様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：３２６６５
研究種目：若手研究
研究期間：2023～2024
課題番号：２３Ｋ１３０８１

研究課題名（和文）亜音速／超音速インフローによる磁気リコネクション速度への影響の実験的検証

研究課題名（英文）Evaluation of effects of subsonic/supersonic inflow on a magnetic reconnection process

研究代表者
小林　大地（KOBAYASHI, Daichi）

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：８０９０５９０１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,600,000円

研究成果の概要（和文）：超音速インフローを伴う磁気リコネクション過程を観測し，磁気リコネクション速度のインフロー速度への影響を調査することを目的として実施した。2つの磁化プラズモイドを超音速で衝突・合体させるための実験系と衝突面近傍の磁場構造を観測するための磁気プローブアレイを新たに構築し，これらを用いて衝突・合体時の磁気リコネクション速度および磁場構造の変化に着目した観測を実施した。インフロー速度がイオン音速やアルヴェン速度を超える条件において，磁気リコネクションを伴う合体過程が比較的高速に完了することが示唆された。今後は磁気リコネクション速度のインフロー速度に対する依存性の評価を課題として研究を推進する。

研究成果の学術的意義や社会的意義
磁気リコネクションは天体プラズマや実験室プラズマ中で普遍的に観測される現象であるが，既存の準静的過程を前提とした理論モデルだけでは定量的な説明ができない。そのため，高速なインフローや衝撃波を伴う場合など，動的な物理過程を含んだ理解が重要である。しかし，従来の磁気リコネクションの地上実験は，準静的な条件下におけるものがほとんどで，動的な物理過程を含む実験の実施例は少ない。したがって，本研究によってイオン音速やアルヴェン速度を超えるような高速インフローを伴う条件領域の実験が実現したことは，今後の磁気リコネクション研究の発展に大きく寄与するものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The magnetic reconnection process was observed to investigate the effect of the supersonic inflow on the reconnection speed. The experimental device for the collision and merging of two magnetized plasmoids at supersonic speed, and the magnetic probe array for the observation of the magnetic field structure around the collision surface, were newly built in this study. The observation was performed focusing on the magnetic reconnection speed and the time evolution of the magnetic field structure during the collision and merging. It was suggested that the merging process, accompanied by magnetic reconnection, is completed relatively rapidly under conditions where the inflow speed exceeds the ion speed of sound and the Alfven speed. Further research will be conducted to evaluate the dependence of magnetic reconnection speed on inflow speed using the newly built device.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：磁気リコネクション　磁化プラズマ　プラズモイド合体　スフェロマック　磁場反転配位

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

磁気リコネクションは，文字通り磁力線が磁化プラズマ中で繋ぎ変わる現象である。磁力線が繋ぎ変わる過程で磁気エネルギーを荷電粒子の運動・熱エネルギーへ変換する，エネルギー解放機構であり，天体プラズマや実験室プラズマ中で普遍的に観測される[1]。太陽フレアのような磁気リコネクションを介した爆発的なエネルギー解放現象は，人工衛星や地上に対して大規模な電波障害などを引き起こす可能性もあり，また核融合プラズマにおいては閉じ込めの崩壊の要因にもなり得ると考えられている。そのため，磁気リコネクションは磁化プラズマの局所的・大域的な構造変化を捉える上で，宇宙物理学・プラズマ物理学分野における学術的に重要な現象であるとともに，我々人類の生活に対しても大きな影響を与える可能性のある物理現象である。磁気流体力学に基づいた既存の理論モデルは，磁気リコネクションの物理過程を定性的に説明できるとされる一方で，準静的な過程を前提としているため，実際の磁化プラズマ中で観測されるような動的な物理過程を含む磁気リコネクション現象の定量的な説明が重要な課題となっている。

自然界や実験装置で観測される磁気リコネクションの定量的な説明のため，近年のシミュレーション研究により荷電粒子の効果などを考慮した新たな理論モデルが提案されている[2]。ただし,次々提案される新たな理論モデルは,実際の現象の観測結果をもとに検証する必要がある。しかし，太陽フレアなどのように遠方で突発的に起こる現象は，衛星による観測だけでは検証に十分な情報が得られないことが多い。そこで，高い再現性で繰り返し実施できる地上実験が重要な役割を担っている。磁気リコネクションの実験研究は東京大学およびプリンストン大学が先行しており，スフェロマック（SPH）または球状トカマク（ST）様の磁化プラズマを合体させる手法による実験が実施されている[3,4]。これらの実験により，磁気リコネクションに関する様々な知見が蓄積されてきたが，この手法は準静的過程を前提とした，比較的低速な領域における実験である。したがって，高速なインフローを伴うような動的な物理過程を含む条件領域における磁気リコネクション実験は前例が少ない。

２．研究の目的

こうした背景のもと本研究は，イオン音速やアルヴェン速度を超えるインフローを伴うような動的な物理過程を含む磁気リコネクションを再現するための新たな実験手法を確立すること，さらには，高速インフローによる磁気リコネクション過程への影響を調査することを目的として実施した。

３．研究の方法

2 つの SPH 様の磁化プラズモイドをイオン音速やアルヴェン速度を超える速度で衝突，合体させる実験装置を新たに開発する。また，磁化プラズモイド同士の衝突から合体，緩和過程における磁化プラズモイド内部の磁場構造の時間変化を観測するため，磁気プローブアレイを新たに構築する。開発した装置の両端から SPH 様の磁化プラズモイドを 20-100 km/s 程度で射出し，装置中央付近で衝突，合体させ，装置中央断面に設置した磁気プローブアレイを用いて，磁気リコネクションを伴う合体過程における磁場ベクトルの径方向分布を観測する。その観測結果から高速インフローによる影響を評価する。

４．研究成果

(1) 実験装置の新規開発

図 1 に本研究で開発した実験装置の概略図を示す。本装置は，SPH 様の磁化プラズモイドを生成，射出するための磁化同軸プラズマガン（MCPG），2 つの磁化プラズモイドが衝突・合体する過程を観測するための透明石英製の大型チェンバー，磁化プラズモイドの径方向・軸方向の運動や膨張を制限するための軸方向磁場を形成する外部磁場コイルから構成されている。MCPG により生成された磁化プラズモイドは電磁力により軸方向に加速され，その速度は最大で 80 km/s を達成した。磁化プラズモイドの温度・密度から推定されるイオン音速やアルヴェン速度は 30-60 km/s 程度であり，衝突時の相対速度はこれらの特性速度を大きく上回る。したがって，当初の目標一つであった，イオン音速やアルヴェン速度を超えるインフローが実現された。

(2) 磁化プラズモイドの合体過程における内部磁場構造の観測

片側の MCPG を用いて単一の磁化プラズモイドを射出した際の内部磁場分布を図 2 に示す。ポロイダル磁場とトロイダル磁場にそれぞれ相当すると考えられる，z 方向磁場 Bz と x 方向磁場 Bx が観測された。したがって，射出された磁化プラズモイドは SPH 様の磁場構造を持つことが確認された。また，図 1 の左側の MCPG を用いた場合（図 2 (a)）と右側の MCPG を用いた場合（図 2 (b)）では，トロイダル磁場の極性が反転しており，異なる極性の磁気ヘリシティを持つ SPH 同士の衝突および合体になることがわかる。

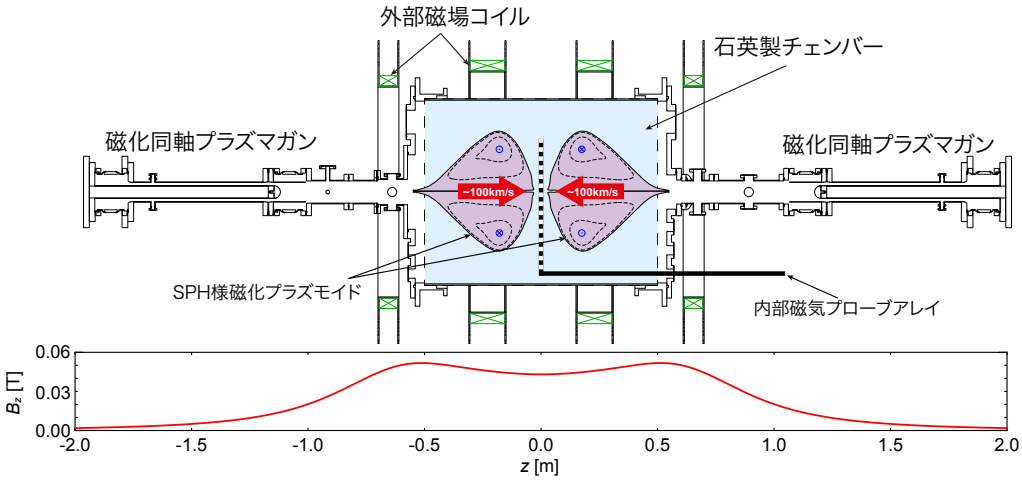

図 1　開発した実験装置の概略図

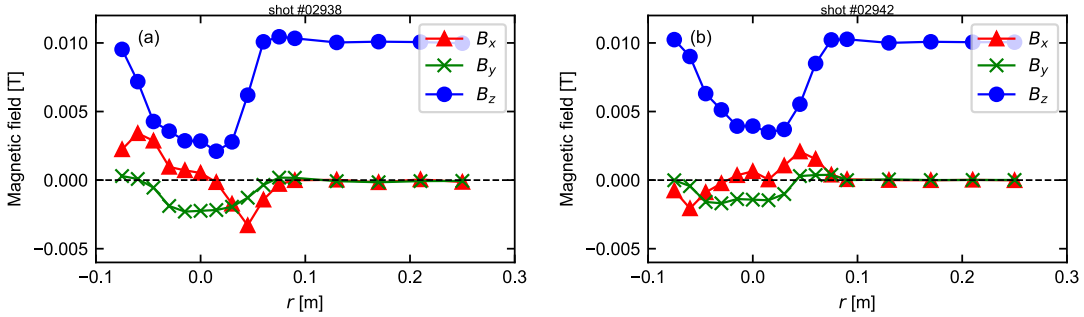

図 2　片側の MCPG を用いて単一の磁化プラズモイドを射出した際の内部磁場分布.
(a)と(b)は，対向する MCPG をそれぞれ単独で使用した場合の観測結果.

衝突時の相対速度（インフロー速度）がイオン音速やアルヴェン速度を超える条件において，2 つの磁化プラズモイドを衝突させた場合の内部磁場分布を図 3 に示す。カラーマップは磁場強度とその向きを表しており，各方向の磁場成分ごとでプロットした。図 3 のショットでは，磁化プラズモイドが衝突する時間（t ~ 45-50 μs）で磁場強度が増大し，その後 t ~ 65-70 μs で衝突時に生じた揺動成分が減衰し，緩和状態に至る様子が観測された。この結果から磁気リコネクションを伴う合体過程は 10-20 μs 程度で比較的高速に完了することが示された。ただし，今回構築した実験系ではインフロー速度を低速にすることが困難であったため，今回の観測結果が高速なインフローによる影響を受けたものであるかなど，インフロー速度に対する依存性を評価することが課題として残った。今後は実験可能な条件領域を拡大して低速から超音速程度のインフロー速度を実現し，この課題に取り組む。

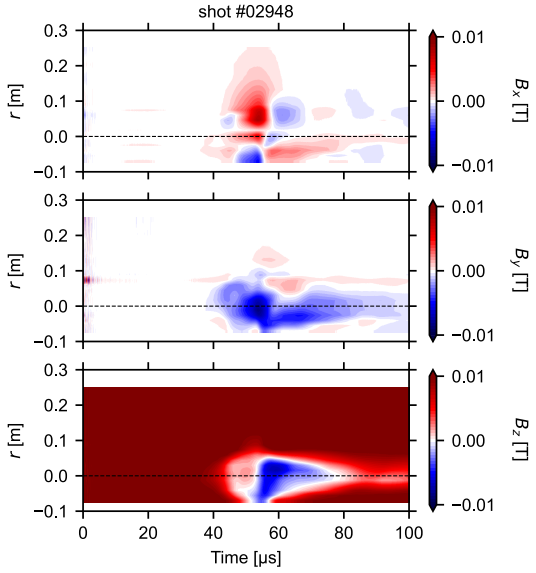

図 3　2 つの磁化プラズモイドを衝突させた場合の内部磁場分布とその時間発展.

また図 4 に示すように，2 つの磁化プラズモイドの合体後にトロイダル磁場が消失せずに SPH 様に緩和する場合（図 4 (a)）と，トロイダル磁場が概ね消失してポロイダル磁場のみが残り，磁場反転配位 (FRC) 様になる場合（図 4 (b)）が観測された。従来の異極性 SPH 合体実験において，2 つの磁化プラズモイドのトロイダル磁束量の差に応じて，SPH と FRC に緩和する分岐現象が報告されている。今回の実験においても同様の緩和状態の分岐が起きた可能性があるが，再現性が十分でなく磁束量の定量的な評価に至っていない他，衝突時の圧力勾配の形成など高速インフローによる影響を無視できないため，同様のメカニズムによる分岐現象であるかについては追加調査が必要である。

さらに，いずれのケースにおいても，単一の磁化プラズモイドを射出した場合に比べて合体時にポロイダル磁場（Bz）の強度が増加することがわかった。磁化プラズモイドの径方向の大きさ

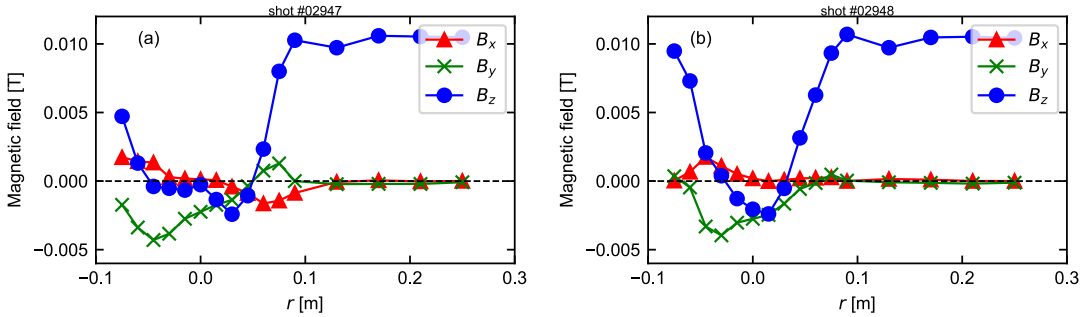

図 4　2 つの磁化プラズモイドの衝突・合体後の緩和状態における内部磁場分布.

は衝突前後でほとんど変化しないことから，この磁場強度の変化はポロイダル磁束の増加を示唆しており，トロイダル磁束からの磁束変換や圧力勾配の形成による電流駆動などが生じた可能性があると考えられる。この点についても，今後の課題としてメカニズムの解明を目指す。

＜参考文献＞

[1] M. Yamada *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **82**, 603 (2010).
[2] S. Zenitani *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **894**, L7 (2020) など.
[3] Y. Ono *et al.*, *Physics of Fluids B* **5**, 3691, (1993).
[4] Y. Ono, *AIP Conference Proceedings* **1721**, 030001 (2016).

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計3件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 D. Kobayashi, T. Seki, M. Mori, H. Kaneko, K. Ito, R. Hayata, Y. Takeuchi, N. Matsudaira, T. Takahashi, and T. Asai
２．発表標題 Development of a Super-sonic Spheromak Merging Device for Magnetic Reconnection Experiments
３．学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics（国際学会）
４．発表年 2023年

１．発表者名 小林 大地, 森 正輝, 金子 悠花, 伊藤 冬美, 松平 夏奈, 早田 怜司, 関 太一, 髙橋 努, 浅井 朋彦
２．発表標題 FRC生成およびリコネクション実験のための高速スフェロマック合体装置の開発
３．学会等名 核融合科学研究所共同研究 「高ベータトーラスプラズマの学理と応用」研究会
４．発表年 2023年

１．発表者名 Daichi Kobayashi, Haruka Kaneko, Masaki Mori, Kazumi Ito, Kana Matsudaira, Ayu Onoma, Taichi Seki, Tsutomu Takahashi and Tomohiko Asai
２．発表標題 Super-sonic Spheromak Merging Device for FRC Formation and Reconnection Experiments
３．学会等名 US-Japan Workshop on "Progress of the Innovative and Alternative Confinement Concepts (IAC)"（国際学会）
４．発表年 2024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