

研究開発テーマ名

# 数理研究班：気象制御容易性の定量化

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究では、台風の進路分岐など気象現象の中に存在する「分水嶺」の存在に注目した研究を進めています。分水嶺のある現象では、少しの操作で望ましい方向に誘導できる制御のツボがある可能性があります。しかし、超次元の気象データにある「分水嶺」の探索には、技術的困難を伴います。我々は深層学習などの数学・情報科学的手法を用いた高次元の気象データを低次元化し、気象制御容易性の定量化を目指しています。またランドスケープ解析による流れの分岐点検出の研究を実施し、分水嶺及び効率的な介入が可能であろう鞍部の検出手法開発を進めています。

一方で、分水嶺のある現象であっても、軌道の制御に有効な操作が無いと、望ましい軌道への移動が難しい、という困難に直面します。そこで我々は、モデル予測制御(Model Prediction Control、以下 MPC) と呼ばれる手法を用いて、有効な操作を開発する取り組みを行っています。

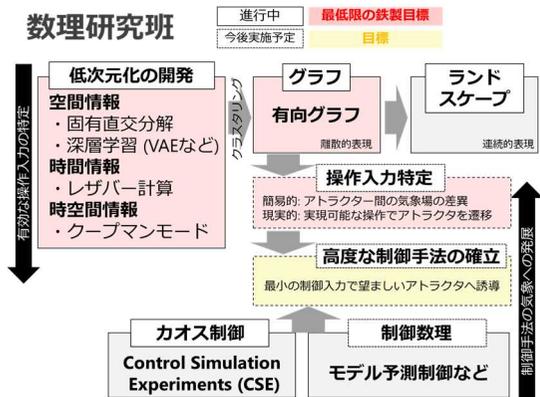


図1 数理研究班の研究開発計画

## 2. 2022年度までの成果

### [低次元化技術開発]

数理・情報系の課題推進者が調査・検討する様々な低次元化手法を気象・地球科学データに適用する戦略で研究開発を進めました。その結果、極端気象の制御においてネックになっている気象シミュレーションに特有な高次元データの扱いが可能となり、意思決定や効率的な介入方法の特定に貢献することが期待されています。

### [ランドスケープ解析]

気象データを「クラスタリング」手法を用いて分解して「有向グラフ」を作成し、さらにそれを「グラフホッジ分解」手法を用いて「ポテンシャル」を導き、分水嶺及び制御のツボを検出するアルゴリズムの開発を推進しました。我々は、2020年に発生した台風12号に適用し分析を実施しました。その結果、図2にある通り台風12号のランドスケープの可視化まで導くことに成功し、分水嶺のある気象事象であることが確認され、さらに効率的な介入が可能と思われる鞍部の位置についても示唆することができました。

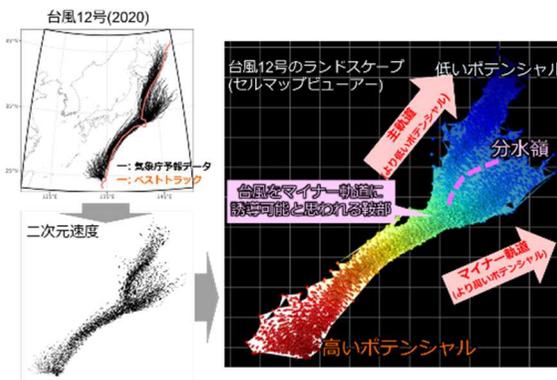


図2 2020年台風12号のランドスケープ

### [MPCの導入による制御手法開発]

カオス力学制御研究において、望まれるレジームに誘導する Control Simulation Experiment (CSE) という手法が提案されています。ただ、CSEでは、必要な摂動を見つけるために、長期のアンサンブル予測が必要になります。一方、本研究では、データ同化に MPC を導入することで、システムを望ましい状態に導く手法開発を推進しました。Lorenz-63モデルに対して行った初期実験では、長期の予測を用いることなく、より少ない制御入力で望ましい軌道へ誘導することが可能であることが示されました。

