

平成29年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト 成果報告書

課題代表者：中村琢磨（オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所）、申請区分：新規（一般）

研究課題名：3次元粒子シミュレーションを用いた磁気リコネクションにおけるエネルギー輸送過程の研究

(Study on the energy transfer process in magnetic reconnection: Full particle simulations)

成果報告：

本研究では、オーロラサブストームへ繋がる磁気圏尾部におけるエネルギー解放を担う「磁気リコネクション」現象について、名古屋大学貴センターの運用する FX100 を用いた大規模3次元完全粒子シミュレーションを行った。これまでの磁気リコネクション研究では、磁気リコネクションを駆動するミクروسケールの拡散領域を対象としたものが多かったが、同 FX100 を用いた課題代表者らが昨年度に実行した大規模3次元完全粒子シミュレーションでは、拡散領域の外部で高速ジェット（リコネクションジェット）がマクروسケールに発達する過程を3次元効果を含み捉えることに成功した（下記関連研究1）。この計算により新たに、発達したジェットの先端領域に2次的なマイクロ領域が生み出され、そこで2次的に発生した Lower-hybrid drift instability (LHDI) が Ballooning/interchange instability (BICI) と呼ばれるプラズマ不安定と結合することで、先端領域が素早く乱流化がすることが示された。このような背景の下、本研究では、LHDI が強く発生しない条件下で同規模の計算を新たに実行することで、ジェット先端領域における LHDI の役割を系統的に理解することを試みた。具体的には、LHDI は密度差の大きい境界でより強く発達する傾向が知られていることから、昨年度の計算よりも背景領域の密度を大きくし、初期電流層と背景領域の密度比が 20 であった昨年度の計算に対し密度比が 3.3 となる設定の計算を実行した。このような密度比は一般的な磁気圏尾部の値より低い、実際に研究代表者らが研究を進める現在世界最大規模の磁気圏ミッションである NASA の MMS (Magnetospheric Multiscale) 衛星が本年度 2017 年 7 月 11 日に観測した磁気圏尾部リコネクションイベント（下記関連研究2）において実際に観測されている値に近く、現実的に起こりうる範囲の設定である。また、同観測イベント時には、AE (Auroral Electrojet) index がピーク時に 200nT 以下と磁気圏擾乱が非常に弱かったことも報告されている。

本シミュレーション結果を図1に示す。図1a, 1bに示されるように、密度比の大きいケースでのみ LHDI の成長に伴う強い電場の振動がリコネクションジェット先端領域に発生している。図1cは、主に LHDI の成長を示す y 成分の電場と主に BICI の成長を示す x 成分のイオンの速度の y 方向への振動強度の時間発展を示している。まず密度比の大きいケースでは、課題代表者らの過去の研究で示されたように、LHDI の強い成長（赤実線及び破線）に伴い BICI（青実線）が段階的に強く成長する様子が見られる。しかし一方、密度比が小さいケースでは、LHDI 及び BICI の弱い成長は見られるものの、振動強度は密度比が大きいケースに比べ2桁程度弱くなっている。これに関連して、図1dに示されるように、密度比が大きい場合のみ、2次元計算は見られない付加的な電子加熱が見られる。これは、ジェット先端領域で発生する電場の3次元的な振動により電子が付加的に加熱されるためである。また、密度比の違いによる別の効果として、図1dに見られる磁気エネルギーの減少率から明らかのように、密度比が大きい場合はリコネクションの成長そのものが速くなっている。これは、背景密度が低いことで、アルフベン速度が大きくなり、これに伴いリコネクションジェット及びインフロー速度が大きくなることによる。

これらの結果より、密度比が大きい場合（具体的には、背景密度が小さい、つまり磁気圏尾部においてはローブ領域の密度が低い場合）、(i) リコネクションの素早い成長、及び、(ii) リコネクションジェット先端領域の乱流化に伴う2次的な電子加熱が見られることで、磁気リコネクションに伴ってリコネクションの下流領域へ運ばれるエネルギーが大きくなる

可能性が示された。このことは、上述の磁気圏尾部電流層での密度比が小さいイベント時に磁気圏擾乱強度が小さかった点と関係している可能性があり、今後のより広いパラメータ範囲をカバーしたシミュレーション及び理論によるサーベイ研究及び統計的な観測研究が期待される。本年度は、12月のアカウント発行時から主に計算の実行及び解析を行い、今後上述の結果をまとめて国際雑誌へ投稿する計画である。

関連研究：

1. Nakamura, T. K. M., R. Nakamura, W. Baumjohann, T. Umeda, and I. Shinohara (2016), Three-dimensional development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 8356-8364, doi:10.1002/2016GL070215.
2. Nakamura, T. K. M., et al. (2018), New estimation methods of the reconnection rate using in-situ measurements, Paper presented at the European Geosciences Union (EGU) 2018 General Assembly, Vienna, Austria

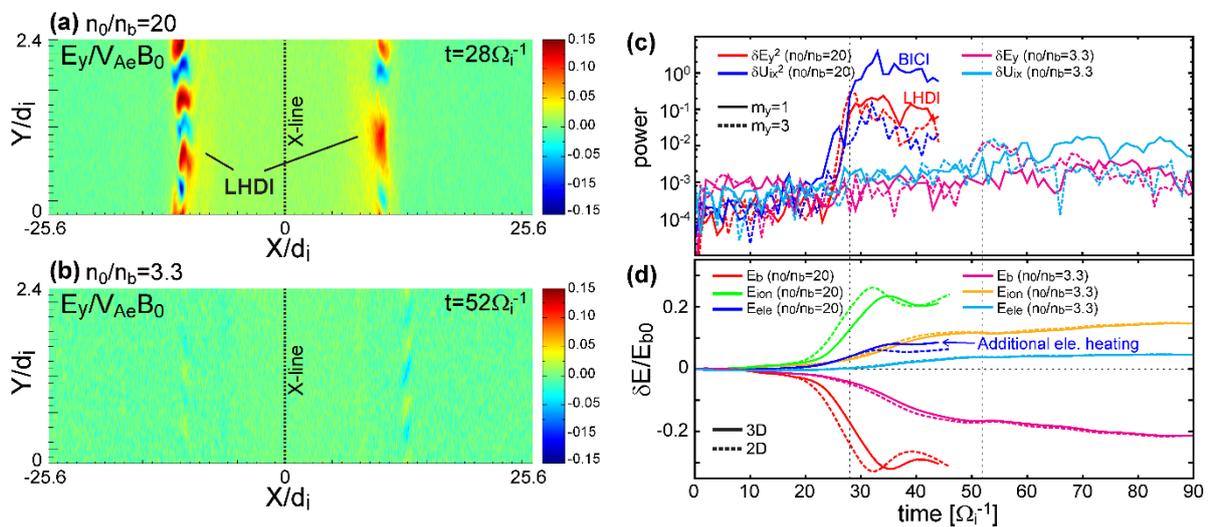


図1：(a, b) x - y 面における電場 y 成分 (E_y)。± X 方向に広がるジェット先端領域において、密度比 20 (a) の場合に密度比 3.3 (b) の場合に比べ遥かに大きい y 方向の振動が見られる。(c) E_y 成分及びイオンの速度場 U_{ix} 成分の $m_y=1$ (実線) 及び $m_y=3$ (破線) モードの時間発展。密度比が大きい場合にのみ顕著な振動が見られる。(d) 磁場、電子及びイオンのエネルギーの時間発展。破線は対応する同じ条件下での 2次元計算結果を示す。密度比が大きい場合にのみ、 ky モード発生後に磁場のエネルギーがより低く電子のエネルギーが高くなっている。