。ピンク色の枠で示した期間に大きな差が見られる。

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:

(1) 人工衛星データの高度利用法の開発

(1)-1 ひまわり 8/9 号の 2.5 分観測による大気追跡風導出手法開発と適用

ひまわり 8/9 号は、西太平洋の台風について常時、2.5 分間隔で機動観測を実施しており、2015 年の観測開始以来のデータの蓄積がある。これを用いて、質のよい大気追跡風(雲追跡による風速の推定値。Atmospheric Motion Vector より AMV と略称)が導出できるようにするための開発を行い Tsukada et al. (2024)として論文出版した。開発した手法は、台風画像を回転角速度で回転させたもの複数通り用意し、それぞれについて AMV を求め、得られる複数の候補から、品質評価指標と周囲の結果との類似度から最終結果を選択するものである(図 1)。これまでに開発した 30 秒観測に基づく AMV および航空機によるドロップゾンデ観測との比較から、実際に精度よく測定できていることを明らかにし、当該年度の目標を達成した。

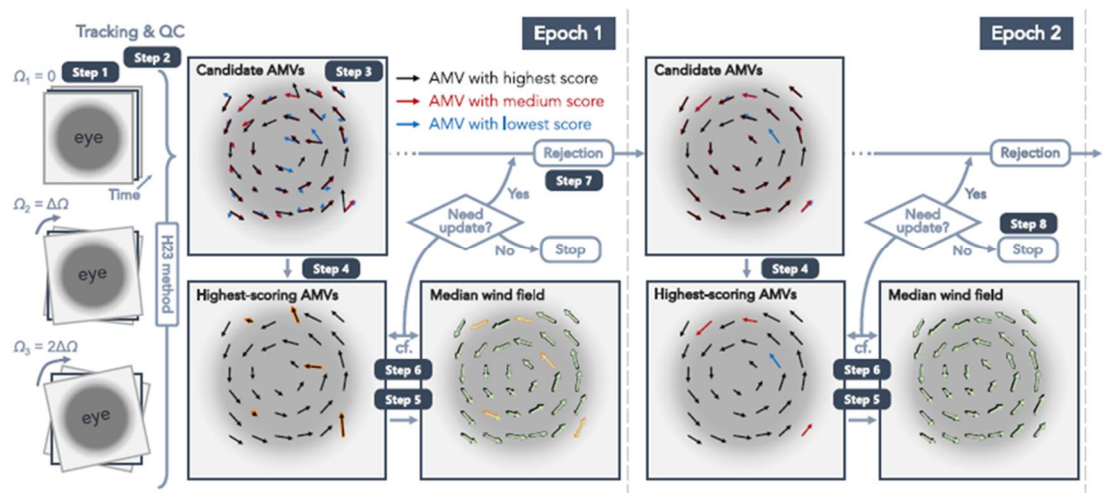


図1 AMV 導出の新手法の概念図(Tsukada et al., 2024, Fig. 1 より転載)

本手法を用いて、台風の目の中の下層の渦度分布や角運動量収支を時々刻々明らかにすることができた。これにより、例えばある台風では、波数2以上の順圧不安定が発生し、その後の非線形過程で波数1成分が増大して角運動量輸送を引き起こし、内部コアの構造の急激な変化をもたらしたことが明らかになった。現在、さらなる応用も行いつつある。

(1)-2 新しい海面高度計を用いた台風への海洋応答の研究

台風に伴う風は海面温度を変化させ、それが台風の発達に影響するという相互作用があるため、制御に必要な正確な予測には、台風下の大気海洋相互作用の定量化と理解が必要である。2022 年末に打ち上げられた SWOT 衛星は面的に海面高度を観測する新しい機能を持つ。台風通過後の海面高度低下を定量することで、大気が海に与えた力学強制が推定できる。我々はこれを活用し、2023 年の台風 Mawar による海洋応答の詳細な研究を行い、Mawar が引き起こした海面高度変動を、台風通過

後1カ月以上にわたって定量することに成功した。(Combot, Horinouchi, 他3名の共著で間もなく論文投稿予定)。今後、海面での抵抗係数の推定などへの応用が期待される。

(1)-3 衛星搭載マイクロ波放射計観測を用いた最大風速半径推定法の研究

最大風速が台風を中心からどれだけ離れたところにみられるかを表す最大風速半径(RMW)は、台風の内部コアの特徴を表す重要なパラメータの一つであるが、西太平洋の台風に対しては定常的な航空機観測が行われていないため、不確かさが大きいことが問題となっている。その解決は、台風の予測を良くすることにより、制御の前提となる精度の高い予測実現に資する。分担者の嶋田は、衛星搭載マイクロ波放射計による RMW の推定法開発に取り組み、衛星による合成開口レーダー(SAR)観測結果と比較した。SAR は下層風の面的な分布を計測するため RMW が高い精度で計測できるが、観測頻度が少ない。一方、マイクロ波放射計は直接には風速を測らないがより高頻度である。検証の結果、適切なクオリティコントロールを行うと、SAR の結果とよく一致することが示された。

(2) 高密度 AMV の同化による台風の客観解析実現に向けた基礎研究

衛星観測は、データ同化を通じて台風の予測に用いられる。データ同化はまた、観測をもとに大気の状態を推定する「客観解析」手法でもあるが、台風の強度・構造推定には未だにデータ同化が用いられていない。その実用化は、台風の実況把握と予測の向上にかかる喫緊の課題である。本研究では、我々が開発した高密度高頻度の AMV 等の同化により台風の客観解析を実現するための基礎研究を行っている。そのため、主に数値シミュレーションの結果を真値とする、観測システムシミュレーション実験(OSSE)に基づいて研究を行っている。用いる手法は、局所アンサンブルカルマンフィルタである。

昨年度までは、我々の初期の手法により求まる、台風の接線風の軸対称成分を同化する実験を行い、まずまずの成果を得ていた。今年度は、高密度高頻度 AMV をそのまま与える実験を行った。目の中の下層の風速分布を「観測」として与えた実験では、データを与えていない風速が最大となる領域でも「真値」であるシミュレーションによく近づくことが示された(図2)。下層の AMV は、気象衛星によって観測できる、壁雲より内側しかデータが得られず、壁雲の下にあるはずの最大風速が直接には観測できないことが、強度推定上の問題点であったが、データ同化によって克服できる可能性が示された、顕著な成果である。

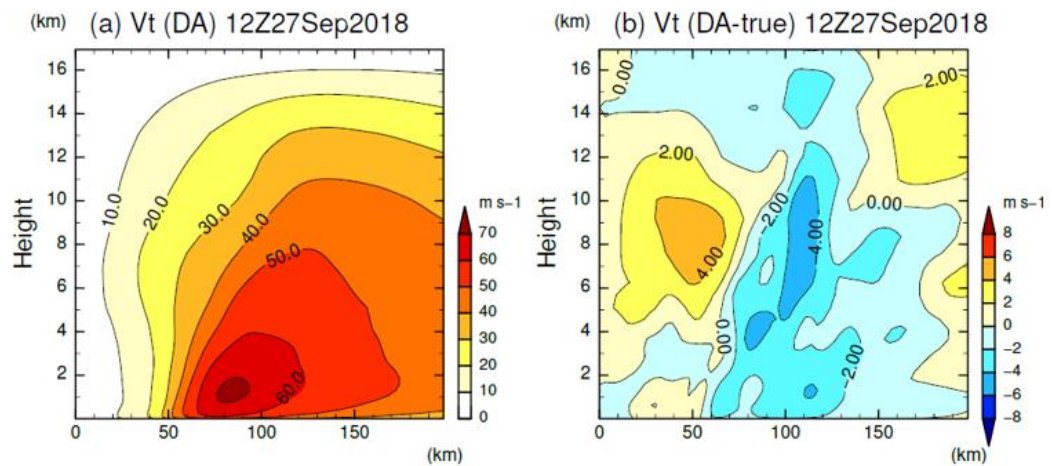


図2 目の中の下層の風速分布を与えた OSSE の結果の例。(a) 「真値」の接線風の分布。このうち、半径 60 km までの下層の風速のみが「観測」とできるという設定になっている(壁雲の変化に合わせて設定するので、当該時刻の1日前までは 40 km までのみのデータを与えている)。データ同化により、半径 80 km 強にある最大風速がよく再現された。Tsuji no and Horinouchi (2025, JGR-Atmospheres に投稿中)より転載。

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①:

台風 Nanmadol(2022)の台風中心付近の運動エネルギーを評価関数として、5 km メッシュの随伴モデルを基礎とした感度解析を実施した。その結果、対流活動が活発な領域の近傍に感度が現れ、後方積分を進めると高感度領域は対流圏下層の吹込みに従って、外側へと移っていく様子が確認された。一般に、高解像度モデルを用いる場合、線型時間発展が保たれる時間スケールは短くなるため、台風の数時間～数日スケールの時間発展を捉えることは困難であるが、本開発課題では、感度解析を実施する固定区間を細かく分け、感度解析とその初期時刻における初期摂動の導入を繰り返す解析介入サイクルの実施により、高解像度モデルに基づく成長の速い摂動を頑強に捉えながら、長期間の変動に影響する摂動を取り出すことに成功した。確認のため、1 時間の感度解析ウィンドウを用いて、Nanmadol の急発達時に、水蒸気の高感度領域に 20%の摂動を加える 6 回の解析介入サイクルにより、中心気圧が 10-15 hPa 増加する程度の弱体化が認められた。前述の感度解析は、初期摂動が無限小であることを仮定しているが、摂動が有限振幅であり場が変形することを加味すると、さらに成長率が大きい摂動が得られる可能性がある。本開発課題では、要素研究の PM であった西澤誠也博士と共同し、このような非線形最適励起摂動を導出する取り組みにも関わった。具体的には、我々が開発を進めてきた WRFDA に基づく感度解析システムの提供を受けた同博士が中心となって研究開発を進めた。共同研究の結果、水物質を含まない力学系において、先行研究と概ね対応する、成長率の大きな摂動を導出することができた。

当該年度実施内容②:

沖縄本島に接近した台風 Hinnamnor (2022)近傍の船舶観測データを同化し、解析精度が向上したことを確認した。ただし、本開発課題が年度途中で数理研究開発項目の「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」に引き継がれることになったため、年度の途中までで、船舶観測の同化による解析精度向上を確認した時点にとどまり、当初予定していた 1 km メッシュでの同化実験には至らなかった。

課題推進者:伊藤 耕介(国立大学法人 京都大学)

研究開発課題7: 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

当該年度実施内容:

