

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系 先端エネルギー工学専攻  
2018年3月修了 修士論文要旨

## マイクロ波ロケットにおけるミリ波ビーム伝送方式の研究

学生証番号 47156068 氏名 柿沼 薫  
(指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words : Space Transportation, Beamed Energy Propulsion, Gyrotron, Wireless Power Transfer

将来的な大量輸送の需要に応える打上げ手段として、マイクロ波ロケットが検討されている。周囲大気を吸込んで推進剤とし、地上から照射されるミリ波ビームを推進エネルギーとするため、理論上燃費ゼロ（比推力無限大）であり、機体構造がきわめて簡素で、高ペイロード比が期待できる。地上に建設されたビーム発振装置は繰返し利用することができ、燃焼を用いないことから環境適合性が高く、推進剤を充填する必要がないために打上げ準備が容易となることも、低コスト・高頻度の打上げを可能とする要因である。マイクロ波ロケットを実現する鍵は機体にミリ波ビームを照射する地上システムの構築であり、地上設備の建設費を抑えるには効率的なエネルギービーム伝送技術が不可欠である。しかしながら想定されている最も規模の小さい打上げシナリオでも、位相固定アンテナアレイによる準光学ビーム伝送を採用すると、地上設備に1460 MWのミリ波出力が要求される。これは現在検討されているITERやDEMOといった核融合装置に比べても非常にハードルが高い。

本研究ではその打開策として考えられる、アクティブフェーズドアレイ送電アンテナによるミリ波ビーム径制御を検討した。飛行高度に合わせて送電アンテナの焦点距離を変化させることで、機体側の受電アンテナを小さく保ちつつ広い高度領域にわたり高伝送効率が確保できると期待される。位相固定アンテナアレイの場合と比較することでそのシステムメリットを評価することが目的である。

アクティブフェーズドアレイを実現するには、発振器であるジャイロトロンが発振位相を制御し、アンテナ手前で出力を合成・分配することが求められる。多くは研究開発段階であるが、近年ITERの開発に関連してMWレベルの導波路におけるミリ波帯の制御技術が精力的に研究されている。位相制御に関しては、ジャイロトロンにミリ波シグナルを入力することで出力周波数や位相をロックするインジェクション・ロック方式が提案されている。また出力制御に関しても、スイッチ装置などはジャイロトロンを用いたMWレベルでの実証がなされており、マルチプレクサのようなパワー制御についてもある程度の目処が立っているといえる。

解析にあたっては140 GHzを採用した。すでにMWクラスのジャイロトロンが存在しており、大気による減衰が比較的小さく、直進性も高いので、マイクロ波ロケットの応用に適している周波数のひとつである。ジャイロトロンで発振されたミリ波電力はコルゲート導波管を通してアンテナ系まで伝送される。導波管は最終的にパラボラアンテナの放射器に接続され、ビーム径を拡張、自由空間に放射される。一般的にアレイアンテナにおいて素子間隔が十分に小さければ、その放射指向性は開口面アンテナからの放射と同一となるので、パラボラアンテナの電界分布は半波長間隔・四角配列の平面アレイで再現する。そのパラボラアンテナを二次元最密充填で配列することでひとつのアンテナ面（パラボラアレイ）を形成する。射出部表面上における電界分布のエンベロープが所望のガウシアンビームとなるよう、各要素に位相と振幅とを与える。

電磁波伝播解析の結果、アンテナアレイ有効径の段階的な変化と、ビームウェスト径の連続的な変化との組み合わせにより、広い高度領域にわたり高効率の伝送の可能であることが確認された。メインロープの理論的なビームウェスト内に収まるパワーの割合は最大で39%である。またアンテナ要素数と可能なスポット径は反比例の関係にあり、1/100の集光度が必要な場合、径方向に100程度のアンテナ要素を配置すればよい。以上の考察をもとに打上げ軌道解析と地上設備のシステム構築を行ない、位相固定（焦点固定）のアンテナアレイを採用した場合と比較すると、地上設備に必要なミリ波出力は1/10程度となり、現在検討されている核融合原型炉MEMOと同程度の規模となる。また地上設備の建造コストは、現時点で推算不可能な制御装置の費用を除いて1/6程度となる。