

2019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)

副代表者: 梅田隆行(名古屋大学・宇宙地球環境研究所)

共同研究者: 岡光夫(カリフォルニア大学バークレー校(米国、カリフォルニア州))

申請区分: 継続、応募区分: 一般

「粒子シミュレーションを用いた磁気リコネクションジェット先端領域の乱流化過程の研究」 (Study on the stability of the reconnection jet fronts by particle simulations)

成果報告:

本プロジェクトでは、2018年度に引き続き「磁気リコネクション」過程について、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用いた研究を行った。具体的には、磁気リコネクション過程において2次的に発生する乱流現象及びそれに伴うエネルギー変換過程の解明を目的とし、シミュレーション結果と線形解析及び人工衛星によるその場観測結果を比較した研究を行った。磁気リコネクションは、磁力線が繋ぎ変わることで蓄積された磁気エネルギーを爆発的にプラズマの運動また熱エネルギーに変換するプラズマ物理において最重要なエネルギー変換過程の1つであり、太陽系から銀河ジェットまで様々な領域で起こる爆発的なプラズマ現象において中心的な役割を果たすと考えられている。例えば、地球磁気圏においては、磁気リコネクションが磁気圏夜側領域に蓄積された磁気エネルギーを解放する事で、オーロラサブストームに代表される大規模な磁気圏擾乱が駆動されると考えられており、本過程におけるエネルギー変換過程を定量的に理解する事が、磁気圏物理を理解する上で最重要課題の1つとなっている。また、太陽物理においては、磁気リコネクションが太陽表面で起こるフレア爆発を駆動していると考えられている。このように、本過程におけるエネルギー変換過程の理解は、磁気圏や太陽表面など各単体領域の理解を超えて、太陽-地球系を包括的に捉えた宇宙天気という視点からも重要である。磁気圏や太陽表面で起こる磁気リコネクション過程は、電磁流体(MHD)スケールに発展する大規模な現象であるが、近年のコンピュータ資源また計算技術の発展により、粒子法を用いた運動論的シミュレーションで扱う事が可能になった。これにより、磁力線の繋ぎ変わりが起こる磁気拡散領域において運動論的スケールの物理がエネルギー変換に大きな役割を果たす事が示された[参考文献 1]。さらに課題代表者らの大規模3次元完全粒子シミュレーションにより、3次元性を考慮すると、磁気拡散領域だけでなく、拡散領域の外側のリコネクションジェット先端領域で3次的に成長する lower-hybrid drift instability(LHDI)が、付加的なエネルギー変換を起こす可能性が示された[参考文献 2]。

このような背景の下、本プロジェクトでは昨年度(2019年度)、課題代表者がFX100を使用して行った3次元完全粒子シミュレーションとNASAの国際磁気圏観測衛星ミッションMMSによる電子スケールのその場観測データ、及び、課題副代表者主導で開発した運動論的線形解析ツール[参考文献 3]を組み合わせる事で、ジェット先端領域で起こるLHDI乱流を系統的に調べた[成果発表 1,2]。手順としてはまず、シミュレーション結果と地球磁気圏尾部領域で2017年7月18日にDipolarization Frontと呼ばれるジェット先端領域を観測したMMS観測イベントを比較し(図1)、ジェット先端領域におけるLHDI乱流が磁気拡散領域に匹敵する強度のエネルギー変換を起こしている事、また、シミュレーションに見られるLHDI乱流が実際に磁気圏尾部で起こっている可能性を示した。さらに、シミュレーションでは再現できない現実的なパラメータの範囲で線形解析を行う事で(図2)、シミュレーションで見られるようなLHDI乱流が、磁気圏尾部で観測されたイベントだけでなく、地球磁気圏尾部から太陽フレアを含む幅広いパラメータ範囲で発生する可能性を示した。この事は、磁気リコネクションの発達に伴ってジェット先端領域で起こる強いエネルギー変換が、宇宙プラズマにおける幅広い領域で発生している可能性を示唆しており、地球磁気圏に限らず様々な領域への応用が期待できる。また本結果は、太陽フレアからオーロラサブストームまで太陽-地球系のエネルギー輸送において中心的な役割を果たす磁気リコネクション過程を定量的理解するにあたりジェット先端領域を考慮することの重要性を示しており、より正確な宇宙天気研究への応用も期待できる。本結果は、課題代表者が第一著者となり、本課題構成メンバー三者を共著者としてPhysical Review Lettersに出版された[成果発表 1]。

使用した計算機リソースについて、昨年度(2019年度)は、2018年度にFX100において「コア数: 12288(768ノード)、実計算時間: 120時間計算」の資源量を使って計算した結果を解析した。昨年度に申請した資源は、上記の解析した計算及び今後解析予定の計算で得られた大規模な粒子データの保存に使用する事で限度に達し、新たな追加計算には至っていない。