2024 年度(本課題は 2025 年 1 月に開始)はカオス性を示す典型的な数理モデルとしてエノン写像を取り上げて小さな入力で大きな制御効果をもたらす数理構造の候補を探索した。一様双曲性が破れたエノン写像のアトラクタ上の点 x を、アトラクタに埋め込まれた比較的短い周期 p をもつ周期点からサンプルし、 x に対して一定時間 T ($T \leq T_0$) の間に最も伸びる摂動ベクトル δx ($|\delta x| = \delta_0$) に着目し、その摂動の背景に存する数理構造の候補を力学系理論の観点から列挙した。ここで、 T_0 は摂動の時間発展がアトラクタの直径に達する時刻、 δ_0 は $\delta_0 \ll 1$ なる正の実数である。

(1) T が $0 < T (\ll T_0)$ をみたすとき、周期点 x をあるひとつに固定すると、その局所安定多様体に直交する方向に摂動ベクトル δx を取ることで時刻 T までに摂動の高い拡大が実現される。リアプノフベクトルで捉えられる局所安定多様体と局所不安定多様体のなす最小角度が小さい周期軌道上の点 x で特に局所安定多様体に直交する方向に摂動ベクトル δx を取ることで時刻 T までに摂動の高い拡大が実現される。

(2) T が $(0 \ll) T < T_0$ をみたすとき x として不動点を採用して、かつ摂動ベクトル δx の方向としては、およそ x の安定固有ベクトル(局所安定多様体)に直交する方向を採用すると、時刻 T までに摂動の高い拡大が実現される。

(1),(2)で実現される摂動ベクトルの拡大は、カオス力学系がもつ平均的な不安定性をあらわすリアプノフ指数による摂動ベクトルの拡大の 10~100 倍程度となることが確認されている。

(1)は、何度も制御入力を入れられる場合も同じ戦略、すなわち局所安定多様体に直交する方向に制御入力を加えることが多段階の制御戦略となることを意味している。(2)は、有限時間の不安定性の揺らぎが比較的大きく、かつ周期点の中で周期の一番短い不動点のリアプノフ指数が一番大きことを活用している。ただし、この場合も不動点の局所不安定多様体方向に摂動ベクトル δx を置くよりも、局所安定多様体に直交する方向に摂動ベクトル δx を置くのが有利であることが見出された。これらの結果は系の散逸性が効いていると見込んでいる。

課題推進者: 齊木 吉隆(一橋大学)

(2) 研究開発項目2:工学的アプローチ

研究開発課題2:船舶を利用した台風介入手段の開発

当該年度実施内容:

- (1) 前年度に試行的に検討したオペレーション評価手法をさらに発展させ、荒天下での台風介入を目的とした帆船の操縦可否を確認する PoC (概念実証) 実験を実施した。実験では、荒れた風と波の中で帆船がどの程度動揺するかといった船舶運動性能の観点から、オペレーションの安全性評価を行い、対象帆船の運動性能を定量的に評価可能なスキームを構築した。また、帆船に水中タービンを搭載して発電機能を付与することにより、運動性能が大幅に向上することを水槽実験および CFD 解析の両面から確認した。これにより、荒天下での安定的なオペレーションには、発電機能の付与が極めて有効であることが示された。

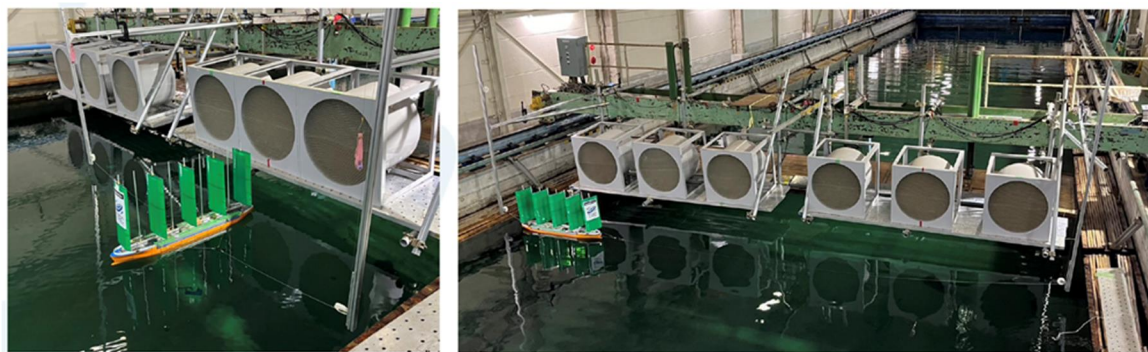


図 1. YNU 大型水槽実験での実験の様子

- (2) 船舶を用いた台風内部への海水散布手法に関し、関連技術のレビューおよび現実的な実装に向けた工学的課題の整理を行った。以下に、具体的な検討事例の一つを示す。気象学的アプローチの研究者との議論を踏まえ設定した想定仕様は、ポンプによって揚程 1,000 [m]、流量 0.11 [m^3/s]の海水を打ち上げるというものであり、これに必要な動力は約 1.1 [MW]と算出された。既存の消防艇や発電所で使用されているポンプ兼用水車の性能を踏まえると、当該仕様を技術的に実現可能であることを確認した。具体的には、ポンプを直列に配置することで揚程を、並列に配置することで流量を増加させることができる。一方で、移動体としての船舶に海水打ち上げ装置を搭載する場合には、装置のサイズ、噴射時の反作用やトルクの吸収といった点が主な技術課題となる。また、散布効果を高めるためには、ノズル形状の最適化や、噴出後の水滴の挙動予測に基づいた設計が必要である。

東京湾口に船舶を展開して摩擦を増加させる手法については、気象学的シミュレーションによって得られた摩擦増加量と台風強度低減量の関係を示す図に基づき、防風ネットの活用を前提とした東京湾口への設置に関するコストを数億円程度であると試算し、技術的難易度や社会実装のあり方について検討を実施した。この結果に、影響評価グループの研究者らが算出した介入量とそのベネフィットの関係図を組み合わせることで、当該介入手法の定量的な評価が可能となる。

(3) 台風を利用した発電機能の実現可能性については、横浜国立大学台風科学技術研究センターが提案する「台風発電船コンセプト」を対象に、図 3 に示すような、台風介入と発電のオペレーションを確認するためのシミュレータを開発した。このシミュレータでは、船舶に搭載する帆面積やタービンの大きさなどの仕様を入力として、過去の台風進路履歴データに基づき、どの程度台風に介入できるか、どれほどの発電が可能かを出力することができる。本シミュレータを用いたケーススタディでは、最大の発電量を得るための台風発電船の仕様について検討を行い、搭載すべき具体的な発電装置の設計指針を得た。

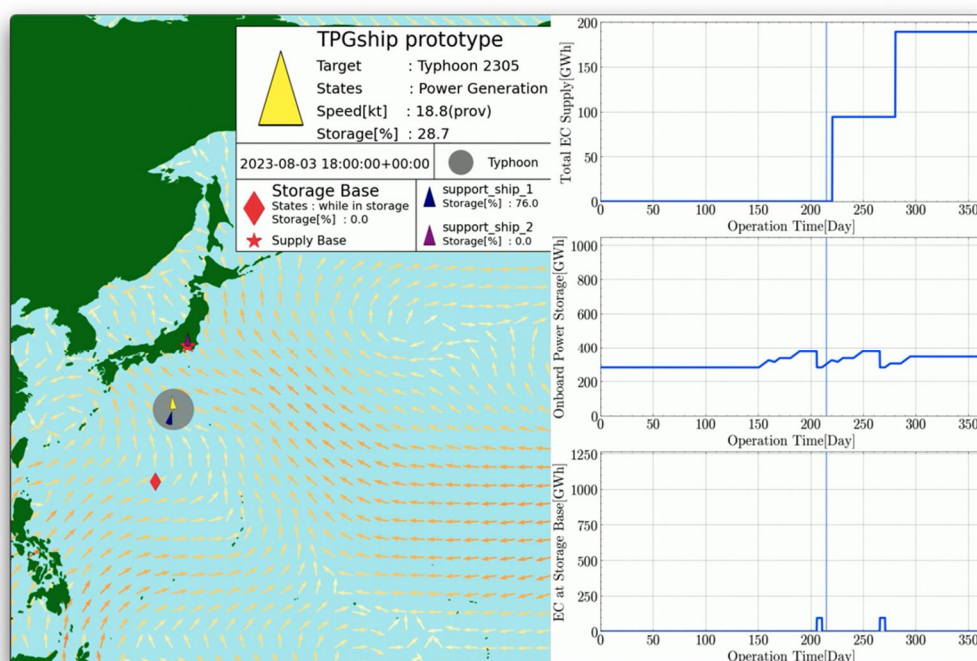


図 2. 船舶による台風介入のオペレーションと発電を確認するシミュレータ

課題推進者: 満行 泰河 (国立大学法人 横浜国立大学)

研究開発課題3: 海洋構造物を利用した台風制御研究

当該年度実施内容①:

本研究で必要となる風車は、台風の強風に対しても効率的に揚力が得られる形状と、強風に耐えられる強度が必要となる。カテゴリ 5 のスーパータイフーン相当の 60m/s の風速に耐えられ、かつ、送風も可能な翼形状および風車構造として、回転翼の外周が筐体で覆われた軸流送風機を採用し、その全圧空気動力、軸動力、反力の見積もりを行った。次項(2)に述べる冷却機構と組み合わせることで台風の風速や中心気圧に影響を与えることができ、その台風制御に必要なエネルギーを算出し、送風機軸動力の合計として 140MW という結果を得た。

当該年度実施内容②:

本研究の発電装置は、従来のものよりも広範囲の回転数で運転することが想定されることから、特に高速回転領域への対応、および、力行運転への対応について、発電

機および増減速機の構造の研究を行った。(1)(2)の結果より 1 隻あたりの必要電力 173.5MW を発電するために、発電回転子回転速度 3000min⁻¹、回転子直径 1200mm、積厚 3500mm、質量 10t の発電機が必要であり、その効率は 99%程度であることが分かった。すなわち、必要なエネルギー量(機械動力)は 1 隻あたり約 175MW となる。

当該年度実施内容③:

超急速充放電可能な Na イオン電池用 Ti 系材料の研究を実施し、実際に Mn 系正極と組み合わせた電池としての評価も行い、1280 mA g⁻¹ という電流密度で急速充電が可能であることを立証した。また、さらなる急速充放電が可能になることが期待できる水系電解質を用いるプロトン電池についての検討も行った。電極作製に用いる高分子バインダーとしてアミド樹脂を利用することで、プロトンの高速イオン輸送特性を引き出せるバイポーラータイプの構造の電池が実現できることを確認した。エネルギー密度はNaイオン電池よりも低いものの、1 分程度の時間でも満充電可能となる基本性能を有している。

