

論文の内容の要旨

論文題目： High-energy particle acceleration and magnetic field dissipation
in the plasma sheets of celestial magnetospheres

(天体磁気圏中のプラズマシートにおける高エネルギー粒子加速と磁場拡散)

氏名： 銭谷 誠司

プラズマ中で磁力線が繋ぎかわる磁気リコネクションは、宇宙空間・惑星間空間におけるさまざまなプラズマ現象に関与している。代表例としては太陽フレアや磁気圏尾部のリコネクションが知られているが、最近では、パルサー磁気圏からの超相対論的プラズマ流 (Coroniti 1990, Kirk & Skjæraasen 2003) といった高エネルギー天体領域でもリコネクションが議論されるようになってきた。しかし、このような状況で予想される相対論的磁気リコネクション (Blackman & Field 1994) や、リコネクションが起きるプラズマシート構造の性質はほとんど研究されていない。本研究は、地球磁気圏物理のリコネクション／プラズマシートの理解を出発点として、高エネルギー天体を論じるために必要な電子・陽電子プラズマシート内の粒子加速・磁場拡散過程を理解することを目的としている。

まず、電子・陽電子系のプラズマシートでの磁気リコネクションについて、2次元の粒子シミュレーションを行った。その結果、リコネクションジェットが光速近くに達する「相対論的」磁気リコネクションを再現 (図1) するとともに、相対論効果によって強い粒子加速が起きていることを発見した。磁気リコネクションでは、粒子は X 点近くでエネルギーを得るが (Speiser 1965)、粒子の慣性質量が相対論効果で重くなると、より長期間、粒子は磁気中性面に留まって加速を受け続ける。そのため、系の非熱的エネルギースペクトル (図1) に現れるほど、粒子加速が強く効いていることがわかった。この加速は、プラズマシートの温度が高い超相対論的ケース ($T \gg mc^2$) でも見られることから、粒子加速は相対論的磁気リコネクションに伴う一般的な特徴だと言える。

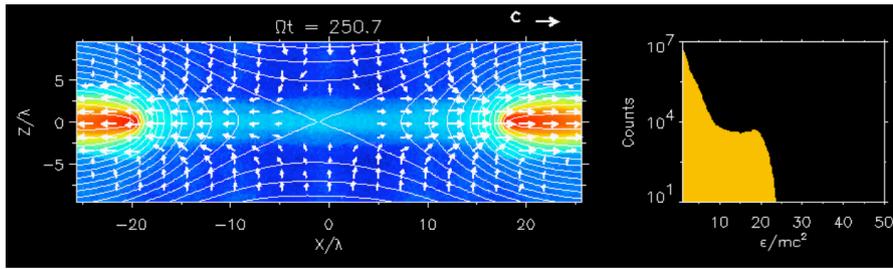


図1 相対論的磁気リコネクションの2次元シミュレーション結果。右図は系のエネルギースペクトル

一方、リコネクションと垂直な平面でのプラズマシートの安定性についても粒子シミュレーションを行った。このとき、プラズマシートでは相対論的ドリフトキンク不安定という電流駆動型の不安定が成長することがわかった(図2)。そして不安定の非線形段階では、プラズマシートの折り畳み構造を利用した粒子加速も発生する。その後、プラズマシートは折り畳まれて崩壊し、プラズマシート近傍の磁場エネルギーが粒子の熱エネルギーとして解放される。磁気リコネクションと比較すると、粒子加速効果は弱く、むしろ**磁場散逸過程**としての性質が強い。プラズマが相対論的高温($T \geq mc^2$)な場合、相対論的ドリフトキンク不安定は磁気リコネクションよりも速く成長するため(図3)、相対論的プラズマシートでの支配プロセスはドリフトキンク不安定による磁場散逸だと予想される。

