

# ジャイロ運動論シミュレーションによる 位相空間分布関数のダイナミクス解析

日大生産工(院) ○原 遥平 日大生産工 佐々木 真

## 1. 背景

核融合の実用化において、高温プラズマの制御が重要な課題の一つである。高温プラズマでは温度勾配が強い乱流を引き起こし、エネルギーや粒子の輸送を支配する[1]。したがって乱流輸送の理解が制御実現に不可欠である。また、高温化に伴い衝突頻度が低下することで波動粒子相互作用が顕著となり、乱流の性質そのものに影響を与える。この相互作用に起因するランダウ減衰は低周波域では観測が報告されている[2]一方、高周波域での直接観測は未だ十分に確立していない。ゆえに、高周波ランダウ減衰の直接観測の確立には、波動粒子相互作用が位相空間および実空間に与える影響をシミュレーションで解析し、その知見を直接観測に還元するアプローチが必要になってくる。そのため、本研究では、ジャイロ運動論に基づく運動論シミュレーション[3]を用いて、この波動粒子相互作用の影響を波と粒子の共鳴速度に着目し、位相空間分布関数のダイナミクスを解析した。磁場形状を特徴づけるパラメータである安全係数  $q$  を変化させることで、乱流によって形成される帯状流構造の分岐を再現し、その際の位相空間構造の違いを調査した。

## 2. 解析データ

本研究では、ジャイロ運動論に基づくシミュレーションコードである Gyrokinetic Vlasov Simulation Code (GKVコード) [3]を用いた。GKVコードは、トカマクおよびヘリカル型プラズマ中における乱流やゾーナルフローの時間発展を解析する際になどに用いられるコードである。計算では、磁力線近傍をフラックスチューブ座標[4]でモデル化された温度や密度といった背景分布を固定した条件のもとで、空間3次元  $(x, y, z)$  と速度空間2次元  $(v_\perp, v_\parallel)$  からなる5次元位相空間を解いている。ここで、 $v_\perp, v_\parallel$  はそれぞれ磁場に垂直、平行な速度座標に対応する。本研究では、イオン温度の空間不均一性に起因する乱流が発生する場合の非線形計算を実行した。さらに、安全係数を変化させることで発生する帯状流構造の分岐に着目し、その際に位相空間構造がどのように変化するかを解析した。

## 3. 安全係数変化による帯状流分岐

本章では、安全係数  $q$  の変化に対する静電ポテンシャル  $\phi$  の帯状流成分の周波数スペクトルを比較する。Fig.1 は、横軸に角周波数  $\omega$ 、縦軸にパワースペクトル  $|\phi(\omega)|^2$  を取り、 $q$  を変化させたときのスペクトルを示す図である。Fig.1 より、 $q=1$  では  $\omega=0$  に最も顕著なピークが現れ、静的な帯状流が支配的であることが分かる。一方、 $q=5$  ではピークがより高周波側に移り、これは GAM 周波数に対応する。

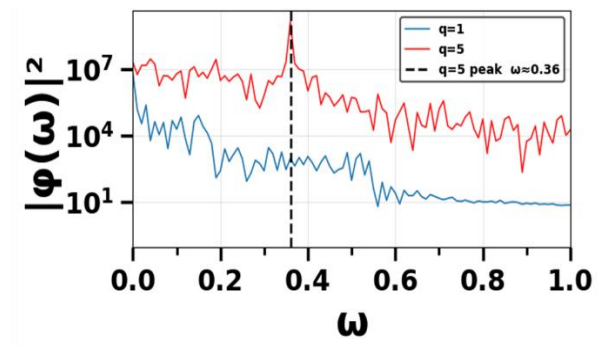


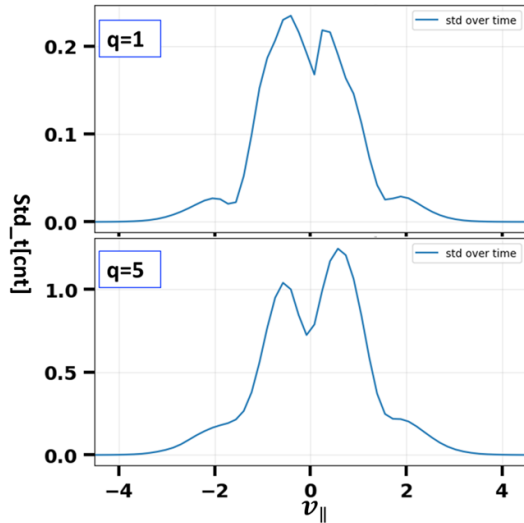
Fig.1 静電ポテンシャルのパワースペクトル  
青線： $q=1$  赤線： $q=5$  に対応。

## 4. 位相空間構造

GAM 周波数近傍では粒子と波の共鳴が起きる。したがって共鳴点付近では位相空間のゆらぎが増大すると予想される。そこで、本研究では、明確な共鳴点が現れる場合と現れない場合を比較し、その差異が位相空間構造および実空間に与える影響を磁力線方向座標  $z$  と磁力線方向速度  $v_\parallel$  に着目して、検討した。Fig.2 は、抽出した  $z$  ごとの速度分布関数の揺らぎの中から任意の  $z$  を取り出し、時間内に分布関数がどのくらい振動したかを速度ごとに標準偏差をとった。その結果、 $v_\parallel=1$  付近、つまり熱速度付近において強い揺動が存在していることが分かった。

