

井戸村 泰宏

原研那珂

IDOMURA Yasuhiro

JAERI, Naka

核融合プラズマ中の乱流輸送を引き起こす代表的な微視的不安定性としてドリフト波不安定性が挙げられるが、その不安定化機構としては波 - 粒子共鳴や粒子軌道効果といった運動論的な効果が本質的である。ジャイロ運動論では、ドリフト波のような低周波揺動と高周波のサイクロトロン運動の間で時間スケールの分離を仮定して永年摂動理論を適用することにより、本質的な運動論的效果を厳密に取り扱いつつ高周波現象を運動論方程式から消去することに成功している。この結果、ジャイロ運動論モデルでは系の特徴的な時間スケールが低周波現象と一致し、また、現象がジャイロ位相に依存しない 5 次元の位相空間で記述されるために解析が大幅に容易になる。このような解析モデルの進展と近年の急速な計算機性能の発展が相まって、ジャイロ運動論モデルに基づく第一原理的なアプローチによりトラスプラズマ全領域にわたる乱流輸送現象を直接模擬しようという機運が高まりつつある。ジャイロ運動論的シミュレーションの手法としては、現在、粒子 (Lagrangian) コードと Vlasov (Eulerian) コードの 2 つのアプローチが存在する。本研究で採用してきた粒子コードでは 5 次元位相空間にばら撒いた多数の粒子により分布関数を表現するため粒子ノイズが問題となるが、現在、標準的な手法となっている δf 法では、摂動分布関数 δf のみを粒子で表現することにより大幅な粒子ノイズの低減を実現しており、 $\delta n/n_0 \sim 1\%$ と非常に振幅の小さい微視的不安定性を精度良く模擬することに成功している。他方、Vlasov コードでは分布関数を 5 次元位相空間のグリッド上で離散化して数値流体力学 (CFD) スキームにより解き進めるため、数値拡散や数値振動を抑える高精度な CFD スキームを選択し、十分なグリッド点を用意する必要がある。現時点では、それぞれのモデルに一長一短があり、例えば、粒子コードの δf 法は保存系に対して開発された手法なので、衝突項や熱・粒子源を実装するのが非常に困難であるが、Vlasov コードではこういった問題に対し拡張性がある。逆に、粒子コードでは完全トラス配位のグローバルシミュレーションが実現しているのに対し、多くの Vlasov コードでは計算資源の制約により 1 本の磁力線に沿った局所領域をモデル化したフラックスチューブ配位を採用しているといった問題がある。本講演では、これまで開発を進めてきたジャイロ運動論的トロイダル粒子コード GT3D¹ の計算手法やイオン系・電子系乱流シミュレーションへの適応例を紹介するとともに、より現実的な乱流輸送解析へ向けたジャイロ運動論的シミュレーションの課題を議論する。また、CIP 法に基づき新たに開発したジャイロ運動論的 Vlasov コードと粒子コードの比較から、Vlasov コードによるグローバルシミュレーションの可能性を展望する。

¹ Y.Idomura, S.Tokuda, and Y.Kishimoto : Nucl. Fusion **43**, 234 (2003).