

研究開発テーマ名

# アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発とモデル問題および気象問題への適用

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

気象場は大きな自由度を持つシステムであるため、シミュレーションを一度行うだけでも、長い計算時間がかかります。このため、アクチュエータ選択のために膨大な数の気象シミュレーションを行うアルゴリズムは現実的ではありません。本テーマでは、そのような大規模システムに対しても適用可能なアクチュエータ位置選択アルゴリズムを数学的に定式化された問題にしたがって開発します。アルゴリズムの性能を効率的に評価するために、比較的規模の小さいシステムのシミュレーションモデルをアルゴリズムの開発と並行して構築します。このテストモデルに対して開発したアルゴリズムによって選択された位置でのアクチュエーションがランダムに選択された位置でのアクチュエーションよりも99%以上の確率で場を大きく変更できることを示します(図1)。最終的に気象モデルに対しても開発したアルゴリズムによるアクチュエータ位置選択がランダム選択よりも高性能となることを示します。

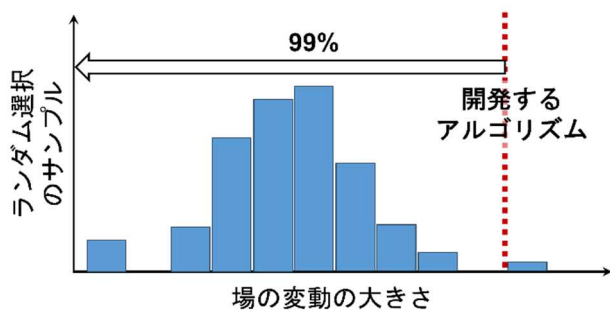


図1: 開発するアクチュエータ選択アルゴリズムの目標

### 2. 2022年度までの成果

研究グループが持っている知見を活かすために大規模アクチュエータ位置最適化問題の双対問題であるセンサ位置最適化の問題のアルゴリズムの整理および評価を行いました。まず、線形モデルに対するいくつかのセンサ選択の評価指標に対して、現状で利用できるセンサ選択アルゴリズムを適用して、性能を比較しました。この結果、センサ位置の候補が大量にある大規模自由度場の問題では、貪欲法のセンサ位置の性能が高く、センサ選択にかかる計算コストも低いことがわかり、貪欲法をベースに研究を進めることが妥当であることを結論付けました。そこで、貪欲法の性能向上を行うための乱択エリートグループ貪欲法(図2)など、新たな貪欲法を提案しました。さらにこれらの緩和された貪欲法の性能保証を理論的に保証しました。線形逆問題での評価指標による貪欲法によって選択されるセンサによって、線形モデルに対するいくつかの評価指標を高めることができることがわかりました。これは、計算コストの低い線形逆問題での評価指標に対するセンサ選択によって、ほかの評価指標に対するセンサ選択を代替できる可能性を示唆しています。

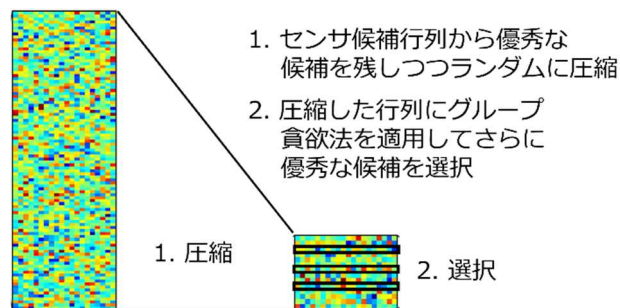


図2: 乱択エリートグループ貪欲法

また、アクチュエータ選択アルゴリズムの性能を評価するために、線形化ギンズバーグランダウ方程式(図3左)やローレンツ96モデル(図3右)などのシミュレーションモデルを構築しました。