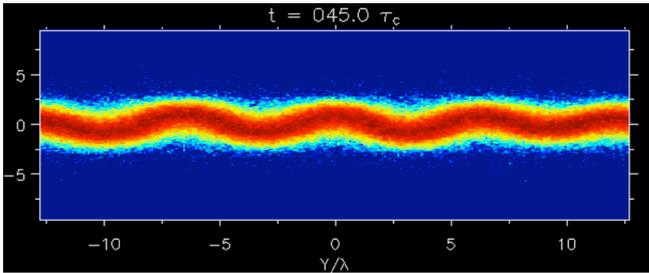


図2 相対論的ドリフトキンク不安定のシミュレーション結果

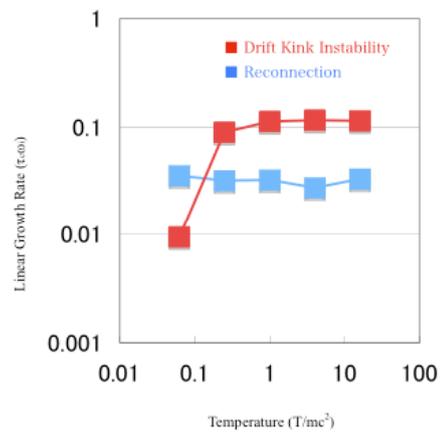


図3 リコネクション及びドリフトキンク不安定の成長率のプラズマ温度依存性

上記2つの研究結果を踏まえて、我々は3次元の粒子シミュレーションを行った。そして、予想された通り、相対論的ドリフトキンク不安定が2次元的に成長して磁場エネルギーを散逸することを確認した。しかし、宇宙空間では磁力線が反平行ではなく、斜めに捻れていることも多い。そこで、電流方向に一様ガイド磁場を加えた系で2次元と3次元の

粒子シミュレーションを行った。2次元シミュレーションでは、ガイド磁場の張力がドリフトキンク不安定を安定化することがわかった。そして3次元では、ガイド磁場効果により「相対論的ドリフトキンク=テアリング不安定」という新しい不安定モードが成長し、その後で二次的に磁気リコネクションが発生することがわかった（図4）。相対論的ドリフトキンク=テアリング不安定は、相対論的ドリフトキンク不安定と相対論的テアリング不安定間の性質を持つ、斜め方向のモードである。そして、プラズマシートの上下で別向きのモードが成長してお互いに干渉し、磁気リコネクションを励起するわけである（図5）。リコネクションの結果、系のエネルギースペクトルにも加速による非熱的成分が現れる。つまり、ガイド磁場の有無という磁力線トポロジーの違いが、プラズマシートで起きるマクロ不安定の種類を決定し、ひいては、磁場エネルギーがプラズマの熱的エネルギー（相対論的ドリフトキンク不安定による磁場拡散）に変換されるか、非熱的エネルギー（リコネクションによる粒子加速）に変換されるかを左右する、ということがわかった。

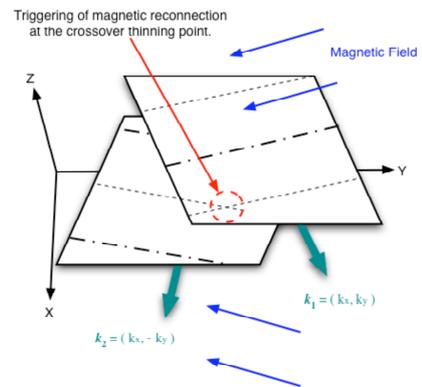
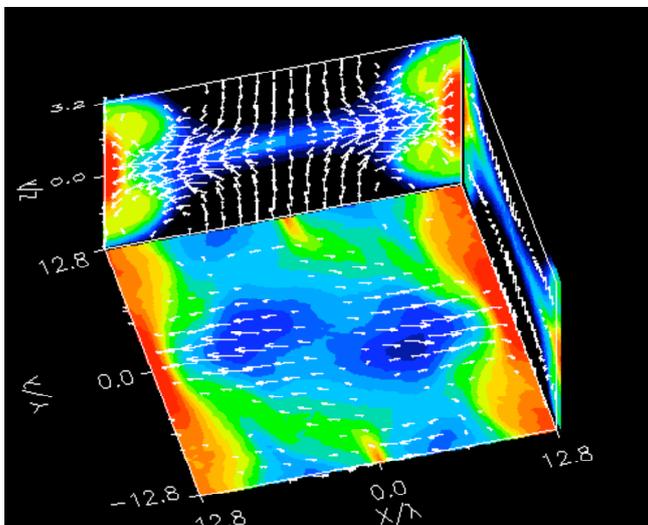


図4 ガイド磁場を考慮した3次元系での相対論的磁気リコネクション 図5 二次リコネクションの励起メカニズム

本研究で我々は、電子・陽電子プラズマシートでの相対論的磁気リコネクションと相対論的ドリフトキンク不安定という2つの2次元不安定と、それに伴う粒子加速過程を明らかにした。そして、これをもとに3次元系でプラズマシートの安定性を議論し、相対論的ドリフトキンク=テアリング不安定に伴うリコネクション励起メカニズムなどのガイド磁場効果も明らかにした。本研究での知見は、例えばパルサー風中で相対論的ドリフトキンク不安定による磁場散逸を考えるなど、高エネルギー天体磁気圏でのプラズマ現象に幅広く応用できるものであり、今後の議論の礎になる成果だと考えている。