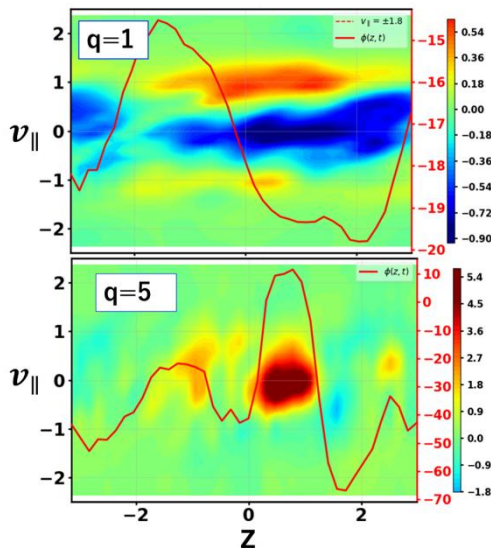
Analysis on Dynamics of Phase-Space Distribution Function  
based on Gyrokinetic Simulations

Yohei Hara and Makoto Sasaki



**Fig.2 速度分布関数揺動標準偏差**  
(上図)安全係数  $q=1$  (下図)安全係数  $q=5$  に対応。

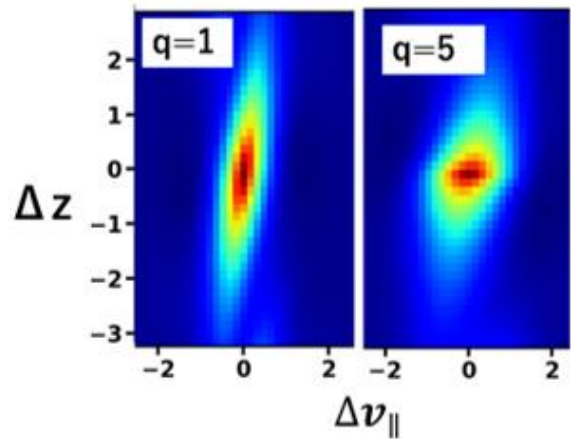
Fig.3 は、同一時刻における分布関数揺らぎの位相空間構造を安全係数  $q$  ごとに比較したものである。いずれの  $q$  においても分布は一樣ではなく、 $z$ - $v_{\parallel}$  面上に局在した帯状・斑状の増減が確認される。さらに、位相空間上に静電ポテンシャルを重ね描きすると、分布関数が大きい領域でポテンシャルも高く、ポアソン関係と整合的である。これらの局在は、GAM 近傍での波と粒子の共鳴により特定の速度帯で相互作用し、位相空間に渦状構造が形成される可能性を示唆する。



**Fig.3 位相空間構造スナップショット**  
上図:  $q=1$  下図:  $q=5$   
赤線: 静電ポテンシャルに対応。

Fig.4 では、磁力線方向  $z$  と磁力線方向速度の二

次元自己相関を評価した。横軸は速度の差  $\Delta v_{\parallel}$ 、縦軸は位置の差  $\Delta z$  を表す。原点は同一点の自己相関である。 $q=1$  では中心ピークが細く、 $\Delta v_{\parallel}$  方向への広がりが小さいことから、変動は限られた速度帯および近傍の位置に主に集中していることが分かる。一方、 $q=5$  では中心ピークが太く、 $\Delta v_{\parallel}$  および  $\Delta z$  の両方向に裾が広がり、ピーク軸がわずかに傾く様子が確認された。これは、速度の変化に伴って位置も同時に変化する傾向が強まり、変動がより広い速度帯や離れた位置にまで及んでいることを示唆している。



**Fig.4  $z$ - $v_{\parallel}$  二次元相関**  
左図:  $q=1$  右図:  $q=5$  に対応。

## 5. まとめと展望

本研究では、磁場形成に関わるパラメータである安全係数  $q$  を変化させ、帯状流構造の分岐を確認した。位相空間分布関数のダイナミクスを詳細に解析し、分布関数の速度揺動を抽出した。その結果、熱速度近傍で揺らぎが顕著に強く、位相空間上に渦状の局在構造が形成されていることが明らかとなった。さらに、磁力線方向の速度と座標の二次元相関を評価することで、位相空間構造の解像を高めることができた。今後は、得られた速度揺動および位相空間構造から GAM 成分や ZF 成分を抽出し、調査を進めていく。

## 参考文献

- 1) P.H. Diamond et al., Modern Plasma Physics vol.1 Physical Kinetics of Turbulent Plasmas (Cambridge University Press, Cambridge, 2011).
- 2) K. Ida et al., Commun. Phys. 5, 228 (2022).
- 3) T.H. Watanabe, and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006)
- 4) M. A. Beer, et al., Phys. Plasmas 2, 2687(1995)