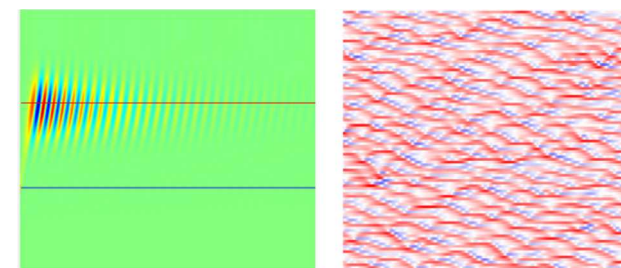


図3: テストモデル

### 3. 今後の展開

本プロジェクトの「アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化」と「気象シミュレーションによる最適化アクチュエータ配置の評価方法構築」のテーマと連携しながら、気象場に適用可能なアクチュエータ配置のアルゴリズムを開発します。まず、これまでのセンサ位置最適化アルゴリズムの整理の成果に基づき、双対の関係を利用して線形モデルに対するアクチュエータ位置最適化アルゴリズムを開発します。そして、線形モデルに対するアルゴリズムの開発によって得られた知見を活かし、気象モデルを含む非線形モデルに対して適用可能なアクチュエータ位置最適化アルゴリズムを開発し、これらの有効性を示します。

研究開発テーマ名

# アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

気象場を効率的に変動させるようなアクチュエータ位置を求めるために、アクチュエータ位置最適化問題を定式化します。評価指標を明確にすることでアクチュエータ配置の良し悪しを定量的に評価できるようになり、それに基づいてアクチュエータ配置を最適に決定するアルゴリズムの開発が可能となります。定式化された数理問題が複雑すぎると、大規模自由度場である気象場に対するアクチュエータ配置問題に解を与えることが困難となるため、アルゴリズム開発のテーマと協調しながら、数値解法の開発が可能な程度に簡便な数理問題を定式化します。

アクチュエータ配置の数理問題を定式化するために、まず先行研究の多い線形モデルに対するセンサ配置の数理問題に着目します。線形モデルに対する既存のセンサ配置の数理問題の双対な数理問題を導出することで、アクチュエータ配置の数理問題を構成します(図 1)。双対性を利用して、センサ配置のアルゴリズムを少し修正するだけでアクチュエータ配置のアルゴリズムに転用することができ、

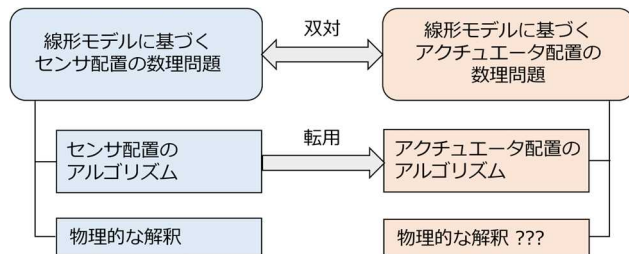


図 1: 双対性を利用したアクチュエータ配置問題の定式化

開発コストを低減することができます。ただし、双対性を利用して得られるアクチュエータ配置問題がどのような物理的・工学的な意味を持つのか明らかではないため、この問題を解釈する必要があります。こうした双対性を利用したアクチュエータ配置問題の定式化で得られた知見を活かし、気象場への適用で重要となる非線形モデルに対するアクチュエータ配置問題の定式化に繋げることを目指します。

### 2. 2022年度までの成果

双対性を利用して、線形モデルに対するアクチュエータ配置問題を定式化しました。線形動的モデルに対する最適状態推定のためのセンサ配置問題の双対問題を考えると、線形動的モデルに対する最適制御のためのアクチュエータ配置問題が得られます(図 2)。両者の配置問題で現れる行列  $Q$  と  $R$  は、センサ配置問題ではノイズの共分散行列を意味するのに対し、双対なアクチュエータ配置問題では制御評価指標における重み行列(設計者が制御において、どの

