

Millimeter-Wave Beam Energy Transmission to Microwave Rocket using a Tapered Mirror System

○Kenta Asai, Shohei Saito, Satoshi Kurita, Masahumi Fukunari, Toshikazu Yamaguchi,
Kimiya Komurasaki
(The University of Tokyo)

5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa, Chiba, 277-8561, Japan

Yasuhisa Oda, Ken Kajiwara, Kouzi Takahashi, Keishi Sakamoto
(JAEA)

801-1 Mukoyama, Naka, Ibaraki, 311-0193, Japan

Abstract.

Microwave rocket is expected to achieve the dramatically low cost way in order to transport mass materials to the space. (e.g. Space Solar Power Satellite). In the previous study, we succeeded in demonstrating 5 m beam transmission. The method is composed of two systems. First, a beam expander composed of a couple of offset parabolic mirrors was applied on the beam transmitter side. Second, the beam was condensed on the vehicle side to provide enough power density to propel the vehicle.

However, both of the beam expand and the beam condenser have some problems. One of them is the bad beam profile after the beam expander system. Another is the mirror-exhaust gas interaction at the exit of the thruster, where a pair of offset parabolic mirrors interfered in generating thrust. In addition, the vehicle's center of mass was off axis because of the beam condenser optics.

We solved those problems using a phase corrected mirror on the beam transmitter side and a new tapered mirror beam condenser on the vehicle side.

These mirror systems were designed using both of the phase correction method and the ray tracing method.

マイクロ波ロケットへのテーパ型集光器を使用したミリ波空間エネルギー伝送

○浅井健太, 齋藤翔平, 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)

1. はじめに

宇宙太陽光発電衛星システムのような大規模な宇宙開発・利用において大量物資輸送コストの大幅低減は今後の最重要課題の一つであるが、地上から静止軌道への打ち上げコストを現状の百分の一以下にすることを可能にすると期待されているシステムが「マイクロ波ロケット」である。^{1,2)}

図1, 2にマイクロ波ロケットの概念と基本原理を示す。推進に必要なエネルギーは地上からミリ波のパルスビームで供給される。マイクロ波ロケットに照射されるビームは、推進器内部の先端に設置されている集光器で集光され、空気をプラズマ化させる。発生したプラズマにミリ波ビームが照射され続けることでプラズマは衝撃波を伴いながら成長し爆轟現象を引き起こし推力を得る。パルス状のビームを繰り返し照射することで機体は持続的に推力を得ることが可能である。

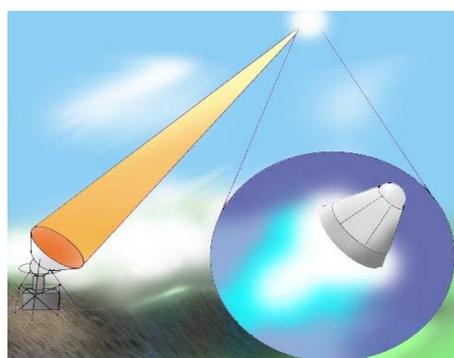


図1 マイクロ波ロケット概念図

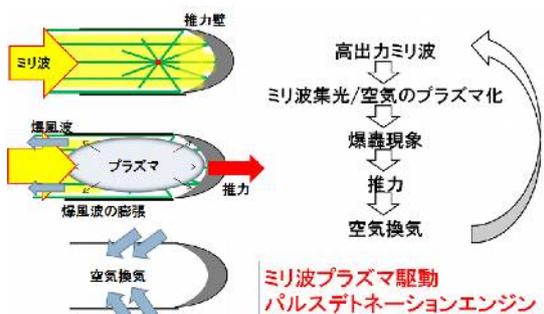


図2 マイクロ波ロケット作動原理

マイクロ波ロケットにおける研究の対象は、ビーム伝送と推進器である。本研究では従来のビーム伝送系（拡大系と集光系）の問題点の改善を試みた。

2. ミリ波長距離エネルギー伝送系

マイクロ波ロケットの推力生成実験では、日本原子力研究開発機構(JAEA)にて国際熱核融合実験炉(ITER)の高周波加熱・電流駆動のために開発された 170 GHz ジャイロトロン（定格出力 1 MW）をマイクロ波発振装置として利用している。照射されるミリ波はビームウェスト半径 20.4 mm の 0 次のガウスビームである。ミリ波の波長は可視光などに比べて長い為、空間照射の際には回折効果により容易に拡散する。ビームを介してエネルギーを長距離伝送する際、ビームの拡散を防ぐために図3に示す放物鏡面の組み合わせで構成されたミラー系（拡大光学系）でビーム径を元の直径 40 mm から直径 240 mm へと変換し推進器直前に集光器を利用して径を再び直径 40mm へ変換し推進器内部にエネルギーを取り入れる手法をとる（参照、図3, 4）³⁾

