

研究開発項目

A-1. 「制御可能性」を導く新しい気象データの構築・解析と制御手法設計

2023年度までの進捗状況

1. 概要

背景: 台風のような極端気象は大きなエネルギーを持つ複雑な現象です。目標8では十分小さな力で安全に、極端気象の未来を大きく動かす新しい理論の開拓が望まれます。

目的: **人工的な小さな外力で台風をはじめとする極端気象の未来を大きく変えるために有用な秩序だった気象現象を発見し、それを利用する気象制御理論を打ち立てます。**

手法: 最新鋭のシミュレーション技術と衛星観測を統合し、過去の大量の台風の3次元的な構造を再現するデータセットを作成します。そのデータを気象学的な現象理解による手法(プロセス駆動型アプローチ)、およびそのような気象学的知識を必要としない機械学習手法(データ駆動型アプローチ)を組み合わせで解析(図1)します。

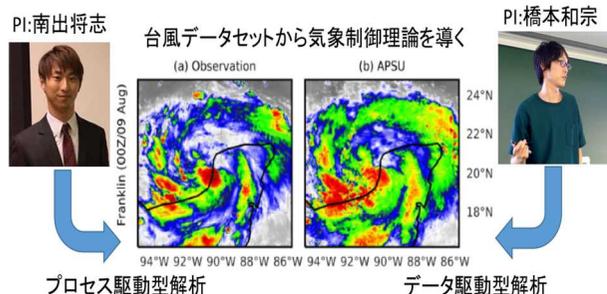


図1. 研究開発テーマの全体像

2. これまでの主な成果

- ① 台風のデータセットの作成に必要な技術基盤を整備し、当面解析に必要なだけのデータの作成を完了しました。
- ② [プロセス駆動型アプローチ] 台風内部の積乱雲をもたらす**小さな水蒸気の空間的揺らぎが、台風全体の強度発達をもたらしているという新しい秩序を発見**しました(図2)。この現象を有効活用した具体的な制御介入手法の提案を進めています。

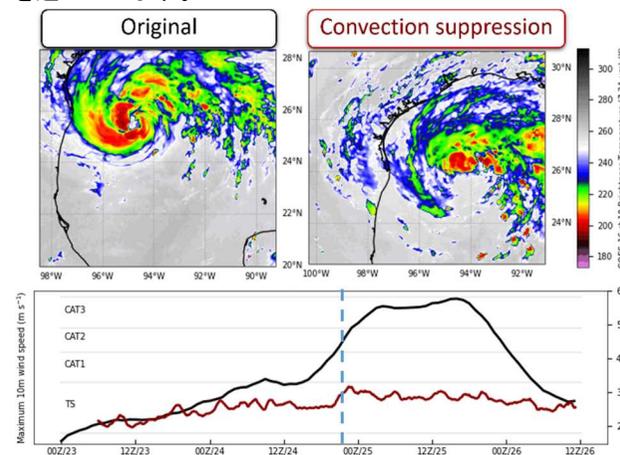


図2. (左上) 台風のシミュレーション、(右上) 左上と同様だが、台風中心付近の積乱雲をもたらす水蒸気が特定の場所に集中しないようにシミュレーション中で仮想的に分散させた結果、(下) 台風最大風速の時間変化。青い点線での時刻でのシミュレーション結果が上の2つの図に示されています。黒線が左上の、茶線が右上のシミュレーション結果を表します。水蒸気を分散させ、狭い範囲における水蒸気の集中を避けるだけで、本来大型台風に発達するはずのものが、小さい規模に抑えられることが分かります。

- ③ [データ駆動型アプローチ] 前年度から開発を続けてい

る**データ駆動型アプローチ**(図3)をより気象に近い**大規模かつ複雑な設定に適用**し、その有効性と限界を解析しています。

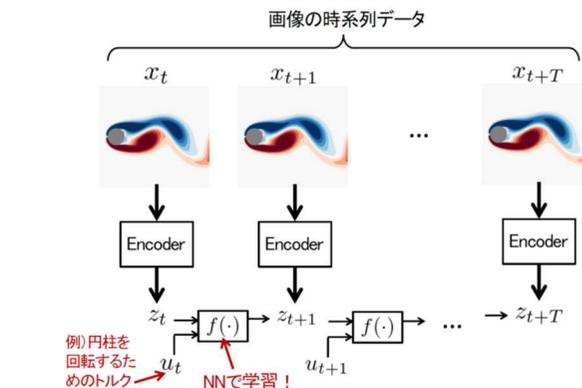


図3. 本研究で開発中のデータ駆動型アプローチを円柱周りの流れに用いる例。NNとはニューラルネットワークのこと。限られた観測データと制御外力の情報から現象の本質となる部分をモデリングし、効率的な制御に結びつけます。

3. 今後の展開

2023年度は、小さなスケールの水蒸気の揺らぎが台風全体の強度発達をもたらしていることを解明し、台風制御に有用な秩序だった気象現象を発見することができました。しかしながら、このような秩序を実際に活用して制御を行うためにはまだ超えなければならないハードルは多いです。今後はデータ駆動型のアプローチを有効活用し、具体的に大気へ介入する装置を想定したシミュレーション実験を進めていくことで、科学的知見を台風制御につなげていきます。

研究開発項目

A-2. 制御のための不確実性定量化

2023年度までの進捗状況

1. 概要

背景: 気象制御研究は制御介入手法の安全性が厳格に確認されるまでは、コンピュータシミュレーションを使った評価を行うことが大前提です。しかし、気象シミュレーションには多くの不確実性が存在しており、計算結果をそのまま信頼することは難しいのが現状です。

目的: 気象シミュレーションのあらゆる不確実性の原因を列挙し、観測を用いてその不確実性を最小化するとともに、なお残る不確実性を正確に評価してシミュレーションによる制御介入効果の正確な見積もりを実現します。

手法: 異なる設定の大量のシミュレーションと観測データを、機械学習を用いて解析しモデル開発者にもとらえられていなかったシミュレーションの不確実性を定量化します(データ駆動型アプローチ)。一方で、高性能な人工衛星観測とシミュレーション結果を丁寧に突き合わせることで、不確実性が生じるメカニズムを明らかにし、気象学的知見を得ます(プロセス駆動型アプローチ)。(図1)

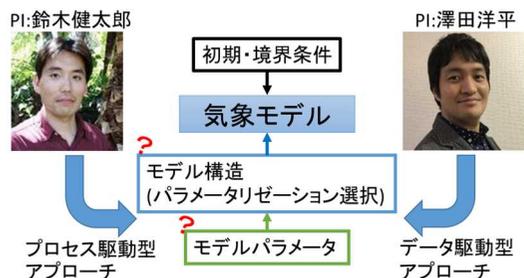


図1. 研究開発テーマの全体像。気象モデルのモデル構造やモデルパラメータの選択の恣意性から生まれる不確実性の定量化に挑みます。

2. これまでの主な成果

- ① [データ駆動型アプローチ] 全球大気モデルにおいて過去に例のない 9216 個もの時空間分布するパラメータの推定に成功し、**開発した不確実性定量化手法が気象シミュレーションにおいても有効であることを確認**することができました。この手法を用いて、**豪雨や台風の予測性能改善やその正確な不確実性定量化を実現**しています(図2)。加えてこのような正確な不確実性情報を用いた水害対策手法に関する研究も積極的に推進しています。
- ② [プロセス駆動型アプローチ] 本研究開発テーマ及び他の研究開発テーマと連携し、様々な**大規模アンサンブル実験データを解析**しています(図3)。特に主要な不確実性要因であるとされる降水過程に着目し、データ駆動型のアプローチで生じた不確実性を解釈する研究を進めています。

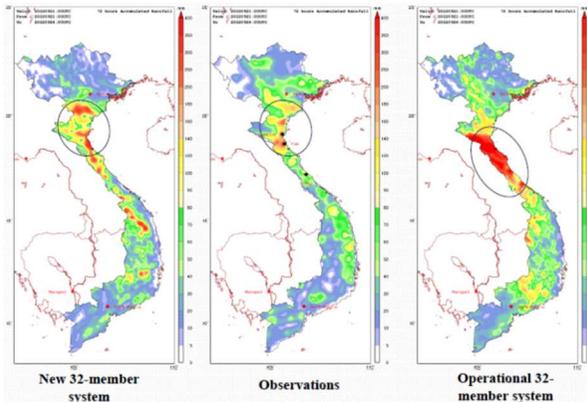


図2. ベトナムにおける豪雨事例のシミュレーション。(左) 私たちの不確実性定量化手法で作ったモデル選択の不確実性を考慮したアンサンブル予測、(中) 降水観測、(右) ベトナム水文気象庁が出している現業天気予報。丸で示したところに着目すると私たちの新手法では観測された豪雨をより適切に再現できていることが分かります。

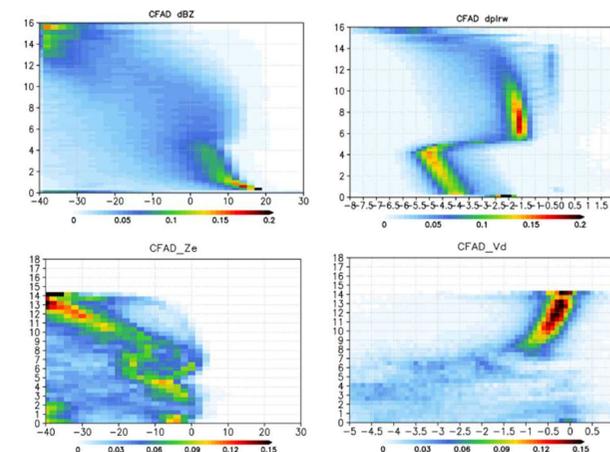


図3. (左上) 本研究開発テーマで行ったシミュレーションにおけるレーダ反射強度、横軸に反射強度、(右上) 同様だがドップラー速度、(下) 上と同じものを現場観測で描いたもの。横軸が物理量の値を表し、縦軸が高度になっていて頻度分布が示されています。このような比較をしてみると一見降水量などが正確に出ているシミュレーション結果でもその細かな表現には誤差があることが分かってきます。

3. 今後の展開

データ駆動型アプローチによる不確実性定量化のアルゴリズム開発はすでに終了し、実際の大规模気象シミュレーションへも適用が可能であると 2023 年度に示すことができました。今後はこの新手法を気象予測・気象制御に適用する応用研究を続けていき、気象シミュレーションに内在するあらゆる不確実性を発見・定量化・最小化することを目指します。加えて、そのような気象シミュレーションの不確実性、ひいては制御効果の不確実性をプロセス駆動型アプローチで解析し気象学的に理解することで「説明可能な気象制御」を目指していきます。

研究開発項目

A-3. 海上における湿潤対流の変化技術の開拓

2023年度までの進捗状況

1. 概要

背景：激しい気象に対して適切に介入を行い、その脅威を抑制しようとするとき、どのような介入手法を用いればよいかは、当然極めて重要な課題です。台風のような海上において発達する現象は海上で介入を行うことが望ましいです。今は存在しない新しい介入手法を理論研究との連携で創り出していく必要があります。

目的：理論研究に基づいて、台風を始めとする極端気象の未来を大きく変えるために、**現実の大気に対して適用可能な介入手法**を開発します。

手法：海上の台風において大量に発生している個別の積乱雲に注目します。この積乱雲やそれをもたらす湿潤対流に多角的にアプローチすることで積乱雲を抑制することを目指します(図1)。海上での実施が可能な手法を模索します。

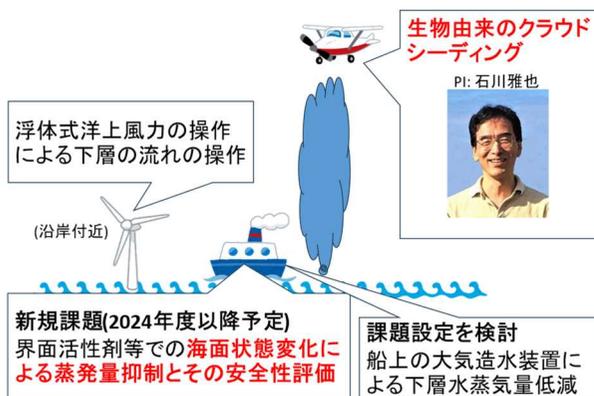


図1. 研究開発項目の全体像。海上の積乱雲を生じる気象への介入に多角的なアプローチで挑みます。

2. これまでの主な成果

① 2024年1月に本研究開発項目は発足しました。他の研究開発項目との連携によって、図1に示すように**海上の個別の積乱雲をもたらす気象システムに対し、大気上端と下端からそれぞれアプローチする戦略を策定**しました。

②大気上端からのアプローチを実現するため、**植物・菌類等由来の氷核活性物質の探索**をしています。これを航空機等を利用して散布することで積乱雲をもたらす気象を制御することを目指します。類似のアプローチに比べて、**環境への悪影響が小さく、なおかつ効果の高いものを設計**することを目指します。図2はブルーベリーの枝内の氷核活性をまとめたものです。自然の環境では氷が形成されにくいような高温(-1.6℃)でもブルーベリー枝内では氷が形成できることがわかります。2023年度はレンギョウ枝などに含まれている氷核活性物質の解析、雪の下から分離した菌類などの解析を進めました。

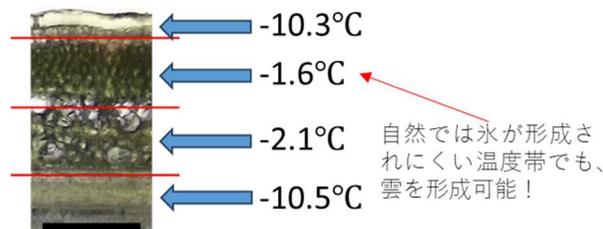


図2. ブルーベリーの枝内の氷核活性。場所によってどのくらいの温度で凍るかが異なり、それぞれの層でおおよそ何℃で凍るかを示しています。気象制御の観点からは高い温度で凍ることが望ましいです。そのような高温でも凍る物質を探索することが重要です。

3. 今後の展開

2023年度は本研究開発項目の研究期間は3か月程度でしたが、積乱雲の上端からアプローチする手法について研究活動の立ち上げと初期的な成果を得ることができました。今後も効率よく雲・氷を大気中で作ることができる新規物質の開拓を進めていきます。

また図1に示した通り、次年度以降さらに多様な介入手法の研究が展開される予定です。特に他研究開発項目における理論研究から、大気下端の大気の湿度に介入するアプローチは有望であると考えられているため、本研究開発項目において介入手法の開発を精力的に行っていく予定です。

研究開発項目

B-1. 水害の複合ハザードの統合的確率予測

2023年度までの進捗状況

1. 概要

背景: 気象制御の有効性を測るためには、台風の強度がどれだけ弱くなったかといった気象学的な量の変化を見るだけでは不十分であり、気象災害の社会へのインパクトそのものが気象制御によってどのように変化したかを推定する”Impact-based forecasting”を行うことが不可欠です。Impact-based forecastingでは洪水氾濫などの水害の危険度(ハザード)を直接見積もることが重要です。

目的: 私たちの住む陸域で起こる**洪水・高潮といった水害ハザードを、その不確実性を見積もりも含めて精緻に、リアルタイムに推定する技術開発**を行います。

手法 (図1): ① 洪水・浸水ハザードに関しては、全球陸域水動態モデルにダムや堤防といった洪水防護設備を精緻に組み込むことで、特にこれらの設備が効果を発揮する中小規模の洪水イベントの推定性能の向上を目指します。
② 沿岸災害のハザード推定に関しては、統計的確率台風モデルや機械学習による流体計算の置き換えなどの技術を駆使して、高潮・高波計算とその不確実性を超高速に行う開発を行います。

PI: 山崎大

PI: 田島芳満

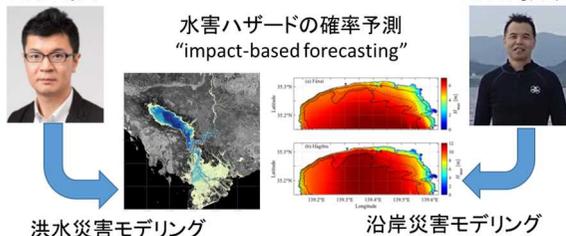


図1. 研究開発テーマの全体像

2. これまでの主な成果

- ① 洪水災害モデリングに関しては、**河川区間ごとの堤防高さを自動推定**する手法(図2)を開発しました。堤防・ダムの効果を考慮できる全球河川モデルを用いて、**人工物の効果を考慮した広域洪水計算が可能**になりました。
- ② 沿岸災害モデリングに関しては、流体計算をニューラルネットワークによる機械学習の一手法である Long-Short Term Memory (LSTM)で置き換えた**高速高潮推定手法を開発**しました。またこれと確率台風モデルを組み合わせることで**実際の台風事例において高潮の確率予測に成功**しました(図3)。

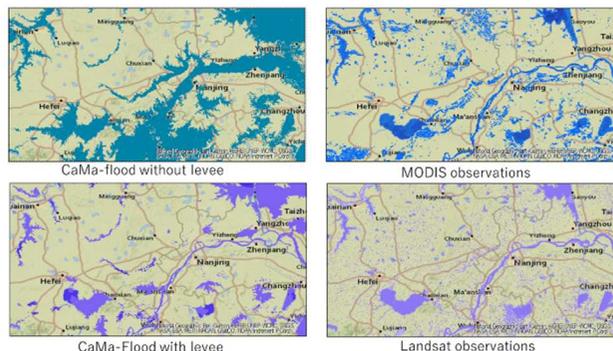


図2. 長江における100年に1回の洪水マップ。(左上)堤防の影響を考慮しない洪水計算、(左下)堤防の影響を考慮した洪水計算、(右上&右下)二つの異なる衛星観測に基づいた浸水マップ。堤防の高さをアルゴリズムによって自動抽出し、その上で堤防の効果を適切に考慮した洪水計算を行うことで洪水氾濫の再現性が高まっていることが見て取れます。

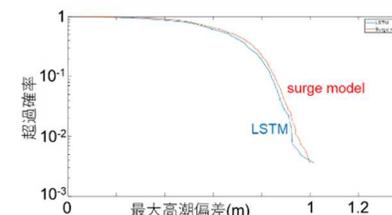
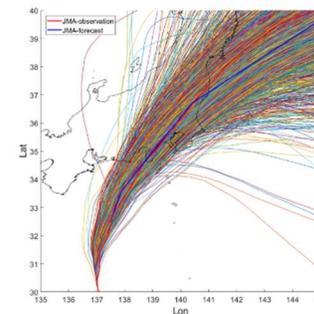


図3. (上)2019年台風19号において、気象庁の1つの予測を確率台風モデルで1000個の予測に増幅させました。(下)通常のモデル(赤)とLSTM(青)による高潮予測結果の比較。LSTMを用いれば流体計算とほぼ同じ結果を、たとえ予測が1000個あっても一瞬で得ることができます。

3. 今後の展開

洪水災害モデリングについては人工物の影響を考慮することで中小規模の洪水から大洪水までを正確に計算できるようになりました。沿岸災害モデリングについても高潮を極めて高速に計算できるようになりました。これらの要素技術をフルに活用し、不確実性を含めた災害予測および気象制御がもたらす社会へのインパクト推定を進めていきます。

