

磁場エネルギーはなぜ急速に解放されるのか？ レーザー実験で太陽フレアや地球磁気圏の爆発的現象の謎に迫る

ポイント

- ① レーザー生成プラズマ（※1）を用いて磁場のつなぎ替わり（磁気リコネクション（※2））の時間発展を詳細に計測
- ② 流入条件を大きく変えても、磁気エネルギーの解放速度はほぼ一定であることを実証
- ③ 磁気リコネクション率（※3）は大域的な条件ではなく、局所的な電流シート（※4）の物理によって決まる可能性を示唆
- ④ 太陽フレアや地球磁気圏で観測される高速なエネルギー解放現象を理解するための新たな実験的基準を提供

概要

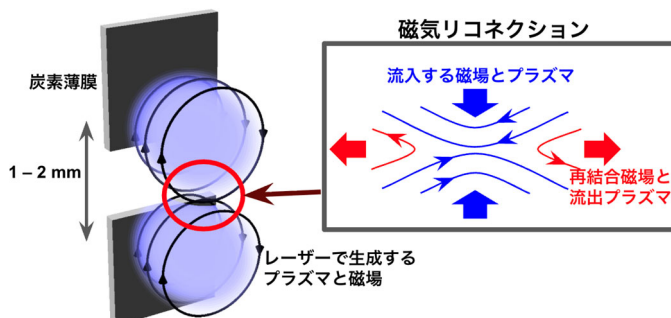
九州大学大学院総合理工学研究院の森田太智准教授らの研究グループは、大阪大学、北海道大学、青山学院大学、富山大学、成蹊大学、核融合科学研究所と共同で、大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII レーザーを用いた実験により、宇宙プラズマで重要なエネルギー変換過程である磁気リコネクションの時間発展を詳細に計測しました。

磁気リコネクションは、磁場中に蓄積されたエネルギーを粒子の加熱や高速流へと急激に変換する現象であり、太陽フレアや地球磁気圏サブストームなどの爆発的現象の根源と考えられています。しかし、なぜこれほど短時間で大量の磁気エネルギーを解放できるのか、その物理的仕組みは現在も活発に研究されています。

本研究では、レーザー生成プラズマ同士が衝突する条件を変えることで、磁気リコネクションに流れ込むプラズマ密度や磁場強度などの初期条件を大きく変化させました。その結果、リコネクションが始まる時刻は大きく変化する一方で、磁気エネルギーが解放される速さを表す「リコネクション率」はほぼ同じ値となることを明らかにしました。

今回の成果は、磁気エネルギーがどのように急速に解放されるのかという宇宙プラズマ物理学の重要課題に新たな実験の手掛かりを与えるものです。太陽フレアや地球磁気圏で観測される高速な磁気リコネクションの仕組みを理解するだけでなく、それらを説明する理論や数値シミュレーションの妥当性を検証するための基準として活用できます。今後、さらに多様な条件で実験を行うことで、高速磁気リコネクションがどのような条件で生じるのかを明らかにし、宇宙における爆発的なエネルギー解放現象の理解につながる事が期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review E に 2026 年 9 月 8 日（火）（日本時間）に掲載されました。



実験による磁化プラズマ生成とリコネクションの様子。
高出力レーザーで電離した炭素プラズマは自己生成された磁場とともに膨張し、中間面で磁気リコネクションが発生する。

研究者からひとこと：

磁気リコネクション率が、流入条件を大きく変えてもほぼ一定であることを実験的に示せたことは大きな成果です。今回確立した計測手法を用いることで、今後はななめ磁場や非対称プラズマ流など、より現実的な宇宙プラズマ条件での磁気リコネクション研究へ発展させたいと考えています。

（森田太智）

【研究の背景と経緯】

磁気リコネクションは、磁場中に蓄積されたエネルギーを急速に解放し、プラズマの加熱や高速流を生み出す現象です。太陽フレアや地球磁気圏サブストームなどの爆発的な宇宙現象の原因として知られており、宇宙プラズマ物理学における重要課題の一つです。

近年の宇宙観測や数値シミュレーションから、磁気リコネクションは多様な環境で高速で進行し、その速さは普遍的な値が得られています。しかし、異なる環境にもかかわらず類似したリコネクション率が得られる理由は十分には理解されていません。その解明には、流入プラズマや磁場条件を制御した実験的検証が必要です。

【研究の内容と成果】

研究グループは、大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII レーザーを用いて、レーザー生成プラズマ同士の衝突実験を実施しました。プラズマ中には自発的に磁場が生成され、プラズマの衝突と同時に磁場がつなぎ替わります。本実験では、レーザー照射位置の間隔を変えることで、磁気リコネクションに流れ込むプラズマや磁場の条件を大きく変化させました。

また、独自に開発した二方向レーザートムソン散乱（※5）計測（図 1）により、電流シート内部の電流密度や、リコネクションによって生成される高速流を同時に測定しました。その結果、

- プラズマの膨張履歴や磁場の輸送履歴は大きく異なる
- リコネクション開始時刻は大きく異なる
- それにもかかわらず、リコネクション率はほぼ同じ値（0.1～0.2）となる（図 2）

ことを明らかにしました。

さらに、磁場エネルギーがプラズマの加熱と流れのエネルギーへどのように分配されるかを定量的に評価し、リコネクションによるエネルギー変換過程を実験的に明らかにしました。

