

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03645

研究課題名(和文)非対称磁気リコネクション磁気流体モデルの観測的実証

研究課題名(英文)Verification of the asymmetrical magnetic reconnection magneto-hydro-dynamics model using the in-situ observations

研究代表者

近藤 光志(Kondoh, Koji)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・助教

研究者番号：30304653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非対称磁気リコネクションにおいて、先行するプラズモイドの伸展速度が高プラズマ側のファストモード波速度を上回る場合、高プラズマ側にファストモードの衝撃波が形成され、一方、低ベータ側プラズモイド内には両側のプラズモイドが混在し、2層のプラズマジェットが形成される新しい構造を、二次元および三次元シミュレーションを用いて示した。また、GEOTAIL衛星による昼側地球磁気圏境界の観測データから、プラズマ環境の時空間変化を明らかにし、その結果に基づいた数値計算により、先に示した磁気リコネクション構造が再現されることを示し、それらがTHEMIS衛星による観測データと一致することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非対称磁気リコネクションは、非常に様々な領域、様々な環境で起こる現象であるにも関わらず、対称磁気リコネクションと比べ、その全体構造やその環境依存性が十分に分かっていない現象であった。本研究により、幅広い環境における非対称磁気リコネクション構造を解明しただけでなく、実観測に基づいてそれらの検証を行い、数値計算で得られたモデルが実際に較正されることが示された。これらの結果により、今後実衛星の磁気リコネクション構造の通過領域を知ることができる。また、今後太陽大気、太陽圏外縁など、直接観測が難しい環境における非対称磁気リコネクションを知るうえで重要なモデルを得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In asymmetric magnetic reconnection, if the extension velocity of the leading plasmoid exceeds the fast mode wave velocity on the high plasma side, a fast mode shock wave is formed on the high plasma side, while the plasma on both sides coexistence in the low beta side. A new structure in which plasma coexist and a two-layer plasma jet is formed was demonstrated using two-dimensional and three-dimensional simulations. In addition, we investigated the spatial and temporal changes in the plasma environment from observation data of the dayside geo-magnetopause by the GEOTAIL satellite, and showed that numerical calculations based on these results reproduced the asymmetric magnetic reconnection structure shown by our above simulations. Furthermore, it was also shown that these agree with observation data from THEMIS satellite.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：非対称磁気リコネクション その場観測 磁気流体シミュレーション ファスト衝撃波 非対称構造
自発的磁気リコネクション 自己相似拡大モデル

1. 研究開始当初の背景

太陽風により地球磁気圏は反太陽方向に伸ばされ、地球磁気圏尾部では対称反平行磁場に挟まれた電流層が形成される。ここで起こる対称磁気リコネクションについては、これまで非常に多くの研究がなされ、対称磁気リコネクションの基本的な構造はペチェックモデルやスウィートパーカーモデルの2大モデルに基づいて理解されてきた。一方、太陽側地球磁気圏境界で形成される電流層は、太陽風と地球磁気圏の異なるプラズマの境界に形成される。その電流層の両側では、磁場強度や熱力学量が非対称となる。この非対称磁気リコネクションについても多くの研究がペチェックモデルに基づいて行われてきたが、我々の最近の研究により、ペチェックモデルを更新する非対称磁気リコネクション特有の構造を示してきた(Nitta et al. 2016; Nitta & Kondoh 2019; Nitta & Kondoh 2021)。

2. 研究の目的

我々がペチェックモデルから修正してきた新しい構造について、「これらの非対称磁気リコネクション特有の構造が実衛星観測では実際に観測されるのか?」「観測できた場合、磁気リコネクション構造中の衛星の通過位置を判別することができるか?」を示すことが、本研究の主目的である。そこで、

- (1) 新しい非対称磁気リコネクションモデルをより広範囲にわたる磁場・プラズマ環境について調べ、汎用的なリコネクションモデルを構築する。
- (2) GEOTAIL 衛星による、その場実観測データを用いて、昼側地球磁気圏境界の電流層の磁場・プラズマ環境を明らかにする。
- (3) THEMIS 衛星による多点同時観測データを用いて、昼側地球磁気圏境界における非対称磁気リコネクション構造を調べ、我々の非対称磁気リコネクションモデルを検証する。
- (4) 三次元的な非対称磁気リコネクション構造を調べ、非対称磁気リコネクションモデルを三次元的に拡張する。

