

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | プラズマ乱流による電子熱輸送のジャイロ運動論的シミュレーション研究 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 朝比祐一 |
| Author(English) | Yuuichi Asahi |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9797号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:筒井 広明,小栗 慶之,青木 尊之,飯尾 俊二,赤塚 洋 |
| Citation(English) | Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9797号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 論文要旨 |
| Type(English) | Summary |

論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号 | 甲第 | 号 | 学位申請者氏名 | 朝比 祐一 | | |
|-------------|-----|------|---------|-------|------|----|
| 論文審査 審査員 | | 氏名 | 職名 | | 氏名 | 職名 |
| | 主査 | 筒井広明 | 准教授 | 審査員 | 青木尊之 | 教授 |
| | 審査員 | 小栗慶之 | 教授 | | | |
| | | 赤塚 洋 | 准教授 | | | |
| 飯尾俊二 | | 准教授 | | | | |

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「プラズマ乱流による電子熱輸送のジャイロ運動論的シミュレーション研究」と題し、6章から構成されている。

第1章「序論」では、磁場閉じ込めプラズマにおける静電的な揺らぎに起因する乱流現象および乱流による輸送現象について概説している。また、本研究の対象であり乱流を駆動するドリフト波不安定性、電子温度勾配 (ETG) 不安定性、及び、捕捉電子モード (TEM) について、その物理的描像を説明している。さらに、乱流輸送に関するこれまでの研究を理論、シミュレーション、実験の観点から解説し、本研究の目的として、電子の熱輸送解析の必要性とその課題を述べ、最後に本論文の構成について記述している。

第2章「理論モデル」では、本研究で用いた計算コードの基盤となるジャイロ運動論的方程式を第一原理から導き、その適用範囲について述べている。また、磁気座標系について説明し、数値解析で用いたフラックスチューブモデルにより表すことのできる磁場配位と、実空間との対応について説明している。

第3章「電子温度勾配乱流に対する捕捉電子モードの影響」では、従来は計算コストが高い等の理由で解析されていなかった短い空間スケールを持つ ETG 乱流と長い空間スケールを持つイオン温度勾配 (ITG) 乱流の中間領域について、電子とイオンともに運動論的方程式を用い数値的に解き、乱流現象を解析している。この中間領域では温度勾配で不安定化される ETG モードの他に、ETG と ITG の中間の波長を持ち密度勾配で不安定化される TEM が存在し、これらが乱流を引き起こし電子熱輸送を増大させることを示している。さらに、ETG に加えて TEM が不安定化される場合について計算することで、TEM に駆動されるゾーナル流と呼ばれる秩序構造の形成を介して短波長の ETG 乱流を抑制し、電子熱輸送を低減させることを明らかにしている。

第4章「ETG-TEM 乱流におけるゾーナルフローの特性」では、ETG-TEM 乱流におけるゾーナル流の特性について解析している。ゾーナル流の議論において重要となる残存ゾーナル流レベルの半径方向波長依存性について調べ、長波長の TEM スケールと短波長の ETG スケールでの残存ゾーナル流レベルを比較している。これにより、TEM スケールのゾーナル流は ETG スケールのゾーナル流と比べ残存レベルが高いことを明らかにしている。さらに、第3章において示した、TEM 駆動ゾーナル流の乱流抑制効果を定量的に評価するため、E×B シアリングレートの評価し、それが長波長モードの線形成長率と同程度あることを示している。この結果より、TEM 駆動のゾーナル流は長波長モードの抑制に有効であると論じている。

第5章「ETG-TEM 乱流における非線形相互作用の解析」では、第3章において明らかにした TEM 駆動のゾーナル流の ETG 乱流への影響を調べるために、波数空間におけるエントロピーの移送について解析している。これにより、ETG-TEM 乱流においては長波長の TEM からゾーナル流へとエントロピーが移送されるのに対し、ETG 乱流においては短波長の ETG モードからゾーナル流へとエントロピーが移送されることを明らかにし、第4章の結果と併せて、ETG-TEM 乱流において TEM がゾーナル流を駆動していることを明らかにしている。さらに、準定常の乱流状態におけるエントロピー移送過程を解析することで、ゾーナル流を介して長波長モードから短波長モードにエントロピーが移送され散逸することを示し、ゾーナル流が乱流を抑制し電子熱輸送を低減することを明らかにしている。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、本論文は数値シミュレーションにより磁場閉じ込めプラズマにおける電子の乱流熱輸送機構の理解に貢献するとともに、磁場閉じ込め核融合炉の性能向上に資するものであり、工学上及び工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値あるものと認められる。

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

| | | | | |
|--------------------------|-------|----|--|------------------------------------|
| 専攻 : Department of | 原子核工学 | 専攻 | 申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested | 博士 (工学) Doctor of (Engineering) |
| 学生氏名 : Student's Name | 朝比 祐一 | | 指導教員 (主) : Academic Advisor(main) | 筒井 広明 |
| | | | 指導教員 (副) : Academic Advisor(sub) | 赤塚 洋 |

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In theoretical fusion research, much attention has been paid to the plasma turbulence which is considered to cause the anomalously high heat and particle transport. The first principle gyrokinetic simulations have played a significant role in plasma turbulence study, and the results of these simulations are compared with heat and particle transport level in some experiments. For example, ion heat transport level with the presence of a steep ion temperature gradient (ITG) can be predicted by ITG driven turbulence simulations. Still difficult to explain is the electron heat transport, which would be quite important in future fusion reactors. This thesis tackles with the electron heat transport to achieve two important consequences.

First, we carried out gyrokinetic simulations for the electron heat transport and found that the electron temperature gradient (ETG) turbulence can be regulated by zonal flow driven by trapped electron modes (TEMs). Through the comparison of the simulation results employing adiabatic and kinetic ion models, we investigated effects of the TEMs on ETG turbulence. The adiabatic ion model can treat the ETG modes, while the kinetic ion model can deal with TEMs in addition to ETG modes. In the kinetic ion case, we found the ETG turbulence can be regulated by the TEM-driven zonal flow. By contrast, the zonal flow is not strongly generated in the adiabatic ion case, since the TEMs are stable in the adiabatic ion case. Correspondingly, the electron heat transport level is reduced only in the kinetic ion case.

Second, the mechanism of the regulation of the ETG turbulence by zonal flows is investigated by nonlinear entropy transfer analysis. To begin with, in order to identify the source of zonal flows, we analyzed the entropy transfer process from turbulence to zonal modes. The entropy transfer process from the TEMs to the zonal modes is found in the kinetic ion case, but not found in the adiabatic ion case. Thus, it is concluded that the strong zonal flow found in the kinetic ion case is driven by TEMs. Then, the role of the zonal flows in the steady state was also investigated. In the kinetic ion case, it turned out that the zonal flows mediate the entropy transfer of the ETG modes from low to high radial wavenumber regions. This is the direct consequence of the regulation of the ETG turbulence by TEM-driven zonal flows.