

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540483

研究課題名(和文) 磁気圏尾部ダイナミクスに対するプラズマ波動のエネルギー散逸への寄与の評価

研究課題名(英文) Evaluation of contribution from plasma waves to energy dissipation associated with magnetotail dynamics

研究代表者

篠原 育 (Shinohara, Iku)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20301723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Geotail衛星の20年以上にもわたる磁気圏尾部の観測データを用いて、(1)磁気リコネクション領域、(2)ダイポーラリゼーション・フロント領域、を例にとって磁気圏尾部のダイナミクスに対するプラズマ波動の寄与を評価した。観測データの解析結果からは、磁気拡散領域におけるプラズマ波動による磁場エネルギー散逸への貢献はほとんどないことが明らかになった。しかし、磁場拡散領域中の電子高速流を通して励起されていると示唆されるプラズマ波動による電子加熱を通して、プラズマ波動は磁気圏尾部ダイナミクスに影響を与えていると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Using plasma and electromagnetic fields data obtained by Geotail satellite over 20 year observation in the Earth's magnetotail, the contribution of the plasma waves to the energy dissipation associated with the magnetotail dynamics, e.g. (1) in magnetic reconnection region and (2) in dipolarization front, is evaluated. As a result of our data analysis, we concluded that less contribution from the plasma wave activity to the magnetic field energy dissipation in the reconnection diffusion region. However, the plasma waves may affect the magnetotail dynamics via the electron heating that is caused by the low-frequency plasma wave excited in the ion-electron decoupling region.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：磁気リコネクション プラズマ波動 磁気圏尾部 エネルギー散逸

1. 研究開始当初の背景

Geotail, Cluster, THEMIS 衛星などの観測によって, サブストームに伴う磁気圏尾部のダイナミックな変動の様相が明らかになってきた. これらの成果からは, 例えば薄い電流層の形成にみられるように, 観測された重要な領域の空間構造はイオン・スケール以下の空間スケールであることが多く, 運動論的な効果の発動していることが示唆されている.

運動論効果の発現としてのプラズマ波動の励起/減衰は, プラズマのダイナミクスと連動しているはずであるが, プラズマ波動がプラズマ・ダイナミクスに与える影響が無視できるかどうかは自明ではない. しかし, 観測の情報が増えるにつれて様々な理論モデルが提案されているものの, ほとんどの場合は, 巨視的なダイナミクスにのみ着目し, より微視的なプラズマ波動の影響は考慮されていなかった.

2. 研究の目的

本研究では, 磁気圏尾部のプラズマ波動と磁気圏尾部のダイナミクスの関連を調べることによって, プラズマ波動によるエネルギー散逸効果が磁気圏尾部のダイナミクスにどのようにカップルしているのか(/いないのか)を明らかにすることを試みる. 具体的には, (1) 磁気リコネクション, (2) ダイポーラリゼーション・フロント, の2つの現象に着目してプラズマ波動のアクティビティーとの因果関係を調べ, ダイナミクスとプラズマ波動のカップリングの物理を明らかにしたい.

磁気リコネクションに関する最近の磁気圏尾部の観測結果からは, 磁場拡散領域の電子・イオンのデカップル領域中には非常に強いプラズマ波動が励起されている一方, その外側に出た途端に波動強度は明瞭に下がることが示唆されている. このようなプラズマ波動の活動領域の空間構造を含めた磁気リコネクションの理論モデルはこれまでに存在せず, 磁気リコネクションの時空間発展モデルの修正を迫る可能性を含んでいる.

ダイポーラリゼーション・フロントについては, 統計的な解析の結果から, この領域は散逸的であり, 磁気リコネクションからの流れのエネルギーの約 10 %がここで失われるとされている. フロント領域の空間スケールはイオン回旋半径程度であり, プラズマ不安定を通してのプラズマ加熱などのエネルギー散逸が期待されるが, 物理過程の詳細はわかっていなかった.

これらの研究を通して, 磁気圏尾部ダイナミクスにおける動的なスケール間結合の物理過程の役割が検証できれば, 磁気圏尾部にとどまらず宇宙空間プラズマ研究にとってそのインパクトは大きいだろう.

