

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18748

研究課題名(和文)非中性プラズマ中での磁気リコネクション

研究課題名(英文)Magnetic reconnection in non-neutral plasmas

研究代表者

星野 真弘(Hoshino, Masahiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90241257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、相対論的プラズマの磁気リコネクションは、パルサー磁気圏やマグネターなど宇宙物理で注目されている。そして、電子と陽電子の密度が異なる帯電したプラズマで満たされていると考えられている。本研究では、(1)帯電プラズマの静電場を(人工的)重力で釣り合わせた平衡解、(2)準中性プラズマのハリス平衡解をローレンツ変換して得られる帯電プラズマの平衡解、(3)準中性条件ではあるが電流を担うドリフト電流が相対論的速度で流れている平衡解の3つについて調べた。特に3番目のケースは、従来の予想とは異なり、リコネクションの成長が、ドリフト電流のローレンツ因子に逆比例して成長が抑制されることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温希薄プラズマ中では、磁場のエネルギーを熱エネルギーに変換する素過程として、磁力線の繋ぎ換えによって起きる磁気リコネクションと呼ばれるものがあり、実験室プラズマから宇宙プラズマまで数多くの研究が行われてきている。本研究は、極限宇宙で重要となる磁場を作る電流の速度が相対論的な速度を持つ場合の磁気リコネクションについて、理論およびスーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションを行い、電流速度が光速に近づくとリコネクションのエネルギー変換効率が著しく低下することを明らかにした。これはパルサー天体を始めとする高エネルギー天体のプラズマ環境を理解するうえで重要な素過程である。

研究成果の概要(英文)：Recently, relativistic magnetic reconnection has received great attention in relation to astrophysical objects (e.g., pulsar magnetosphere and magnetar), and non-neutral plasma with different plasma density between electron and positron is believed to be occupied. We investigated three cases: (1) an equilibrium state with the electrostatic field in the non-neutral plasma is balanced by an artificial gravity, (2) a non-neutral equilibrium state obtained by the Lorentz transformation from the standard Harris solution, and (3) the Harris solution with a relativistic drift current. Specifically, about the third project, we found that, contrary to the conventional understanding of the fast energy dissipation by the relativistic reconnection, the growth of magnetic reconnection is suppressed, and is inversely proportional to the Lorentz factor of the drift speed.

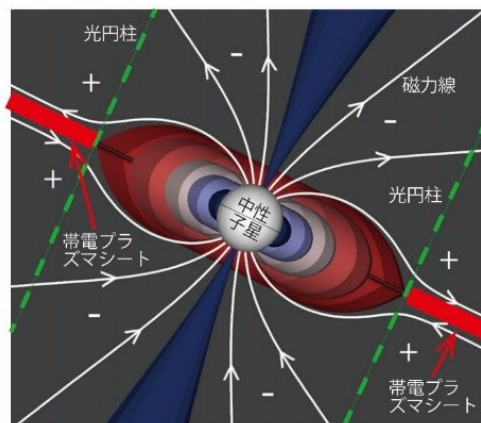
研究分野：宇宙空間プラズマ物理学

キーワード：磁気リコネクション 相対論プラズマ 非中性プラズマ パルサー磁気圏

## 1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは、磁場の極性が反転する電流層に閉じ込められたプラズマが磁力線のつなぎ替えにより起きる不安定で、磁場エネルギーを熱エネルギーや運動エネルギーに効率よく変換するメカニズムとして知られている。1950年頃から太陽フレアや地球磁気圏サブストームなどの磁気爆発現象の解明や、核融合プラズマでのディスラプション現象を制御する物理過程として数多くの研究がなされてきた。しかし、これまでのリコネクション研究は、すべてプラズマ準中性が保たれているプラズマシートでの研究であった。磁気リコネクションの起きるプラズマシートの構造は、ガス圧が優勢である電流層を、磁気圧の優勢な極性の反転する磁場圧で支えることでマクロな安定構造を保っており、一般に「ハリス解」と呼ばれるブラソフ平衡解を初期条件に研究が進められてきている。

