

レーザーアブレーションプラズマが駆動する磁気リコネクション研究 (2019A-MORITA)

森田太智,¹ 高木麻理子,² 西岡裕輝,² 枝本雅史,² 坂和洋一,³ 富田健太郎,¹ 佐野孝好,³ 蔵満康浩,⁴ 山崎了,⁵ 田中周太,⁵ 松清修一,¹ 大平豊,⁶ 太田雅人,⁷ 江頭俊輔,⁷ 泉智大,⁷ 境健太郎,⁴ 角地真,⁵ 瀬井柊人,⁵ 石坂夏槻,⁵ 杉山慧,⁵ 樋口琢己,² and 村上洋大²

¹ 九州大学大学院総合理工学研究院

² 九州大学大学院総合理工学府

³ 大阪大学レーザー科学研究所

⁴ 大阪大学工学研究科

⁵ 青山学院大学理工学部

⁶ 東京大学大学院理学系研究科

⁷ 大阪大学理学研究科

INTRODUCTION

磁化プラズマ中において、磁気リコネクションは、磁場構造の変化とともに磁気エネルギーからプラズマの熱エネルギーや運動エネルギーへの変換を伴う、非常に重要な物理過程である [1]。磁気リコネクションを理解するには、流体スケールにおける磁場の移流と、運動論的效果が重要となる微小な磁場拡散領域を同時に理解する必要がある。これまでに運動論的数値シミュレーションや流体シミュレーションを用いた研究や、衛星によるその場計測、太陽フレア観測等で磁気リコネクションが検証されているが、大きな空間スケールの違いを統一して理解することは難しい。レーザープラズマはその性質上、高温・高密度であり、他の放電プラズマを用いた室内実験と比較して高いベータ値を実現でき、様々なプラズマ計測を用いることで、これまでにないパラメータ領域で磁気リコネクションを検証できる。また、数ミリメートルの流体スケールの計測と 1 mm 以下の磁場拡散領域の計測が同時に可能である利点がある。しかし、レーザープラズマは空間的に微小で時間的に非定常なプラズマであるため、電磁場計測やプラズマの局所計測が難しい。

激光 XII 号レーザーを固体に照射したときに自己生成される磁場 (Biermann battery effect) 中で発生する磁気リコネクションを検証した。プラズマの自発光をイメージングすることで、レーザー生成プラズマの密度構造を計測し、プラズマ生成、膨張、相互作用を可視化した。同時に、Nd:YAG レーザーをプラズマ中に集光照射してトムソン散乱光を分光計測することで、レーザー集光径程度の局所領域におけるプラズマパラメータを計測した。今年度は、昨年度 [2] に加え、二つの分光器を設置することで二方向からトムソン散乱光を計測し、磁力線に対して平行および垂直と二方向のパラメータを計測した。また、磁気リコネクションにより駆動されるジェットのパラメータに B-dot プローブを配置し、磁化されたジェットによる磁場変化の検出も同時に行った。

EXPERIMENT

実験は激光 XII 号レーザーのチャンバー II で実験を行った。出力エネルギー 600 J、パルス幅 1.3 ns の激光レーザーを厚さ 200 μm のターゲット表面に集光照射し、アブレーションプラズマを生成すると同時に、その周りに Biermann Battery effect ($\partial B/\partial t \propto \nabla T \times \nabla n_e$) により磁

