

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

気象制御を実現するためには、気象制御効果を最大化するためのアクチュエータ位置が不明であるというボトルネックを解決する必要がある。本プロジェクトでは、アクチュエータ位置最適化手法を整理、開発および評価する。そして開発された手法によって得られたアクチュエータ位置を利用することで制御効果が向上することをシミュレーションによって示す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本研究開発プロジェクトでは、単一の研究開発項目「大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化」を扱う。当該年度は引き続き、3つの研究開発課題「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」「アクチュエータ位置最適化の数理問題定式化」「気象シミュレーションによる最適化アクチュエータの評価方法構築」を実施した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発プロジェクトの実施を円滑に進めるために、東北大学においてPM支援体制チームを、特任助教の永田貴之氏、佐々木康雄氏、准教授の伊藤純至氏、東海大学の高橋俊氏および事務補佐員から構成した。PMの名古屋大学への異動に伴い、特任助教の2名も名古屋大学へ異動することでPM支援体制チームを大きく変更すること無くスムーズにマネジメントを移行した。PM支援体制チームと課題推進者、JSTの参加する課題推進者会議を月に一度、運営会議を年一回開催し、事務作業および研究の進捗に関して情報共有を行うことで、プロジェクトを円滑に進めてきた。

昨年度から引き続き、プロジェクト内月例会を月一回開催し、メンバーへの情報共有、作業依頼をするとともに研究の進捗の共有および、プロジェクトメンバーが今後の研究のために参考になる他分野の最新研究を外部の講師に講演いただいた。

本分野でのプレゼンスを示すため自動制御連合講演会において、計測自動制御学会の調査研究会と共同して、オーガナイズドセッションを実施した。

合わせて、外部プロジェクトとの連携として、東京工業大学大西領准教授の科学研究費補助金学術変革B「微気象制御学」プロジェクトと交流し国際学会であるIFACにおいて、ジョイントセッションを行って将来の共同に向けたアクティビティを進めた。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化

研究開発課題1: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

当該年度実施内容:前年度のセンサ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アクチュエータ最適化アルゴリズムとして整理した。課題2「アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化」で得られた目的関数を取り入れて、アルゴリズムの改良を行った。線形化 Ginzberg—Landau 方程式において、インパルス入力に対して終端時間での変

化を最大化させる問題を取り上げ、この入力から出力の関係を結ぶ行列を特異ベクトル法を用いて近似し、得られた左特異行列から計算する入出力関係を表す行列の行列式を最大化することにより、ランダムなアクチュエータ位置で入力を入れた結果よりも 99%以上の確率で制御効果が高いことを示した。

また、非線形で入力位置の候補が大規模となる問題を構築するために非線形な数値的モデル問題および流体力学問題を作成した。気象問題につながるよう、気象の専門家で課題 3 の担当である伊藤准教授と議論をして進めた。今年度は特に流体問題としてジェットのせん断層をモデル化した問題で検証できるようにした。本問題は計算コストをかけないように問題を設定している。また課題 3 と協力して WRF を利用した気象シミュレーションにランダム入力を入れられるようにした。

非線形数値的モデル問題である Lorenz96 モデルに対して課題 2「アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化」で得られた目的関数を最大化する形でアクチュエータ位置最適化アルゴリズムを構築した。入出力関係を線形化し、入力と出力の関係を表す行列を特異ベクトル法で近似、その行列の特徴量を最大化することでアクチュエータ位置の最適化を進めた。行列の対角和を最適化指標とすると目的関数がモジュラとなり、最適なアクチュエータ位置が得られ、このアクチュエータ位置で駆動することでランダムなアクチュエータ位置でのシミュレーションよりも大きな変化を与えられることを示した。この指標では第一モードを強く励起する一方他のモードの励起が小さくなる傾向にあることがわかった。一方で行列式を最適化指標に用いた場合は第二モード以降も強く励起できる場所を選択することを確認した。極端現象を抑制するためのモデル予測制御を行った際には、行列式を最大化したアクチュエータ位置を利用することで、極端現象をより効果的に抑制できることを明らかにした。さらに、ジェットのせん断層をモデル化した流体問題において課題 2「アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化」で得られた目的関数を最大化する形でアクチュエータ位置最適化を実施した。入力と出力の関係を表す行列を乱択特異ベクトル法により近似することで得られる行列の行列式を最大化した。この場合、ジェット出口のせん断層付近にアクチュエータ位置を集めることがわかり、流体力学の知見に沿ったアクチュエータ位置が最適化アルゴリズムにより得られることを明らかにした。このことはアクチュエータ位置最適化アルゴリズムが信頼できることを示すと同時に、物理的知見を用いずとも適切な場所にアクチュエータを配置できることを示すものである。

課題推進者:野々村拓(名古屋大学)

研究開発課題2:アクチュエータ位置最適化の数理問題の定式化

当該年度実施内容:課題 1 のサブ研究課題(1)「線形大規模問題におけるセンサ・アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発」において、双対の関係となる線形なアクチュエータ位置最適化問題と線形なセンサ問題の目的関数の関係を利用し、アクチュエータ位置の最適化アルゴリズムの目的関数を精査した。特に現在考えられている線形問題でのアクチュエータ位置最適化指標に関して指標間の関連性を検討した。入力としてインパルス入力および連続時間入力、出力として終端時間での変化および連続時間出力の変化の大きさを利用できることを整理し、これらの関係を表す行列を取り出して評価することで効果的なアクチュエータ位置の評価ができることを示した。特殊な場合にこれらの行列が可観測性グラミアンや可制御性グラミアンと一致することを示した。さらに行列を評価する際に、対角和や行列式を利用するが、相加相乗調和平均の関係式からこれらの大小関係を明らかにし、よりロバストな指標の存在などを議論した。これらの議論より、課題1で目的関数を再定義して進める指針につながった。

非線形なアクチュエータ位置最適化問題の数理構造を検討し、目的関数を提案した。まずは(1)で提案した線形システムでの指標を利用できるようにするため、非線形システムに対して線形近似を行った接線系を利用することを提案した。これにより、線形問題でのアクチュエータ位置最適指標をそのまま利用できることを示した。さらに、経験的可制御性グラミアンなどを利用した、非線形性も含めたアクチュエータ位置最適化手法も検討した。アンサンブル特異ベクトル法を利用した手法では、随伴方程式が必要ないという利点があるものの、随伴方程式を利用しないために、アクチュエータ位置を決定するために重要な右特異ベクトルが正確に計算されないという問題点があることが判明した。このため非線形システムに対してアクチュエータ位置を最適化するためには、接線系とその随伴方程式を利用した手法のほうが適していると判断した。

課題推進者:椿野大輔(名古屋大学)

研究開発課題 3:気象シミュレーションによる最適化アクチュエータ位置の評価方法構築

当該年度実施内容:課題 1「アクチュエータ位置の最適化とモデル問題および気象問題での実証」で開発した、アクチュエータ位置最適化アルゴリズムを気象問題で評価するためのベンチマークとなるような長時間持続・停滞する降水系を再現するためのシミュレーションのパラメータを決定し、テスト計算を行った。この際に検証作業が実施可能な範囲になるように気象シミュレーションの計算規模や解像度・環境条件を決定した。昨年度に引き続き、課題 1 からの要望を受け、随伴方程式を利用でき

るシミュレータとして WRF を、随伴方程式は利用できないがより一般的で高精度なシミュレータとして SCALE や JMA-NHM を利用したシミュレーション結果を参照しながら行った。本年度は課題1で、まずは随伴方程式を用いたアルゴリズムを開発しているため、前者のシミュレーションに注力して研究を進めた。2018年8月の西日本豪雨に対して WRF4DVAR によるデータ同化を成功させており、もっともらしい結果を得ている。さらに、この WRF のシミュレーションに対して、初期値を改変するツールを開発しており、アクチュエータによる気象場の変化を模擬できるようになった。これによりランダムな位置に擾乱を入れた気象場のシミュレーションに成功している。

課題推進者:伊藤純至(東北大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

研究開発プロジェクトの実施を円滑に進めるために、当初東北大学において PM 支援体制チームを、特任助教の永田貴之氏、佐々木康雄氏、伊藤純至氏、JAXA の高橋俊氏および事務補佐員から構成した。PM が名古屋大学へ異動することとなり、特任助教の永田貴之氏と佐々木康雄氏も名古屋大学へ異動することで、PM 支援体制チームを大きく変更することなく進めることができた。課題推進者、JST の参加する課題推進者会議を月に一度、運営会議を年一回開催することで、事務作業および研究の進捗に関して情報共有を行うことで、プロジェクトを円滑に進めてきた。

また、プロジェクト内月例会を月一回開催し、メンバーへの情報共有、作業依頼をするとともに研究の進捗の共有および、プロジェクトメンバーが今後の研究のために参考になる他分野の最新研究を外部の講師に講演いただいた。

さらに課題1と課題2、課題1と課題3は密接に関連して研究を進める必要があるため、実務者を入れて、2週間に一度ビデオ会議を設定し、情報交換をしながら研究を進める体制を継続した。

研究開発プロジェクトの展開

本課題では、必要最小限の体制で必要不可欠な研究をすべて実施するため、互いに競わせるような競争を行うことは当初より予定しておらず、当初の体制で研究を進めてきた。課題1で研究員の雇用(渡辺昌仁氏)し、研究の推進を加速した。

国際連携を進めるために、制御分野の国際学会である 2023 年度の IFAC において、科学研究費補助金学術変革 B の東京工業大学大西領准教授の「微気象制御学」のプロジェクトと共同してジョイントセッションを行い、認知度を高めるとともに国際的な共同の可能性を探ることができた。また計測自動制御学会において学会の調査研究会と合同でオーガナイズドセッションを行っており、国内の研究者への広報活動に力を入れた。