3. 研究の方法

(1) 磁気リコネクション領域におけるプラズマ波動の解析

Geotail 衛星は, これまでに磁気圏尾部における磁気リコネクションのイベントを数多く観測している. これらのイベント解析にもとづいて, 磁気リコネクション領域の空間構造の中で「どの領域にどのモードのプラズマ波動のアクティビティーが発生しているのか」を調べる. 特にここでは Geotail 衛星や Cluster 衛星で報告されている, 強い低域混成ドリフト不安定や変形2流体不安定など, 低域混成周波数帯の波動に注目して, 磁気リコネクション領域の空間構造とプラズマ波動のアクティビティーの関連を整理する. この周波数帯の波動は異常抵抗源の候補として電流層の散逸に大きく寄与する可能性があるからである. これらの観測事実の再整理に基づいて, 数値シミュレーションを援用しながら, プラズマ波動の活動領域の空間構造を含めた磁気リコネクション・モデルの構築を試みる.

(2) ダイポーラリゼーション・フロント領域におけるプラズマ波動の解析

ダイポーラリゼーション・フロント領域についても, Geotail 衛星の観測データから多数の観測例を集める. 先行研究である THEMIS 衛星の観測結果からダイポーラリゼーション・フロントの X 方向への伝搬の様相が明らかにされており, これをガイドラインとしてイベントを整理することで Geotail 衛星が一点観測であることの欠点を補う. 空間構造について THEMIS 衛星の結果との整合性を検討した後, プラズマ波動のアクティビティーについて空間構造の中で整理を行い, 不安定モードの同定を試みる.

(1), (2)の課題研究を通じて「磁気圏尾部におけるリコネクションとそれによって生成されるプラズマ流のエネルギー散逸」という磁気圏尾部ダイナミクスの大きな文脈の中でプラズマ波動による散逸の効果がどれほど寄与するのかを明らかにする.

4. 研究成果

(1) 磁気リコネクション領域におけるプラズマ波動の解析

Geotail 衛星の磁気圏尾部探査では, リコネクション領域中の磁気中性面近傍で低域混成ドリフト波が励起されていることが同定されていたが, 観測された波動のパワースペクトルから推定される異常抵抗値は, 推定される磁気レイノルズ数で $O(1000)$ 以上と小さく, 磁気圏尾部リコネクションの急速なトリガーを説明するには波動強度にして1桁以上小さいものであった. 最近になって, Geotail 衛星が磁気中性線の極めて近傍を通過したと考えられる観測データが数例見つかり, これらのイベントで観測されるプラズマ波動の解析を行った.

図1は Geotail 衛星の2003年5月15日に観測された磁気圏尾部リコネクション領域

の電磁場のパワースペクトルとプラズマの速度データである。衛星が磁気中性線の極近傍を横切ったと推察される最も大きな理由は、イオンの太陽-反太陽方向の流れ(=リコネクションで加速された流出流の成分)の反転(と、同時に観測される磁場の南北成分の反転)に加えて、電子の太陽-反太陽方向の流れの反転も観測され、その流れの速さの最大値(～3,000 km/s)がアルフベン速(～2,000 km/s)を大きく超えていることである。また、電子流の朝夕成分(=電流層の電流を担う成分)についても、朝側へ向けてアルフベン速を超える(～3,000 km/s)速さであった。こうした超アルフベン速の電子流の特徴は、粒子シミュレーションの結果に共通して、磁気中性線の極近傍にのみ見ることができる特徴である。この電子とイオンの速度に大きな差のある領域では、過去に報告されたように、確かに低域混成周波数帯(～数 Hz)の波動強度が強くなっている。しかし、磁場や流れの反転の中心付近では、逆に急激に波動強度が著しく小さくなっている。この時の波動強度は、先に報告された例よりもむしろ小さかった。(8×10⁻²³ J/m³) Geotail 衛星の過去 20 年以上の磁気圏尾部観測の中で、超アルフベン速の電子流反転が観測された例はわずか 3 例しかないが、このように流れの反転の中心付近で波動強度が弱まる傾向は、3 例とも同様に観測されていることが確認できた。この結果から、私たちは、磁気中性線の近傍はプラズマ波動的には静かな領域である、と結論づけた。(より周波数の高い、プラズマ振動までの周波数帯についても同様に相対的に静かな領域であることが Cluster 衛星の観測結果から報告されている。)