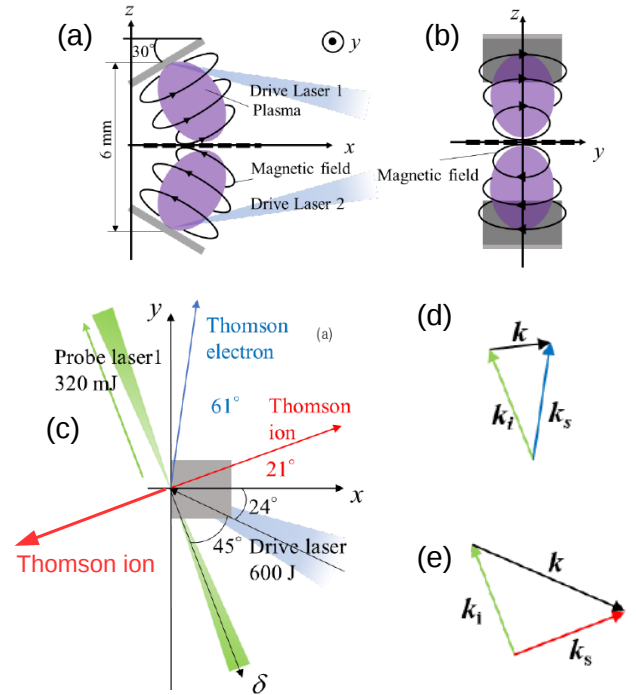


FIG. 1. (a), (b) のように、二枚のアルミニウム薄膜ターゲットを上下に 6 mm 距離を離して設置し、それぞれ激光レーザー 1 ビームずつで照射する。自己生成磁場は中間面で相互作用する。レーザートムソン散乱計測は、 δ 軸と反対方向に入射し、(c)–(e) のように、イオン項を 2 方向から、電子項を 1 方向から計測した。

場が自己生成される。ターゲットとレーザートムソン散乱計測の配置は図 1(a)–1(e) に示した。自己生成磁場は上下から互に対向する方向に膨張するプラズマと共に移流され、中間面 ($z = 0$) で相互作用する。トムソン散乱計測は $z = 0$ 面内で計測した。計測方向は図 1(c)–1(e) に示すように、 $k = k_s - k_i$ 方向のパラメータが得られる。

また、磁気リコネクションにより駆動が期待されるジェット (y 軸方向) 排出方向に B-dot プローブを設置し、磁場変化を計測した。リコネクションによって排出される磁化プラズマは $\pm y$ において磁場が反転するはずであるため、 $y = -25$ mm, 13 mm と 2 点で計測した。

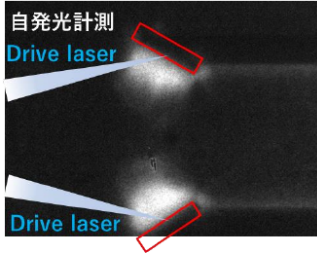


FIG. 2. レーザー生成プラズマからの熱制動放射 (波長 $\lambda = 450$ nm) の計測結果。上下のターゲットから対向するプラズマが生成されていることがわかる。

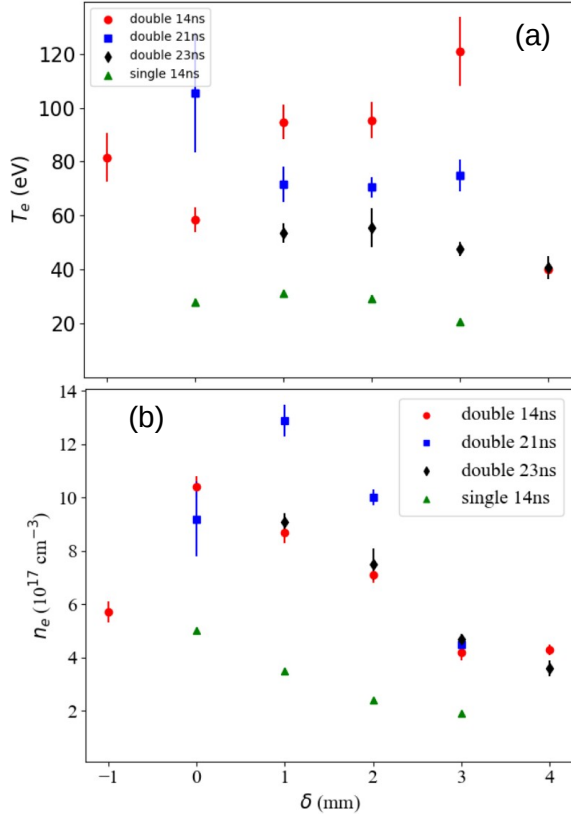


FIG. 3. レーザートムソン散乱の電子項計測から得られた (a) 電子温度と (b) 電子密度。横軸はプローブレザーに沿った空間を示す。

RESULTS

図2に、 y 軸に沿って計測したプラズマの自発光 ($\lambda = 450$ nm における熱制動放射) の一例を示す。昨年度までの結果と同様、上下からプラズマが膨張し、中心付近で相互作用する様子がわかる。