一方で、右図で示したような強磁場を有し高速回転するパルサー磁気圏では、通常の準中性のプラズマではなく、帯電したプラズマで満たされていると考えられている(DeVore et al., ApJ, 2015)。右図は標準的パルサー磁気圏のモデルであるが、図の中央が強磁場を持つ中性子星で、そこから伸びる磁力線が白線(実線)で示されている。また単極誘導電場によってプラズマが帯電している様子が、正および負の記号であらわしてある。基本的に中性子星近傍ではダイポール型の閉じた磁場構造を持つが、中心から遠ざかるにしたがって回転方向の速度が増大し、磁力線が遠心力で引き延ばされる。そして回転速度が光速になる半径(光円柱、緑色の破線)のところで磁力線は開いた形状を持つと同時に、プラズマがほぼ光速



で流れ出すと考えられている。帯電プラズマシートは、赤道における開いた磁力線で取り囲まれた領域(赤色の太線)である。これまでのパルサー磁気圏研究では、この領域を特異面として扱い、そこでの不安定性やダイナミクスについては詳細な議論がなされていない。通常の中性プラズマの性質から、磁気リコネクションによって磁場のエネルギーが解放され、高エネルギー粒子が加速されているのではないかと考えられてきたが、果たしてそのようなエネルギー解放が本当に起きるのかどうかは全く分かっていなかった。

このように、帯電プラズマシートのリコネクションは、極限宇宙の天体物理への応用として興味深いだけでなく、非中性プラズマや相対論プラズマにおける素過程としても重要な問題と位置付けられる。そして、本問題の背景には、そもそも帯電プラズマシートの平衡解(初期条件)をどのようにとらえるかという基本的な問題から考察を進める必要があった。非中性プラズマと相対論プラズマは密接な関係にあり、例えば、準中性プラズマの平衡解として知られるハリス解は、電流方向にローレンツ変換を施すことで非中性プラズマの平衡解を得ることが出来る。このような非中性プラズマシートのリコネクションは、単なるローレンツ変換の問題と見なすことができるであろうが、より一般の非中性プラズマの磁気リコネクションについては全くわかっていなかった。そのため、本研究では、平衡解の議論から初めて、非中性プラズマと相対論プラズマ中が織りなす磁気リコネクション過程に挑戦することとした。

## 2. 研究の目的

パルサー磁気圏やマグネターなどでは、強磁場に閉じ込められた相対論的高温プラズマの電流層で、磁気リコネクション過程によって爆発的な磁気エネルギーの解放が起きると考えられてきた。磁気リコネクションは、磁場の極性が反転する電流層に閉じ込められたプラズマが磁力線のつなぎ替えにより起きる不安定で、磁場エネルギーを熱エネルギーや運動エネルギーに効率よく変換するメカニズムであり、近年になって、リコネクションで効率よく高エネルギー粒子加速が起きることが明らかになった。このようなリコネクション過程は、1950年頃から太陽フレアや地球磁気圏サブストームなどの磁気爆発現象の解明や、核融合プラズマでのディスラプション現象を制御する物理過程として数多くの研究がなされてきており、また近年の天文観測では、かに星雲において、光子エネルギーが数日で1GeV程度まで達するガンマ線フレアが発見され(Tavani et al., Science, 2011; Abdo et al. Science, 2011)、リコネクション過程が注目されている(e.g., Cerutti et al, PoP, 2014; Blandford, Hoshino et al., SSR, 2017)。このようにリコネクションは、現在も重要な素過程として研究が進展してきている。ところが、これまでのリコネクション研究は、すべて電子とイオンの電荷密度が釣り合ったプラズマの準中性条件が保たれているプラズマシートについての研究であった。すなわち磁気リコネクションの起きるプラズマシートの構造は、ガス圧が優勢である電流層を、磁気圧の優勢な極性の反転する磁場で支えることで平衡状態を保っており、静電場は存在していない系であった。しかし、