課題推進者:藤本 康孝(国立大学法人 横浜国立大学)

研究開発課題4: 台風・豪雨等の極端気象を抑制する海面からの蒸発抑制技術の開発
当該年度実施内容①:

テフロン製のシャーレに超純水を満たし、そのシャーレ内の超純水の蒸発速度評価について、昨年度に確立した精密電子天秤内に設置したシャーレの質量変化測定による蒸発量計測法を用いて界面活性剤による蒸発抑制効果の評価を行った。界面活性剤の蒸発抑制効果は界面活性剤を散布したシャーレと界面活性剤を散布していないシャーレの質量の比較によって評価を行った。以下に示した(1)式を用いて蒸発抑制率を算出した。

$$S [\%] = (E_c - E_s) / E_c \times 100 \quad (1)$$

S: 蒸発抑制率(Suppression ratio) [%]

E_c : 界面活性剤の無い場合の水の蒸発量(control) [g]

E_s : 界面活性剤の有る場合の水の蒸発量(surfactant)[g]

界面活性剤の種類について、昨年度検討を進めたポリオキシエチレン(5)ドコシルエーテル、ヘキサデカノール(セタノール)に加えて、オクタデカノール、ドデシルベンゼンスルホン酸の二種類の界面活性剤について検討した。界面活性剤の密度が約 13 分子/ nm^2 の条件において、ポリオキシエチレン(5)ドコシルエーテルやドデシルベンゼンスルホン酸においては、全く蒸発抑制効果は観察されなかったものの、ヘキサデカノールやオクタデカノールなどの高級アルコールにおいては、観測時間 3600 秒において 30-50%程度の蒸発抑制効果が観察された。

界面活性剤の密度が及ぼす蒸発抑制効果について、昨年度の実験結果に修正を加える必要があることが、後述する(2)表面圧-面積等温線を用いた界面活性剤の水面単分子膜の研究によって明らかになった。ここでは修正後の結果のみを示す。蒸発抑制効果がもっとも大きく観察されたヘキサデカノールについて、密にパッキングされた単分子膜が形成されることが予想される 5 分子/ nm^2 の条件においては、観測時間 3600 秒においてほとんど蒸発抑制効果が観察されなかったもの、10 分子/ nm^2 の条件においては約 20%の蒸発抑制率が、16 分子/ nm^2 の条件においては約 30%の蒸発抑制率と界面活性剤の密度の増加に伴い、蒸発抑制率が増加することが明らかになった。

蒸発抑制効果の水温依存性について検討を行った。水温については一定に制御できる装置を組み込むことができなかったため、観測時間 300 秒の結果を示す。ヘキサデカノール 10 分子/ nm^2 の条件において、5.0~15.0℃の水温では約 30~40%の蒸発抑制率であったが、水温が上昇するにつれて蒸発抑制率が低下し、40℃では蒸発抑制率は約 15%になることがわかった。水温上昇によって蒸発抑制率は低下するものの台風が発生・発達する海域の水温においても界面活性剤の超薄膜による蒸発抑制が明らかになった。

蒸発抑制効果の水質依存性について検討を行った。これまでの実験において用いられてきた超純水に加えて、海水と同濃度の食塩水、人工海水、海水(湘南港・八景島沖)の四種類の水質において同様にヘキサデカノール 8 分子/ nm^2 の蒸発抑制効果を評価したが、食塩水においては、ほとんど超純水と変化が見られないものの、人工海水や海水においては蒸発抑制率が半減し、蒸発抑制率のばらつきも大きくなり、

定量的評価には更なる検討が必要であることがわかった。

これまでの実験において、いずれも観測時間は 3600 秒までの結果であったが、86400 秒(1 日)における長期観測も行った。ヘキサデカノール 10 分子/nm² の条件において、散布直後における約 40% の蒸発抑制率は、3600 秒までの間に約 25-30% に低下するものの、その後も 86400 秒までの間では、約 25~30% の間で推移し続けることがわかった。

以上のように、蒸発速度評価方法を確立し、界面活性剤の種類、密度、水温、水質が及ぼす蒸発抑制率を長時間にわたり明らかにし、当初計画を概ね達成することができた。

当該年度実施内容②:

一分子の界面活性剤が占める面積(分子占有面積) A と表面圧 π の関係のプロット $\pi-A$ 等温線より、界面活性剤溶液の正確な濃度評価が可能となり、界面活性剤の密度が及ぼす蒸発抑制率を修正できた。また、単分子膜が形成されることが予想される 5 分子/nm² 以上の分子密度条件において界面活性剤の超薄膜が形成されていることを確認できた。

当該年度実施内容③:

テフロンシャーレ内の水が飛散することのなく蒸発抑制効果の測定が行える風速の範囲(風速 0.0~7.6 m/s)で蒸発抑制率の検討を行った。その結果、ヘキサデカノール 10 分子/nm² の条件において、風速 5.0 m/s 以下では風速の増加に伴い蒸発抑制率が増加すること明らかになった。それ以上の風速においては蒸発抑制率が減少することが確認された。

課題推進者:生方 俊(国立大学法人 横浜国立大学)

(3) 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:

(1) 統合的風水害被害評価モデル開発

実施内容:過去被害データの整備

強風・高潮高波・洪水ハザードモデルで利用する地形、曝露データ、過去被害データの共通化を関係課題間(加藤課題、芳村課題)で協議した。また、強風・高潮高波・洪水ハザードモデル統合化に向けて、前年度から行っているアウトプット統合に関する協議を継続し、入出力の整備を行った。

(2) 強風被害評価モデル開発、沿岸浸水被害評価モデル開発および社会経済活動影響評価

実施内容:

強風被害評価モデル開発については、ミクロ的被害予測のために個々のエクスポージャ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の構築を推し進めた。具体的には、建築物の特徴として、高さ、屋根ふき材の種類、屋根形状、屋根の向き、外壁の種類、シャッター・雨戸の有無等、周辺の特徴として隣接建築物との離間距離、風上に位置する建築物の密度等をパラメータとして、所与の風速場に対する個々の建築物の個々の部位における被害を計算する手法を構築し、地理空間情報システム上に実装した(図1)。また、上記の手法を用いてマクロ的な被害予測を行うために、集積されたデータを、空間的な指標に基づいて確率的に再分解(disaggregation)する手法を検討し、検討した手法を大阪府下の一部地域に展開した。さらに、飛散物による強風被害の予測に資する研究として、正方形板で近似した屋根瓦の空気力学的特性の評価ならびにモデル化を行い、数値シミュレーションを実施した。その結果、風速が大きくなるに従い飛散物による被害が急増し、将来気候下では風圧による被害を上回る可能性があることを示唆する結果を得た。



図1. 各建築物の部位(図は屋根棟部の屋根ふき材)の被害(再調達価格比)の計算結果

台風強度の変化から高潮、陸地の浸水、そして被害額までの推計を推し進めた。前年度の成果を発展させ、高潮による浸水計算の精度向上のために移流項に非線形項を追加したネスティングスキームの改良を行い、理想化条件および過去の顕著イベントを対象に、水位等の計算精度の確認を行った。ついで、家屋についての直接被害額を推計するためのフレームワークを、東京湾を対象に構築した。家屋被害推計では、東京湾岸の家屋の平均床面積、計算メッシュ毎の家屋数、平米当たりの資産単価、浸水深毎の被害率の基礎的データを収集し、モデルに取り込んだ。以上の検討をもとに、2019 年台風第 19 号 Hagibis を対象に計算を行い、直接被害額の推計を実施した。さらに、仮想的に Hagibis の中心気圧を変化させ、台風強度の変化と高潮偏差、浸水範囲、直接被害額の関係性を求めた。図 2 はその結果であり、30%の中心強度の正負の変化は、約 70%の被害額の増減になることを明らかにした。また、浸水特性に依存する高潮偏差と被害額の非線形な関係を求め、台風強度の増加は被害額の非線形な増加をもたらすことを推計した。

前年度同様に、防災研究者によるディスカッションを行った。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、取りまとめを行った。前年度までの検討を発展させ、自治体の危機管理担当者を対象に防災情報、防災計画、防災教育等のヒアリングを実施した。これにより台風制御によって生じる可能性がある「行政へ影響」に関する実情についての現状把握を行った。

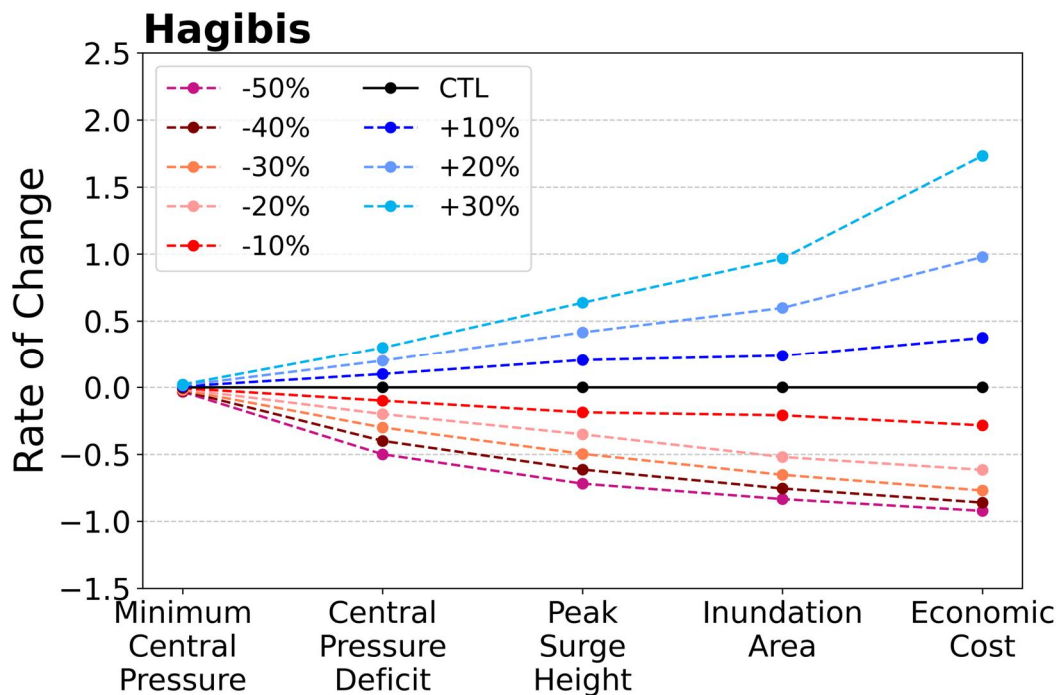


図 2: 台風 Hagibis の中心気圧を仮想的に変化させたときの、高潮偏差、浸水範囲、直接被害額の関係

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

当該年度実施内容:

