

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01949

研究課題名(和文) 磁気リコネクションでのイオンと電子のエネルギー分配の物理

研究課題名(英文) Physics of energy partition between ion and electron during magnetic reconnection

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) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：高温希薄なプラズマで満たされている宇宙空間では、粒子間の平均自由行程が非常に長く、加熱が起きた後のイオンと電子の温度は異なる。また速度分布関数も、熱的成分に加えて非熱的成分を有することが一般的である。しかし、この無衝突プラズマ系のエネルギー分配の物理は未解決となっている。本研究では、磁場エネルギーを効率的に熱エネルギーに変換する磁気リコネクションに絞って、電磁粒子シミュレーションおよび磁気圏衛星データ解析により、選択的プラズマ加熱や加速について調べた。リコネクションの加熱率は、イオンと電子の質量比に依存することや、プラズマの温度が高温になるほど非熱的成分の生成率が良い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

無衝突プラズマ系での選択的加熱や加速の物理は、重要かつ基本的な未解決問題となっている。加熱や加速が、プラズマ集団現象による波動と粒子の相互作用の結果進行しているが、非線形効果が効く複雑な現象がおきており、エネルギー分配の物理は手つかずの状態であった。ここでは磁気リコネクション過程に絞って、それに特徴的な電磁場構造に着目して、加熱率の定式化や、定量的に非熱的成分の生成率を見積もることに成功した。今回の成果は単純化された系での考察に留まっているが、より一般的な場合への拡張を視野に入れた成果となった。

研究成果の概要(英文)：In plasma universe with hot dilute plasma, the mean free paths between particles are very long, and the temperatures of ions and electrons differ after plasma heating. The velocity distribution function also typically has a non-thermal component in addition to the thermal component. However, the physics of energy partition in this collisionless plasma system remains unresolved. In this study, preferential plasma heating and acceleration are investigated by using electromagnetic particle simulations and magnetospheric satellite data analysis, focusing on magnetic reconnection, which efficiently converts magnetic field energy into thermal energy. It was found that the heating rate of reconnection depends on the ion-to-electron mass ratio and that the higher the plasma temperature, the better the production rate of non-thermal components.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：磁気リコネクション エネルギー分配 無衝突プラズマ プラズマ粒子シミュレーション 磁気圏衛星観測

### 1. 研究開始当初の背景

高温希薄なプラズマで満たされている宇宙空間では、粒子間の平均自由行程が特徴的なスケールに比べてはるかに長く、ダイナミックなプラズマ変動現象による加熱後も、プラズマを構成するイオンと電子の温度は異なりエネルギー等分配は成り立っていない。たとえば、地球磁気圏尾部では、陽子の温度が電子よりも数倍程度高温であることが観測的に知られている。また、衝撃波や磁気リコネクションなどの素過程に着目したプラズマ粒子シミュレーションでも、イオンの方が電子よりも温度が高いことがわかっている。無衝突プラズマでは、波動と粒子の相互作用によって加熱や加速が進行するが、エネルギー分配の物理は未解決の問題となっている。このエネルギー分配問題の解決の手がかりを得るために、ここでは太陽フレアや磁気圏サブストームなど様々な宇宙プラズマ中で、磁気エネルギーを運動・熱エネルギーに変換する機構として重要である磁気リコネクションに注目して、イオンと電子にどのようにエネルギーが配分されるのかを考察した。また、イオンと電子のエネルギー分配と同様の問題として、熱的プラズマと非熱的プラズマの分配問題も重要である。無衝突系のプラズマでは、加熱されたプラズマは、熱的な分布に加えて非熱的粒子を含んでいることが一般的であるが、熱的プラズマと非熱的プラズマの分配もよくわかっていない。このようなエネルギー分配は、プラズマシートの進化や構造に関わるプラズマ動力学を考える際にも極めて重要である。

### 2. 研究の目的

反平行磁場の磁気圧で囲まれた高密度プラズマは、磁気リコネクションに伴う磁場エネルギー散逸によって効率よく加熱されることが知られているが、磁気リコネクションでの加熱のメカニズムは、X点と呼ばれる磁場拡散領域に加えて、プラズマが流入するプラズマシート境界層、磁気リコネクションで発生した高速プラズマ流が静止しているプラズマに衝突する磁場の pileup 領域など、さまざま領域での加熱が起きていることが議論されてきている。実際、地球磁気圏の衛星で観測される加熱はこれらを示唆するものの、単なる磁気リコネクションだけでなく様々な要因が関与しており複雑である。一方、加熱過程だけでなく、非熱的高エネルギー成分を生成する加速過程についても、リコネクションに伴う大局的電場や磁場拡散領域での電場による加速や乱流場との相互作用など、いろいろな可能性が議論されてきている。これらの様々な加熱や加速過程から、基本的な加熱・加速の主要因を引き出して、それに伴うエネルギー分配を理解することを目標とした。本研究では、地球磁気圏から天体現象で起きる磁気リコネクションについて、無衝突プラズマ系のエネルギー分配のメカニズムを、プラズマ電磁粒子シミュレーションと磁気圏での衛星観測を用いて調べることが目的である。

### 3. 研究の方法

磁気リコネクションに伴って起きる加熱および加速メカニズムを調べるために、まずプラズマシートの平衡解からのリコネクションの時間発展を、空間2次元のプラズマ電磁粒子シミュレーションで調べた。特に加熱過程を、断熱過程と非断熱過程に分けて理解するために、磁気フラックスごとの温度変化を調べた。これは本研究で工夫したポイントであるが、基本的に磁場凍結が成り立っていることから、密度と温度変化を理解するうえで有益であ

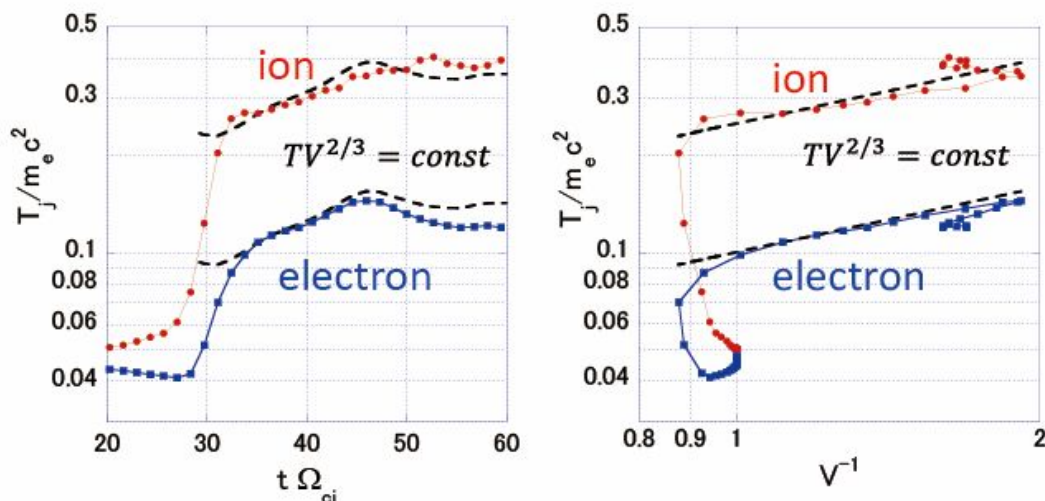
る。断熱過程であれば、磁場と密度には一定の関係があり、それからのずれを議論することで非断熱過程によるイオンと電子の選択的加熱が議論できる。

次に、熱的プラズマと非熱的プラズマのエネルギー分配を理解するために、単純化して電子・陽電子プラズマの粒子シミュレーションを行い、リコネクション後のエネルギースペクトルに対して、熱的成分と非熱的成分の関係を調べた。この際に、エネルギースペクトルが、熱的なマックスウェル分布と非熱的なカッパ分布の重ね合わせて非常にうまくフィットできることを発見し、シミュレーションの初期パラメータを非相対論的な温度から相対論的高温プラズマまで調べることで、温度の関数として、エネルギー分配を理解した。

数値シミュレーション研究と並行して、地球磁気圏の衛星観測データ解析も進めた。MMS 衛星で得られたプロトンデータを用いて、磁気圏尾部における高温プラズマ (1-10 keV) と低温プラズマ (<700 eV) の特性を統計的に調査した。無衝突系の磁気圏プラズマでは、加熱・加速を受ける前の低温プラズマと受けた後の高温プラズマが共存している状態を、プラズマ速度分布関数の直接観測から確認できる場合がある。磁気圏尾部の広範囲にわたって得られた多量データに対して両成分を分離抽出する解析を実施し、両成分のプラズマ特性と空間分布を調べることにした。

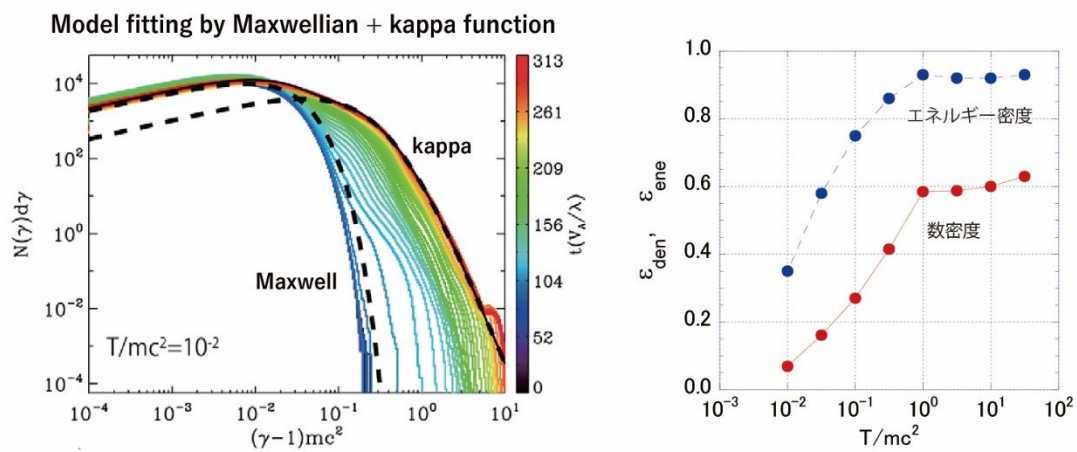
#### 4. 研究成果

今回の成果は大きく4つある。まず最初は、イオンと電子の選択的加熱である。磁気リコネクションの時間発展により、プラズマシートの外側に位置していた磁気フラックスは、時間とともにプラズマシートに運ばれ、そこで磁力線の繋ぎ換えを起こして、アルフベン速度の高速プラズマとともに両側に輸送されるが、粒子シミュレーションを用いて、この磁気フラックスに閉じ込められた電子およびイオンの平均温度を調べたのが下図である。左側は、横軸イオンのジャイロ周期で規格化した時間、縦軸イオンと電子の温度を静止質量で規格化してある。時間  $t < 30$  では、磁気フラックスがプラズマシートの外側にあり冷たい温度であるが、 $t \sim 30$  で磁場の繋ぎ換えがおこり急激に高温となり、 $t > 35$  からはプラズマジェットとともに下流に運ばれていく。この変化で注目したいのは、右側の縦軸の温度と横軸の磁気フラックスの体積  $V$  との関係である。 $t > 35$  では、イオン温度も電子温度も体積  $V$  の  $2/3$  乗に比例し、理想的な断熱加熱を示しているが、 $t \sim 30$  では、体積変化がほとんどなく急激な非断熱加熱が起きている。このことから磁気リコネクションの選択的加熱は、磁力線の繋ぎ変わると

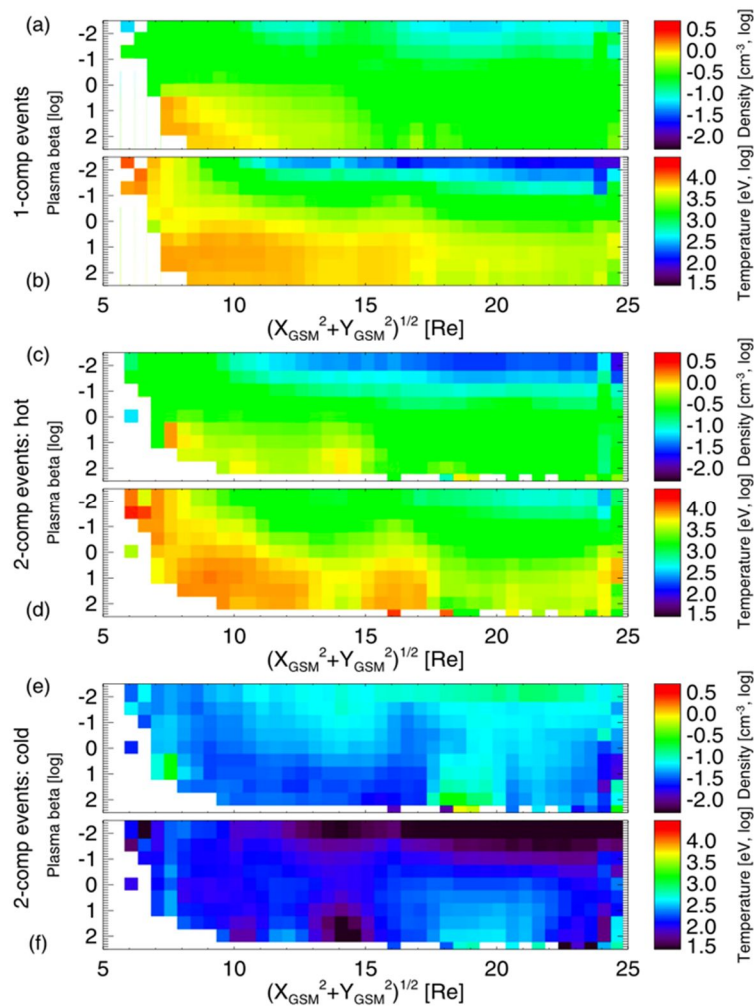


きに起きていることが今回初めて明らかになった。またこの選択的加熱を説明する理論モデルも考察し、非断熱加熱中での温度増加は、イオンと電子の質量比の 1/4 乗に比例することを見出した。なお、この初期結果は論文 Hoshino, PoP 2018 にあるが、この研究では初期温度の違いについても考慮し、温度増加がイオンと電子の（質量と温度の積）の比の 1/4 乗に依存することを明らかにした。

2 番目の成果は、電子・陽電子プラズマ中での熱的エネルギーと非熱的エネルギーの分配である。下図に示したのは、粒子シミュレーションを用いて、反平行磁場のプラズマシートを初期条件にしたリコネクションの時間発展後のプラズマシートのエネルギースペクトル（左側）と非熱的粒子が占める数密度とエネルギー密度（右側）である。エネルギースペクトルは、最初の時刻では熱的マックスウェル温度であったが（青色系の線）、時間とともにカッパ分布で近似できる非熱的成分が卓越している（赤色系の線）。カッパ分布の非熱的成分の全体に占める割合を示したのが右図で、横軸に初期のプラズマシートの温度の関数として示してある。非相対論的な温度のプラズマシートではエネルギー密度は温度とともに下がり、例えば、静止質量温度の 1/100 では 3 割から 4 割程度であるが、相対論的溫度では 9 割以上が非熱的成分になることが明らかになった(Hoshino, 2022)。



3 番目の成果は、地球磁気圏の衛星観測データを用いて、プラズマシートの温度の特性と空間分布を調べた。プラズマシートの温度は、単一の温度で近似できるときと、2 成分の温度からなるときがある。2 成分は、リコネクションによる加熱を受ける前の低温プラズマと受けた後の高温プラズマの共存であると考えられるが、その特性からリコネクションの加熱について議論した。主要結果を下図に示す。縦軸はプラズマ 値で、プラズマシートからの距離の指標であり、横軸が地球からの距離である。上段の二つが 1 成分の密度と温度、中段の二つが 2 成分系の高温プラズマの密度と温度、下段の二つが 2 成分系の低温プラズマの密度と温度である。高 がプラズマシート側、低 は磁気ローブ側に対応する。1 温度プラズマおよび 2 温度プラズマの高温成分については、密度温度ともに磁気ローブ（低 域）からプラズマシート（高 域）に向けて上昇している（図 a-d）。2 温度プラズマの低温成分は、温度は同様にプラズマシート側が高くなっている（図 f）一方で、密度はローブ側が高くなっている（図 e）。その密度の変動が大きい領域は、1 温度プラズマや 2 温度プラズマの高温成分の密度温度が大きく変動する領域と一致している。また、図は省略するが、2 温度プラズマの観測頻度は同領域で最も高く、1 温度プラズマの観測頻度はより高 域で高か



った。以上の結果から、磁気ローブからプラズマシートに供給される低温プラズマが、プラズマシート境界域においてプラズマシート高温プラズマと混合していることが分かった。イオンの加熱がプラズマシート境界域で効率よく発生していることを示唆している(Keika et al., 2022a)。

4 番目の成果は、あらせ衛星で観測されたデータを用いて、磁気リコネクションに伴う高エネルギー高速流が到達する近地球領域におけるプラズマエネルギースペクトル(速度分布関数)特性の質量および電荷に対する依存を調査した。地球磁気圏では太陽風起源のプラズマ(主に  $H^+$ 、 $He^{++}$ )と地球大気起源プラズマ(主に  $H^+$ 、 $He^+$ 、 $O^+$ 、 $O^{++}$ )が共存しているため、異なる質量および電荷を持つイオンの変動を直接観測することができる。特に磁気嵐やサブストームといった磁気圏の活動度が高い状態では、多量の地球大気起源プラズマが磁気圏に供給されるため、両起源のプラズマを同時に観測し特徴の相違を調査することができる。本研究では、複数の磁気嵐期間において異なる 5 つの粒子種 ( $H^+$ 、 $He^{++}$ 、 $He^+$ 、 $O^{++}$ 、 $O^+$ ) のエネルギースペクトル時間空間変動を調査し、磁気圏尾部でのプラズマ高エネルギー化(加熱・加速による energization)は、電荷あたりの質量が大きいほど効率的に発生していることが明らかになった(Keika et al., 2022b)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 K. Watanabe, K. Keika, M. Hoshino, N. Kitamura, Y. Saito, B. L. Giles, and W. R. Paterson	4. 巻 46
2. 論文標題 Statistical study on electron and ion temperatures in the near-Earth reconnection and magnetic pile-up regions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophys. Res. Letters	6. 最初と最後の頁 14223-14229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL084837	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 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Martin Pohl, Masahiro Hoshino, Jacek Niemiec	4. 巻 111
2. 論文標題 PIC simulation methods for cosmic radiation and plasma instabilities	5. 発行年 2020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 29
2. 論文標題 Efficiency of nonthermal particle acceleration in magnetic reconnection	5. 発行年 2022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） 10.1063/5.0086316	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 Hoshino Masahiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Nonlinear explosive magnetic reconnection in a collisionless system	5. 発行年 2021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) 10.1063/5.0050389	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 Totorica S. R., Hoshino M., Abel T., Fiuza F.	4. 巻 27
2. 論文標題 Nonthermal electron and ion acceleration by magnetic reconnection in large laser-driven plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112111 ~ 112111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0021169	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 -

1. 著者名 Keika K., Kasahara S., Yokota S., Hoshino M., Seki K., Amano T., Kistler L. M., Nos? M., Miyoshi Y., Hori T., Shinohara I.	4. 巻 127
2. 論文標題 Preferential Energization of Lower Charge State Heavier Ions in the Near Earth Magnetotail	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space 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) 10.1029/2021JA029786	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 Keika K., Asami R., Hoshino M., Fuselier S. A.	4. 巻 127
2. 論文標題 Global Characteristics of Cold Protons Around Midnight in the Magnetotail: Implication for Efficient Heating and Origin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space 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) 10.1029/2021JA029576	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 Retin Alessandro, Khotyaintsev Yuri, Le Contel Olivier, et al.	4. 巻 54
2. 論文標題 Particle energization in space plasmas: towards a multi-point, multi-scale plasma observatory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 427 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-021-09797-7	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 Baumjohann W., Matsuoka A., Narita Y., et al.	4. 巻 216
2. 論文標題 The BepiColombo?Mio Magnetometer en Route to Mercury	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	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) 10.1007/s11214-020-00754-y	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

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Energy partition between thermal and nonthermal particles in magnetic reconnection
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Nonlinear explosive magnetic reconnection in collisionless plasma
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kunihiro Keika, Satoshi Kasahara, Shoichiro Yokota, Masahiro Hoshino, Kanako Seki, Takanobu Amano, Lynn Kistler, Masahito Nose, Yoshizumi Miyoshi, Tomoaki Hori, Iku Shinohara
2. 発表標題 Observational study on preferential energization of lower-charge-state heavier ions in the near-Earth magnetotail
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Nonlinear explosive magnetic reconnection
3. 学会等名 URSI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Fast particle acceleration mechanisms in astrophysics and laboratory astrophysics
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Science (HEDS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 PIC simulations of particle acceleration and heating mechanism in accretion flows
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-wavelength and multi-messenger era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Nonlinear explosive magnetic reconnection
3. 学会等名 URSI GASS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 Fast particle acceleration mechanisms in astrophysics and laboratory astrophysics
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Science (HEDS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hoshino
2. 発表標題 PIC simulations of particle acceleration and heating mechanism in accretion flows
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-wavelength and multi-messenger era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M. Hoshino	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer, Cham	5. 総ページ数 21
3. 書名 Fully Kinetic (Particle-in-Cell) Simulation of Astrophysical Plasmas: Buchner, J. (eds) Space and Astrophysical Plasma Simulation	

〔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	桂華 邦裕  (Keika Kunihiro)  (10719454)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教    (12601)	

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