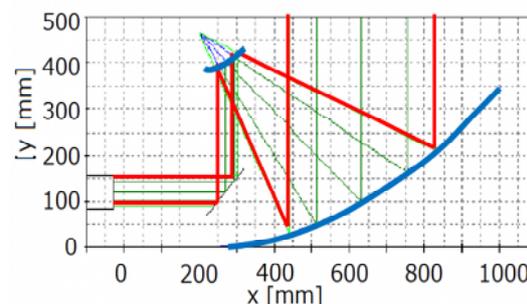


図3 ビーム拡大光学系

2.1 ビーム拡大系

2008年に我々が行った水平5mエネルギー伝送実験に成功した拡大系では、図4に示すようにジャイロトロン導波管出力部から拡大系までの間にビームが拡散してしまうため、平行ビームが入射される想定で制作しある一対の放物線ミラー系では、ビーム拡大後に想定していた平行ビームにはならず、拡大系直後のビーム径が想定の倍以上になりビームの

ピーク電力が下がり有限の大きさを持つ推進器に伝送できるエネルギー量が減少して推力低下につながるという問題があった。

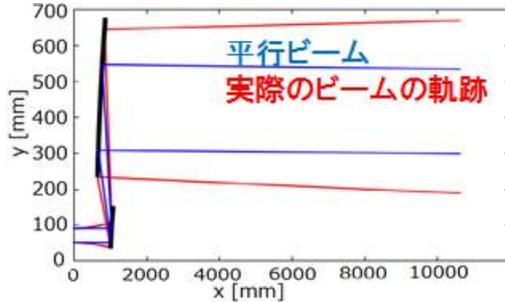


図 4 拡大系に平行ビームを入射した時と実際のビームを入射した時のビームの軌跡

2.2 ビーム集光系

拡大されたビームは、推進器上で再び元の径に集光され、推進器へと投入される。これは過去の実績からビームの電力密度が高い元の径に戻さなければ十分な推力が得られないためである。

先行研究では一対の放物鏡（大凹面鏡: ϕ 280 mm, 小凸面鏡: ϕ 60 mm)を使用した集光器系(図 5)で 5 m の伝送実験が行われた¹⁾。ミラー型集光器系では、1)集光器系が推力生成の妨げになる、2)軸対称ではない為に安定性が悪いという問題点があった。

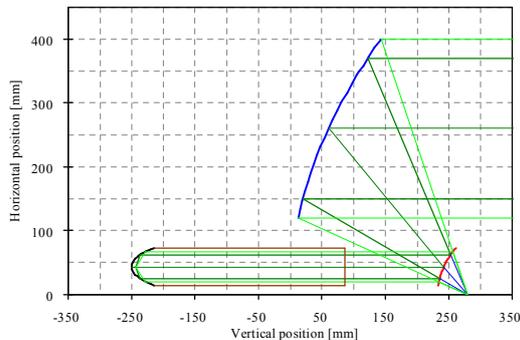


図 5 ミラー型集光系簡略図

3. 伝送系の改善

ビーム拡大系に位相補正鏡を導入することでビームのプロファイルを改善し、集光系にテーパ管型集光器を使用することでミラー型集光器の問題点の解決をはかる。

3.1 位相補正鏡

ジャイロトロン導波管出力部から拡大系の第 1 ミラー（凸型ミラー）までの距離を 30cm とし、広がって系に入射されるビームが系直

後で直径 240mm の平行光のガウスビームになるように位相補正鏡を制作し、従来あった拡大系の第 1 ミラーと取り替えた。

3.2 テーパ管型集光器系

集光系であるテーパ管開口面直径 (ϕ 250 mm)と推進器直径(ϕ 56 mm)が、ビームの波長(1.76 mm)に対し十分に大きい^{4,5)}ので設計には光線追跡法を利用し、テーパ管開口面に入射される光線が推進器内部に全て入るように設計した。シミュレーション結果を図 6 に示す。また、表 1 に設計したテーパ管型集光器の諸元を記す。