(1) 台風水災害影響評価モデルの開発

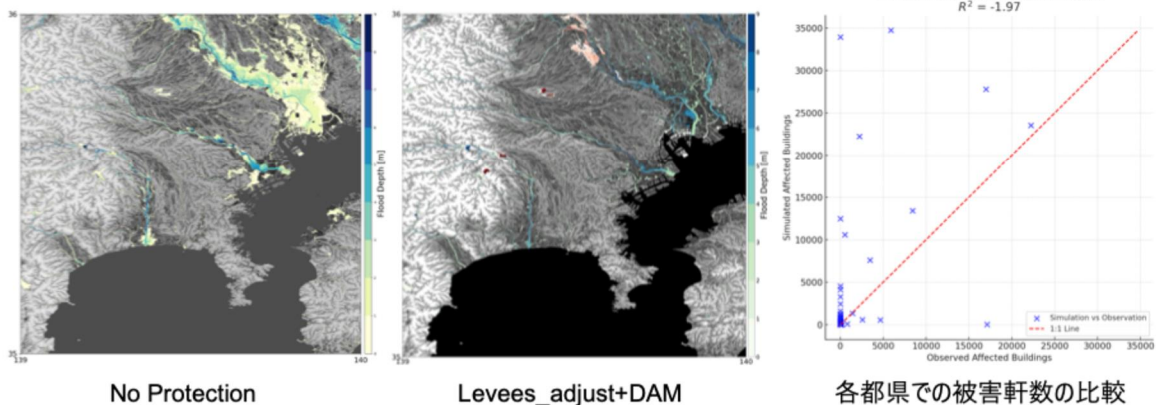
前年度までに開発した TE-Japan の洪水氾濫面積率から浸水地域での被害額の推計を行うアルゴリズムの検証を進め、堤防とダムの有無も考慮できるようモデルを改良した。その結果、堤防なしのシミュレーションでは浸水域が過大だったものが抑えられ、実際の被害軒数との検証結果が大幅に改善した。

(1) 台風水災害影響評価モデルの開発



ILSに堤防・ダムを導入し、その効果を2019年台風Hagibisの再現実験で評価

→ 被害軒数の再現性において大幅な性能向上



TYphoon JIP 2

図1: 台風水災害影響評価モデルの開発

(2) 気象水文被害連成予測システムの開発

気象学的アプローチで行われる人為介入シミュレーション結果として、台風経路アンサンブルデータ(TPES、とある台風について中心を西側東側に計算上ずらした仮想的シミュレーション結果)を、台風水災害影響評価モデルの入力として用い、それぞれの被害額を求めた。その結果、現実に近いコントロール実験よりも、東にずれた経路を取っていたほうが被害額は大きくなることがわかった。

(2) 気象水文被害連成予測システムの開発

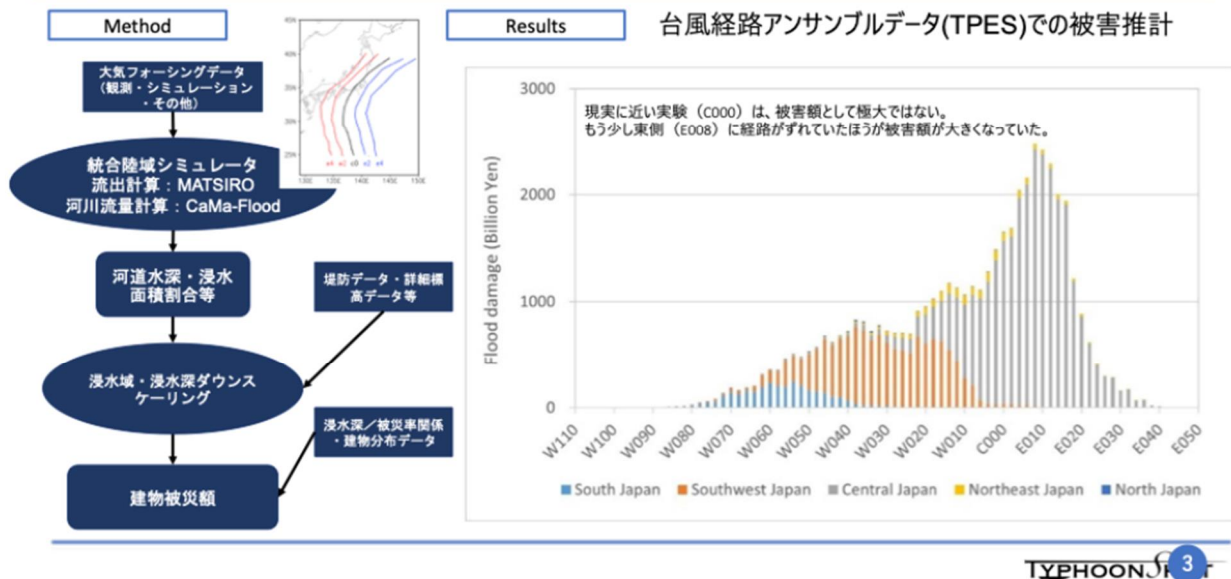


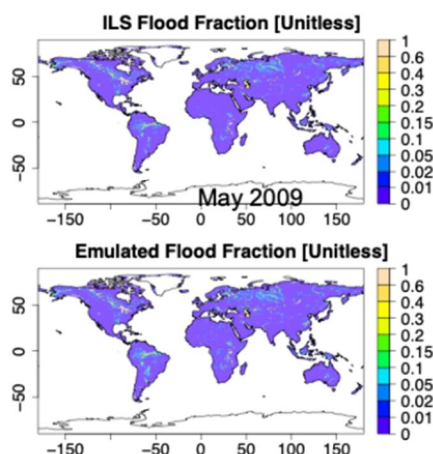
図2: 気象水文被害連成予測システムの開発

(3) 被害最小化をもたらす人為介入の逆推計

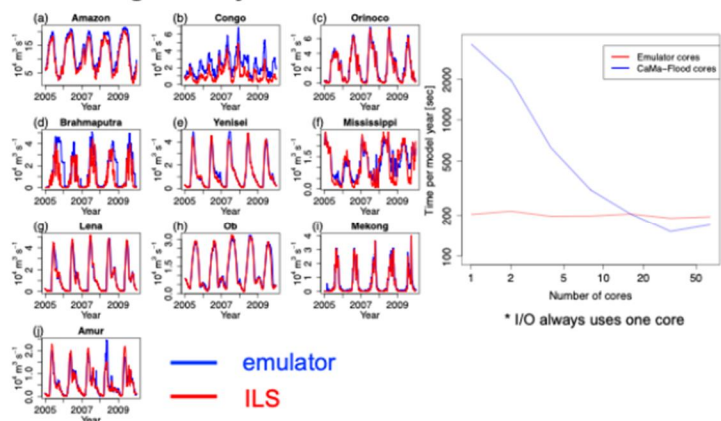
前年度に開発した代理モデルを、統合陸域シミュレータ ILS に結合し、陸面物理過程パートを代理モデルに置き換えたシミュレータを作成し、計算時間の削減量を定量化した。その結果、ILS 全体としてエミュレータを用いることで 30 倍程度の効率化が実現できることがわかった。

(3) 被害最小化をもたらす人為介入の逆推計

● 陸面モデル MATSIRO エミュレータを開発し、ILS (統合陸域シミュレータ) に実装



Discharge for major world rivers



MATSIRO エミュレータにより、計算結果の再現性は保ちながらシステム全体の計算速度が劇的 (30 倍程度) に向上

図3: 被害最小化をもたらす人為介入の逆推計

課題推進者: 芳村圭 (東京大学生産技術研究所)

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:

(1) 風災被害評価に向けた広域リスク評価モデルの構築

まず、最終的な目的である都道府県レベル程度の解像度で風災被害を概算できる広域リスク評価モデルの構築を目指すべく、令和5年度に構築したプロトタイプモデルをブラッシュアップし、さらに推定精度を高めた。

プロトタイプモデルの主要な課題は、台風単位の被害の合計については過去の実績をある程度再現できるものの、都道府県別では依然として誤差が大きいことである。この誤差は、モデルの実用性を高めるために改善が必要である。誤差に影響を与える要因として様々な要素が想定されるが、特に建物の耐風性能の地域差が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

一般的に、建物の耐風性能は、建築基準法がベースとなっていると考えられる。例えば九州や四国の太平洋側など、他の地域と比較して台風による強風に晒されやすい地域は、設計の前提となる基準風速が他の地域よりも大きいため、高い耐風性能を基準に設計されていると考えられる。よって、建物の耐風性能の高い地域は、相対的に被害が出にくいと想定される。

しかしながら、実際はもともとの耐風性能の差の他に、多くの要因が建物の風災害脆弱性に影響を与えている。例えば、以下のような要素が考えられる。屋根の老朽化による耐力低下の影響、工務店による施工状況の違い、建材の品質・特性の違い、建築年代による構造基準の違い、建物の維持管理状況の地域差、保険金支払いに関する地域差など。さらに、保険金支払については、契約者の請求マインドの違いや保険会社の支払方針の違いなども結果に影響する可能性がある。例えば、保険加入率や補償内容、被災後の請求行動、保険会社の査定基準や対応、修理業者の対応能力や価格設定の違いには地域差が存在する。これらの要素が複雑に絡み合い、モデルの精度に影響を与えている可能性がある。

これらの複雑な要素を全て考慮してモデルを構築することは現実的ではなく、都道府県レベルという極めて粗い解像度の評価モデルの構築を目指す観点からも適切ではない。そこで、本研究ではこれらの影響を「地域特性」としてひとまとめとして扱うアプローチを採用することで、被害評価の精度向上を志向した。

