

境界から熱的に駆動される静電プラズマ乱流の構造形成

学生証番号 47-126064 氏名 大野 裕司
(指導教員 吉田 善章 教授)

Key Words: drift wave; zonal flow; inverse energy cascade; baroclinic effect; thermal drive

核融合プラズマにおける構造形成は、閉じ込めの改善や劣化をもたらすとして注目されている。例えば zonal flow と呼ばれるポロイダル方向への対流構造は、トカマクの内部と外部との熱輸送を阻害し、閉じ込めを改善すると考えられている。

このような乱流中の構造形成は、2次元乱流であればエネルギーの逆カスケードによって説明される。逆カスケードによってエネルギーは低波数、すなわち大規模な構造へ集中する。その逆カスケードされるエネルギーは、プラズマのように力学的なエネルギー入力がない場合、傾圧効果によって入力される。そして傾圧効果によるエネルギー入力の源になるのは、熱 $\delta Q = T ds$ である。以上のように、逆カスケードによる構造形成と傾圧効果、そして熱の間には深い関わりがある。さらに核融合プラズマのような乱流は開放系であり、系の外から境界を通じて熱が入力することが重要である。このような視点に立った研究には熱力学モデルによるもの [1] があるが、本研究ではより直接的に、プラズマの運動方程式と熱輸送とを組み合わせた解析をおこなった。

本研究ではまず、傾圧効果を含んだドリフト波方程式（傾圧 Hasegawa-Mima 方程式 [2]）の構造形成に関して数値計算によって調べた。このドリフト波方程式は傾圧効果に起因する線形不安定性を持っており、背景の温度や密度の勾配によって乱流は成長する。エネルギーで重み付けした平均波数の時間発展を見ることで、エネルギーの逆カスケードによって大規模構造が形成されていることを確認した。そして背景の温度や密度の勾配を変化させて計算することで、これまでのドリフト波方程式ではあまり考慮されていなかった密度勾配が、zonal flow などの構造形成に大きく影響することが明らかになった。

続いて、境界から熱が流入するということの定式化をおこなった。よく用いられる Dirichlet 境界条件や周期境界条件のようなものではこれが実現できないので、本研究では新たな境界条件を考案した。そのために、Hamilton 形式と呼ばれる、非散逸でかつ境界が閉じている場合に成立する概念を利用した。その中では Hamiltonian と呼ばれる保存量があり、Hamiltonian は乱流のエネルギーの項と背景の勾配による項からなっている。乱流のエネルギーは線形不安定性によって成長するので、Hamiltonian の残りの部分が熱エネルギーに相当すると考えられる。そこで、その熱エネルギーの対流を熱流束と考え、境界で値を制御するという境界条件を定式化した。この熱流束を制御するという境界条件を高温側（トカマクの内側）に設定した。低温側（トカマクの外側）では熱浴があると想定し、その中では乱流が減衰するという方程式を設定して計算した。

以上のような定式化のもとで、高温境界での熱流束の値を制御した計算をおこなった。まず zonal flow が形成されている状態まで計算し、その後で境界から流入する熱流束を制御した。本研究で設定した加熱量は、トカマクを想定して評価すると、キロワットからメガワット程度のオーダーになっている。乱流がもともと持っていたエネルギーの総量と同程度か、それよりも大きな加熱をもたらすような熱流束の値のときに背景の勾配は増加し、熱流束の値が小さいときには背景勾配は減少するという結果が得られた。

参考文献

- [1] Z. Yoshida and S. M. Mahajan, Phys. Plasmas **15**, 032307 (2008).
- [2] 川面洋平, 東京大学大学院 博士論文 (2013).