

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03953

研究課題名(和文) 宇宙線の加速・輸送における太陽圏境界の役割の解明

研究課題名(英文) Roles of heliospheric boundaries in acceleration and transport of cosmic rays

研究代表者

松清 修一 (Matsukiyo, Shuichi)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：00380709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽圏境界が果たす重要な2つの役割に注目することで、地球で観測される宇宙線の加速・輸送機構の解明を目指した。1つ目は、宇宙線の外部からの侵入を防ぐ砦としての太陽圏境界の役割である。これには磁気流体計算とテスト粒子計算という2つの数値実験手法を組み合わせることで、広大な太陽圏における宇宙線粒子の挙動を粒子軌道レベルで解き明かすことに初めて成功した。2つ目は、宇宙線加速器としての太陽圏境界の役割である。重要な境界構造のひとつである終端衝撃波で生成されると考えられている宇宙線異常成分に注目した。第一原理のフル粒子計算で終端衝撃波を再現し、そのミクロ構造と粒子加速の関係性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽圏境界は米国のボイジャー探査機が今世紀に入って初めて直接探査に成功した。宇宙線の生成や輸送は、生命進化や惑星の気候変動にも重要な役割を果たすと考えられているものの、その詳細はほとんど不明なため、研究の進展への期待が大きい。宇宙線がどのようにして複雑な太陽圏内部を旅して地球にやってくるのか、どのような条件下で終端衝撃波での加速機構が発現するのか、本研究では従来のモデルの制限を超えて粒子軌道レベルでの解明に取り組んだ。ボイジャーは広大な太陽圏境界をたった2本の経路上で探査したにすぎないため、本研究のような数値実験によるアプローチが本質的に重要で、ここで得た知見が次世代の探査計画にも生かされる。

研究成果の概要(英文)：Our research aimed to unravel the mechanisms of acceleration and transport of cosmic rays observed on Earth by focusing on the two crucial roles played by the heliospheric boundary. The first role is that of a fortress preventing the entering of cosmic rays from the external environment. We combined magnetohydrodynamic simulations and test particle calculations, to investigate this aspect. Through this approach, we successfully revealed the behavior of cosmic ray particles at the level of particle trajectories within the vast heliosphere for the first time.

The second role is that of a cosmic ray accelerator within the heliospheric boundary. We specifically focused on the anomalous cosmic rays believed to be generated at an important boundary structure known as the termination shock. By employing first-principles full particle simulations, we reproduced the termination shock and elucidated the relationship between its microstructure and particle acceleration.

研究分野：宇宙プラズマ物理学、宇宙流体環境学

キーワード：太陽圏境界 宇宙線 粒子加速・輸送 微物理特性 MHD計算 フル粒子計算 テスト粒子計算

1. 研究開始当初の背景

今世紀に入って、ボイジャー探査機による太陽圏境界領域の直接観測が行われ、宇宙線異常成分の最終的な加速現場は終端衝撃波ではないかもしれないこと、境界領域での銀河宇宙線と背景プラズマの振る舞いに有意な差があること、さらに IBEX 衛星観測による高エネルギー中性粒子の天球マップに事前には予測されなかったリング構造が現れることなど、衝撃的な事実が次々と判明した。これらを含めた多くの観測事実を、研究者は未だに説明できていない。重要な観測事実として、太陽圏境界領域でのピックアップイオンの存在比(終端衝撃波近傍で 20~30%)が、過去の理論的予想よりも大幅に高かったことが挙げられる。このことは、地球周辺の衝撃波などの観測結果を単純にスケールしても太陽圏境界領域の諸現象を理解できないことを意味する。実際、高いピックアップイオンの存在比が、同領域の微物理特性を特異なものにしていることが、それまでの研究活動で分かっていた。

太陽圏外縁は観測が難しく、直接観測はボイジャーによるものが唯一であるため、数値実験研究が必須である。同分野の研究が盛んな米国では伝統的に磁気流体近似をベースにしたアプローチが主流であった。しかしボイジャーのデータには磁気流体理論で説明できない点が多々あり、流体的なアプローチに限界があることは明らかだった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁気流体近似では無視されるプラズマ運動論にまで踏み込んで、太陽圏境界領域の微物理特性を解明することである。具体的に以下の2点を目指した。

目的1: 境界領域の微物理特性と宇宙線異常成分の成因の解明

目的2: 銀河宇宙線の太陽圏進入過程の粒子軌道レベルでの理解

3. 研究の方法

本研究では3種類の高精度数値実験を組み合わせで用いた。まず、3次元磁気流体計算で大域的な太陽圏の電磁場構造を再現した。銀河における太陽風の勢力圏が太陽圏であるが、太陽圏の内側と外側を隔てる界面は太陽圏界面と呼ばれる。ボイジャー探査機が太陽圏界面を通過したときの太陽からの距離は、太陽-地球間距離(約1.5億km=1天文単位)の120倍ほどであった。銀河の星間媒質(星間風)は太陽に対して相対速度を持っているため、実際の太陽圏は星間風に吹き流されて風下側に引き伸ばされた形状をしていると考えられている。ここでは、太陽を原点としてここから50天文単位的位置に内側計算境界、900天文単位的位置に外側計算境界を設定して、太陽圏の3次元磁気流体構造を再現した(図1)。図の白抜き部分は内側計算境界の内側で、計算領域外である。星間風はこの図のXの正方向に吹いている。黒実線は星間磁場(星間風とともに運ばれる銀河の磁場)を表し、太陽圏を迂回して伸びている。黄実線は太陽風磁場で、太陽の自転の影響でスパイラル状に伸びつつ星間風風下側に吹き流されている。このように、星間磁場と太陽風磁場は基本的に太陽圏界面で隔てられているが、赤実線のように星間磁場と太陽風磁場が結合している領域も存在する。また太陽圏内には、超音速の太陽風が亜音速に減速される終端衝撃波(TS)や、南北で太陽風磁場の極性が反転する領域が赤道面付近にシート状になって現れる電流シート(CS)が形成されている。なお図1の例では、太陽活動は定常で磁軸は太陽の自転軸(z方向)と一致するとした。

磁気流体計算の結果をもとに、2つの不連続面(太陽圏界面および終端衝撃波)の内部構造と、終端衝撃波でのピックアップイオンの加速過程をフル粒子計算を用いて調べた。フル粒子計算は無衝突プラズマの第一原理計算と呼ばれ、多数の電子およびイオン(いずれも超粒子)の運動方程式とマクスウェル方程式をフルに連立して解く。磁気流体計算では解像できない不連続面の内部構造や、終端衝撃波での宇宙線異常成分の加速の詳細を議論するために用いた。

一方、天の川銀河で作られ太陽圏に侵入して地球で観測される銀河宇宙線については、その侵入経路や太陽圏内深部への輸送過程を詳細に調べるため、テスト粒子計算を行った。テスト粒子が感じる太陽圏の電磁場には、磁気流体計算の結果を用いた。本研究以前にも同様の計算例はあ

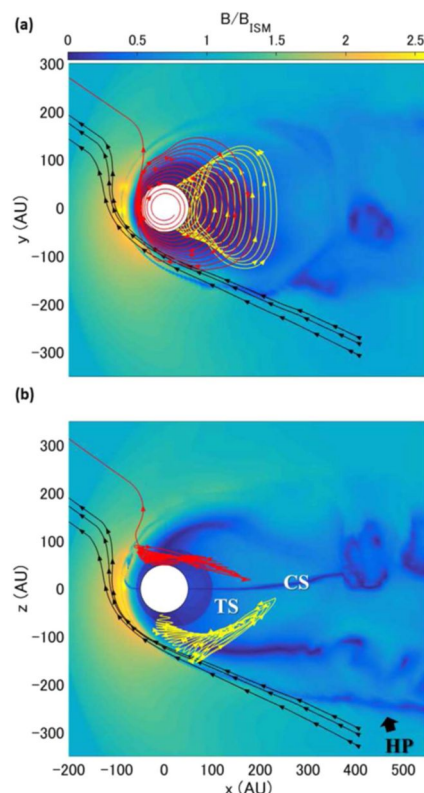


図1 .3次元磁気流体計算で再現した太陽圏。カラスケールは磁場強度で、上段は磁気赤道面(XY)、下段はY=0に沿った子午面(XZ)。太陽圏内外の典型的な磁力線を実線(+矢印)で示す(Yoshida et al., 2021)。

ったが、磁気流体計算の空間解像度が荒いためテラ電子ボルト以上のエネルギーを持つ宇宙線粒子にしか適用できておらず、また丁寧な粒子軌道解析も行われていなかった (Lopez-Barquero et al., ApJ, 2016, 2017)。こうした従来の計算と比べ、本研究の3次元磁気流体計算の空間解像度は2桁高い。これにより、太陽風の変調効果が顕著になる低エネルギーの銀河宇宙線(10ギガ電子ボルト)のテスト粒子計算が初めて可能になった。

4. 研究成果

(1) 日ごとの太陽風データを取り込んだ3次元磁気流体計算コードの開発

前項で説明した磁気流体計算では定常太陽風を仮定しているため、図1は単純化した太陽圏構造である。本研究の粒子計算(フル粒子計算およびテスト粒子計算)はこの結果を前提としている。これにより、テスト粒子計算では宇宙線粒子の挙動を単純化した太陽圏構造と詳細に対応付けて理解することができる。一方で、現実の太陽圏は非定常な太陽活動の効果を反映しており、宇宙線フラックスなどの観測可能な物理量を定量的に評価するためにはこうした効果を正確に取り込む必要がある。将来こうした議論を可能にするため、日ごとの太陽風データを取り込んだ3次元磁気流体計算コードの開発を進めた。

さまざまな地球周回衛星の観測データがOMNIデータとしてNASAにより公開されている。このOMNIデータを用い、地球軌道における日ごとの太陽風の情報を入力として、太陽から20天文単位以遠の太陽圏の大規模構造を再現する3次元磁気流体計算コードを開発した。OMNIデータは地球周回衛星のデータであるため地球位置での情報しか得られない。太陽の自転を考慮して、過去26日分のデータを用いて経度方向の地球軌道での太陽風パラメータを決定する。このパラメータを外挿して内側計算境界(20天文単位に設定)での境界条件を定める。境界条件を日ごとに更新しながら以降の太陽圏構造を計算する。図2はこのようにして計算したプラズマ圧力の子午面分布である。今後は内側境界を地球軌道にまで拡張し、これとテスト粒子計算を組み合わせ地球で観測される宇宙線統計量を定量的に評価する数値計算システムの構築を目指す。

