



小特集 レーザー核融合ロケットの原理実証研究

6. 模擬実験による推進性能評価

6. Propulsion Performance Evaluation through Simulation Experiments

枝本 雅史

EDAMOTO Masafumi

岐阜工業高等専門学校 電子制御工学科

(原稿受付：2021年6月21日)

レーザー核融合ロケットの実機では、数メガジュールの出力エネルギーをもつレーザーによって生成される核融合プラズマの使用が想定されている。しかし、現状ではエネルギー源として核融合プラズマを用いた実験は不可能である。模擬実験として、共同利用施設で実験可能な数ジュールから数キロジュールのレーザーを用いてアブレーションプラズマによる実験が行われた。実験によるプラズマおよび力積の計測や、シミュレーションの再現性検証について紹介する。

Keywords:

laser ablation plasma, magnetic nozzle, plasma measurement, thrust measurement

6.1 はじめに

レーザー核融合ロケットの実機運用においては、数メガジュールの大型レーザーを用いて核融合プラズマを生成することが想定されている[1]。この核融合プラズマによって加熱・プラズマ化された推進剤が磁気スラストチャンバーと呼ばれる磁気ノズルシステムで制御され、所定の方向への推力を生成する[2]。一方で、現在の技術水準においては、エネルギー源としての核融合プラズマは実現しておらず、核融合プラズマによる実証実験を行うことは不可能である。

そこで、レーザー核融合ロケットの推進原理実証を目的として、レーザーアブレーションプラズマと永久磁石、もしくは常伝導磁石を用いた模擬実験が行われた。模擬実験では、広島大学レーザー実験装置を用いた1J程度の実験、大阪大学 EUV データベースレーザー装置を用いた数ジュール級の実験、大阪大学激光 XII 号レーザーを用いたキロジュール級の実験と、幅広いエネルギースケールでの実証および推進性能評価が試みられた。

この章では、レーザーアブレーションプラズマを用いた実験を通して得られた、磁気スラストチャンバーの実証および推進性能評価に関する知見を紹介する。

6.2 磁場によるプラズマ制御実証のためのイオン計測

レーザーアブレーションにより生成されたプラズマが磁場によって制御され方向を変えることを実証するために、斎藤他 (2018) によってチャージコレクタによるイオン電流計測が行われた[3]。

図1に計測が行われた実験体系を示す。この実験は大阪

大学 EUV データベースレーザー装置を用いて行われた。真空チャンバ中心に設置された直径0.5 mm のポリスチレン球ターゲットに対して、波長1064 nm, エネルギー 7.5 ± 0.2 J, パルス幅 9.4 ± 0.1 ns の Nd:YAG レーザーが照射され、アブレーションプラズマが生成された。ターゲットから見てレーザー上流方向13 mm の位置にソレノイドコイルが設置され、レーザー照射タイミングに合わせたミリ秒スケールのパルス磁場が生成された。これは数マイクロ秒程度であるアブレーションプラズマの時間スケールに比べ十分に長く、準定常磁場とみなせるものである。ソレノイドコイルの軸を基準とした複数の角度にチャージコレクタが設置され、イオン電流の角度分布が計測された。

この実験体系において、アブレーションプラズマの初期速度はレーザー上流方向に向くため、磁場と相互作用しない場合にはプラズマはコイルに向かう方向の速度を持つ。一方、磁場とプラズマが相互作用した場合には、プラズマ

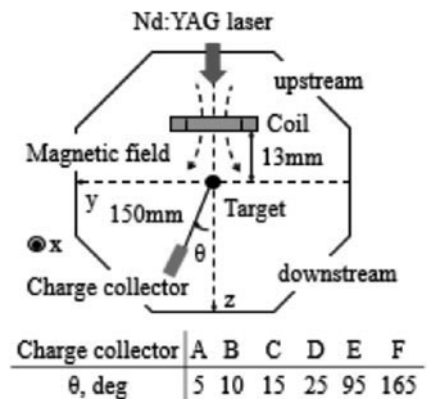


図1 イオン電流計測実験における実験体系[3]。

図1に計測が行われた実験体系を示す。この実験は大阪 National Institute of Technology, Gifu College, Motosu, GIFU 501-0495, Japan

