

氏 名 中山 智成

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2481 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Modeling and co-simulation of global transport dynamics in  
turbulent plasmas

論文審査委員 主 査 菅野 龍太郎  
核融合科学コース 准教授  
仲田 資季  
核融合科学コース 准教授  
横山 雅之  
核融合科学コース 教授  
佐野 孝好  
大阪大学 レーザー科学研究所 准教授  
今寺 賢志  
京都大学 エネルギー科学研究科 准教授

# 博士論文の要旨

氏 名：中山 智成

論文題目：Modeling and co-simulation of global transport dynamics in turbulent plasmas

In order to realize high performance fusion plasmas, it is crucial to clarify and predict turbulent transport processes, which are driven by various microinstabilities, and the associated formations of global profiles such as the temperature, density, pressure, electric current, and electric fields. There have been many efforts on this subject from both aspects of theoretical and experimental studies, and an era of realizing the burning plasma is, nowadays, in prospect.

As a powerful approach, gyrokinetic simulations for the transport and profile formations in turbulent plasmas have been developed, where the global analyses over the whole plasma volume are capable, as well as the radially local analyses. Since the global gyrokinetic simulations carry out a massively parallelized computation based on the 5-dimensional gyrokinetic theory, it is often difficult to comprehensively scan the various plasma states and heating/fueling scenarios due to the requirement of huge computational resources. Also, the coupling effects among the pressure profile evolution, the heating absorption (fueling as well) variation, the plasma current variation, and the confinement magnetic field variation, have not been taken into account, where all above dynamics are related to the turbulent transport.

In this thesis, an extended turbulent transport modeling based on the nonlinear gyrokinetic simulations and mathematical optimization techniques is realized. The constructed simplified transport model enables us to accurately reproduce the turbulent heat diffusivity in the nonlinear gyrokinetic simulation only by the quantities obtained from the linear calculations. Then, a novel global turbulent transport simulation is developed, where the co-simulation framework with the simplified turbulent transport model is utilized. It allows us to calculate the spatio-temporal evolutions of turbulent transport and profiles under the various heating scenarios at relatively less computational costs. The impact of the background variations on the turbulent transport and profile formations is investigated by means of the new global transport simulation including the temporal modulations of the heating power or confinement magnetic fields.

First, a nonlinear functional relation(NFR), which describes a functional relation among the turbulent diffusivity, turbulence intensity, and zonal-flow intensity observed in the local nonlinear gyrokinetic ion temperature gradient(ITG) turbulence simulation, is identified. Considering several functional forms that satisfy the phenomenological requirements, the optimal regression parameters in the NFR are determined by an optimal solution of the mathematical optimization problem to minimize the deviation from the nonlinear simulation results. The relevant physical interpretations are discussed for the choice of the functional form. The newly constructed NFR shows a better reproducibility for a wide parameter region of the temperature gradient including the near- and far-marginal stability of the ITG instability, compared to that in the conventional works.

Then, a novel simplified turbulent transport model based on the NFR is constructed by further modeling of the turbulence intensity and zonal-flow intensity with quantities in the linear gyrokinetic calculations. The temperature-gradient dependence is newly incorporated into the modeling of the zonal-flow intensity. As a result, the accuracy and robustness are verified by comparing with the estimation results from the conventional model.

Next, by utilizing the simplified turbulent transport model based on the NFR, a new global transport simulation, AGITO(Alterable Gyrokinetics-Integrated Transport co-simulation), has been developed, where discretely distributed local gyrokinetic calculations are directly coupled with a 1-dimensional transport calculation to solve the time evolution of the temperature, density, and plasma current profiles. The so-called co-simulation framework, which is often used in the fluid-structure coupled simulations, is applied in terms of MPMD (Multiple Program Multiple Data) parallelization. The numerical verifications for the global ITG driven turbulence simulation with the stationary heating are carried out. The results confirm that the time evolution of the turbulent diffusivity and temperature profile towards the power-balanced steady state is properly solved.

