

核融合プラズマにおけるデータ駆動科学的研究

日大生産工 ○佐々木真 日大生産工(院) 麿嶋祐樹
日大生産工(院) 古田原拓実

1. 背景

実験室プラズマをはじめ惑星大気や海洋現象など、エネルギーや粒子の流入・流出のある開放システムには、普遍的に揺らぎや乱流等の「時空間ダイナミクス」が存在する¹⁾。そして、時空間ダイナミクスに起因する輸送によってそれぞれの系の発展が支配されている。このようなシステムの発展を予測・制御することは現代物理学の最先端の課題であり、それぞれの系における詳細な研究が精力的に進められている。

本研究では、磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流複雑現象を対象としたデータ駆動科学的研究の事例を紹介する。特に、深層学習を用いた測定困難な物理量の時空間ダイナミクス推定に関する研究例と、特異値分解を用いた物理現象解析手法について紹介する。

2. 深層学習を用いた測定困難量の推定

核融合プラズマは超高温であるため、プラズマ内の物理量の局所計測は非常に困難である。特に、輸送を担う流れ場や静電ポテンシャルの計測は喫緊の課題であるが、重イオンビームプローブ計測のように超大規模な装置が必要な場合や、静電プローブ計測のように多くの仮定を必要とする手法しかなく、汎用的な静電プローブ計測手法の開発が待たれている。

そこで、本研究では乱流シミュレーションと深層学習を組み合わせる事で、計測可能量から計測困難量の推定を行う。近年、マルチスケール畳み込みニューラルネットワークと呼ばれる手法が提案され、太陽表面の乱流状態の推定に成功している²⁾。太陽乱流推定に用いられたネットワーク構造を、磁場閉じ込めプラズマ乱流の推定に応用した。比較的優しい密度場データから計測困難な静電ポテンシャルの時空間挙動を推定することを目指す。対象とするプラズマには、単純な幾何構造を持つ直線プラズマを考え、Hasegawa-Wakataniモデルに磁場方向イオン流を結合させた簡約流体モデルを考える。Fig. 1に非線形乱流シミュレーションで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示す。両者の関係を学習させ、密度揺動画像を入力させ、静電ポテンシャル画像を出力するネットワークを構築した。ネ

ットワーク構造をFig. 2に示す。ネットワークの詳細情報は文献³⁾に記述されている。

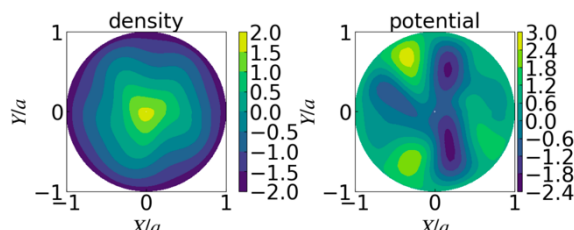


Fig. 1: シミュレーションで得られた密度(左図)と静電ポテンシャル(右図)のスナップショット³⁾

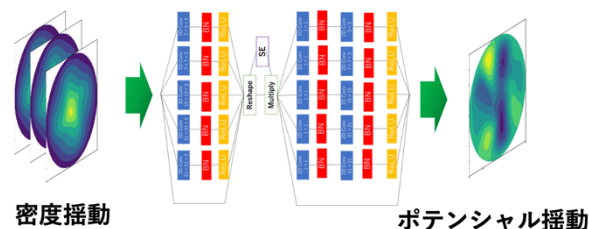


Fig. 2: マルチスケール畳み込みニューラルネットワーク³⁾

ットワークを用いて推定した結果をFig.3に示す。両者の構造は相関値が0.9を超える精度となっており、高精度での推定が出来ている。本手法は、入力する密度揺動を時々刻々変化させることで、静電ポテンシャルの時間発展を含めての推定も可能である。さらに得られた静電ポテンシャルの空間微分により評価される速度場から評価した粒子輸送についても定量的な議論が可能であることがわかった³⁾。未学習の乱流状態における推定についての外挿性も70%程度あることが示唆される結果を得た。

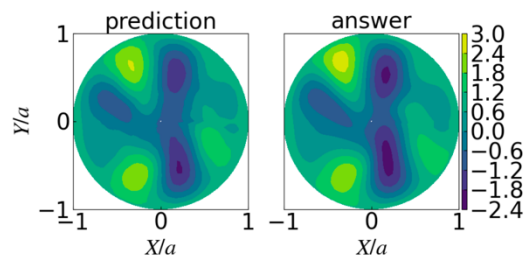


Fig. 3: ネットワークで推定された静電ポテンシャル構造(左図)と正解構造(右図)³⁾

3. 特異値分解を用いた物理解析手法

近年、計算機性能の発達により様々な高精度なシミュレーションが可能になってきた。それに伴い、シミュレーションで得られるデータも大規模となってきた。大規模データから重要となる素過程を抽出する重要性が増している。特に核融合プラズマにおける乱流現象では、構造形成や突発性を伴うため、従来のフーリエ基底を用いた解析では多くの自由度が出てしまい、本質的な時空間構造の抽出が困難となる。