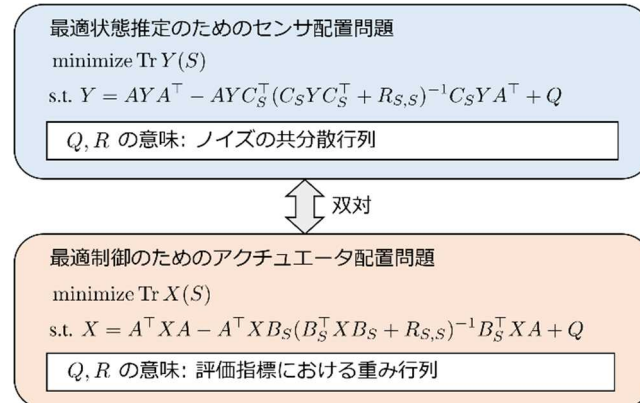


図 2: 線形動的モデルに対する双対な配置問題

状態・入力に重きを置くか定めるための行列)を意味します。気象場の制御では同じ性質を持つアクチュエータを配置することが想定されるため、入力の重みを定める行列  $R$  は単位行列と設定することが自然です。単位行列と設定するとアクチュエータ配置を実行するときに、行列の正規化に要する計算時間を削減することができます。このアクチュエータ配置問題は、別テーマで開発したセンサ配置のアルゴリズムを修正することで近似的に解くことができます。

### 3. 今後の展開

非線形システムのためのアクチュエータ配置問題の定式化を開始します。このために、気象分野でよく扱われる特異ベクトル法に着目しています。特異ベクトル法では初期状態の変動に対する終端状態の変動の最大化を目指した数理問題が扱われます。これを拡張し、アクチュエータへの入力に対する状態の時系列の変動の最大化を目指した数理問題の定式化を行います(図 3)。これにより、気象場に対してより妥当なアクチュエータ配置の評価が可能となります。

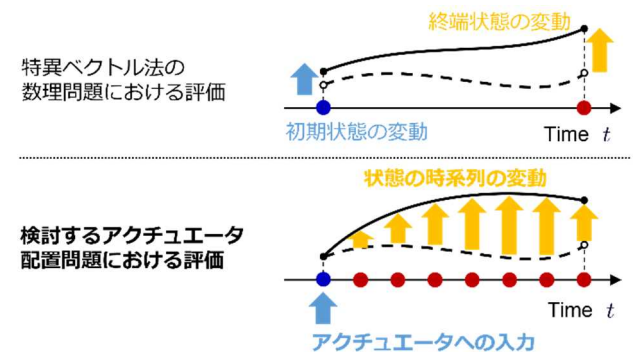


図 3: 検討するアクチュエータ配置問題



研究開発テーマ名

# 気象シミュレーションによる最適化アクチュエータ配置の評価方法構築

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

この研究テーマでは、最適化したアクチュエータ位置での入力により、気象場がどの程度改変できるかを評価するための気象シミュレーション技術を構築します。このプロジェクトで改変・制御しようとする気象場は、線状降水帯などの極端気象です。このような気象現象はそれ自体が現在活発に研究されている状況にあり、現在の技術ではシミュレーション上で再現すること自体が容易ではありません。そのため、気象シミュレータ上で極端気象場に入力を加えて、その変化を確認する場合、極端気象をある程度現実的に再現できるようにする必要があります。また、気象モデルは様々なものがあり、それぞれ特徴があるため、どの気象モデルを選択するかも重要な点です。本テーマでは、利用する気象モデルや計算に必要な境界条件や計算領域の大きさ、解像度など様々なパラメータを明らかにし、現実的な計算コストで極端気象を再現してアクチュエータによる入力の効果を適切に評価する技術を構築します。

### 2. 2022年度までの成果

これまでに、気象モデルの選定と試験的なシミュレーションを実施しました。気象モデルとしては、米国のNCAR(National Center for Atmospheric Research)を中心に開発された WRF と日本の理化学研究所を中心に開発されている SCALE を選定しました。WRF は入力に対する感度を計算するために使われる典型的な手法が必要とされる adjoint モデルが用意されています。一方、SCALE は、adjoint モデルは実装されていないものの、国内で現在精力的に開発が進められており、最新の物理モデルが実装や、多様な計算機環境での効率的な実行を想定した設計が成されてい

