様々なプラズマ環境への応用に向けたジャイロ運動論PIC法の開発 Gyrokinetic Particle-in-cell scheme for various plasma environments

森高外征雄, Robert Hager, Michael Cole, Seung-Hoe Ku, Choong-Seock Chang, 石黒静児, 洲鎌英雄, 佐竹真介, 沼波政倫, 松岡清吉 MORITAKA Toseo, Robert HAGER, Michael COLE, Seung-Hoe KU, Choong-Seock CHANG, ISHIGURO Seiji, SUGAMA Hideo, SATAKE Shinsuke, NUNAMI Masanori, MATSUOKA Seikichi

自然科学研究機構 核融合科学研究所、総合研究大学院大学

National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences, The Graduate University for Advanced Study, SOKENDAI

プリンストンプラズマ物理研究所

Princeton Plasma Physics Laboratory

高温・希薄なプラズマでは、微視的な荷電 粒子の運動や静電・電磁揺動から、巨視的な 磁場構造の形成やエネルギー輸送などを含む 様々な時空間スケールの現象が、衝突による 強い緩和を受けることなく結びつくことによ って、興味深いダイナミクスが生み出されて いる。このようなプラズマ現象に対し、より 多くの素過程を考慮しながら、より巨視的な 現象を議論するための理論・シミュレーショ ンモデルが提案され、大型並列計算機への適 用が進められてきた。

ジャイロ運動論モデルは磁化プラズマ現象 を対象にジャイロ運動に対する体系的な粗視 化を行うことで、ジャイロ半径程度の空間解 像度で重要となる有限ラーマー半径効果や 動-粒子間の共鳴相互作用を運動論効果を含 めて自己無撞着に取り扱うことが可能であ る。ジャイロ運動そのものを解像する必要が ないため、運動論効果が重要となる巨視的現 象、例えば核融合プラズマ中の乱流輸送の解 析で有効である。本モデルは、核融合プラズ マにおける静電揺動の線形解析に応用された ほか、非線形発展や電磁揺動へとモデルの一 般化が進み、さらには太陽風プラズマの乱流 や磁気リコネクションといった宇宙プラズマ 現象にも応用が広がっている。

近年のジャイロ運動論シミュレーションの

進展として、核融合炉の炉心部分だけではなく 炉壁(ダイバータ)近傍を含む炉内全域を対象 とした全系シミュレーションの実現を目指し、 X-point Gyrokinetic Code (XGC) プロジェクト が進められている[1]。このようなシミュレーシ ョンモデルでは、ダイバータ近傍の静電場構造 やフラックスの非等方性、X点近傍の粒子損失 などを取り入れた精緻な熱負荷予測が可能にな るとともに、炉心領域への不純物輸送や輸送障 壁の形成に伴う閉じ込めの改善など炉心-周辺部 にまたがる現象の統一的な理解に有効である。 しかし、炉心部と周辺部ではプラズマ環境およ び磁場構造の違いが大きいため、様々な環境に 対応できるロバストなシミュレーション手法の 開発が求められる。

XGCの特徴の一つは非構造格子を用いた Particle-in-cell(PIC)法を用いていることであ る。プラズマの分布関数を計算粒子で表すこと で、速度空間を直接離散化するVlasov法よりも 計算コストが抑えられるとともに、磁場や境界 の構造に由来する数値不安定性に強い計算が可 能になる。一方、計算粒子の数が十分多くない 場合に数値ノイズが大きくなる。平衡状態また は粗視化した速度分布関数からのずれを重み付 き粒子で表現する"Hybrid Lagrangean"法を用い ることで、粒子ノイズを抑えた非平衡計算を可 能にしている[2,3]。静電・電磁揺動は非構造格 子上で表現される。格子形状は、平衡磁場も しくは容器形状に応じて生成するため、磁気 座標を直接用いることなく、磁場形状に対応 した方程式の離散化や粒子-格子間の補間が 可能である。このほか、ジャイロ運動論シミ ュレーションを基盤に、シース電場や原子・ 分子過程の簡単なモデルの組み込みも進めら れている。

ITERをはじめとしたトカマク核融合炉を 対象とした周辺部を含むジャイロ運動論シミ ュレーションでは、X点近傍の粒子損失やそ れに伴う静電場構造、周辺領域におけるポテ ンシャル障壁や乱流構造の形成がシミュレー ションで観測されてきた[4]。また、ダイバー タの熱負荷の評価では、従来のトカマク装置 で観測された熱負荷幅を再現するとともに、 ITERサイズの装置ではダイバータ近傍の乱 流生成により、熱負荷の集中が緩和されるこ とが予測されている[5]。

さらに、ヘリカル核融合炉への適用を目指 した開発も進められている[6]。ヘリカル核融 合炉では、炉心・周辺領域は接続長の長い磁 力線が絡み合ったErogdic層によって仕切ら れており、両者の相互作用はトカマク核融合 炉以上に複雑なものになると予測される。大 型ヘリカル装置は輸送障壁はErgodic層にま たがったものが観測されているが、この領域 の静電場構造や運動論的効果を扱うシミュレ ーション手法は確立されていない。講演で は、XGCの非軸対象な磁場構造への一般化に 向けた最近の計算手法開発を紹介し、ヘリカ ル磁場配位の炉心領域への適用例として、い くつかのベンチマーク計算[7,8]とポロイダル 回転のもとでのイオン温度勾配不安定性の線 形・準線形解析[9]について説明する。

 S. Ku, C. S. Chang, R. Hager et al., Phys. Plasmas 25, 056107 (2018)
S. Ku, R, Hager, C-S. Chang, J. Comput. Phys. 315, 467–475 (2016)
E. Yoon, C-S. Chang, Phys. Plasmas 21, 032503 (2014). [4] S. Ku, C-S. Chang, P. Diamond, Nucl. Fusion 49, 115021 (2009)

[5] C-S. Chang, S. Ku, A. Loarte et al. Nucl. Fusion 57, 116023. (2017).

[6] T. Moritaka, R. Hager, M. Cole et al., Plasma, 2 (2019) 179-200.

[7] M. D. J. Cole, R. Hager, T. Moritaka et al., Phys. Plasmas, 26 (2019) 082501.

[8] M. D. J. Cole, T. Moritaka, R. Hager et al., Phys. Plasmas, 27 (2020) 044501

[9] T. Moritaka, M.Cole, R. Hager et al., Accepted IAEA-FEC 2020.