

マルチスケール CNN を用いた直線プラズマにおける 発光強度分布に基づく電位揺動の推定

日大生産工(院) ○星野 秀太 日大生産工 佐々木 真 日大生産工(院) 古田原 拓実
核融合研 石川 遼太郎 駒澤大・総合教育 仲田 資季

1. 目的・背景

プラズマは外部から粒子や熱が与えられ、内部に発生する乱流により自律的に輸送が決定する。乱流の直接計測に基づく輸送の特性を理解することが喫緊の課題であるが、輸送を引き起こす流れの計測は困難である。そこで簡便で汎用的な流れ推定手法の開発が必要となっている。近年ニューラルネットワークを用いた太陽表面における乱流場の推定が提案された[1]。この手法は磁化閉じこめプラズマに適用され、密度勾配に起因するドリフト波乱流において、計測が比較的容易な密度揺動を入力データとし、静電ポテンシャル揺動を推定することに成功している[2, 3]。本研究では、シミュレーションデータを用いて、マルチスケール畳み込みニューラルネットワーク (MSDL)[1]の妥当性を検証しており、最終的な目標はこのモデルを実験データに適用することである。提案手法を実験に適用する前に、以下の拡張が必要である。発光強度分布データの取得とMSDLの入力データへの利用や、実験データに含まれるノイズの除去。そこで本研究では、これらの拡張を行い、[2]の手法に基づいて、発光強度分布に基づく電位揺動の推定を行う。なお、本概要では、発光強度分布を入力とする推定の前段階として、直線磁化プラズマにおける Kelvin-Helmholtz 乱流状態の静電ポテンシャル揺動の推定結果について述べる[3]。また、密度・静電ポテンシャル・電子温度を対象とした Hasegawa-Wakatani モデルの拡張方程式を数値的に解いた結果についても併せて報告する。

2. シミュレーションデータ

シミュレーションは、円筒プラズマの3次元流体モデルに基づいており、密度、静電ポテンシャル、磁場方向速度場を対象とした Hasegawa-Wakatani モデルの拡張方程式を解く[4, 5]。渦度ソースを導入する事で、直線装置

で重要とされる Kelvin-Helmholtz 不安定性を駆動することが可能である [6]。本シミュレーションは、背景場と揺動エネルギーがリミットサイクルを示す動的な乱流状態を解析対象とした。プラズマ条件は[7]と同様のものである。本手法では、入力データに密度揺動を入れ、静電ポテンシャル揺動を出力するニューラルネットワークを設計する。

3. 推定手法

推定手法として近年、解析の分野で広く用いられている、畳み込みニューラルネットワーク (convolution neural network: CNN) を用いた。マルチスケール畳み込みニューラルネットワークは、様々なフィルターサイズを持つことで、空間的に集中した構造と、広範囲に広がった構造を同時に検出することが出来る[1]。MSDLの構造をFig. 1に示す。左ブロックの最初の畳み込み層では、空間軸と時間軸にそった3次元の畳み込みが行われ、空間軸、時間軸、フィルター数を含む4次元の配列になる。右ブロックに示す最後のブロックでは、畳み込みは空間軸のみで行われる。このネットワークの最適化には、Adamが使用され、学習率は $\eta = 0.001$ とする。訓練データ、検証データ、テストデータのサイズはそれぞれ、1170, 155, 150である。この推定手法を直線磁化プラズマにおける Kelvin-Helmholtz 乱流に適用し、密度揺動から静電ポテンシャル揺動の推定を行った。

Estimation of Electrostatic Potential Fluctuations Based on Emission Intensity Distributions in a Linearly Magnetized Plasma Using a Multi-Scale CNN

Shuta HOSHINO, Makoto SASAKI, Takumi KODAHARA,
Ryohtaroh T. ISHIKAWA and Motoki NAKATA

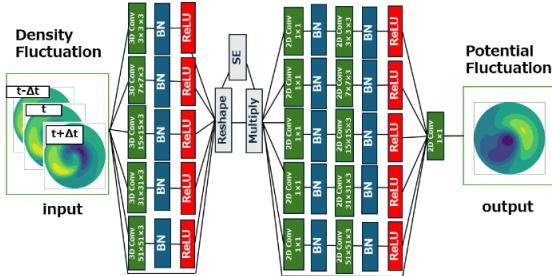


Fig. 1 マルチスケール畳み込みニューラルネットワーク [1, 3]

