

マルチスケール CNN を用いた直線プラズマにおける Kelvin-Helmholtz 乱流の流れ場揺動の推定

日大生産工 ○星野 秀太 日大生産工 佐々木 真
核融合科学研 石川 遼太郎 駒沢大・総合教育研究部 仲田 資季

1. 目的・背景

核融合発電は二酸化炭素を排出させず、高レベルの放射線産業廃棄物をださない点から次世代エネルギーとして注目されている。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neural network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]。一方で、基礎プラズマ装置などでは、強いプラズマ乱流が存在し、Kelvin-Helmholtz乱流が重要となることが指摘されている[3]。Kelvin-Helmholtz乱流では密度とポテンシャルの相関が弱くなるため、[2]の手法が適用できるか自明ではない。そこで本研究では、[2]の手法に基づいて、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を行う。

2. 乱流シミュレーション

シミュレーションデータは、円筒プラズマの3次元流体モデルに基づいている[4]。本シミュレーションでは、磁場方向をZ軸にとっており、磁場に垂直な密度揺動と静電ポテンシャル揺動をシミュレーションによって得た。得られた密度揺動と静電ポテンシャル揺動のスナップショットをFig1に示す。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。

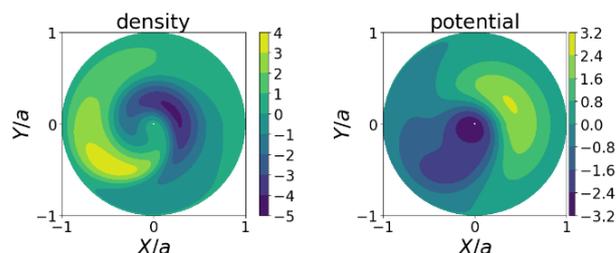


Fig1: (左) 密度揺動 (右) 静電ポテンシャル

3. 深層学習

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、高速に拡散した構造を同時に検出することが出来る[1]。マルチスケールCNNの構造をFig2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。

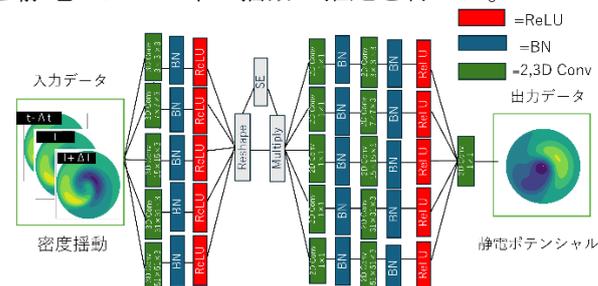


Fig2:マルチスケールCNNの構造

4. 静電ポテンシャル揺動の予測

マルチスケールCNN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Fig3に示す。時間

Estimation of flow field fluctuations in Kelvin-Helmholtz turbulence in linear plasma using multiscale CNN

Shuta HOSHINO, Makoto SASAKI, Ryohtaroh ISHIKAWA and Motoki NAKATA

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。

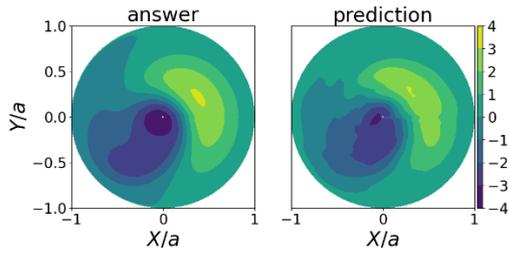


Fig3:(左) シミュレーションによる正解データ
右)予測データ

推定精度を定量化するために方位角スペクトルを評価する。静電ポテンシャル $\varphi(r, \theta, t)$ の方位角フーリエモード分解は次のように与えられる。

$$\varphi(r, \theta, t) = \sum_m \varphi_m(r, t) e^{im\theta} \quad (1)$$

ここで、 m は方位角モード数、 θ は周方向角度を表す。 $r/a=0.58$ における周方向モードスペクトルをFig4に示す。ここで r は半径、 a はプラズマ半径である。 $m=1,2,3,4$ では予測データとシミュレーションデータは高い精度で一致しており、相対誤差はそれぞれ9.5%,0.8%,5.5%,12%である。

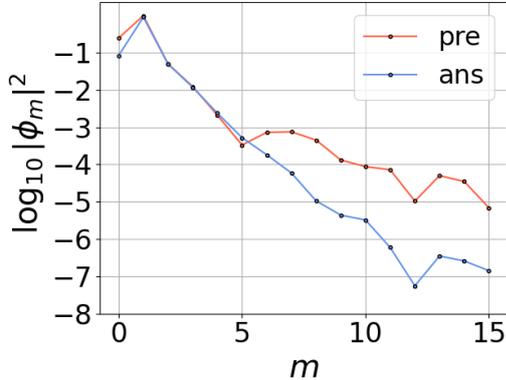


Fig4:静電ポテンシャルの周方向スペクトル
preは予測データ ansはシミュレーションデータ

次に、予測したデータとシミュレーションデータからコヒーレンスと位相角を計算した。各モード数におけるコヒーレンスは $m=1,2$ ではそれぞれ0.98,0.89の値で高い相関を示している。位相角では、それぞれ0.013,-0.06の値であり、予測データとシミュレーションデータは空間的に高い精度で一致している。

次に推定された静電ポテンシャルから粒子輸送を計算した。次のように粒子輸送は計算される。

$$\Gamma = \langle \tilde{n}, \tilde{v} \rangle = -\frac{1}{r} \sum_m \text{Im}[m n_m \varphi_m^*] \quad (2)$$

ここで、 \tilde{n} は密度揺動、 \tilde{v} は径方向速度場揺動、 $\langle \rangle$ は時間平均、 $*$ は複素共役を表す。 $r/a=0.58$ での各モードが駆動する粒子輸送をFig5に示す。各モードの総和は、98.4%での精度で一致している。このように、シミュレーションデータと予測データの支配的モードに対して振幅と位相は高い精度で一致した。

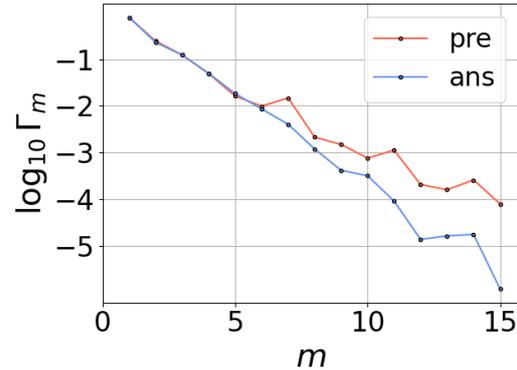


Fig5:各周方向モードが駆動する乱流粒子輸送 preは予測データ ansはシミュレーションデータ

5. 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。

参考文献

- [1] R.Ishikawa T.Nakata M.Katsukawa Y.,Masada Y and Riethmüller T L 2022 Astron. Astrophys. 658 A142(2022)
- [2] Y.Jajima M.Sasaki et al 2023 Plasma Phys. Control. Fusion 65 125003(2023)
- [3] P.Ricci B.N.Rogers Phys. Plasmas 20, 010702 (2013)
- [4] M.Sasaki et al 2019 Plasma Phys. Control. Fusion 61 112001(2019)