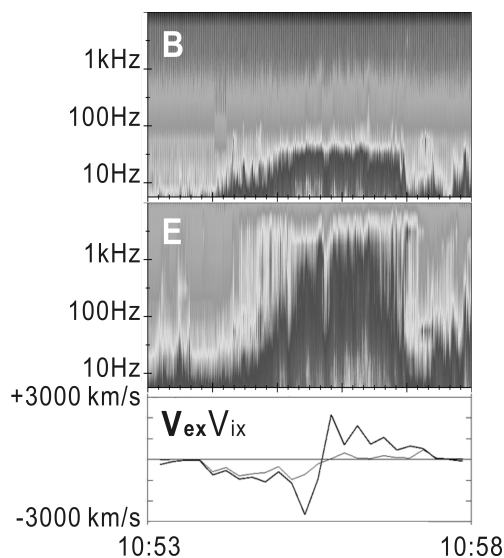


図 1: 2003 年 5 月 15 日のリコネクション・イベントにおけるプラズマ波動(上: 磁場、中、電場)とプラズマ流速の X 成分(下: 太線-電子、細線-イオン)

2003 年 5 月 15 日のイベントについて、リコネクションによる磁場エネルギー散逸率を約 45 pW/m³ と推定されている。私たちは波動のパワースペクトルを分析し、準線形理論を適用した結果、磁気中性線近傍での波動による磁場エネルギー散逸率は高々 3×10⁻⁴ pW/m³ にしかならないことを推定した。この値は磁気中性線近傍で推定される磁場エネルギー散逸率にほとんど寄与しないものである。これらの結果から、私たちは Geotail 衛星の磁気圏尾部リコネクションの観測結果は、異常抵抗モデルよりも、リコネクション電場が電子の圧力テンソルの発散によってもたらされる無衝突リコネクション・モデルを支持するものであると結論した。

以上のように定量的に磁気中性線近傍でのエネルギー散逸率を定量的に議論した研究は、磁気リコネクションを対象とする周辺分野の研究にも見られないもので、衛星による“その場”観測によってこそもたらされた結果である。磁気圏での結果と同様なプラズマ波動の出現傾向が、室内実験でも見られるかどうか、今後、検証実験がなされることを期待したい。

それでは、プラズマ波動は大局的にはリコネクションの発展に何の寄与もしないのだろうか? この疑問の回答を考える 1 つのポイントは「プラズマ波動は、磁気中性線近傍でこそ弱くなるとはいえ、周辺部や電流層の境界領域近傍では、決して無視し得ない強度で観測されている」ことである。

Geotail 衛星が 20 年余りの磁気圏尾部の観測期間において観測した 46 例のクリアなプラズマ流の太陽-反太陽方向の流れの反転イベントの解析から、電子とイオンの運動差が顕著に見える領域(電子・イオンのデカップル領域)内で強度の強い低周波の静電波動が共通して観測され、電子・イオンのデカップル領域と強い静電波の観測される領域は非常によい対応があることが明らかになった。このことから、高プラズマであるにもかかわらず強い静電波が励起されている原因は、電子・イオンのデカップル領域内に現れる高速な電子流との関係が示唆される。また同時に、磁気中性線からの高速な電子の外向き流れ領域では、同時にフラットトップ分布と呼ぶ速度空間内で円錐台状の形状を示す特徴的な電子速度分布関数が観測される場所と一致することが確認されたことにより、観測される強いプラズマ波動がフラットトップ分布の電子加熱と関係している可能性が高いことが結論付けられた。観測されるプラズマ波動強度から推定される磁気レイノルズ数は 0(100) 近くにも及ぶと私たちは推定しており、大局的には、プラズマ波動が電子加熱などを通してリコネクション流の発展に影響を与えている可能性があると考えられる。

一方、Geotail 衛星の多くの観測データを統計的に解析した結果から、イオンの流れの

構造は磁気圏尾部の朝夕方向の位置によってその様相が異なり、磁気圏尾部におけるリコネクション領域の3次元的な構造を反映していることが明らかになった。本研究ではこれに対応するプラズマ波動の波動強度分布についても同様な3次元的な構造が見えるかどうかを検証した。即ち、地球磁気圏の近尾部リコネクション領域で観測された電子・イオンのデカップル領域中の低域混成周波数帯のプラズマ波動強度とプラズマ流れの反転の関係を統計的に解析した。

