## レーザー核融合ロケットの原理実証に向けて Feasibility Study of Laser Fusion Rocket

山本 直嗣<sup>1)</sup>, 森田 太智<sup>1)</sup>, 齋藤 直哉<sup>1)</sup>, 中島 秀紀<sup>1)</sup>, 藤岡 慎介<sup>2)</sup>, 余語 覚文<sup>2)</sup>, 西村 博明<sup>2)</sup>, 森 芳孝<sup>3)</sup>, 砂原 淳<sup>4)</sup>, 城崎 知至<sup>5)</sup>

Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Naoya Saito, Hideki Nakashima, Shinsuke Fujioka et al.

<sup>1)</sup>九州大学大学院 総合理工学府先端エネルギー理工学専攻 <sup>2)</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター <sup>3)</sup> 光産業創成大学院大学 <sup>4)</sup> レーザー技術総合研究所 <sup>5)</sup>広島大学大学院工学研究院

<sup>1)</sup> Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University,
 <sup>2)</sup> Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan
 <sup>3)</sup> Institute for Laser Technology, Japan
 <sup>4)</sup> The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Japan
 <sup>5)</sup> Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Japan

米国の National Ignition facility(NIF)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、着実に研究が進めら れている [1]。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野心的な計 画も発表された。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いる。一 方、米企業 Space X 社は、2022 年にも火星への 100 万人移住計画を目指して、エンジンなどの 開発を本格化させている [2]。

そして、核融合は宇宙推進に非常に適してい る。なぜなら、核融合反応では、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いため、高温・ 高速のプラズマが容易に得られる。核融合反応 で生成した膨大なエネルギーを持つプラズマ を、固体壁ではなく磁場による壁、すなわち磁 気圧によって運動方向を変えることにより、大 きな推力を得ることが出来る(図1)。従って、 核融合プラズマを利用した宇宙推進システム (ロケット)は、従来の推進機では不可能な、高 い排出速度(即ち低燃費)と大推力および長寿 命を同時に達成可能であるため、画期的な高速 推進システムとして非常に有望である。米国の Livermore 国立研究所のグループも、概念設計 例「VISTA」に関するレポートを公開しており [3]、火星までの往復は、化学推進を用いた 場合の1/5のわずか100日で可能であり、しか も10日間の火星滞在が許されることを示した。しかしながら、彼らは推進力獲得の実証に 最重要課題である、磁気ノズル中のプラズマ挙 動については、殆ど議論していない。

そこで、我々は長年にわたり数値解析を用い て磁気ノズル中の非定常なプラズマの振る舞 いを解明してきた。また実験による検証をめざ しても努力してきた。

数値解析においては、3次元ハイブリッドコ ード[4]を用いて磁場形状の最適化を行ってき た。その結果として、2つのコイルを用いるシ ステムにおいては、プラズマの運動量から推進 力への推進効率は77% に達した。また、スラ ストベクトルが変更可能なように、図2に示す ような、矩形コイルを12個配置した体系にお いて計算を行った。その結果として、矩形コイ ルに均一な電流を流した際の推進効率は71% と従来のコイル一つのシステムの65%と比



図 1 磁気ノズル・スラストチャンバーシステ ムでの推力獲得のメカニズム、 核融合で発生した プラズマは、磁場を圧縮しながら膨張する。圧縮された磁 場は、バネの役割をし、プラズマを跳ね返し放出し、その 反作用で推力が発生する。磁場は、非定常的に、大きく変 化する。



図2ベクトル制御の概略図

## 較して向上した。

コイル間のカスプ状磁場に粒子が閉じ込め られており、従来のコイルでは 5%ほど抜ける コイル軸方向の粒子数は全体の 0.6%と減少し ていたことが性能向上に寄与したと考えられ る。次に、推力方向制御の可能性を検討するた めに、上側 6 個の矩形コイルには時計方向に 32 kA turns 流し、下側の 6 個の矩形コイルには半 分の 16 kA turns を流す。これにより計算領域の -X 方向の磁場が弱くなり、プラズマが-X 方 向に多く排出され、Steering angle  $\beta$  が発生する 事が確認できた。

数値解析だけでなく、磁気スラストチャンバ ーシステムによる推力が発生することを実証 し、設計指針を得るべく、大阪大学レーザーエ ネルギー学研究センターとの共同研究を実施 してきた.実験においては、核融合プラズマを 模擬したレーザーアブレーションプラズマと 磁場との相互作用を観察してきた。

永久磁石を用いた推力測定の結果、レーザー エネルギー1Jの力積も2μNsと小さいが、力積 の測定に成功し、初めて磁気スラストチャンバ ーシステムを実験的に実証した。

プラズマと磁場の相互作用を観察するため、 マッハ・ツェンダー干渉法を用いて、磁場とプ ラズマの相互作用を観察した。図3にマッハ・ ツェンダー干渉法から算出したプラズマ密度 分布を示す。図の左方向-13 mm にコイルの端 面がある。磁場を印加しない条件下では、プラ ズマは彼方に飛んで、ほとんど存在していない が、磁場を印加することで、磁気圧とプラズマ の圧力が釣り合う、薄い層状の高密度領域が存 在しており、この境界層よりも下流において反 磁性キャビティの存在が示唆される結果を得 ることができた。またこの境界層は磁場強度, レーザーの投入エネルギーおよびターゲッ ト材質によって変わることを確認している。

また、レーザー生成プラズマから噴出される プラズマの密度および温度および速度を協同 トムソン散乱法により測定した。磁場の印加に よる密度の上昇ならびに径方向の速度の減少 が観察されている。またプラズマの反磁性電流 による磁場の変化をマルチループプローブで 計測したところ、膨張するプラズマの先端での 磁場増幅を計測し、間接的に反磁性キャビティ の存在を確認した。これらの成果をもとにスケ ーリング則を構築し、レーザー核融合ロケット のデモ機の設計・試作に還元できるようにする。



図3 磁気スラストチャンバ中のプラズマ密度 分布、レーザーエネルギー100 J×6、t=200 ns 後(a)0 T at target, (b)1.1 T at target

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、ショットマネー ジメント、レーザー運転、ターゲット製作及び プラズマ計測など、佐藤英児氏をはじめ、大阪 大学レーザーエネルギー学研究センターの皆 様の支援に感謝いたします.本研究は日本学術 振興会科研費補助金 JP25420852、JP21360418、 JP10J01672 および大阪大学レーザーエネルギ ー学研究センターの共同利用・共同研究のもと に実施された.

## 参考文献

[1] O. A.Hurricane, et al, Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion, Nature, 506, 343–348 (20 February 2014)

 [2] http://www.spacex.com/mars (accessed 1 March 2015)
 [3]C. D. Orth、 VISTA-A Vehicle for Interplanetary Space Transport Applications Powered by Inertial Confinement Fusion、 UCRL-TR-110500、 2003

[4] A. Maeno、T. Hinaga、N. Yamamoto、A. Sunahara、S. Fujioka、 and H. Nakashima、Effect of Magnetic Field Strength on a Magnetic Thrust Chamber System、 Journal of Propulsion and Power、 Vol.30、1 (2014)、 pp.54-61.
[5] 川渕他、2006 年宇宙科学技術連合講演会 3F15(2006)

[6] N. Sakaguchi et al., Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. 48 (161), 180 (2005).