

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02966

研究課題名(和文) 直接観測に基づく衝撃波電子加速の実証的理論モデルの確立

研究課題名(英文) Establishing Theory of Electron Acceleration at Shocks Based on In-situ Observation

研究代表者

天野 孝伸 (Amano, Takanobu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：00514853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,570,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙空間の無衝突衝撃波における電子加速の効率について、理論、観測データ解析、数値シミュレーションの3つの異なるアプローチを全て組み合わせて調べた。新たに非相対論的電子の加速理論モデルを構築し、地球前面の弓状衝撃波の人工衛星観測データを用いて検証した。また、第一原理数値シミュレーションによって衝撃波の非定常性の効果や、幅広い応用を目指したパラメータ依存性についても調査を行った。これらの結果を総合すると、本研究で提唱した電子加速機構は衝撃波電子加速における最大の困難である電子注入問題の解決策として、現時点で最も有力なモデルと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギー粒子の加速は宇宙において普遍的に見られる現象であり、一部の粒子のみが熱的エネルギーよりも遥かに高いエネルギーまで加速されることが知られている。熱平衡状態から大きく逸脱した粒子を生成する機構として、最も有力視されているのが衝撃波における粒子加速機構である。本研究によって衝撃波粒子加速における最大の困難であった電子注入問題の解決に向けて大きな一歩を踏み出すことができた。

研究成果の概要(英文)：The efficiency of electron acceleration at shocks in space was investigated by combining theory, observational data analysis, as well as numerical simulations. A new theoretical model for acceleration of sub-relativistic electrons was proposed, which explains spacecraft observations of Earth's bow shock. First-principles numerical simulations have also been conducted to investigate the effect of non-stationarity and survey the parameter dependence for application to shocks in various space environments. Judging from the obtained results, the model proposed in this research may be considered as the most promising candidate to resolve the long-standing issue of electron injection in the shock acceleration theory.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：プラズマ 粒子加速 衝撃波 プラズマ波動 宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間プラズマは一般に粒子間衝突が非常にまれにしか起こらない無衝突系であるため、十分に長い時間が経っても通常の熱力学的平衡状態にはならず、一部の粒子のみが非常に高いエネルギーまで加速された非熱的エネルギー分布を持つことが知られている。非熱的粒子は典型的にはベキ型のエネルギースペクトルを持つが、宇宙空間プラズマ中の無衝突衝撃波における1次フェルミ加速機構は、観測されるベキ型スペクトルを生成する機構として最も有力なものである。ところが、フェルミ加速は初期に十分に高いエネルギーを持つ粒子にのみ効率的に働く機構であり、理論的には非相対論的エネルギーを持つ電子の加速は困難である。観測的には太陽圏内で観測される衝撃波では電子の加速効率は悪く、理論予測と整合的である。一方で、超新星残骸衝撃波をはじめとする天体衝撃波では相対論的エネルギーを持つ電子加速が普遍的に起きていることが超相対論的電子のシンクロトロン放射などの観測から示されている。すなわち、同じ無衝突衝撃波であっても、パラメータによって電子加速の効率に大きな違いが生まれることが示唆される。

無衝突衝撃波における電子の加速・加熱の効率は、衝撃波遷移層の構造と、そこで局所的に励起される種々のプラズマ波動の性質に支配されているものと考えられており、古くから盛んに研究が行われてきた。しなしながら、その詳細やパラメータ依存性については未解明の点も数多く残されている。実際に、太陽圏内衝撃波と天体衝撃波における電子加速効率の違いをプラズマ波動励起のマッハ数依存性の観点から理解しようとする理論モデルも提案されていたが、その過程の観測・数値シミュレーションによる裏付けは示されていない。