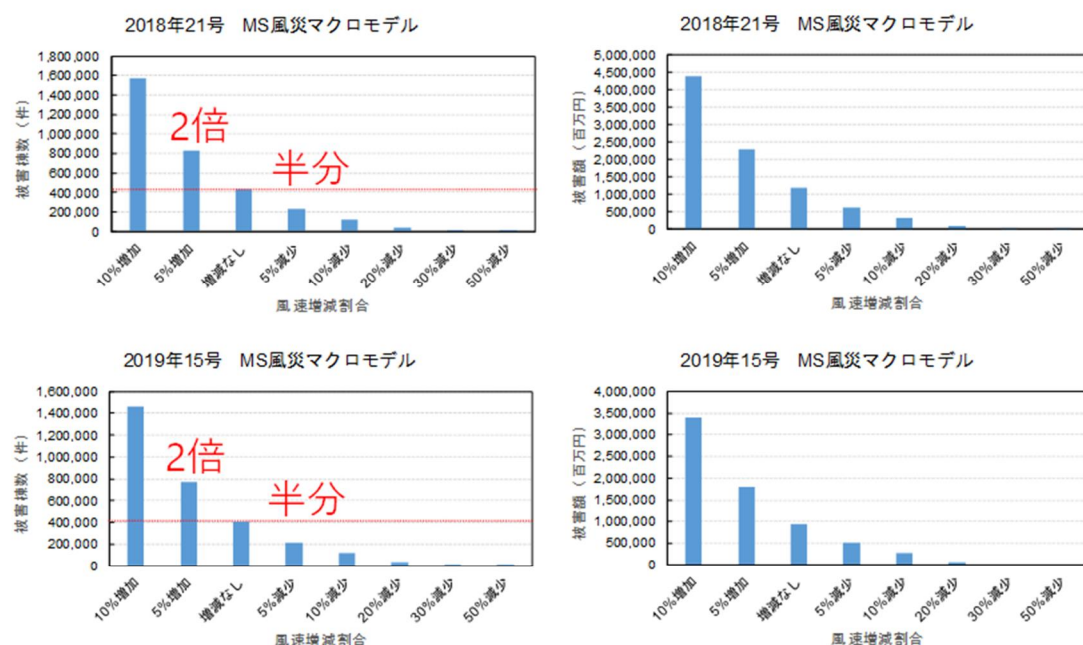


図 1 構築した風災マクロモデルを用いた、台風制御による風速変化が建物被害棟数と被害額に与える影響。上段が2018年台風21号、下段が2019年台風15号を対象とした結果。左が風速増減割合と被害棟数の関係、右が風速増減割合と被害額との関係を示す。

具体的には、「地域係数」を導入することで、地域ごとの特性を反映させるモデル構造とした。この地域係数は、都道府県別のばらつきの影響が強く影響しないよう、関東地方、近畿地方といったある程度広範な行政区界をベースとして試行錯誤により作成した。これにより、モデルの安定性と精度のバランスを取ることができると考えられる。

最終的な目的である、台風制御による風速の変化が建物被害棟数や被害額に与える影響の定量的評価のため、構築した風災マクロモデルを用いて2018年台風第21号(JEBI)および2019年台風第15号(FAXAI)を対象に再現計算を行った。その結果、地域係数の導入により、都道府県レベルでの被害予測精度が向上していることが確認された。その上で、風速を5%、10%増加/減少させたときの建物被害棟数と被害額への影響を確認した。その結果、わずか5%風速を増加/減少させることで、建物被害棟数と被害額が概ね2倍/半分となることを確認した(図1)。検証のため、同様の分析を既往モデル(MS&AD インターリスク総研株式会社開発)により実施した結果、10%の風速の増加/減少によって、建物被害棟数と被害額が概ね2倍/半分になることを確認した。本研究開発プロジェクトで構築したモデルと既往モデルでは、風速変化に対する被害額の感度は異なるものの、5~10%程度の風速の変化によって、建物被害棟数と被害額が大きく増減することを確認した。この結果は、気候変動による地球温暖化によって風速が増大した場合に建物被害棟数や被害額が大幅に増加する一方で、台風制御によってわずかに風速を減少させることで、大きな効果を得られる可能性があることを示唆している。

(2)台風外力が家計・企業・農林水産業に与える影響の分析

発生した場合に社会への甚大な影響が予測される、首都圏大規模水害を対象とする意識調査を実施した。首都圏大規模水害時には浸水想定地域の人口の膨大さと浸水深の大きさ、浸水期間の長さから、非都市部での水害とは次元の異なる避難行動が住民に求められる。首都圏大規模水害時に犠牲者を最小限に抑えるためには、行政界を超えた広域避難を水害発生の可能性が不確実な段階で開始する必要がある。水害発生の可能性が高まってから自宅付近の避難所に避難するという、非都市部での水害避難とは異なる避難行動が必要となることを住民が認識した上で、避難者全体を考慮しつつ的確な行動をとらなければならない。

このような特殊性を有する首都圏大規模水害に対する、現在の住民の意識を確認するため、首都圏大規模水害時に浸水が予測される江東5区(足立区、葛飾区、墨田区、江東区、江戸川区)の住民合計1,000名を対象に、質問紙による調査を行った。リスク認知、効果評価、実行可能性、コスト認知、記述的規範、主観的規範認知、自己に対する規範、水害に対する興味・関心、自己責任認知に関する合計47の質問を作成し、各質問に対する回答者の意識を問うた。さらに、避難意向の詳細や平時の防災行動も確認した。

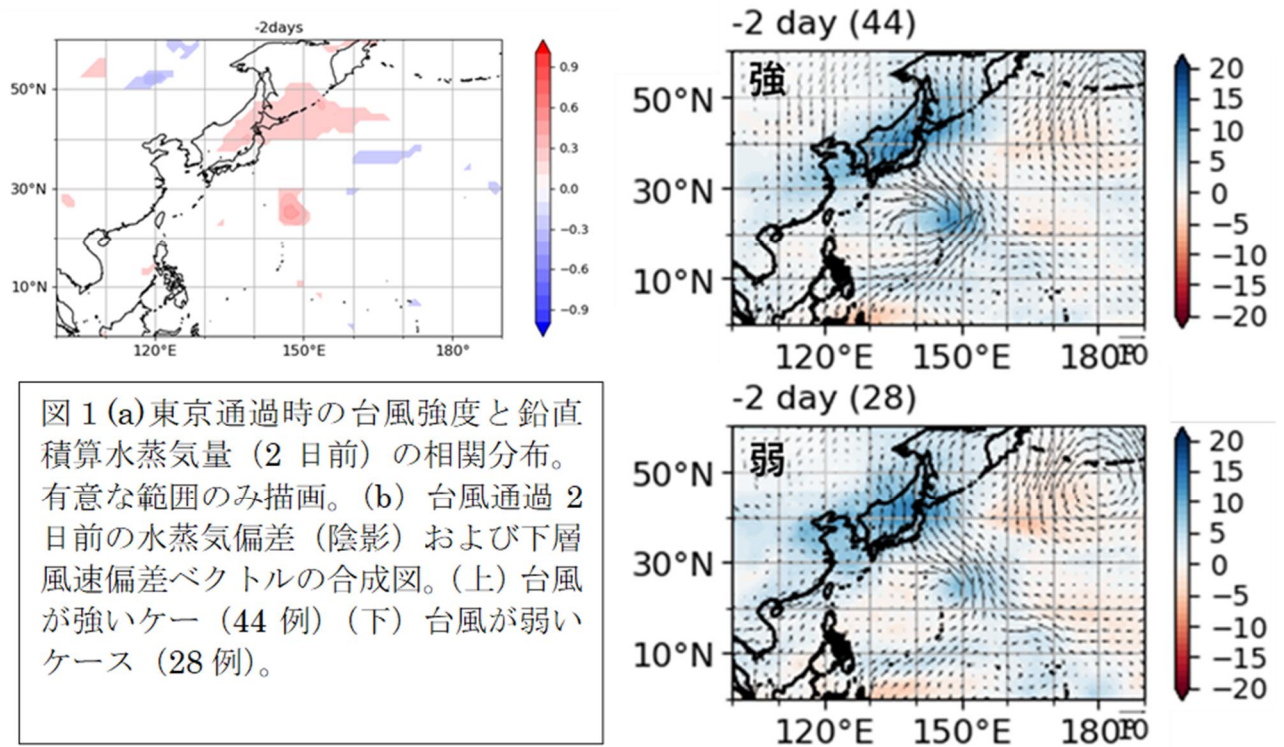
調査結果から、首都圏大規模水害の特殊性を理解し、避難者全体を考慮して的確な避難行動をとることができると考えられる住民は極めて少数であることが確認された。水害防災についての規範はある程度住民に浸透しているが、行動への負担感から実際に行動に移すことができる住民は必ずしも多くはないと考えられる。さらに、非都市部での避難行動を念頭においている住民が多く、水害防災について現在有している知識や規範から、首都圏大規模水害の特殊性を推量できる住民は少ないと考えられる。このような状況から、住民が首都圏大規模水害時に行政が理想とする避難行動をとれる状態に移行するのは極めて困難と考えられることから、台風制御による外力自体の軽減を含む、異なる視点での対策が必要であると考えられる。

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の診断手法の開発
当該年度実施内容:

(1) 数値実験データを用いた台風による影響の定量化

2019 年台風第 15 号(Faxai)を対象とする 1600 メンバーアンサンブル数値実験データ(Yamada et al. 2023)を用いて、シミュレートされた多数の台風の中から経路の類似するものを抽出し、広域環境場(西太平洋域)における熱力学的要素(水蒸気量や降水量)について、台風強度との関係を合成解析およびラグ相関解析により定量化した。



台風の日本付近通過時を基点とする合成解析では、台風の東京通過時の強度との間に遠隔影響を示唆する有意な相関が見られた(図1a)。水蒸気および下層風速偏差場の合成解析から、台風が強い場合(図1b 上)には台風が弱い場合(図1b 下)に比べ、太平洋高気圧の北縁に沿った帯状の水蒸気量が多く、同領域の風速がやや強いことが確認できる。台風強度の違いに連動して周辺の気圧・風速場や台風自身に伴う水蒸気量が変化し、これにより水蒸気輸送量が変わることで遠隔地の水蒸気量が系統的に変化したと解釈される。ただし、その変化量は、最大で基本場の約 10%程度であり、介入により想定しうる台風強度変化に対応する変化量はこの範囲を越えないと推測される。

日本付近での台風強度と日本域の積算降水量の関係について、両者の間に有意な正の相関があることを前年度報告した。この結果の一般性を確認するため、解析対象を拡大し、夏季(6-10 月)多年実験(2009-2019 年)の 64 メンバーアンサンブル数値実験データ(当初計画では 4 年目以降に利用予定だった)を用いて、日本域における、台風活動度と降水量の気候的な関係を定量的に見積もった。その結果、5 か月間

