

# 熱源駆動型乱流のジャイロ運動論シミュレーション — 計算手法の開発とその応用 —

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 プラズマ・核融合基礎学分野  
今寺 賢志, 岸本 泰明, 李 継全

核融合プラズマでは一般に、急峻な温度勾配を自由エネルギー源として乱流が励起され、その結果、熱輸送が発生する。そのような輸送研究において、これまでは空間の限られた領域における流束と勾配の一意的関係に準拠した「局所輸送」の考え方が基本であった。しかし近年の熱源駆動型の乱流シミュレーションでは、臨界温度勾配近傍で熱が弾道的に伝搬し、プラズマ輸送が「非局所的」な様相を示すことが示唆されている。

そのようなダイナミクスをより正確に再現する方法として、磁力線による旋回運動を平均化した位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーションが世界的に広く用いられている。Vlasov シミュレーションは、加熱や衝突過程を直接的に導入できるため、熱源駆動型の乱流シミュレーションに適している一方で、位相空間の微細構造を保持したシミュレーションは容易ではなく、その離散化手法については十分注意する必要がある。

そのような Vlasov シミュレーションに適用する計算手法として、本研究では新たに「多重拘束マルチモーメント法」を提案する。この方法は、物理的に意味のある拘束条件の下で離散化を行うべきとの着想に基づいており、複数の物理モーメント値を参照することで精度を確保し (図 1)、更にそれらを支配方程式のモーメントに沿って独立に時間積分することで、物理的に意味のある多重の拘束条件を課している。

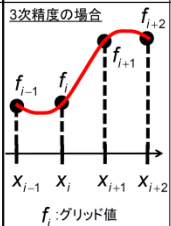
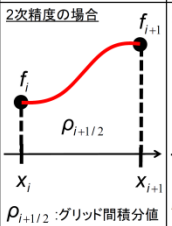
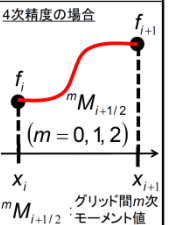
	従来の差分概念	保存型IDO法の概念	多重拘束マルチモーメント概念
独立変数	グリッド値のみ	グリッド値とグリッド間積分値	グリッド値とグリッド間モーメント値
精度の向上	参照する区間を拡げる	参照する区間を拡げる	参照するモーメントの次元を上げる
急峻な構造の捕捉	 <p>3次精度の場合 <math>f_{i-1}, f_i, f_{i+1}</math> を参照し、<math>f_{i+2}</math> を予測する。 <math>f_i</math>: グリッド値</p>	 <p>2次精度の場合 <math>f_i, f_{i+1}</math> と <math>\rho_{i+1/2}</math> を参照する。 <math>\rho_{i+1/2}</math>: グリッド間積分値</p>	 <p>4次精度の場合 <math>f_i, f_{i+1/2}^m, f_{i+1}</math> を参照する。 (<math>m = 0, 1, 2</math>) <math>f_{i+1/2}^m</math>: グリッド間m次モーメント値</p>

図 1: 従来の離散化概念と多重拘束マルチモーメント概念の特徴

そこで、本講演ではまず「①Vlasov シミュレーションにおける計算手法の変遷」について簡単にレビューしたのち、「②多重拘束マルチモーメント法の数値計算特性」について、安定性解析や実空間における剛体回転計算、および位相空間 2 次元 Vlasov シミュレーションの結果を基に説明する。そののち、「③多重拘束マルチモーメント法を実装したジャイロ運動論的 Vlasov コードによる熱源駆動型の乱流シミュレーションの解析結果」について報告する。③については特に、外部からの熱の入力を増加させても、乱流が励起される臨界勾配近傍で温度分布が硬直化される現象について、熱流束の確率密度分布やクロススペクトル、乱流と帯状流のエネルギー配分率の観点から考察する。