

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロ波ロケットのリード弁式吸気機構と
 テーパー管型マイクロ波受電器の開発

氏 名 福成 雅史

1. 初めに

現在の化学ロケットはその重量の大部分を燃料が占めるため効率が悪い．そのため宇宙への物資輸送費用が高額となり、宇宙開発の発展を著しく遅らせている．マイクロ波やレーザーのビームにより地上からエネルギーを供給するビームエネルギー推進機はこの問題を解決する最も有望な方式の一つである．マイクロ波ロケットはジャイロトロンから発せられるマイクロ波ビームを推進エネルギーに変換して飛行するロケットであり、物資輸送費用を劇的に低減できるものと期待されている．

本研究では、マイクロ波ロケットの吸気性能を改善するためにリード弁を用いた吸気機構を開発した．またマイクロ波ロケットの打ち上げには大電力マイクロ波電力伝送システムが不可欠である．そのため大電力マイクロ波の長距離電力伝送システムを光線追跡手法により設計し、実際に試験を行った．さらにリード弁とマイクロ波電力伝送システムを用いた将来的な運用手法として既存のH-IIBロケットの一段目と固体ロケットブースターをマイクロ波ロケットで置き換えることを提案し、その実現性解析を行った．

2. リード弁式吸気機構の開発

リード弁は吸気口と圧力差によって動作するリードペタルからなり、圧力変化に対して受動的に開閉し吸気を行う．開閉のためのアクチュエータや制御系が不要で、パルスデトネーションエンジンや2ストロークエンジンの他にコンプレッサーなど様々な分野で使用されている．多くの場合、リード弁ではリードペタルの変位による塑性変形を防ぐため、リードペタルストッパーが採用されているが、マイクロ波ロケットでは推進機内部で入射マイクロ波と干渉するため使用することができない．そのため本研究ではリードペタルストッパーを用いずリード弁の塑性変形を防ぐため、最大応力の加わる固定端に向かってテーパ形状とし、また金属材料で降伏応力の高いチタンを採用した．

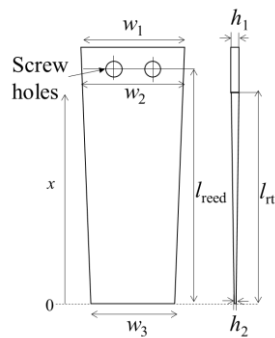


図1 チタンテーパリード弁

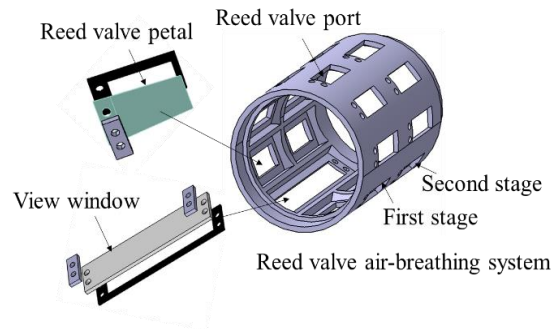


図2 16個のリード弁と推進機の組立図

図1に設計したリード弁を図2にリード弁を取り付ける推進機を示す．設計は静的解析に基づいて行った．推進機には円周方向に8個ずつ合計16個のリード弁が搭載されている．また推進機は観測窓を持ち内部のプラズマを観測できる．

実際に大電力のマイクロ波を用いて吸気性能の試験を行い、負圧に対して動作していることを確認した．リード弁の変位と推進機内部圧力の履歴、マイクロ波パルス毎の衝撃波伝播速度の上昇からそれぞれ部分充填率を見積もった結果、16個のリード弁の部分充填率は0.3 - 0.4程度であることが分かった．リード弁一個当たりの部分充填率は0.02程度であるため、50個のリード弁を搭載すれば部分充填率1を達成可能である．

3 大電力マイクロ波電力伝送システム

伝送ミラーと機体に搭載するテーパ管からなるマイクロ波電力伝送システムの開発を行った．ガウシアンプロファイルのビームは伝送距離がレイリー長を超えると発散角を持って発散していく．このシステムではビーム径を広げ、レイリー長を延伸することでレイリー長の範囲内で伝送を行う．図3にその概要図を示す．

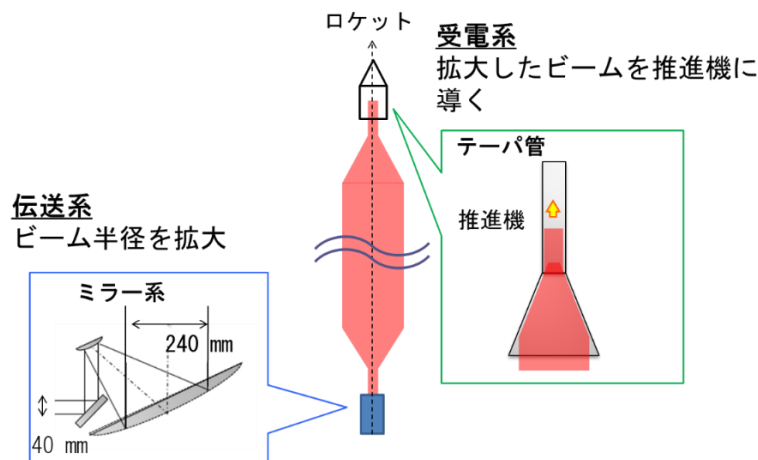
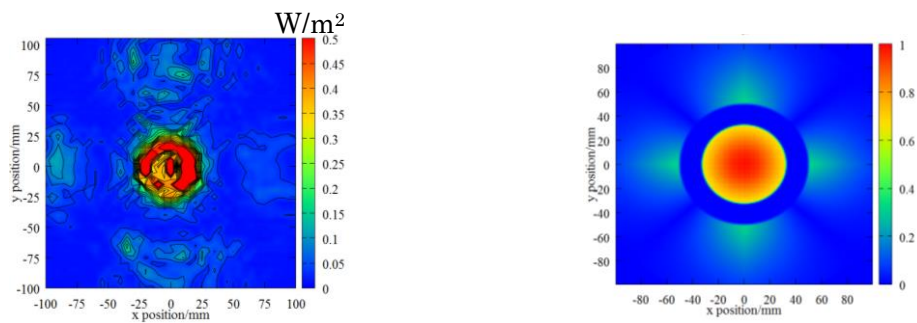


図3 マイクロ波電力伝送システムの概念図



(a) テーパ管出口での電力密度 (b) 計算で求めた電力密度
図 4 入射光のビームプロファイル(垂直偏波成分、テーパ管出口からの距離 100 mm)

伝送システムはサイズが波長に比べ十分に大きいので光線追跡法により設計した．発振器側の伝送ミラーシステムはビーム径を 20.4mm から 120 mm に拡大し、レイリー長を 0.7 m から 25.7m に延伸する．

機体側ではテーパ管型受電器を用いてマイクロ波を受電し、推進機に導く．テーパ管も、同様に光線追跡手法を使ってビーム源への反射がなく、テーパ管長さが最少となるよう設計した．結果としてテーパ管の入射直径、出口直径がそれぞれ 250 mm、60 mm のときの最少テーパ管長さは 387 mm となった．

光線追跡の結果を確認するため 94 GHz の発振器を用いて低電力試験を行った．図 4 に光線追跡法で計算したテーパ管出口でのビームプロファイルと計測結果の比較を示す．結果としてテーパ管出口の電力プロファイルは回折の影響で乱れているが、計算により定性的に分布を再現できている．

また電力伝送システムと一体のマイクロ波ロケット打ち上げシステムを開発し、大電力マイクロ波を用いた電力伝送試験を行った．図 5 に高速度カメラで撮影した推進機内部の電離波面の伝播の様子を示す．開発したマイクロ波電力伝送システムを用いて、プラズマの着火、電離波面の駆動に成功し、推力の生成に至った． 推力性能試験では、連続運転時の推力性能はマイクロ波パルスのデューティ比とともに増加するが、デューティ比がおおよそ 0.2 を超えるとテーパ管内部に消えずに残留したプラズマにより異常放電が発生し、マイクロ波エネルギーが推進機に伝送されず推力生成に至らないことが分かった．

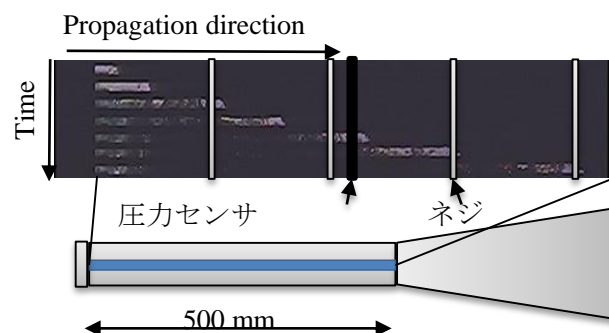


図 5 マイクロ波プラズマの着火と電離波面の伝播

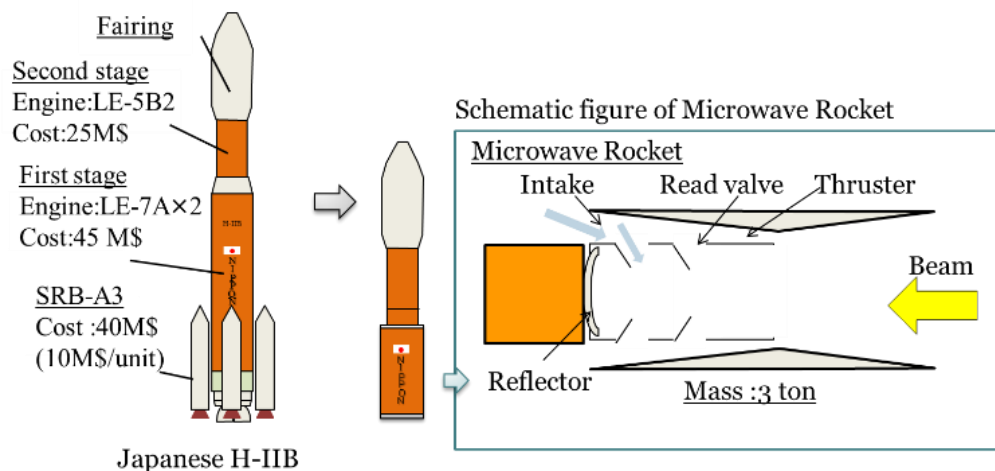


図 6 H-IIB の一段目と固体ロケットブースターのマイクロ波ロケットによる置き換え

4, マイクロ波ロケットと既存の化学推進のハイブリッドシステムの提案

将来的な大量物資輸送機としての優位性を具体的に示すとともに、ターゲットとすべき要素技術を明確にすることを目標に、マイクロ波ロケットを用いた将来的な宇宙輸送システムとしてH-IIBロケットの一段目と4機の固体ロケットブースターをマイクロ波ロケットに置き換えることを提案した。図6にその概念図を示す。マイクロ波ロケットの推力生成モデルを開発し打ち上げ軌道を計算することで積荷の輸送費用を見積もった。また打ち上げ軌道の計算のためパルスデトネーションエンジンサイクルの推力生成モデルを開発した。結果としてマイクロ波ロケットを用いることで全体の重量が従来のH-IIBロケットの1/5になり、77%の打ち上げ費用削減になることが分かった。

5、まとめ

マイクロ波ロケットの高性能化と大電力マイクロ波の長距離伝送の実現に向けてチタンテーパード弁とマイクロ波電力伝送システムの開発を行った。

リード弁の開発においては部分充填率0.4を達成し、50個のリード弁を用いることで部分充填率1を達成可能であることが分かった。

マイクロ波電力伝送システムの開発は光線追跡法を用いて行い、プラズマの着火、推力の生成に成功した。

さらに、これらのシステムを用いた将来的な運用方法の1つとしてH-IIBロケットの一段目と4機の固体ロケットブースターをマイクロ波ロケットに置き換えることを提案した。実現性解析の結果、マイクロ波ロケットを用いることで全体の重量が従来のH-IIBロケットの1/5になり、77%の打ち上げ費用削減になることが分かった。