

熱とながれを予測し制御する 先端シミュレーションと逆解析



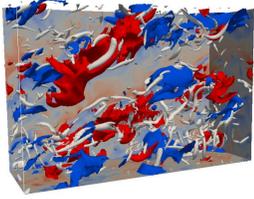
学術研究院 環境生命自然科学学域 数理データ科学
准教授 関本 敦



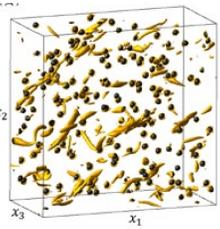
<https://sites.google.com/view/sekimoto-lab>

研究テーマ：
乱流の数値シミュレーションによって得られた
時空間データの解析とデータ駆動による乱流の
予測・制御・ダイナミクスの抽出・因果推定

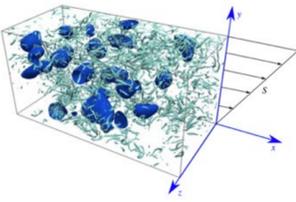
大気や海洋中の密度成層乱流



粒子を伴う流れ
[Tanaka, et al. J. Turb. (2019)]



ソフトマター（液滴や気泡）
と乱流 [Rosti et al. JFM (2019)]



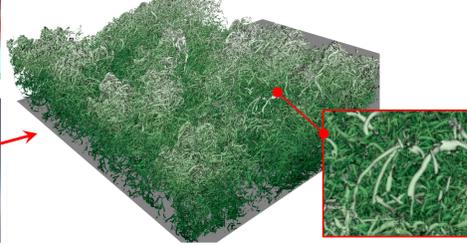
大スケール渦



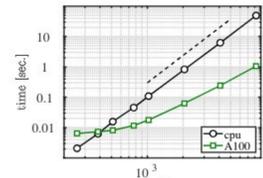
微細渦の圧力が低い領域を可視化
（壁面からの高さで色付け）



最小スケール渦



High-Performance Computing (HPC)



10-30倍の高速化



NVIDIA A100 GPU

GPUによる流体解析の高速化

SEEDS① データ駆動計算とシミュレーションの融合研究

熱や物質のながれの予測・制御には「乱流」の理解と予測モデルが必要です。複雑な現象を複雑なまま理解するデータ駆動科学は、乱流のような非線形現象の制御の新たなアプローチです。当研究室では、以下をキーワードに熱とながれに関わる工学の諸問題にチャレンジします。

数値シミュレーション, 最適化, AI・機械学習, HPC, GPU計算

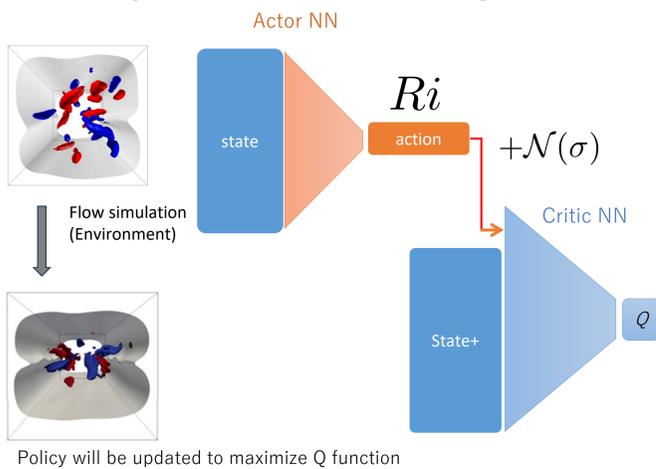
熱エネルギーの取り扱いは産業プロセス全般において重要であり、エネルギーを効率的に利用することは産業基盤の効率化の鍵を握ります。例えば、熱交換器の設計や、計算機のCPU/GPUの冷却システム、車載バッテリーやモーターの熱管理などにも流れに関わり、流体力学が重要な役割を果たします。その応用と流動制御のためには、特に乱流という非常に複雑な流れのダイナミクスを解析する必要があります。空気の流れや熱のうごきは目に見えないため、高度な数値シミュレーションが不可欠です。

乱流は古典力学最後の難問と呼ばれ、その支配方程式であるナビエ・ストークス方程式（流体の運動量保存則）は解析解の存在が未だに証明されていない、数学の中でも特に困難な問題とされています。方程式に忠実なシミュレーションは計算資源の大量消費を伴い、高度なプログラミングスキルとスーパーコンピュータを利用したハイ・パフォーマンス・コンピューティング (HPC)の技術が必要です。