4. 静電ポテンシャルの推定

周方向のフィルターサイズは、 3×3 、 7×7 、 15×15 、 31×31 、 51×51 であり、これらの数値はピクセル数に対応している。ピクセルの大きさは、半径方向および周方向でそれぞれ $a/86$ と $2\pi/64$ であり、ここで a はプラズマ半径を表し、本研究では、 $a=10\text{cm}$ とした。 31×31 ピクセルのフィルターサイズは、シミュレーションにおける支配的なモードのスケールに対応している。一方、 3 、 7 、 15 ピクセルのフィルターは、支配的なモードの高調波成分に対応する。MSDLで得られた静電ポテンシャルの空間分布とシミュレーションによって得られた空間分布の比較をFig. 2に示す。時間発展を含む相関係数は0.96であり、両者は高い精度で一致している。

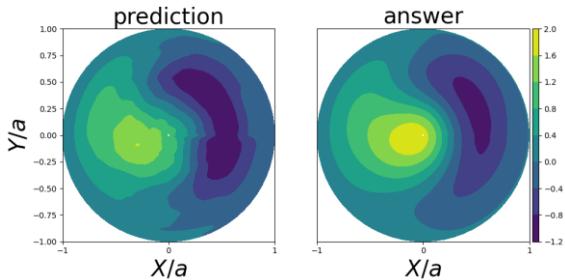


Fig. 2 静電ポテンシャルの空間分布
左：予測データ 右：シミュレーションデータ

5. 発光強度分布の取得及び可視化

現在のCNNは、プラズマ密度の二次元断面データを入力として必要とする。一方、実験ではトモグラフィ技術 [8] を用いることで、発光強度の二次元画像を取得することが可能である。発光強度は、密度と電子温度の関数として表すことができ、密度と電子温度の間には、強い相関関係が指摘されている [9]。したがって、MSDLに学習させる際には、密度だけでなく電子温度も考慮する必要がある。そこで我々は、[10]を参考に、密度、静電ポテンシャル、電子温度を対象としたHasegawa-Wakataniモデルの拡張方程式を解いた。以下に、シミュレーション

から得られた密度揺動、電位揺動、電子温度揺動のスナップショットをFig. 3に示す。

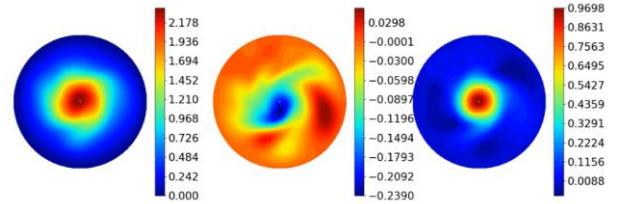


Fig. 3 シミュレーションデータ
(左) 密度揺動 (中) 電位揺動 (右) 電子温度揺動

6. まとめ

本研究は、円筒プラズマの3次元流体モデルに基づいた、Kelvin-Helmholtz乱流が支配的なデータに対して、畳み込みニューラルネットワークによる学習を行い、計測が比較的可能である密度揺動から計測困難量である静電ポテンシャル揺動の推定を行った。推定した静電ポテンシャルのデータから、粒子輸送を評価し、98.4%の結果を得た。このように本手法を用いて、Kelvin-Helmholtz乱流においても静電ポテンシャルを推定できる事を確認した。本手法を実験データに適用するために、密度、静電ポテンシャル、電子温度を対象としたHasegawa-Wakataniモデルの拡張方程式を解いた。今後、得られたシミュレーションデータをもとに、発光強度分布を計算し、発光強度分布を用いた電位揺動の推定を行う。

参考文献

- [1] R.T. Ishikawa *et al.*, *Astron. Astrophys.* **658**, A142 (2022).
- [2] Y. Jajima *et al.*, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **65**, 125003 (2023).
- [3] S. Hoshino *et al.*, *Plasma and Fusion Research*, 20: 1203035. (2025).
- [4] N. Kasuya, *Phys. Plasmas* **15**, 052302 (2008).
- [5] M. Sasaki *et al.*, *Nucl. Fusion* **54**, 114009 (2014).
- [6] M. Sasaki *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* 61 112001(2019).
- [7] M. Sasaki *et al.*, *Phys. Plasmas*, **26.4**. (2019).
- [8] A. Asensio Ramos *et al.*, *Astron. Astrophys.* **604**, A11 (2017).
- [9] P. Ricci B. N. Rogers, *Phys. Plasmas* **20**, 010702 (2013).
- [10] Y. Nagashima, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn* **92.3**, 033501 (2023).