

マイクロ波ロケットの要素技術開発

Development of Elemental Technologies for Microwave Rocket

○田畑 邦佳・エンギユイエン フロリアン・原田 祐貴・中村 友祐・小紫 公也・
川嶋 嶺・小泉 宏之（東京大学）

○Kuniyoshi Tabata・Nguyen Florian・Yuki Harada・Yusuke Nakamura・Kimiya Komurasaki・
Rei Kawashima・Hiroyuki Koizumi (The University of Tokyo)

Abstract

This paper introduces elemental technologies for *Microwave Rocket*, which is a low-cost launcher that gains its propulsive energy from outside of the rocket. Some of already developed technologies for millimeter-wave oscillating facilities in nuclear fusion studies can be employed for ground facilities of *Microwave Rocket*. On the other hand, technologies which are uniquely necessary for *Microwave Rocket* launches have to be developed in the future. As for the vehicle itself, studies have been conducted on physics of millimeter-wave discharge plasma and air-breathing systems, which technologies are of much importance for thrust generation. The next challenges are to develop an attitude control system and a heat resistance design.

1. はじめに

ビーミング推進は、レーザーやマイクロ波などの電磁波によって、機体に遠隔からエネルギーを供給することで飛行する推進方法である。1972年 Kantrowitz によって初めて提唱され、¹⁾ 現在まで様々な機関で研究が行われてきた。マイクロ波ロケットは、マイクロ波に比べて波長が短くより長距離の伝送を可能にするミリ波をエネルギー源に飛行し、パルスデトネーション方式で推力を得る推進器である。現在の化学ロケットに比べて打ち上げコストを大幅に削減することが期待される打ち上げロケットであり、その特徴を3点紹介する。まず一つ目に、その推進剤には機体周りの空気を用いるため推進剤を搭載する必要がなく、高ペイロード比を実現できる。二つ目に、ミリ波ビームの発振基地を地上に設置するため、メンテナンスが容易であり、何度でも繰り返し利用することができる。三つ目に、パルスデトネーション方式のエンジンを用いるため、化学ロケットに用いられる高圧ターボポンプなどの複雑な機構を必要とせず、安価に機体を製造することができる。以上の特徴から、マイクロ波ロケットは、現在の打ち上げロケットに比べて大幅なコスト削減が可能である。

ミリ波発振装置にはジャイロトロンを用いる。ジャイロトロンは、磁場中でサイクロトロン運動を行う電子ビームのエネルギーを、サイクロトロン共鳴メーザーという現象を用いてミリ波エネルギーに変換する。マイクロ波に比べてより波長の短いミリ波を大電力で発振することが可能で、現在は主に核融合研究においてプラズマ加熱のために用いられている。²⁾ 過去の研究で、ジャイロトロンを用いた推

力生成原理の実証が行われている。2003年中川らは、量子科学技術研究開発機構QSTの1MW級ミリ波発振装置ジャイロトロン1基を用いて、10gの機体をおよそ2mまで飛行させることに成功した。³⁾ さらに2009年には繰り返しミリ波を照射することで持続的に推力を生成する実験が行われ、126gの機体がおよそ1.2mまで打ちあがった。⁴⁾

このように実験室レベルでの打ち上げ実証はされたが、現在の化学ロケットにとってかわることのできる打ち上げシステムとなるには様々な課題が残る。本稿では、マイクロ波ロケットの技術成熟度レベルを引き上げるために必要となる技術を、現在までの本研究室における研究成果とともに紹介する。ミリ波発振基地に求められる技術と、マイクロ波ロケット機体側に求められる技術の2つの観点から説明していく。

2. ミリ波発振基地に必要な技術

本節では、まずマイクロ波ロケットを打ち上げるのに必要なミリ波発振基地に求められる技術や性能について説明する。ミリ波発振基地としては大きく分けて3つの設備、技術が必要であると考えられる。それらは、打ち上げの際に用いる電力を貯蔵しておく設備、ミリ波発振設備をクラスター化する技術、それぞれのジャイロトロンから発振されたミリ波を合成・分配する技術である。

