

レーザー生成高エネルギー密度磁化プラズマの
流体不安定性の激光XII号レーザーにおける実験的検証
Experimental Investigation of Hydrodynamic Instability
of Laser-Produced Magnetized High Energy Density Plasmas

藤岡慎介, 松尾一輝, 佐野孝好, 長友英夫, 疇地宏, 兒玉了祐
S. Fujioka, K. Matsuo, T. Sano, H. Nagatomo, H. Azechi, R. Kodama

大阪大学レーザー科学研究所
Institute of Laser Engineering, Osaka University

イントロダクション

高強度レーザーを固体に照射すると、固体表面は急激に加熱され、希薄なプラズマとなり表面から吹き出す。この過程をアブレーションと呼ぶ。アブレーションの反作用で、固体プラズマは加速される。加速された固体プラズマ表面における圧力勾配と密度勾配は互いに逆向きになっており、流体力学的に不安定な状態である。レーザー生成プラズマ中では、固体表面の形状及び密度分布の不均一性が、レイリー・テイラー不安定性によって指数関数的に成長することが知られている。レイリー・テイラー不安定性を理解し、その抑制策を明らかにすることは、レーザー核融合の成功に不可欠であり、長年取り組まれてきた研究課題である。

長年の研究によって得られた最も重要な結論は、アブレーションを伴う不安定界面では、レイリー・テイラー不安定性の成長率が抑制されるということである。ターゲット表面の擾乱の凹凸を反映し、アブレーション・プラズマ中での熱流が不均一となり、熱流の不均一がレイリー・テイラー不安定性の抑制を起こす。言い換えると、アブレーション流を伴う不安定界面でのレイリー・テイラー不安定性においては、熱流・熱伝導が重要な働きを果たす。

研究目的

近年、レーザー核融合における点火を補助するために、レーザー核融合プラズマへの外部磁場の導入が注目されている[1, 2]。点火を補助するために必要な磁場強度は、100 - 2000 T と非常に強く、この磁場によってプラズマ中での電子熱伝導が変調を受けることが予測される。熱エネルギーを輸送する熱電子は、磁力線周りを周回運動するため、磁力線に沿った方向に流れやすく、磁力線を横切る方向には、流れ難い。結果として、電子熱伝導は磁場中で非等方になる。熱電子の衝突時間とサイクロトロン周波数の積で定義される、ホール係数によって、電子熱伝導の非等方性は定量化される。

本研究では、外部磁場を印加した状態で、ホールパラメーターがほぼ1のレーザー生成高エネルギー密度プラズマ中でのアブレイティブ・レイリー・テイラー不安定性の成長を観測し、磁場中での電気熱伝導の非等方性が、アブレイティブ・レイリー・テ

イラー不安定性の成長に与える影響を明らかにした。
研究手法

外部磁場の発生には、レーザー駆動キャパシター・コイル・ターゲット[3]を用いた。直径 500 μm のコイルを二つ平行に配置し、空間的に一様な 200 T の外部磁場を発生させた。予め正弦波の擾乱を表面に成形した波板状のポリスチレン・ターゲットを磁場中におき、その表面をレーザーで照射した。レイリー・テイラー不安定性による擾乱振幅の時間発展を、X線ラジオグラフィ法を用いて観測した。

観測した結果は、空間2次元の放射流体シミュレーションコード (PINOCO-2D) [4]と比較した。このコードは、外部磁場による熱伝導の非均一性が含まれている。実験結果とシミュレーション結果は極めて良い一致を示しており、シミュレーション結果をより詳細に解析にした。

結論

不安定界面に対して垂直なアブレーション流に加え、擾乱の成長に伴って、不安定界面に平行な方向の流れが生まれる。不安定界面に平行な方向のアブレーション流は、高い磁気レイノルズ数を持っており、外部磁場を圧縮又は膨脹させる。この外部磁場の圧縮と膨脹に伴って熱伝導の非等方性が空間的に非一様となり、結果として、アブレーションプラズマ中で、プラズマの温度 = 圧力を不均一になる[5]。その結果、擾乱のスパイクの部分では、アブレーションプラズマの圧力が小さくなり、固体プラズマのスパイクは希薄なアブレーションプラズマにより深く入り混む。バブルの部分では、アブレーションプラズマの圧力が強くなり、より大きな浮力を得て、高密度プラズマ中に侵入する。更にこの結果を説明するスケージングも得た。

参考文献

- [1] L. J. Perkins, et al., Phys. Plasmas **20**, 072708 (2013).
- [2] S. Sakata, et al., Nat. Commun. **9**, 3937 (2018).
- [3] S. Fujioka, et al., Sci. Rep. **3**, 1170 (2013).
- [4] H. Nagatomo et al., Nucl. Fusion **55**, 093028 (2015).
- [5] K. Matsuo et al., Phys. Rev. E., 95 053204 (2017).