

	研究代表者	東京大学・先端科学技術研究センター・講師	
		武石 直也（たけいし なおや）	研究者番号：20824030
	研究課題 情報	課題番号：25B402	研究期間：2025年度～2027年度
		キーワード：逆問題、シミュレーション、偏微分方程式、機械学習、流体計測	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

計算機シミュレーションは、数理モデルによって物理現象を理解するための基本的なツールになっている。多くのシミュレーションでは微分方程式などを数値的に解いて結果を得るが、その計算にはときに膨大な計算資源や時間を要する。近年、深層学習などの機械学習を利用して、微分方程式の解を直接近似したり解の代理モデルを学習したりすることで、シミュレーション（の近似）を高速に実行する方法が研究され、さまざまな分野で活用が進んでいる。

シミュレーションの利用法のひとつに、実観測とシミュレーションの計算結果を突き合わせて現象の理解・予測・制御に役立てる方法がある。そのためには、観測と計算結果が一致するようにシミュレーションのパラメータを推定しなければならない。この問題はいわゆる逆問題の一種であり、従来はシミュレーションを多数回実行することによる試行錯誤や最適化を行う必要があった。この逆問題についても、シミュレーションの実行結果をデータとして機械学習を適用することで解を直接学習するアプローチ（データ駆動型推論）が研究されている。しかし、高次元問題への効率的な適用や理論的正当性の保証はまだ難しい。

本研究領域では、データ駆動型推論を効率的に解く手法とその理論を研究する。とくに、偏微分方程式に基づくシミュレーションを対象とし、機械学習による逆問題解法の正当性及び適用可能範囲を数理的に評価する。また、こうした逆問題解法を流れ場などの高次元の計測に応用し、革新的な流体計測手法の創出を目指す。本領域ではこの目標に向けて、偏微分方程式・機械学習・流体計測の各分野の専門家が、数理解析からアルゴリズム開発、実験計測までをつなぐ協働体制を築く（図1）。

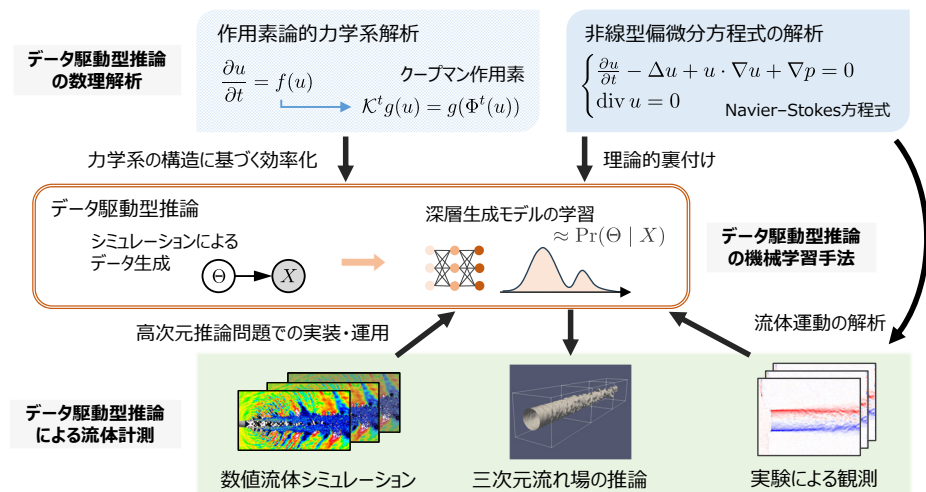


図1 本研究領域の構成：データ駆動型推論の数理解析・手法開発・流体計測への応用

●データ駆動型推論

機械学習によるデータ駆動型推論の基本的な枠組み（図2）では、

- ① シミュレーションを様々なパラメータで実行しパラメータと計算結果（観測量）の組をデータとして保存する
- ② このデータから、観測量を入力・対応するパラメータの確率分布を出力とする機械学習モデルを学習する
- ③ 利用時には、学習したモデルに実際得られた観測を入力して対応するパラメータを推論する

という手順で計算を行う。このとき、特に推論対象となるパラメータが高次元の場合には、生成すべきデータの量が膨大になったり、推論に必要な機械学習モデルがあまりに複雑になったりするために、現実的な計算資源で実行できないことがある。そこで本研究では、偏微分方程式などの数理的な解析に基づき、データ生成の手順やモデルの構造を効率化することを目指す。

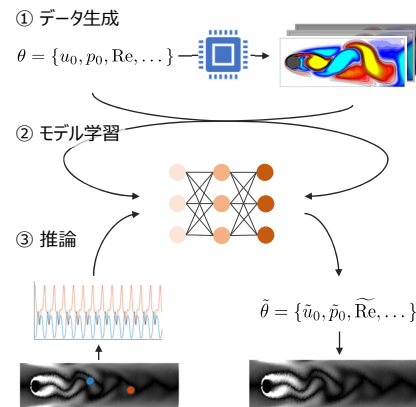


図2 データ駆動型推論の手順

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●偏微分方程式の数理解析

Navier-Stokes方程式に代表される非線型偏微分方程式の解析を通して、データ駆動型推論の理論的裏付けを行う。特に、クープマン作用素などを用いた作用素論的力学系解析を用いて、データに基づく計算と親和性のある知見の獲得を目指す。クープマン作用素による力学系の解析は近年活発に研究されているが、非線形系が複雑な場合や作用素の定義域と値域が複雑な無限次元空間の場合は、連続性やスペクトルの情報などの応用上有用な事実を数学的に保証できるかは明らかではない。そこで、関数空間論、複素解析、調和解析等の数学解析を用いて、これらの保証を行う。複雑な流体現象を記述する微分方程式の初期値境界値問題の大域適切性理論を構築し、流体運動の理解を進める。

●機械学習手法の開発

既存の機械学習による逆問題解法では、汎用的な深層学習に基づく生成モデルを活用することが多かった。これはモデルの表現力などでは有利だが、適切な学習には大量のデータが必要となり、高次元の推論問題にそのまま適用するのは難しい。そこで、推論対象の構造を機械学習に取り込む方法を研究する。例えば、モデルや訓練データ生成過程の設計において、低次元構造、安定性、周期性などの力学系の構造を活用することを考える。そのために、偏微分方程式の数理解析によって明らかになる構造やその表現方法を用いる。

●流体計測への応用

データ駆動型推論による流体計測技術の確立を目指す。そのために、データ駆動型推論の観測データの種類・空間領域・ノイズ次第で把握できる流れ場の情報や、訓練データサイズや格子解像度等の計算設定が推論の妥当性にどのように影響するかを明らかにする。また、データ駆動型推論を実際に活用して、乱流ジェット音響を構成する間欠イベントのダイナミクスの実験的な解明を進める（図3）。

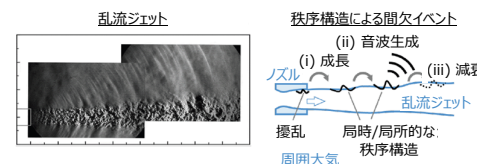


図3 検討する計測対象

●他分野への発展

高次元の推論問題に対するデータ駆動型推論の手法は、流体計測だけでなく、マルチエージェントシステムのパラメータ推論や、地震波トモグラフィによる地下構造をはじめとする様々な分野でも活用し得る。その実現のためには異なる分野の研究者が深く協働する必要があるが、本研究領域はそのような大規模融合領域の形成にむけた第一歩となるものである。