過去の研究で、マイクロ波ロケットの軌道解析が行われた。現在のH-IIBロケットの代替として、第1段にマイクロ波ロケットを、第2段にH-IIBロケットの2段目を用いる輸送システムが考案された。⁵⁾ 1回の打ち上げで数千GJ

のエネルギーが必要になることが分かっている。また、第1段目にマイクロ波ロケットを、第2段目にNASAのParkin博士らが提案したマイクロ波熱交換型ロケット⁹⁾を用いる、比較的小規模な打ち上げシステム⁷⁾においても少なくとも数GJのエネルギーが必要である。どちらの場合においても単位時間あたりに必要なパワーはとても大きく、エネルギー貯蓄設備を建設することが必要である。QSTにおける核融合研究において用いられている、フライホイールなどの既存設備の転用が可能である。⁸⁾しかしながら、フライホイールの貯蓄能力は高々8GJほどであり、数千GJのエネルギーを貯蔵するには多数のフライホイールが必要になり、それだけでもミリ波発振基地の大きさは巨大になる。そこで、現在研究が進んでいる20GJのエネルギーが貯蔵可能とされる超電導エネルギー貯蔵システムSMESなどを用いることが有効となると考えられる。

過去の軌道解析によって打ち上げには、柿沼らの場合で50MW、福成らの場合で188GW必要になることが示されている。現在日本で開発されているジャイロトロンはエネルギー変換効率50%で、最大1~2MWの出力が可能である。⁹⁾すなわち、数多くのジャイロトロンをクラスター化することでミリ波発振設備の建設が可能である。クラスター化する際には、ジャイロトロンの超電導磁石の漏洩磁場が他のジャイロトロンの電子ビームに影響を与える恐れがあり、ジャイロロン相互間距離に関して制約条件が生まれる。国際熱核融合実験炉ITER計画においては20MWの出力を確保するために、24本のジャイロトロンをクラスター化して用いる構想が既に練られている。ここで用いられている条件を適用することで、ロケット打ち上げ用ミリ波発振設備を建設することが可能である。軌道解析によって算出された打ち上げに必要なパワーを考慮すればミリ波発振設備が巨大なものになることは避けられない。ジャイロトロン発振効率を改善することによる設備縮小が可能である。

クラスター化されたジャイロロンより発振されたミリ波は、空間伝送を行うアンテナまで伝送される際に、位相調整、パワー分配・合成が必要である。mWレベルの低電力ミリ波の出力制御コンポーネントは既に存在するが、MW級大電力ミリ波に関するコンポーネントはまだまだ少ない。位相制御に関しては、G. Denisovらによってジャイロトロンに低電力ミリ波を投入することでその周波数や位相をロックする技術が提案されている。¹⁰⁾これら技術のさらなる研究開発が必要である。

3. マイクロ波ロケット機体側の要素技術開発

本節では、地上設備から発振されたミリ波を効率的に推力に変換し飛行するために必要な要素技術について紹介する。大きく分けて5つの課題が存在する。ミリ波受電器設計、機体の姿勢制御システム設計、ミリ波放電物理の解明、空気吸い込み機構設計、耐熱設計である。空間伝送によって広がるミリ波を推進器内部に導くためにミリ波受電器が

必要である。また、機体の姿勢が不安定な状態では、機体を適切な軌道に投入することが難しいうえ、そもそもミリ波ビームを受けることができない。レーザーデトネーション推進器であるライトクラフトにおける姿勢制御に関する研究は過去に行われたが¹¹⁾、マイクロ波ロケットにおいてははまだ検討されておらず、今後の研究が必要である。推進剤となる大気を効率よく推進器内に取り込むために必要な空気吸い込み機構設計や、推力生成の核となるミリ波放電プラズマの解明に関する研究は行われている。これらに関しては、次の章から詳しく説明していく。爆発的推力が得られるパルスデトネーション方式の推力生成原理を用いるため、推進器の耐熱設計が不可欠である。今後の研究課題の一つとある。

