

研究開発テーマ名

# 「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

## 2022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。

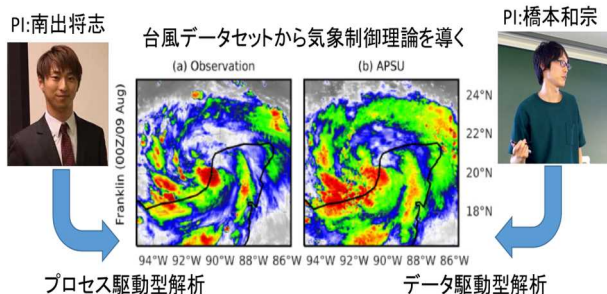


図1. 研究開発テーマの全体像

### 2. 2022年度までの成果

- 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、作成を開始しました。
- ② [プロセス駆動型アプローチ] 初期的なデータセットの解析と気象シミュレーションを組み合わせることで、**効果的なタイミングと場所で台風から水蒸気を奪うことで、効率的に台風の発達を抑えることができる可能性**を示唆する結果を得ました(図2)。

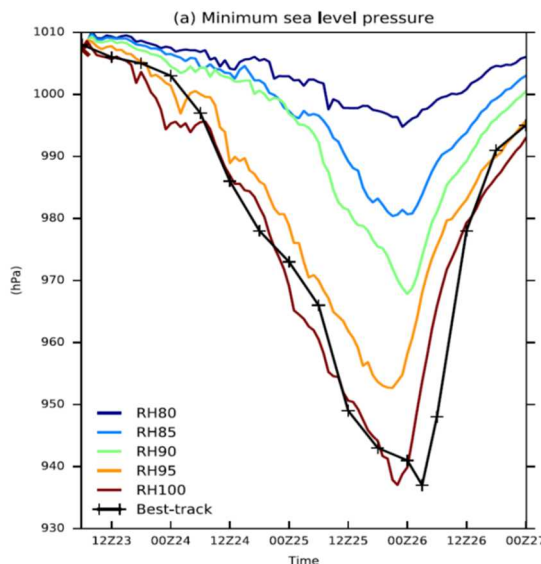


図2. 台風の中心気圧の時間変化。黒が実況。茶色が本研究のシミュレーション予測。オレンジ、黄緑、青、紫は仮想的に台風周辺から水蒸気をそれぞれ5%、10%、15%、20%奪った結果。水蒸気を奪うと台風の強度が低下しているのがわかります。

- ③ [データ駆動型アプローチ] 複雑で大規模な流体現象である気象現象から**制御に役立つ秩序だった現象を自動的に抽出する**ためのデータ駆動型アプローチを開発しました(図3)。簡単な流体問題に適用し妥当性を確認しました。

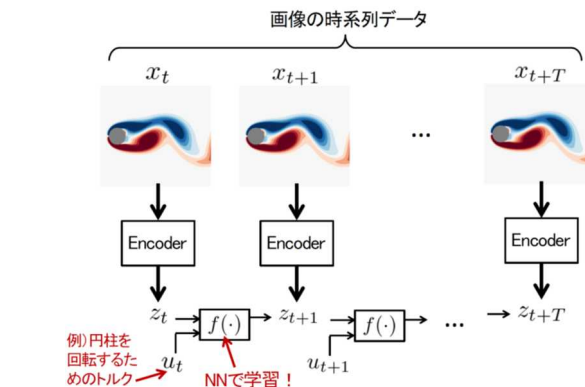


図3. 本研究で開発中のデータ駆動型アプローチを円柱周りの流れに用いる例。NNとはニューラルネットワークのこと。限られた観測データと制御外力の情報から現象の本質となる部分をモデリングし、効率的な制御に結びつけます。

### 3. 今後の展開

プロジェクトの初年度となる2022年度においては、台風データセットの作成とそのプロセス駆動型アプローチによる解析で小さな力で台風を弱体化させるための手がかりを得ることができました。しかしながら現状では必要となる人工的な外力の大きさはまだまだ十分小さくありません。今後はもう一つの解析アプローチであるデータ駆動型アプローチと組み合わせ、考えられる限り最も効率的で安全な気象制御手法を探求していきます。