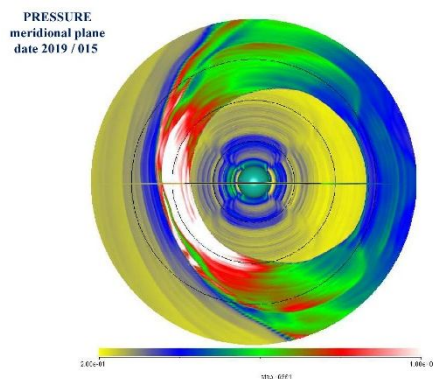


図2.日ごとの太陽風データを取り込んだ太陽圏の磁気流体構造

(2) 太陽圏界面の1次元マイクロ構造

1次元フル粒子計算を用いて衝撃波管問題を解いた。太陽風プラズマを模した低密度かつ弱磁場のプラズマを星間風プラズマを模した高密度かつ強磁場のプラズマが継続的に押す状況を再現し、太陽風中を伝わる衝撃波(=終端衝撃波に相当)、星間風中を伝わる衝撃波(=バウショックに相当)、両プラズマの界面としての接触不連続面(=太陽圏界面に相当)を再現した。1次元系ではあるが、2つの衝撃波と接触不連続面を自己無撞着に解くことで、太陽圏の動径方向構造における接触不連続面の役割を議論することができる。

接触不連続面の厚みは不連続面法線と磁場のなす角が90度からずれるにしたがって大きくなる。この際、不連続面の磁場波形とプラズマ密度(または圧力)波形に大きな違いが認められた。これは非磁気流体的な効果である。不連続面の両側(かつ2つの衝撃波で挟まれた領域)は乱流的で、太陽風プラズマ側では圧縮性の振動と非圧縮性の振動がともに観測された(図3右)。一方、星間風プラズマ側では圧縮性の振動のみが見られ(図3左)、振動は接触不連続面から遠ざかる方向に伝搬した。この星間風プラズマ中を伝わる圧縮性の振動の起源は太陽風プラズマ中にあり、太陽風中で励起された振動のうち圧縮性の振動だけが接触不連続面を透過して星間風中に伝搬することがわかった。これらは速進波と呼ばれるプラズマの波で、接触不連続面を透過する際には非線形性により波形の突っ立ちが起こることも確認した。その結果、星間風側では圧縮性振動のスペクトルが広帯域化している。これらの結果はVLISM(太陽圏界面の外側の星間空間)でボイジャーが観測した乱流の起源が太陽風側にあることを示唆しており、Zank et al. (2017)の理論的予測と整合的であった。結果はMatsukiyo et al., ApJ (2019)で公表した。

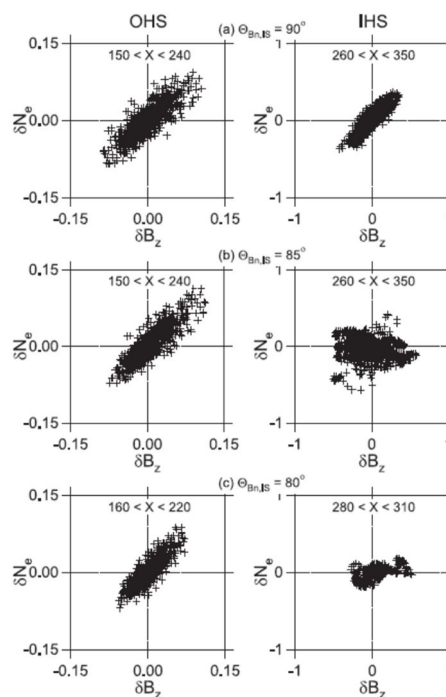


図3.接触不連続面の太陽風側(右列)と星間風側(左列)の磁場揺動と密度揺動の相関(Matsukiyo et al., 2019)

(3) 終端衝撃波の2次元マイクロ構造とピックアップイオンの加速

ピックアップイオンの影響を考慮した終端衝撃波の2次元構造をフル粒子計算により調べた。まずは衝撃波法線方向と上流磁場のなす角(=衝撃波角)が90度となる垂直衝撃波について、ピックアップイオンの相対密度を0%, 20%, 60%と上げると、衝撃波面に沿ったリップル構造の空間スケールが小さくなること、衝撃波下流の乱流場の振幅が衝撃波面からの距離に応じて大きくなることなどを確認した(図4)。こうした振る舞いの違いは、衝撃波遷移層でのプラズマの実効的な温度異方性の度合いに応じて、励起される不安定性の特徴が変化することによっていることがわかった。なお、衝撃波のマッハ数は5強、上流の電子ベータ値は0.25(背景イオン温度=電子温度)、イオン-電子間質量比は100、電子プラズマ周波数とジャイロ周波数の比は4とした。

