



## 小特集 大型レーザー装置を用いた科学研究の新展開

# 5. レーザー核融合プラズマ推進の研究

前野 旭弘, 山本直嗣<sup>1)</sup>, 中島 秀紀<sup>1)</sup>

九州大学大学院 総合理工学府, <sup>1)</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院

(原稿受付: 2010年7月21日)

将来の火星などの太陽系惑星の有人宇宙探査のためには、従来にない高い比推力と大きな推力を併せ持つ宇宙推進システム(ロケット)を開発する必要がある。その候補の一つとして、莫大なエネルギーを生成するレーザー核融合と磁気スラストチャンバーを組み合わせたレーザー核融合ロケットが挙げられる。本章では、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の共同利用研究施設にて実施した磁気スラストチャンバーの原理実証実験について解説する。

### Keywords:

laser fusion rocket, plasma thruster, magnetic thrust chamber, thrust stand, impulse

### 5.1 はじめに

今年2月に、ブッシュ前米政権が推進した「2020年有人月探査計画」をオバマ新政権は白紙にし、月探査の代わりに有人火星探査計画を発表した。オバマ大統領はこの計画について、「2025年までに長期宇宙旅行が可能な新型宇宙船を完成させ、2030年代までに宇宙飛行士が地球と火星を往復できるようにし、火星着陸を推進する。」と発表した。このように、宇宙開発は地球周回軌道から、火星や太陽系惑星探査へと重点を置きつつある。地球周回軌道にある宇宙ステーションにもあてはまることだが、このような有人宇宙探査では、宇宙飛行士の宇宙線被曝による健康被害が非常に重要な問題となってくる。そのため、有人宇宙探査にはミッション期間の短縮を行うために、高速推進可能な宇宙推進システム(ロケット)が求められている。

レーザー核融合反応は他の化学反応や核分裂反応と比較して単位質量あたりに発生するエネルギーが非常に大きく、高温・高速のプラズマが容易に得られる。このプラズマを磁気スラストチャンバーにおいて磁場と相互作用させることによって、(固体壁との相互作用無く)プラズマの運動方向を変えることができ、大きな推力を得ることができる。従って、従来の宇宙推進システムと比較して、高い排出速度(即ち高い比推力)と大きな推力を同時に達成することができる。この高い比推力と大きな推力により、レーザー核融合ロケットはミッション期間を短縮することができ、将来の火星などの太陽系惑星の有人宇宙探査を目指した宇宙推進システムに非常に適している。また、高い比推力は、推進剤質量の低減によるロケット積載可能質量の増加につながり、コスト削減につながる。そして、推進剤流量やレーザー繰り返し率を独立に調整することによって、比推力や推力を自由に变化させることができ、様々な

有人惑星探査に最適な運用を行うことができる[1, 2]。

米国のNIF(国立点火施設 National Ignition Facility)において、2010年からエネルギー利得の実証に向けて核融合点火実験が開始された。1.8 MJのレーザー投入に対して、その約20倍の40 MJの核融合エネルギーの出力がある。また、2030年代にはレーザー核融合炉により電力を供給するという野心的な計画も発表されている。このように、レーザー核融合の実現性が一段と確かなものになってきており、レーザー核融合ロケット実現への期待も高まっている。

最近のレーザー核融合ロケットの研究では、米国Livermore国立研究所のグループが図1に示す概念設計例「VISTA」に関するレポートを公開している[3]。しかしながら、推力獲得の実証に最重要課題である磁気スラストチャンバー中のプラズマ挙動についてはほとんど議論がなされていない。

