

## ジャイロ運動論シミュレーションに基づく

## コヒーレント帯状流の時空間ダイナミクス

日大生産工(院) ○小澤 一隆      日大生産工 佐々木 真  
核融合研 小林 達哉

## 1. 背景

磁場閉じ込めプラズマにおける乱流輸送の抑制には、トロイダル及びポロイダル対称( $m = n = 0$ )の電位揺動によって生じる帯状流(ZFs)、その高周波分枝である測地線音波(GAMs)が重要な役割を果たす[1,2]。近年の乱流シミュレーションにおいて乱流の弾道伝播や空間局在が観測されており、帯状流の乱流捕捉効果が指摘されている[3,4]。特に、磁気面のねじれを特徴づけるパラメータである安全係数 $q$ は帯状流の空間構造や自発的な構造形成に強く影響を及ぼすことが知られており[5,6]、 $q$ 分布を変化させることで帯状流の形成・特性を制御できる可能性が理論やシミュレーションの両面から示唆されている。このように帯状流と安全係数の依存性を明らかにすることは、乱流の弾道伝播の機構理解に指針を与える上で極めて重要である。本研究では、ジャイロ運動論的シミュレーションコードを用いて、安全係数をパラメータとして掃引した非線形シミュレーションを実施し、帯状流の遷移過程やイオン音波の励起及び、乱流との相互作用ダイナミクスを解析した。

## 2. 解析データ

本研究の解析対象データとしてジャイロ運動論に基づくシミュレーションであるGyroKinetic Vlasov code (GKV code)を用いる[7]。GKVは、トカマク及びヘリカル系プラズマにおける微視的乱流輸送現象や帯状流を解析するためのシミュレーションコードである。このコードでは、ある磁力線近傍のフラックスチューブをモデル化[8]し、局所的な密度・温度勾配などで定式化された分布関数に関するジャイロ運動論的方程式を数値的に解いている。本コードが解く基本方程式は、荷電粒子の分布関数 $f = f_0 + \delta f$ に対する線形化された方程式であり、実空間3次元、速度空間2次元からなる5次元の位相空間上で時間発展を追跡することにより、プラズマ乱流や帯状流の時空間構造を

高精度に再現する。本研究では、GKVシミュレーションの主要パラメータをCyclone Base Case (CBC)[9]に基づいて計算を行い、安全係数の変化に伴う静電ポテンシャルデータを解析した。

## 3. 安全係数依存性の空間分布

安全係数を変化させた時の静電ポテンシャルと乱流変調強度の周波数スペクトルをFig. 1に示す。乱流変調強度は、帯状流によるシアにより、乱流の振幅や空間分布の特性が変動する成分である。静電ポテンシャルでは安全係数 $q$ が低い領域ではZFsが支配的で、高い領域ではGAMsが支配的なのが確認できた。乱流変調強度でも同様な結果が得られた。

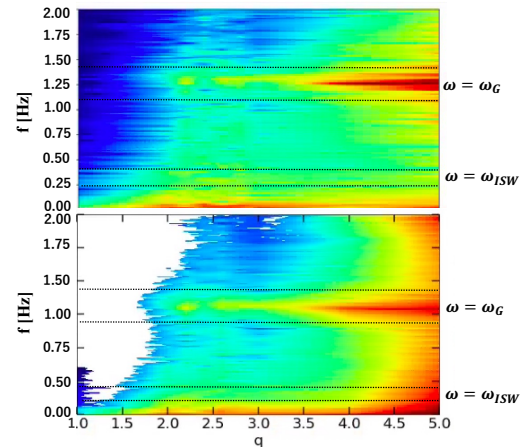


Fig.1 静電ポテンシャル(上)と乱流変調強度(下)の安全係数  $q$  の空間分布。横軸：安全係数、縦軸：周波数。

## 4. 乱流とイオン音波の時空間構造

低周波帯状流から測地線音波に遷移する過程では乱流の弾道伝播が観測された。 $q = 2$ 付近の周波数スペクトルでは、これら帯状流成分とは異なる低周波領域で顕著なピークを確認した。このピークは理論的に予測されるイオン音波の領域[10]と一致しており、新たなコヒーレント構造の存在を示唆している。イオン音波