福成らは、効率よく大気を推進器内に取り込むためのリード弁を開発した。¹²⁾一般的にリード弁の塑性変形を防ぐためにストッパーが用いられる。しかしながら、マイクロ波ロケットにおいては推進器内部でミリ波がストッパーと干渉する可能性があるため、ストッパーを用いない。リード弁形状をテーパ形にすることで曲げ変形に対する強度を強化した。さらに、福成らが開発したミリ波受電器では、伝送されたガウシアンミリ波をそのプロファイルを変化させずに推進器内部に取り込むことが可能である。¹³⁾過去に行われたリード弁、ミリ波受電器搭載推進器においてはその推力生成が確認されている。

高高度飛行時には、機体周辺の空気密度が下がるため推進器内部に取り込むことのできる空気量が減少し、推力低下が危惧される。そこで、圧縮して空気を取り込むことのできるプレナム室を推進器周りに搭載することが考えられている。大気をより多く吸い込むことができる一方で空気抵抗は増大してしまうので、最適なプレナム室大きさが決まる。マイクロ波ロケットが高度10km、速度マッハ2で飛行しているときの、プレナム室、推進器内部の流れをCFD計算により再現し、プレナム室大きさの最適化とその推進性能評価に関する研究が行われた。¹⁴⁾

ここではミリ波放電物理について説明する。ミリ波を用いた大気放電に関する研究は、実験、数値計算によって多くなされてきた。^{2, 15-18)}マイクロ波ロケットにおいては、ミリ波を大気伝送する際に絶縁破壊が起きないように、絶縁破壊閾値に比べてかなり低いビーム強度でのミリ波伝送が必要である。このような条件をunder-critical条件と呼んでいるが、種電子が存在すればそのような条件でも放電が起きることが確認されている。マイクロ波ロケット推進器においては、推進器閉口端における集光器が種電子を生成する役割を担っている。集光器においてunder-critical条件のビーム強度で伝送されてきたミリ波が集光され絶縁破壊閾値を超え空気の絶縁破壊が起きる。生じたプラズマはunder-critical条件のミリ波エネルギーを吸収しつつ、推進器閉口端に向かって衝撃波を伴いながら伝播していく。この現象をミリ波支持デトネーション(Millimeter-wave supported detonation: MSD)と呼んでいる。この際、効率的にミリ波エネルギーが推力に変換される。推進器内部での

圧力上昇はプラズマによる重粒子加熱率によって決まり、加熱率はプラズマ波面進展速度に大きく影響を受ける。そこで、圧力上昇を最大にする最適なビーム強度を調べるためミリ波放電プラズマ物理の解明に関する研究が行われている。28 GHz ジャイロトロンを用いた過去の研究では、様々な雰囲気圧力、ビーム強度に対して、レーザー放電プラズマにおいて見られなかったミリ波放電プラズマ特有のフィラメント構造が確認されている。¹⁸⁾ また、過去に QST ジャイロトロンを用いて、フラットトップのプロファイルを持つ 170 GHz、1.5 GW/m² ミリ波を照射する実験が行われた。この実験では、ミリ波の電界方向に、ある一定間隔でプラズマの粒が並び、それらがミリ波源に向かって進展していく現象が確認された。この構造を櫛状構造と呼んでいるが、中村らはこの構造を数値計算によって再現することに成功している。¹⁹⁾ ただ、この数値計算においては under-critical 条件におけるプラズマ生成を再現するために、Bolsig+ で得られる値よりも大きいイオン化周波数を用いられている。そのため、この解は非物理解を与えている可能性がある。今後は under-critical 条件において放電が起きる原理を解明することを含め、より詳細なミリ波放電プラズマの現象理解が必要になる。

4. まとめ

マイクロ波ロケットはミリ波を用いたビーミング推進であり、現在の化学ロケットに比べ大幅なコスト削減が期待されている。過去に実験室レベルでの打ち上げ試験が行われ、ミリ波支持デトネーションを用いた推力生成原理が実証された。本稿では、既存のロケットに匹敵する輸送能力を持つロケットを打ち上げるために必要な要素技術とその開発状況について紹介した。