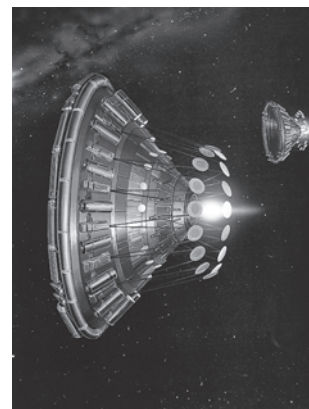


図1 VISTA 概念図(提供: 矢沢サイエンスオフィス)。

### 5. Study on Laser Fusion Plasma Propulsion

MAENO Akihiro, YAMAMOTO Naoji and NAKASIMA Hideki

authors' e-mail: maeno@aees.kyushu-u.ac.jp, yamamoto@aees.kyushu-u.ac.jp, nakasima@aees.kyushu-u.ac.jp

そこで、本研究グループは大阪大学レーザーエネルギー学研究所（レーザー研）の共同利用研究施設を利用して、磁気スラストチャンバー中のプラズマ挙動についての模擬実験を実施した。本章では、そこで得られた成果等について紹介する。

### 5.2 磁気スラストチャンバーについて

レーザー核融合ロケットの推進機構である磁気スラストチャンバーの推進原理を図2に示す。レーザー核融合プラズマを超電導コイルによる磁場中で生成させると、プラズマ粒子は反磁性電流が流れるように運動を始める。この反磁性電流と磁場の相互作用によってプラズマを排出することで推力を得る。つまり、反磁性電流によって磁場は排除され、圧縮され、プラズマに対して強い力を及ぼすようになる。プラズマは磁場により後方へ押し戻されて、プラズマの運動方向を変化させる。

### 5.3 EUV データーベースレーザー装置を用いた実験

レーザー核融合ロケットの根幹をなす磁気スラストチャンバーに関する研究は主に数値シミュレーションが中心であったので、磁気スラストチャンバーが実際にインパルス（1ショットあたりに得られる推力）を得られるかどうかは長年確かめられて来なかった[4-7]。そこで、本研究グループでは磁気スラストチャンバーの実験的実証のためにはインパルス測定が最適な計測方法であると考え、レーザー研の共同利用研究施設である EUV データーベースレーザー装置にて実験を実施した。

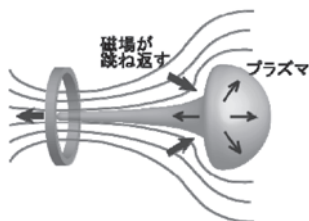
実験で用いた、レーザー生成プラズマと磁場との相互作用によるインパルスを測定する実験器具を図3(a)に示す。これは振子の原理を応用した振子式スラストスタンドというもので、相互作用により振子の上部に設置した推進器

（永久磁石）にインパルスが与えられると振子が振れるので、この振幅を下部に設置した変位センサーで追いかける仕組みである[8,9]。このインパルスと振幅の最大値の間には線形性が成り立つと仮定できる。したがって、荷重変換器による既知のインパルスを与えることによって校正した校正値を用いて、実験で測定されたショットごとの最大振幅からインパルスを求めることができる。磁気スラストチャンバーを形成する磁場には、ここでは、永久磁石（ネオジウム円柱磁石）を使用した。つまり、推進器はこの磁石により形成される。また、レーザー生成プラズマ粒子が測定器具へ衝突することによる振子の振れを防ぐために、永久磁石の前面1mmの位置にポリスチレン板のシールドを取り付けた。磁場中のプラズマは、レーザー波長1064nmのシングルショットNd:YAGレーザー（レーザー集光径が500μm）をポリスチレン球状ターゲット（ターゲット直径が500μm）に照射して生成した。

真空容器内での実験配位を図3(b)に示す。レーザー生成プラズマはレーザー入射方向へプラズマが噴出しやすいので、アブレーションプラズマを強い磁場で受け止めることができれば相互作用により生まれるインパルスは大きくなると考えられる。また、レーザー生成プラズマに磁石を近づければ、それだけ強い磁場がプラズマと相互作用する。その構造上、円筒磁石は円柱磁石よりもサイズが大きくなり、また、磁石近傍の磁場はすぐ弱くなってしまふ。そこで、ここでは、ネオジウム円柱磁石（直径16mm×長さ10mm）を長さ方向に6個並べたものを使用した。ネオジウム円柱磁石の中心軸とレーザー光軸との角度が0度の位置にネオジウム円柱磁石を設置することは不可能となる。また、真空容器内にはターゲットがレーザー焦点（真空容器