author's e-mail: edamoto@gifu-nct.ac.jp

表面に生成される反磁性電流と磁場によるローレンツ力が働き、プラズマは下流方向に加速される。

図2は、コイル軸に近い低角度域である5°地点におけるイオン電流について、ターゲット中心位置での磁場強度が0 Tの場合と1.1 Tの場合を比較した図である。0 Tの場合に比べ、1.1 Tの場合では大きなイオン電流が計測された。これはアブレーションプラズマが磁場によって方向を変え、また、磁気ノズル効果により低角度域に収束したものと考えられる。この実験により、磁場によるアブレーションプラズマの制御が可能であると証明され、磁場強度と下流域でのプラズマ流角度分布の関係が示された。

6.3 推力計測

レーザー核融合ロケットの推進原理である磁気スラストチャンバーによって推力が得られることを実証するため、また、投入エネルギーと推力の関係を明らかにするために、複数のエネルギースケールで推力計測実験が行われた。磁場発生源として永久磁石を用いる場合は、磁石に働く推力の直接計測が可能であったが、電磁石を用いる場合はコイル自体の振動が大きく、推力の直接計測は困難であった。永久磁石を用いた実験と、電磁石を用いた実験について、それぞれ紹介する。

6.3.1 磁気ノズル生成に永久磁石を用いた場合の推力計測

永久磁石による磁場と、レーザーアブレーションプラズマの相互作用によって発生する推力を計測するため、大阪大学 EUV データベースレーザー装置において、前野他(2011)によって推力計測実験が行われた[4]。マイクロニュートン級の力積を計測するために、図3左に示す逆振り子型の推力計測装置が開発された。ナイフエッジで支持された振り子の最上部に永久磁石が設置され、重心調整のためのカウンターウェイトおよびオイルダンパーが下部に設置される構造である。磁石にプラズマやデブリが直接衝突することによる力積の発生を防ぐため、コイル前方にはシールドが設置された。振り子の揺れはLED変位計で計測され、図3右に示す感度特性を示した。

磁場生成に棒磁石を用いたため、ソレノイドコイルのように磁石の軸上をレーザーが通過することはできず、棒磁

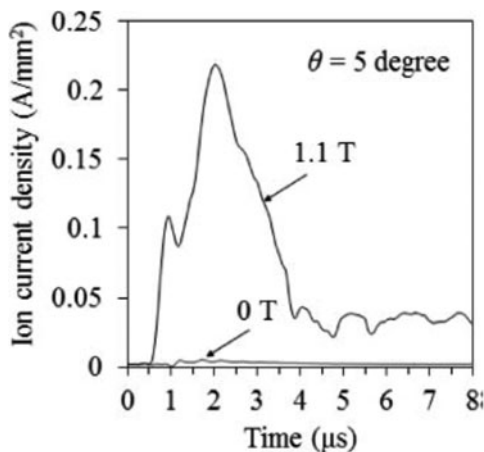


図2 ソレノイドコイル軸から5°の地点におけるイオン電流の時間変化[3]。

石の中心軸に対して斜め45°からレーザーが照射された。計測が行われた実験体系を図4に示す。波長1064 nm、エネルギー0.5–1.5 J、パルス幅3.9 nsのNd:YAGレーザーを真空チャンバ内に導入し、直径0.5 mmのポリスチレン球に照射することでプラズマが生成された。

実験により計測された推力特性を図5に示す。エラーバー付きの点で示されたデータはレーザーのパルス幅が3 nsの場合に0.5–0.8 J、9 nsの場合に0.7–1.5 Jのエネルギーを照射した際の力積を示す。線で示されたデータは、力積がプラズマ質量とイオン音速の積で決定され、全てのプラズマが磁場により方向を変え、推力を生成したと仮定した場合の理論値である。レーザーのパルス幅が長い場合に力積が大きくなっており、理論値と一致する傾向を示している。この結果より、磁気スラストチャンバーによる推力生成が実証された。

