

小特集

レーザー核融合ロケットの原理実証研究

Demonstration of the Principle of Laser-Fusion Rocket

1. はじめに

1. Introduction

森田 太智

MORITA Taichi

九州大学大学院総合理工学研究院

(原稿受付：2021年10月6日)

ロケットや衛星の推進には、低燃費な電気推進と高出力な化学推進があり、長期ミッションには低燃費でペイロード比（ロケット質量に対する荷物質量の比）を大きく設計できる電気推進が、打ち上げや有人探査には大推力の化学推進が主に用いられる。一方、火星より遠方の有人航行を考えた場合、大推力かつ低燃費を達成する必要がある、その可能性を持つ推進方法として考案されたのが核融合推進である。

核融合ロケットは、核融合反応の結果として得られる高エネルギープラズマによって推進剤を加熱・プラズマ化し、磁場（磁気ノズル）によって機体から排出する方法が考えられている。核融合反応は他の化学反応や核分裂反応に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ので、高温高速プラズマが容易に得られる。そして、核融合エネルギー（燃焼プラズマや中性子）によって固体推進剤をプラズマ化し、プラズマを磁場で制御して一方方向に排出することで推力を発生させるシステムが有力視されている。他の推進システムと比較して、高い排出速度（低燃費・高い推進剤利用効率）と、大推力が期待され、核融合技術の応用の一つとして期待できる技術である。

核融合には磁場によるプラズマ閉じ込めと、レーザーによる爆縮を用いた慣性核融合と異なる方式が研究されているが、ロケットへの利用を考えた場合、形状を工夫することで高エネルギー中性子の遮蔽や軽量化しやすいことから慣性核融合方式が適していると考えられる。レーザー核融合ロケットは米国ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）の R. Hyde によってレーザードライバや核融合燃料、推進システムについて議論され[1]、その後、中島らによって

ロケットの詳細設計が行われた[2]。また、LLNLによる一連の研究結果は、2003年、C.D. Orth によってまとめられ[3]、当時の慣性核融合の見通しから、ターゲット、ドライバ、推進システム、電源システム、排熱・冷却システムや構造等のロケット設計、火星等へのミッション設計が提案された。しかし、磁気ノズルによる推進効率を検証しておらず、核融合ゲインも現在の研究からみると楽観的な評価であった。そこで我々は、数値シミュレーションを用いて推進性能の評価[4-8]やレーザーアブレーションプラズマを用いた模擬実験による推力発生[9-10]や磁気ノズルによるプラズマ制御[11-17]を実証し、シミュレーション結果を実験によって検証してきた。また、最新の慣性核融合、特に高速点火方式を用いた核融合研究の現状を踏まえた上で、実行可能なミッションや機体設計についても再考した。

まず第2章で可能な惑星探査ミッションの設計について述べる。有人での火星探査・開発や定期的な地球・火星間航行を実現するには大推力と低燃費性能が必要である。ここでは、その性能評価方法について述べ、化学燃料ロケットと比較することで、将来の核融合ロケットの優位性について議論する。

第3章では、第2章で述べたミッションを実現するのに必要となるロケットの機体設計について述べる。2000年頃までに LLNL で進められた核融合ロケットの設計案では、およそ6000トンという大型の機体で D-T 核融合を用いたエネルギーゲインを1500と想定するなど、現在の核融合研究の現状とはかけ離れた見積りである。そこで、最新の研究に沿って機体設計を見直し、高速中性子のシールドや

核融合燃料と推進剤の設計指針，ドライバとなるレーザーシステム等について，詳細を述べる。

また，推進剤となる高エネルギープラズマの発生方法は，核融合ロケットの性能を決定する大きな要素の一つである。第4章では，レーザー核融合で用いる燃料の設計と，核融合出力エネルギーによってプラズマ化する推進剤の設計指針について述べる。

その後，レーザー核融合ロケットの推進システムである磁気ノズルの性能評価について，数値シミュレーションと実験研究の進捗状況を述べる。核融合エネルギーによってプラズマ化した高エネルギープラズマは磁場中を膨張し，最終的には磁場によってシステムから排出される。この磁気スラストシステムによる推力や推進効率を，数値シミュレーションによって議論するのが第5章である。三次元ハイブリッド（電子流体とイオン粒子）シミュレーションを用いた推進性能評価や，第6章で述べる実験結果を評価するため，二次元輻射流体シミュレーションを用いたレーザーアブレーションの評価とそこから得られる推進性能について議論する。そして，レーザーアブレーションプラズマを用いて磁気ノズルによるプラズマ排出と推力発生を検証した結果について，第6章で述べる。実験で計測したインパルスビットは，第5章で計算した値と大きくは違わないがまだシミュレーション・実験とも改善すべき点が多数あり，今後の課題についても議論する。

本小特集を通して，レーザー核融合ロケットの原理実証研究の最近の進捗を報告し，核融合技術の宇宙利用を議論する機会となれば幸いである。

参考文献

- [1] R.A. Hyde, Laser-fusion rocket for interplanetary propulsion. In International Astronautical Federation conference, Budapest, Hungary (1983).
- [2] 中島秀紀 他：核融合研究 66, 291 (1991).
- [3] C.D. Orth, VISTA - A Vehicle for Interplanetary Space Transport Application Powered by Inertial Confinement Fusion. Ucr1-Tr-110500 (2003).
- [4] Y. Nagamine and H. Nakashima, Fusion Sci. Technol. 35, 62 (1999).
- [5] N. Sakaguchi *et al.*, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. 48, 180 (2005).
- [6] Y. Kajimura *et al.*, Fusion Eng. Des. 81, 2871 (2006).
- [7] Y. Kajimura *et al.*, Fusion Sci. Technol. 51, 229 (2007).
- [8] A. Maeno *et al.*, J. Propuls. Power 30, 54 (2014).
- [9] A. Maeno *et al.*, Appl. Phys. Lett. 99, 071501 (2011).
- [10] A. Maeno *et al.*, Aerosp. Technol. Jpn. 10, 71 (2012).
- [11] K.V. Vchivkov *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 42, 6590 (2003).
- [12] K.V. Vchivkov, Study of Thrust Conversion Process of Explosive Plasma Source in Dipole Magnetic Field by Using Three-Dimensional Hybrid Code. PhD thesis, Kyushu University (2005).
- [13] R. Kawashima *et al.*, Plasma Fusion Res. 11, 3406012 (2016).
- [14] T. Morita *et al.*, J. Phys.: Conf. Series 717, 012071 (2016).
- [15] T. Morita *et al.*, Sci. Rep. 7, 8910 (2017).
- [16] Y. Itadani *et al.*, Plasma Fusion Res. 13, 1306016 (2018).
- [17] N. Saito *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 050303 (2018).