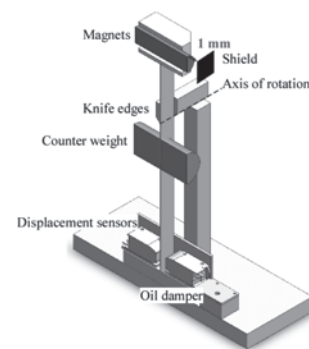


(a) 超電導コイル磁場中にレーザー核融合プラズマが生成される。(b) プラズマ膨張によってコイル磁場が圧縮される。

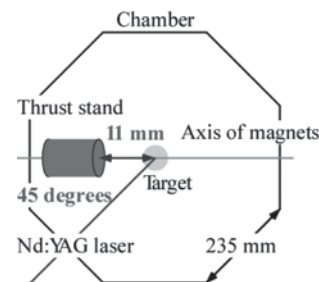


(c) コイル磁場が元に戻ろうとする力によって、プラズマが押し出される。

図2 磁気スラストチャンバーの推進原理。



(a) インパルス測定装置。



(b) 実験配位

図3 EUV 装置における実験。

中心)に設置されるように監視するカメラが設置されているので、このカメラの視界を測定器具が遮らないように測定器具を配置する必要がある。このため、ネオジウム円柱磁石を取り付けた振子式スラストスタンドを、ターゲットまでの距離が11 mm、レーザー光軸との角度が45度となるように配置し、インパルス測定実験を実施した。

ネオジウム円柱磁石の代わりに鉄を振子式スラストスタンドに取り付けて磁場が形成されていない状態で実験を行った。このとき、測定されたインパルスは測定限界未満だったので、シールドは有効であった。つまり、磁場なしではインパルスを得られないということを確認できた。

ネオジウム円柱磁石を振子式スラストスタンドに取り付けた磁場有でのインパルス測定結果を図4に示す。図4からも明らかなように、ここでは、インパルスを測定することができた。このインパルスはレーザー生成プラズマと磁場の相互作用のみによって得られたものだと断定することができる。したがって、磁気スラストチャンバーがインパルスを生み出すことを実験的に実証することができた。

また、EUV データーベースレーザー装置では、レーザーパルス幅は2~10 nsの範囲で、レーザーエネルギーは最大2.0 J (10 ns/1064 nm)まで変化させることができる。図4には、レーザーパルス幅を9 ns(●)と3 ns(○)に設定したときのレーザーエネルギーに対するインパルス測定結果を示す。各点では3回以上の測定を行い、エラーバーはその標準偏差を示している。この図から、磁気スラストチャンバーはレーザー推進と同様に、レーザーエネルギー、レーザーパルス幅がそれぞれ大きくなると、インパルスが大きくなることを確認した[1]。ターゲット直径100  $\mu\text{m}$ においても、同様の実験を行ったが、インパルスは500  $\mu\text{m}$ のときよりも小さかった。

#### 5.4 激光 XII 号を用いた実験

EUV データーベースレーザー装置を用いたインパルス測定実験から、磁気スラストチャンバーの概念を実験的に実証することができた。そこで、レーザーエネルギーがkJオーダーで生成したプラズマの磁気スラストチャンバー内での挙動を確認するために、レーザー研の共同利用研究施設である激光 XII 号チャンバー2にてインパルス測定実験を実施した。実験方法は、EUV データーベースレーザー装置を用いた実験とほぼ同じであるが、ネオジウム円柱磁石の形状(直径50 mm×長さ40 mm)、振子式スラストスタンドの構造(図5(a)参照)、ターゲットの種類(直径1.5 mmのポリアセタール球状ターゲット)が異なる。

