

氏 名 仲田 資季

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1410 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 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 Vortices, Zonal Flows, and Transport in Gyrokinetic
Plasma Turbulence

論文審査委員 主 査 教授 藤堂 泰
教授 渡邊 智彦
教授 居田 克巳
教授 洲鎌 英雄
上級研究主席 菊池 満
日本原子力開発研究機構
教授 岸本 泰明 京都大学

論文内容の要旨

Plasma turbulence driven by drift wave instabilities is a key issue for understanding anomalous transport of particle, momentum, and heat observed in magnetically confined plasmas. Ion temperature gradient (ITG) and electron temperature gradient (ETG) driven instabilities are considered as main causes of the micro-scale turbulence with the spatial scale of the ion and electron gyroradii, respectively. Various flow structures, i.e., fine-scale turbulent vortices, axisymmetric zonal flows, and radially elongated streamers, are generated through complicated nonlinear interactions in plasma turbulence. From the aspect of regulating the turbulent transport in future burning plasmas, it is worthwhile to understand fundamental physics behind the formation of vortex and zonal flow structures and their stability as well as the related transport properties. Since the high temperature plasmas with weak collisionality inherently involve a lot of kinetic processes, i.e., the Landau damping, the finite gyroradius effect, and the particle drift/trapping, the gyrokinetic theory is a powerful tool for the precise investigation of the physical mechanisms of plasma turbulent transport.

In this dissertation, the ITG and ETG turbulence are explored based on nonlinear gyrokinetic theory and direct numerical simulations. Then, the results concerning (i) formation of coherent vortex streets and the resultant transport reduction, (ii) effects of parallel dynamics on the zonal flow generation, and (iii) nonlinear entropy transfer among turbulent vortices, streamers, and zonal flows, are presented.

First, vortex structures in the slab ETG turbulence are investigated, including comparisons with those in the slab ITG case. Depending on parameters which determine the growth rate of linear ETG modes, two different flow structures are observed, i.e., statistically steady turbulence with a weak zonal flow and coherent vortex streets along a strong zonal flow. The former involves many isolated vortices and their mergers with complicated motion, and leads to steady electron heat transport. When the latter is formed, the high wavenumber components of potential and temperature fluctuations are reduced, and the electron heat transport decreases significantly. It is found that the transport reduction is mainly associated with the phase matching between the potential and temperature fluctuations rather than the reduction of fluctuation amplitudes. A traveling wave solution of a Hasegawa-Mima type equation derived from the gyrokinetic equation with the electron temperature gradient agrees well with the coherent vortex streets found in the slab ETG turbulence.

Second, effects of parallel dynamics on transition of vortex structures and zonal flows, which are closely associated with transport reduction found in the slab ETG turbulence, are intensively examined. Numerical results show three different types of vortex structures, i.e., coherent vortex streets accompanied with the transport reduction, turbulent vortices with steady transport, and a zonal-flow-dominated state, depending on the relative magnitude of the parallel compression to the diamagnetic drift. In particular, the formation of coherent vortex streets is correlated with strong generation of zonal flows for the cases with weak parallel compression, even though the maximum growth rate of linear ETG modes is relatively large. A physical mechanism of the secondary growth of zonal flows is discussed based on the modulational instability analysis with a truncated fluid model, where the parallel dynamics with acoustic modes is incorporated. The modulational instability for zonal flows is found to be stabilized by the effect of the finite parallel compression. The theoretical analysis

qualitatively agrees with the secondary growth of zonal flows found in the slab ETG turbulence simulations, where the transition of vortex structures is observed.

Finally, the investigations of vortex structures and zonal flows are extended to toroidal ITG and ETG turbulence by means of five-dimensional nonlinear gyrokinetic simulations. In the steady state, the formation of the strong zonal flow is observed in the toroidal ITG turbulence, while the radially elongated streamers, which yield the significant enhancement of heat transport, develop in the toroidal ETG case. Gyrokinetic entropy balance relations for zonal and non-zonal modes, and the nonlinear entropy transfer function, which is regarded as a kinetic extension of the zonal-flow energy production due to the hydrodynamic Reynolds stress, are carefully examined. The different entropy transfer processes in saturation and steady phases are revealed for the ITG turbulence. The entropy transfer from non-zonal to zonal modes is substantial in the saturation phase of the instability growth, while the entropy variable of the low radial-wavenumber modes driving the heat transport are successively transferred to the higher radial-wavenumber modes with less turbulent heat flux via the non-local interaction with zonal flows in the steady phase. On the other hand, in both the saturation and steady phases of the ETG turbulence, the role of zonal flows in the entropy transfer to the higher radial-wavenumber modes is much weaker than that in the ITG case. Instead, the nearly isotropic entropy transfer within the low wavenumber modes occurs dominantly through the nonlinear interactions among non-zonal modes.