に日本に接近する台風の積算運動エネルギー(台風強度の指標)と台風に伴う直接降水(半径 500 km 以内; 図2a)および間接降水(半径 > 500 km; 図2b,c)積算量との間に高い正の相関が確認された。この気候的關係は、台風の減勢に対する降水量の減少量は台風が活発なほど大きくなることを示唆する。また、直接降水と台風活動度の關係は、海面水温等の外部条件の年々変動に依らず一定であることも分かった。即ち、地球温暖化した環境での台風の活動度変化に伴う降水の推定にも適用可能な指標として利用できる。さらに、台風活動度に対応する大気環境場の変化の解析から、台風が活発な場合には日本の南西で低気圧性の循環が強く、南からの水蒸気流入が大きくなっており(図2d)、これが間接降水の増加に寄与することも分かった。以上の成果は論文として受理された(Yamada et al. 2025)。

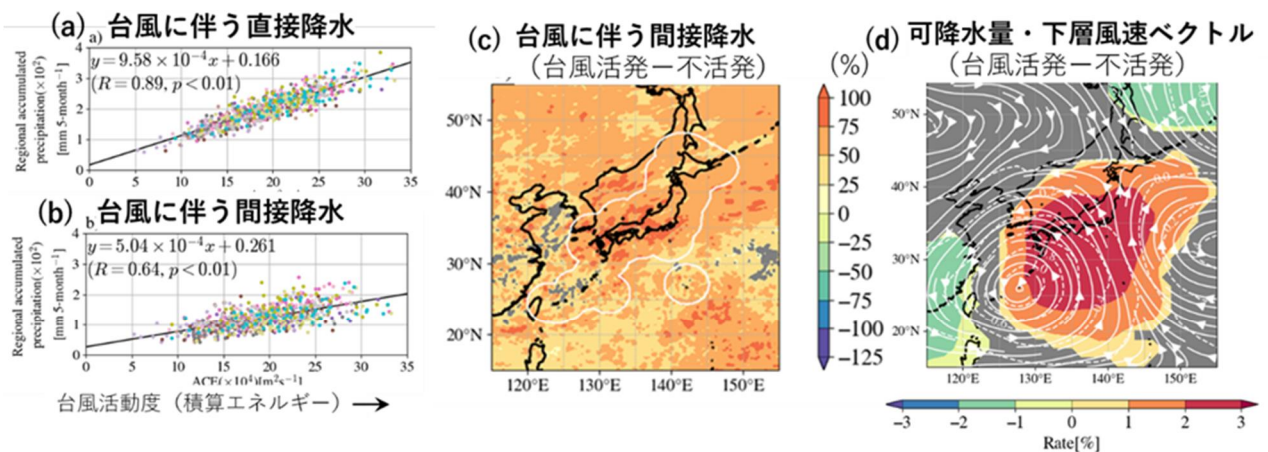


図2 多年実験における日本域の台風活動度(横軸)と台風に伴う積算降水量(縦軸)の散布図。(a) 台風直接降水(b) 台風間接降水。台風が活発なメンバーと不活発なメンバーの差の合成図。(c) 台風間接降水(d) 園直積算水蒸気量(陰影)850h流線関数(等値線)。

(2) インパクト調査実験による検証・推定手法の構築

(1)により得られた知見の因果關係を検証し、台風の減勢による周辺環境場への影響をより定量的に示すため、インパクト調査実験を行った。具体的には、プロジェクトの共通対象である4つの台風事例について、それぞれ現実再現実験(標準実験)を行い、ある時点で標準実験の台風中心付近に介入を想定した操作を施し他は全く同一の条件を与えた実験(介入模擬実験)を行った。操作として水平方向の平滑化を採用し、台風の中心核の構造を弱めた。各台風事例について、15段階(1~15hPa)の介入強度を設定し、介入のタイミングを1日ずつずらして4~8セットの介入実験を行った。標準実験と介入実験の差異や両者のパターン相関により、介入の影響を定量的に見積もることができる。まず、広域の大気力学場(北太平洋全域の500hPa高度場)の評価を行い、何れの台風事例においても、台風の勢力(中心気圧)を1~15hPa弱化した場合の変化量は介入後5~6日の間、極めて小さい(パターン相関係数が0.99以上、平均二乗偏差が10 m以内)ことを確認した(図略)。このことから、人的な介入として想定される範囲の台風強度変化に対しては、どの事例にも共通する有意な広域場への影響はないことが示唆される。ただし、各実験について標準実験からの偏差の空間分

布を確認すると、標準実験において擾乱の存在する地点で偏差が拡大しやすい傾向があった。擾乱の消長は台風事例や介入時期および着目する変数によって異なるため、これらに対する介入のインパクトを定量化するためには、次年度以降、事例ごとに十分な数のアンサンブル実験を行う必要がある。

以上により、当該年度の目標を十分に達成すると共に、次年度以降の目標を先取りして一部達成した。

課題推進者: 那須野 智江 (海洋研究開発機構)

(4) 研究開発項目4:倫理的・法的・社会的課題(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) 風災被害評価に向けた広域リスク評価モデルの構築

令和6年度の中盤には、プロジェクト全体で制御手法の候補を特定し、その実現可能性を検討する活動を実施した。本研究課題においても、①噴水、②ヒートポンプ、③クラウドシーディング、④OTEC、⑤バブルカーテン、⑥船・構造物、⑦界面活性剤、⑧バイブロックのそれぞれについて、(a)社会実装までのシナリオ、(b)活動の適法性(現行法ベース)、(c)想定される懸念事項とステークホルダー、(d)プラス材料(年間を通じての使用、他用途転用の可否、産業振興など)、(e)実現可能性に関する評価(工学・費用を除く)を整理した(図1、2)。

【ELSI】 ①噴水を用いた制御を社会実装するためのロードマップ・懸念事項 笹岡PI				
実装シナリオ	活動の適法性 (現行法ベース)	想定される懸念事項とステークホルダー	プラス材料(年間を通じての使用、他用途転用の可否、産業振興など)	実現可能性に関する評価 (工学・費用を除く)
1-1 着床式噴水を日本沿岸にn基設置する。 (※着床式の限界は水深50-60mと仮定)	・一般海域の占用許可(都道府県条例など)→△ ・法的手当の必要性:長期の占用許可(例、再エネ海域利用法) ・水路通報など	・漁業権(とりわけ共同漁業権)を制限(→正当な補償が必要に) ・他船舶その他の海域利用者の航行を制限 ・景観利益との対立(沿岸自治体) ・環境影響の不確実性 ・着床式施設の設置場所の奪い合い(電力会社など) ・台風の進路や構造に合わせられるか?(適地選択の難しさ)	・噴水による冷却効果(温暖化適応策としての導入可能性) ・観光	①効率性:△ ②法的対応の容易さ:○ ③負の外部影響:漁業・他船舶△、景観△、環境○、生態系? ④産業創出など:○
1-2 浮体式噴水を日本領海内(基線から12海里)にn基設置する。 (※海底に係留+タグボートで移動)	・一般海域の占用許可(都道府県条例など)→△ ・法的手当の必要性:長期の占用許可(例、再エネ海域利用法)	・漁業権(とりわけ共同漁業権)の行使範囲を制限(→正当な補償) ・他船舶その他の海域利用者の航行を制限 ・適地までの機動性? ・景観利益との対立 ・生態系への影響の不確実性	浮体式洋上発電施設とのプラットフォーム共用化	①効率性:○ ②法的対応の容易さ:△ ③負の外部影響:漁業・他船舶△、景観○、環境○、生態系? ④産業創出など:◎
1-3 浮体式噴水を日本EEZ(基線から200海里)にn基設置する。 (※移動方法?)	・根拠法なし ・法的手当の必要性:海域の占用許可(例、再エネ海域利用法)、人工の構造物(国連海洋法条約)に該当するため、安全水域の設定	・大部分は許可漁業(漁業法、排他的経済水域における漁業等に関する主権的権利の行使等に関する法律)→漁業権のような排他的利用権ではなく、補償の問題とはなりにくい ・適地までの機動性?(面が広い分、適地配置が難しい?) ・生態系への影響の不確実性	1-1と同じ	①効率性:△ ②法的対応の容易さ:△ ③負の外部影響:漁業・他船舶○、景観○、環境○、生態系? ④産業創出など:◎
1-4 噴水搭載船舶の場合	②と同様	・生態系への影響の不確実性	発電の可能性?	①効率性:◎

図1 噴水を用いた制御のELSI論点

【ELSI】 ③クラウド・シーディングを用いた制御を社会実装するためのロードマップ・懸念事項 笹岡PI

実装シナリオ	活動の適法性 (現行法ベース)	想定される懸念事項とステークホルダー	プラス材料（年間を通じての使用、他用途転用の可否、産業振興など）	実現可能性に関する評価（工学・費用を除く）
3-1 無人機（無操縦者航空機）で日本EEZ／公海上の台風[巻雲／上層雲（？）／壁雲／暖気核]に[物質・エアロゾル／水蒸気／水][単位]を散布する。	・無操縦者航空機の飛行（航空法87条）→○（ただし、耐空証明必要）※公用の機体であれば不要 ・物質の散布（物体の投下。同89条）→○ ・上空飛行の自由（国連海洋法条約87条）→○（・過冷却水滴による被害？・水素の運搬？）	・物質の環境影響（海洋・大気） →公海上であれば、投下による第三者影響は考えなくてよい？（投下した物質は台風の一部となるため、海上には影響を与えない？ ※物質次第）	・対象となる雲の位置に合わせられる ・観測、輸送 →航空産業、気象関連ビジネス、気候変動ビジネス（大気観測（観測ロケットより安価＋多頻度）） ・災害時の利用	①効率性：◎ ②法的対応の容易さ：◎ ③負の外部影響：第三者◎、環境？（物質次第）、生態系◎ ④産業創出など：○
3-2 無人機（無操縦者航空機）で他国EEZ上の台風の[上層雲（？）／壁雲／暖気核]に[物質][単位]を散布する。	・上空飛行の自由？（国連海洋法条約87条） ・無操縦者航空機の無許可飛行の禁止？（シカゴ条約8条） ※他国EEZ上空にも適用があるかどうかは解釈問題（・過冷却水滴による被害？・水素の運搬？）	3-1と同じ	3-1と同じ	①効率性：◎ ②法的対応の容易さ：△ ③負の外部影響：第三者◎、環境？（物質次第）、生態系◎ ④産業創出など：○
3-3 成層圏プラットフォームHAPS（High Altitude Platform Station）	・法的性質不明（高高度飛行についての許可制度を設ける国もあるが日本では未整備）	？	・通信（基地局）	？
3-4 観測（サブオービタル）ロケット	・法的性質不明（宇宙活動法改正により規制対象？）	・警戒区域の設定（打上げ射場周辺）	・観測、宇宙旅行、人工衛星の打上げ	？