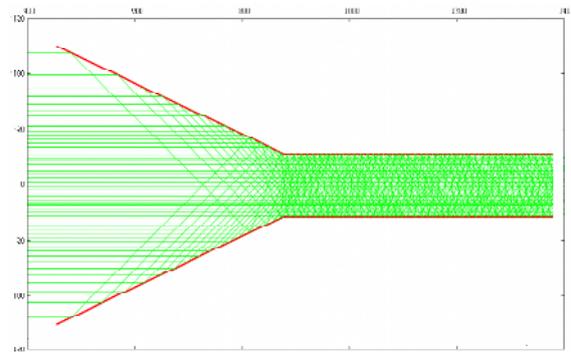


図 6 光線追跡法によるビーム集光シミュレーション

表 1 設計したテーパ管型集光器の諸元

推進器直径	56 mm
開口面直径	250 mm
テーパ長	470 mm
重量	540 g

4. 実験・結果

4.1 拡大ビームのビームプロファイル

従来の拡大系と改良した拡大系で拡大系から距離 50cm と 150cm の位置でビームのプロファイルを計測した。ビーム発信源には 170GHz, HE11 モード(ビームウエスト 20mm)の低電力発信器を使用した。結果を表 2 および図 7,8 に示す。

表 2 拡大鏡から距離 50cm と 150cm の位置でビームスポットサイズ ω の比較

	ω (50cm) 測定	ω (150cm) 測定	ω (10m) 計算
従来	156 mm	160 mm	168.3 mm
改良	103 mm	106 mm	125.3 mm

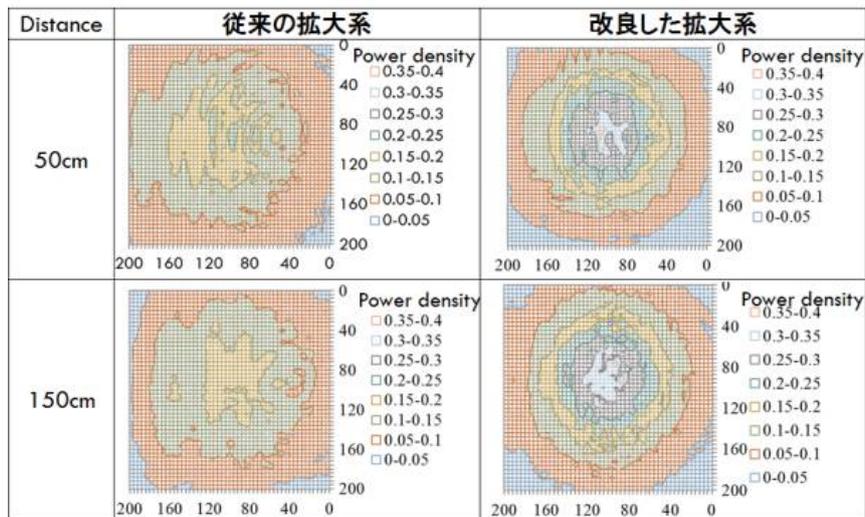


図 7 ビームプロファイル. 左が従来の系, 右が改良した系. 上が距離 50cm, 下が距離 150cm.

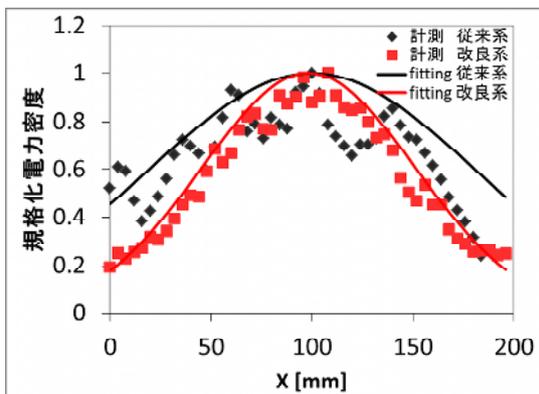


図 8 従来型と改良型での電力密度分布の比較 (最大値が1になるように規格化)