強磁場を有し高速回転するパルサー磁気圏では、電子と陽電子の密度が異なる帯電したプラズマで満たされていると考えられおり、通常の準中性プラズマではなく、非中性プラズマのリコネクションを調べる必要がある。非中性プラズマでの電流層の平衡解についてもよくわかっていない。本研究では、これまでのリコネクション研究を発展させて、通常の電気中性のプラズマシートではなく、「帯電した」プラズマシートでの磁気リコネクションと、その基礎となるプラズマシートのドリフト電流が相対論的な速度を持つ場合のリコネクションについて調べることを目的とした。

### 3. 研究の方法

まず初年度に行った「帯電したプラズマシート」のリコネクション研究は、正もしくは負の荷電粒子が過剰なプラズマシートを対象とし、ローレンツ変換で静電場を消去できない強い静電場が存在する平衡解の考察であった。すなわち、準中性が満たされているプラズマシートにおいて、電流方向にローレンツ変換を施すと、イオンと電子のドリフト速度が異なることから、変換後系ではイオンと電子の電荷密度が異なり、有限の静電場が生じる。 $B^2 - E^2$  はローレンツ不変量であり、このような系では、電場  $E$  が磁場  $B$  より小さくなっており、これまでの準中性プラズマでのリコネクションと基本的に同じである。本研究では、 $E > B$  の場合を扱うことになるが、膨張する帯電プラズマをローレンツ力だけでは閉じ込めることが出来ないため、外部から何らかの力で支える必要がある。本研究では、特異な状況ではあるが、支える力として空間非一様な人工的な重力を仮定した。これは例えば重力回転系において、赤道面から離れると、遠心力と重力の合力が赤道面に向かう成分を持っていると仮定してもよいであろう。この仮定の下で、粒子コードを用いたシミュレーションを行い、短時間の爆発的なエネルギー解放があり得るのかどうか、また非熱的高エネルギー粒子が加速されるかどうかについて非線形時間発展を調べた。粒子コードは、プラズマシミュレーションで一般的に用いられる第一原理の計算であり、電磁場を記述するマクスウェル方程式と電子およびイオンの運動をローレンツ方程式に従って時間発展を計算するものである。

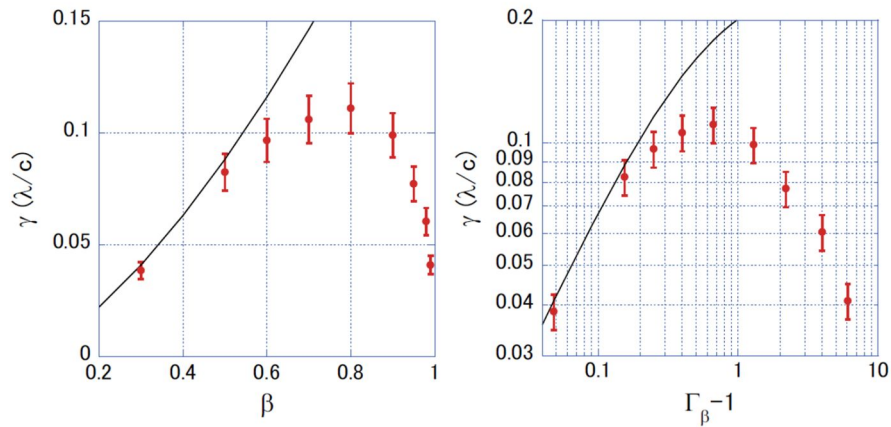
次年度以降は、初年度の空間非一様な重力を仮定した初期条件設定を見直して、中性プラズマのリコネクションとの違いを明確化するために方針を少し変更した。そして、準中性プラズマのハリス解をローレンツ変換して得られるプラズマシートの平衡解を初期条件においた非線形時間発展と、準中性プラズマであるがイオンと陽電子が光速に近い同じ大きさの速度で反対方向にドリフト運動をしている系のリコネクション、すなわち相対論的ドリフト速度を持つ系でのリコネクションについてシミュレーションおよび線形理論解析を行った。線形理論解析では、エネルギー原理に基づく線形成長率の計算を相対論的高温かつ高速ドリフト運動をしているプラズマシートに応用した。数値計算では、光速に近いドリフト速度を持つ電流層を、精度よく計算するために、粒子の運動を解くローレンツ方程式プログラムの改良も行うこととした。