次に、ピックアップイオンの相対密度を25%として衝撃波角50度の衝撃波を再現した。衝撃波角を斜めにすると、波面で反射されたイオンや電子が上流側に背走するため、衝撃波法線方向に十分大きな計算領域を確保する必要がある。また同時に、粒子が磁力線沿いに衝撃波を跨いで往復することが可能なため、衝撃波を介した粒子加速過程を再現することができるようになる。従来よりも格段に大きな計算領域を確保してイオンジャイロ周波数(Ω_i)の逆数の125倍という長時間計算に初めて成功した。図5は $\Omega_i t = 65$ における計算結果のスナップショットである。上の3つのパネルは各粒子種の $V_x - x$ 位相空間分布で、上から(a)ピックアップイオン、(b)背景イオン、(c)電子である。 $x = 115$ 付近が衝撃波面の位置で、右側が上流である。一部のピックアップイオンが衝撃波面で反射され、正の V_x をもって上流に背走しているのが確認できる。一方、背景イオンの反射は確認されず、下流でも温度はさほど上昇していない。続く3つのパネルは磁場の空間波形を表しており、上から(d) B_x , (e) B_y , (f) B_z である。衝撃波の上流側にも大振幅の磁場揺動が確認できる。上流の3か所($x =$ (g) 400, (h) 300, (i) 200)におけるピックアップイオンの速度空間分布を下の9つのパネルに示す。朱色の円形は入射ピックアップイオンを表している。反射ピックアップイオンは磁力線(左パネルの破線)に沿うビームとなっており、線形分散関係の解析からこのビームが上流の磁場揺動を励起していることがわかった。

下流におけるピックアップイオンのエネルギー分布を図6に示す。横軸は上流の入射イオンの運動エネルギーで規格化したピックアップイオンのエネルギーである。時刻 $\Omega_i t = 100$ あたりから、非熱的成分が有意に生成されている。この非熱的成分の生成時

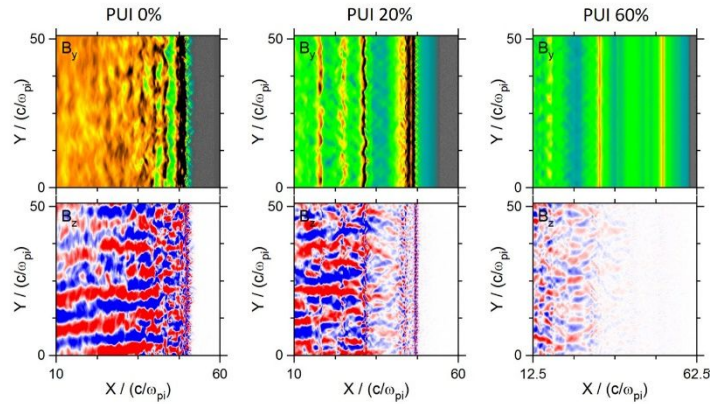


図4. ピックアップイオンを含む垂直衝撃波の2次元構造。

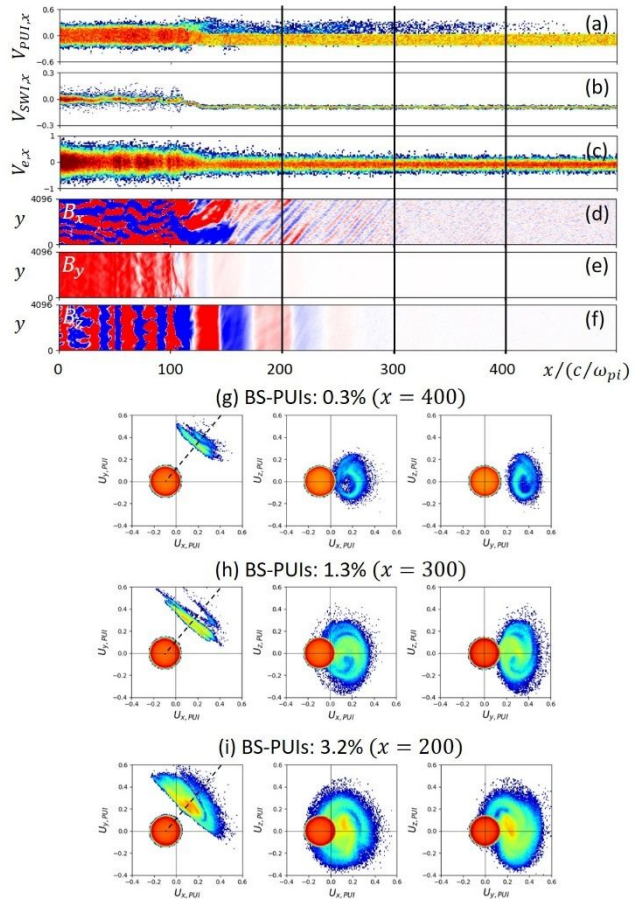


図5. 斜め衝撃波の構造と上流ピックアップイオンの速度分布関数

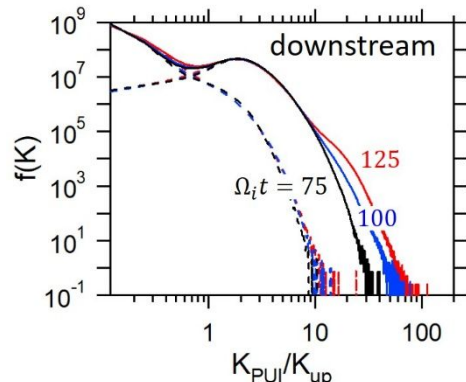


図6. 下流のピックアップイオンのエネルギー分布

間は、過去のハイブリッド計算 (Giacalone et al., 2021) で見積もられた時間とも整合的である。被加速粒子は、衝撃波面で反射されたのち波面近傍にとどまって、衝撃波面を跨ぐようにして磁場旋回運動を繰り返しながら徐々に加速されていることがわかった。これは衝撃波ドリフト加速として知られる加速機構で、過去の 1 次元フル粒子計算でも見られた (Matsukiyo & Scholer, 2014)。ただし、反射直後の粒子の振る舞いには衝撃波ドリフト加速とは異なる特徴も確認されており、今後より詳細な解析が必用である。

(4) 銀河宇宙線の太陽圏への進入過程のテスト粒子計算

3次元磁気流体計算(図1)で得られる電磁場データを用い、銀河宇宙線をテスト粒子としてその運動方程式を第一原理的に解いた。初期において、太陽圏(図7のレインボーカラーが太陽圏界面)の外側を取り囲むように宇宙線粒子を配置して、ランダムな方向に初速度を与える。最終的に内側境界に到達した粒子について、その軌道を解析した。

粒子の初期エネルギーが約1テラ電子ボルト(ローレンツ因子: $\gamma = 1000$) のとき、星間空間での粒子の典型的なジャイロ半径は70天文単位程度であり、これは太陽圏のサイズと同程度である。そのため粒子は太陽圏の微細な電磁場構造にはあまり影響を受けずに、比較的大きなスケールの構造に共振する。星間風の風上方向から侵入する粒子はほとんど直線的に内側境界に達する(図8の緑線)。太陽圏

をかすめて過ぎ去ろうとした粒子の中に、尾部の乱流的な磁場構造に共鳴的に共振して運動方向を大きく変え、前方に戻って内側境界に達するもの(図8の黄線)。太陽圏を取り囲むミラー状の星間磁場によって反射されて内側境界までやってくるものなどがある。比較的多くの粒子が、太陽圏尾部から侵入して太陽圏の弱い磁場領域を伝搬しながら尾部側低緯度の内側境界に到達することがわかった。

約10ギガ電子ボルト(ローレンツ因子: $\gamma = 10$)の宇宙線粒子の典型的なジャイロ半径は0.7天文単位程度であるため、これらの粒子は太陽圏の各種不連続面や電流シートなどの構造に敏感に共振し、より複雑な振る舞いを示す。侵入した粒子の多くが、磁場の弱い太陽圏界面や赤道面の電流シートに長時間滞在する。一部の粒子は赤道面電流シートを蛇行運動(図8の黒線)しながら短時間で内側境界に達する。一方、尾部に吹き流された太陽風のスパイラル磁場に捕まった粒子は非常に長い時間をかけて磁力線沿いに運動し内側境界に到達する(図8の赤線)。このエネルギー帯の粒子は太陽風対流の効果を受けて終端衝撃波の上流には進入しにくい。一方、終端衝撃波に沿って極方向にドリフト運動して極域の内側境界に降下するものや、太陽圏の脇腹方向から衝撃波の内側に侵入し磁力線沿いに運動して衝撃波に到達するたびにミラー反射することでバウンス運動する粒子も観測され、これらはいずれも衝撃波面で加速を受ける。これらさまざまな粒子軌道についてはYoshida et al., ApJ (2021)にまとめた。