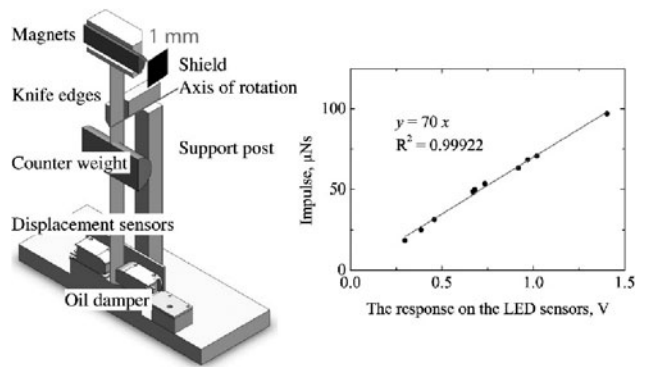


図3 逆振り子式推力計測装置およびその校正値[4]。

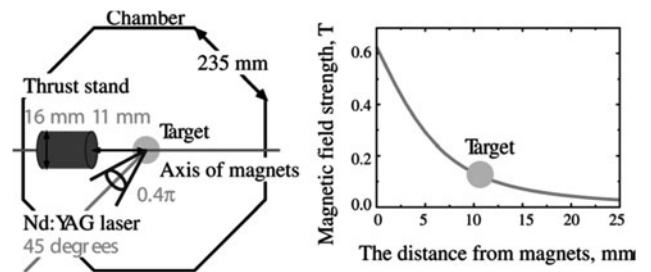


図4 磁場生成に永久磁石を用いた推力計測実験における実験体系[4]。

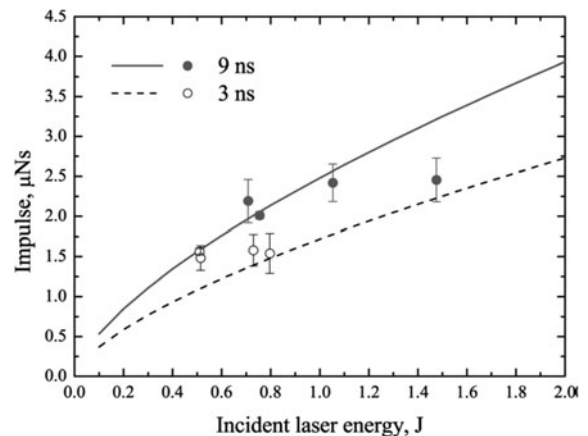


図5 磁場生成に永久磁石を用いた推力計測実験におけるレーザーパラメータと力積の関係[4]。

さらに、大阪大学激光 XII 号を用いた数十ジュールから数百ジュールのエネルギー域での推力計測も行われた [5]。ここでは、力積のレーザー波長依存性についても調査された。激光 XII 号の基本波である 1053 nm に対し、基本波、二倍高調波、三倍高調波の波長で実験が行われた。図 6 の直線は力積の理論値を示し、マーカーは計測値を示す。理論値は、アブレーションにより生成されたプラズマが全て磁場により方向を変え、推力を生成したものととして計算された。また、力積はプラズマ量とイオン音速の積として計算された。絶対値としては、理論値と計測値の間に数倍程度の差があるが、双方において、照射するレーザーの波長が短く、かつエネルギーが大きいくほど、力積が増加する傾向を示した。

これらの結果より、大きな力積を得るためには、短い波長の高エネルギーレーザーを、長いパルス幅で照射することが望ましいと示された。

6.3.2 磁気ノズル生成に電磁石を用いた場合の推力計測

磁場生成に永久磁石を用いた場合、定常磁場の生成が可能であり、磁石自体が振動しないという利点がある。一方で、プラズマのエネルギーを大きくした際には、磁場エネルギーが相対的に小さくなり、十分にプラズマを制御することができない。そのため、模擬実験においても数 J 以上のレーザー照射でプラズマを生成する際には、電磁石を用いた高エネルギー磁場の生成が求められる。また、電磁石の場合には駆動電流によって磁場強度を制御可能であるため、複数の磁場パラメータで実験を行うことが可能となる。実機においては超伝導磁石を用いた磁場生成が想定されているため、実機の運用条件により近い条件であるとみることがもできる。

