

惑星磁気圏のグローバル粒子シミュレーション（に向けて）

藤本 桂三 (Beihang University)

太陽風-惑星磁気圏相互作用の解明は惑星磁気圏における大域的なプラズマダイナミクス（運動量・エネルギー輸送過程）を理解する上で非常に重要である。太陽風変動にともない、惑星磁気圏はそれに呼応する過渡的変動を受ける。そして、しばしばグローバルなプラズマ対流や磁場構造変化が発生し、磁気圏全体の力学的バランスが大きく変わる。特に、地球磁気圏におけるこのような現象は磁気圏サブストームと呼ばれ、極域におけるオーロラ発光や強いプラズマ加速をともなう、磁気圏物理学における最重要問題の1つとなっている。しかし、サブストームの発生機構やオーロラ発光を引き起こす粒子加速機構などは未だに十分には解明されていない。

太陽風と惑星磁気圏からなる系は、さまざまなスケールの物理過程が互いに相互作用しあう複雑系である。そのため、純粋理論や人工衛星による観測のみからそのダイナミクスを理解することは困難であり、数値シミュレーションを用いた理論モデルの構築が有力な研究手法となっている。従来のグローバルシミュレーションでは、計算機資源の制約のため、プラズマを磁気流体（MHD: Magnetohydrodynamics）として近似的に扱うことがほとんどであった。実際、惑星磁気圏のサイズは、一般的に、プラズマの粒子性が重要となる運動論スケールに比べて十分大きく、磁気流体近似が良く成り立つと考えられてきた。しかし、地球磁気圏のグローバル MHD シミュレーションでは、プラズマの運動論過程を規定する電気抵抗（粘性）モデルの与え方によって、大域的なダイナミクスが大きく変わることが知られている。このことは、マイクロ過程である運動論過程がマクロ過程である MHD 過程に大きな影響を与えることを示唆しており、マイクロとマクロを同時に記述する必要があることを指摘している。

一方、最近の急速な計算機性能の向上と、適合細分化格子（AMR: Adaptive Mesh Refinement）を用いた先進的なプラズマ粒子計算手法の確立により、地球磁気圏全体を粒子シミュレーションによって記述することが可能になりつつある。今回、我々は、磁気圏グローバル粒子シミュレーションの準備段階として、磁気圏ダイナミクスにおいて重要な役割を担う磁気リコネクション現象の大規模粒子シミュレーションを実施し、マイクロとマクロの結合過程を調べた。

まず、地球磁気圏スケールの2次元粒子シミュ

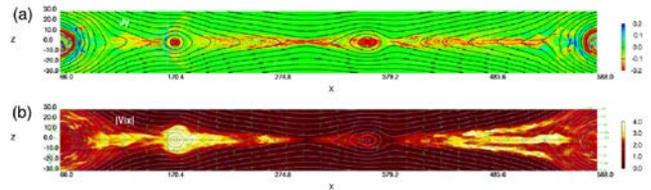


図1：2次元粒子シミュレーション結果。(a) 紙面垂直方向の電流密度分布と、(b) イオンのアウトフロー速度の絶対値。

レーションを実施し、磁気 X 線近傍のマイクロ過程が、リコネクションジェット下流域における大規模過程にどのように結合していくのかを調べた [1]。計算領域の大きさは $L_x \times L_z = 660\lambda_i \times 330\lambda_i$ (λ_i はイオン慣性長) とした。その結果、十分下流域においても、MHD リコネクション過程には漸近しないことが明らかになった (図1)。つまり、運動論リコネクション過程が MHD リコネクション過程とは本質的に異なることが示唆される。一方、大規模な3次元粒子シミュレーション ($L_x \times L_y \times L_z = 82\lambda_i \times 41\lambda_i \times 82\lambda_i$) では、電子慣性に起因するプラズマ不安定性が、MHD スケール ($\sim 10\lambda_i$) のアウトフロー構造を制御していることが明らかになった (図2) [2]。以上のことから、無衝突プラズマでは、運動論スケール (イオン慣性長) よりも十分大きな大規模過程であっても、必ずしも MHD 近似が妥当であるとは限らないことが示唆される。

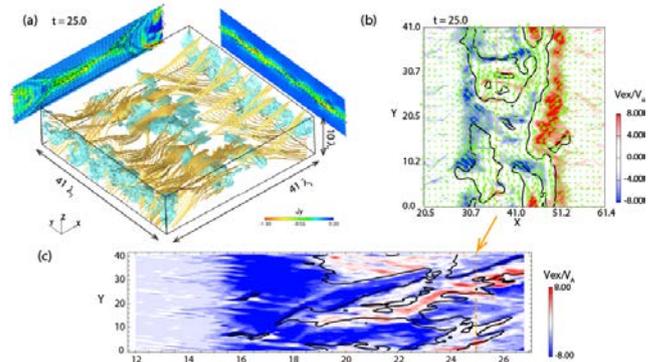


図2：3次元粒子シミュレーション結果。(a) 電流強度の等値面と磁力線、(b) 赤道面における電子アウトフロー速度、(c) 電子アウトフロー速度分布の時間発展。

参考文献

- [1] K. Fujimoto & M. Takamoto, Phys. Plasmas, 23, 012903, 2016.
- [2] K. Fujimoto, Geophys. Res. Lett., 43, 10557, 2016.