以上を本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 非対称磁気リコネクションモデルの拡張

宇宙プラズマを磁気流体として扱う磁気流体方程式を数値的に解くことにより、磁気リコネクション現象を調べた。本研究では、先に述べた非対称電流層を初期条件として与え、非対称磁気リコネクションの初期プラズマ環境依存性を調べた。本研究期間においては、磁場強度比・磁場角度(図 1(a))に対する依存性を広範囲にわたり調べ、モデルをより汎用化した。また、以上の計算は、空間二次元物理量三次元の 2.5 次元計算であったものを空間三次元に拡張し、より現実的な問題へ拡張した。

(2) 実観測衛星による検証

我々のモデルをより現実的な問題に適用するためには、その環境を調べる必要があるため、GEOTAIL 衛星により 1994 年から 2019 年の期間に観測されたプラズマ・磁場データを用いて太陽側地球磁気圏境界を通過したイベントを同定し、この領域におけるプラズマ環境を統計的に調査した。

また、THEMIS 衛星群により 2014 年 2 月 13 日から 14 日にわたり連続的に太陽側地球磁気圏境界を通過するイベントが観測された。本研究では、この連続イベントに我々のリコネクションモデルを適用し、非対称磁気リコネクション構造の衛星の通過領域を同定することにより、リコネクションモデルの検証を行った。

4. 研究成果

(1) 数値計算によるモデルの汎用化

図 1 右図は、電流層を挟んだ両側の磁場シア角を 60° に固定した際の磁気リコネクション率の磁場強度比 k 依存性を示している。磁場強度比が大きい環境ほど磁気リコネクション率が大きく減少することが明らかになった。また、磁場の繋ぎ変わる場所は三次元的に見ると線(磁気リコネクションライン)となり、この線の垂線と上側磁場のなす角 θ を横軸にとっている。これにより磁気リコネクションラインとの磁場のなす角に対する磁気リコネクション率を調べている。この結果、磁気リコネクションラインの垂線と両側磁場のなす角の半分が平行であるとき、磁気リコネクション率が最大であり、その角度から離れるに従い、リコネクション率が下がることが示された。これらの結果から、電流層を挟んだ両側の磁場環境に対する非対称磁気リコネクションの依存性を明らかにすることに成功した。また、これらの環境における衝撃波やプラズモイドの形成、そしてプラズマ流などの磁気リコネクション構造への依存性を明らかにした。

一方、三次元計算により磁気リコネクションラインの長さの磁気リコネクション率への依存性を明らかにし、その磁気リコネクション構造の三次元発展を明らかにした(図 2 左図)。また、先に述べた磁場シア角が 0° でない場合、プラズモイドは三次元的に捻じ曲げられ、かつプラズマ流

よりもプラズモイドの磁気リコネクションライン方向への拡がりが大きくなり、衛星観測に置いて、プラズモイドのみを観測、もしくは電流層の片側だけのプラズマ流を観測する可能性が有ることを示した(図2右図)。

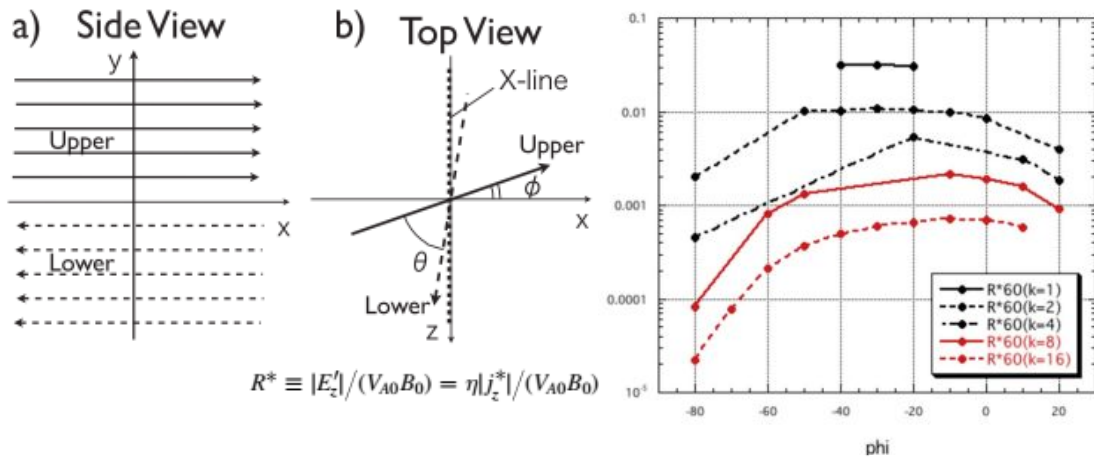


図1 Figure 2 (left 2 panels) and 8 (right panel) in Nitta & Kondoh, 2022

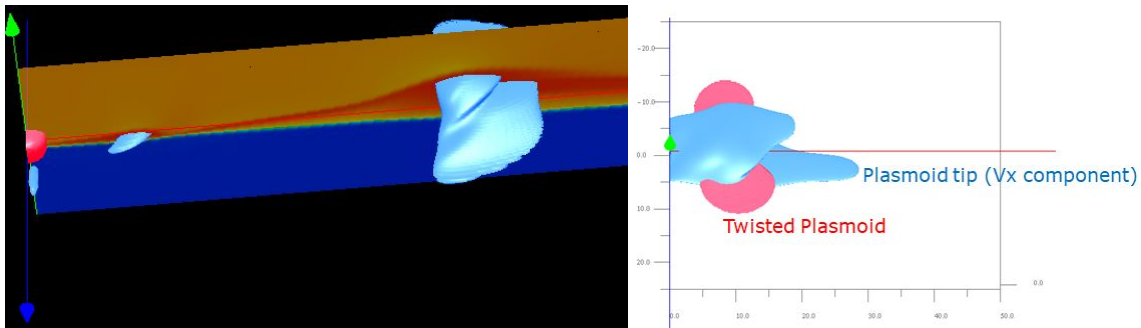


図2 Kondoh & Nitta (AGU2023)で示された非対称磁気リコネクションの三次元構造

左図：プラズモイドの三次元発展(水色カラー等高図)

右図：シア磁場を考慮することにより捻じ曲げられたプラズモイド(赤色等高図)とプラズマ流速(青色等高図)

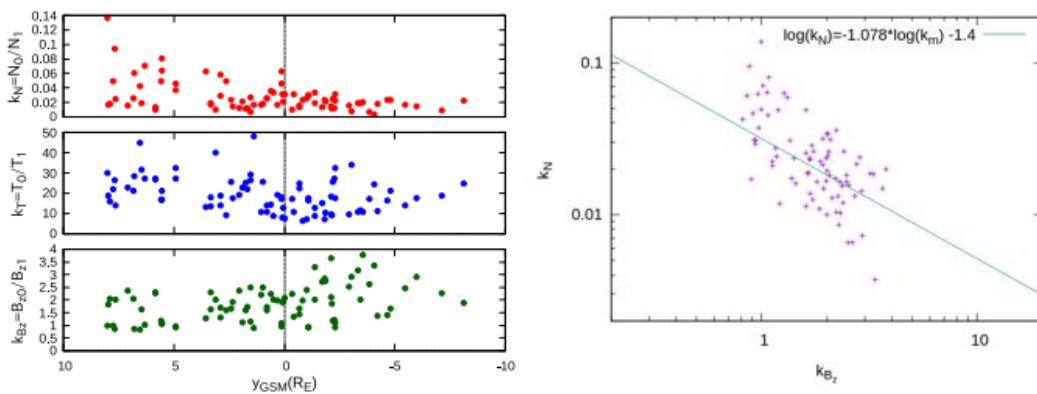


図3 Figure 5 (left panel) and 6 (right panel) in Kondoh & Nitta, 2024

(2) 実衛星観測による検証

GEOTAIL 衛星による昼側地球磁気圏境界の通過を 81 イベント同定し、この領域の磁場・プラズマ環境を調査した結果、図3左図に示すように、プラズモイド密度比 k_N は夕方側で広範囲に分布し、一方磁場強度比 k_{Bz} は朝側で広範囲に分布することが明らかになった。この逆相関は、右図に示されるように一定の相関関係にあることが明らかになった。一方、プラズマ温度比 k_T は等温から 50 倍まで広い範囲に分布し、真昼側では比較的等温に近い一方、朝夕側では広範囲に分布することが明らかになった。これらを考慮したプラズマ環境での非対称磁気リコネクションの数値計算を行った結果、これまで我々が示してきたモデルで十分説明できることが示された。

