

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14876

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システムの数値計算および実験的検証

研究課題名（英文）Numerical and experimental investigation on 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー照射によって高エネルギープラズマを生成し、外部から強磁場を印加することで本推進システムの動作原理を調べた。遠方下流にイオンコレクタを複数配置して排出されるプラズマの計測に成功した。また磁気ノズル内のプラズマの温度・密度・速度等を精度よく計測可能であることを示すと同時に、磁気ノズル内におけるプラズマ減速、加速を検出することに成功した。また複数コイルを組み合わせたパルス駆動磁場発生装置を開発し、レーザー生成プラズマの排出方向を変更することに成功した。さらにプラズマ生成過程と外部磁場によるプラズマ排出過程を数値計算によって再現し、排出方向と推進効率との関係を明らかにすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー核融合に関する研究は米国、欧州、日本が中心となって行われているが、その応用に関する研究はほとんど行われていない。本研究の実験手法と開発した数値計算により、実機を想定した高エネルギー核融合プラズマ実験までのスケールアップを構築できる。

また、高温・高密度プラズマと磁場の相互作用は、普遍的な現象であるにも関わらず、未解決な問題も多く応用分野も広い。例えばレーザー核融合研究における加熱効率の上昇や、太陽プラズマと磁場の相互作用（磁気リコネクション）によるフレアなど我々の生活に大きな影響を与えるプラズマ物理の研究である。このように本研究は、宇宙推進だけでなく多くの分野への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We demonstrated the extraction of a laser-produced plasma from a magnetic nozzle. The extracted ions were measured with multiple ion collectors located downstream of the system far from the original position.

In addition, the plasma in the magnetic nozzle was successfully measured precisely. This measurement showed that the expanding plasma was decelerated and accelerated by the magnetic field.

Moreover, we demonstrated the thrust vector control by using multiple-coil magnetic nozzle via extracting the laser-produced plasma. We calculated the plasma dynamics with numerical simulations and compared it with the plasma structure observed in the experiment. Also, the calculation indicated that there is a correlation between the thrust vector and the thrust efficiency.

研究分野：プラズマ物理、プラズマ理工学

キーワード：レーザー核融合推進 レーザー生成プラズマ レーザートムソン散乱 プラズマシミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現在、国際宇宙ステーション計画の次のステップとして小惑星、月、火星等への有人宇宙飛行が各国で真剣に考えられている。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。これは、核融合による出力を一部電力として取り出しつつ、生成された高温・高密度プラズマから推力を得るシステムであり、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。レーザー核融合は、例えば米国ローレンスリバモア国立研究所において、ターゲット吸収エネルギー以上の核融合出力を得ることに成功するなど、着実に進展しつつある。一方その応用である核融合推進は、核融合プラズマを磁気ノズルによって制御することで推力を得るが、このシステムの原理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。

2. 研究の目的

レーザー核融合磁気推進では核融合で生じる高温・高密度プラズマを磁場により排出し（磁気ノズル）推力を得る。我々はレーザー生成プラズマを用いたモデル実験で磁気ノズルによる推力発生を確認し、ノズル内のプラズマ密度・温度・流速など、数値計算と比較し得るデータ取得に成功した。本研究では、これらの成果を発展させ、より具体的なシステムの動作実証を行う。①輻射磁気流体計算による磁気ノズル内プラズマの定量的再現、②推進効率向上のための燃料ターゲットや磁場形状の最適化と③実機で必要となる方向ベクトル制御のための磁気ノズル形状を明らかにする。さらにエネルギーに対するスケール則を明らかにすることで核融合プラズマ実験に向けた磁気ノズルの設計へと発展させる。

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ける、プラズマ状態を再現する数値計算コードを開発し、実験で得られる推力・プラズマ状態を定量的に再現し、推進効率向上のための最適なターゲット形状と磁場形状を数値計算・実験両面から求める。さらに磁気ノズルの応用として、推力方向制御が（他の特別な補助推進機を用いず）システム単体で可能であることを実験的に示す。

- (1) 輻射磁気流体計算による磁気ノズル内のプラズマ挙動計算（平成 29 年度）
- (2) 推進効率向上に向けた実験および推力ベクトル方向制御実験（平成 29-30 年度）
- (3) 数値計算・実験による推進効率の最適化・エネルギースケール則の構築（平成 30 年度）

4. 研究成果

レーザー照射によって高エネルギープラズマを生成し、外部から強磁場を印加することで本推進システムの動作原理を調べた。典型的なプラズマサイズは 10 mm 程度であるが、それより遠方 150 mm 下流にイオンコレクタを複数配置し、排出されるプラズマを計測した。磁場強度を変更することで、排出されるプラズマ（イオン）の空間・時間分布に違いが表れることを明らかにし、数値シミュレーションと比較することで、確かに磁気ノズルとして動作していることを確認した[論文 2]。本研究では、高エネルギーレーザー動作時に発生する強い電磁ノイズ下でも安定して動作する磁場発生装置が必要である。また、外部機関で共同研究を行うため、持ち運び可能である必要もある。そこで我々はこれら条件を満たす数テスラの強磁場発生装置を開発した[論文 1]。

研究方法(2)で述べた推力ベクトル制御に関して、複数コイルを組み合わせたパルス駆動磁場発生装置を開発し、レーザー生成プラズマの排出方向を変更することに成功した。さらにプラズマの挙動を詳しく解析するため、レーザーアブレーション過程と外部磁場によるプラズマ排出過程を数値シミュレーションによって再現した。プラズマ生成過程はレーザー吸収と放射を考慮した輻射流体計算で、その後のプラズマ膨張と磁場によるプラズマ排出過程は、電子を慣性を無視した電磁流体、イオンを超粒子として扱う三次元ハイブリッド計算で行った。この結果、実験で得られたプラズマ密度構造をよく再現し、排出方向と推進効率との関係を明らかにすることに成功した[論文 4]。

磁気ノズルによるプラズマ排出と排出方向の制御は実証できたが、プラズマ状態が推力にどう影響するのか、を明らかにするには、プラズマの温度・密度・速度等を精度よく計測する必要がある。そこで、磁気ノズル内のプラズマに対してレーザートムソン散乱計測を行い、詳細なパラメータ計測が可能であることを示すと同時に、磁気ノズル内におけるプラズマ減速、加速を検出することに成功した[論文 3]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文]（計 4 件）

1. Masafumi Edamoto, Taichi Morita, Naoya Saito, Yutaro Itadani, Satoshi Miura, Shinsuke Fujioka, Hideki Nakashima, Naoji Yamamoto, Portable and noise-tolerant magnetic field generation system, Review of Scientific Instruments, 89, 094706, 2018.09.
2. Naoya Saito, Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Masafumi Edamoto, Hideki Nakashima,

- Shinsuke Fujioka, Akifumi Yogo, Hiroaki Nishimura, Atsushi Sunahara, Yoshitaka Mori, Tomoyuki Johzaki, Experimental demonstration of ion extraction from magnetic thrust chamber for laser fusion rocket, Japanese Journal of Applied Physics, 57, 50303, 2018. 03.
3. Yutaro Itadani, Taichi Morita, Naoya Saito, Masahumi Edamoto, Tomihiko Kojima, Mariko Takagi, Sinsuke Fujioka, Akifumi Yogo, Hiroaki Nishimura, Hideo Nagatomo, Atushi Sunahara, Yoshitaka Mori, Tomoyuki Johzaki, Hideki Nakashima, Naoji Yamamoto, Thomson scattering measurement of laser-produced plasma in a magnetic thrust chamber, Plasma fusion Research, 13, 1306016, 2018. 03.
 4. Taichi Morita, Masafumi Edamoto, Satoshi Miura, Atsushi Sunahara, Naoya Saito, Yutaro Itadani, Tomihiko Kojima, Yoshitaka Mori, Tomoyuki Johzaki, Yoshihiro Kajimura, Shinsuke Fujioka, Akifumi Yogo, Hiroaki Nishimura, Hideki Nakashima, and Naoji Yamamoto, Control of unsteady laser-produced plasma-flow with a multiple-coil magnetic nozzle, Scientific Reports, 7, 8910, 2017. 08

〔学会発表〕（計 7 件）

1. 山村徹, 枝本雅史, 森田太智, 砂原淳, 藤岡慎介, 城崎知至, 山本直嗣, 中島秀紀, レーザー核融合ロケットにおける円錐形ターゲットの数値解析, 宇宙輸送シンポジウム, 2019. 01. 18.
2. 枝本雅史, 齋藤直哉, 森田太智, 児島富彦, 高木麻理子, 中島秀紀, 砂原淳, 藤岡慎介, 西村博明, 余語覚文, 梶村好宏, 森芳孝, 城崎知至, 山本直嗣, 準定常磁気ノズルを用いたレーザー生成プラズマの制御および推力発生機構の実証, 宇宙科学技術連合講演会, 2018. 10. 26
3. 中島秀紀, 森田太智, 山本直嗣, p-11B 核融合反応を利用する宇宙船の設計研究－20日 で火 星まで－, 宇宙科学技術連合講演会, 2018. 10. 26
4. 児島富彦, 森田太智, 諫山翔伍, 高木麻理子, 山本直嗣, 磁気ノズルにおけるプラズマデ タッチメントの数値解析, 宇宙科学技術連合講演会, 2018. 10. 24.
5. 森田太智, レーザープラズマ磁気推進発生, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2018, 2018. 05.
6. Taichi Morita, Naoji Yamamoto, Naoya Saito, Masafumi Edamoto, Yutaro Itadani, Tomihiko Kojima, Atsushi Sunahara, Hideo Nagatomo, Shinsuke Fujioka, Tomoyuki Johzaki, Yoshitaka Mori, Mariko Takagi, Keisuke Nagashima, Akifumi Yogo, Hiroaki Nishimura, Hideki Nakashima, Plasma extraction and control technique for laser fusion propulsion, Plasma Conference 2017, 2017. 11.
7. Taichi Morita, Satoshi Miura, Hideo Nagatomo, Atsushi Sunahara, Tomohiko Kojima, Naoya Saito, Yutaro Itadani, Yoshitaka Mori, Tomoyuki Johzaki, Akifumi Yogo, Hiroaki Nishimura, Shinsuke Fujioka, Hideki Nakashima, Naoji Yamamoto, Experimental and Numerical Investigation of Thrust Generation and Vector Control with a Magnetic Thrust Chamber, International Symposium on Space Technology and Science(ISTS), 2017. 06.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。