は、プラズマ中のイオンによって生じる音波である。さらに周波数解析を通じてこの領域に対応するイオン音波と乱流の時空間構造を抽出

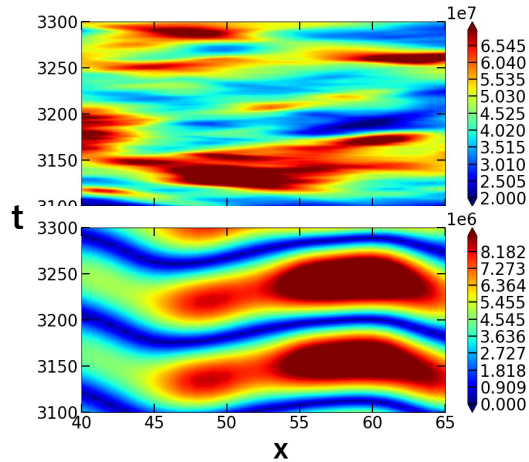


Fig.2 乱流変調強度(上)とイオン音波(下)の時空間的挙動。横軸：空間、縦軸：時間

した。得られた時空間構造をFig. 2に示す。Fig. 2より、イオン音波と乱流変調強度が同速度で伝播している構造が確認できた。これは乱流の変調成分がイオン音波の振動と非線形的に相互作用し局所的に弾道伝播をしている可能性を示唆している。

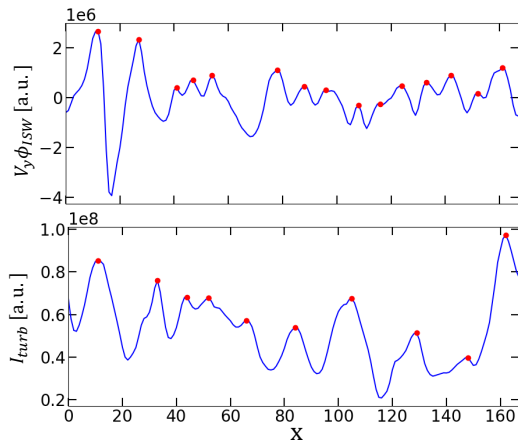


Fig.3 特定の時間における空間構造 (上図)イオン音波、(下図)乱流変調強度

さらに特定の時間における空間分布を解析した。特定のtにおける空間分布をFig. 3に示す。時間的に固定した断面においても同様の波数構造が確認できる。イオン音波成分が径方向に沿って位相を保ちながら伝播していることがわかる。これらの結果から、時間・空間領域の両方においてイオン音波が乱流と強く結合し

て、乱流の弾道伝播に影響していることが示唆される。

## 5. まとめ

本研究では、ジャイロ運動論に基づくGKVシミュレーションコードを用いて、安全係数 $q$ をパラメータとした非線形シミュレーションを実施し、帯状流及び測地線音波の遷移過程における乱流の時空間ダイナミクスを解析した。安全係数 $q$ の増加に伴い、低周波帯状流から測地線音波が支配的となる遷移が明瞭に現れることを確認した。また、遷移過程において、これら帯状流とは異なる周波数領域に顕著なピークが現れ、理論的に予測されるイオン音波の領域と一致することを示した。周波数解析による時空間構造の抽出より、イオン音波と乱流変調強度が空間方向には同様の波数で、時間方向には同様な周期で伝播している構造が確認でき、今後の詳細な解析が待たれる。

以上の解析から、低周波帯状流・イオン音波・測地線音波という異なるモード間の非線形相互作用が乱流輸送のダイナミクスに寄与していることがわかった。今後は、空間的な相関を定量的に評価し、他種の物理量を用いて弾道伝播の構造を評価していく。

## 参考文献

- 1) P.H. Diamond, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005).
- 2) N. Winsor, et al., Phys. Fluids **11**, 2448 (1968).
- 3) M. Sasaki, et al., Phys. Plasmas **25**, 012313 (2018).
- 4) X. Garbet, et al., Phys. Plasmas **28**, 042305 (2021).
- 5) D.K. Gupta, et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 125002 (2006).
- 6) N. Miyato, et al., Phys. Plasmas **11**, 5557 (2004).
- 7) T.H. Watanabe, and H. Sugama, Nucl. Fusion **46**, 24 (2005).
- 8) M.A. Beer, et al., Phys. Plasmas **2**, 2687 (1995).
- 9) A.M. Dimits, et al., Phys. Plasmas **7**, 969 (2000).
- 10) Z. Gao, et al., Phys. Plasmas **15**, 072511 (2008).