

マイクロ波ロケットによる大量輸送

小紫公也 (こむらさききみや)

東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

277-8561 柏市柏の葉5-1-5

序

近年、世界各国においてビーミング推進の研究が進められている。ビーミング推進は、電磁波などを用いて外部から推進エネルギーを獲得するため、高いペイロード比を実現できるという特徴がある。また、一度建設したビーム発振源を非常に多数の回数にわたって使用することが可能であり、打上げシステムへ適用することにより大幅な打上げコストの低減を期待することができる。そのため、ビーミング推進は太陽発電衛星のような大規模な宇宙構造物の建設において、低コスト化を実現することができるため、有利な輸送手段であると考えられている。しかし、低コストの打上げを実現するには、打上げに必要な大電力のビーム発振基地の建設コストが所定の打上げ回数内で償還可能なレベルに抑える必要がある。もっとも盛んに研究が進められているレーザーを利用したビーミング推進（レーザー推進）の場合、一回当たりの打上げコストを現在のロケットよりも大幅に低下させるには、数万回近い打ち上げ回数を要するとされている。

少ない打上げ回数において打上げコストを十分に低く抑えるためには、ビーム発振基地の建設コストを抑える必要がある。そのため、効率のよい大電力ビームを出力できるマイクロ波帯の電子管をビーム源として利用することが検討されている。ビーミング推進におけるマイクロ波の利用は、1980年代には既に検討が開始されていたが、波長が長いことによる効率的な飛行体へのエネルギー供給が難しいとされ、打上げに必要なビームの径が巨大化する問題点が指摘されていた。この問題に対して、波長の短いミリ波帯のビームを利用することでの解決が可能であるとされていたが、この波長領域での発振源開発が遅れていたため、ミリ波対ビームのロケット推進の研究はほとんど存在しなかった。しかしながら、近年のミリ波帯の大電力発振源開発が進展したことにより、大電力ビームを実際に利用したマイクロ波ビーミング推進（マイクロ波ロケット）の研究が可能となった。

ジャイロトロン

ジャイロトロンはミリ波帯・テラヘルツ帯などの高い周波数の電磁波の発振を得意とするマイクロ波電子管の一種である。その発振原理は、磁界中の電子のサイクロトロン運動と電磁波の相互作用であるサイクロトロン共鳴メーザー効果（CRM）によるエネルギー変換を利用したものである。1950年代にCRMの原理が示され、1970年代以降、ミリ波帯電磁波の発振源としての開発が進められてきた。とりわけ、磁場閉じ込め方式の核融合炉において電子サイクロトロン加熱源として注目されて以降は、急速な開発・研究が進められた。2007年には、国際熱核融合実験炉（ITER）に向けて開発された170GHz帯ジャイロトロンについて、1MWの出力と1000秒以上の連続出力を達成した。他の多くのマイクロ

波電子管と同様に、比較的lowコストでの大電力ビームの発振が可能である。[1]

マイクロ波ロケット

大電力のミリ帯のマイクロ波ビームを用いたビーミング推進であるマイクロ波推進の研究が行われている。その推進原理は、次のように説明される。大電力のパルス状のマイクロ波ビームを集光することによりプラズマを発生させることにより高温・高圧を推進器内の生じさせることができる。このように生じた高エンタルピーの作動流体を排気することによってインパルス状推力を発生させることとなる。マイクロ波パルスを繰り返し投入することにより、推力発生サイクルを繰り返し、連続的な推力を発生させることが可能となる。このようなパルス状ビームのエネルギーをプラズマを介して推進力に変換する繰り返しパルス型（R P型）推進システムは、レーザー推進にも適用されている。2000年に米国で、レーザーによる70mの打上げ実験で用いられたLightcraftもこのような繰り返しパルス型システムである。[2]

東京大学では、日本原子力研究開発機構との共同研究でマイクロ波ロケットの研究をすすめている。2003年には、図1に示すような軽量のロケットモデルに単パルスを投入することで2メートルの飛行実験に成功した。この実験においては、ロケットモデルが発生させた推力を測定した。その結果、発生推力と投入エネルギーの比である運動量結合係数 C_m について、450N/MWという測定結果を得ている。この結果は、レーザー推進の実験結果と比較して、十分に比肩するものであるといえる。[3]