## 2. 研究の目的

上記のような背景のもと、本研究では理論、観測データ解析、数値シミュレーションを有機的に用いて無衝突衝撃波における電子加速について調べた。理論としては、衝撃波遷移層内部における電子の加速機構、また電子加速に重要となるプラズマ波動の励起過程についての解析を行った。観測データ解析ではNASA MMS衛星によって得られた高時間分解能データを解析することによって理論・数値シミュレーション結果との比較・検討を行った。数値シミュレーションでは理論的・観測的アプローチでは困難な衝撃波の非定常性がプラズマ波動励起や電子の加熱・加速に与える影響や、幅広い天体への応用を視野に入れたパラメータ依存性に着目した研究を行った。最終的にはそれぞれのアプローチから得られた結果をもとに、電子の加速過程について包括的な理解を得ることを目指した。

## 3. 研究の方法

研究の目的で述べた通り、(A)理論解析、(B)NASA MMS衛星の観測データ解析、(C)第一原理数値シミュレーションの3つのアプローチを有機的に用いて研究に取り組んだ。

### (A) 理論解析

ピッチ角拡散方程式や空間拡散方程式などの輸送方程式を用いて超熱的エネルギーを持つ電子(非相対論的電子)の粒子加速過程を解析した。具体的には輸送方程式の導出を行い、電子のエネルギースペクトルや最大エネルギーを見積もった。また観測から示唆された粒子の散乱係数を用いて輸送方程式の定常解を求め、幅広いエネルギー帯での電子加速をモデル化した。また、線形理論を用いて、ピッチ角方向の拡散を引き起こすプラズマ波動の励起過程についての議論も行った。

### (B) NASA MMS衛星の観測データ解析

NASA MMS衛星のバーストモード観測データで得られた地球バウショックのデータの解析を行った。解析に適したイベントを抽出し、超熱的電子のエネルギー分布、ピッチ角分布、空間分布を解析した。また高周波サンプリングの電場・磁場データの解析を行い、プラズマ波動の強度

や偏波などの性質を調べた．これら観測から得られた情報と理論モデルの予測との比較・検討を行った．

#### (C) 第一原理数値シミュレーション

電子の効率的な加速や加熱が期待できるケースとして，i) 高ベータの準垂直衝撃波，ii) 低ベータの準垂直非定常衝撃波，iii) 準平行衝撃波に注目し，それぞれの衝撃波を数値シミュレーションによって再現し，電子の加速・加熱過程の詳細を解析した．手法は電子・イオンを全ての運動論的效果を考慮する無衝突プラズマの第一原理数値シミュレーションである Particle-In-Cell (PIC) 法を用いた．

### 4．研究成果

#### (A) 理論解析

電子加速の理論モデルとして統計的衝撃波ドリフト加速 (Stochastic Shock Drift Acceleration; SSDA) を提唱した．このモデルは熱的エネルギーよりも少しエネルギーの高い超熱的電子の加速を考えたもので，相対論的電子の1次フェルミ加速への注入過程に重要な役割を果たすことが期待される．理論的には電子加速の効率は Alfvén マッハ数  $M_A$  と衝撃波角  $\theta_{BN}$  によって決まると考えられる．また，このモデルが予言する超熱的電子のエネルギースペクトルのベキ指数は，標準的な1次 Fermi 加速モデルのものよりも大きい (ベキがソフトである) こと，最大エネルギーの衝撃波のマッハ数，衝撃波角，ピッチ角散乱効率に対する依存性を明らかにした．

さらに，この考え方を発展させることで SSDA による非相対論的な超熱的電子の加速から，1次フェルミ加速による相対論的電子の加速までを統一的に記述できることが分かった．これによって，地球のバウショックにおける非相対論的電子加速の定量的な理論モデルが完成し，同時にマッハ数の大きな天体衝撃波においては非相対論的エネルギーから相対論的エネルギーまでの電子加速がシームレスに理解ができることが分かった．