真空容器内での実験配位を図5(b)に示す。振子式スラストスタンドを、ターゲットまでの距離が33 mm、レーザー光軸との角度が66.5度となるように設置し、インパルス測定実験を実施した。

レーザーはシングルショットのガラスレーザーで、レーザーパルス幅が1.3 nsのもとで、レーザー波長を $\omega$ (1053 nm)、 $2\omega$ (527 nm)、 $3\omega$ (351 nm)と変化させ、各レーザー波長におけるレーザーエネルギーに対するインパルスを測定した。測定結果の概略ではあるが、 $\omega$ の場合

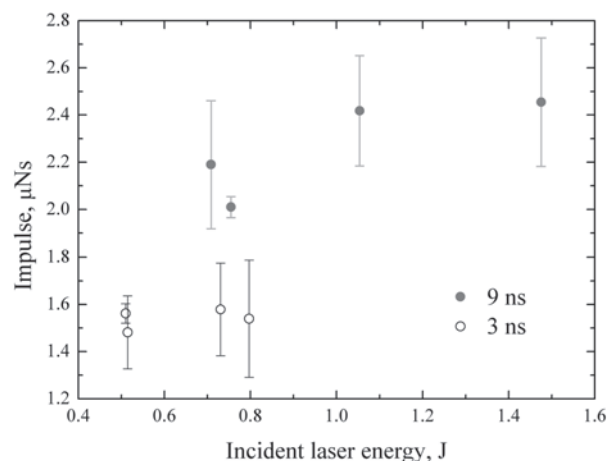
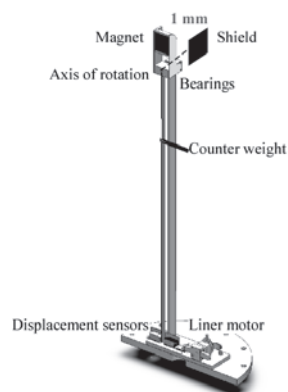
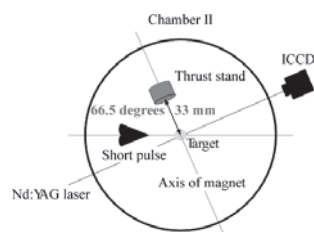


図4 レーザーパルス幅9 ns(●)、3 ns(○)における、レーザーエネルギーに対するインパルス測定結果。



(a) インパルス測定装置。



(b) 実験配位

図5 激光 XII 号における実験。

3 $\omega$ に比べインパルスが小さいことがわかった。また、2 $\omega$ と3 $\omega$ では、インパルスが同等であることがわかった。例えば、レーザーエネルギーが560 J近傍の場合、6.4 mNs (3 $\omega$ , 550 J@shot no. 33453), 5.0 mNs (2 $\omega$ , 568 J@shot no. 33456), 1.3 mNs ( $\omega$ , 548 J@shot no. 33442)であった。よって、本実験では短波長レーザーのほうがレーザー生成プラズマと磁場の相互作用によるインパルスが大きいことを実験的に実証することができた。また、ICCDによるシュリーレン測定も併せて行ったが、現在これらのデータに関しては解析中なので、またの機会に紹介したい。