位相補正鏡により拡大系後のビームのプロファイルがよりシャープに改善できたことがみてとれる。

4.2 テーパー型集光器エネルギー伝送実験

制作したテーパ型集光器でエネルギー伝送を行った (図 9)。ビーム発信源であるジャイロトロン出力は 630KW でありビームが拡大系を通った直後でのビームのピークパワー密度は 96KW/cm² である。

図 10 はアクリル窓付き推進器内部でのプラズマを高速度カメラを用いて撮影したものである。プラズマが推力壁で着火し、時間とともにミリ波を吸収して成長する様子が見て取れる。

プラズマの伝播速度は 578m/s であり、我々が過去に得たデータ (図 11) より、この時の推進器内部でのビームのピークパワー密度は 140kW/cm² 程度だと予想される。

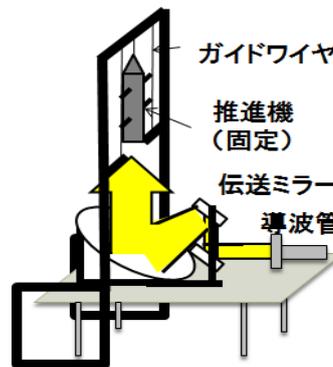


図 9 エネルギー伝送概略図



図 10 推進器内部でのプラズマの時間変化

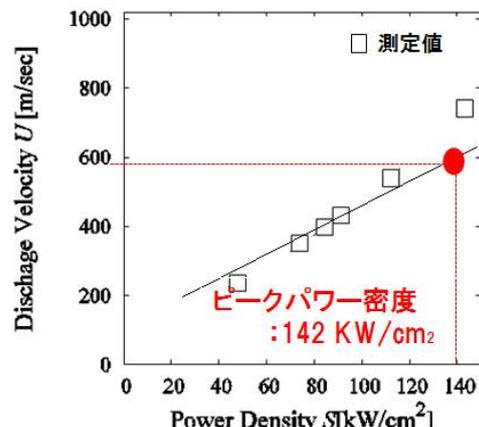


図 11 推進器内部においてプラズマ伝播速度とビームのピークパワー密度の関係性 (実験値)⁶⁾

5. まとめと今後の展望

テーパ管型集光器を使用してミリ波ビームを推進器内部に取り入れる事に成功し、プラズマの着火、成長を確認することができた。

拡大系に位相補正鏡を導入することでビームのプロファイルを改善した。長距離エネルギー伝送実験を考えた時、拡大系からの距離ももっととった位置でのプロファイルをとり平行ビームになっているか確かめる。

光線追跡法を用いで制作したテーパ管型集光器でエネルギー伝送に成功した。今後より効率的にエネルギー変換を行うためのテーパの形状を模索する。

6. 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A) No. 23246145の補助を受けた。

参考文献

- 1) Oda, Y., Shibata, T., Komurasaki, K., Takahashi, K., Kasugai, A., Sakamoto, K., "Thrust Performance of Microwave Rocket under Repetitive Pulse Operation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, Jan.-Feb. 2009, pp.118-122.
- 2) Masafumi Fukunari, Reiji Komatsu, Anthony Arnault, Toshikazu Yamaguchi, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, "Air-breathing Performance of Microwave Rocket with Reed Valve System," *Vacuum*, 88 (2013), pp. 155-159.
- 3) Toshikazu Yamaguchi, Kimiya Komurasaki, Yasuhisa Oda, Ken Kajiwara, Koji Takahashi, and Keishi Sakamoto: Millimeter-wave Beam Conversion with Quasi-optical Mirrors for Microwave Rocket Launch Demonstration, AIP Conf. Proc. 1402, pp. 467-477.
- 4) Tetsuro Imai, "Prediction of Propagation Characteristics in Tunnels using Ray-tracing Method," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B 2004, pp. 216-226.
- 5) Kazunori Ughida, Chang-Kwon Lee, Toshiaki Matsunaga, Tetsuro Imai, "On Ray Tracing Method for Evaluating Field Distribution in Tunnels," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-B, No.5 1999,pp 1030-1037.
- 6) Yasuhisa Oda, Ken Kajiwara, Koji Takahashi, Atsushi Kasugai, Keishi Sakamoto, and Kimiya Komurasaki, "In-Tube Shock Wave Driven by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma," *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 (2009) 116001.