本研究で確立した計測手法により、磁気リコネクション率とエネルギー変換の関係を定量的に評価できるようになりました。

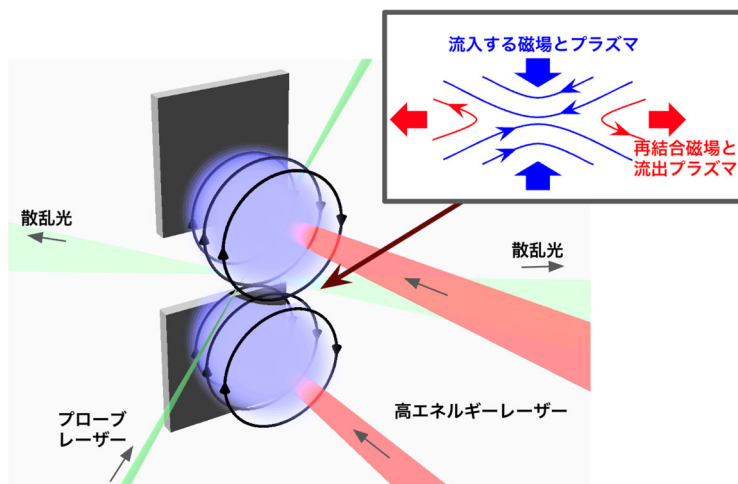


図 1 炭素板をレーザーで電離して得られるプラズマと磁場が相互作用する様子。中間面で磁場がつなぎ替わる。リコネクションの様子は、別のレーザーを入射して、その散乱光を分光することで、見積もられる。

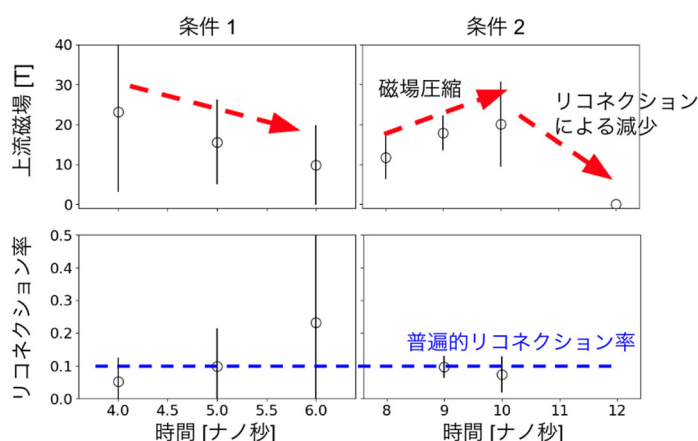


図 2 リコネクション前の磁場強度の時間変化と、見積もられたリコネクション率。異なる 2 条件でほぼ同等の結果が得られた。

【今後の展開】

今後は、

- 3次元的な斜め磁場中の磁気リコネクション
- 非対称な流入プラズマ
- より大規模な電流シート

など、より現実の宇宙プラズマに近い条件へ研究を発展させる予定です。これにより、近年提案されている Hall リコネクション、非対称リコネクション、プラズモイド媒介リコネクションなどの理論や数値シミュレーションを実験的に検証できるようになります。

本成果は、太陽フレアや地球磁気圏で観測される高速リコネクションの普遍性を理解するための実験的基準を提供するものであり、宇宙における爆発的なエネルギー解放現象の理解に貢献することが期待されます。

【用語解説】

（※1）プラズマ

電子とイオンが自由に運動できる電離気体。宇宙空間の物質の大部分はプラズマ状態にある。

（※2）磁気リコネクション

反対向きの磁場がつなぎ替わることで、磁場エネルギーが熱や運動エネルギーへ変換される現象。太陽フレアやオーロラ現象の原因となる重要なプラズマ過程。

（※3）リコネクション率

磁気エネルギーがどれだけ速く解放されるかを表す指標。宇宙プラズマでは一般に最大 0.1 程度の値が報告されており、その起源は未解決問題の一つ。

（※4）電流シート

磁場の向きが急激に変化し、強い電流が流れる薄い層。磁気リコネクションが起こる中心領域であり、磁場エネルギーが熱や流れのエネルギーに変換される場所。

（※5）レーザートムソン散乱

レーザ光の散乱スペクトルから、プラズマの密度・温度・流速などを非接触で測定する診断技術。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP24K00605、JP24H01816、JP24K17029、JP23K22522、JP23H04864、JP23K20038、JP23K25907、JP22H00119、JP20H01881）、大阪大学レーザー科学研究所共同研究、鹿島学術振興財団国際共同研究助成などの支援を受けて実施されました。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review E

タイトル：Characterizing the temporal evolution of Biermann-battery-driven magnetic reconnection in laser-ablated plasmas

著者名：T. Morita, Y. Muramoto, S. Isayama, M. Edamoto, M. Hanano, R. Ishikawa, Y. Kanesada, K. Koba, H. Kondo, S. Kurimaru, K. Maeda, Y. Maenosono, S. Matsukiyo, A. Morita, Y. Nagamatsu, G. Nakayama, T. Ogawa, K. Oshida, Y. Pan, K. Sakai, T. Sano, Y. Sato, N. Shimoda, J. Shiota, Y. Sudo, Y.

Suzuki, T. Takezaki, S. J. Tanaka, K. Tomita, S. Ueno, S. Yakura, R. Yamazaki, and Y. Sakawa
DOI : 10.1103/2b4s-5m1n

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院総合理工学研究院 准教授 森田 太智（モリタ タイチ）

TEL : 092-583-7586 FAX : 092-583-7587

Mail : morita@aees.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp