

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18283

研究課題名(和文) レーザー核融合推進のための磁気ノズルにおけるプラズマ・磁場の挙動解析と最適化

研究課題名(英文) Analysis and optimization of plasma and magnetic field behavior in a magnetic nozzle for laser fusion propulsion

研究代表者

森田 太智 (Morita, Taichi)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：30726401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：将来の推進システムの有力候補のひとつであるレーザー核融合ロケットの推進原理として考えられている磁気スラストチャンバーについて、(1)プラズマの膨張とともに変化する磁場を可視化し、(2)プラズマの温度・密度・速度等のパラメータを局所的に計測することを目的に研究を行った。まず、磁場の可視化のためにXeイオンを用いたバックライト法のシステムを構築に成功し、動作検証を行ったが、レーザー生成プラズマに応用結果、レーザー作動時のノイズにより、実際の計測には至らなかった。また高い波長分解能を持つ分光器を作成してレーザートムソン散乱を行うことで、システム内の希薄プラズマの局所計測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Magnetic thrust chamber is one of the candidates of thrust system for laser fusion rocket. We performed experimental research (1) on visualization of magnetic field and (2) on the local plasma parameter measurement. First, we successfully developed ion backlight system with Xe ion source and applied it to a laser-produced plasma. In the experiment, however, the system did not work due to electromagnetic noise from large laser systems. In addition, we developed high-resolution spectrometer to measure the ion feature of Thomson scattering from a probe laser. We successfully measured local plasma parameters such as temperature, density, and drift velocity in relatively low density plasmas in a magnetic thrust chamber systems. The results suggested that the plasma was extracted from the magnetic nozzle, indicating the thrust system works as expected.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：磁気ノズル レーザー核融合ロケット レーザー生成プラズマ 高出力レーザー レーザー計測

## 1.研究開始当初の背景

将来の有人宇宙飛行では、放射線被曝の影響から飛行期間を短縮する必要があり、その有力な推進機の候補としてレーザー核融合推進がある。レーザー核融合推進は、核融合による出力を一部電力として取り出しつつ、さらに生成された高温・高密度プラズマから推力を得るというものであり、大推力・高比推力を両立し得るが、核融合・発電・プラズマ制御といった多くの研究、技術を必要とする。

核融合の研究はおもに米国、欧州、日本等で進められている。一方、核融合技術の応用である核融合磁気推進は、核融合用プラズマを磁場によって制御することで推力を得るが、推力を得るための磁気ノズルによるプラズマ制御は重要な課題であるにも関わらず、世界的に見てもほとんど研究が進んでいない。

我々はこの原理実証のため、大阪大学レーザーエネルギー学研究所の EUV データベースレーザー（小型レーザー，出力： $\sim 10$  J）と激光 XII 号（大型レーザー，出力：数 kJ）を用いて実験を行い、磁気ノズルによる推力の測定に世界で初めて成功している [A. Maeno et al. Appl. Phys. Lett. 17 122702 (2011)]。しかし磁場とプラズマの相互作用による磁場の变化、その時のプラズマ状態の変化など詳細な計測はできておらず、実験結果は数値計算とも大きな差異がある。

## 2.研究の目的

これまでの研究では、プラズマの膨張の様子を、遠方に置いたチャージコレクタを用いて計測してきた。一方、輻射流体計算、およびハイブリッド（電子を流体、イオンを粒子とする）計算によるプラズマ膨張の解析は、実験結果と大きなずれがある。この原因として、[1] プラズマ生成場所から遠方で計測しているため、イオンの再結合によりイオン密度が減少している可能性、また、[2] 実験による数値計算の検証ができていないため、数値計算の実験再現性に問題があ

る可能性が考えられる。そこで本研究では遠方でのイオン計測ではなく、磁場と相互作用するプラズマ、および磁場をその場で計測し、数値計算と直接比較する。さらに数値計算とレーザー実験によって、推力を得る上で最適な磁場構造を求める。そのため、本研究において以下を明らかにする。

- ・ 磁場と相互作用するプラズマの温度・密度・速度の空間・時間分布
- ・ プラズマ中の磁場構造の空間・時間分布
- ・ 数値計算による実験の再現性を検証する
- ・ 必要に応じて、実験データを再現できるように数値計算コードの改良を行う。

## 3.研究の方法

本研究では、核融合磁気推進で用いられる磁気ノズル中において、磁場と相互作用する局所場におけるプラズマの温度・密度・速度を計測し、さらにその場での磁場構造を可視化する。それによって現在得られている実験・数値計算の違いを検証する。更に数値計算を用いて磁気ノズルの最適化を目指す。具体的には以下の計画で研究を行う。

- ・ レーザー生成プラズマの局所的計測のためのレーザートムソン散乱法の準備
- ・ 陽子・イオンビームを用いた磁場測定システムの準備・構築
- ・ 大型・小型レーザーを用いた磁場・プラズマ計測実験

## 4.研究成果

本研究の目的は、将来の推進システムの有力候補のひとつであるレーザー核融合ロケットの推進原理として考えられている磁気プラズマ推進システムについて、その動作原理とエネルギースケール則を構築するため、(1) プラズマの膨張とともに変化する磁場を可視化し、(2) プラズマの温度・密度・速度等のパラメータを局所的に計測することであった。まず平成 27 年度には、(1) の磁場計測

において、イオンエンジンが出力する Xe+イオン計測のためのアレイ状に配置したチャージコレクタとその計測システムを構築した。またイオンエンジンからのイオンのみを検出するため、初期の時間に計測器に到達するレーザー生成プラズマをチャージコレクタに印加する電圧で排除し、パルス状に電圧を印加するシステムを構築した。これらは九州大学で予備実験を行った後、大阪大学で実験を行った。しかし、レーザー照射時のノイズの影響によって電圧印加システムが正常動作せず、イオン計測までは至らなかった。(2)については、新たに高波長分解能の分光器を作成してレーザートムソン散乱計測を行い、局所的なプラズマパラメータ計測に成功した。その結果、磁場の有無によって温度・密度に大きな違いはなかったが、プラズマ流速に明らかな違いを計測した。この結果は、磁気スラストチャンバー内の比較的低密度なプラズマでの計測も可能であることを示すと同時に、磁場によるプラズマの排出が機能していることを示している。また、平成 28 年度には、これまでに行っていた輻射流体シミュレーションによるレーザーアブレーションプラズマ生成過程と、その後の長時間計算を行うハイブリッド計算のカップリングを改善し、これまでに実験との大きな差異があった、イオン分布を 2 桁以上改善することに成功した。また、さらなる改善を目指し、輻射流体計算に代わって外部磁場を考慮した輻射磁気流体計算を行い、レーザープラズマ生成過程までの計算を行うことができた。

さらに上記の研究に加えて、排出プラズマの方向を制御するための新たな試みとして、複数コイルを組み合わせた磁気ノズルを作成し、プラズマ排出方向の制御実験を行った。駆動コイル数と電流を制御することで、プラズマ排出方向の制御が可能であることを実験的に示した。さらに同システムの数値計算も行い、実験で得られたプラズマ構造の再現に成功した。本結果は現在論文投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件, すべて査読有り)

1. T. Morita, N Yamamoto, R Kawashima, N Saito, M Edamoto, S Fujioka, Y Itadani, T Johzaki, S Miura, Y Mori, H Nishimura, A Sunahara, A Yogo, H Nakashima, “Plasma structure and energy dependence in a magnetic thrust chamber system”, Journal of Physics: Conference Series 717 012071 (2016), doi:10.1088/1742-6596/717/1/012071

2. Ryosuke Kawashima, Taichi Morita, Naoji Yamamoto, Naoya Saito, Shinsuke Fujioka, Hiroaki Nishimura, Hiraku Matsukuma, Atsushi Sunahara, Yoshitaka Mori, Tomoyuki Johzaki, Hideki Nakashima, “The Measurement of Plasma Structure in a Magnetic Thrust Chamber”, Plasma and Fusion Research 11, 3406012 (2016), DOI: 10.1585/pfr.11.3406012

[学会発表](計 7 件)

1. 森田太智, 山本直嗣, 齋藤直哉, 枝本雅史, 三浦智之, 板谷佑太郎, 砂原淳, 長友英夫, 藤岡慎介, 城崎知至, 森芳孝, 余語覚文, 西村博明, 中島秀紀, “レーザー核融合推進にむけたモデル実験におけるレーザー生成プラズマの制御とプラズマ計測”, 日本物理学会, 大阪大学(大阪府豊中市), 2017年3月18日

2. 森田太智, 山本直嗣, 齋藤直哉, 枝本雅史, 三浦智之, 板谷佑太郎, 児島富彦, 砂原淳, 藤岡慎介, 長友英夫, 城崎知至, 森芳孝, 余語覚文, 西村博明, 中島秀紀, “磁気スラストチャンバーによるプ

ラズマ排出制御の実験的検証” , 日本物理学会, 金沢大学(石川県金沢市), 2016年9月14日

3. 森田太智, 山本直嗣, 齋藤直哉, 川島諒祐, 枝本雅史, 三浦智之, 板谷佑太郎, 砂原淳, 藤岡慎介, 城崎知至, 森芳孝, 余語覚文, 西村博明, 中島秀紀, “磁気ノズルにおける推力発生の原理実証実験” , 日本物理学会, 東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市), 2016年3月22日

4. 山本直嗣, 齋藤直哉, 森田太智, 中島秀紀, 藤岡慎介, 余語覚文, 西村博明, 森芳孝, 砂原淳, 城崎知至, “レーザー核融合ロケット推進の基礎研究” , レーザー学会(招待講演), 名城大学天白キャンパス(愛知県名古屋市), 2016年1月10日

5. 川島諒祐, 山本直嗣, 森田太智, 齋藤直哉, 枝本雅史, 三浦智之, 板谷佑太郎, 中島秀紀, 藤岡慎介, 余語覚文, 松隈啓, 西村博明, 砂原淳, 城崎知至, 森芳孝, “磁気スラストチャンバーにおけるプラズマの振る舞いに関する実験” , プラズマ・核融合学会, 名古屋大学東山キャンパス(愛知県名古屋市), 2015年11月26日

6. T. Morita, N. Yamamoto, R. Kawashima, N. Saito, M. Edamoto, S. Fujioka, Y. Itadani, T. Johzaki, S. Miura, Y. Mori, H. Nishimura, A. Sunahara, A. Yogo, and H. Nakashima, “Model Experiment of a Magnetic Thrust Chamber System for Laser Fusion Rocket”, International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2015)(国際会議), Hyatt Regency Bellevue on Seattle's Eastside (Seattle, WA, USA), 2015年9月22日

7. 森田太智, 山本直嗣, 齋藤直哉, 藤岡慎介, 城崎知至, 川島諒祐, 森芳孝, 西村博明, 砂原淳, 余語覚文, 中島秀紀, “大型レーザー生成プラズマを用いた磁気ノズルに

よる推進システムの模擬実験” , 日本物理学会, 関西大学(大阪府吹田市), 2015年9月18日

[その他]

ホームページ等

[http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/laser\\_fusion.html](http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/laser_fusion.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森田 太智 (MORITA, Taichi)

九州大学大学院・総合理工学研究院・助教

研究者番号: 30726401

### (4) 研究協力者

山本 直嗣 (YAMAMOTO, Naoji)

藤岡 慎介 (FUJIOKA, Shinsuke)

森 芳孝 (MORI, Yoshitaka)

砂原 淳 (SUNAHARA, Atsushi)

城崎 知至 (JOHZAKI, Tomonori)

梶村 好宏 (KAJIMURA, Yoshihiro)

長友 英夫 (NAGATOMO, Hideo)