The formation of vortices and zonal flows, and the related entropy transfer processes in the ITG and ETG turbulence are comprehensively examined in this study, then the detailed mechanisms of the turbulence suppression due to the nonlinear interactions with zonal flows are clarified in the framework of kinetic theory. The results obtained by a novel method of the entropy transfer analysis provide one with not only deeper understandings of the fundamental physics of the turbulent transport and zonal flows, but fruitful suggestions for advanced turbulence measurement methods such as the bicoherence analysis.

博士論文の審査結果の要旨

電子温度勾配 (ETG) やイオン温度勾配 (ITG) などに起因する微視的不安定性により駆動されるプラズマ乱流とそれによる粒子・運動量・熱の輸送は核融合プラズマ研究の最重要課題の一つであり、その機構解明のために運動論的非線形シミュレーションが近年精力的に進められている。本論文で出願者は、多次元位相空間を扱うジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーションにおいて、乱流輸送低減を伴う ETG 乱流渦の自発的な秩序構造形成を新たに見出すとともに、従来は注目されなかった ETG 乱流による二次的な帯状流形成の重要性を理論およびシミュレーションの両面から明らかにした。さらに大規模シミュレーションにより得られた粒子分布関数から揺動エントロピーを求め、ITG および ETG 乱流における帯状流と乱流揺動の非線形相互作用過程を詳細に解析することにより、ITG 乱流における乱流輸送抑制をもたらす帯状流を介した連鎖的なエントロピー伝達機構の存在を明瞭に示すことに初めて成功した。

論文の第 1 章では研究の背景と目的が述べられ、第 2 章ではジャイロ運動論的方程式などの理論関係式が整理されている。第 3 章では、スラブ配位における ETG 乱流のジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーション結果が主に報告されている。ETG 乱流の統計的定常状態として、従来から知られていた弱い帯状流を伴う乱流状態以外に、より強い帯状流に沿った秩序渦列が自発的に出現することを、出願者は運動論的シミュレーションにより初めて見出した。あわせて、秩序渦列が形成されると熱輸送が顕著に低減することを示し、電子分布関数揺動の速度空間分布と静電ポテンシャルの位相差から、両者の位相が一致することにより熱輸送が低減することを明らかにした。さらに、ジャイロ運動論的方程式から導かれる流体方程式の定常移流解の十分条件を理論的に導き、形成された秩序渦列構造がその条件を満たすことを実証した。

第 4 章では、スラブ配位におけるさまざまな物理条件下での ETG 乱流のジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーション結果から、磁力線平行方向の圧縮性に依存して三種類の統計的定常状態（上述の秩序渦列と統計的定常乱流に加えて、ETG 不安定性の飽和以降の全時間帯で帯状流が支配的な状態）が存在することを新たに示し、平行圧縮性が弱い場合の非線形発展において帯状流の成長に伴って秩序渦列が形成されることを明らかにした。さらに出願者は帯状流の変調不安定性解析モデルを独自に構築し、シミュレーションで見られたように、平行圧縮性が帯状流の成長を抑制することを理論的に示した。

第 5 章では、トーラス配位およびスラブ配位での ITG 乱流および ETG 乱流の大規模なジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーション結果を用いて、波数空間におけるエントロピー伝達過程を解析している。出願者は、帯状流との非線形結合を介した連鎖的なエントロピー伝達機構が ITG 乱流に存在することを初めて定量的に明らかにし、減衰の強い短波長成分へのエントロピー伝達過程を帯状流による乱流抑制の新しい物理的描像として提示している。第 6 章は全体のまとめに充てられている。

以上のように、本論文は核融合プラズマ研究の重要課題であるプラズマ乱流に関する斬新な知見を与えるとともに、その理解を進展させるものであり、プラズマ閉じ込め改善に向けた今後の研究の発展に大きく寄与することが期待される。よって、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し、合格であると判定した。