ます。

アクチュエータ位置の最適化には多数のシミュレーションを繰り返し行う必要があるため、極端気象を再現するだけでなく、それをいかに低コストで実現するかも重要です。図1は WRF モデルによる試験的なシミュレーションの結果を示しています。カラーマップは地上 2 m の温度場を示します。計算の解像度を変化させ、計算に必要な時間を調べました。解像度が 20 km の場合は計算時間は 400 秒程度ですが、解像度が低く局所的に発生する線状降水帯のような極端気象現象を再現できません。一方、解像度が 2 km の場合は現象を詳細に再現でき、陸上付近での細かい温度変化が捉えられています。しかし、高解像度でのシミュレーションは計算時間を必要とするため、多数のシミュレーションを行うことが難しくなります。そのため、対象とする極端気象現象を極力低コストに再現できる条件を今後明らかにしていきます。

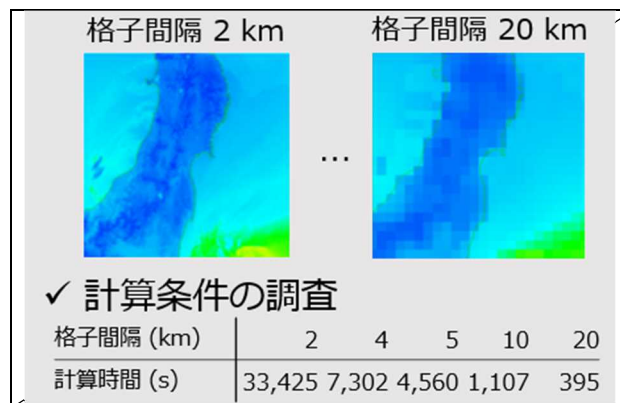


図1：試験的なシミュレーション結果（地上 2 m の気温）

また、図2は SCALE モデルで再現した線状降水帯の鉛直断面の水物質と速度ベクトルの可視化です。図に示す通り、局所的な水物質の上昇と上昇気流の発生が捉えられており、線状降水帯を合理的に再現したシミュレーションが実施できています。

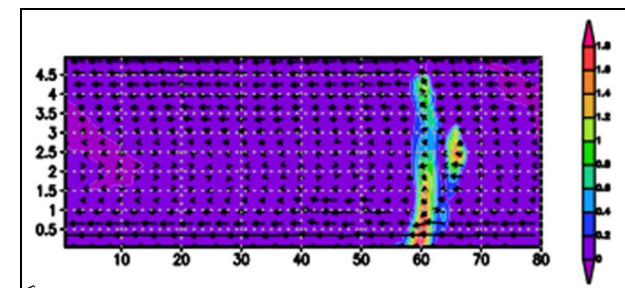


図2：鉛直断面の水物質と速度ベクトルの可視化

### 3. 今後の展開

気象モデルはそれぞれ異なる特徴を持っています。また、アクチュエータ位置の最適化手法にも様々な方法論が考えられるため、これら2つの気象モデルの双方を効果的に活用して最適化アクチュエータ配置の評価方法を構築していきます。今後は複数の異なるシナリオで線状降水帯を再現できる計算条件の同定と、気象場に入力を行う機能を気象シミュレータに実装する作業を行います。その後、シミュレータ上で再現した極端気象場に対して、アクチュエータ位置を最適化する計算を行います。次に、最適化された地点で水蒸気や熱の入力を行った計算を行い、気象場がどの程度改変できるかやアクチュエータ位置の最適化が効果的に行えているかどうかを明らかにします。また、入力によって気象場が変化するメカニズムを調べることで、より効果的な入力方法の検討などが可能になると期待されます。