Geotail 衛星は、約20年間の観察において、46回の明瞭なフロー反転現象を観測している。46回のフロー反転現象の内、30イベントについてはプラズマ流および磁場の南北成分の反転と同時に電子・イオンのデカップル領域と強烈な電子電流を観測する。一方、残りの16イベントについては無衝突リコネクションに特徴的な電子・イオンのデカップル領域、強烈な電子電流の両方が見られない。今回の統計結果の最も重要な点は、低域混成周波数帯の波動エネルギー密度を基準としてアクティブ磁気中性線とノン・アクティブなプラズマ流反転現象を分離することができたことである。図2に示されるように、両者で観測される波動強度には大きな違いがあり、ノン・アクティブなプラズマ流反転では強い波動は観測されない。この結果は、観測された低域混成周波数帯のプラズマ波動の励起が電子・イオンのデカップル領域、あるいは強烈な電子電流と関係することを示唆している。(前述の個別のイベントの解析結果とも整合する。)

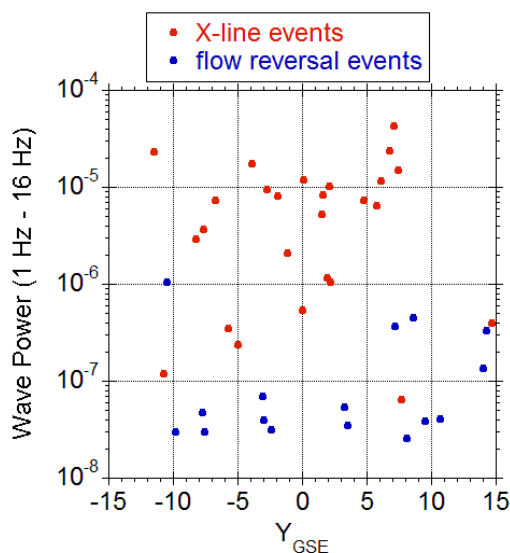


図2: 46のプラズマ流反転イベント(赤丸: 30アクティブ磁気中性線イベント, 青丸: 16ノン・アクティブプラズマ流反転イベント)の波動強度の観測位置(朝夕方向依存性)

波動エネルギー密度の分布については、イオンの流れ構造と同様な朝夕非対称があることも見つかった。最も強いプラズマ波動は

真夜中前の領域で観測された。磁気圏尾部の夕方側 $Y=8 R_E$ に明瞭な境界が存在し、それより外側には強い波動は観測されない。一方、磁気圏尾部の朝方側には明瞭な境界はみられず、外側に向けて徐々に波動強度を減少させる傾向を持つことがわかった。これらの新しい発見は、磁気圏尾部リコネクション領域の巨視的な3次元構造の理解に繋がる手掛かりの1つになるだろう。

(2) ダイポーラリゼーション・フロント領域におけるプラズマ波動の解析

地球の磁気圏尾部のダイナミクスは、太陽風の運動エネルギーに起因する磁場エネルギーによって駆動されていると考えられている。磁場エネルギーが再びプラズマのエネルギーに転換されることに磁気リコネクションが大きな役割を果たしていることは間違いないが、リコネクションの発展に伴ってエネルギー変換がどこで行われているのかについては、観測的には明らかではない。

ダイポーラリゼーション・フロントにおける散逸については、THEMIS 衛星と Geotail 衛星のデータ解析から次のようなことがわかった。THEMIS, Geotail 衛星など、8つの衛星が磁気圏尾部に並ぶ同時観測機会に得られたデータから、リコネクションによって発生する流れの最前面に形成されるダイポーラリゼーション・フロントにおける領域には、非常に薄い電流層が形成され、その内で磁場エネルギーがプラズマエネルギーに変換されていることが明らかになった。薄い電流層の厚さは1~10倍の電子慣性長ほどしかないと推定され、電流強度は数 $10 \sim 100 \text{ nA/m}^2$ である。解析の結果、リコネクション領域から運ばれてくる磁束は、この領域でプラズマエネルギーに変換されており、およそ $10 \sim 100 \text{ GW/R}_E^2$ におよぶことがわかった。この値は地球磁気活動がアクティブな期間に消費されるグローバルな磁気圏尾部の磁束減少量の推定値と整合しており、ダイポーラリゼーション・フロントが磁場エネルギー変換に大きな役割を果たしていることを強く示唆している。本研究では、さらにこの薄い電流層領域におけるプラズマ波動の励起状態を検討するつもりであったが、残念ながら十分な検証を可能とするだけのデータが得られておらず、ダイポーラリゼーション・フロントにおける磁場エネルギー散逸に果たすプラズマ波動の寄与についての評価までには至らなかった。

(3) まとめ

今回の研究の範囲では、リコネクション領域の高速電子流が静電波動を励起し、電子を加熱するまでの過程を理論的に解明するには至らなかったが、リコネクション領域内のプラズマ波動と電子加熱の対応について観測的にこれほど詳細に検討できたことはなく、磁気圏尾部のダイナミクスに対するプラ