図2 クラウドシーディングを用いた制御の ELSI 観点

並行して、具体的な法整備までの空白段階における自主的なガバナンスを実践するため、(a)研究倫理原則(全7原則)と(b)小規模実証実験実施ガイドラインの素案(全7条)を作成した(図3、4)。このような文書作成活動は、ELSI 横断検討(2025年度からは ELSI 基盤ユニット)と共同で行っている。

1. 筆保PJにおけるELSI研究の進め方：タイムライン

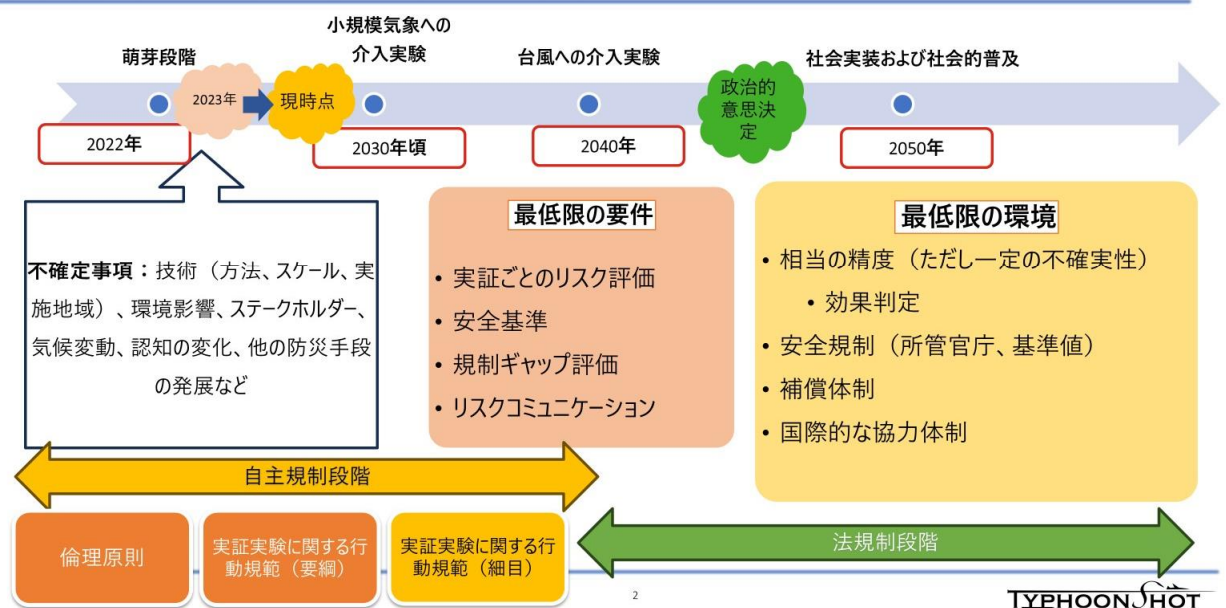


図3 社会実装までのタイムラインと自主規制の必要性

第1条 ガイドライン要綱の目的と適用範囲

このガイドライン要綱は、「気象制御研究に関する原則」（以下「原則」という。）に則り、気象制御に関する「小規模な」屋外実証実験（以下「実験」という。）を行うにあたって、実験に参加する者が遵守すべき事項を定めるものである。〔このガイドライン要綱の規定は、ムーンショット目標8に関係する研究者に適用される。〕

〔論点〕「小規模」を出発点とし、徐々に対象気象を拡大していくか。その場合、「小規模」を定義するかどうか。

羽鳥PIからのコメント：規模として、「介入スケール」「現象スケール」「影響スケール」の軸がある。山口プロジェクトでは、風下に人が住んでいない条件（社会的な影響が殆ど考えられない条件）での実験を「予備実験」あるいは「小規模実験」と想定している。

- ・現象スケール（例、一つの積乱雲）の意味で統一する？
- ・想定される影響範囲で限定することも考えられる（リスクと相関）

図4 実証実験実施ガイドライン素案

令和6年度は、上記の活動に理論的な基礎を与えるための基礎研究も実施した。まず、グループ全体で気候・気象への人為的介入に関わる ELSI 論点を整理し、その成果を公表した(笹岡ほか(2025))。また、Abe et al.(2025)は、極端気象の制御に関わる1940年代以降の歴史を整理し、とりわけ Stormfury 計画(1962-83年)における実証実験基準の変遷やその策定の困難さを明らかにした(同論文は、気象集誌103巻3号のハイライト論文に選出された)。米村(2025)は、台風制御がもたらしうる災害リスクの押付けを出発点として、とりわけ正義論の観点からその倫理的課題を整理分析した。グループ全体では、気象改変や気候工学に関する過去の文書(AGU, Ethical Framework (2024)など)を整理し、倫理原則として採すべき原則の素案作成に活用した。

(2) 社会受容性を確認するための調査

令和5年度以降、本研究課題では、「台風制御」そのものの社会受容性ではなく、台風と社会とのつながりや、人々の極端気象への向き合い方について調査を実施している。令和6年度は、自治体において災害対策に携わる担当者(15県20市の計35自治体)を対象として、気象災害に対する防災意識を調査した(その成果は、すでに報告書としてまとめており、近日中に公表する予定)(図5、6)。

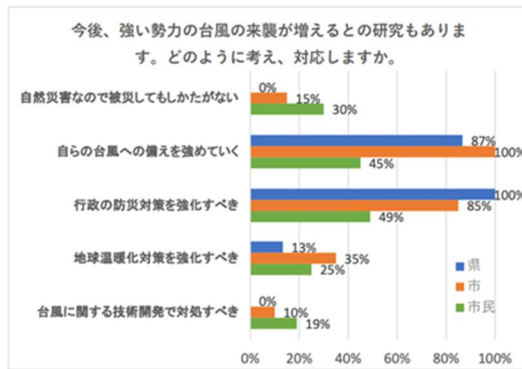


図5 自治体の防災意識

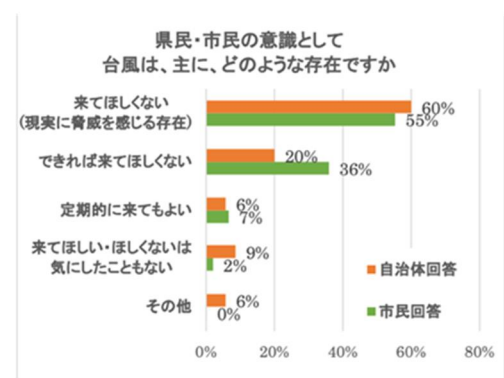


図6 台風に対する県民・市民の意識

課題推進者: 笹岡 愛美 (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

本プロジェクトでは、代表機関である横浜国立大学の総合学術高等研究院(IMS)に、強力かつ機動的なPM支援体制を構築した。中核となる支援メンバーとして、全体管理・外部連携・アウトリーチの各分野に特化したPM補佐4名、研究戦略企画マネージャー1名、事務職員・事務補佐員2名が連携し、研究開発機関間の協働促進と進捗管理を戦略的に支援している。

PM補佐(全体管理担当)は、プロジェクト全体の進捗と成果を統括的に把握し、総合的な渉外窓口としてPM活動を支えている。外部連携担当は、産学官連携による事業化戦略の策定・実行を牽引し、知財権利化にも主体的に取り組んでいる。アウトリーチ担当は、シンポジウムや一般向け広報活動を通じて、社会的理解と共感の醸成を推進し、プロジェクトの社会的インパクトを拡大している。

IMSは、学長が研究院長を兼任するトップダウン型ガバナンスの下、研究戦略企画マネージャーを通じて学内の研究環境整備や他部局との連携を推進している。大学全体を巻き込んだ支援体制を形成し、PMの活動を全方位から支えている。

さらに本年度は、次年度から始動する新研究開発項目「数理研究」の基盤づくりとして、気象学的アプローチ内に数学的視点を導入。新たな人材を採用し、2つの数理課題を設定するなど、研究体制の高度化と拡張を積極的に進めている。

(2) 研究開発プロジェクトの展開

本プロジェクトでは、PMを議長とする「TSMS チーム運営会議」を月例で開催し、全体の意思決定・情報共有・進行調整を着実に進める運営体制である。研究の進捗把握は、定期的な会議と成果報告書によって管理することによって、2件の知財取得を検討し、内1件について特許申請を行った。

随時実施するPMと課題推進者との個別打合せに加え、関係者全体が集う「課題推進者会議」を年2回開催。令和6年度は、5月1日に初回会議を実施し、課題間連携や全体方針を議論。7月24日には中間報告に向けた成果整理を集中的に行い、12月10日には緊急的に第3回を開催し、次年度に向けた戦略を全員で協議した。これにより、迅

速かつ柔軟な意思決定が可能な体制を実現している。

さらに、国際展開においては、毎年開催している IWTRC (International Workshop of TRC) に合わせて、世界的に著名な台風研究者と本プロジェクトの PM・PI・研究者が直接対話する「タイフーンショットワークショップ」を開催。プロジェクトの進捗と課題を国際的視点でレビューし、学術的フィードバックを得る貴重な機会となっている。この取り組みは 2023 年・2024 年と継続し、2025 年度も実施予定である。国内外の知見を融合させるこの仕組みにより、プロジェクトの科学的価値と社会的波及力を着実に高めている。

(3) 研究成果の展開(戦略的展開と方向性の確立)

本プロジェクトは、MS 目標 8 プログラムが掲げる「可能な限りの介入手法を提示し、その中からチャンピオンケースを選定する」という方針のもと、研究チーム全員が一丸となって取り組んだ。その結果、気象学的アプローチから 10 手法、工学的アプローチから 7 手段を抽出し、計 14 の台風介入候補を策定(図 1)した。これらの候補に対して、プロジェクト研究員全員でレーダーチャートおよびノックアウトファクターを活用した多面的評価を実施し、科学的妥当性、技術的実現性、社会的受容性の観点から精緻に分析した。この徹底的な評価を経て、次年度以降の研究開発は「クラウドシーディングによる台風介入」に戦略的にフォーカスするという明確な方向性を打ち出すことができた。本成果は、台風制御研究の次なるフェーズへの橋渡しとなる重要なマイルストーンであり、プロジェクト全体の展開における大きな進展であった。

