

PRESS RELEASE (2022/11/15)

ミニチュア太陽フレアを大型レーザーで実験室に生成 ～宇宙の爆発現象のカギを握る磁気リコネクションの駆動機構解明に新たな光～

ポイント

- ① 太陽フレア^{*1}や地球磁気圏で普遍的に観測されるプラズマの爆発現象は、磁力線再結合（磁気リコネクション）によるものと考えられるが、未だそのメカニズムは未解決である。
- ② 従来は人工衛星による観測が唯一の実証研究の手段であったが、大型の高出力レーザー^{*2}を用いた「レーザー宇宙物理学実験」で実験室に高エネルギープラズマを生成し、太陽フレアと同様に強力な磁場が繋ぎ替わる様子と、磁場によるプラズマの加熱・加速を検出した。
- ③ 今後、本手法を用いることで、磁気リコネクションのプラズマ挙動やエネルギー変換過程の解明につながる可能性がある。

概要

磁力線再結合（磁気リコネクション）は、太陽フレアや地球磁気圏、核融合プラズマ等、様々なプラズマ中で普遍的に観測され、磁場からプラズマへのエネルギー変換、宇宙線（高エネルギー荷電粒子）の加速や、核融合プラズマの閉じ込め悪化を引き起こします。しかしその現象を完全に説明できる理論はまだ無く、磁力線が繋ぎ替わるメカニズムやどのようにエネルギー変換が決まるのかなど多くの点が未解明です。

九州大学大学院総合理工学研究院の森田太智助教、松清修一准教授、諫山翔伍助教、青山学院大学・山崎了教授、田中周太助教、富山大学・竹崎太智助教、北海道大学・富田健太郎准教授、大阪大学・坂和洋一准教授、蔵満康浩教授ら（図1）は、世界有数の大型レーザーである大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号（図2）を用いて、高エネルギープラズマ中で、太陽フレアと同様、磁力線が繋ぎ替わるとともにプラズマが加熱・加速される様子と、局所的なプラズマ挙動を計測することに成功しました。

磁気リコネクションは、人工衛星による”その場”観測や太陽観測、数値シミュレーション等で研究が進められてきました。今回、本研究グループは、レーザープラズマ^{*3}を用いた「レーザー宇宙物理学実験」（図3）で、人工衛星観測では不可能なプラズマの大域構造と、磁場が繋ぎ替わる場所でのプラズマの計測を同時に行うことに成功しました。プラズマ中に計測用レーザーを入射して散乱光スペクトルを測定することで、磁場が繋ぎ替わる微小空間のプラズマ挙動を詳細に調べました。その結果、逆向きの磁場を維持する電流の発生と、磁場の繋ぎ替わりを示す電流消失、磁気リコネクションによるプラズマの加熱・加速が明らかになりました。

今後、本実験手法を用いることで、50年以上未解決な磁気リコネクションの駆動メカニズムやエネルギー変換過程の解決に大いに貢献できると期待されます。

本成果は2022年11月10日(木)に米国科学誌 Physical Review E に掲載されました。



図1 共同研究実験には多くの研究者、大学院生が参加しました

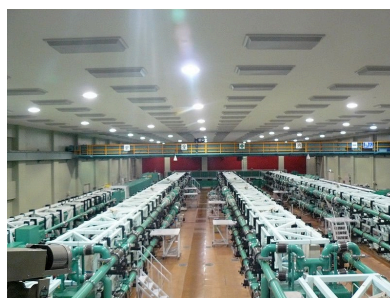


図2 大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーシステム

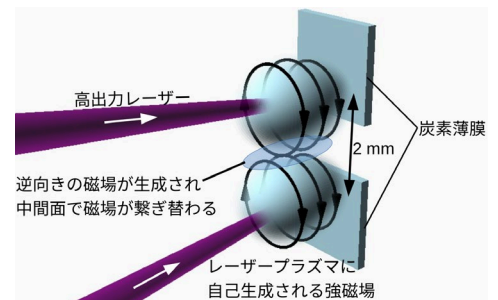


図3 レーザー照射の様子。高エネルギープラズマが発生し、2つのプラズマ間に逆向き磁場が自発的に形成される。

【研究の背景と経緯】

磁力線再結合（磁気リコネクション）は、ほぼ反平行に近い磁力線を伴う2つのプラズマが互いに近づく際に、境界面に流れる電流が電気抵抗で弱まり、消えるために磁力線がつながかわる現象であり、再結合後は磁場による張力でプラズマが加速・加熱される（図4, 6）。太陽フレア（図4）や磁気圏プラズマ、降着円盤等の天体プラズマ、磁場閉じ込め核融合プラズマ等、様々な環境でプラズマを加熱・加速し、磁場からプラズマへのエネルギー変換の速さを決める重要な現象であるため、観測・数値計算などで盛んに研究されていますが未だ謎が多い現象です。特に磁力線が繋ぎ替わる速さを定量的に説明できず、磁場からプラズマを構成する電子・イオンにどのようにエネルギーが変換、分配されるのか、わかっていません。電荷を帯びた流体としてプラズマを考える磁気流体近似では、観測される磁気リコネクションを説明できず、プラズマを構成する粒子個々の運動を考慮する必要があります。



図4 太陽における磁気リコネクションとプラズマ放出（太陽フレア）の様子（NASA's Conceptual Image Laboratory, <https://svs.gsfc.nasa.gov/20310>）

レーザープラズマを用いると、高温・高密度なプラズマが生成でき、これまでにないパラメータ領域で実験が可能であるため研究の進展を期待されていますが、プラズマが微小で非定常なため、時間・空間分解した計測が難しく、これまで詳細なパラメータや、プラズマを構成する粒子集団の速度分布などは計測できていませんでした。

【研究の内容と成果】

本研究では、大型レーザー装置を用いて、図3や図5のように磁気リコネクションを引き起こすような反平行な磁場配位を高エネルギープラズマ中に生成しました。高出力レーザーを集光照射することで、プラズマ中に周回状の磁場が自己生成されます*4。異なる二点に照射することで、その

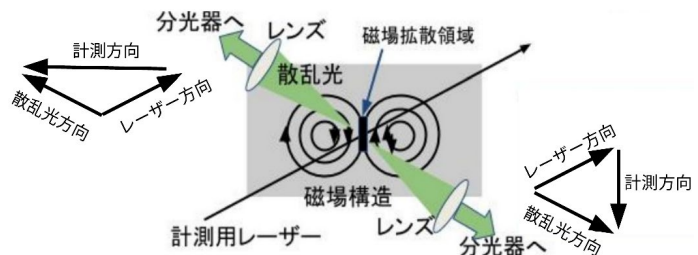


図5 実験によって生成する磁場配位と計測の模式図

間には逆向きの磁場をもつプラズマが生成されます。そしてこのプラズマ中に別の低エネルギーな計測用レーザーを集光照射して、プラズマ中の電子による散乱光を異なる二方向から分光計測*5しました。プラズマ中の自由電子からの散乱はトムソン散乱と呼ばれ、この光のスペクトルを詳細に解析することで、プラズマが持つ温度、速度、イオン価数、局所的な電流やプラズマ流の速度を求めることができます。計測は、計測用レーザーの入射方向と散乱光が作るベクトル差で決まる方向に沿ったものになります（図5参照）。計測の結果、反平行磁場に垂直な方向には電子とイオンに異なる速度、つまり電流が計測され（図6：電流シート*6）、時間とともにこの電流が減少して消失する様子が観測されました。これは磁場が繋ぎ替わったことを意味します。それと同時に、磁場に平行な方向には、プラズマを構成するイオンの速度分布を求めることができ、プラズマが加速・加熱されている結果を示唆するものでした

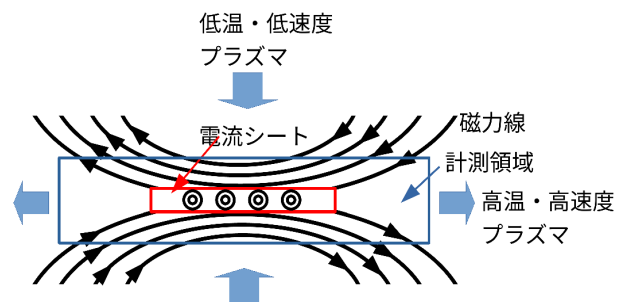


図6 磁気リコネクション領域の模式図。本研究の計測で、この領域内のプラズマ挙動を実験的に明らかにした。

(図 6:高温・高速度プラズマ)。このように、レーザー宇宙物理実験において、初めてプラズマ粒子(イオン)の速度分布関数を計測し、磁気リコネクションに関わる電流構造、プラズマ加速・加熱を同時に計測することに成功しました。

