２０２４年度　名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト

研究種別	一般課題
利用期間	2024.04～2025.03

2025 年 3 月 30 日提出

気象制御に向けたアクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発

野々村　拓
名古屋大学大学院工学研究科　教授

1. プロジェクト概要

本研究では，無数の候補点の中から気象制御効果を最大化するアクチュエータ（制御介入）位置を求めるアルゴリズムを開発する．開発するアルゴリズムでは，実行可能な時間で最適なアクチュエータ配置を計算するために，乱択特異値分解を利用した特異ベクトル法（乱択特異ベクトル法）を開発し利用する．この方法は並列化効率が高いため，短い実実行時間で気象場の低次元モデルが得られる．この計算複雑性の低い低次元モデルに基づいてアクチュエータ配置の指標を最大化することで，実行可能な時間で高い気象制御効果をもたらすアクチュエータ配置が可能となる．最終的に，ランダム配置や直感的もしくは経験的なアクチュエータ配置で介入した気象シミュレーション結果と比較して，開発するアルゴリズムで計算されるアクチュエータ配置で介入したシミュレーション結果のほうが，高い制御効果を得られることを確認する．また，乱択特異ベクトル法が既存の特異ベクトル法と比較して，計算時間の面で優位性を持つことを示す．

2. 研究成果の内容

2.1 気象モデルのインストール

気象モデルとして米国国立大気研究所を中心に開発が進められてきた Weather Research and Forecasting (WRF)を用いた. これは, 随伴モデルを有しているためである. 通常の WRF モデル（フォワード計算用のモデル）は富岳での利用実績があるが，随伴モデルが同梱された WRFPLUS に関しては FX1000 のシステムにおける利用実績が調べた限りでは見つからず，インストール作業が非常に難航した．最終的に，情報基盤センターおよび富士通の技術者の支援を受けてインストールおよびシミュレーションの実行が可能となった．また，本研究で利用する特異ベクトル法の実行のために改変を加えた WRFPLUS についてもコンパイルと実行が可能になった.

2.2 アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの検討

アクチュエータの位置を最適化するためには，入力に対する感度を計算する必要がある．一般に利用される特異ベクトル法は Lanczos による繰り返し計算が必要なため，気象場の計算など計算コストが大きい問題では反復計算に時間を要する．そこで，乱択特異ベクトル法を提案し，大規模自由度場での効率的な感度解析を実現した．この手法は，一般的な特異ベクトル法と同様に接線形モデルと随伴モデルの時間積分を必要とするが，従来手法が接線形

モデルと随伴モデルを交互に繰り返して時間積分をする代わりに，提案手法は多数の独立した計算を行いその結果を用いて上位の特異ベクトルを近似するため並列化効率が非常に高く，実実行時間で大幅に計算時間を短縮できる．WRFPLUS を組み合わせることで，対象事例における積算降雨量に対する地表水蒸気量の感度モードおよび積算降雨量の応答モードを算出した．

アクチュエータ位置の最適化においては，乱択特異ベクトル法で算出した感度モードを用いて終端状態の出力を最大化する初期場に対する入力位置を求める線形逆問題のフィッシャー情報行列の行列式最大化を目的関数とした．この目的関数を用いて貪欲法でアクチュエータ位置を選択する方法を研究グループでこれまでに開発してきたセンサ位置最適化アルゴリズムを応用して構築した．また，ここで選択したアクチュエータ位置は場を大きく変化させるための位置であり，雨量を最小化するための入力を決定する必要がある．本研究では，乱択特異ベクトル法で得た低次元モデルを用いて，各アクチュエータの on/off を変化させ，終端状態での最大降水量地点の雨量を最小化する on/off の組み合わせを総当りで探索する方法を実装した．

本研究では，2018 年 7 月 5 日 12 時から 18 時を対象に西日本地域の解析を行った．この時間帯は集中豪雨の初期に相当する．図 1 に示すように応答モードと感度モードが得られた．なお，これらのモードは Lanczos 法により得られた特異ベクトルとおおよそ一致することを確認した．

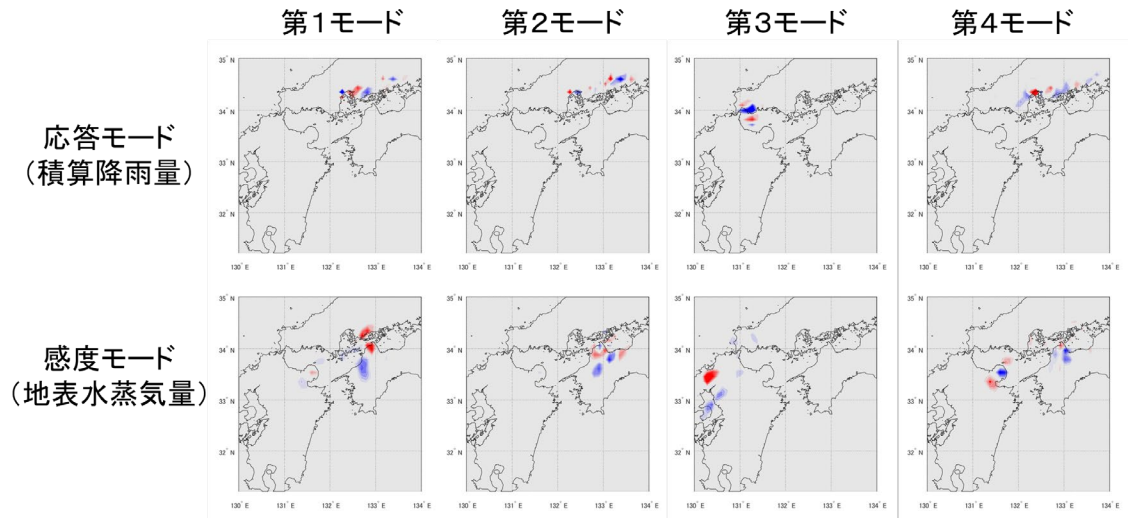

図１：得られた特異モード

図２には特異ベクトルを利用して得られたセンサ位置とアクチュエータ位置を積算降水量と共に示す．図より，降水量の変化を効率よく計測するためのセンサは降水域に配置され，降水量を効果的に変化させるためのアクチュエータ位置はその南西側に配置された．アクチュエータ位置として強雨域の上流側が選択させていることから，気象学的に違和感のない配置が数理的に得られた．更に，低次元モデルにより終端状態での最大降水量地点の雨量を最小化するアクチュエータの on/off の組み合わせを探索し，適用することで接線形モデルにおいて介入なしおよび乱択したアクチュエータ位置での介入に対して大幅に最大降水量地点の雨量を抑制できた．

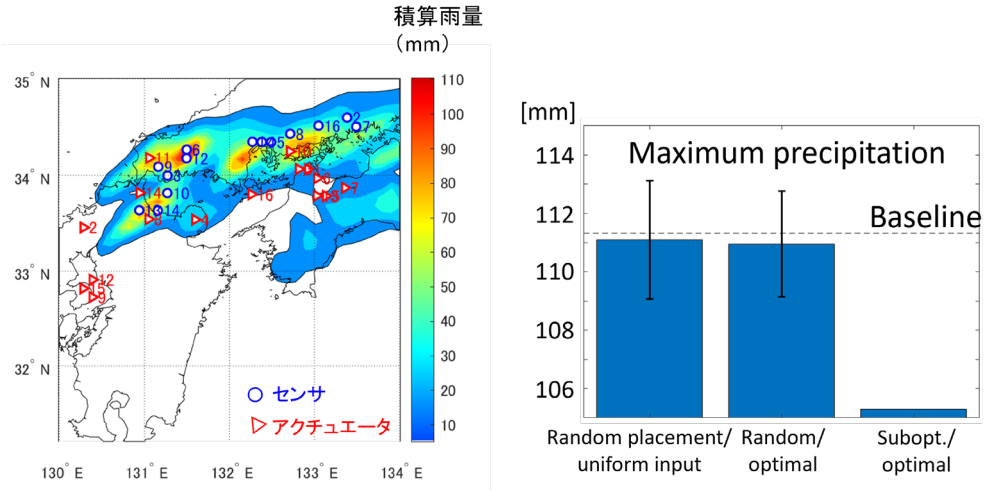

図２：積算雨量分布と選択されたセンサ/アクチュエータ位置と接線形モデルでの介入結果.

2.4 制御効果の確認

本研究で提案したアクチュエータ位置最適化手法は接線系モデルとその低次元モデルに基づいている．一方，実際に入力を行い制御しようとするシステムは非線形システムである．そのため，物理的な挙動および数値モデルとしての挙動の違いがある．制御効果の有効性を調べるためにアンサンブル計算により統計的に評価した．この評価では，地表全体（2500 点）から p 点乱択した場合(Random)と，貪欲法により 16 点エリートアクチュエータ候補を生成してその中から p 点乱択した場合（Greedy）のアクチュエータ位置で水蒸気量を 0.1%, 1%, 10%減少させ，その終端状態を比較した．計算は-6 乗オーダーの背景擾乱も加えて行い，入力がない場合とある場合の終端状態における積算雨量の差の L2 ノルムを計算した（図３）．図より，入力が 0.1%減の小さな入力の場合は完全な乱択との差は明確ではないが，10%減の場合は貪欲法で選択された点で入力した方が終端状態を大きく変える可能性が高い．また，1%減の場合は 2 点での入力では貪欲法による選択の効果は薄いが，8 点での入力の場合は有効性がある．

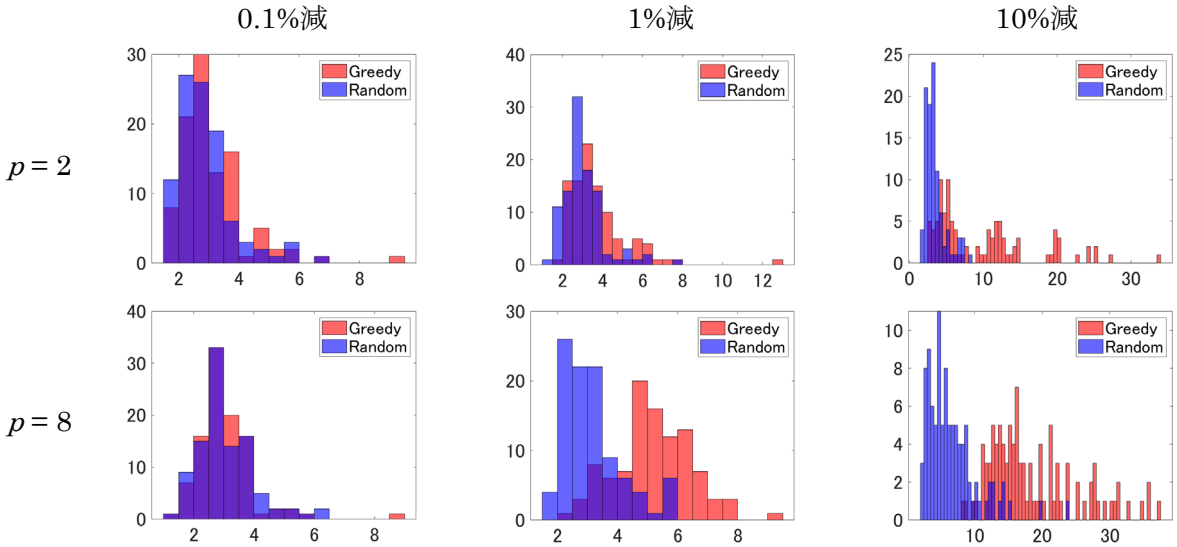

図３：アクチュエータ位置で地表水蒸気量を除去した場合の終端状態の変動の L2 ノルムの頻度分布.

3. まとめと今後の課題

現在までに, 乱択特異ベクトル法と WRFPLUS により集中豪雨の積算雨量に対する地表水蒸気量の感度解析を行い，効率的な介入が実施できると期待されるアクチュエータ位置の最適化が行えた．今後は，目的関数のさらなる検討，他の集中豪雨イベントへの適用などを行っていきたい．さらに，介入する状態量や介入における制約条件を変えた実験により，より効率的な介入方法の探索および介入による気象場への影響の物理的洞察を得ることも可能であると考えている．

4. 研究成果リスト

4.1 学術論文・学会発表

国際学会

Naruse, H., Nagata, T., Sasaki, Y., Watanabe, M., Yamada, K., Ito, J., Paski, J. A. I., Tsubakino, D., Obayashi, S., and Nonomura, T., “Construction of Actuator Placement Optimization Framework Toward Realization of Efficient Weather Modification Technology,” Twenty-first International Conference on Flow Dynamics, CRF-63, Miyagi, November 2024.

国内学会・研究会等

永田貴之, 佐々木康雄, 渡辺昌仁, 成瀬寛高, 山田圭吾, 伊藤純至, Jaka Anugrah Ivanda Paski, 椿野大輔，大林茂，野々村拓：効率的な気象場への介入に向けたアクチュエータ位置最適化フレームワークの検討-WRFPLUS と乱択特異ベクトル法による感度解析-，日本流体力学会年会 2024，3FH110-14-05，東京，2024 年 9 月．

4.2 その他（特許、受賞、マスコミ発表、等）

なし