磁場生成に電磁石を用いた推力計測実験が蔵本他 (2021) によって行われた [6]。実験は広島大学レーザー実験装置の Nd:YAG レーザーを用いて行われた。磁場生成に伴う電磁石自体の振動と、推力による振動を分離するため、スラストターゲットを用いて間接的に推力が計測された。

実験体系を図 7 に示す。ターゲットとなる直径 0.5 mm のカーボンロッドを中心として、レーザー上流側 10 mm

(コイルのターゲット側端面) にソレノイドコイル、下流側 10 mm にスラストターゲットが設置された。波長 1064 nm, エネルギー 2.3 J, パルス幅 3 ns の Nd:YAG レーザーをカーボンロッド先端に照射することでアブレーションプラズマが生成され、同時にキャパシタバンク [7] によって駆動されるソレノイドコイルを用いてサブミリ秒程度の準定常磁場が生成された。磁場によって方向を変えたプラズマが推力に寄与するため、下流方向に到来したプラズマがアクリル製スラストターゲットに衝突した際の力積を計測した。レーザー変位計によってスラストターゲットの変位量が計測され、既知の力積による校正曲線との比較によって計測値が算出される。

プラズマエネルギー E_p に対する磁場エネルギー E_b の比と、スラストターゲットにより計測された力積の関係を図 8 に示す。永久磁石を用いた EUV データベースレーザー装置での実験に比べ、レーザーエネルギーは数倍程度であったが、計測された力積は数十倍の値を示している。プラズマエネルギーに対する磁場エネルギーの増加にしたがって、計測された力積の値も増加しており、プラズマと磁場の相互作用によって推力が生成されたものと考えられる。アブレーションプラズマの質量や速度がレーザーおよびターゲットのみで決定されると考えた場合、磁場エネルギーの増加に伴う推力の増大は一定程度で飽和すると考えられるが、この実験においては線形に近い関係を示した。磁場エネルギーをさらに増加させることによって、力積の増大が可能であると考えられる。

