

kg 級マイクロ波ロケットの打上げ実証実験報告

○齋藤翔平, 浅井健太, 栗田哲志, 福成雅史, 山口敏和, 小紫公也 (東大),
小田靖久, 梶原健, 高橋幸司, 坂本慶司 (JAEA)

Abstract

Microwave rocket is one of BEP (Beamed Energy Propulsion) systems. It is expected as a future low cost transportation system for large-scale infrastructure constructions like SSPS (Space Solar Power System). Microwave rocket can realize high payload ratio because it can use the atmospheric air as a propellant during its flight in atmosphere. However, a launch experiment with a kg class thruster was not conducted in the past study. The reason for this is impulse decrement due to refilling problem and low power density due to long distance beam transmission. In this study, these problems are resolved and the launch experiment with a kg class thruster is conducted.

1. 諸言

近年, 国際宇宙ステーションや宇宙太陽光発電衛星に代表される大規模宇宙構造物の建設が盛んに議論されており, その建設のためには宇宙への物資輸送コストを飛躍的に引き下げるが必要となってくる. そこで, 大量物資輸送に適した超低コスト打ち上げシステムの候補としてビーミング推進(Beamed Energy Propulsion, BEP)が期待されている. その中でも, 比較的安価に高出力を達成し得るマイクロ波を利用したビーミング推進であるマイクロ波ロケットが, 次世代超低コスト大量物資宇宙輸送システムとして期待されている. [1][2]

このマイクロ波ロケットの特長としては大きく以下の3点で表わされる. 一つ目は, 地上からマイクロ波を照射することによってエネルギーを供給し, また周辺の大気を推進剤として利用することで機体に燃料を積載する必要がないため, 高ペイロード比を達成し得る点. 二つ目は, パルスデトネーションサイクルによって駆動するため, ターボポンプ等の複雑な機構を必要とせず簡素な構造に出来る点. 三つ目

は, 高価な装置であるマイクロ波発振源を地上に設置することによって繰り返し使用することができ, 初期投資のコスト償還が可能である点である.

マイクロ波ロケットの推力発生サイクルは図1のように, 基本的にパルスデトネーション

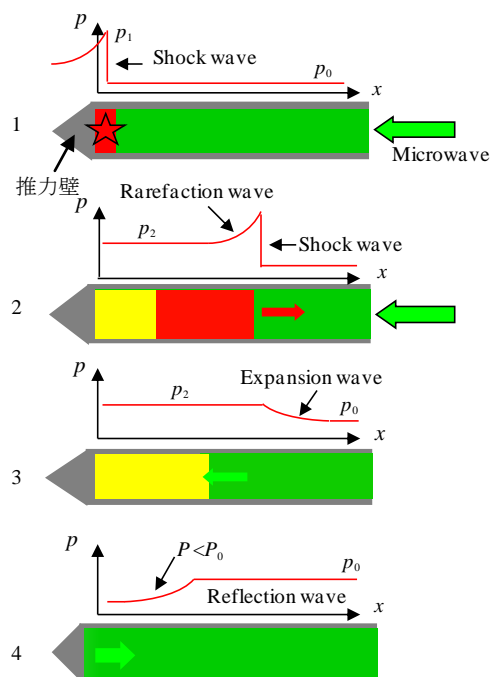


図1 マイクロ波ロケットのエンジンサイクル

エンジンと同様である。マイクロ波を照射すると、推力壁に設けた集光器によって集光されプラズマが発生する。このプラズマが後から来るマイクロ波を吸収して衝撃波を駆動する。衝撃波は電離波面を伴って推進機内を開口端に向けて伝播していく。衝撃波が開口端を過ぎると、膨張波が開口端から推力壁に向けて伝播して排気がなされる。この膨張波が推力壁に到達するまで、推力壁付近には衝撃波後方に生じた高い圧力が維持されることになる。以上のプロセスを繰り返すことでマイクロ波ロケットは連続的な推力を得る。

2. 目的

過去の研究において、課題となっていた推力の不足が解決され、kg級の推力が達成された。また、長距離のマイクロ波伝送でパワー密度が低下するという課題も解決されたため、本研究ではkg級の推進機を用いての垂直打上げ実験を実施することが目的となっている。

