

Development of a Lagrange–Monte-Carlo Scheme for 3D Plasma Fluid Simulation in Fusion Edge Plasmas

February 2020

Ryoko Tatsumi

報告番号	甲 第 号	氏 名	巽 瞭子
主 論 文 題 名 : Development of a Lagrange–Monte-Carlo Scheme for 3D Plasma Fluid Simulation in Fusion Edge Plasmas (核融合境界層プラズマにおける 3 次元プラズマ流体シミュレーションに向けたラグランジュ - モンテカルロ法の開発)			
新しいエネルギー源として期待されている磁場閉じ込め核融合装置では、炉心から排出される熱・粒子は境界層プラズマを通して固体壁に多大な熱・粒子負荷を与える．このような熱・粒子負荷の制御手法を開発するために、境界層におけるプラズマ輸送シミュレーションの高性能化、特に3次元化が強く望まれている．しかし、そのシミュレーションにおいては、境界層プラズマに特有な（1）磁力線に平行方向と垂直方向とで輸送メカニズムが大きく異なる、（2）粒子、運動量、エネルギーの各輸送で支配的な輸送メカニズムが異なる、（3）壁境界ではシースからの制約条件が課される、といった物理現象をモデル化し安定的に数値計算することが求められる．しかしながら、これまで境界層プラズマの2次元数値計算手法として主に用いられてきた有限体積法では、上記のような各種物理現象の連成を考慮に入れた上で3次元へ拡張することは困難と考えられる．以上の背景を踏まえ、本研究では、仮想流体粒子を用いた新しい3次元数値計算手法の開発とその数値的な妥当性検証を目的としている． 第1章では、本研究の背景と目的・意義について述べている． 第2章では、本研究で用いたプラズマ流体モデル・中性粒子モデルについてまとめている．プラズマ流体モデルとしては、一般的なBraginskii方程式を元に、粒子連続の式、磁力線方向の運動量バランスの式、イオン及び電子のエネルギーバランスの式を解いている．中性粒子については簡単な解析モデルを用いている． 第3章では、仮想流体粒子を用いたモンテカルロ法（以下、MC法）について、理論的かつ数値的に妥当な境界条件設定手法について議論している．1次元拡散方程式に代表的な境界条件を与えMC法で計算し、比較・検討を行っている．有限体積法に比べ注意深く境界条件を設定する必要があるが、ディリクレ条件、ノイマン条件各々に対し妥当な手法を明らかにしている． 第4章では、対流問題に適したラグランジュ法（以下、LG法）について述べている．確率的な解法であるMC法の対流が支配的である問題への適用性は必ずしも明らかでない．そこで、実際にMC法を対流支配の問題に適用し、その結果、圧力勾配項の陽的な扱いにより非物理的な解になってしまうことを明らかにしている．さらに、この問題を解決するために、粒子の移流を基礎とするLG法コードを開発し、LG法における圧力勾配項の半陰的な取り扱いが有効であることを示している． 第5章では、以上の検討に基づき、対流に対しLG法、拡散に対しMC法を用いたLG-MC法を新たに開発し、1次元の系でその妥当性を検証している．さらに3次元円筒形に拡張し、本手法の最終目標である3次元体系への拡張の有用性を示している． 第6章は結論であり、本研究で得られた知見と成果を述べている．			

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	Ryoko Tatsumi
Thesis Title Development of a Lagrange–Monte-Carlo Scheme for 3D Plasma Fluid Simulation in Fusion Edge Plasmas			
Nuclear fusion energy is a promising candidate as a new energy resource. One issue for magnetic-confinement fusion reactors is enormous amount of particle and heat loads onto the machine inner-walls which are transported through the Scrape-Off-Layer (SOL) region. To control these loads, improvement of SOL plasma transport simulation, especially three-dimensional (3D) modeling, is highly required. However, there are several unique characteristics of SOL plasmas which has to be modelled and stably calculated in the simulation; 1) Different transport mechanism depending on the direction to a magnetic field, 2) Different dominant mechanism between the transport of particles, momentum, and energy, and 3) Presence of sheath at the wall imposing complex boundary conditions. A finite volume scheme has mainly been used for the 2D modeling of SOL plasma, however, it is difficult to be extended to a 3D geometry with taking into account the above-mentioned unique characteristics. Therefore, the purpose of this study is to develop a new 3D simulation scheme using pseudo fluid particles. Chapter 1 describes the background, the purpose, and the significance of this study. Chapter 2 introduces basic equations for the plasma and neutral particles in the SOL. Chapter 3 discusses boundary treatments of the Monte-Carlo scheme (MC) in detail. By calculating one-dimensional (1D) diffusion equation, some different boundary treatments are compared and validated. Suitable treatments for Dirichlet and Neumann boundary conditions are suggested for each. Chapter 4 introduces the Lagrange scheme (LG), a scheme with pseudo fluid particles transported by convection. Since MC is a statistical scheme, its applicability to convective problems is unclear. For this reason, MC is examined by being applied to a convective-dominant problem. The result indicates that MC obtains unphysical numerical solution due to its explicit treatment of the pressure gradient term. On the other hand, the result of LG shows effectiveness of the semi-implicit treatment of the pressure gradient term. Chapter 5 describes numerical algorithm and results of the Lagrange–Monte-Carlo scheme (LG-MC) which combines LG and MC. After validating the scheme in a 1D geometry, the code is extended to a 3D cylindrical geometry. The applicability of LG-MC to a 3D geometry is confirmed. Chapter 6 concludes the thesis, with giving future steps of this study.			