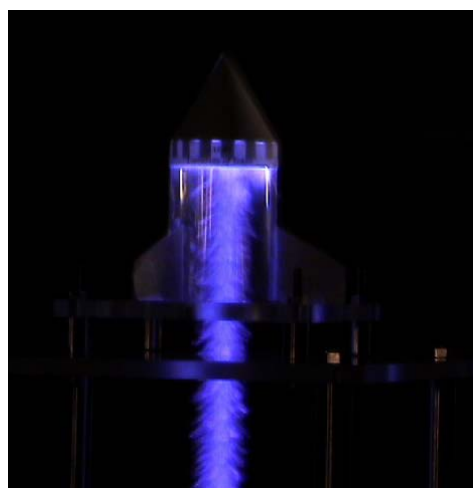


図1 マイクロ波ロケット

表1 各種推進器の推進性能

推進器種類	運動量結合係数
ベル型レーザー推進器	350 N/MW
Lightcraft	150 N/MW [2]
マイクロ波ロケット	450 N/MW [3]

マイクロ波プラズマによる衝撃波形成と推力発生

マイクロ波ロケット内部でのエネルギー変換過程は、マイクロ波による支持される大気圧プラズマの挙動によって支配される。マイクロ波プラズマはマイクロ波を吸収しながらその電離波面は照射方向に伝播することが知られている。170GHzのジャイロトロンを用いた実験の結果、マイクロ波ビームの電力密度が75kW/cm²を超えた場合、その電離波面は超音速で伝播することがあきらかになっている。このとき、電離波面で吸収されたマイクロ波エネルギーによる空気の等積加熱により急激な圧力上昇が生じて、衝撃波が電離波面部分に形成される。このような状況は、いわゆるデトネーションと呼ばれる現象に近く、マイクロ波エネルギーから流体エンタルピーへの変換効率が向上するため、推進性能が向上する。マイクロ波ロケットで用いられている円筒状の推進器では、円筒内を電離波面と

衝撃波が伝播することにより、高圧の空気が円筒内に形成される。この空気は、パルス終了後出口から排気されて推力を生じる。このような推力発生機構は、パルスデトネーションエンジンと似たものである。電離波面が超音速で伝播する条件下で高い性能となることが明らかになっている。[4]

大気圧マイクロ波プラズマ

大気圧中で大電力のマイクロ波ビーム上で形成されるプラズマは、図2に示すとおり魚の骨のような形状(Fishbone)を形成することが知られている。プラズマの構造は、衝撃波へのエネルギー変換に影響を及ぼしているものと考えられている。減圧条件下でのマイクロ波ロケットの研究においても、ある圧力以下において推力性能が急激に低下することが明らかになったが、これと同じ条件でプラズマの Fishbone 形状が消失することが知られている。

[5]このような構造が出現する要因として、マイクロ波による電磁場とプラズマとの相互作用が指摘されているが、その詳細なメカニズムに関しては、各国で研究が行われている段階である。

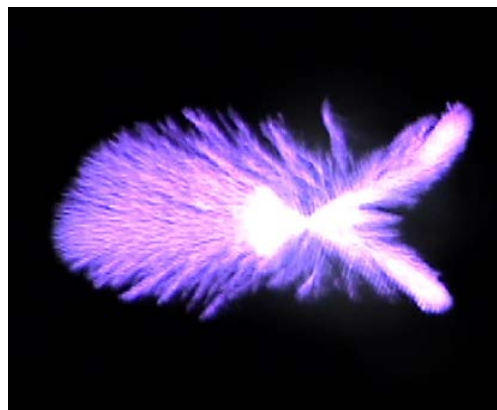


図2 大気圧マイクロ波プラズマ

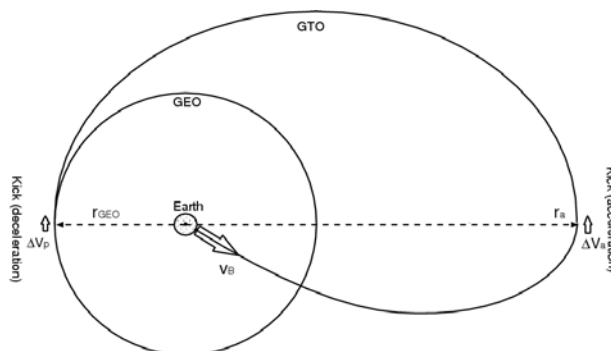


図3 ビーミング推進ロケットの打上げ軌道[6]