3. 実験装置・方法

3-1 マイクロ波発振装置

本研究では、日本原子力研究開発機構にて国際熱核融合実験炉(ITER)の高周波加熱源として開発された170GHz帯大電力ジャイロトロンを利用した[3]。定格1MW大出力を、1000secの長時間運転から0.1msecの短パルスまで発振が可能である。また、Single-stage Depressed Collector (SDC)によるエネルギー回収機構を持ち、電力エネルギー変換効率50%を達成している。マイクロ波はビームウェスト20.4mmの0次のガウスビームとして出力される。

また、IGBTスイッチングシステムを導入することによって、メイン電源を直接カットでき、ハイパワーで安定して運転することが可能となっている。

3-2 実験系・計測系

本研究では、図2に示すような垂直打上げ系を使用して実験を行った。また、図3のようにリード弁を搭載した推進機とそうでない推進機を用いた。ここで、リード弁非搭載推進機には、内部のプラズマ伝播の様子を観測するためにアクリル窓が設置されている。

また、長距離マイクロ波伝送において、送電側で一度マイクロ波を拡大して伝送し、推進機で集光することで長距離伝送を行っているが、その際使用したテーパ型集光ミラーを図4に示す。

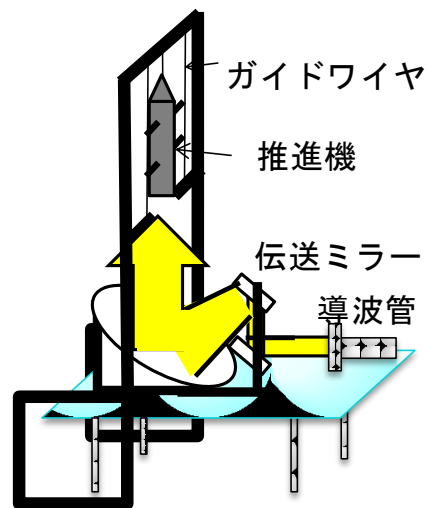


図2 実験系模式図

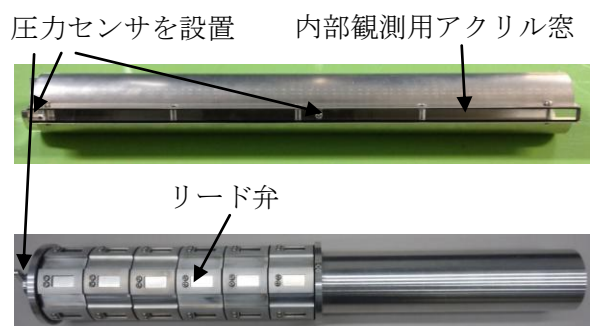


図3 使用推進機(上:リード弁非搭載推進機, 下:リード弁搭載推進機)



図4 テーパ型集光ミラーを搭載した様子

本研究では、圧力と衝撃波速度の測定用に圧力センサ(日本キスラー 603B)を、内部のプラズマ観測用に高速カメラ(NAC MEMRECAM HX-1)を使用した。

4. 実験結果・考察

4-1 伝送ミラーの改良結果

過去の研究において送電ミラーは、ジャイロトロンから発振されたマイクロ波が平行光で伝送ミラー(図5)に入射するとして設計されていたが、実際には多少の広がりを生じて入射してくる。今回これを考慮に入れて改良を行った。

その結果が図6, 7である。これは伝送ミラーから150 cmの地点で計測したビームプロファイルになっており、これらからピークパワー密度が約2倍に向上していることがわかる。したがって、改良したことによってさらなる推力の向上が見込まれる結果となった。



