

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14440

研究課題名（和文）電磁パルス駆動プラズマ流を用いた無衝突衝撃波の粒子加速現象の実験的検証

研究課題名（英文）An experimental study of particle acceleration in collisionless shock using electro-magnetically driven plasma flow

研究代表者

竹崎 太智（Takezaki, Taichi）

富山大学・学術研究部工学系・助教

研究者番号：90824326

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）：無衝突衝撃波は宇宙空間の高エネルギー粒子（宇宙線）の生成起源であると考えられているが、詳細な物理過程は明らかにされていない。本研究はパルスパワー放電により駆動された無衝突プラズマ流と電磁場の相互作用を評価することで、無衝突衝撃波の物理機構の解明を目的とする。本研究成果より電磁パルス駆動方式のプラズマ発生装置を開発し、高速な無衝突プラズマ流の発生手法を確立した。電磁粒子-流体ハイブリッドシミュレーションにより無衝突プラズマと電磁場の相互作用による粒子加速過程を観測したが、その実験的検証には、より高精度なイオン計測手法が要求され、今後さらなる開発を進める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線は100年以上前にその存在が明らかとなったが、その生成過程ははまだ未解明であり、天体物理学の重要課題とされている。近年、高強度レーザーを用いた無衝突衝撃波の再現実験が世界各国の大型レーザー施設で行われ、観測・理論シミュレーションに次ぐ新たな宇宙物理研究手法として、その有用性が認知されつつある。一方、高強度レーザー実験はマシンタイムとショットレートに制約があり、実験データ取得の加速が難しい一面を持つ。本研究で提案するパルスパワー放電を用いた無衝突プラズマ発生手法は安価かつ簡便な装置構成で無衝突衝撃波実験を行い、高強度レーザー実験や天体観測結果を補完する実験データ取得を推進する。

研究成果の概要（英文）：Although collisionless shocks play an important role in generating high-energy particles in outer space, cosmic rays, the detailed processes are not fully satisfied. The purpose of this study is to elucidate the mechanisms of collisionless shocks by evaluating the interaction between collisionless plasma flow driven by pulsed power discharge and electromagnetic fields. We developed an electro-magnetically driven plasma generator and established a method for generating fast collisionless plasma flow using pulsed-power discharge. A particle acceleration process due to the interaction between collisionless plasma flow and electromagnetic fields was observed by an electromagnetic particle-fluid hybrid simulation. For its experimental verification, an ion measurement method with high-accurate is required and will be further developed.

研究分野：高エネルギー密度プラズマ科学

キーワード：無衝突衝撃波 無衝突プラズマ パルスパワー放電 プラズマフォーカス装置

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間には宇宙線とよばれる高エネルギー粒子が存在する。その特徴は高エネルギーの相対論的な粒子が存在すること、および粒子のエネルギー分布が非熱的な冪型スペクトルを示すことにある。宇宙線のエネルギー分布は熱的な Maxwell 分布から逸脱することから、宇宙線の生成過程には非熱的なエネルギー増加過程が存在することが示唆されており、その過程で重要な役割を果たすのが無衝突衝撃波とよばれる現象である。無衝突衝撃波とは、宇宙空間のような密度が希薄な無衝突プラズマ中で発生する衝撃波現象である。地上の流体力学的な衝撃波現象では上流の流体が粒子間衝突によりエネルギー散逸するのに対し、無衝突衝撃波では超新星残骸や太陽風などの無衝突プラズマの流れが背景電磁場の擾乱で散逸される。その過程で、散逸されたプラズマ流の運動エネルギーを流体中の一部の荷電粒子が受け取り、宇宙線が生成される。

宇宙線生成過程の未解明な問題は「非相対論的な無衝突プラズマ流からどのように非熱的な加速粒子が生成されるか?」という点である。相対論的領域でのエネルギー増加過程は 1 次フェルミ加速とよばれる統計的加速機構が、宇宙線の冪方エネルギー分布を理論的に説明したことから、標準加速理論として広く受け入れられている。一方で、非相対論的領域でのエネルギー増加過程(粒子加速過程)は不明瞭なままである。超新星残骸や太陽風などの宇宙プラズマの速度は  $\sim 1000$  km/s であり、この非相対論的なプラズマ流から、1 次フェルミ加速が駆動される相対論的領域までのエネルギー増加過程が明らかにされておらず、注入問題とよばれる宇宙物理学の重要課題とされている。