そこで本研究では、特異値分解と呼ばれる一般行列の対角化を用いた手法を用いて非線形素過程を明らかにする試みについて紹介する。磁場閉じ込めプラズマでは、乱流の構造形成機構や突発的輸送現象の理解が喫緊の課題である。以下では、それぞれの問題に対する進展について紹介する。

プラズマ乱流は、帯状流やストリーマや孤立渦などの大規模構造を生み出すことがあり、構造選択がプラズマ特性を大きく左右する。ストリーマや孤立渦構造は、フーリエ分解すると多くのモードが現れるため、エネルギー移送を考える際、解析が煩雑になる。特異値分解を用いると上記の構造を一つの自由度として扱うことが可能であり、大幅に解析の見通しが良くなる。さらに、分解される基底はデータ駆動的にデータ毎に得られるが、フーリエ基底と同様に直交性を保持しているため、エネルギーの定義も可能である。

特異値分解が持つ直交性を考慮し、一般的なモードに関する相互作用の定量化手法を提案した⁴⁾。本手法により、構造間（特異値モード間）の相互作用の定量化を行ない、構造間のエネルギー移送の可視化手法も考案した⁵⁾。動的なエネルギーのやり取りや構造エネルギー増減を見通しよく把握することが可能となった。その結果、リミットサイクル振動における短寿命構造の重要性が発見された。

さらに、上記解析を多重物理量へ拡張した⁶⁾。複数の物理量を一つの観測行列に収めてしまうことで、多重場の相関等を見通しよく調べることが可能となり、輸送現象の直接的な解析が可能となる。この手法を多重場特異値分解と呼んでいる。本手法を、磁場閉じ込めプラズマ乱流の観測データに適用した。観測データ例をFig. 4に示す。密度場の揺動の様子を示しているが、揺動は空間伝播しながらその振幅は長周期で変調している。この変調はストリーマと呼ばれる非線形構造に対応する。

上述のデータと静電ポテンシャル揺動から評価した速度場揺動に、多重場特異値分解を適

用した。両者の結合から粒子輸送を評価した。各特異値モードとの結合の内訳を寄与行列の形でFig. 5に示す。Fig. 5は時間平均・空間平均を行なったものであるが、寄与行列には対角成分のみが出現することがわかる。これは特異値モードが持つ直交性に起因する。このように、多重場特異値分解を用いると、少数自由度で輸送を表現することが可能である。更に、定常輸送だけでなく突発輸送に本手法を適用した結果については発表で詳述する⁸⁾。

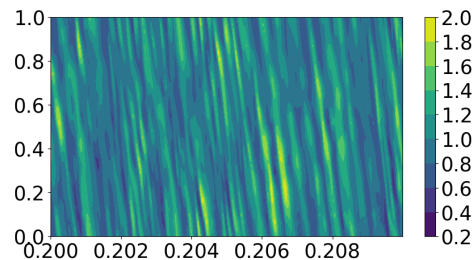


Fig. 4: 解析に使用した密度場データ例。横軸・縦軸はそれぞれ時間と空間を示す。

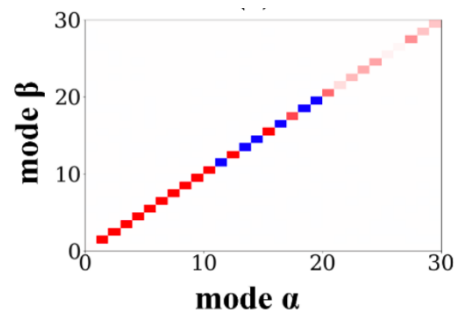


Fig. 5: 多重場特異値分解による粒子輸送への寄与行列。

参考文献

- 1) P. H. Diamond, et. al., Plasma Phys. Control. Fusion, R35, 47 (2005).
- 2) R. Ishikawa, T. et. al., Astronomy & Astrophysics, 658, A142 (2022).
- 3) Y. Jajima, M. Sasaki, et. al., Plasma Phys. Control. Fusion (2023), in press.
- 4) M. Sasaki, et. al., Plasma Phys. Control. Fusion, 63, 025004 (2020).
- 5) S. Maeyama, M. Sasaki, et. al., New J. Phys., 23, 043049 (2022).
- 6) T. Kodahara, et. al., Plasma Fusion Res. Rapid communication, 18, 1202036 (2023).
- 7) G. Yatomi, M. Nakata, M. Sasaki, Plasma Phys. Control. Fusion, 65, 095014 (2023).
- 8) T. Kodahara, M. Sasaki, et. al., in preparation (2023).