

乱流弾道伝搬に関する理論モデルの検証方法の提案

日大生産工 ○若林 佑真

日大生産工 佐々木 真

1. 背景

核融合炉を実現するためには、高温プラズマの閉じ込め性能を高める必要がある。しかし、トロイダル型プラズマ（トカマクやヘリカル装置）の磁気閉じ込め配位では、微視的な不安定性によって乱流が発生し、熱や粒子が外部へ漏れ出す異常輸送が引き起こされる。この異常輸送の抑制は、プラズマ研究における最重要課題の一つである。

近年、この乱流輸送を自発的に制御するメカニズムとして、径方向にせん断を持つ低周波の平均流である帯状流（Zonal Flow, ZF）の存在が注目されている。帯状流には、時間的に一定な成分（静的帯状流, ZF）と、時間的に振動する成分である測地線音波（Geodesic Acoustic Mode, GAM）の2種類が存在する。

波動運動論による乱流捕捉機構を考えると[1]、静的帯状流（ZF）は乱流を空間的に「局在化（捕捉）」させ、輸送を抑制すると予測されている[2]。一方、測地線音波（GAM）は乱流塊を空間的に「弾道伝播」させる可能性が示唆されている[3]。

本研究は、GAMと乱流の相互作用に焦点を当て、乱流捕捉の起こるパラメータ領域を明らかにすることを旨とする。

2. 手法

本研究では、プラズマ乱流の自己制御メカニズムを記述するために、部分的にトロイダル効果を考慮に入れた波動運動論シミュレーションを採用した。

このモデルは、乱流強度 I_k と、帯状流成分の空間・波数空間での時間発展を記述する。

乱流強度のダイナミクスは、位相空間での伝播とZFによるシアリング効果、および非線形飽和項を含む以下の運動論的方程式で記述される。

$$\partial_t I_k + v_g \partial_x I_k - \partial_x \omega_k \partial_{k_x} I_k = \gamma_L I_k - \Delta \omega I_k^2 \quad (1)$$

ここで、 v_g は乱流の群速度、 ω_k はドリフト波の周波数、 γ_k はドリフト波の線形成長率、 $\Delta \omega$ はドリフト波の非相関率である。ドリフト波周波数には、帯状流によるドップラーシフト効果が含まれており、この空間不均一性が乱流渦の変

形をもたらす。変形した乱流渦は、波数方向の分布の変化に対応し、分散関係を通じて乱流の群速度に影響する。この一連のプロセスによって乱流捕捉が生まれる。帯状流成分については、流れの励起とトロイダル効果によるZFとGAMのカップリングを考慮した連立方程式を使用する。特に、GAM成分はトロイダルカップリングの強さを表すパラメータ $\varepsilon_n = L n / R$ によって強く影響を受ける。ここで $L n$ は密度勾配長、 R は磁場曲率半径に対応する。

本研究では、GAMの周波数及び位相速度を制御すべく、トロイダル結合パラメータ ε_n の影響に焦点を当てる。問題設定としてシミュレーションにおいて、安全係数 q を2に固定した条件で、乱流の時間発展を追跡した。掃引パラメータでは ε_n を0.0707, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0の範囲で変化させて掃引し、各 ε_n における乱流の定常状態を調査した。

GAMの周波数 ω_{GAM} はモデル方程式における線形分散関係式によって、以下のように与えられる。

$$\omega_{GAM} \approx \pm \varepsilon_n \sqrt{2 + \frac{1}{q^2}} \quad (2)$$

この式から、GAMの周波数（振動速度）は ε_n に比例することが分かる。

3. 結果および検討

シミュレーションの結果、 ε_n の変化に伴い、プラズマ中の帯状流構造が劇的に変化した。 $\varepsilon_n = 0.0707$ の場合のスナップショットをFig.1に示す。乱流の位相空間分布関数は、位相空間内で渦を形成する様子が確認された。白線は、GAMのポロイダル速度に対応する。ポロイダル速度は、電子反磁性方向を正に取った場合、乱流はポロイダル速度の正の領域に局在することが分かった。GAMは時間とともに、 x 方向に速度一定で伝播するが、上記の空間位相関係は、保った形で乱流が伝播する。このようにGAMに捕捉された乱流は、空間方向に弾道伝播することが分かる。この時空間ダイナミクスは、[3]で予測されたものと一致する。