マイクロ波ロケットの打上げコスト

マイクロ波ロケットにおいては、大気中では大気を推進剤として利用できるためペイロード比を大幅に向上できると考えられており、打上げシーケンスにおいては、大気吸い込みモードであるパルスジェットモード、ラムジェットモードでの飛行がなされることが考えられている。打上げ初期段階の機速が低い条件においては、推進器からの排気によって生じる推進器内の負圧を利用した受動的な吸気によるパルスジェットモードで飛行する。機速がある程度確保できた段階で、機体前面からラム圧縮された空気を取り込むラムジェ

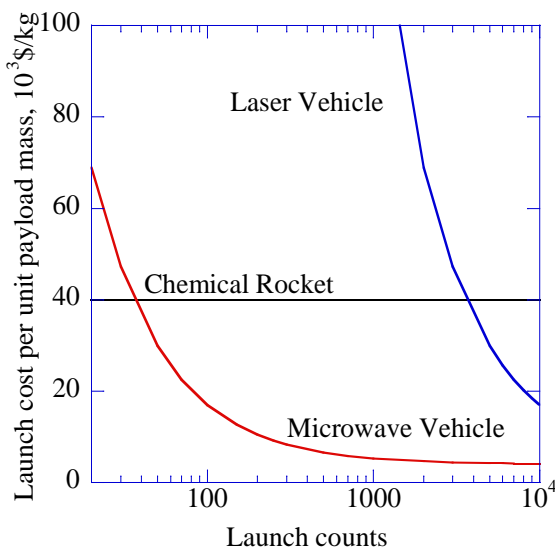


図4 レーザー推進器とマイクロ波ロケットの打上げコスト[6]

ットモードに移行する。飛行高度が高くなり雰囲気大気を推進剤として利用することが難しくなった段階より、搭載推進剤を利用したロケットモードに遷移する。ロケットモードにおいては高い比推力を確保できる推進剤を使用することができる。ビーミング推進による打上げを行うための軌道として、図 3 に示すとおり、ビームの制御を簡単にするため鉛直方向への打上げを行い、打上げ目標軌道より高高度の遷移軌道に投入する軌道が考えられている。

上記のような打上げシーケンスを元に、打上げコストの見積もりが行われた。図 4 に、ビーム源建設コストにもとづいた打上げ回数における打上げコストの算出結果が示されている。実際のミッションを検討するにあたり、100 トンの太陽発電衛星を静止軌道上に打ち上げるが想定された。1GW 出力のマイクロ波ビーム源を用いて 1 回あたり 100kg の打上げが可能なマイクロ波ロケットを利用する場合、打上げ回数が 1,000 回程度となり、この場合、従来型化学ロケットに比べて 1/10 のコストでの打上げが可能となる。一方で、レーザー推進の見積もりにおいては、100MW 出力のレーザーを建設し、1 回あたり 10kg のペイロード輸送により 10,000 回程度の打上げが必要となるが、コストは化学ロケットの半分程度となる。したがって、太陽発電衛星の打上げコストを大幅に軽減する手法として、マイクロ波ロケットは有効であると考えられる。[6]

まとめ

170GHz 帯大電力ジャイロトロンを用いたマイクロ波ロケットの研究が進められている。これまでに、飛行実験を含む推力発生の実験が行われ、レーザーを用いたビーミング推進システムと同程度の性能を得られることが確認された。マイクロ波ロケットの性能向上を目指して、大気圧マイクロ波プラズマによる衝撃波形成による推力発生過程の研究が行われると同時に、打上げシーケンスの検討、またコストの見積もりなどが研究された。これまでの研究よりマイクロ波ロケットは、太陽発電衛星のような巨大構造物の建設において、低コストの打上げ手段として活用できると考えられる。

参考文献

- [1] Sakamoto, K., Kasugai, A., Takahashi, K., Minami, R., Kobayashi, N., and Kajiwara, K., *Nature Physics*, Vol. 3, No. 6, 2007, pp.411-414
- [2] Myrabo, L. N., *AIAA Paper 2001-3798*, 2001
- [3] Nakagawa, T., Mihara, Y., Komurasaki, K., Takahashi, K., Sakamoto, K., and Imai, T., *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, 2004, pp. 151-153
- [4] 小田 靖久, 小紫 公也, 高橋 幸司, 春日井 敦, 今井 剛, 坂本 慶司, *電気学会論文誌 A*, Vol.126, No.8, 2006, pp.807-812
- [5] 小田靖久, 小紫公也, 高橋幸司, 春日井敦, 坂本慶司, *プラズマ核融合学会誌*, Vol.83, No.3, 2007 pp.296-299
- [6] Katsurayama, H., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., *Journal of Space Technology and Science*, Vol. 20, No.2, 2005, pp.32