研究開発項目

B-2. 社会インパクトの予測・制御と気象制御の社会的意識決定

2023年度までの進捗状況

1. 概要

背景：気象制御の有効性を測るためには、台風の強度がどれだけ弱くなったかといった気象学的な量の変化を見るだけでは不十分であり、気象災害の社会へのインパクトそのもの気象制御によってどのように変化したかを推定する”Impact-based forecasting”を行うことが不可欠です。気象災害の社会インパクトは迫りくる気象災害に関する情報を個人がどのように受け止め、地域社会において人々がどのように行動するかによって大きく変わりますが、このような社会現象としての災害を予測することは現状極めて困難です。また、人間社会への深い理解に基づいて、気象制御技術を社会に根付かせるためにはどのような過程を経る必要があるかを理解する必要もあります。

目的：①様々な**気象予測情報が個人にどのように解釈されているかを理解**します。②**防災関連情報が社会全体にどのように伝達され、人々の行動につながっているかを理解・予測**し、適切な行動変容を導くための方策を探ります。

③**気象制御の倫理的・法的・社会的課題(ELSI)を整理**し、技術導入是非の社会的意識決定に必要な論点を抽出します。**手法(図1)**：①防災情報に関する個人の認知を調べるための心理実験を実施します。②多様な社会統計の解析により、気象予報の性能と社会全体の減災行動の間に関係があることを実証します。また実証結果に基づいて社会全体の減災行動の数理モデル構築を行います。③市民対話ワークショップを通じて気象制御のELSI論点を抽出します。

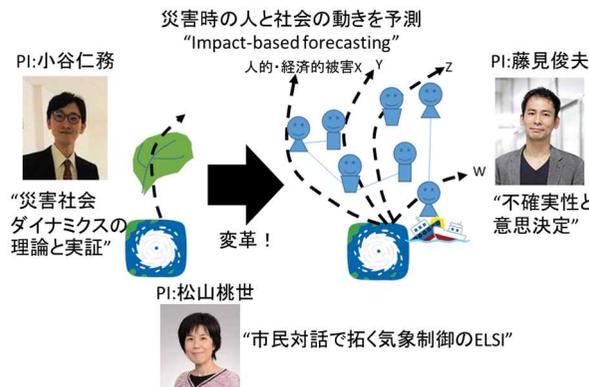


図1. 研究開発項目の全体像。ある一つだけの気象予測に基づいて、自然現象としての災害を予測する状態から脱却し、様々な気象シナリオを確率的に予測すると同時に、そこに住む人々の行動を予測の視野に入れて社会現象としての災害を予測できるようになることを目指します。

2. これまでの主な成果

- ① 心理実験を実施するための**Virtual Reality環境を構築し精緻化を進めています**(図2)。すでにこのVRを一般の方に体験してもらい、基礎的な調査を進めています。今後本格的な調査・実験を通じて減災行動につながる人間の情報処理の在り方を調べていきます。
- ②空振りの予報が続いて災害予報を信じなくなる**「オオカミ少年効果」が災害の現場においてどれほど存在するかの定量化**に理論・実証両面から取り組んでいます。
- ③ **市民対話ワークショップ**を高知県・和歌山県・鹿児島県で行い(図3)、気象制御に係るELSI論点の抽出を進めました。**既存の調査では必ずしも明瞭でなかった気象制御に関する論点の抽出**を行うことができました。



図2. 心理実験で使用するVR動画の一例。このような素材を被験者に見せることを通じて災害時の個人の意思決定プロセスの理解に迫ります。



図3. 市民対話ワークショップの様子です。

3. 今後の展開

今後は他の研究開発項目とも連携し、気象災害予測に反応する人と社会を深く理解することで、気象災害予測情報の価値を最大化して人々の行動変容を促す方策を導きます。その先に気象制御技術の価値を最大化するための社会制度の在り方をデザインするような新しい研究テーマを見出します。気象制御技術を健全な形で社会実装するための議論をリードしていきます。