(2) 研究成果の展開

今年度得られた研究成果は論文化および構築したアルゴリズムに基づくプログラムを

GitHub へアップロードすることによるオープン戦略を取っており、他の研究者が利用することで本研究分野の更なる加速を狙っている。

技術動向調査に関しては引き続き、複数の流体力学・数理研究集会へ参加し発表を聴講しているが、アクチュエータ位置最適化に関する研究はまだ一部の研究者が 2,3 発表を行っているのみであり、今後この分野で理論構築を行っていくことで、本プロジェクトが研究のイニシアティブを握れる状態であるとの判断は変わっていない。

本要素研究が扱う技術はまだ、事業化戦略、グローバル展開できる段階にないと考えるが、企業との共同研究・議論を通じてその可能性を探った。

(3) 広報、アウトリーチ

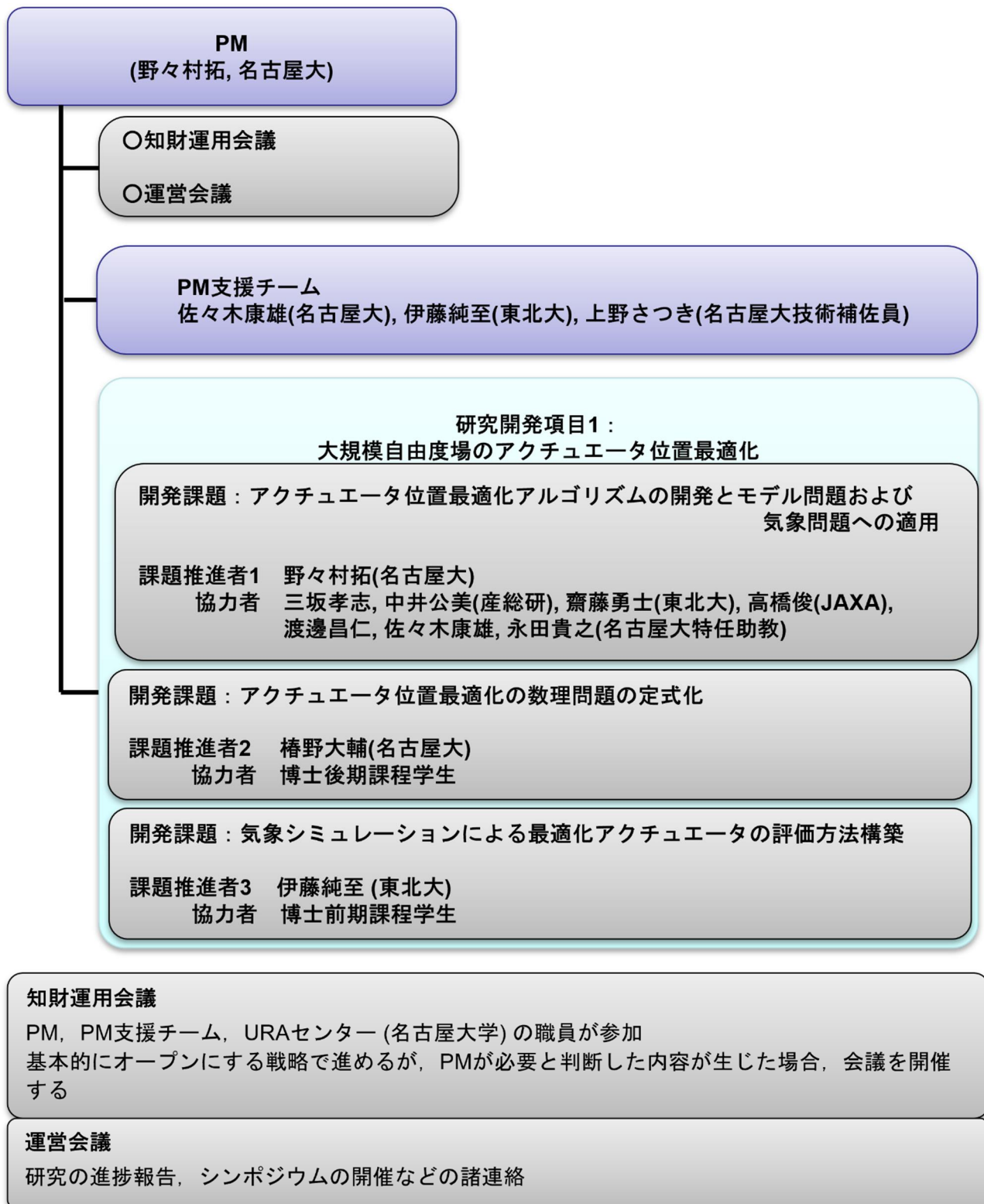
広報・アウトリーチ活動としてホームページを作成し、定期的に更新している。



(4) データマネジメントに関する取り組み

構築したアルゴリズムに基づくプログラムを GitHub へアップロードすることで他者が研究成果を再現できる体制を整えている。今後も同様のオープン戦略を取り本研究分野の更なる加速を狙う。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	0	0	0
口頭発表	8	5	13
ポスター発表	0	0	0
合計	8	5	13

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	3	3
(うち、査読有)	0	3	3

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
2	0	2

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
2