近年、無衝突衝撃波を実験室で再現し、現象を「その場観測」することで、無衝突衝撃波の物理機構を探求する「実験室宇宙物理」という研究手法が広く認知されつつある。とくに、高強度レーザーを用いた無衝突衝撃波の再現実験が世界各国の大型レーザー施設で行われている。高強度のレーザーを固体ターゲットに照射することで、流速が数 100 km/s という、宇宙プラズマと同程度の速度の高速なプラズマ流を生成することができ、観測・理論シミュレーションに次ぐ新たな宇宙物理研究手法として、その有用性が認められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は電磁パルス駆動方式の無衝突プラズマ流発生装置を構築し、大型レーザー実験に次ぐ新たな無衝突衝撃波の実験手法を確立することである。高強度レーザー実験の魅力は、小型装置では実現できない高速・高エネルギー密度のプラズマを生成できる点にある。一方、高強度レーザー実験は大型施設ゆえに実験期間に制限があり、また、1 日に実施できるショット数にも制限があるため、実験データ取得の加速が難しいという課題がある。この課題を解決するため、我々はパルスパワー放電を用いた小型かつ安価な装置構成での無衝突衝撃波の実験手法を提案している。高強度レーザー実験と比較して、パルスパワー放電で駆動されるプラズマ流の速度は数 10 km/s と低い。しかし、無衝突衝撃波のような物理現象はスケール則が成り立ち、プラズマの速度・温度・密度および外部磁場強度などで決定される無次元パラメータを合わせることで、パルスパワー放電実験の結果と高強度レーザー実験の結果、および宇宙プラズマの観測結果との比較が可能となる。

パルスパワー放電により無衝突プラズマ流を生成するため、本研究ではプラズマフォーカス(PF)という手法を利用する。PF は放電電極間にパルス大電流を投入し、大電流放電で発生するローレンツ力によりプラズマを加速・圧縮することで高エネルギー密度プラズマを生成する手法である。古くは核融合発生手法として、現在も粒子線源として研究されている技術であるが、従来の PF 装置は低真空領域(数 100 Pa)で動作するのに対し、本研究では中真空領域(0.1 - 1 Pa)で PF 装置を運転することで、無衝突プラズマの発生手法に応用する点が本研究の特徴である。PF 装置はローレンツ力によるプラズマの加速・圧縮過程を経て高エネルギー密度プラズマを生成することから、電極内部でのプラズマのダイナミクスが生成されるプラズマのパラメータを決定する。従来の PF 装置は低真空領域で動作するため、イオンの平均自由行程が電極間距離より短く、電極内のプラズマ挙動は電磁流体力学(MHD)モデルで説明される。しかし、本研究では無衝突プラズマ流の生成のために低真空領域で PF 装置を運転するため、イオンの平均自由行程が電極間距離より長く、電極内部でのプラズマの生成・加速過程、および生成されたプラズマ流のパラメータが不明瞭という課題があった。この課題を解決するためには、電極内部でのプラズマ挙動の観測、および生成されたプラズマ流のパラメータ評価を行う必要がある。

本研究では新たに PF 装置を構築して 0.1 - 1 Pa の中真空領域で PF 装置を駆動し、電極内部でのプラズマ生成過程、および生成されたプラズマ流の速度・温度・密度を評価した。電極内のプラズマ挙動の観測が簡便となるよう PF 装置の電極形状を工夫し、プラズマの自発光計測からプラズマ挙動の評価を行った。また、生成されたプラズマ流のイオン電流計測を行い、プラズマ流のイオンエネルギー分布関数(IEDF)の評価からプラズマパラメータの評価を行った。

