

研究課題名 宇宙プラズマの電磁ブラソフシミュレーション

利用者氏名(所属機関) 簗島 敬(海洋研究開発機構)

利用カテゴリ XC-B

成果の概要を記入してください。必要に応じてページを加えても構いませんが、pdf のファイルサイズの上限は2MB とします。

Write up your research report in this area. Total file size should be less than 2 MB in PDF format.

1. 目的

宇宙空間を満たすプラズマはほぼ無衝突状態であり、プラズマ粒子は集団的運動が誘導する電磁場を介して相互作用する。宇宙プラズマは粒子スケールから流体スケールに渡って異なる階層の現象を本質的に内包しており、階層間の相互作用が系全体の発展に重要な役割を果たしている。宇宙プラズマにおける階層現象の最たる例の一つが、太陽フレアなどの磁気エネルギー解放現象を引き起こす磁気リコネクションである。リコネクションでは、粒子スケールの散逸過程が鍵となって最終的には流体スケールの変動を駆動するため、散逸過程の詳細を明らかにすることがリコネクション研究の主目的の一つである。無衝突リコネクションの場合、粒子の運動論効果やプラズマ波動との相互作用が実効的な散逸を担っていると考えられる。一方で、衝突性リコネクションの散逸性 MHD シミュレーションから、リコネクションの発展には電気抵抗のみならず、粘性や熱伝導も重要な役割を果たすことがわかった (Minoshima et al. 2016)。この結果から類推すると、無衝突リコネクションにおける散逸過程の役割を理解するためには、従来の研究で精力的に調査されてきた実効的な電気抵抗の調査に加えて、実効的な粘性や熱伝導による運動量と熱の輸送についても調査する必要がある。

2. モデル

そこで本研究では、空間2次元、速度空間3次元の電磁ブラソフコードを用いた無衝突磁気リコネクションの大規模シミュレーションを実施する。ブラソフシミュレーションは位相空間分布の時間発展をオイラー的に追跡する手法である。従来の粒子法に比べて数値ノイズが少ないため、速度分布関数を積分して得られるモーメント量(密度、運動量、圧力)について、高精度のデータが取得できる。モーメント量や電磁場の分布を流体方程式と比較することで、実効的な輸送係数(電気抵抗、粘性、熱伝導)を計測し、リコネクションの非線形発展との関係を調べる。イオンと電子の質量比には1を採用することで、ホール項を無視する。ブラソフコードには、筑波大学計算科学研究センターと共同で開発した7次精度セミラグランジュ法 (Tanaka et al. 2017) を用いる。

3. 結果

図(a)はオームの法則の散逸項(非理想MHD項)の空間分布を示している。この時点で電流層は $X=20$ まで伸びており、電流層に比べて散逸領域は $0 < X < 10$ に局在化している。散逸項は一般化されたオームの法則の圧力項と慣性項の和とよく釣り合っていることが確かめられた。特に、圧力項(図b)が主として担っている。散逸領域の速度分布関数から、これはつなぎ変わった磁場に対する粒子のバウンス運動に起因している。図(c,d)はそれぞれ、 X 方向の運動量に作用するローレンツ力と圧力非対角成分の勾配の空間分布である。リコネクションジェットにはこれら2つの力が主な加速項と減速項として作用している。図(d)から、ジェットの運動量は進行方向と垂直方向(Y 方向)に輸送されていることがわかり、これは実効的な粘性による運動量輸送とみなすことができる。図(b,d)から、実効的な電気抵抗及び粘性を見積もった。その結果、両者はいずれも電流層の厚さで定義したレイノルズ数が10程度に相当し、電気抵抗は原点付近に局所化しているのに対し、粘性は下流に広く発生していた。よって、リコネクションジェットのダイナミクスを流体的に解釈する上で、電気抵抗に加えて粘性も重要な役割を果たしていることが示唆された。これは衝突性リコネクションの散逸性MHDシミュレーションと整合的である。

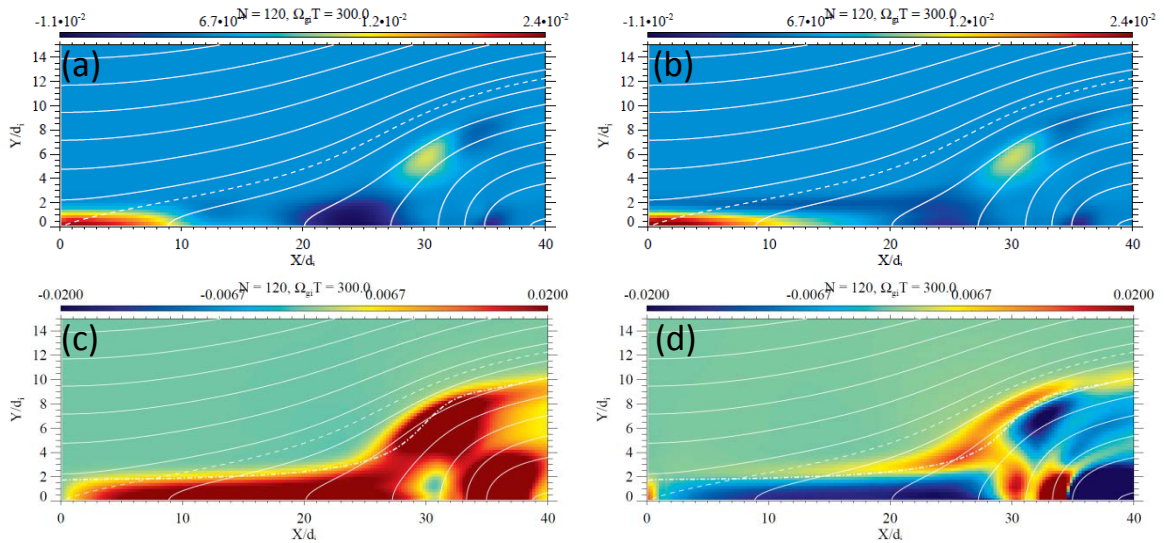


図 1 無衝突磁気リコネクションの様々な物理量の空間分布 (文中参照)。実線は磁力線、破線は開いた磁力線と閉じた磁力線の境界 (セパトロックス)

参考文献

Minoshima, T., Miyoshi, T., Imada, S. 2016, PoP, 23, 072122

Tanaka, S., Yoshikawa, K., Minoshima, T., Yoshida, N. 2017, ApJ, 849, 76