Proposal of a method for verifying theoretical models of turbulent ballistic propagation

YUMA Wakabayashi and MAKOTO Sasaki

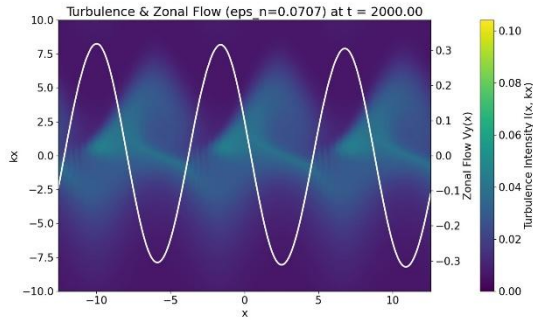


Fig.1: 乱流の位相空間分布のスナップショット。横軸は実空間、縦軸は波数空間に対応する。白線はGAMのポロイダル速度に対応する。

一方で、 $\varepsilon_n=0.3$ の場合は、GAMが安定化し、乱流捕捉が顕著にならなかった。飽和状態における乱流の位相空間分布をFig.2に示す。この場合ではGAMが弱く、波長もFig.1の場合と異なることがわかる。乱流分布をみると実空間方向にほぼ一様となっており、GAMのシアリング効果が効いていないことがわかる。この場合は、GAMによる乱流抑制の効果は弱いと推察される。定量的な評価は今後の課題である。

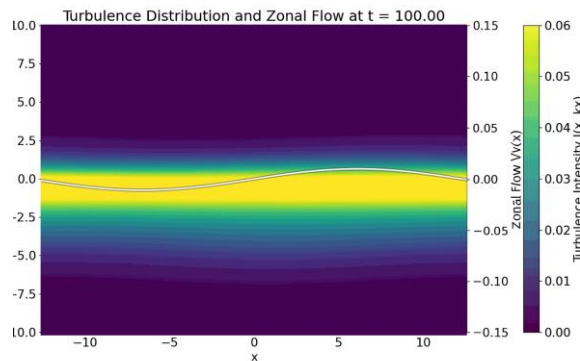


Fig.2: 乱流の位相空間分布のスナップショット。横軸は実空間、縦軸は波数空間に対応する。白線はGAMのポロイダル速度に対応する。

今後は、 ε_n の詳細なスキャンを行い、GAMの振幅の変化、乱流抑制効果などを定量化する。特に、GAMによる乱流捕捉効果が顕著になるケースとそうでないケースを決定づける要因を理論的に明らかにする。この時、乱流によるGAM内のバウンス周波数と乱流の非相関率及び線形成長率、乱流周波数などの相互関係に着目する。

4. まとめ

本研究では波動運動論シミュレーションを用いて、GAMと乱流の相互作用の解析を行った。特に、位相空間におけるダイナミクスを考慮することで、GAMと乱流の非線形共鳴効果として現れる乱流捕捉効果を取り込んだ。トロイダル効果が小さい場合、乱流捕捉効果により乱流は位相空間内で渦を形成し、GAMとともに伝播する様子を観察した。トロイダル効果を強くすると(GAM周波数をあげることに対応)、GAMが安定化し、乱流捕捉は起きなかった。今後は、トロイダル効果の詳細なスキャンを行い、乱流捕捉が生じるパラメータ領域を明らかにする。

参考文献

- [1] P. Kaw et al 2002 Plasma Phys. Control. Fusion 44 51
- [2] M.Sasaki et al Phys. Plasmas 28, 112304 (2021)
- [3] M.Sasaki et al Phys. Plasmas 25, 012316 (2018)