

PINNs を用いた MHD 現象におけるプラズマパラメータ予測

#下岡 暉¹⁾, 松清 修一²⁾, 諫山 翔伍³⁾

¹⁾ 九大総理工, ²⁾ 九大・総理工, ³⁾ 九大総理工

Prediction of plasma parameters in MHD phenomena by using PINNs

#Hikaru Shimooka¹⁾, Shuichi Matsukiyo²⁾, SHOGO ISAYAMA³⁾

¹⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²⁾ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, ³⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

In space, satellite observations can access to microstructure of plasma phenomena. The MMS (Magnetospheric Multiscale) mission, for instance, utilizes a formation flight of four satellites to measure microscale spatio-temporal structure of a plasma. To discuss the physics of plasma phenomena, numerical simulations are commonly used for the comparison with the observational data [1,2]. In this way, the boundary conditions and initial conditions are set to be consistent with the observed data. In this case symmetry and/or planarity of the system are often assumed. However, in reality, there are observational data that cannot be explained solely by comparison with such simplified systems, and there may be still yet-to-be unexplained physics. While attempts have been made to reconstruct the two-dimensional structure of plasma directly from observational data, they assume that the plasma is in equilibrium [3,4]. However, actual plasma phenomena are multidimensional and dynamic so that it is difficult to reconstruct such spatio-temporal evolution from the observation data.

With the recent advancements in AI research, a method called Physics-informed Neural Networks (PINNs) has been proposed [5]. In this approach, unknown physical parameters are predicted from limited data to satisfy the governing equations describing physical phenomena. As a first step of this study, by using numerical simulations, we use the PINNs to predict spatio-temporal structures of MHD phenomena such as magnetic reconnection and magnetic turbulence. By using the observed data as a training data, the parameters apart from the observation points are predicted to satisfy the MHD equations. In this approach, the unknown parameters can be predicted without setting the initial and boundary conditions explicitly. Therefore, if this method is established, it is expected to greatly contribute to understand spatiotemporal behavior of MHD phenomena. In our presentation, we discuss the development status of the prediction model and prospects.

宇宙では衛星観測により、宇宙プラズマ現象のマイクロ構造の情報にアクセスすることができる。MMS (Magnetospheric Multiscale) ミッションでは、4機の衛星を編隊飛行させることで、プラズマの時空間構造を計測している。観測データからプラズマ現象の時空間発展を議論する際には、通常数値シミュレーションを比較対象として用いる [1, 2]。この時、境界条件と初期条件は観測データと矛盾がないように設定されるが、構造の対称性や平面性などを仮定するが多い。しかし実際には、このように簡略化されたシステムとの比較からだけでは説明できない観測データも存在し、その中には、未だ明らかにされていない物理が残されている可能性がある。観測データから直接プラズマの二次元構造を再構築する試みも行われているが、これらはプラズマの平衡状態を仮定したものである [3,4]。実際のプラズマ現象は多次元かつダイナミックであり、そのような構造の時空間発展を衛星データから直接再構築する事は困難である。

近年の AI 研究の発達に伴い、Physics-informed Neural Networks (PINNs) [5] という手法が提案された。本手法では、限られた観測パラメータから物理現象を記述する支配方程式を満たすように他の物理パラメータを予測することが可能である。本研究における最初のステップとして、数値シミュレーションによって観測データを模擬し、PINNs を用いて磁気リコネクションや磁気乱流等の MHD 現象における時空間構造の予測を行う。本手法では、初期条件や境界条件を明示的に定める必要がなく、観測データのみから観測領域以外のパラメータを推定することができる。本手法を確立できれば、MHD 現象の時空間構造の解明につながると考えられる。本セッションでは、予測モデルの開発状況と今後の展望について述べる。

参考文献

- [1] S. Lu, R. Wang, Q. Lu et al., Nat. Comm. **11**, 5049 (2020).
- [2] Q. Y. Xiong, S. Y. Huang, M. Zhou et al., Geophys. Res. Lett **49**, e2022GL098445 (2022).
- [3] B. U. Ö. Sonnerup and H. Hasegawa, J. Geophys. Res. **115**, A11218 (2010).
- [4] B. U. Ö. Sonnerup, H. Hasegawa, R. E. Denton and T. K. M. Nakamura, J. Geophys. Res. Space Phys. **121**, 4279 (2016).
- [5] M. Raissi, P. Perdikaris and G. E. Karniadakis, J. Comput. Phys. **378**, 686 (2019).