(1) 入力制約条件なし → 成功

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -s(x-y) + u_1 \\ \dot{y} &= -xz + rx - y + u_2 \\ \dot{z} &= xy - bz + u_3 \\ J &= 0 \end{aligned}$$

(2) 入力制約条件あり → 成功

$$J = \int_t^{t+T} (u^T W u) dt$$

図3 Lorenz-63の誘導実験結果

## 3. 今後の展開

初年度に開発したアルゴリズムを利用して、過去の実際の災害事例に関して、分水嶺の有無や制御の容易さを数値化する取り組み事例の数を増やし知見を高めます。また、データ同化研究班が開発しているより長期の大規模なアンサンブル気象予測を活用して、低次元化技術の更なる高度化研究を進めます。

MPC制御に関しては、膨大な計算コストや非凸最適問題の解決のために、量子アニーリング計算機を含めた最先端の研究開発を進める方針です。

研究開発テーマ名

# データ同化研究班：大アンサンブル・データ同化実験

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマでは、大アンサンブル・データ同化実験を行い、アンサンブル気象予測情報を作成します。アンサンブル気象予測情報は、本プロジェクトの全ての出発点となる重要なデータです。特に数理研究班は、アンサンブル気象予測の低次元化に取り組むため、学習データとして1,000以上のアンサンブル気象予測情報が必要となります。さらに数理研究班が特定する気象制御入力のなし/あり実験を行い、制御により望ましい軌道に誘導可能であるかを検証します。加えて、制御なし/ありに関するアンサンブル気象予測情報を経済被害研究班に提供する役割も担っており、プロジェクトの要となる重要な開発テーマです。

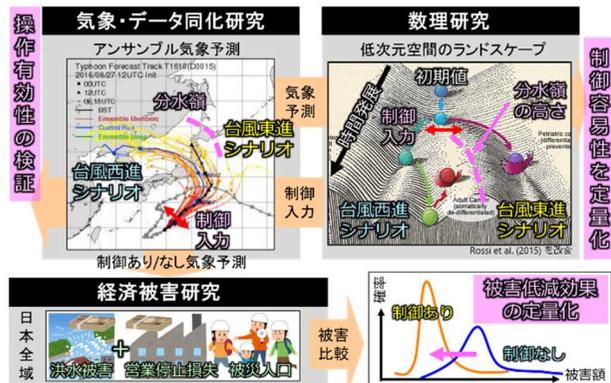


図1 データ同化研究班と他研究班との関係

開発項目は下記の通りです。

- [1] 簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成
- [2] 実気象モデルを用いた大アンサンブルの作成

### 2. 2022年度までの成果

#### [簡易気象モデル SPEEDY を用いた大アンサンブルの作成]

扱いが容易な簡易気象モデル SPEEDY を用いて、数理研究班が取り組むアンサンブル気象データの低次元化に用いる学習用データおよび検証用データを作成しました。それぞれのデータは、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) により擬似観測を同化することで実施しています。

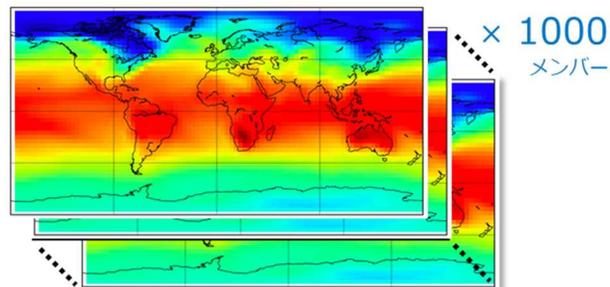


図2 作成した SPEEDY 大アンサンブルデータのイメージ

#### [実気象モデルを用いた大アンサンブルの作成に向けた計算機環境の準備]

現実的な気象モデルを用いて大アンサンブルデータの作成に向けて、研究環境の構築に着手しました。1,000以上の大アンサンブルデータを作成するため、計算資源の確保が重要になります。気象モデルおよびデータ同化システムには、並列化効率が高く大規模計算に向く SCALE-LETKF を使用し、計算機はスーパーコンピュータ「Wisteria」および「富岳」を使用する予定です。