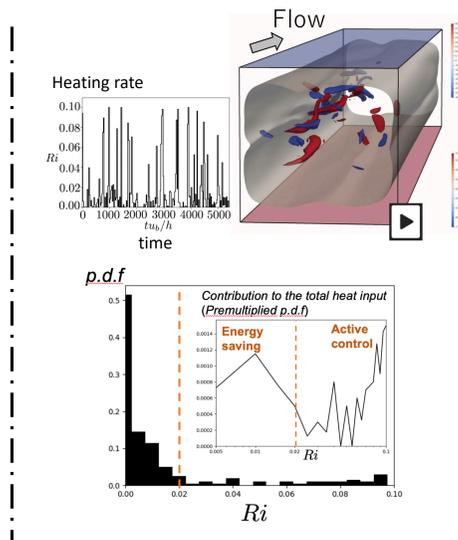
左の研究では、ダクト内乱流に起因する二次流れを深層強化学習を用いて制御する新たなアプローチを提案しています。動的に変化する乱流状態を壁面加熱による浮力を利用して制御し、従来とは異なる二次流れパターンを安定化できることを数値シミュレーションを用いて示しました。これは、熱エネルギーの再利用および流体制御の分野における革新的なステップとなることが期待できます。

深層強化学習で熱とながれを制御する

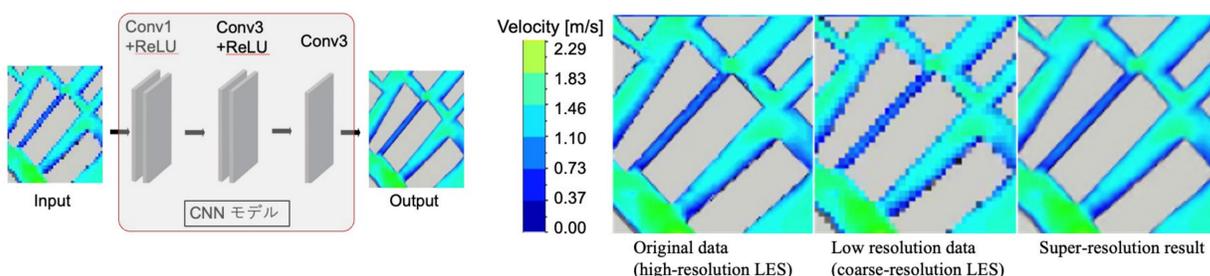
Active thermal control by
Deep Reinforcement Learning (DRL)



$$Q(s_t, a_t) = E_{s_{t+1}} [r(s_t) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1})]$$



深層機械学習による超解像でシミュレーション時間の短縮



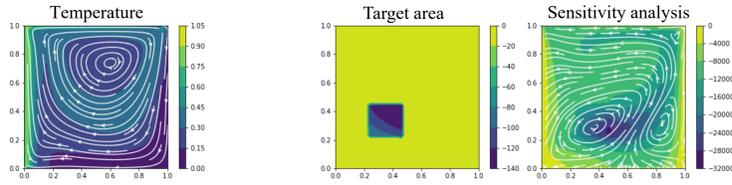
3次元の流体のシミュレーションは計算時間がかかりコストがかかります。大まかな計算を数分で行い、詳細は機械学習に任せる（超解像）という手法も実用的です。中山間地や市街地などの学習モデルの基盤モデルを開発し、地域特性に応じてチューニングすることで、汎用的に利用が可能です。

SEEDS② 逆解析シミュレーションによる最適化支援

設計現場におけるシミュレーションは、パラメータ調整から装置形状の変化などの試行錯誤を行い、設計目標に近づけることが目的です。しかしながら、高精度の流体計算には多くの時間を要するため、試行錯誤を効率的に行う必要があります。

ここでは、シミュレーションならではの手法としての逆解析について解説します。

データ同化と逆解析



キャビティ内の
熱対流シミュレーション結果

随伴変数解析
(因果律反転シミュレーション)

～ 因果律反転シミュレーションの威力 ～

流体のシミュレーションは支配方程式であるナビエ・ストークス方程式に基づいて行い、設計目標の現状値を把握することができます（順解析）。逆解析では、この設計目標に対する影響（感度）を1回の時間反転シミュレーションによって得ることができます。しかも、すべての設計パラメータや物性値に対する感度も得られます（逆解析）。得られた感度を基にして、設計パラメータを調整したり材料を変えたりすることでより良い設計を実現できます。

顧客への設計根拠の説明が可能になったり、設計の手戻りを減らしたりすることができます。

ご相談ください

▶ [利用シーン]

室外機の排熱、データセンター内のサーバーの排熱のショートサーキットの把握、工場内の汚染物質の拡散解析、意匠建築設計の制約の下で空調環境を最適化したい、工程の最下流でのすり合わせ設計など

✓ 流体解析を簡単に始めてみたい方

⇒ 気流解析ソフトを利用して、ノートPCで解析できます。

✓ 単発の受託解析を希望

⇒ お急ぎの場合は開発会社へお繋ぎします。研究室ではモデル作成のアドバイスから解析結果の検証・解釈などをお手伝いし、最終的にご自身で動かせるようになるまで伴走します。