Finally, the impacts of the heating power modulation and background magnetic modulation on the global profile evolutions in turbulent plasmas are investigated by means of AGITO. It is found that the different time delay appears in each profile, depending on the modulation frequency. Then, in some modulation scenarios, the time-averaged temperature profile deviates from that in the case with the stationary heating. Although the externally imposed temporal modulation without any feedback from the pressure and bootstrap current profile evolutions is assumed in the present analysis, a significant deviation from the stationary heating cases, which depends on the modulation amplitude and frequency, is clarified.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 中山 智成

Title  
論文題目 Modeling and co-simulation of global transport dynamics in turbulent plasmas

出願者は、核融合燃焼プラズマの閉じ込め状態の解析や予測において重要となる、微視的乱流が駆動する熱輸送現象と温度分布形成に関する理論・シミュレーション研究を行った。学位研究においては、互いに影響し合う加熱分布、圧力分布、閉じ込め磁場、乱流輸送の動的な相互作用に注目し、その解析を可能とするための新たな研究手法の枠組みの構築とそれらの物理過程の理解の深化を目的とした。まず、ジャイロ運動論に基づく大規模な非線形シミュレーションを実行し、トカマクプラズマにおけるイオン温度勾配駆動乱流における熱輸送レベル、乱流強度、ゾーナルフロー強度の間の非線形関係と現象論的考察に基づく、新たな縮約乱流輸送モデルを構築した。この研究過程では、ゾーナルフロー強度のイオン温度勾配依存性や、乱流強度に対するゾーナルフローの影響の考慮、さらには多次元数理最適化を活用した最適パラメータの広域探索といった、従来の研究では無視されていた物理効果や新たな計算手法を導入した。これにより、先行研究で提案されたモデルでは予測誤差が増大してしまう温度勾配パラメータ領域においても、熱輸送レベルとゾーナルフロー強度を高い精度で予測することが可能となった。ここで、得られた縮約乱流輸送モデルは、先行研究において機械学習で推論された乱流輸送モデルとは異なり、その物理的解釈が可能であるという特徴を持っている。このモデル開発を通じて、先行研究では着目されてこなかった、乱流強度と混合長拡散係数およびゾーナルフロー減衰時間との間の統計的な関数関係を特徴づける冪指数を同定することに成功した。さらに、1次元輸送方程式とジャイロ運動論方程式の数値計算を連成させることにより、プラズマ炉心領域における乱流輸送と温度分布の時空間発展の解析を実現する新しい大域的乱流輸送シミュレーション体系を構築した。前述の縮約乱流輸送モデルの導入により、非線形ジャイロ運動論シミュレーションに基づいた輸送評価を従来の1/200程度の計算量に低減し、同一の計算機条件の下でおよそ1500倍の高速計算を実現することに成功した。これにより、これまでの大域的乱流輸送シミュレーション研究では困難であった、外部加熱や閉じ込め磁場の時空間変動と乱流輸送の相互作用を取り扱うことが可能になり、その特長を活かして、熱輸送レベルと温度分布変動に対する加熱強度や磁場強度の変調に応答する周波数依存性や時間遅れなどを初めて明らかにした。

以上のように、出願者の研究において開発された縮約モデルおよび数値シミュレーションにより、核融合プラズマにおける乱流輸送に対する物理的理解が進むとともに、プラズマ炉心領域の大域的乱流輸送シミュレーション手法の新たな枠組みが完成した。この研究のモデルおよび数値シミュレーション手法は、様々な異なるトーラス型磁場配位に適用可能であり、今後、磁場閉じ込め核融合炉の実現に向けた研究を進めていく上で、プラズマ

閉じ込め性能の解析や予測，核融合炉の運転シナリオの構築に対して重要な役割を果たすものと期待でき，学術的にも高く評価される。以上の理由により，本審査委員会は，本論文が博士学位論文として十分な価値を有するものと判断した。