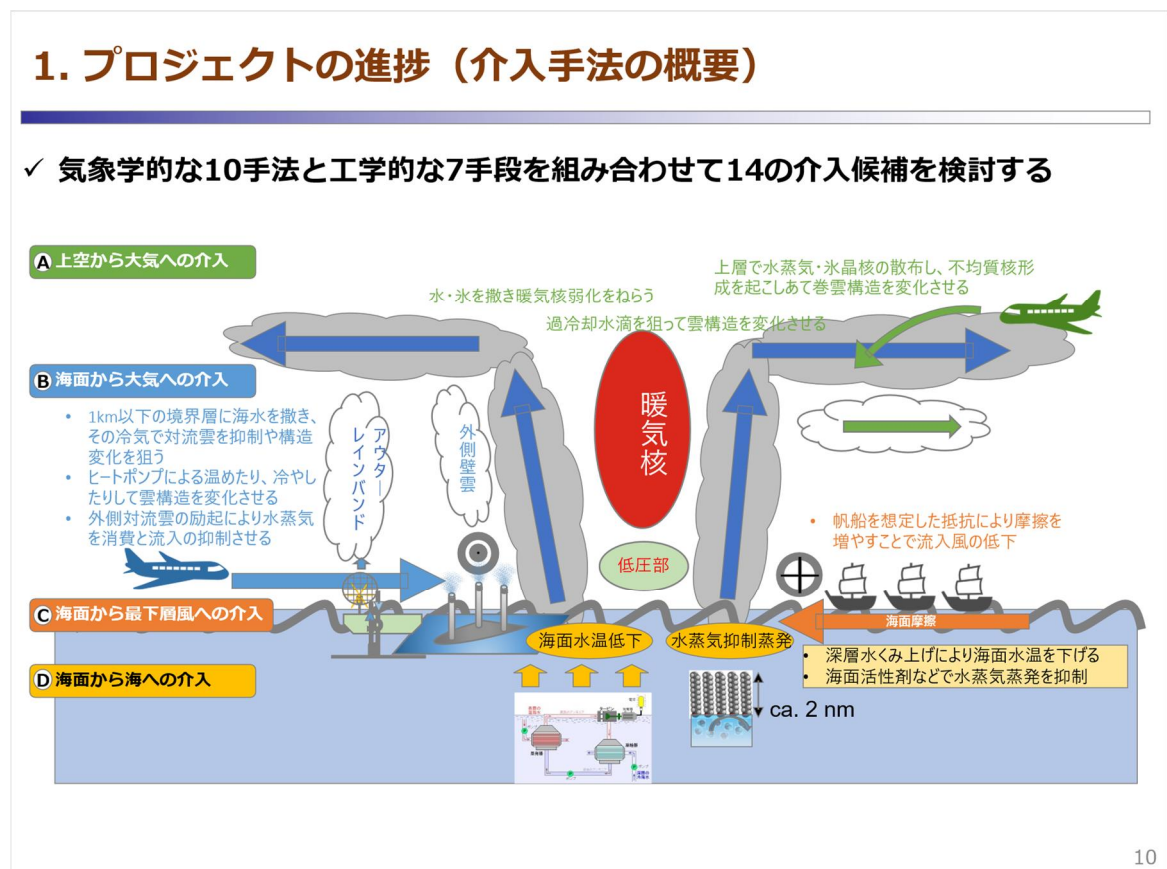


図1 令和 6 年度に検討した介入手法の概要

(4) 広報、アウトリーチ

令和 5 年度における広報活動が引き続き注目を集め、令和 6 年度も TV・新聞などの主要メディアに加え、教育・環境・工学分野をはじめとした多様な専門誌から取材依頼が寄せられた。こうしたメディア露出の機会を通じて、これまでリーチできていなかった層に対しても、プロジェクトの目的と社会的意義を訴求することができた。

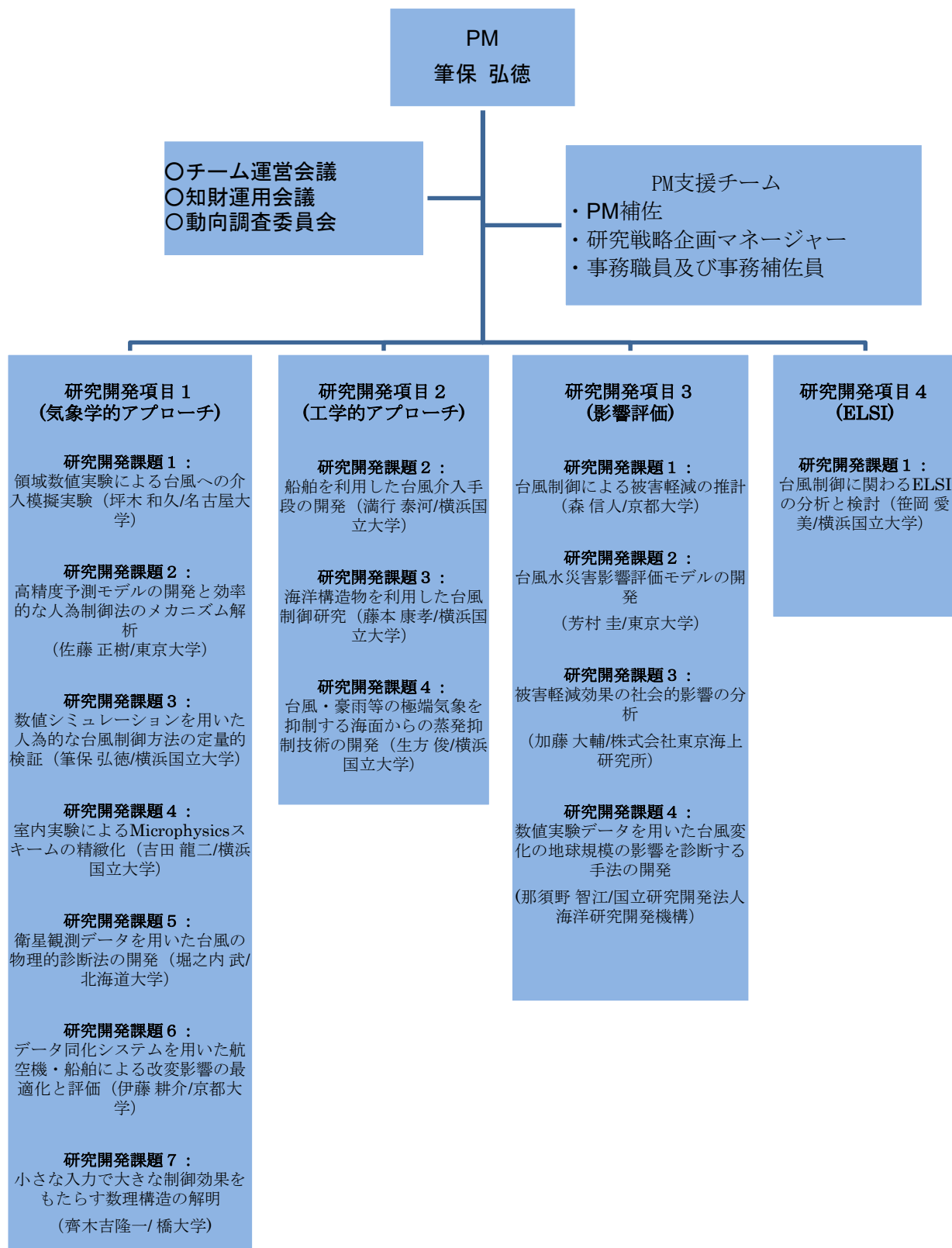
特に「ムーンショット目標」および「タイフーンショット」については、わかりやすい説明を心がけ、子供向けの教育媒体や一般向け雑誌にも特集が掲載されるなど、幅広い年代への周知に繋がった。令和 6 年度における主なイベントとしては、まず「台風専門学校」を計 4 回開催。台風に関する最先端の科学技術をテーマに、一般市民、学生を対象とした講演や体験型プログラムを実施し、参加者から高い関心と評価を得た。講義や展示を通じて、ムーンショット型研究開発の先進性と実用可能性について深い理解を促す機会となった。また、2 回目の実施となる、国際学会「IWTRC (International Workshop of the Typhoon Science and Technology Research Center)」を横浜国立大学にて開催。MS 目標 8 に関する成果発表や研究者間のディスカッションを実施。海外からの参加者に対して、日本における台風制御研究の取り組みと国際連携の重要性を発信した。さらに、気象庁との連携を強化し、連絡会議、共催シンポジウム(ハイブリット型配信イベント)を通じてのアウトリーチ活動を行った。年間を通して計画的かつタイムリーにプレスリリースを発信したことで、社会的関心と認知度が着実に高まった手ごたえを感じた。メディア各社への情報提供を継続的に行った結果、TV、新聞、Web ニュースなど幅広い媒体において本研究に関する報道が掲載され、専門分野にとどまらず一般層にも情報が届く機会が拡大した一年であった。広報資料としては、令和 6 年度版のパンフレット(日英両言語)を制作した。プロジェクトの体制、進捗状況、成果を整理・掲載し、イベント会場や教育機関、研究機関等への配布を通じて広く展開した。

このように、令和 6 年度は、より専門的かつ参加型のイベントを中心に据えたアウトリーチ活動を展開し、国内外の多様なステークホルダーとの対話と連携を深める重要な一年となった。

(5) データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトでは、研究成果の再利用性と透明性を高めるため、データマネジメントの体制強化に注力した。一昨年度には、登録件数がゼロという課題に直面したが、昨年度以降、全研究参加者に対してデータ管理の重要性を周知・啓発し、プロジェクト全体での意識改革を推進した。その結果、今年度までに 101 件がデータベース化された。81 件これは、単なるデータの蓄積にとどまらず、各研究成果をオープンで持続可能な形で社会へ還元する基盤を築いたことになる。この取組は、台風制御という先進的かつ複雑な研究テーマにおいて、研究の透明性と波及効果を最大化する重要な柱となっている。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

【構成機関】

- ・ PM（議長）、PM 補佐所属研究代表機関
- ・ PI 所属機関（個別案件の権利化等に関わる協議の場合は案件に関わる PI の機関のみ議論に参加）
- ・ 必要に応じて、研究代表組織や課題推進者組織の知財部門からの参加を要請する。

【実施内容】

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。さらに上記知的財産支援室の支援のもと、必要に応じて当該合意書の中で、外部機関との秘密保持契約に関する条項を設け、プロジェクト外部の機関との関連も定義し、管理を行う。

チーム運営会議 実施内容

・ 同会議にて本プロジェクトの重要事項の連絡・調整・議論等を行う。チーム運営会議の事務局は高等研究院内に 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。

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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	9	2	11
口頭発表	22	37	59
ポスター発表	4	29	33
合計	35	68	103

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	1	18	19
(うち、査読有)	0	18	18

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	2	0	2
その他	6	0	6
合計	9	0	9

受賞件数		
国内	国際	総数
3	1	4

プレスリリース件数
1

報道件数
15

ワークショップ等、アウトリーチ件数
10