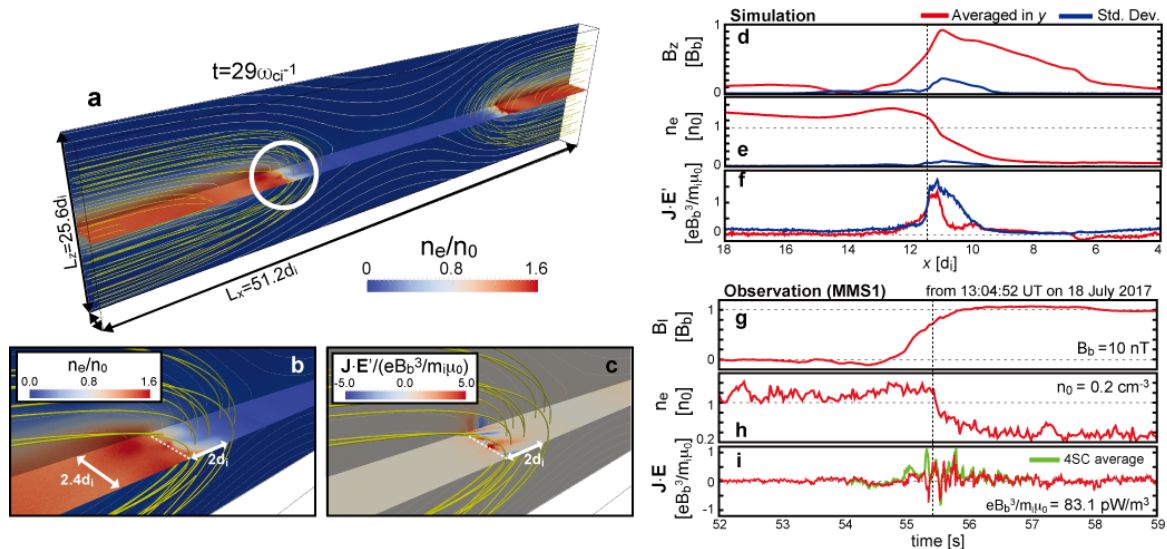


図1: (a-c)磁気リコネクション過程の3次元完全粒子シミュレーション結果。リコネクションジェット先端領域に、LHDIの成長とそれに伴う強いエネルギー変換 ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$) が見られる。(d-i)ジェット先端領域のシミュレーション結果の擬似観測と2017年7月18日のMMS衛星の観測結果の比較。繋ぎ変わった磁場が集まり密度変化の大きい先端領域においてシミュレーションで見られるのと同程度のエネルギー変換が観測結果にも見られる。

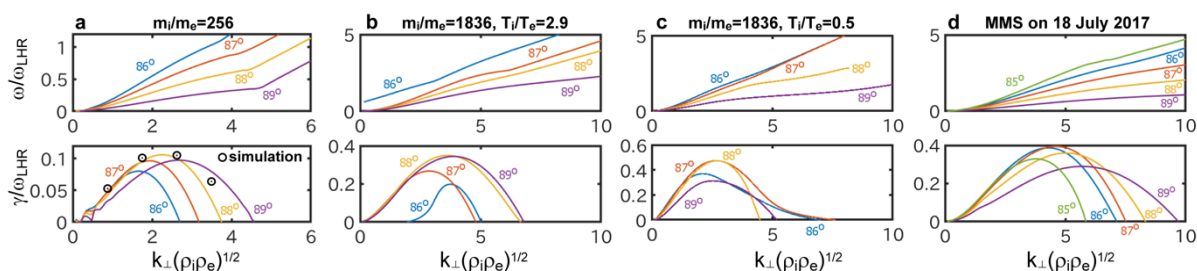


図2: シミュレーション及びMMS観測から得られたパラメータ、またその他の現実的パラメータを運動論的線形解析ツール[参考文献3]に入力した結果。MMS観測イベントを含む幅広いパラメータ範囲でLHDIが発生する事が確かめられた。

参考文献:

- [1] [T.K.M. Nakamura et al.](#), Measurement of the magnetic reconnection rate in the Earth's magnetotail, *JGR*, 123, 9150, 2018
- [2] [T.K.M. Nakamura, T. Umeda et al.](#), 3-D development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection, *GRL*, 43, 8356, 2016
- [3] [T. Umeda & T.K.M. Nakamura](#), Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field revisited, *POP*, 25, 102109, 2018

【成果発表】

- [1] (投稿論文) [T.K.M. Nakamura, T. Umeda, R. Nakamura, H. S. Fu, & M. Oka](#), Disturbance of the Front Region of Magnetic Reconnection Outflow Jets due to the Lower-Hybrid Drift Instability, *Physical Review Letters*, 123, 235101, 2019
- [2] (学会発表) [T.K.M. Nakamura, T. Umeda, R. Nakamura, H. S. Fu, & M. Oka](#), Study on the stability of the reconnection jet fronts, *the EGU General Assembly 2019*, Vienna, Apr. 2019