加えて、実際に大気へ介入する装置・手法の探求も進めていきます。理論研究に支えられた介入手法開発を進めるためのエンジンとして本研究開発テーマを位置付けます。

研究開発テーマ名

# 制御のための不確実性定量化

## 2022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)

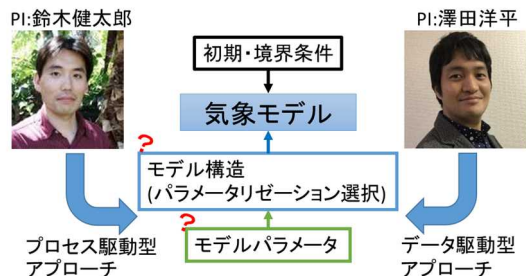


図1. 研究開発テーマの全体像。気象モデルのモデル構造やモデルパラメータの選択の恣意性から生まれる不確実性の定量化に挑みます。

### 2. 2022年度までの成果

- ① [データ駆動型アプローチ] 従前では極めて大きな計算量が必要で実現が難しかったシミュレーションの不確実性定量化を可能にする新しいアルゴリズムを開発しました。この手法の一部を実際の気象モデルに適用しました。2022年のスーパー台風 Nammadori において静止気象衛星を使って台風予測モデルのパラメータ最適化をすると同時に、静止気象衛星の情報のみでは台風の発達シミュレーションに大きな不確実性が残ることを示しました(図2)。
- ② [プロセス駆動型アプローチ] 衛星観測と気象シミュレーションを丁寧に比べて気象シミュレーションにおいて降水が生じる過程の再現性がどのような要因に左右されるかを解析しました(図3)。2023年度以降、データ駆動型アプローチによる不確実性解析の結果を気象学的な観点から解釈・説明するための技術基盤を整備しました。

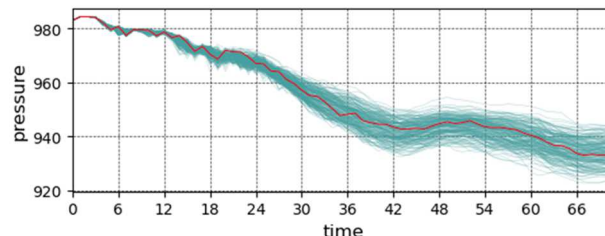
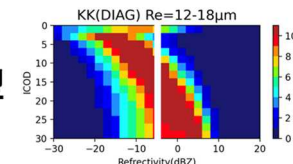
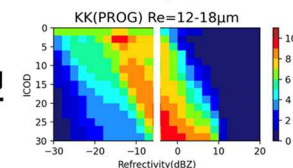


図2. 台風 Nammadori の中心気圧予測。赤が正解値で青が静止気象衛星ひまわりの観測データを用いて気象モデルのパラメータを最適化した結果。観測を説明できる同様に確からしいパラメータの組は多くあるため、そのようなパラメータの組をサンプリングして大量にシミュレーションしています。全く同じ初期値から始めているにも関わらず、中心気圧予測は大きくばらついており、ひまわりの観測だけでは十分に不確実性を減らせていません。

### 降水診断型



### 降水予報型



### 衛星観測

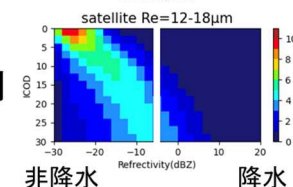


図3. 横軸に反射強度、縦軸に高度をとった2次元ヒストグラム。二つの異なる物理スキームの結果と衛星観測を比較している。図は全球気候モデル MIROC によるものだが、今後よりスケールの小さい台風予測モデル等の解析に挑む。

### 3. 今後の展開

プロジェクトの初年度にあたる 2022 年度において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、簡易なモデルでの検証は済んでいます。しかしながら実際の超大規模気象シミュレーションに適用するためには様々な工夫が必要です。今後も開発を続け、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「説明可能性のある気象制御」を目指していきます。

研究開発テーマ名

# 水害の複合ハザードの統合的確率予測

## 2022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

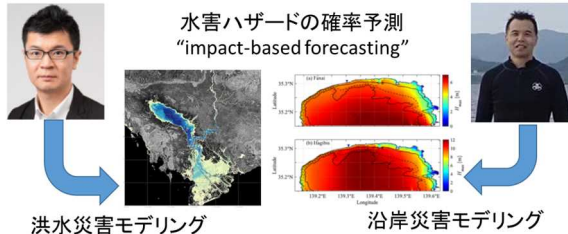


図1. 研究開発テーマの全体像です。

### 2. 2022年度までの成果

- ① 洪水ハザード計算に関しては、**ダム操作スキームおよび堤防防護スキームを全球陸域水動態モデルに組み込むことに成功**しました。このモデルを動かすには今後正確な堤防配置等のデータの整備・取得が必要ですが、米国での計算結果の解析からモデルの挙動が正しいことが確認できました (図2)。
- ② 高潮計算の高速化のため、**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) で置き換えることに成功**しました。流体計算を行った場合と変わらない精度の海面水位変化計算を一瞬で行うことができるようになりました (図3)。

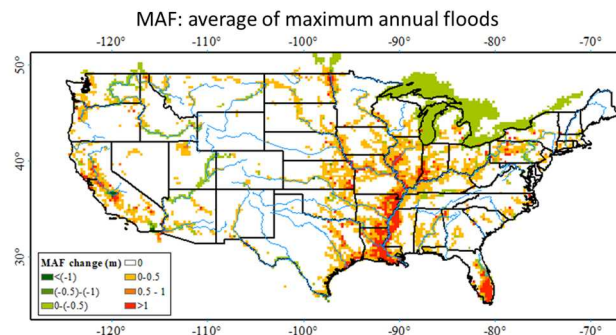


図2. 最大年洪水 (Maximum annual floods) における水位について堤防を考慮したモデルとそうでないモデルの計算結果の差を示しています。全体的に堤防があることで水が河道の外にあふれなくなるために水位が上昇していることが見て取れます。

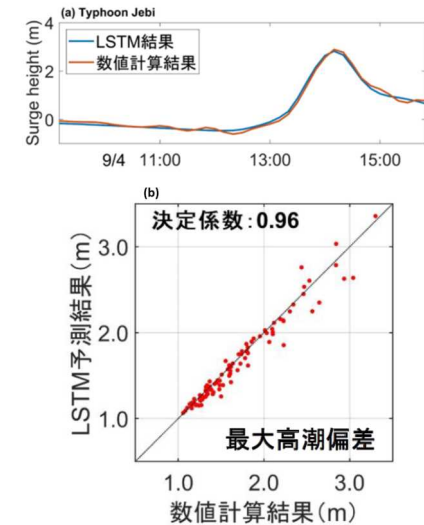


図3. LSTMによる高潮予測性能評価結果です。(a)LSTMと数値流体計算の結果の時系列比較です。(b)様々な事例での最大高潮偏差の比較です。

### 3. 今後の展開

洪水ハザード計算については、今後全球規模で客観的に河川の洪水防護施設の整備度を見積もり、2022年度に開発したモデルに組み込むことで、堤防などの存在を考慮した精緻な洪水計算の実現を目指します。

沿岸災害ハザードについては、今回の高潮のみならず高波の効果を考慮するとともに、モデルに入力する台風の情報を他の研究開発テーマと連携して精緻化させることで、正確でありながら極めて高速な沿岸災害ハザード計算を目指します。

そして両者を統合して、気象制御による複合ハザードの減災効果を確率的に見積もることが目標になります。

研究開発テーマ名

# 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

## 2022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。

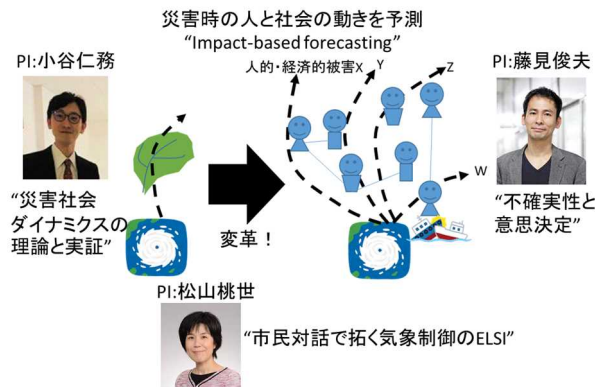


図1. 研究開発テーマの全体像。ある一つだけの気象予測に基づいて、自然現象としての災害を予測する状態から脱却し、様々な気象シナリオを確率的に予測すると同時に、そこに住む人々の行動を予測の視野に入れて社会現象としての災害を予測できるようになることを目指します。

### 2. 2022年度までの成果

- ① 心理実験を実施するための Virtual Reality 環境を構築しました(図2)。このような**現実の災害を模した動画によって減災行動が促される様子をつぶさに解析**することで、減災行動につながる人間の情報処理の在り方を調べる研究基盤を整えています。
- ② 防災情報が社会ネットワークを伝搬する過程を数理モデル化し、空振りの予報が続いて人々が災害予報を信じなくなる**「オオカミ少年効果」の発現をシミュレーションすることに成功**しました。
- ③ **市民対話ワークショップ**を高知県・和歌山県で行い(図3)、気象制御に係る ELSI 論点の抽出を進めました。



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テーマとも連携し、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。気象制御技術をどのように設計し、その技術をどのように市民に伝えることで健全な形で技術の社会実装がなされるのか、そのような議論をリードする研究開発テーマとなることを目指しています。