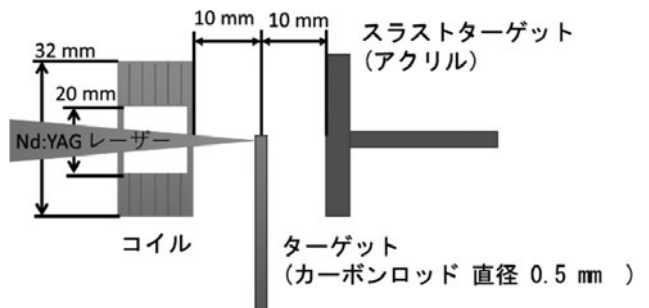


図 7 磁場生成に電磁石を用いた推力計測実験における実験体系 [6]。

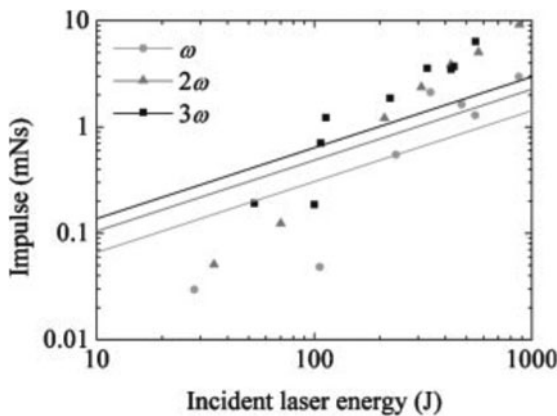


図 6 磁場生成に永久磁石を用いた推力計測実験における力積の波長およびエネルギー依存性 [5]。

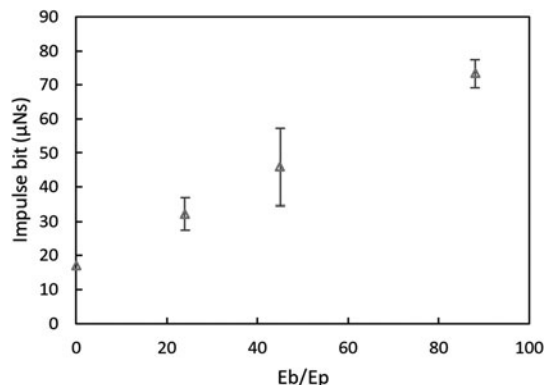


図 8 磁場生成に電磁石を用いた推力計測実験における磁場エネルギー/プラズマエネルギーと力積の関係 [6]。

6.4 プラズマパラメータの非接触計測

磁気スラストチャンバー内でのプラズマ構造を計測するために、川島他 (2016) による自発光計測[8]や、森田他 (2016) による干渉計測[9]が行われた。また、プラズマ温度および密度を計測するために、板谷他 (2018) によってプラズマのトムソン散乱計測が行われた[10]。ここでは、干渉計測によって計測された磁気スラストチャンバー内でのプラズマ構造について述べる。

図9に実験体系を示す。これまでに紹介した電磁石を用いた実験と同様に、ソレノイドコイルの中をレーザーが通過し、直径0.5mmのポリスチレンターゲットに照射される。ターゲットからレーザー上流方向に18mm(コイル軸方向の中心)の位置にソレノイドコイルが設置された。EUVデータベースレーザー装置と激光XII号の双方で実験が行われた。EUVデータベースレーザー装置での実験においては、レーザーエネルギー約6J、パルス幅約9ns、ターゲット位置での磁場強度0.2T、磁場エネルギー8.2Jであった。激光XII号での実験においては、レーザーエネルギー約600J、パルス幅約1.3ns、ターゲット位置での磁場強度1.1T、磁場エネルギー190Jであった。

図10に、干渉計測結果から得られた密度構造を示す。レーザー照射タイミングから200ns後の構造であり、初期のターゲット中心位置を $(z, r) = (0, 0)$ と定義する。レーザー上流方向が z 軸マイナス、下流方向が z 軸プラスである。 z 軸に対称な構造であると仮定した逆アーベル変換によって、干渉計測の位相変化から密度が算出された。図10

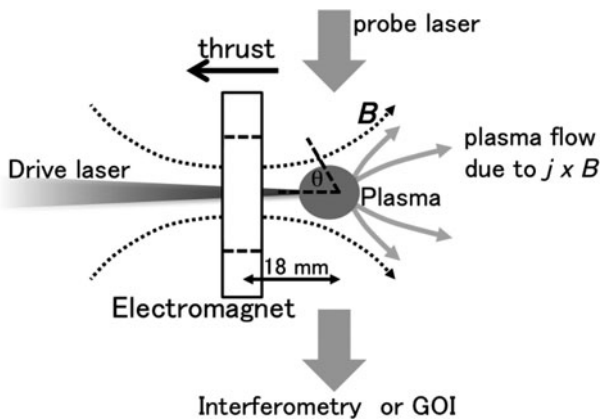


図9 干渉計測を用いたプラズマ密度構造計測における実験体系[9].

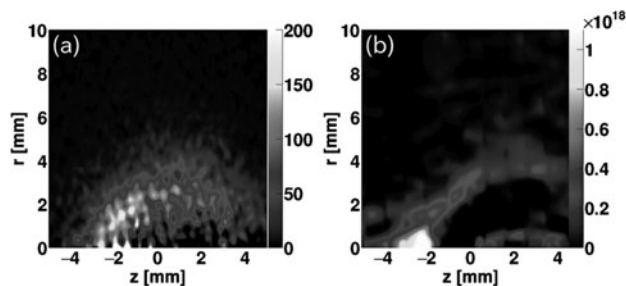


図10 干渉計測を用いたプラズマ密度構造計測結果：(a)レーザーエネルギー約6J、磁場エネルギー8.2J (b)：レーザーエネルギー約600J、磁場エネルギー190J[9].

(a)はEUV実験の結果を示し、カラーバーの単位は相対値である。図10(b)は激光XII号実験の結果を示し、カラーバーの単位は cm^{-3} である。どちらの実験においても、プラズマがシェル状の構造を形成した。これは外部磁場を圧縮する方向にプラズマが膨張し、プラズマの圧力と、圧縮された磁場圧が均衡する領域においてプラズマがせき止められたことで、高密度な領域が形成されたものと考えられる。

入射レーザーエネルギーが100倍増加した場合においても、磁場エネルギーを23倍程度増加させることによって、類似したプラズマ構造が形成されることが明らかとなった。これはプラズマ構造がレーザーエネルギー(プラズマエネルギー)と磁場エネルギーの比によって決定されることを示唆する。すなわち、核融合反応をエネルギー源として生成される高エネルギープラズマの挙動を予測するにあたり、レーザーアブレーションプラズマを用いた比較的低エネルギーでの実験が有用であると示された。

ただし、実験において類似した構造が見られた場合の入射レーザーエネルギーと磁場エネルギーの変化率は1:1ではなかった。線形な関係ではないと考えられ、レーザーエネルギーの吸収率も含めた、より詳細な検証が必要である。

6.5 シミュレーションと実験の比較検証

第5章で述べられたシミュレーション手法の妥当性について検証するために、町田他 (2020) によって、実験結果との比較が行われた[11]。実験データには6.3.2で述べた、広島大学レーザー実験装置において行われた推力計測実験の結果を用いた。シミュレーションでは実験と同等の初期パラメータで計算が行われた。

図11に、力積についての実験とシミュレーションの比較を示す。 v_{cut} は、輻射流体コードからハイブリッドコードへデータを受け渡す際に行われる低速領域除去の基準値である。 $v_{\text{cut}} : 5 \text{ km/s}$ の場合、5 km/s以下の領域が除去されたことを示す。横軸 r_E は磁場エネルギーをプラズマエネルギーで割った値であり、0は磁場を印加していないことを示す。比較結果としては、全ての r_E 値において実験がシ

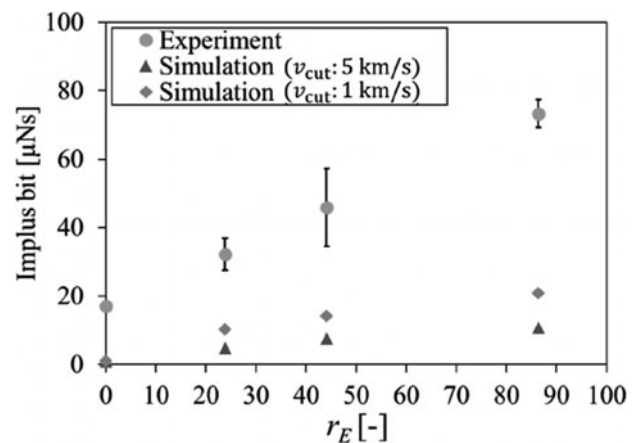


図11 同一条件でのシミュレーションと実験における力積の比較[6].

ミュレーションを大きく上回った。この差の要因としては、シミュレーション側の原因と実験側の原因の両面から複数の可能性が指摘された。

シミュレーション側の原因としては、輻射流体コードからハイブリッドコードへ受け渡す際に、低速領域のプラズマおよび全ての熱エネルギーが失われている点が考えられる。低速領域のプラズマについては、ハイブリッドコードでの計算コストの制約上、扱える超粒子が 10^7 個程度となっていることに由来する。中実球や中実ロッドのターゲットを用いた場合、ターゲット中心部の高密度・低速領域と、アブレーションプラズマの低密度・高速領域が同時に存在する。そのため、均等に超粒子を割り振った場合に中心部にのみ超粒子が配置され、周辺のアブレーションプラズマが無視される。これを回避するために低速領域を無視し、高速領域のみに焦点を当てたが、 v_{cut} の値を小さくすると計算される力積の値が増加することが示された。熱エネルギーについては、ハイブリッドコードにおいて温度を無視した計算となっていることによるものである。輻射流体コードからハイブリッドコードへの受け渡し時において、プラズマの全エネルギーのうち約4割を熱エネルギーが占めており、このエネルギーロスによって最終的な力積が過小評価されている可能性がある。

これらの問題を解決するために、重みの異なる複数種の超粒子を用いることが提案された。プラズマは膨張に伴い密度が低下すると考えられるため、計算途中での超粒子の分裂を含めた柔軟な超粒子配置が実現すれば、より忠実にプラズマを再現できる可能性がある。また、熱エネルギーの問題については、プラズマが十分に冷えるまで輻射流体コードで計算する方法と、ハイブリッドコードに温度を導入する方法が考えられる。現状の計算コストから考えると、輻射流体コードでマイクロ秒の計算を行うことは現実的でなく、ハイブリッドコードに温度を導入することが望ましいと考えられる。

また、輻射流体コードがオイラーコードであることに由来する問題として、背景ガスによるプラズマの減速があげられる。実験では周囲圧力は十分に低いが、輻射流体コードではターゲット初期密度に比べ 1.2×10^{-6} の質量密度を持つ背景ガスが配置された。また、計算過程においてこのガス中を衝撃波が通過することで、さらに密度が増加する。実験に比べて高密度な背景ガスが存在することによりプラズマの膨張が減速され、力積の減少につながっている可能性がある。この問題を解決するためには、輻射流体コードをラグランジュコードに改良する必要があるが、この改良にはある程度の時間が必要であると考えられる。

実験側の原因としては、ターゲット由来のプラズマから

の輻射によりスラストターゲット表面がプラズマ化することで、力積が過大評価された可能性が指摘された。また、荷電粒子がスラストターゲット表面で弾性反射することにより、スラストターゲットに与えられる運動量が過大評価された可能性についても指摘された。

スラストターゲットのプラズマ化については、高エネルギープラズマを用いた場合には不可避であり、プラズマ化されづらい材料を用いる対処しか存在しない。本質的な解決を試みる場合には、ターゲットによる間接計測ではなく、コイルに働く推力を直接計測する手法の開発が望ましいと考えられる。スラストターゲット上での荷電粒子の反射については、スラストターゲットの形を工夫し、内部で複数回反射させ運動量を失わせる対策が考えられる。

実験とシミュレーションの両面から改良を行うことにより、実際の推力を正確に見積もることが可能になると考えられる。

6.6 まとめ

磁気スラストチャンバーによる推力発生については、永久磁石を用いた実験によって実証に成功した。一方で、電磁石を用いた場合の推力計測については実験とシミュレーションの両方に課題があり、正確な値を求めることはできていない。

今後、実験の改良とシミュレーションの改良の両方が求められる。その過程で、干渉計測やトムソン散乱、チャージコレクタを用いた、プラズマの温度や密度等の詳細な計測も重要になると考えられる。

参考文献

- [1] C.D. Orth, Lawrence Livermore National Laboratory, Final Systems Report UCRL-TR-110500 (2003).
- [2] Y. Nagamine and H. Nakashima, Fusion Technol. **35**, 62 (1999).
- [3] N. Saito *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 050303 (2018).
- [4] A. Maeno *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 071501 (2011).
- [5] A. Maeno *et al.*, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. **56**, 170 (2013).
- [6] 蔵本英祐 他：令和2年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2020-003 (2021).
- [7] M. Edamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 9, 094706 (2018).
- [8] R. Kawashima *et al.*, Plasma Fusion Res. **11**, 3406012 (2016).
- [9] T. Morita *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **717**, 012071 (2016).
- [10] Y. Itadani *et al.*, Plasma Fusion Res. **13**, 1306016 (2018).
- [11] 町田貴大 他：第64回宇宙科学技術連合講演会, 2M04 (2020).