図3(a)と3(b)は、それぞれ、レーザートムソン散乱の電子項計測から得られた電子温度と電子密度を示す。ターゲットの片側のみを照射した場合 ($t = 14$ ns) と比較し、上下のプラズマが衝突する場合は、どの時刻においても温度、密度ともに上昇していることがわかる。衝突初期の時間と考えられる $t = 14$ ns と比較し、21–23 ns では、密度

が大きく変わらない一方で、温度が急激に低下しているこ

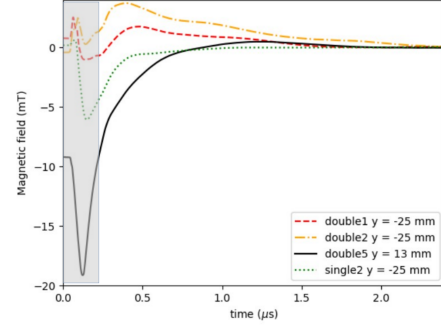


FIG. 4. $y = -25$ mm および 13 mm において、B-dot プローブにより計測した磁場変化 (B_z).

とが分かる。これは、 $t = 14\text{--}21$ ns の時間においてプラズマが急激に加熱されていることを示唆している。

また、ここでは載せなかったが、二方向からイオン項を計測し、2次元速度、温度計測も試みたが、プラズマ膨張に対して垂直方向の分光器は波長分解能が足りず、速度・温度変化を捉えるには至らなかった。しかし、二方向を計測することで、磁気リコネクションに特有のジェットの数値場や温度、速度の磁力線方向依存性を議論できる可能性があるため、来年度以降は、分光器を改善し、計測を行いたいと考えている。

B-dot プローブにより計測した磁場変化の z 成分を図4に示す。激光レーザー照射時の電磁ノイズが強いため、 $t < 0.2 \mu\text{s}$ での磁場変化を求めるのが難しい。そこで、得られた電圧信号に対し、 $t = 7.3 \mu\text{s}$ と十分磁場変化が小さい時刻から、 $-t$ 方向に積分することで、磁場変化を見積った。 $t \sim 0.5 \mu\text{s}$ 付近での磁場変化を比較すると、片側のみを照射した場合 (single) と比較し、両側のターゲットを照射した場合 (double) の磁場変化が増加していることがわかる。また、 $y = 13$ mm と -25 mm における計測では、それぞれ ΔB_z が反転して計測されていることから、プラズマに磁化した自己生成磁場を計測できていると考えられる。

ACKNOWLEDGEMENTS

レーザー運転、ターゲット製作及びプラズマ計測など、大阪大学レーザー科学研究所の職員からの技術支援に感謝いたします。本研究の一部は、JSPS 科研費 18H01232, 17H06202、および大阪大学レーザー科学研究所の共同利用・共同研究のもとに実施された。

- [1] E. G. Zweibel and M. Yamada, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **47**, 291 (2009).
- [2] T. Morita, K. Nagashima, M. Edamoto, K. Tomita, T. Sano, Y. Itadani, R. Kumar, M. Ota, S. Egashira, R. Yamazaki, S. J. Tanaka, S. Tomita, S. Tomiya, H. Toda, I. Miyata, S. Kakuchi, S. Sei, N. Ishizaka, S. Matsukiyo, Y. Kuramitsu, Y. Ohira, M. Hoshino, and Y. Sakawa, Physics of Plasmas **26**, 090702 (2019).