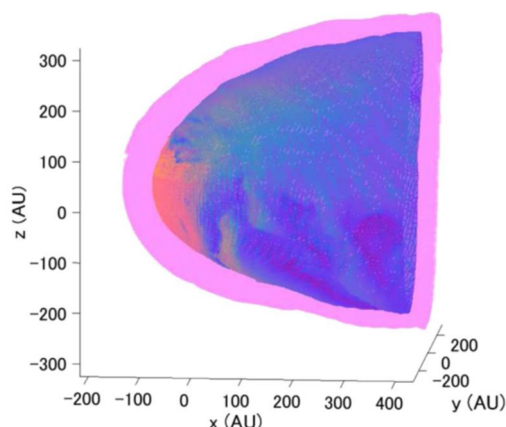


図7. 初期のテスト粒子分布

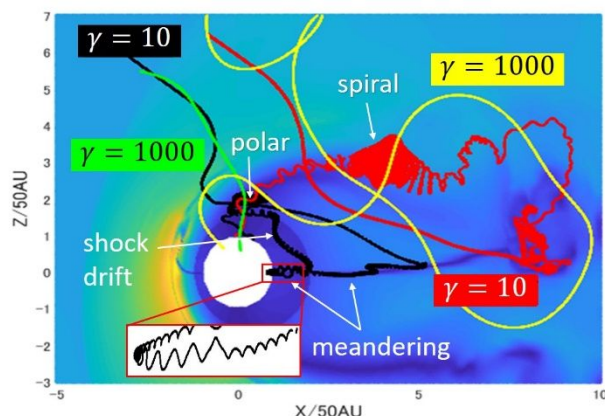


図8. 太陽圏に侵入する銀河宇宙線のさまざまな軌道

(5) 本研究では、宇宙線(宇宙線異常成分および銀河宇宙線)の加速・輸送における太陽圏境界の役割を明らかにすべく、3種類の高精度数値実験を組み合わせた研究を遂行した。太陽圏における宇宙線の挙動を粒子軌道レベルで解析するための研究プラットフォームを構築し、いくつかの具体的な成果につなげた。発展性のあるこのアプローチを今後さらに深化させ、より定量的な議論へとつなげることが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Yoshida, K.; Matsukiyo, S.; Shimokawa, K.; Washimi, H.; Hada, T.	4. 巻 916
2. 論文標題 Trajectory analysis of galactic cosmic rays invading into the heliosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29(1)-29(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac02c2	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 Otsuka, F. ; Matsukiyo, S. ; Oka, M.	4. 巻 395
2. 論文標題 Bursty betatron acceleration of electrons at nonstationary quasi-perpendicular shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science: 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 1344(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Yang Zhongwei, Liu Ying D., Matsukiyo Shuichi, Lu Quanming, Guo Fan, Liu Mingzhe, Xie Huasheng, Gao Xinliang, Guo Jun	4. 巻 900
2. 論文標題 PIC Simulations of Microinstabilities and Waves at Near-Sun Solar Wind Perpendicular Shocks: Predictions for Parker Solar Probe and Solar Orbiter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abaf59	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 Matsukiyo S.	4. 巻 1620
2. 論文標題 Parametric instabilities in a two ion species plasma as a driver of super Alfvénic waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013 ~ 012013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1620/1/012013	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 Ligorini Arianna, Niemiec Jacek, Kobzar Oleh, Iwamoto Masanori, Bohdan Artem, Pohl Martin, Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Matsukiyo Shuichi, Esaki Yodai, Hoshino Masahiro	4. 巻 501
2. 論文標題 Mildly relativistic magnetized shocks in electron ion plasmas: I. Electromagnetic shock structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4837 ~ 4849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3901	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 S. Matsukiyo, T. Noumi, G. P. Zank, H. Washimi, T. Hada	4. 巻 888
2. 論文標題 PIC Simulation of a Shock Tube: Implications for Wave Transmission in the Heliospheric Boundary Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11(1)-11(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab54c9	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 Niemiec, J. ; Kobzar, O. ; Amano, T. ; Hoshino, H. ; Matsukiyo, S. ; Matsumoto, Y. ; Pohl, M.	4. 巻 394
2. 論文標題 Electron Acceleration at Rippled Low Mach Number Shocks in Merging Galaxy Clusters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science: 36th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 368(0-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Otsuka, F.; Matsukiyo, S.; Hada, T.	4. 巻 33
2. 論文標題 PIC simulation of a quasi-parallel collisionless shock: Interaction between upstream waves and backstreaming ions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100709(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2019.100709	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 Oka, M.; Otsuka, F.; Matsukiyo, S.; Wilson, L. B., III; Argall, M. R.; Amano, T.; Phan, T. D.; Hoshino, M.; Le Contel, O.; Gershman, D. J.; Burch, J. L.; Torbert, R. B.; Dorelli, J. C.; Giles, B. L.; Ergun, R. E.; Russell, C. T.; Lindqvist, P. A	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 53(1-11)
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 Matsukiyo, S.; Akamizu, T.; Hada, T.	4. 巻 887
2. 論文標題 Heavy ion acceleration by super-Alfvenic waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L2(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab58cf	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 Yamazaki, R.; Shinoda, A.; Umeda, T.; Matsukiyo, S.	4. 巻 9
2. 論文標題 Mach number and plasma beta dependence of the ion temperature perpendicular to the external magnetic field in the transition region of perpendicular collisionless shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125010(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129067	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 Ligorini, A.; Niemiec, J.; Kobzar, O.; Iwamoto, M.; Bohdan, A.; Pohl, M.; Matsumoto, Y.; Amano, T.; Matsukiyo, S.; Hoshino, M.	4. 巻 502
2. 論文標題 Mildly relativistic magnetized shocks in electron-ion plasmas - II. Particle acceleration and heating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5065-5074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab220	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 Kobzar, O.; Niemiec, J.; Amano, T.; Hoshino, M.; Matsukiyo, S.; Matsumoto, Y.; Pohl, M.	4. 巻 919
2. 論文標題 Electron Acceleration at Rippled Low-mach-number Shocks in High-beta Collisionless Cosmic Plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1107	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 Iwamoto, M.; Amano, T.; Matsumoto, Y.; Matsukiyo, S.; Hoshino, M.	4. 巻 924
2. 論文標題 Particle acceleration by pickup process upstream of relativistic shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108(1-14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac38aa	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 Yamazaki, R. ; Matsukiyo, S. ; Morita, T. ; et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 025203(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.025203	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 Niemiec, J. ; Kobzar, O. ; Fulat, K. ; Pohl, M. ; Amano, T. ; Hoshino, M. ; Matsukiyo, S. ; Matsumoto, Y.	4. 巻 395
2. 論文標題 Electron Pre-acceleration Through Stochastic Shock Drift Acceleration at Intracluster Shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science: 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 477(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Iwamoto, M.; Amano, T.; Matsumoto, Y.; Matsukiyo, S.; Hoshino, M.	4. 巻 395
2. 論文標題 Particle-in-Cell Simulations of Synchrotron Maser Emission and Associated Particle Acceleration in Relativistic Shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science: 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 162(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Matsukiyo, S.; Yamazaki, R.; Morita, T.; et al.	4. 巻 106
2. 論文標題 High-power laser experiment on developing supercritical shock propagating in homogeneously magnetized plasma of ambient gas origin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 025205(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.025205	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 Yoshida, K.; Matsukiyo, S.; Washimi, H.; Hada, T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Numerical study of statistical behaviors of galactic cosmic rays invading the heliosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 3-A20(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Amano, T.; Matsumoto, Y.; Bohdan, A.; Kobzar, O.; Matsukiyo, S.; Oka, M.; Niemiec, J.; Pohl, M.; Hoshino, M.	4. 巻 6
2. 論文標題 Nonthermal electron acceleration at collisionless quasi-perpendicular shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-022-00093-1	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48件（うち招待講演 15件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Kotaro Yoshida, Shuichi Matsukiyo, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Effects of heliospheric structures on galactic cosmic rays transport
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松清 修一, 松田 昇也, 地球磁気気・地球惑星圏学会 波動分科会
2. 発表標題 宇宙プラズマ波動研究の将来構想
3. 学会等名 第150回地球磁気気・地球惑星圏学会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 光太郎, 松清 修一, 鷲見 治一, 羽田 亨
2. 発表標題 銀河宇宙線の振る舞いにおける太陽圏境界の役割に関する数値シミュレーション研究
3. 学会等名 第150回地球磁気気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Yoshida, Shuichi Matsukiyo, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Simulation study on the roles of heliospheric boundaries and the effect of pitch angle scattering in the behavior of galactic cosmic rays
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Yoshida, Shuichi Matsukiyo, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Numerical simulation on invasion process of galactic cosmic rays into the heliosphere: Particle orbits and statistics
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹下裕文、松清修一、吉田光太郎、鷲見治一
2. 発表標題 宇宙線異常成分の生成に関するテスト粒子計算
3. 学会等名 名古屋大学ISEE研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kotaro Yoshida, Shuichi Matsukiyo, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Investigation of the statistical properties of galactic cosmic rays propagating through the steady heliosphere
3. 学会等名 Workshop on nonlinear waves and particle acceleration in space
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirofumi Takeshita, Shuichi Matsukiyo, Kotaro Yoshida, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Numerical simulation on the production of anomalous cosmic rays in the heliospheric termination shock
3. 学会等名 Workshop on nonlinear waves and particle acceleration in space
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, K. Yoshida, K. Shimokawa, H. Washimi, G. P. Zank, M. Scholer, T. Hada
2. 発表標題 Heliospheric boundary: Kinetic structure, cosmic ray property
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田光太郎; 松清修一; 鷺見治一; 羽田亨
2. 発表標題 銀河宇宙線の太陽圏侵入過程に関するシミュレーション研究
3. 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Matsukiyo
2. 発表標題 Experimental investigations on the shock self-reformation
3. 学会等名 Workshop on Laboratory Astrophysics: Novel Development in Nonlinear Plasma Physics with Lasers (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, K. Yoshida, K. Shimokawa, H. Washimi, G. P. Zank, M. Scholer, T. Hada
2. 発表標題 Kinetic properties of heliospheric boundary
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松清修一、大塚史子、Arpad Kis
2. 発表標題 地球フォアショックULF 波動による高エネルギーイオンの拡散過程
3. 学会等名 令和2 年度ISEE 合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、「惑星間空間プラズマにおける波動現象」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鷲見治一、田中高史、松清修一
2. 発表標題 ボイジャー観測を用いた太陽圏ヘリオポーズ構造のMHD 解析
3. 学会等名 令和2 年度ISEE 合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、「惑星間空間プラズマにおける波動現象」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田光太郎、松清修一、鷲見治一、羽田亨
2. 発表標題 銀河宇宙線の太陽圏侵入過程に関する研究
3. 学会等名 令和2 年度ISEE 合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、「惑星間空間プラズマにおける波動現象」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松清 修一, 吉田 光太郎, 下川 啓介, 鷲見 治一, 羽田 亨
2. 発表標題 銀河宇宙線の太陽圏侵入過程の数値実験
3. 学会等名 令和2年 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会 / 第443回 生存圏シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Yoshida, Kesuke Shimokawa, Shuichi Matsukiyo, Haruichi Washimi and Tohru Hada
2. 発表標題 Invading process of galactic cosmic rays into the heliosphere
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, G. P. Zank, H. Washimi, T. Hada
2. 発表標題 Radial structure of heliospheric boundary region
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, Y. Matsumoto
2. 発表標題 Acceleration of relativistic electrons at a high beta shock
3. 学会等名 10th Korean Astrophysics Workshop: Astrophysics of High-Beta Plasma in the ICM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, Y. Matsumoto
2. 発表標題 ピックアップイオンを含む衝撃波の2次元構造
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Matsukiyo, Gary P. Zank, Haruichi Washimi, Tohru Hada
2. 発表標題 Kinetic radial structure of heliospheric boundary
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, K. Yoshida, H. Washimi, T. Hada