### 3. 研究の方法

#### 【装置構成】

図1に本研究で構築したPF装置の概略を示す。PF装置はパルスパワー発生回路、PF電極、真空容器および真空ポンプ、そして各種計測器で構成される。PF電極は円錐型の陰極と、その陰極の周囲に配置される6本の柱状型陽極で構成される。これらのPF電極は真空容器内に同軸上に配置され、PF電極の末端に絶縁体チューブを配置することで発生したプラズマをガイドし、準一次元のプラズマ流を駆動する。実験前に真空容器内を排気し、その後ヘリウムガスを封入することで、真空容器内を0.1 - 1 Paのヘリウム雰囲気調整する。図2はPF装置の等価回路図を示す。コンデンサバンク ( $C_{\text{bank}} = 7.7 \mu\text{F}$ ) を直流電圧 (12.5 kV) で充電し、ギャップスイッチの自爆放電により回路が導通することで、コンデンサバンクに蓄えられたエネルギーがPF電極へ投入される。図3は計測された放電電流波形と、RLC回路シミュレーションによるフィッティング波形を示す。放電電流ピーク値が-68 kA、周期  $7.5 \mu\text{s}$  の減衰振動波形が得られた。RLC回路シミュレーションによるフィッティングから、回路の寄生抵抗  $R_s = 30 \text{ m}\Omega$ 、寄生インダクタンス  $L_s = 170 \text{ nH}$  が得られ、比較的到低抵抗・低インダクタンスなパルス大電流放電装置を構築することができた。図4は真空容器内のプラズマ自発光を撮影した画像を示すが、PF電極内でプラズマが発生している様子が確認できる。

#### 【計測手法】

本研究では電極内でのプラズマ生成過程と、生成されたプラズマのパラメータを評価するため、以下の2つの計測器を開発した。

##### (1) 光ファイバーによるプラズマ自発光計測

PF電極内に複数の光ファイバーを設置し、光ファイバー末端にアバランシェ・フォトダイオードを用いた光検出回路を接続することで、プラズマの自発光を計測した。光ファイバーの設置位置と発光信号の時間発展波形から、電極内でのプラズマ生成箇所と、プラズマの加速・収束のダイナミクスを評価した。

##### (2) ファラデーカップによるイオン電流計測

プラズマガイドチューブの末端にファラデーカップというイオン電流検出器を設置することで、飛来するプラズマ中のイオンの挙動を評価した。また、ファラデーカップの前段にイオンを反射する電位グリッドを追加し、印加した電位以下のエネルギーのイオンを反射することで電圧-電流特性 (V-I 特性) を評価し、PF電極で生成されたプラズマ流のIEDFを調査した。

#### 【電磁粒子-流体シミュレーション】

PF装置で駆動されたプラズマ流と電磁場の相互作用を解析するため、Hybrid Particle-In-Cell (PIC) 法とよばれる電磁粒子-流体ハイブリッドシミュレーションを行った。Hybrid PIC法ではイオンを粒子、電子を流体として取り扱うことで、粒子加速現象のようなイオンの非熱的挙動を解析することができる。本研究では1次元のHybrid PICシミュレーションコードを構築し、本研究で構築したPF装置で駆動されるプラズマ流を模擬したパラメータでの解析を行い、無衝突プラズマ流と垂直磁場の相互作用によるプラズマ挙動の変化を解析した。また、プラズマを構成するイオン種を変更し、重イオンと軽イオンで構成される多種イオンの効果を調査した。

