

研究開発項目

1. 気象学的アプローチ

2023年度までの進捗状況

1. 概要

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を開発し、それを利用して有効な台風制御が可能な手法を数値的に提示します。具体的には、シーディング、海面付近の気温を低下させての台風制御方法、海上に障壁や風車において海上風を弱めたり風向を変化させたりする方法等が考えられますが、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定量的に解明します。航空機からのシーディングを想定し、対流雲における雲物理の詳細を調べる室内実験を実施します。また、台風制御の実施にあたっては、災害をもたらす可能性がある事例を事前に予測して選択し、人為的な介入の影響の効果を判定できる程度にまで予測精度を高めます。このため、高解像度モデルによるデータ同化システムに航空機・船舶観測データを同化し、台風の進路・強度・内部構造の高精度な再現と予測の改善を行います。

2. これまでの主な成果

2023年度は、日本に大きな災害をもたらした顕著台風を対象に様々な台風制御方法の効果を数値シミュレーション上で検討しました。また引き続き、台風の高精度予測を実現するための高精度数値予測モデル開発、雲物理実験研究、データ同化システム開発に取り組みました。

2021年台風第14号 Nannadol を対象として、2km 格子間隔の数値モデル CReSS-4ICE-CCN を用い、シーディングの効果を調べる数値シミュレーションを実施しました。シーディングなしケースでは雲凝結核 CCN 数を空間一様に 5×10^7 個/kg、シーディングありケースでは特定の場所で CCN を 3×10^9 個/kg まで増加させました。シーディングを台風の北象限の水平風が強い場所に実施することで、台風の内部コア中の対流活動の非軸対称化を狙いました。シーディング

なしの実験（図1左）で台風中心の東側に大きく広がる降雨域（アウターレインバンド）が、シーディングありの実験（図1右）では縮小しています。今後、シーディングに対して感度が高い場所の特定や、降雨分布が変化した時の台風の強度を調べ、より精緻な台風制御技術開発へつなげます。

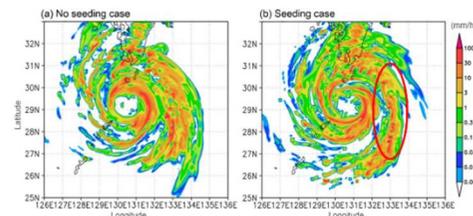


図1：左：シーディングなし、右：シーディングあり実験の地上降水分布。計算開始71時間後。シーディングにより、台風中心の東側における降雨域が大きく減少しています。

2019年台風第19号 Hagibis を対象に、高度1km以下の特定の範囲に、海水くみ上げ蒸発による冷却が及ぼす影響を調べました。最小格子間隔1.4kmの数値モデル stretch-NICAM を利用し、初期値10月10日0時UTCに対し台風経路上の一定の場所に冷却を与えた実験を行いました。図2は、半径50kmの範囲に冷却率10、20 K/hに対する効果を示します。計算開始後24時間の時点で強制の位置は概ね台風の中心に位置します。台風の中心付近に強制の大きさにほぼ比例した気圧変化量が見られます。今後、冷却率1K/hまでの強制の強さ、半径1kmまでの強制の大きさの依存性、強制を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ことで、より効果的な強制の効果を検討します。

台風全域の水平解像度100mのラージ・エディ・シミュレーション(LES)実験において、海面付近に船舶に対応する抵抗力を配置する計算を実現しました。図3では、高解像度計算によって解像可能となる台風境界層の現実的な乱流構造に加え、100m四方の抵抗力の風下後流にウェーク(弱風

域)が生じている様子が再現されています。

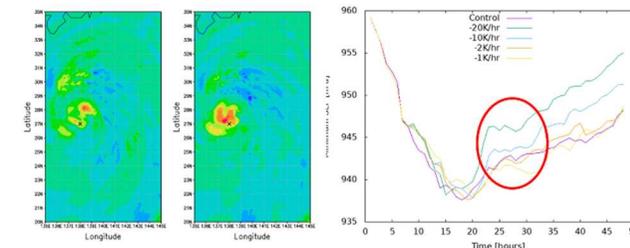


図2：左：冷却率10、20K/hの強制実験の24時間後の海面気圧の変化量。右：コントロール実験、冷却率1、2、10、20K/hの強制を与えた場合の海面中心気圧の時間変化。

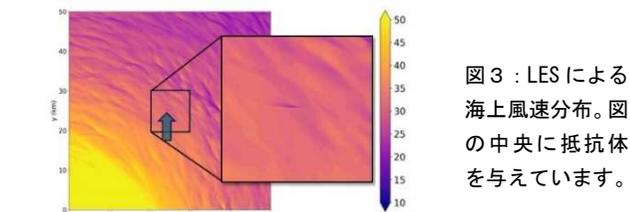


図3：LESによる海上風速分布。図の中央に抵抗力を与えています。

3. 今後の展開

プロジェクト開始3年目には、数値シミュレーション実験により、台風制御のための介入の有効性を様々な角度から調べることで、社会が受容可能な程度に台風被害を軽減する介入手法候補を特定します。理論的・数値的な検討を加え、台風事例を対象とした数値シミュレーションを実施し、外部強制の強度と台風強度へのインパクトとの関係を系統的に調査します。人為的に介入が可能な強制力に対して、有意な台風強度の変化(最大風で5m/s程度)を得るための手法を検討します。数値予報モデルにおける台風予測精度向上の課題を明らかにし、数値予報モデルの開発改良を進めます。台風の強度変化をもたらす台風内部構造の変化メカニズム、壁雲交換、レインバンド等のメカニズム解明を進めます。小さい外力で大きな効果を生むような数理的な研究を進めます。

研究開発項目

2. 工学的アプローチ

2023年度までの進捗状況

1. 概要

気象学的アプローチによって、気象モデルを活用した台風制御のための効果的な台風介入方法が研究されています。しかしながら、想定している台風介入方法が現実的に可能かどうかを判断するためには、具体的な介入装置に関する検討を同時に実施する必要があります。また、影響評価チームによって台風制御によって削減できる被害額を算定可能であるが、実際に制御するかどうかを判断するためには、台風への介入を実施するための費用を算定する必要があります。

工学的アプローチは、上記の課題に取り組むための研究を実施しています。2023年度は主に船舶・海洋構造物を利用した台風への介入方法についての検討を行いました。

2. これまでの主な成果

現在、気象学的アプローチによる台風制御研究によって、大型の帆を持つ船舶を大規模展開する方法が台風への介入方法候補のひとつとして挙げられています。この介入手法の実現可能性を評価するために、横浜国立大学の大型実験水槽にて、台風介入を想定した大型帆船の縮尺模型を用いて現状の設備で台風環境下を可能な限り再現した環境下で帆船のオペレーションが実施可能かどうかの水槽試験を実施しました(図1)。結果として、想定している大型帆船はある程度安定的にオペレーションできることの見込みが立ちました。

また、過去の台風の発生場所と進路履歴をもとに、大型の帆船を想定してどの程度台風介入できそうかを見積りしました。台風の風から大型の硬翼帆によって得られた推進力によって帆船を動かし、水中のタービンを回転させて

発電・蓄電を行う台風発電船の簡易的な数値モデルを作成し、過去の台風の進路履歴に対してどの程度台風介入に従えるか、どの程度発電可能かについて定量的な評価を行いました。また、図2のように台風介入デバイスとして的大型帆船の総合的なコスト評価を実施しました。



