

## PINNs(Physics-Informed Neural Networks) を用いたプラズマ-中性流体相互作用に関する数値計算

#河野 凌<sup>1)</sup>, 松清 修一<sup>2)</sup>, 諫山 翔伍<sup>3)</sup>

<sup>(1)</sup> 九大総理工, <sup>(2)</sup> 九大・総理工, <sup>(3)</sup> 九大総理工

## Numerical calculation of plasma-neutral fluid interactions using PINNs(Physics-Informed Neural Networks)

#Ryo Kono<sup>1)</sup>, Shuichi Matsukiyo<sup>2)</sup>, SHOGO ISAYAMA<sup>3)</sup>

<sup>(1)</sup>Kyushu University Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, <sup>(2)</sup>Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, <sup>(3)</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

Radio-frequency plasma sources utilize high-frequency electrical power in the MHz range to ionize the background neutral gas. Among these sources, the helicon plasma source can generate high-density and low-temperature plasma relatively easily compared to other plasma sources. Therefore, it has been widely used in the fields such as electric thrusters, nuclear fusion plasma, and space plasma simulation experiments. However, helicon plasma has a density limit, and even if the supplied power is increased, the density remains around  $10^{19-20} \text{m}^{-3}$ . This is thought to be due to the depletion of neutral particles in the high-density plasma region. Neutral depletion is considered to be the primary factor that determines the density limit of helicon plasma and has a significant effect on the plasma confinement performance in nuclear fusion and the thrust performance of electric thrusters. Therefore, understanding the fundamental processes of plasma-neutral fluid interactions is an important research topic for improving the performance and expanding the applications of helicon plasma sources. To accurately analyze these interactions, two-fluid calculations that solve for electrons and ions separately are required. In high-density regions, the Newton method, which is based on implicit methods, is frequently employed. However, achieving efficient parallelization is challenging, and computational costs remain a significant bottleneck in numerical calculations.

In this study, we aim to accelerate plasma two-fluid calculations using PINNs(Physics-Informed Neural Networks), with the objective of clarifying the interactions between plasma and neutral fluid in high-density plasma regions. PINNs are machine learning methods that incorporate physical laws, and have attracted attention as efficient approaches for solving partial differential equations. By employing automatic differentiation to search for solutions and executing computations with multiple GPU parallel cores, it is expected that the bottleneck of conventional numerical calculation methods will be eliminated, thereby enhancing computational speed. In this presentation, we discuss the calculation model currently under development, with a specific focus on how the evaluation method of the loss function and the setting of boundary conditions affect calculation accuracy.

高周波プラズマ源とは MHz 帯の高周波電力を用いて背景の中性ガスを電離させてプラズマを生成する装置である。その中でもヘリコンプラズマ源は、他のプラズマ源に対し比較的容易に、高密度かつ低温度のプラズマを生成できる。この特性から、電気推進機や核融合プラズマ、宇宙プラズマ模擬実験などの分野で応用されている。しかし、ヘリコンプラズマには密度限界があり、供給電力を増やしても密度は  $10^{19-20} \text{m}^{-3}$  にとどまる。これは高密度プラズマ領域で中性粒子が枯渇することが原因と考えられている。中性粒子枯渇はヘリコンプラズマの密度限界を決める主な要因であると考えられているとともに、核融合におけるプラズマ閉じ込め性能、電気推進機の推力性能に多大な影響をもたらす。従って、ヘリコンプラズマ源のさらなる性能向上・応用拡大にはプラズマと中性流体間相互作用の基礎課程を理解することが重要な研究課題となっている。この相互作用を正確に解析するには、電子とイオンを別々に解く 2 流体計算が必要となる。特に高密度領域では、陰解法に基づくニュートン法が多く用いられるが、並列化効率を得にくく、その計算コストが数値計算上のボトルネックとなっている。

本研究では、将来的に高密度プラズマ領域におけるプラズマ-中性流体の相互作用を解明する事を念頭に、PINNs(Physics-Informed Neural Networks) を用いてプラズマ 2 流体計算の高速化を目指す。PINNs は物理法則を取り入れた機械学習手法で、偏微分方程式を効率的に解く方法として注目されている。自動微分を用いた解の探索や、大量の GPU 並列コアを用いた計算を活用することで、従来の数値計算手法のボトルネックを解消し、計算速度の向上が期待される。本発表では、開発中の計算モデルについて、特に損失関数の評価方法や境界条件の設定が計算精度に与える影響について議論する。