### 4. 研究成果

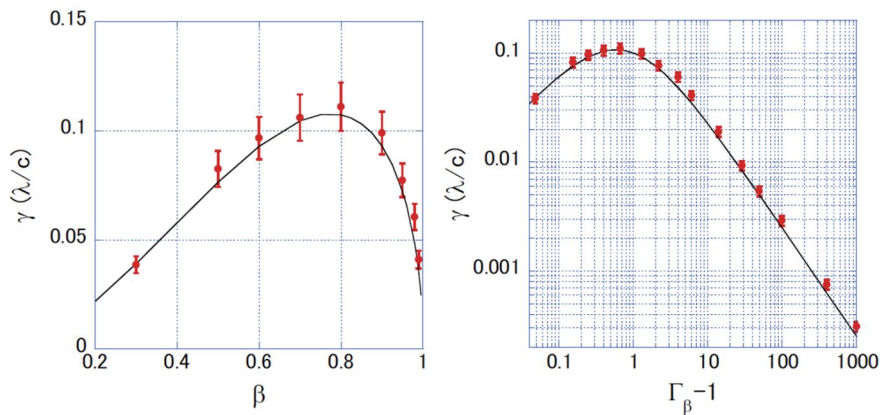
初年度に行った非一様な重力を仮定した帯電プラズマシートの磁気リコネクションのシミュレーション成果はいくつか解決すべき点があり、ここでは主として方針転換後の相対論的速度で流れるドリフト電流の成果について述べることにする。

まず、通常の準中性プラズマでの平衡解をローレンツ変換して得られる帯電プラズマについて、粒子コードを用いたシミュレーションの線形成長率と、従来より知られている線形成長率に対して時間のローレンツ変換を考慮した成長率を比較した。この初期条件は、シミュレーションで電流方向のローレンツ収縮を受けたボックスサイズをどのように取り扱うかが大切であり、理論とシミュレーションとの違いから、帯電プラズマの新しい性質を解き明かそうとした。ローレンツ因子は 1 から 1000 程度まで変化させて調べたが、シミュレーションの成長率は、従来理論にローレンツ因子の時間の延びの効果を入れたものとほとんど変わらないことを見出した。

次に、相対論的な速度で流れるドリフト電流の効果を調べるために、電子と陽電子の電荷密度が釣り合っている準中性プラズマの電流層を仮定するが、電子と陽電子は反対方向に同じ大きさで相対論的に流れるハリス平衡解を考察した。この平衡解は、ドリフト速度が相対論的速度になっているが、その以外の平衡解の与え方は、一般に多くのシミュレーションで用いられているものと全く同じである。下の図には、プラズマ粒子シミュレーションで得られた線形成長率をエラーバー付きの赤丸で、従来のリコネクションの線形成長率が黒の実線で示した。左型の図で、横軸は光速で規格化したドリフト速度、縦軸は光速がプラズマシートを通過する時間で規格化した線形成長率である。ドリフト速度  $\beta$  が 0.5 程度以下では従来の理論と一致しているが、 $\beta$  が 0.5 以上になると、シミュレーション結果は著しく線形成長率が抑制されることがわかる。右の図には、縦軸は左側と同様に規格化した線形成長率を対数グラフで、横軸にはドリフト速度  $\beta$  のローレンツ因子  $\gamma$  でプロットしてある。相対論的ドリフト速度の領域では、線形成長率が著しく低下することがわかる。