ズマ波動の寄与について大きな知見が得られたと考えている。また、ダイポーラリゼーション・フロントに形成される薄い電流層にてエネルギー変換が行われていることが明らかになったものの、その変換メカニズムは明らかにならなかった。今後、より大規模な数値シミュレーションや2015年3月に打ち上げられた米国のMMS衛星による編隊観測データによって、本研究結果から示唆された理解が検証されることを期待したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

- I. Shinohara, T. Nagai, H. Kojima, S. Zenitani and M. Fujimoto, Low-frequency Waves in the Tail Reconnection Region, *in* "Low-frequency Waves in Space Plasmas" AGU monograph, 査読有, 印刷中 (2015)
- T. Nagai, I. Shinohara, and S. Zenitani, Ion acceleration processes in magnetic reconnection: Geotail observations in the magnetotail, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120(A3), 1766-1783, doi:10.1002/2014JA020737 (2015)
- T. Nagai, S. Zenitani, I. Shinohara, R. Nakamura, M. Fujimoto, Y. Saito, T. Mukai, Ion and electron dynamics in the ion-electron decoupling region of magnetic reconnection with Geotail observations, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 118(A12), 7703-7713, doi:10.1002/2013JA019135 (2013)
- T. Nagai, I. Shinohara, S. Zenitani, R. Nakamura, T.K.M. Nakamura, M. Fujimoto, Y. Saito, T. Mukai, Three-dimensional structure of magnetic reconnection in the magnetotail from Geotail observations, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 118(A4), 1667-1678, doi: 10.1002/jgra.50247 (2013)
- V. Angelopoulos, A. Runov, X.-Z. Zhou, D.L. Turner, S.A. Kiehas, S.-S. Li, I. Shinohara, Electromagnetic energy conversion at reconnection fronts, *Science*, 査読有, 341, 1478-1482, doi: 10.1126/science.1236992 (2013)
- S. Zenitani, I. Shinohara, and T. Nagai, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 39, L11102 1-5, doi:10.1029/2012GL051938 (2012)

[学会発表](計9件)

- I. Shinohara, T. Nagai, H. Kojima, S. Zenitani and M. Fujimoto, Geotail observation of low frequency wave activity in a 3D structure of magnetotail reconnection site, AGU fall meeting, 2014年12月15日-12月19日, San Francisco Moscone Center
- I. Shinohara, Recent results on Geotail observations of magnetotail reconnection, The 12th International Conference on Substorms (招待講演), 2014年11月10日-11月14日, 伊勢志摩ロイヤルホテル
- I. Shinohara and T. Nagai, GEOTAIL Over 20 Years Observation in Space, AOGS 11th annual meeting (招待講演), 2014年07月28日-08月01日, ロイトン札幌ホテル
- 篠原 育, 小嶋 浩嗣, 長井 嗣信, 銭谷 誠司, 藤本 正樹, Wave activity in the LH frequency range in 3-dimensional structure of the magnetotail reconnection site, 2013年11月02日-11月05日, 第134回SGEPSS講演会, 高知大学
- I. Shinohara, H. Kojima, T. Nagai, S. Zenitani, M. Fujimoto, Geotail Observation of Plasma Wave Activity at around the Reconnection X-line, 2013年07月01日-07月05日, 12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space, 白馬東急ホテル
- 篠原 育, 小嶋 浩嗣, 長井 嗣信, 銭谷 誠司, 藤本 正樹, 尾部リコネクションのエネルギー散逸に対する波動の寄与の評価, 2013年05月19日-05月24日, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 幕張メッセ
- I. Shinohara, H. Kojima, T. Nagai, and M. Fujimoto, Wave activity around the X-line observed in the near Earth magnetotail, 2012年12月03日-12月07日, American Geophysical Union 2012 fall meeting, San Francisco Moscone Center
- 篠原 育, 小嶋 浩嗣, 長井 嗣信, 藤本 正樹, 磁気圏尾部磁気中性線近傍における波動観測, 2012年05月20日-05月25日, 日本地球惑星科学連合大会2012, 幕張メッセ
- I. Shinohara, H. Kojima, T. Nagai, and M. Fujimoto, Wave activity around the X-line observed in the near Earth magnetotail, 2012年04月22日-04月27日, European Geosciences Union General Assembly 2012, Austria Center Vienna

6 . 研究組織

(1)研究代表者

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20301723