図1. 大型実験水槽での水槽試験の様子

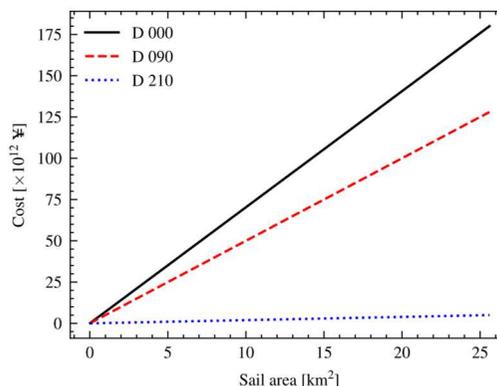


図2. 帆の展開面積と必要コストの関係図
(凡例のDの数値は、年間で発電を実施する日数)

より発展的な台風への介入デバイス検討の一例として、面的に配置された風車による風量・温度制御により、台風の勢力と進路により効率的に影響を与えることのできる制御方式の開発を行うとともに、必要となる風車の容量、数、設置位置、冷却能力について検討を行うこと、さらに、台風の状態に基づいて風車制御を行う場合に必要となる状態変数の種類とその推定方法の研究を実施しました。図3に台風介入デバイスとして具現化したヒートポンプ船発電ユニットの構成例を示します。この構成例に対してヒートポンプ熱サイクルシミュレーションを実施し、冷却/加熱量に対する必要なエネルギーの試算を行いました。

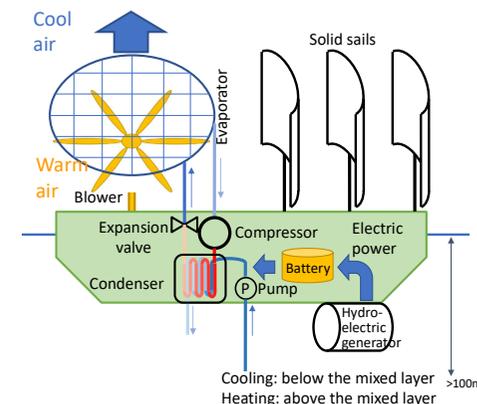


図3. ヒートポンプ船発電ユニットの構成例

3. 今後の展開

2023年度に検討した手法を実現するための研究を実施するとともに、他に気象学的アプローチで提案されている様々な介入手法の検討を実施します。特に、2024年度は新たに化学的な介入手法として、界面活性剤などの利用による海面からの蒸発抑制技術の開発を実施する予定です。

研究開発項目

3. 台風制御の影響評価

2023年度までの進捗状況

1. 概要

台風制御によって生じる影響には、気候的影響と被害軽減の影響があります。台風制御の社会的および経済的な受容性を評価するためには、両社の影響を軽量化する必要があります。

影響評価では、台風制御を行うことによる環境場・社会へのサイドエフェクトが微小であることを示す必要があります。影響評価グループでは、これら気候環境場と台風に関連する風水害である強風、内水氾濫、外水（河川）氾濫、沿岸浸水についての被害を総合的に評価可能な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します。また、台風制御が中長期的な社会経済活動へ与える影響の分析も実施します。

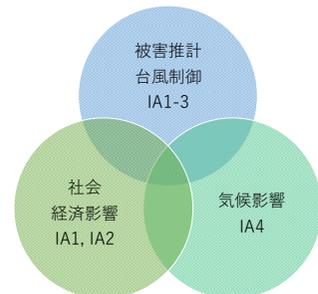


図1：影響評価グループの構成

2. これまでの主な成果

気候学的影响については、プロジェクト共通対象事例である2019年第15号を対象に、全球非静力学モデルの大アンサンブル数値実験データを用いて、台風の強度と環境場の関係についての評価を行いました。介入等により台風の強度を弱めた場合、降水量や強い降水イベントの出現確率が減り、その影響は台風が強いほど大きいことが示唆されました。

被害推計について、風災、高潮災害、河川水災の被害推計モデルの開発とその台風制御効果への簡易影響評価を行いました。また風水害3要素それぞれを統合する統合的風水害被害評価モデル開発について、各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しました。