▶ [流体解析あるある]

✓ 流体解析にチャレンジしたが、パラメータの設定方法がわからない。

✓ 流体解析を業者に依頼したが、「解析結果の見方がわからない」「他社の結果と異なるがなぜか？」（実話）

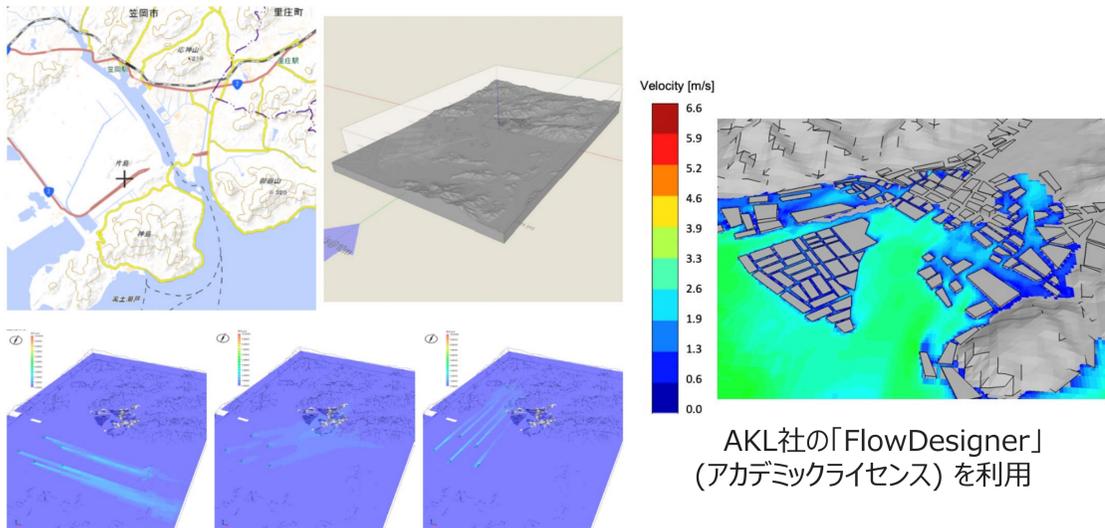
⇒ 受託解析を発注する側と依頼する側が、流体解析の基礎を知らない場合、結果をどう解釈してよいかわかりません。

乱流のプロにご相談ください。

SEEDS③ 可視化解析（室内スケール～微気象スケール）

最近では、東京や大阪などの大都市や岡山中心部は点群データが整備されてきています。今後はこれらのデータの活用によって、簡単に都市のデジタルツインを構築できるようになります。（PLATEAU: <https://www.mlit.go.jp/plateau/> 参照）。都市の暑熱環境の可視化や大気汚染物質の分布の様子をリアルタイムモニターしてアプリで確認できるようなサービス開発が考えられます。

住環境との調和をめざした物質拡散シミュレーション



AKL社の「FlowDesigner」
(アカデミックライセンス) を利用

笠岡湾の干拓地における畜産業は、規模の拡大と機械化が進み重要な産業となっていますが、畜産業に起因する臭気問題が長年の課題となっています。大規模畜産業が密集しており、近隣の市街地や住宅地までの距離も1～2kmしかありません。風向きによっては、臭気が十分に希釈されずに市街地に到達してしまいます。

臭気は目に見えないため、その拡散を把握するには数値シミュレーションが有効です。私たちはDS部の学生有志と協力して、笠岡の住宅地と郊外の干拓地の数値シミュレーションモデルを構築しました。地形データは国土地理院が公開しているCADデータを利用することができましたが、地方都市の建物データは無く、自作する必要がありました。上の図では計算モデルの、干拓地に臭気発生エリアを設定し、西、南西、南からの風によって臭気が住宅地に到達する様子を可視化しました。臭気が住宅エリアに入り込む様子を可視化することで、市で行われるさまざま臭気対策へ活用できます。

微気象解析による霜害リスクの見える化

熱の移動現象には、地面の熱伝導、天空への赤外線放射、対流熱伝達の3つがあり、さらに水蒸気が氷になるときの顕熱も無視できません。これらすべての影響を加味し、中山間地域を対象とした3次元気流解析（微気象解析）を実施しました。

右図は、実際に霜害がおきた日の明け方、風がほとんど吹かなかった晴れの日の条件でシミュレーションを行った結果です。

地表面からの単位面積あたりの熱移動量（熱流束、熱フラックス）を可視化しました。結露のリスクが高い地域が青や緑色で表わされています。

国土地理院が公開しているCADデータを取り込みそのまま気流シミュレーションを実施。