図5 改良した伝送ミラー

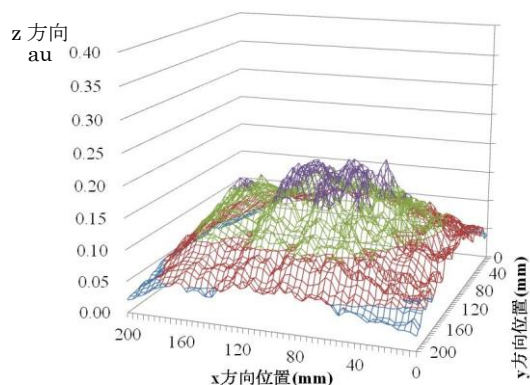


図6 改良前のビームプロファイル

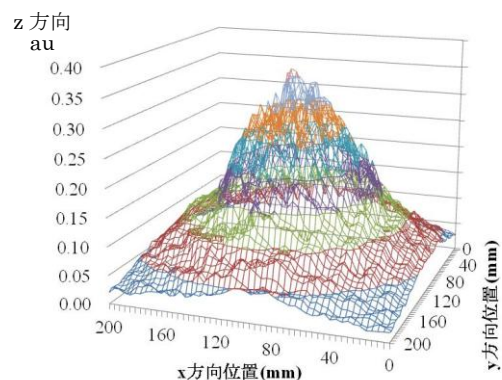


図7 改良後のビームプロファイル

4-2 テーパ型ミラーの結果

今回、図4のようなテーパ型ミラーを導入したが、その際のプラズマ伝播の様子を図8に示す。このように推力壁で絶縁破壊を生じており、正常にマイクロ波を推進機内部に導入し、絶縁破壊を生じるパワー密度まで集光されていることがわかった。

また、図9にその際計測した圧力履歴を示す。この図から、1発目は衝撃波が推力壁から推進機中央まで伝播していることがわかるが、2発目では推力壁において衝撃波が2度生じている。これは、プラズマが推力壁だけでなく推進機の途中でも着火しているからだと考えられる。ここで、衝撃波速度を1発目の波形から計算すると622 m/sとなり、2発目の2度の衝撃波が到達する時間からその距離を求めると545 mmとなった。これより、推力壁から545 mmの位置でプラズマが着火しているということがわかった。さらに、この距離は推進機の長さと同程度であることから、テーパ型ミラーと推進機の接合部分で着火が起こっていることを示している。これはこのテーパ型ミラーが接合部でパワー密度が最大になってしまうという特性によるものだと考えられる。このため今後形状を改良し、この問題を改善する必要がある。

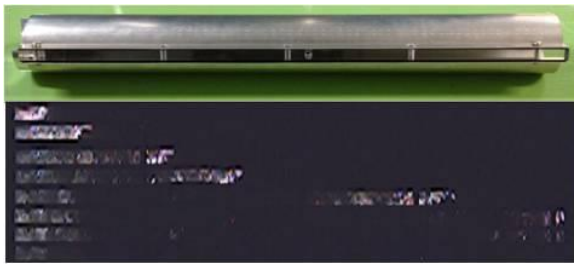


図8 高速カメラで撮影した推進機内部のプラズマ伝播の様子(左が推力壁)

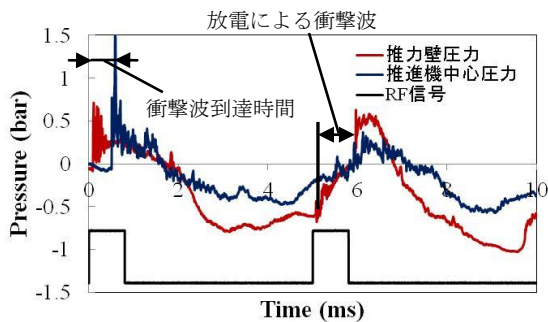


図9 テーパ型ミラー使用時の圧力履歴

4-3 リード弁の再設計結果

過去の研究において、リード弁の変位が想定よりも大きかったために塑性変形を生じ、これによって推力を発生する高压であるプラトー圧が漏れてしまい、力積が低下してしまうという問題が生じていた。そこで本研究ではリード弁の動的解析を行い、その変位を見積ることによってリード弁を再設計した。その結果を表1に示す。ここで、プラトー圧の比はリード弁非搭載時のプラトー圧に対するリード弁搭載時のプラトー圧の比となっている。

表1に示すように、再設計によってリード弁

表1 リード弁再設計後の結果

<実験結果>	プラトー圧の比
塑性変形発生時	0.72
本実験	0.97

に塑性変形は生じず、プラトー圧の漏れを防ぐことができた。

4-4 リード弁の繰返し周波数への効果

図10に定常状態での規格化されたプラトー圧と繰返し周波数の関係をリード弁の有無で比較したものを示す。この図から、リード弁によって広い繰返し周波数領域でプラトー圧の低下を防ぐことができることが示された。