また、THEMIS 衛星群による高時間分解能観測により、リコネクション構造内の変化を調べることが可能となり、衛星の通過領域をリコネクションファン、プラズモイドコア、プラズモイド先端で区別することが可能であることが示され、またこれにより、我々の磁気リコネクションモデルの正当性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nitta Shin-ya, Kondoh Koji	4. 巻 936
2. 論文標題 Effects of Magnetic Shear and Thermodynamic Asymmetry on Spontaneous Magnetohydrodynamic Reconnection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 125 ~ 125
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac729f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 大規模太陽フレア前の非対称磁気リコネクション領域の抽出
3. 学会等名 RISH電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 清水徹
2. 発表標題 テアリング不安定性の線形理論について総括
3. 学会等名 RISH電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 新田伸也, 近藤光志
2. 発表標題 磁気リコネクションにおける磁気シアと非対称性の影響
3. 学会等名 名大ISEE共同研究集会「太陽圏の次世代研究検討会」
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kondoh K. and Nitta S.
2. 発表標題 Study of the global structure of the dayside magnetic reconnection using MHD simulations and in-situ observations
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新田伸也・近藤光志
2. 発表標題 新しい磁気リコネクションモデルの太陽 地球系での観測的検証
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水徹
2. 発表標題 テアリング不安定性の磁気流体線形理論から見た高速磁気再結合過程のトリガ問題 (とカスケード停止問題)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 太陽コロナ中の非対称磁気リコネクション
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kondoh K. and Nitta S.
2. 発表標題 GEOTAIL observations of magnetic reconnection environment around the dayside geomagnetopause
3. 学会等名 Symposium on the Future of Heliospheric Science: From Geotail and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kondoh K. and Nitta S.
2. 発表標題 THEMIS observations of magnetic reconnection structures in the dayside geomagnetopause
3. 学会等名 Symposium on the Future of Heliospheric Science: From Geotail and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 昼側磁気圏境界における非対称三次元磁気リコネクション
3. 学会等名 2023年度STEシミュレーション研究会 - 次世代HPCにおけるSTPシミュレーション - RISH電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム 合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kondoh K.
2. 発表標題 Three Dimensional MHD simulations of the Dayside Asymmetric Magnetic Reconnection
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 シア磁場を考慮した非対称磁気リコネクションの三次元効果
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2022年秋学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kondoh K.
2. 発表標題 Study of the MHD scale asymmetric magnetic reconnection in the dayside geomagnetopause
3. 学会等名 COSPAR 2022 44th scientific assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水徹
2. 発表標題 テアリング不安定性の線形理論(粘性効果による安定化)
3. 学会等名 2023年度STEシミュレーション研究会 - 次世代HPCにおけるSTPシミュレーション - RISH電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム 合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水徹
2. 発表標題 開放上流境界条件におけるテアリング不安定性の線形理論(粘性効果の導入)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2022年秋学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nitta S. and Kondoh K.
2. 発表標題 The self-similar reconnection model --a new MHD reconnection model for astrophysical applications--
3. 学会等名 Symposium on the Future of Heliospheric Science: From Geotail and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新田伸也、近藤光志
2. 発表標題 自己相似磁気リコネクションモデルの数値的研究
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kondoh K.
2. 発表標題 Study of the MHD scale asymmetric magnetic reconnection in the dayside geomagnetopause
3. 学会等名 COSPAR 2022 44th scientific assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 昼側磁気圏境界環境と磁気リコネクション
3. 学会等名 京都大学生存圏研究所 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kondoh K.
2. 発表標題 Physical conditions around the dayside magnetopause and asymmetric magnetic reconnection
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 Relationship between the circumstances of the dayside magnetopause and magnetic reconnection
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2021年秋学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 銭谷誠司、三好隆博、近藤光志、Wai-Leong Teh
2. 発表標題 磁気流体シミュレーションコード OpenMHD の開発
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2021年秋学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤光志
2. 発表標題 Asymmetric magnetic reconnection configuration in the dayside magnetopause
3. 学会等名 STEシミュレーション研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新田伸也・近藤光志
2. 発表標題 シア磁場非対称磁気リコネクションの構造とエネルギー変換
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	新田 伸也 (Nitta Shinya) (30377121)	筑波技術大学・障害者高等教育研究支援センター・准教授 (12103)	
研究分担者	清水 徹 (Shimizu Tohru) (60196524)	愛媛大学・宇宙進化研究センター・准教授 (16301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------