スーパーコンピュータ「富岳」、  
理化学研究所 WEB サイト内フォトギャラリーより引用

### 3. 今後の展開

今後は、現実的な気象モデルを用いて大アンサンブルデータの作成に取り組みます。アンサンブルサイズは1,000メンバー以上を見込んでおり、このような大規模計算は計算科学としてもチャレンジングな内容です。本研究開発テーマにより作成される大アンサンブルデータを数理研究班および経済被害研究班に提供し、それぞれの研究の推進を図ります。一方で、大アンサンブルデータをもとに数理研究班が特定する気象制御操作を気象モデルに入力し、その効果の評価を実施します。

本プロジェクトの目指す「気象制御容易性の定量化」、「気象制御による被害低減効果の定量化」の技術開発の実現を促進する、重要な開発テーマになります。

研究開発テーマ名

# 経済被害研究班：経済被害低減効果の推定

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマは、気象制御による経済被害低減効果の算定のため、日本国内全域の洪水被害額推定技術を開発することを目的としています。政府統計情報や商用データベースを活用し、住宅物件・企業物件への直接被害金額、企業物件の営業停止に伴う間接的損失金額・影響人口を日本全国で網羅的に推定可能な新しい被害推定モデル開発を実施します。開発した被害推定モデルを使って、気象制御なし/ありの気象予測に対して被害リスクを算定、被害低減効果の定量化の実現を目指しています。



図1 気象制御による被害低減効果の定量化の流れ

開発項目は下記の通りです。

- [1] 暴露資産データの作成  
(民間資産・被災人口、間接的損失)
- [2] 洪水被害に対する被害関数の開発
- [3] アンサンブル降雨予測データを用いた洪水被害の算出

## 2. 2022年度までの成果

### [暴露資産(Exposure)データの作成]

日本全国を対象に、本研究で分析対象とする被災人口や民間資産(住宅物件)に関わる暴露資産データベースを構築しました。使用したデータは、政府統計情報(センサスデータ、住宅土地統計、住宅着工統計)および損保料率機構が公開している保険統計情報です。

- 住宅土地統計から市区郡単位での住宅戸数および構造区分を特定し、住宅着工統計から得られる工事費をもとに建物価格の推定実施
- 保険統計情報から得られる住宅物件の保険対象別保険金額をもとに、家財価格を推定実施

特定または推定された各種属性情報は、町丁字~市区郡単位で整理しています。

### [被害関数の開発]

上記の[暴露データの作成]で説明した Exposure データベースを対象とした洪水被害推定を行うための被害関数の構築に着手しました。被害関数とは、被害度合いとハザード強度の関係を表す関数で、過去の被害データに基づく統計的手法、あるいは工学的な被害想定やシミュレーションに基づいて作成されるものです。

過去の水害による被害の実態を明らかにするため、国土交通省の水害統計調査や総務省消防庁の災害情報といった公的な被害実績データ収集も進めています。



図2 被害額推定に必要な要素と流れ

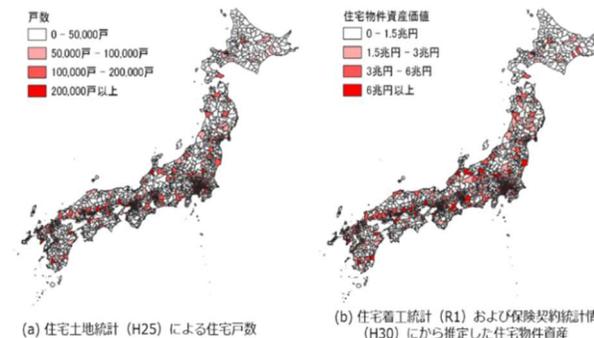


図3 市町村別住宅戸数および住宅物件資産額 (e-Stat から引用)

## 3. 今後の展開

今後は、企業物件の営業停止に伴う間接的損失に係る Exposure データベース構築を推進し、さらに保険会社の保険金支払いデータベースも参照しながら、被害関数の構築に取り組みます。将来的には、構築した被害関数を用いて、気象制御なし/ありの気象予測に対して被害リスクを算定し、被害低減効果の定量化の実現に挑戦します。