従来のリコネクションの理論では、ドリフト速度が光速の5割程度になると、大きくずれることが分かったので、ドリフト速度が相対論的になった場合の理論式を新たに構築した。具体的には、無衝突リコネクションの慣性抵抗の評価に現れるランダウ共鳴の項を、相対論的高温かつ相対論的ドリフト速度で流れていることを考慮して再評価した。詳細は、発表論文 (Hoshino, ApJ 2020) を参照。下記の左側の図は、上記の図と同様に粒子シミュレーションで得られた成長率が赤丸、改良版の線形成長率が黒の実線である。右側の図は対数プロットであ



り、ドリフト速度 について、ローレンツ因子が1000まで示した。図からわかるように、我々が今回導いた線形成長率は、シミュレーション結果と一致している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Martin Pohl, Masahiro Hoshino, Jacek Niemiec	4. 巻 -
2. 論文標題 PIC simulation methods for cosmic radiation and plasma instabilities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnpnp.2019.103751	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Oka, F. Otsuka, S. Matsukiyo, L. B. Wilson III, M. R. Argall, T. Amano, T. D. Phan, M. Hoshino, O. Le Contel, D. J. Gershman, J. L. Burch, R. B. Torbert, J. C. Dorelli, B. L. Giles, R. E. Ergun, C. T. Russell, and P. A. Lindqvist	4. 巻 886
2. 論文標題 Electron Scattering by Low-Frequency Whistler Waves at Earth's Bow Shock	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab4a81	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Morita, K. Nagashima, M. Edamoto, K. Tomita, T. Sano, Y. Itadani, R. Kumar, M. Ota, S. Egashira, R. Yamazaki, S. J. Tanaka, S. Tomita, S. Tomiya, H. Toda, I. Miyata, S. Kakuchi, S. Sei, N. Ishizaka, S. Matsukiyo, Y. Kuramitsu, Y. Ohira, M. Hoshino, and Y. Sakawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Anomalous plasma acceleration in colliding high-power laser-produced plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5100197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Artem Bohdan, Jacek Niemiec, Martin Pohl, Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, and Masahiro Hoshino	4. 巻 885
2. 論文標題 Kinetic simulations of nonrelativistic perpendicular shocks of young supernova remnants. II. Influence of shock-surfing acceleration on downstream electron spectra	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab43cf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hoshino Masahiro	4. 巻 868
2. 論文標題 Energy Partition between Ion and Electron of Collisionless Magnetic Reconnection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L18 ~ L18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaef3a	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 -

1. 著者名 Kuramitsu Y., Moritaka T., Sakawa Y., Morita T., Sano T., Koenig M., Gregory C. D., Woolsey N., Tomita K., Takabe H., Liu Y. L., Chen S. H., Matsukiyo S., Hoshino M.	4. 巻 9
2. 論文標題 Magnetic reconnection driven by electron dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-07415-3	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 該当する

1. 著者名 Hoshino Masahiro	4. 巻 900
2. 論文標題 Stabilization of Magnetic Reconnection in the Relativistic Current Sheet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 66 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba59d	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6件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Magnetic reconnection in relativistic astrophysical plasmas
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Ion and electron heating and their energy partition during magnetic reconnection
3. 学会等名 Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Ion and electron energy partition and T-V relation during magnetic reconnection
3. 学会等名 Korean Astrophysics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Ion and electron heating and their energy partition during magnetic reconnection
3. 学会等名 Workshop on Magnetic Fields in Laboratory High Energy Density Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Particle acceleration in plasma universe
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, AAPPs-DPP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Ion and electron heating during magnetic reconnection
3. 学会等名 Max-Planck Princeton Center Workshop (招待講演)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------