【今後の展開】

本研究で示したように、磁場の方向に対して平行・垂直な二方向のプラズマ粒子(電子・イオン)の速度分布を、高出力レーザー実験で初めて計測しました。今後さらに多方向での計測が可能なシステムを開発することで、磁力線を貫く任意の方向のプラズマ計測が可能になります。このシステムを用いることで、磁力線が繋ぎ替わる微小領域における粒子運動や、磁場からプラズマを構成する電子・イオンへのエネルギー分配を詳細に調べることができます。これまで未解明であった速い磁気リコネクションの駆動メカニズムやエネルギー変換過程の解明に役立つことが期待されます。

【用語解説】

(※1) 太陽フレア

太陽大気黒点群の中で発生する爆発現象。太陽大気に蓄積された磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーや熱エネルギー、高エネルギー粒子、電磁波などに変換される。このエネルギー変換を担うのが磁気リコネクションと考えられている。

(※2) 高出力レーザー

短時間に高エネルギーのレーザー光を出力するため、パルスあたりのピーク強度が非常に大きい。今回使用した激光 XII 号レーザーでは、出力エネルギー700 ジュールを 1.3 ナノ(10^{-9})秒という短時間に出力します。

(※3) レーザープラズマ

高出力レーザーを固体に集光照射したとき、レーザー光が固体に吸収され、固体が加熱されることで爆発的に放出されるプラズマ。

(※4) 自己生成磁場

プラズマの温度と密度が空間的に大きく変化する場合、それらの勾配の向きが異なると、大きな磁場が成長します。レーザーを微小空間に集光して生成するレーザープラズマではこの磁場が大きく成長し、レーザー集光点を周回する向きの磁場になります。

(※5) 分光計測、分光器

光を波長ごとに分光して計測する装置が分光器であり、分光したスペクトルを計測することを分光計測と呼ぶ。本研究では、およそ 20 ピコ(10^{-12})メートルという非常に高い分解能を持つ分光器を作成して、プラズマによる散乱光の微小な波長変化を計測しました。

(※6) 電流シート

プラズマ中で生成される非常に薄い電流層。逆向きの磁力線が押し付けられると、その逆向き磁場を維持するために非常に強く薄い電流層ができます。この電流が流れ続けていると磁力線は繋ぎ替わりませんが、何らかの理由で電流が散逸すると磁力線が繋ぎ替わり、繋ぎ替わった後の磁場の張力によってプラズマが激しく加速・加熱されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会・学術研究助成基金助成金/科学研究費補助金（JP22H01251, JP20H01881, JP18H01232, JP22H00119, JP20K20285, JP17H06202）、研究拠点形成事業 B アジア・アフリカ学術基盤形成型「アジアにおけるレーザー宇宙物理学国際研究教育拠点（JPJSCCB20190003）」、および2020年度大阪大学レーザー科学研究所・共同利用・共同研究の助成を受け実施されました。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review E

タイトル：Detection of current-sheet and bipolar ion flows in a self-generated antiparallel magnetic field of laser-produced plasmas for magnetic reconnection research

著者名：T. Morita, T. Kojima, S. Matsuo, S. Matsukiyo, S. Isayama, R. Yamazaki, S. J. Tanaka, K. Aihara, Y. Sato, J. Shiota, Y. Pan, K. Tomita, T. Takezaki, Y. Kuramitsu, K. Sakai, S. Egashira, H. Ishihara, O. Kuramoto, Y. Matsumoto, K. Maeda, and Y. Sakawa

D O I : 10.1103/PhysRevE.106.055207

【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 助教 森田太智（モリタタイチ）

TEL：092-583-7587 FAX：092-583-7587

Mail：morita@aees.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学広報室

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp