

Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas

March 2014

Yuki HOMMA

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	本間 裕貴
主 論 文 題 目： Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas (核融合プラズマ中の不純物輸送に関する熱力の数値モデリング)				
(内容の要旨) 次世代エネルギー源の一つとして期待される制御熱核融合発電の実現には、高温・高密度プラズマを生成し、長時間磁場中に閉じ込め、維持することが必要である。しかし、プラズマ閉じ込め容器壁で発生した不純物粒子が高温のコアプラズマに混入すると、プラズマ温度は低下し、核融合反応の維持が困難となる。従って、境界層プラズマ中の不純物輸送現象のモデル化とコアプラズマへの混入量の予測は必要不可欠であり、従来から世界各国で様々な不純物輸送シミュレーションコードの開発が行われてきた。しかしながら、急峻な温度勾配が存在する境界層プラズマにおいて、不純物粒子とプラズマイオンとのクーロン相互作用が原因となり生じる熱力と、この熱力に起因する不純物輸送に関する数値シミュレーションモデルは、十分正確とは言いがたかった。特に、閉じ込め磁場に垂直な方向の熱力による境界層プラズマ中の不純物輸送は、従来の運動論的数値シミュレーションにおいては全く考慮されていなかった。以上を踏まえ、本研究では、境界層プラズマ中の熱力による不純物輸送に関する新たな数値シミュレーションモデルを開発し、プラズマ中への不純物混入量に関する信頼性の高い予測シミュレーション実現に寄与することを目的とした。 第1章では、本研究の背景と目的・意義を述べた。 第2章では、本研究の基礎となるプラズマ中のテスト荷電粒子の運動論モデルについてまとめた。このモデルでは、テスト不純物粒子と背景プラズマ粒子群とのクーロン衝突による運動量変化を速度空間における速度ベクトルの酔歩過程として定式化した。解析的な扱いが可能な、密度が一定、かつ、線形な温度勾配を持つ背景プラズマの場合について運動量変化の期待値を求め、熱力の理論式を導き、典型的な核融合プラズマ中での熱力の大きさを計算し、まとめた。 第3章では、第2章の酔歩モデルおよび多体問題を二体問題に帰着させる、いわゆる「二体衝突モデル」に基づき、本研究で新たに開発した熱力の数値シミュレーションモデルについて説明した。本章では、特に磁力線に平行な方向の熱力に関して、モデルの詳細を述べた。その特徴は、1) 背景プラズマの速度分布関数に温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いたこと、さらに、2) この速度分布関数から背景粒子速度のランダムサンプリングを高速かつ正確に行う手法を提案したことにある。 第4章では、第3章のモデルをさらに拡張し、磁力線と垂直方向の温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いることにより、従来の運動論的シミュレーションでは全く考慮されていなかった磁力線垂直方向の熱力に関する数値シミュレーションモデルを新たに提案した。このモデルを用いてシミュレーションを行い、第2章の理論値と比較することにより、モデル妥当性を検証した。これにより、磁場垂直方向にテスト不純物粒子に働く熱力を、運動論的に計算することを初めて可能とした。また、熱力とローレンツ力により不純物粒子が磁場垂直方向に旋回中心ドリフトによって輸送されることを、運動論的数値シミュレーションにより初めて示すとともに、その効果が境界層プラズマ中の不純物輸送過程において無視できないことを示した。二体衝突法を用いた本モデルは、不純物による背景プラズマの自己無撞着な動的変化をも考慮する背景プラズマ不純物統合輸送計算にも容易に応用可能である。 第5章では、第3、4章の二体衝突モデルをもとに、フォッカープランク近似による熱力計算モデルを提案し、その妥当性を第4章の結果と比較・確認した。本近似はいわゆる微量不純物仮定の下で有効で、高精度かつ高速計算を可能にする。 第6章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめた。				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School School of Fundamental Science and Technology	Student Identification Number	SURNAME, First name Yuki HOMMA
Title Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas		
Abstract <p>Correct understanding of impurity transport processes in fusion plasmas is one of the most important research subjects to realize stable energy production by nuclear fusion plasmas. Numerical simulations are widely used to investigate the impurity transport and its effects in fusion plasmas, such as the cooling of core plasma or the mitigation of plasma heat load onto device walls. In order to improve the impurity transport simulation, we have developed a new numerical model to simulate the thermal force acting on kinetic test-impurity particles. The thermal force is caused by Coulomb collisions with plasma ions if the background plasma has temperature gradient. The impurity transport across the magnetic field by thermal force has not been taken into account in the existing kinetic impurity transport simulation codes so far.</p> <p>Chapter 1 summarizes the motivation and the research subject.</p> <p>Chapter 2 describes the kinetic transport model of charged test particles in plasmas. Coulomb collisions are modeled as random walk process in the velocity space, and background plasma ions with temperature gradient are modeled by the distorted Maxwellian velocity distribution. Averaging all collisions between the test impurity particle and the plasma ions, the thermal force is analytically derived.</p> <p>Chapter 3 presents a new numerical model of the thermal force in unmagnetized background plasma, by using the Binary Collision model (BCM) to simulate Coulomb collisions. Efficient algorithm to randomly sample plasma ion velocities from the distorted Maxwellian has been newly developed. This model is equivalent and applicable to the simulation of thermal force along magnetic field line in magnetized plasmas.</p> <p>Chapter 4 extends the model to the case of magnetized background plasmas. By adopting more extended distorted Maxwellian, we have succeeded, for the first time, to kinetically simulate the thermal force due to temperature gradient perpendicular to the magnetic field. Such BCM-based model can be applied to more sophisticated impurity transport simulations including dynamic changes of background plasmas due to interaction with the impurities.</p> <p>On the basis of the study done in Chapter 3 and 4, another new thermal force model based on the Fokker-Planck (FP) collision approximation has been developed in Chapter 5. The FP approximation realizes more rapid calculation as far as the trace impurity limit holds. The validity of the model has been checked by comparison with the results obtained in Chapter 4.</p> <p>Chapter 6 summarizes the conclusion. Our new model has succeeded to simulate the thermal force due to the parallel and perpendicular temperature gradient. Numerical impurity transport simulation in fusion plasmas will be further improved by implementing our model.</p>		