2. 発表標題 Properties of cosmic ray test particles in global MHD simulation of the heliosphere
3. 学会等名 EGU General Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 光太郎, 松清 修一, 鷲見 治一, 羽田 亨
2. 発表標題 定常太陽圏における銀河宇宙線の統計的なふるまいについて
3. 学会等名 JpGU meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹下 裕文, 松清 修一, 吉田 光太郎, 鷲見 治一, 羽田 亨
2. 発表標題 太陽圏終端衝撃波における宇宙線異常成分の生成に関する数値実験
3. 学会等名 JpGU meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚 史子, 松清 修一, 岡 光夫
2. 発表標題 Shock Drift Acceleration and Betatron Acceleration of Electrons at Nonstationary Quasi-Perpendicular Shocks
3. 学会等名 JpGU meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Matsukiyo, K. Yoshida, H. Washimi, T. Hada
2. 発表標題 Properties of cosmic ray test particles invading the virtual heliosphere in global MHD simulation
3. 学会等名 20th Annual International Astrophysics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 諫山 翔伍, 松清 修一, 高橋 健太, 佐野 孝好
2. 発表標題 Relativistic resonant particle acceleration by counter propagating Alfvén waves
3. 学会等名 第152回 SGPSS講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚 史子, 松清 修一
2. 発表標題 Electron betatron and shock drift acceleration at reforming quasi-perpendicular shocks
3. 学会等名 第152回 SGPSS講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松清 修一, 松本 洋介
2. 発表標題 ビクアップイオンを含む斜め衝撃波の運動論的2次元構造
3. 学会等名 第152回 SGEPSJ講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 健太, 諫山 翔伍, 松清 修一, 佐野 孝好
2. 発表標題 2次元アルフベン波乱流中での相対論的粒子加速
3. 学会等名 第152回 SGEPSJ講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮村 勇生, 松清 修一, 諫山 翔伍
2. 発表標題 物理法則に基づいた深層学習によるプラズマパラメータの推定
3. 学会等名 第152回 SGEPSJ講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 鳳仁, 松清 修一, 諫山 翔伍, 岩本 昌倫
2. 発表標題 相対論的電子・陽電子プラズマ中の大振幅電磁波のパラメトリック不安定性の数値実験
3. 学会等名 第152回 SGEPSJ講演会
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Matsukiyo, R. Yamazaki, T. Morita, T. Takezaki, Y. Kuramitsu, T. Sano, K. Tomita, S-J. Tanaka, S. Isayama, M. Iwamoto, M. Ota, S. Egashira, K. Sakai, T. Minami, M. Edamoto, S. Tomita, N. Ozaki, Y. Sakawa
2 . 発表標題 Gekko XII High Power Laser Experiment and Numerical Simulation on Developing Supercritical Magnetized Shock
3 . 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Shuichi Matsukiyo, K. Takahashi, S. Isayama
2 . 発表標題 Relativistic particle acceleration in counter-propagating Alfvén/whistler waves
3 . 学会等名 Joint workshop of Physics and application of whistler waves and Future perspective of study on nonlinear wave-particle interaction
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 F. OTSUKA
2 . 発表標題 Bursty electron acceleration at nonstationary quasi-perpendicular shocks
3 . 学会等名 Workshop on Heliospheric Physics
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. YOSHIDA
2 . 発表標題 Numerical simulation on invasion process of galactic cosmic rays into the heliosphere: Particle orbits and statistics
3 . 学会等名 Workshop on Heliospheric Physics
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田光太郎
2. 発表標題 定常太陽圏を伝播する銀河宇宙線の集団的な性質の調査
3. 学会等名 ISEE 研究集会「宇宙および実験室プラズマ中の非線形波動と粒子加速に関する研究集会」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹下裕文
2. 発表標題 太陽圏終端衝撃波における宇宙線異常成分の生成に関する数値実験
3. 学会等名 ISEE 研究集会「宇宙および実験室プラズマ中の非線形波動と粒子加速に関する研究集会」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚史子、松清修一、岡光夫
2. 発表標題 非定常な準垂直衝撃波における電子のペータトロン加速
3. 学会等名 ISEE 研究集会「宇宙および実験室プラズマ中の非線形波動と粒子加速に関する研究集会」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Otsuka, S. Matsukiyo, Oka, M.
2. 発表標題 Bursty electron acceleration associated with a quasi-perpendicular shock reformation
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yoshida, S. Matsukiyo, H. Washimi, T. Hada
2. 発表標題 Large-scale test particle simulation of galactic cosmic rays invading the heliosphere
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚史子、松清修一、岡光夫
2. 発表標題 準垂直衝撃波における電子加速:PIC シミュレーションと MMS 衛星観測の比較
3. 学会等名 令和2 年度ISEE 合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」「惑星間空プラズマにおける波動現象」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiko Otsuka, Shuichi Matsukiyo, Mitsuo Oka
2. 発表標題 Trajectory analysis of energetic electrons in quasi-perpendicular shock structure
3. 学会等名 JpGU meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiko Otsuka, Mitsuo Oka, Shuichi Matsukiyo
2. 発表標題 Electron acceleration parallel and perpendicular to overshoot magnetic field in quasi-perpendicular collisionless shock
3. 学会等名 37th International Cosmic ray conference
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 F. Otsuka, S. Matsukiyo, and M. Oka
2 . 発表標題 Stochastic acceleration of electrons at collisionless quasi-perpendicular shocks: PIC simulation
3 . 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 F. Otsuka, S. Matsukiyo, and M. Oka
2 . 発表標題 PIC simulation of electron acceleration at quasi-perpendicular collisionless shock: Application to Earth's bow shock
3 . 学会等名 JpGU meeting 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 大塚史子、松清修一、岡光夫
2 . 発表標題 Electron scattering and acceleration at quasi-perpendicular shock: Comparison between PIC simulation and MMS observation
3 . 学会等名 第148回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 F. Otsuka, S. Matsukiyo, and T. Hada
2 . 発表標題 Self-consistent simulation of field-aligned ion beams and upstream waves in quasi-parallel collisionless shock
3 . 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高原文郎ほか(編)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔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
研究協力者	鷺見 治一 (Washimi Haruichi)		
研究協力者	吉田 光太郎 (Yosida Kotaro)		
研究協力者	大塚 史子 (Otsuka Fumiko)		

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1件

国際研究集会 Workshop on nonlinear waves and particle acceleration in space	開催年 2022年～2022年
--	--------------------

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

米国	University of Alabama in Huntsville			
----	--	--	--	--