以上の結果は，観測から示唆される電子のピッチ角散乱効率を仮定した上で，衝撃波近傍における電子の輸送方程式を解くことで得られたものである．一方で，ピッチ角散乱を引き起こすプラズマ波動の励起過程についても理論的な検討を行った．理論的には，特に重要な役割を果たすと考えられているのがホイッスラー波である．背景磁場に対して高周波で平行伝播のホイッスラー波，および低周波で斜め伝播のホイッスラー波の励起機構として過去に提唱されたモデルの検討を行い，どちらの波動も SSDA によって加速された電子が励起源となりうるということが分かった．今後は波動の励起と，励起された波動による電子の散乱・加速の両者を自己無撞着に取り入れた理論モデルへとさらに発展させることが出来ると考えられる．

#### (B) 観測データ解析

MMS 衛星のバーストモード観測データが得られている地球バウショックのイベントから，特に電子加速の効率が良く，また Rankine-Hugoniot 関係式を用いて衝撃波のマクロなパラメータが精度良く決定出来るイベントを抽出し，詳細解析を行った．波動強度，電子ピッチ角異方性，電子空間分布，高エネルギー電子の最大エネルギー，など点について上述の SSDA 理論モデルの仮定や予言との整合性を検討したところ，観測結果は理論で非常によく説明できることが分かった．特に最大エネルギーについては自由パラメータを導入することなく，ユニークに理論と観測の整合性を定量的に比較することができ，理論モデルの妥当性を示す決定的な証拠となった．

また，プラズマ波動についてのより詳細な解析も行った．これから，衝撃波遷移層で見られる高周波ホイッスラー波動の伝播方向については，磁力線に対して平行および反平行 (衝撃波の上流方向および下流方向) の両方向に伝播する波動が共存していることが示された．これは理論の要請と整合的である．また，観測された電子の速度分布関数から，しばしば線形理論から予測される波動の励起条件と整合的な分布が見られることも確認している．一方で，低周波の斜め伝播ホイッスラー波の起源については今後のさらなる検討が必要である．

#### (C) 第一原理数値シミュレーション

### i) 高ベータの準垂直衝撃波

銀河団 merger のような環境で見られる衝撃波として  $M_A = 7.1$ ,  $\beta_i = \beta_e = 1.5$  の 2 次元計算を 2 例 ( $\theta_{Bn} = 70, 85$ ) 行った。また、太陽風においても普遍的に観測される高温・低密度の halo 電子成分を加えて、その影響に着目した。

上記の 2 例とも、イオンスケールの衝撃波のさざ波構造 (リップル) に加えてさまざまな波動が励起された。リップルは入射背景電子の衝撃波面での反射・加速を抑制するため、 $\theta_{Bn} = 85$  では反射は起こらなかった。 $\theta_{Bn} = 70$  では幾文反射されるが加速は非効率であった。以上は断熱的な電子の振る舞いを仮定して理解することができる。一方で、halo 電子は断熱理論に反して  $\theta_{Bn} = 85$  での反射率が高く、加速も非断熱的であった。主要な加速機構は衝撃波ドリフト加速であるが、データからは遷移層の不安定波動による加速が付加的に効いている可能性も示唆された。以上のことから、リップル構造は背景電子の反射、加速を抑制する一方で、halo 電子を選択的に加速すると結論付けられる。

### ii) 低ベータの準垂直非定常衝撃波

地球バウショックなどではイオンスケールの非定常な衝撃波内部構造が観測されており、これが電子の加速・加熱過程に影響を与えていると考えられている。そこで、衝撃波の非定常性 (リフォーメーション) に伴って起こる電子バースト現象を 1 次元計算で再現し、電子加速過程を調べた。衝撃波パラメータは  $M_A = 7.1$ ,  $\beta_i = \beta_e = 0.15$ ,  $\theta_{Bn} = 70$  とした。

衝撃波面が周期的に形成・崩壊を繰り返すリフォーメーションに伴って衝撃波面で周期的に高エネルギー電子が生成され、これに伴い上流に向けて放出される高エネルギー電子バースト現象が起こることを確認した。被加速電子の軌道解析により、電子の加速には衝撃波ドリフト加速に加えてベータatron加速が寄与していることを示した。ベータatron加速は電子が感じる磁場が時間とともに強化されることで起こる。ベータatron加速にはリフォーメーションの過程の中で衝撃波の磁場のオーバーシュート構造が強化されるときに、首尾よくその場に電子がとどまっている必要があるが、遷移層で励起されるホイッスラー波が電子を補足することでこの状況を実現していることが分かった。

### iii) 準平行衝撃波

背走イオンビームが衝撃波上流 (フォアショック) で励起するイオンスケール波動が電子加熱に与える影響を調べた。十分発達したフォアショックを再現するため、2 次元計算並みの計算リソースをつぎ込んだ (衝撃波法線方向に極端に長い) 1 次元計算を用いた。衝撃波パラメータは地球バウショックを想定して  $M_A = 6.6$ ,  $\beta_i = \beta_e = 0.5$ ,  $\theta_{Bn} = 20$  とした。

フォアショックでのイオンの加速に加えて電子の加熱が顕著にみられた。入射電子の磁力線平行および垂直方向のベータ値  $\beta_{e,\parallel} = \beta_{e,\perp} = 0.5$  に対して、衝撃波から上流に 542 Li (Li はイオン慣性長) 離れた位置では  $\beta_{e,\parallel} = 0.74$ ,  $\beta_{e,\perp} = 0.64$ , 377 Li の位置では  $\beta_{e,\parallel} = 1.3$ ,  $\beta_{e,\perp} = 0.96$ , 170 Li では  $\beta_{e,\parallel} = 2.2$ ,  $\beta_{e,\perp} = 1.9$  と、衝撃波に近づくにしたがってベータ値の上昇がみられ、磁力線に沿う方向の加熱が優位であった。加熱の異方性とフォアショックで励起された高周波波動の関係説明は今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Amano Takanobu, Hoshino Masahiro	4. 巻 927
2. 論文標題 Theory of Electron Injection at Oblique Shock of Finite Thickness	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 132 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4f49	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 Jikei Taiki, Amano Takanobu	4. 巻 29
2. 論文標題 Critical comparison of collisionless fluid models: Nonlinear simulations of parallel firehose instability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022102 ~ 022102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077064	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 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Matsumoto Yosuke, Matsukiyo Shuichi, Hoshino Masahiro	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 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
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 Kobzar Oleh, Niemiec Jacek, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsukiyo Shuichi, Matsumoto Yosuke, Pohl Martin	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 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97 ~ 97
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 Nishigai Takuro, Amano Takanobu	4. 巻 28
2. 論文標題 Mach number dependence of ion-scale kinetic instability at collisionless perpendicular shock: Condition for Weibel-dominated shock	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072903 ~ 072903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0051269	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 Jikei Taiki, Amano Takanobu	4. 巻 28
2. 論文標題 A non-local fluid closure for modeling cyclotron resonance in collisionless magnetized plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042105 ~ 042105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0045335	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 Bohdan Artem, Pohl Martin, Niemiec Jacek, Morris Paul J., Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Sulaiman Ali	4. 巻 126
2. 論文標題 Magnetic Field Amplification by the Weibel Instability at Planetary and Astrophysical Shocks with High Mach Number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.126.095101	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 Ligorini Arianna, Niemiec Jacek, Kobzar Oleh, Iwamoto Masanori, Bohdan Artem, Pohl Martin, Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Matsukiyo Shuichi, Hoshino Masahiro	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 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 Bohdan Artem, Pohl Martin, Niemiec Jacek, Morris Paul J., Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro	4. 巻 904
2. 論文標題 Kinetic Simulation of Nonrelativistic Perpendicular Shocks of Young Supernova Remnants. IV. Electron Heating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 12 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbc19	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 Bohdan Artem, Pohl Martin, Niemiec Jacek, Vafin Sergei, Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro	4. 巻 893
2. 論文標題 Kinetic Simulations of Nonrelativistic Perpendicular Shocks of Young Supernova Remnants. III. Magnetic Reconnection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 6 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7cd6	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 Amano T., Katou T., Kitamura N., Oka M., Matsumoto Y., Hoshino M., Saito Y., Yokota S., Giles B. L., Paterson W. R., Russell C. T., Le Contel O., Ergun R. E., Lindqvist P.-A., Turner D. L., Fennell J. F., Blake J. B.	4. 巻 124
