

磁気圏近尾部のダイナミクス

近尾部とは、地心距離 20–30 地球半径の場所であり、磁気リコネクションが発生する場所である。磁気リコネクションはサブストームの重要要素であることはもちろん、宇宙空間における爆発現象の多くに関与しており、宇宙プラズマにおける最重要の素過程である。近尾部は、「その場」観測から磁気リコネクションの本質に迫ることの出来る貴重なフィールドである。

磁気リコネクションの発生位置の同定

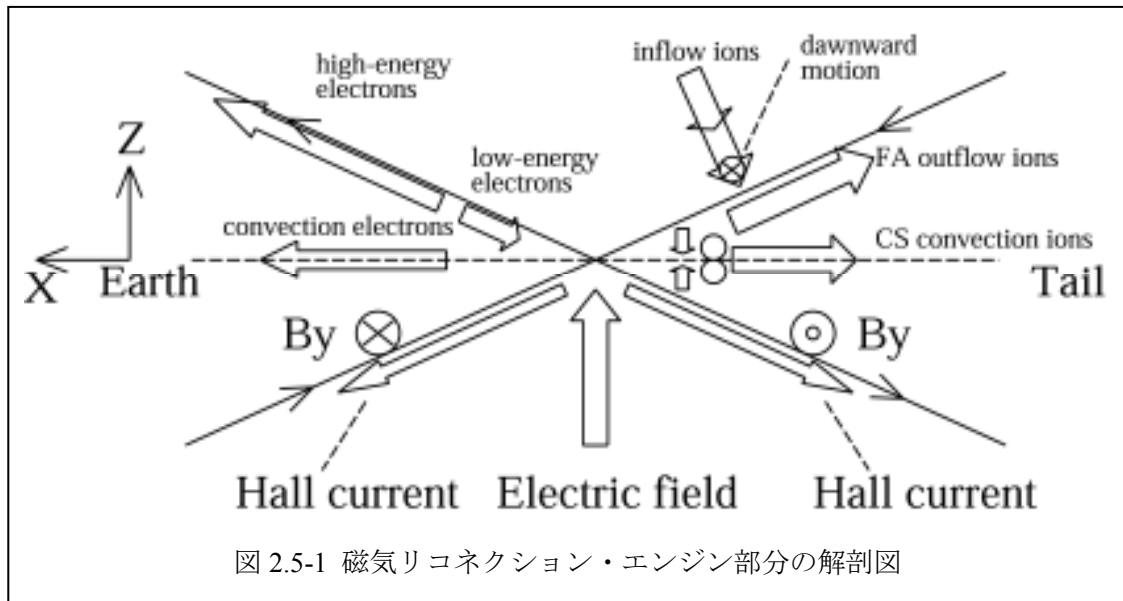
“何が磁気リコネクション発生場所を決定するのか？”

サブストームに伴う磁気リコネクションが、地球の磁気圏尾部のどこで発生しているのかは、1960 年代からの人工衛星による観測でも同定されていなかった。Geotail 衛星は、1996 年以後 10 年以上にわたって地球に近い磁気圏尾部を観測してきたため、さまざまな太陽風の条件のもとでの観測ができた。その結果、磁気圏尾部の磁気リコネクションの位置をコントロールするものは太陽風の速度と磁場の掛け算としてあらわる太陽風の電場であることがわかった。太陽風の電場が大きい時は、磁気圏内の対流が地球に近い尾部に集中しほぼ地球半径の 20 倍以内の距離で磁気リコネクションが起きる。一方、太陽風の電場が小さいときは、より遠い距離で磁気リコネクションが起きる。また、地球に近いところで起きるサブストームの前には磁気圏尾部により大きなエネルギーが蓄積され、地球に遠いところで起きるサブストームの前には磁気圏尾部に蓄積される太陽風のエネルギーはより小さいことがわかった。この結果は、これまでの人工衛星の観測でお互いに矛盾しているように見える結果をうまく説明するという意味でも重要である。このように、Geotail 衛星の長期にわたる観測は、その利点を十分に活かした科学的成果を上げ、かつ、将来の探査衛星の軌道設計に有益な情報を与えている (Nagai et al., 2005, Nagai, 2006)。

磁気リコネクション領域の「その場」観測

“磁気リコネクション・エンジン部で、プラズマ粒子はどのように振舞うのか？”