#### 5.5 思いつくままに

本研究グループは、2008年度から共同利用研究施設であ



るレーザー研のEUVデータベースレーザー装置を、2009年度から激光XII号を利用して実験をさせていただいており、それにより多くの研究成果を出している。現在、レーザー研で実験を行うに当たり、困ることはほとんどなくなったが、実験初期の段階では戸惑うことが多々あった。それは、本研究グループがレーザー生成プラズマ実験に対してまったくの初心者であったからである。これは、本研究グループはレーザー装置を持たず、レーザー生成プラズマ実験に関するノウハウの蓄積もなかったからである。当然、レーザー研で行う実験の予備実験も行うことはできなかった。このような研究グループは共同利用研究コミュニティにおいては稀だと聞いている。このことは本研究グループにおいて大きなウィークポイントであったが、これを克服するため、実験装置の詳細な情報を入手することは大変重要であったと思っている。例えば、真空容器のCADデータや、実験に利用できるポートやねじの位置・サイズの確認である。前章で紹介したように、我々の研究グループでは光学測定よりも機械測定を重視していたので、真空容器内に測定器具を設置する必要があった。そこで、これらの情報から最適な測定器具の設計・配置を考える必要があった。しかし、測定器具を製作しても、実験当日に何かしらの不都合があってはそれまでである。そこで、実験当日よりも一か月程前に実験器具をキャンパスのある福岡からレーザー研のある大阪まで持っていき、事前に下見を行い、うまく設置されるかを確認した。しかし、周到に準備をしても、情報の誤認から上手くいかないこともあった。例えば、前章で述べたようなターゲット監視カメラの視界である。この監視カメラの視界を測定器具が遮ってしまったが、実験当日までに測定器具の配置を調整することによって問題なく実験を行うことができた。このことから、下見の重要性がわかっただけだろう。また、EUVデータベースレーザー装置、および、激光XII号の2つの装置にて実験を行うことができた。これは、予備実験を行えない本研究グループにとっては幸いで、EUVデータベースレーザー装置において、レーザー生成プラズマ実験の経験が得られた。また、その経験を激光XII号に応用するという機会に恵まれた。このように、共同利用研究施設を利用させていただく良い機会に恵まれ、その結果、磁気スラストチャンバーの実験的実証を行えたことを感謝したい。

## 5.6 まとめ

本研究では、レーザー研の装置を用いて、レーザー生成プラズマが発生する推力を磁気スラストチャンバーにて初めて直接測定した。これにより、磁気スラストチャンバーが有効に働くことが実証された。EUVと激光XII号の2つの装置を相補的・有機的に使い効果的に実験が行えた。すなわち、小型装置で問題点の発見と解決を行い、その経験を激光XII号に生かした。また、スケールアップを議論できるのも利点である。もちろん、激光XII号でしかできないこともある。激光XII号ではエネルギー100 J以上が容易に得られ、今後チャンバー1を用いれば照射対称性も改善される。今後とも、この2装置を有効に利用して研究を行いたい。将来的には、NIFでの実験を計画する。この装置では、核融合プラズマが発生するので、より現実の条件に近いパラメータで実験ができる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、受け入れ研究者をはじめ、この機会を与えてくださった、レーザー研の皆様には感謝いたします。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号21360418)、および、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の共同利用・共同研究「課題番号A1-01およびB1-19」のもとに実施された。

## 参考文献

- [1] 内田成明：プラズマ・核融合学会誌 83, 271 (2007).
- [2] 安藤 晃：プラズマ・核融合学会誌 83, 271 (2007).
- [3] C.D. Orth, VISTA-A Vehicle for Interplanetary Space Transport Applications Powered by Inertial Confinement Fusion, UCRL-TR-110500 (2003).
- [4] Y. Nagamine and H. Nakashima, Fusion Technol. 35, 62 (1999).
- [5] T. Muranaka, Y. Nagamine, H. Uchimura and H. Nakashima, Development of a Three Dimensional Hybrid Code for Analyses of Plasma Behaviors, Engineering Sciences Reports, Kyushu University, 22, 309 (2000).
- [6] Y. Kajimura, R. Kawabuchi and H. Nakashima, Fusion Eng. Des. 81, 2871 (2006).
- [7] K.V. Vchivokv, H. Nakashima, Y.P. Zakharov, T. Esaki, T. Kawano and T. Muranaka, Jap. J. Appl. Phys. 42, 6590 (2003).
- [8] 各務 聡：液体推進剤を用いたパルス型プラズマスラストに関する研究, 博士論文, 東京大学大学院 (2002).
- [9] H. Koizumi, A. Kakami, K. Komurasaki and Y. Arakawa, J. J. Soc. Aeronautical and Space Sci. 51, 270 (2003).