2. 論文標題 Observational Evidence for Stochastic Shock Drift Acceleration of Electrons at the Earth's Bow Shock	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.124.065101	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 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., Noumi T., Zank G. P., Washimi H., Hada T.	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 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
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 Yamazaki Ryo, Shinoda Ayato, Umeda Takayuki, Matsukiyo Shuichi	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 ~ 125010
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 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 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
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 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 ~ 100709
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., Argall M. R., Amano T., Phan T. D., Hoshino M., Contel O. Le, 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 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 53 ~ 53
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 Bohdan Artem, Niemiec Jacek, Pohl Martin, Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro	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 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 10 ~ 10
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 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsumoto Yosuke, Niemiec Jacek, Ligorini Arianna, Kobzar Oleh, Pohl Martin	4. 巻 883
2. 論文標題 Precursor Wave Amplification by Ion-Electron Coupling through Wakefield in Relativistic Shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L35 ~ L35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab4265	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 Bohdan Artem, Niemiec Jacek, Pohl Martin, Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro	4. 巻 878
2. 論文標題 Kinetic Simulations of Nonrelativistic Perpendicular Shocks of Young Supernova Remnants. I. Electron Shock-surfing Acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1b6d	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 Katou Takuma, Amano Takanobu	4. 巻 874
2. 論文標題 Theory of Stochastic Shock Drift Acceleration for Electrons in the Shock Transition Region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 119~119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0d8a	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 Kis Arpad, Matsukiyo Shuichi, Otsuka Fumiko, Hada Tohru, Lempenger Istvan, Dandouras Iannis, Barta Veronika, Facsko Gabor	4. 巻 863
2. 論文標題 Effect of Upstream ULF Waves on the Energetic Ion Diffusion at the Earth's Foreshock. II. Observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136~136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad08c	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 Nakanotani Masaru, Hada Tohru, Matsukiyo Shuichi	4. 巻 70
2. 論文標題 Diffusive shock acceleration of cosmic rays from two stationary shocks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-018-0799-3	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 Otsuka Fumiko, Matsukiyo Shuichi, Kis Arpad, Nakanishi Kento, Hada Tohru	4. 巻 853
2. 論文標題 Effect of Upstream ULF Waves on the Energetic Ion Diffusion at the Earth's Foreshock. I. Theory and Simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 117 ~ 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa23f	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 Takanobu	4. 巻 366
2. 論文標題 A generalized quasi-neutral fluid-particle hybrid plasma model and its application to energetic-particle-magnetohydrodynamics hybrid simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 366 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.04.020	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 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsumoto Yosuke	4. 巻 858
2. 論文標題 Precursor Wave Emission Enhanced by Weibel Instability in Relativistic Shocks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 93 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaba7a	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 Nakanotani Masaru, Matsukiyo Shuichi, Hada Tohru, Mazelle Christian X.	4. 巻 846
2. 論文標題 Electromagnetic Structure and Electron Acceleration in Shock-Shock Interaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 113 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8363	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 Matsumoto Yosuke, Amano Takanobu, Kato Tsunehiko N., Hoshino Masahiro	4. 巻 119
2. 論文標題 Electron Surfing and Drift Accelerations in a Weibel-Dominated High-Mach-Number Shock	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.119.105101	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., III L. B. Wilson, Phan T. D., Hull A. J., Amano T., et al.	4. 巻 842
2. 論文標題 Electron Scattering by High-frequency Whistler Waves at Earth's Bow Shock	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L11~L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa7759	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Amano, T., et al.
2. 発表標題 Electron injection at shocks: Transition from stochastic shock drift acceleration to diffusive shock acceleration
3. 学会等名 XXVIII Cracow EPIPHANY Conference on Recent Advances in Astroparticle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amano, T., et al.
2. 発表標題 Connecting Injection and Subsequent Acceleration of Nonthermal Electrons at Collisionless Oblique Shocks
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC30) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Amano, T., et al.
2. 発表標題 Stochastic Shock Drift Acceleration as the Mechanism for Electron Injection into Diffusive Shock Acceleration at Collisionless Shocks
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Amano, T. et al.
2. 発表標題 Particle Acceleration at Collisionless Shocks
3. 学会等名 10th East-Asia Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (EASW-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsukiyo, S. et al.
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 Matsukiyo, S. et al.
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 Amano, T. et al.
2. 発表標題 Non-thermal Particle Acceleration at Collisionless Shocks
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 Matsukiyo, S. et al.
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 Matsukiyo, S. et al.
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 Matsukiyo, S. et al.
2. 発表標題 Kinetic scale radial structure of the heliopause
3. 学会等名 18th Annual International Astrophysics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsukiyo, S. et al.
2. 発表標題 Microstructure of high beta quasi-perpendicular shock and associated electron dynamics
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsukiyo, S. et al.
2. 発表標題 Microstructure of heliospheric boundary and implication for the origin of compressible turbulence in VLISM
3. 学会等名 17th Annual International Astrophysics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T., Iwamoto, M., Matsumoto, Y., Hoshino, M.
2. 発表標題 Cosmic-ray acceleration via astrophysical coherent radiation
3. 学会等名 ISVHECRI 2018 (20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T., Katou, N., Matsumoto, Y., Hoshino, M.
2. 発表標題 Stochastic Shock Drift Acceleration for Electrons
3. 学会等名 EASW8 (8th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Amano, T., Katou, N., Kitamura, N., Matsumoto, Y., Oka, M., Hoshino, M.
2 . 発表標題 Nonthermal Electron Acceleration at Earth ' s Bow Shock: Theory, Simulation and Observation
3 . 学会等名 ISSS-13 (The 13th International School/Symposium for Space Simulations) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Amano, T., Katou, N., Kitamura, N., Matsumoto, Y., Oka, M., Hoshino, M.
2 . 発表標題 Three-dimensional Particle-In-Cell Simulations for High Mach Number Collisionless Shocks
3 . 学会等名 AAPPs-DPP 2018 (2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Matsukiyo, S. et al.
2 . 発表標題 PIC simulation of quasi-parallel shock: Foreshock structure
3 . 学会等名 EGU Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Amano, T.
2 . 発表標題 Coherent and Stochastic Acceleration in Quasi-perpendicular Collisionless Shocks
3 . 学会等名 Workshop on Plasma Astrophysics from the Laboratory to the Non-thermal Universe (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年



1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Nonthermal Electrons at Quasi-perpendicular Collisionless Shocks
3. 学会等名 7th East-Asia Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Particle Acceleration in Relativistic Plasmas
3. 学会等名 Dawn of a New Era for Black Hole Jets in Active Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Cosmic-Ray Acceleration via Astrophysical Coherent Radiation
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Stochastic Shock Drift Acceleration for Electrons
3. 学会等名 8th East-Asia Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Nonthermal Electron Acceleration at Earth's Bow Shock: Theory, Simulation and Observation
3. 学会等名 The 13th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T.
2. 発表標題 Three-dimensional Particle-In-Cell Simulations for High Mach Number Collisionless Shocks
3. 学会等名 The 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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	松清 修一  (MATSUKIYO SHUICHI)  (00380709)	九州大学・総合理工学研究院・准教授    (17102)	

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