風災について、都道府県レベルの広域リスク評価モデルを開発しました。ついで、都道府県レベル程度の解像度で台風制御による風速の減少が被害額に与える効果を分析した。図2はその一例であり、5%風速を増加/減少させることで、建物罹災棟数と被害額が概ね2倍/半分となることを確認しました。詳細風災評価については、大都市圏の一部において航空機による空撮を行い、建物特徴を推定し、被害推定のために都市のデジタル化するアルゴリズムを開発しました。

高潮災害について、高潮の大規模浸水による被害額を推計可能とするため、津波浸水計算モデルの高度化を行いました。ついで、家屋の直接被害額を推計するためのフレームワークを大阪を対象に構築し、2018年台風21号Jebiを対象に再現計算を行い、直接被害額推計の精度の検証を実施しました。

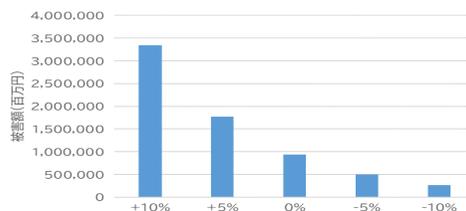


図2：風災マクロモデルを用いた、台風制御による被害額に与える影響（2019年第15号）

河川水災について、水災害影響評価モデルの開発を進め、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を開発し、その検証を進めました。ついで、気象

水文被害連成予測システムの開発を進め、特定の台風に対して人為介入を行った場合の洪水浸水面積推計を実施しました。図3はその一例であり、降水量が50%減少させると浸水面積がほぼゼロになることを推計しました。

台風制御が中長期的な社会経済活動へ与える影響の分析定性的評価について、台風外力が家計・企業・農林水産業に与える影響の分析に取り組み、台風制御に対する国民の受容性を高めるために必要な情報を得るため、大規模な社会調査によって過去の顕著台風がもたらした不安定と困難度を調査しました。さらに、災害対応機関、研究者によるミーティングにより、台風制御による即時対応について論点を整理しました。

3. 今後の展開

全球大気モデルを用いて台風制御による気候的影響を進めるとともに、被害推計のための各種風水害の高度化・広域化と統合化を進めます。気象制御グループの成果をもとに台風制御効果の被害額への影響を計量します。

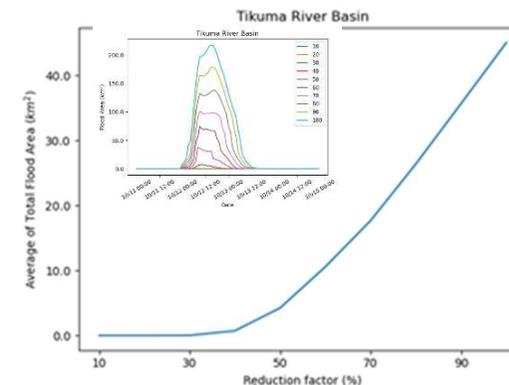


図3：台風制御による浸水面積に与える影響（2019年第19号）

研究開発項目

4. 台風制御に関わる ELSI の分析と検討

2023年度までの進捗状況

1. 概要

台風制御技術には、実際の台風の勢力を弱めることで、防災、減災等の社会的に意義のある結果をもたらすことが期待されます（これを「社会実装」といいます）。伊勢湾台風を契機に制定された災害対策基本法（昭和 36 年法 223 号）にも、台風に対する人為的調節の防災分野での活用可能性が明記されています（8 条 2 項 9 号）。

その一方で、台風制御を含む気象変化技術の多くは、これによって利益を享受する者（受益者）以外の第三者に負の影響（損失）をもたらす可能性があります。たとえば、雨量を調節することで河川 A の氾濫を防ぐことができたとしても、別の地域 B に雨が降り、結果として土砂災害が発生することが予測されるとき、台風制御技術を発動することは、倫理的に許されるのでしょうか。また、制御を行おうとした結果、予測を超えて第三者に負の影響が生じた場合（つまり、「制御」に失敗した場合）、この損失は誰がどのように負担すべきなのでしょう。