磁気圏尾部で磁気リコネクションが起きれば、そのエンジン部分である磁気リコネクション領域では、(1) 北半球と南半球の磁気圏ローブから低エネルギーのプラズマが南北から赤道面方向に流入、(2) まずイオンが磁力線との凍結からはずれ、(3) さらにエンジン中心部では電子も磁力線への凍結からはずれ、(4) 赤道面近傍では、北向き磁場を持つ高速プラズマ流が地球向きに、南向き磁場を持つ高速プラズマ流が反地球向きに噴出、(5) これら高速プラズマ流はイオンでアルフベン速度程度の 1000km/s 以上、電子の最高速度はさらに大きくなり、(6) 同時に電子加熱・加速も期待される。このような磁気リコネクション・エンジンの物理を、世界で初めて現実の宇宙空間での観測で明



らかにしたのが Geotail である。1996 年 1 月 27 日の磁気リコネクション領域「その場」での観測は、エンジン部分でのイオンと電子の（流体ではなく）粒子として振る舞いを明らかにした。特筆されるべきことは、イオンと電子ともに加熱・加速され、X-line のごく近くの赤道面では電子の流体としての速度（4000km/s）がイオンの流体としての速度（2500km/s）を超えていることを示したことである。これは、ダイナミクスの特長長がイオンの慣性長と呼ばれる長さ（1500km 程度）より小さくなり、イオンと電子が同じように運動するという磁気流体力学（MHD）から外れイオンは磁力線にもはや凍結していない状態を観測実証したことを意味する。さらに南北方向に離れた外側領域では、低エネルギー電子磁気リコネクション・エンジンへと向かって流れ込む様相が確認され、この電子流が Hall 電流系と呼ばれる磁気リコネクションの駆動に必須なパーツを担っていることが解明された (Nagai et al., 1998, 2001, 2003, Asano et al., 2004)。

このような「その場」観測に基づいて実証的に磁気リコネクションという素過程を解剖していくという手法は多くのデータ解析研究者に受け入れられ、それまで存在した理論研究者との間の溝を埋めた。現在では観測と理論の実に緊密な連携こそが磁気圏物理分野が誇るべき「文化」である。

サブストームの時空発展

“サブストーム全体の時空発展と磁気リコネクションの関係は？”

サブストーム現象では、磁気リコネクション・エンジン部分などが（イオン・電子スケールといった）小スケールの物理が重要な役割を果たす一方、全体としては磁気圏全体に波及する大スケールな現象である。また、磁気リコネクション・エンジン部分という微小な部品も、大スケールなダイナミクスの発展過程の中で生まれる。したがって、サブストームの大規模時空発展を解明することは重要である。しかし、この課題は広大な磁気圏空間を飛翔しながら「その場」観測を行う（「その場」の情報しか取れない）

衛星観測にとっては難問であり、未解決大問題の一つである。Geotail においては、磁気リコネクション領域における長年の観測結果の蓄積がある。個々のイベントは様々なタイミングと場所で観測されたものだが、これらをサブストーム（オーロラブレイクアップ）開始時との相対時刻を基準にして重ね合わせることで、その解明への手がかりを得た（Machida et al., 1999、Miyashita et al., 1999, 2000, 2001, 2003）。その結果、サブストーム開始数分前に、地球から地球半径の約 20 倍の距離の尾部で磁気リコネクションが起こり、開始直後、地球半径の約 30 倍の距離の領域付近でのプラズモイド発達と地球半径の約 10 倍の距離の領域付近でのダイポール化は同時に起こるという、磁気圏尾部の変化についての三次元的時空発展像を得た。これにより、磁気リコネクションがサブストームの初期段階において重要な役割を果たしていることを明確に示した。さらに詳細な解析により、大きいサブストームの方が、変化の規模が大きく、サブストーム開始時の磁気リコネクションの位置が地球に近いことがわかった（Miyashita et al., 2004）。

[参考文献]

- [04-1] Asano et al. (2004), J. Geophys. Res.
- [99-31] Machida et al. (1999), Geophys. Res. Lett.
- [04-33] Miyashita et al. (2004), J. Geophys. Res.
- [03-23] Miyashita et al. (2003), J. Geophys. Res.
- [01-38] Miyashita et al. (2001), J. Geophys. Res.
- [00-40] Miyashita et al. (2000), J. Geophys. Res.
- [99-34] Miyashita et al. (1999), Geophys. Res. Lett.
- [06-21] Nagai (2006), Space Sci. Rev.
- [05-50] Nagai et al. (2005), J. Geophys. Res.
- [03-25] Nagai et al. (2003), J. Geophys. Res.
- [01-41] Nagai et al. (2001), J. Geophys. Res.
- [98-47] Nagai, et al. (1998), J. Geophys. Res.