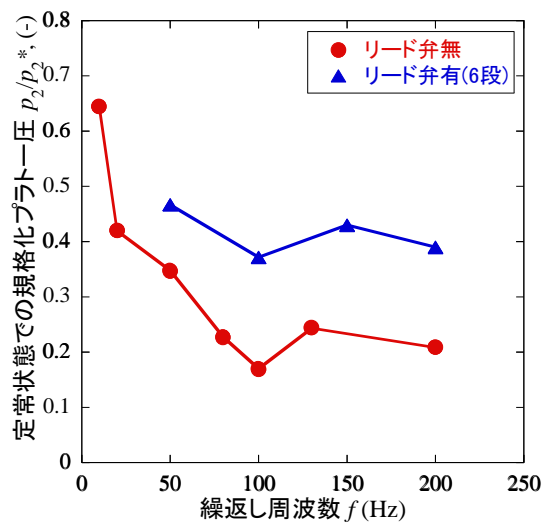


図10 繰返し周波数によるプラトー圧の低下

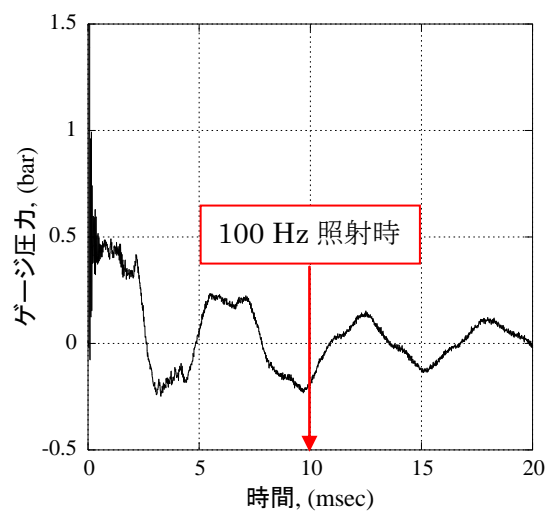


図11 推力壁での圧力履歴

また、図 10 で 100 Hz の点のプラトー圧が特に下がっているが、これは推進機内部の圧力振動が原因と考えられる。図 11 に示す推進機内部での圧力振動から、100 Hz での照射では圧力の低い時にマイクロ波を照射することになり、それによってプラトー圧が低下しているものと考えられる。

4-5 打上げ実証結果

本研究では打上げ実証実験を行ったが、推進機は打ち上がらなかった。その主な理由として以下の二つの点があげられる。

一つは 1 発目の力積が過去の研究で得られた力積よりも小さかった点。もう一つは高パルス時に力積を維持することができなかつた点である。

その原因として、一つ目はテーパ型ミラーを今回導入したが、このミラーを介した場合にマイクロ波のプロファイルが変わってしまい、力積が低下してしまったものと考えられる。よって、マイクロ波のプロファイルを変えないようにマイクロ波を推進機内に導入するミラーを今度設計する必要がある。

また、二つ目の原因は繰返し周波数を大きくしていくと種電子が次のパルスまで推進機内部に残り、そこでプラズマの着火が生じることで高圧が生じる時間が短くなったことと考えられる。したがって、繰返し周波数を大きくする代わりに、推進機長を最適な長さまで伸ばしてパルス幅を大きくすることが必要である。

5. 結論

今回の実験では、改良した伝送ミラーとテーパ型ミラーを導入した。その結果、伝送ミラーによって伝送されたマイクロ波のピークパワーを向上させることができた。またテーパ型ミラーによって伝送されたマイクロ波を集光し推進機内部に伝送し得ることがわかった。

またリード弁を再設計し使用したが、問題となる塑性変形は生じず、広い繰返し周波数領域で効果が実証された。

一方で推進機は打ち上がらなかったが、今後テーパ型ミラーを再設計し、推進機の長さを最適化することが必要である。

参考文献

- [1] H. Katsurayama, K. Komurasaki, and Y. Arakawa : “A Preliminary Study of Laser powered Launcher Performance” , Acta Astronautica, Vol.65, pp. 1032-1041, 2009.
- [2] L. N. Myrabo : “World record flights of beamed-riding rocket light craft” , American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper N, pp. 2001-3798, 2001.
- [3] K. Sakamoto, A. Kasugai, K. Takahashi, R. Minami, N. Kobayashi and K. Kajiwara : “Achievement of robust high-efficiency 1MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170GHz continuous-wave gyrotron” , Nature Physics, Vol.3, No.6, pp.411-414, 2007.