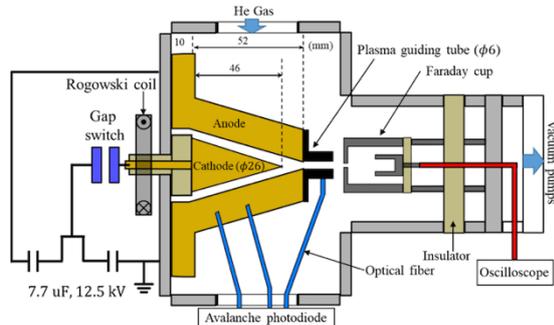


図1 構築したPF装置の概略

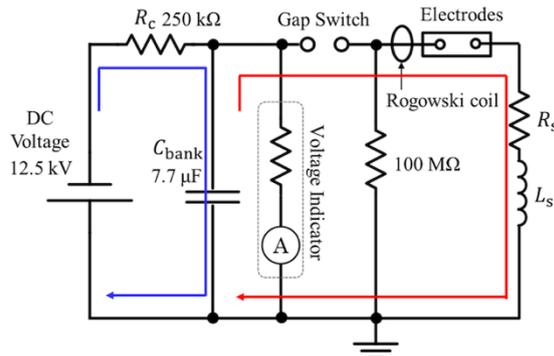


図2 PF装置の等価回路図

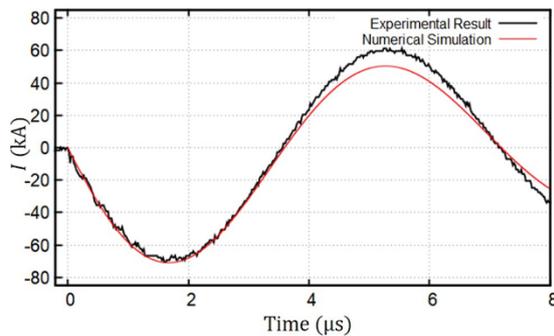
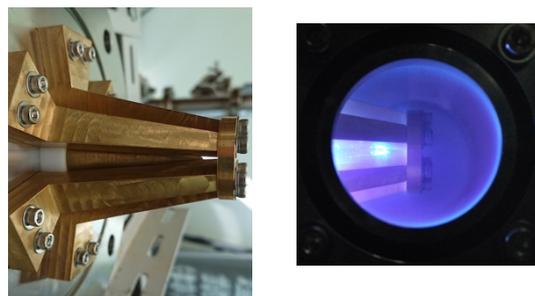


図3 放電電流波形



(a) 放電前の電極 (b) 放電時の様子

図4 電極内のプラズマ自発光の様子

#### 4. 研究成果

##### 【電極内部のプラズマ自発光計測】

図5は光ファイバー計測器のセットアップと計測されたプラズマ自発光信号の時間発展を示す。図5より、電極根元側に設置された光ファイバーから順に発光信号のピーク値に到達することがわかる。これは電極根元側で生成されたプラズマが電極先端方向へ運動している様子を意味する。この挙動は従来のPF装置での典型的なプラズマ挙動であり、本研究のPF装置も同様のプラズマ加速プロセスを経ることを示す。各ファイバー信号のピーク値の時刻から飛行時間差法(TOF法)によりプラズマの進展速度を評価した結果、電極内でのプラズマの進展速度は典型的に15–20 km/sであることがわかった。一方、PF電極内部でのプラズマ挙動をsnow plowモデルというPF装置内部の一般的な流体力学的モデルで解析した結果、数100 km/sという結果が得られ、実験結果との乖離がみられた。本研究では中真空領域でPF装置を運転するため、この実験結果との乖離は、中真空領域でのPF装置の動作は一般的なPFモデルでは記述できないことを示唆する。実験室で無衝突衝撃波を再現するにはプラズマ流速が重要なパラメータであり、これらの結果は本研究のPF装置で駆動されるプラズマ流の速度向上の可能性を示唆するものであり、中真空領域でのPF装置駆動の今後の課題となる。

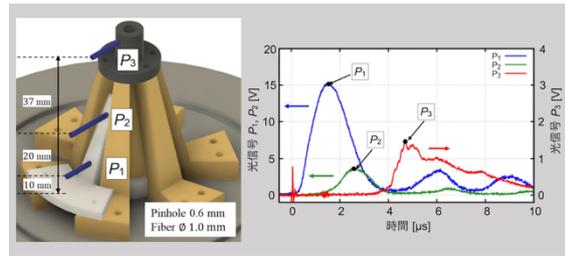


図5 プラズマ自発光信号の時間発展

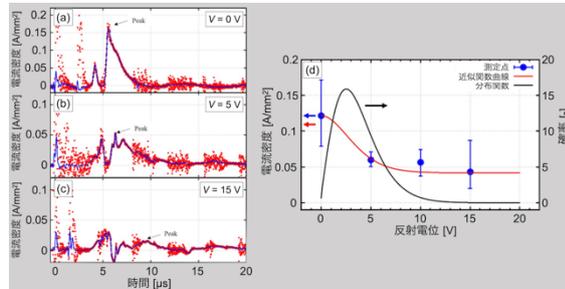


図6 イオン電流波形およびV-I特性

##### 【イオン電流計測およびV-I特性評価】

図6に計測されたイオン電流波形と、反射電位とイオン電流密度のV-I特性を示す。図6(a)-(c)は反射電位を変化した場合の典型的なイオン電流波形であり、反射電位の増加によりイオン電流ピーク値が低下する様子がわかる。これは電位の増加により反射されるイオン数が増加し、検出器に到達するイオン電流が低下するためである。図6(d)は、反射電位の増加によるイオン電流密度の低下をプロットしたV-I特性であり、このV-I特性を解析することでIEDFを評価することができる。ここではShifted Maxwell分布という熱的速度分布関数を仮定し、そのフィッティングからプラズマパラメータを評価した。その結果、本研究で生成されるプラズマ流は、速度11 km/s、数密度 $4.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、イオン温度0.8 eVというパラメータを持つことが示された。これらの値は宇宙空間の無衝突プラズマとのスケーリング則を満たすパラメータであり、本研究で構築したPF装置が無衝突プラズマ流を生成することが示された。一方、本研究で構築したIEDF計測器は信号・雑音比により非熱的イオンの検出が困難であり、より高精度なIEDFの評価には信号増幅率の高いイオン電流検出器の構築が課題となる。

##### 【Hybrid PICシミュレーションによる電磁パルス駆動プラズマ流の解析】

図7はHybrid PICシミュレーションにより解析された、電磁パルス駆動プラズマ流と垂直磁場の相互作用の解析結果を示す。プラズマ流が外部磁場の印加領域へ入射した際に流体中の一部の粒子が加速される様子が示された。これはプラズマ流の入射により印加磁場が圧縮され、磁場の空間的・時間的変化により誘起された電場が一部の粒子を加速するためである。また、プラズマ中のイオン種を変更し、軽イオンと重イオンで構成される多種イオンプラズマ流の垂直磁場中での挙動を解析した結果、加速粒子の最大速度が向上する結果が得られた。この粒子加速現象は磁場の圧縮による誘導電場を加速源とするため、重イオンの注入により磁場の圧縮が強く引き起こされて軽イオンの加速効率が向上した。この結果より、無衝突プラズマでの多種イオン効果の新たな知見を得ることができた。

##### 【まとめ】

以上の研究成果により、電磁パルス駆動プラズマ流発生装置を構築し、宇宙プラズマとのスケーリング則を満たす無衝突プラズマ流を生成することができた。また、数値シミュレーションにより、無衝突プラズマと垂直磁場の相互作用による非熱的粒子加速現象を確認し、その相互作用には多種イオンの効果が影響するという、新たな知見を得ることができた。今後はより高精度なIEDF計測器を構築し、非熱的粒子加速現象についての調査を行う。

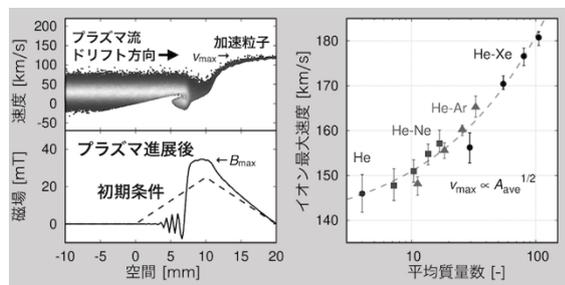


図7 Hybrid PICシミュレーションによる電磁パルス駆動プラズマ流と垂直磁場の相互作用の解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Takuya Oguchi, Jun Matsuyama, Muneaki Shigeta, Taichi Takezaki Taichi, Toru Sasaki, Hiroaki Ito	4. 巻 18
2. 論文標題 Measurement of Ion Energy Distribution Function of Fast Plasma Flow Driven by Plasma Focus Device Using Retarding Field Energy Analyzer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401049 ~ 2401049
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.2401049	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 Taichi Takezaki, Seigo Kato, Takuya Oguchi, Shuto Watanabe, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Hiroaki Ito	4. 巻 28
2. 論文標題 Effect of multi-ion species on collisionless plasma driven by a compact plasma focus device in perpendicular magnetic field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102109 ~ 102109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0055266	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14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takuya Oguchi, Taichi Takezaki, et al.
2. 発表標題 Measurement of characteristics of fast plasma flow driven by plasma focus device using biased ion collector
3. 学会等名 The 9th Euro-Asian Pulsed Power Conference with the 24th International Conference on High-Power Particle Beams (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Oguchi, Taichi Takezaki, et al.
2. 発表標題 Measurement of ion energy distribution function of fast plasma flow driven by plasma focus device using retarding field energy analyzer
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹崎太智, 他
2. 発表標題 小型プラズマフォーカス装置による無衝突プラズマ流の生成と実験室宇宙物理への応用
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 (招待講演)
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

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