



研究課題名 機械学習を活用した革新的流れ制御パラダイムの創出と実践

慶應義塾大学・理工学部・教授

ふかがた こうじ
深潟 康二

研究課題番号： 21H05007

研究者番号： 80361517

研究期間： 令和3年度～令和7年度 研究経費（期間全体の直接経費）： 149,300千円

キーワード： 流体力学、機械学習、流れの制御、低次元モデル、データ駆動

【研究の背景・目的】

連続体としての流体力学研究には既に100年以上の歴史があり、近年では大規模シミュレーションが産業機器の性能向上にも役立っている。しかし現在でもなお、流れ現象の本質的な理解に基づく流れの制御や最適化の方法論は確立されておらず、特に乱流はその巨大自由度と強い非線形性のために、力学系において未解決の大問題として残っている。この巨大自由度のままでは理解も、制御や最適化も困難であるため、特徴を抽出した少ない自由度での表現を通じて、より上手に流れを制御・最適化したいということが世界中の流体力学研究者の共通の目標となっている。

一方、近年の第3次人工知能ブームの中、流体力学分野においても機械学習技術を活用した流れの理解・制御・最適化の可能性が期待されており、理論、実験、数値シミュレーションに続く第4の流体力学「データ駆動流体力学」の基盤整備は既に世界中で大きな潮流となっている。

このような背景のもと、2018～2020年度基盤研究(A)（課題番号18H03758）では、機械学習を用いて流れの特徴を抽出するというテーマに取り組んだが、本基盤研究(S)ではこれを発展させ、流れの制御に機械学習を用いることにより新たな流れの制御手法構築の方法論を提案することを目的としている。

【研究の方法】

まず、第1段階として、畳み込みニューラルネットワークに基づく自己符号器(CNN-AE)を流れ場の低次元化の中核技術として使い、低次元化されたシステムに対してスパース回帰法などを用いて、制御入力に対する応答を含むダイナミクスを記述する。図1に示すように、制御入力を加えた場合をCNN-AEを用いて低次元化し、その制御パラメータや制御に対するレスポンスも含めて低次元モデルを構築する。CNN-AEを用いた低次元化のメリットは、非線形性を加味した低次元化により、従来よりも少数のモード（あるいは潜在変数）で複雑な流れを表現できるということにある。これにより、制御理論・最適化理論の適用が容易になると期待できる。

第2段階では、抽出された低次元ダイナミクスに対して現代制御理論などを適用することにより、機械学

習に基づく非線形なモデルベース制御手法を確立する。潜在変数に対する支配方程式を導出し、これに対して現代制御理論などを適用することで、渦発生抑制、乱流遷移抑制、乱流抵抗低減、伝熱促進などを目的とした流れの制御を今までにないやり方で達成するための基盤を確立し、直接数値シミュレーション(DNS)を用いてその制御効果を検証する。さらに制御された流れ場の物理的解釈を行うことにより、乱流をはじめとする複雑流れの物理的理解を試みる。

最終段階では、ここまでの成果をもとに、実用的な制御手法を提案する。また、実験的実証も行い、これら一連の研究成果を総合することにより、幅広い自然現象の理解と流れの制御・最適化に向けた方法論を確立する。

【期待される成果と意義】

革新的な流れ制御の基盤技術は、様々な産業機器の省エネルギー化・低環境負荷化を通じて持続可能な社会に大きく貢献する。流体力学は産業や社会活動の根幹をなす学問であり、今後の「カーボンニュートラル」に向けた取り組みにおいても、流体力学基盤のより一層の充実あるいは進化なしでは個別の技術における具現化は困難であろう。特に、いま世界中で研究が加速している「データ駆動流体力学」の基盤整備は日本の産業競争力にも直結しており、この分野で世界をリードすることは、日本における力学基盤を再生させるための絶好の機会にもなる。そして、流体力学およびその周辺の学問体系におけるパラダイム創成に関して、機械学習には既存の力学体系を補完できる可能性があり、我々のチームでは本研究によってその基盤整備を強力に推進したいと考えている。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Fukami, T. Murata, K. Zhang, and K. Fukagata, “Sparse identification of nonlinear dynamics with low-dimensionalized flow representations,” *J. Fluid Mech.* (2021). <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.697>
- ・ T. Nakamura, K. Fukami, K. Hasegawa, Y. Nabae, and K. Fukagata, “Convolutional neural network and long short-term memory based reduced order surrogate for minimal turbulent channel flow,” *Phys. Fluids* **33**, 025116 (2021).
- ・ T. Murata, K. Fukami, and K. Fukagata, “Nonlinear mode decomposition with convolutional neural networks for fluid dynamics,” *J. Fluid Mech.* **882**, A13 (2020).

【ホームページ等】

<https://kflab.jp/ja/index.php?21H05007>

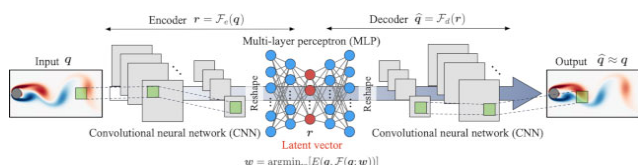


図1 CNN-AEを用いた流れ場の低次元化