本研究開発グループは、台風制御技術の社会実装がもたらす倫理的 (Ethical)・法的 (Legal)・社会的 (Social) な諸影響 (Implications) につき、人文・社会科学系研究者を中心に多角的な観点から分析しています。また、目標 8 およびコア研究全体のハブとして各グループ間の情報共有、用語法などの統一、課題の共有等の役割も担っています。

2. これまでの主な成果

2023 年度は、新規科学技術の社会実装に関わる ELSI 研究の進め方を明確にした上で（図 1）、すでに明らかな論点（環境正義・環境倫理に関わる課題および法制度面の課題）に関する調査分析を深めるほか、仮想の社会実装シナリオに基づき、ケーススタディを進めました。

社会実装シナリオを通して、オペレーション段階における論点（制御を決定し発動する機関、制御の要件、実施

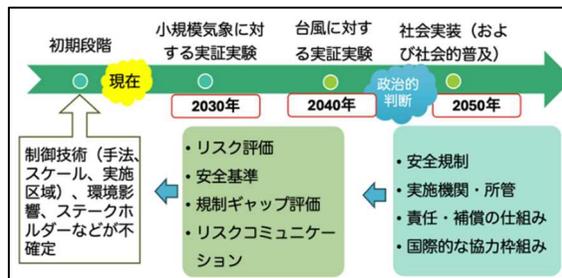


図 1 社会実装までのプロセスと ELSI 研究の進め方

基準、費用負担者、オペレーションの体制、効果についての評価体制、有事の場合）と、オペレーション後の補償に関する論点を整理しました。たとえば、制御の要件に関しては、被害が予想される金額を発動基準とすべきなのか（この基準によれば、経済損失の多寡によって、制御の利益を享受することができるかどうかが変わってきます）、制度設計において制御技術の不確実性に基づくリスクをどこまで許容すべきなのか、制御失敗には (a) 減災効果が得られないケースと (b) 受益者ではない第三者に被害が生ずるケースとが考えられ、それぞれについて責任や補償制度をどのように構築すべきなのか、といった点が検討の対象となっています。

【仮想のシナリオ】

- ・ 2050年10月、気象庁は、太平洋上にある熱帯低気圧が24時間以内に台風が発達すると予想
- ・ 【基礎自治体／都道府県／国／国際機関／政府間組織】は、【台風の勢力を弱めるため／台風の進路を変更するため】、特定の制御技術の発動を決定

技術的前提	・ 人為的介入により減災効果を得られる（やつてみたらできた）効果判定ができる（制御による結果であると判断できる） ・ 社会実装の段階でも一定の不確実性は残る（ゼロリスクではない）
費用的前提	・ 負担可能な費用に収まっている ・ 便益が費用を上回る ・ 便益がリスクを上回る

図 2 仮想の社会実装シナリオ

2023 年度は、屋外での実証実験の実施に向けた基準作りに関する検討を開始しました。1960 年代のハリケーン制御実験 (Project Stormfury) における実施基準（図 3）、地球温暖化を抑制するための人為的介入である気候工学（ジオエンジニアリング）の実施に関する各種文書、気象変化（人工降雨や人工降雪）に関する国内法制や各種ガイドラインなどを参考に、屋外実験の実施のためのルールにおいて整備すべき項目を列挙することを進めています。



図 3 ハリケーン制御実験に関する実施基準案の変遷

3. 今後の展開

2030 年の屋外実験の実施に向けて、引き続き、実施基準案作りに向けた検討を進めます。さらに、2050 年段階の社会実装の姿をデザインし、関連産業を含めたエコシステムの確立に向けた調査研究を実施する予定です。現時点では、台風を制御するための構造物（船舶や航空機）の製造・建造コストは莫大なものとなっています。しかし、洋上発電などの需要の創出によって量産化体制が整備され、規模の経済によるコストダウンを実現することができれば、産業の創出と防災という二つの社会的な便益が発生します。そのために必要な制度等について研究することを実施します。