

平衡プラズマ流効果を取り入れた乱流-帯状流相互作用の変調不安定性解析

Modulational instability analysis of interaction between turbulence and zonal flow including mean plasma flow effect

鷓沢 憲 [1]; 岸本 泰明 [1]; 李 継全 [2]

Ken Uzawa[1]; Yasuaki Kishimoto[1]; Jiquan Li[2]

[1] 京大・エネ科; [2] 中国西南物理研究院

[1] none; [2] SWIP

一般に、トカマクを始めとした核融合プラズマ実験装置で観測される粒子・熱輸送レベルは、元来の簡潔な輸送理論(古典及び新古典輸送理論)で予言される値よりも遥かに大きい。この輸送は異常輸送と呼ばれ、磁化プラズマ中に普遍的に存在する密度勾配や温度勾配により引き起こされる微視的なプラズマ乱流がその原因であるとされる。近年の核融合理論・シミュレーション研究により、乱流から変調過程を通じ非線形的に生じた帯状流やストリーマーと呼ばれる巨視的な構造が、乱流輸送に重要な役割を果たすことが示されている。特に、ポロイダル・トロイダル方向に空間対称性を持つ流れである帯状流は、乱流輸送を軽減する働きがあると考えられ注目を浴びている。同様の構造は、雲層の風速が南北方向と比較し東西方向が卓越している木星型惑星や地球型惑星の一部の大気構造(偏西風や金星のスーパーローテーションなど)に見られ、我々の世界に普遍的な構造であると考えられる。

帯状流に加え、プラズマ中には新古典輸送レベルの平衡流や、乱流のスケールとは異なるスケールの平衡流が存在する。一般に平衡流はそのシアで乱流渦の相関長を短くすることにより、帯状流同様に乱流輸送に対し直接的な抑制効果があると考えられる。したがって平衡流は輸送を制御する外部パラメータの候補の一つとして考えられ、平衡流下での帯状流生成の解析は実験の見地からも重要な研究と位置づけられる。Kim と Diamond は、変調不安定性解析の一つである Wave Kinetic Equation 法で、平衡流が帯状流生成に対し抑制効果があることを示した [1]。しかし、Wave Kinetic Equation 法は弱シアの仮定の下で展開された理論であり、帯状流の成長率が shearing rate と同程度の強シア下で同様の議論をすることは適当ではないと考えられる。また Wave Kinetic Equation method で仮定されている乱流と帯状流との波数のスケール分離が明確にできない場合も当然存在し、そのような場合には、スケール分離の仮定を必要としないモード間結合に注目する方が有用であると考えられる。

本研究で講演者らは、以前 Li と岸本によりなされた短波長の ETG 乱流-帯状流系の変調不安定性解析を平衡流を含むそれに拡張し、帯状流の複素周波数の分散関係を導いた。各々の波を平面波と仮定、ETG 乱流を記述する方程式として Hasegawa-Mima (HM) 方程式 [3] を用い、座標はスラブ座標を用いた。平衡流の時空間スケールは任意に取ることができるが、今回は例としてイオン温度勾配 (ITG) 駆動の帯状流を考えた。計算の結果、平衡流は帯状流の線形成長率に対し抑制効果があることが示された。これは弱シア下での Kim と Diamond の結果と一致し、平衡流は弱シア・強シア下双方で帯状流生成に対し抑制効果があることを示唆している。平衡流の波数が短波長、大振幅になるにしたがい帯状流生成に対する抑制効果が強まることを示され、線形成長率に関する減衰表式が導かれた。

また、帯状流の線形成長率が実周波数の大きさに比例して減少することに着目し、抑制メカニズムが帯状流の実周波数と深い関連性があると考えた。そこで全体の変調過程から平衡流を含む局所的な変調過程を取り出し、その変調不安定性解析を行った。その結果、乱流-帯状流系に平衡流による非共鳴な強制振動が加わることで、帯状流の線形成長率が減衰するという知見が得られた。

最後に、モデル方程式である HM 方程式を波数空間で数値的に解くことで、変調不安定性解析の妥当性をチェックした。平衡流は乱流を直接的に減衰すると考えられるが、数値的に得られた乱流の減衰率は、変調不安定性解析によって得られた帯状流の減衰率と比較すると同程度と見積もられた。さらに、変調不安定性解析で打ち切られた高次の側帯波の帯状流生成に対する影響を調べ、その影響が小さいことを示した。以上より、平衡流を含んだ乱流-帯状流系における変調不安定性解析の妥当性が保たれていることを示した。

[1] E. Kim and P. Diamond, Phys. Plasmas 10, 1698 (2003).

[2] J. Q. Li and Y. Kishimoto, Phys. Plasmas 11, 1493 (2004).

[3] A. Hasegawa and K. Mima Phys. Fluid 21, 87 (1978).