ミリ波発振基地に関しては、核融合研究において既に用いられている技術の転用が可能な設備もある。一方で、大電力のミリ波出力や位相を制御する技術などは今後の研究開発が期待される。ミリ波発振基地のサイズを抑えるには、現状より多くのエネルギーを貯蓄できるシステムや、ジャイロトロンの高効率発振を実現することが有効である。

マイクロ波ロケット機体に関しては、空気吸い込み機構設計やミリ波放電プラズマ物理の解明、ミリ波受電器に関する研究は行われている。しかしながら、機体の姿勢制御システムや耐熱設計に関する研究はあまり行われておらず、今後の研究が必要である。

参考文献

- 1) Kantowitz, A.R.: Propulsion to Orbit by Ground-Based Lasers, *Astronautics and Aeronautics*, **10**, 5 (1972), pp. 74-76.
- 2) 小田靖久, 小紫公也, 高橋幸司, 春日井敦, 坂本慶司: 大電力ジャイロトロンを用いたマイクロ波ロケットの推進性能の大気圧力依存性, *J. Plasma Fusion Res.*, **83**, 3 (2007), pp. 296-299.
- 3) Nakagawa, T., Mihara, Y., Komurasaki, K., Takahashi, K., Sakamoto, K. and Imai, T.: Propulsive

- Impulse Measurement of a Microwave-Boosted Vehicle in the Atmosphere, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **41** (2004), pp. 151-153.
- 4) Oda, Y., Shibata, T. and Komurasaki, K.: Thrust Performance of a Microwave Rocket Under Repetitive-Pulse Operation, *Journal of Propulsion and Power*, **25** (2009), pp. 118-122.
- 5) Fukunari, M., Arnault, A., Yamaguchi, T. and Komurasaki, K.: Replacement of Chemical Rocket Launchers by Beamed Energy Propulsion, *Applied Optics*, **53** (2014), pp. I16-I22.
- 6) Parkin, K.L. and Murakami, D.D.: An Overview of the NASA Ames Millimeter-Wave Thermal Launch System, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2012.
- 7) Kakinuma, K., Fukunari, M., Yamaguchi, T., Nakamura, Y., Koizumi, H., Komurasaki, K. and Parkin, K.: Two-Stage-To-Orbit Transporting System Combining Microwave Rocket and Microwave Thermal Rocket for Small Satellite Launch, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, **14**, ists30 (2016), pp. Pb_99-Pb_103.
- 8) Kajiwara, K. et al.: Effect of the stray magnetic field on the gyrotrons for ITER, 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW 2009), Busan, Korea, 2009.
- 9) Sakamoto, K., Kasugai, A., Kajiwara, K., Takahashi, K., Oda, Y., Hayashi, K. and Kobayashi, N.: Progress of high power 170 GHz gyrotron in JAEA, *Nuclear Fusion*, **49** (2009) 095019_1 - 095019_6.
- 10) G.G. Denisov and A.G. Litvak: New Results of Development of Gyrotrons for Plasma Fusion Installations, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan (2016).
- 11) 高橋聖幸, 大西直文: レーザー推進機のビームライティング性能に関する数値計算, 第 43 回流体力学講演会, 東京, 2011.
- 12) Fukunari, M., Yamaguchi, T., Komurasaki, K., oda, Y., Ikeda, R., Kajiwara, K., Takahashi, K. and Sakamoto, K.: Air-Breathing System Using Reed Valve for Pulse Detonation Microwave Rocket, *Trans. JSASS Aerospace Tech.*, **14** (2016), pp.363-371.
- 13) Fukunari, M., Wongsuryrat, N., Yamaguchi, T., Nakamura, Y., Komurasaki, K. and Koizumi, H.: Design of a Millimeter-Wave Concentrator for Beam Reception in High-Power Wireless Power Transfer, *J Infrared Milli Terahz Waves*, **38** (2017), pp. 176-190.
- 14) 田畑邦佳, Nguyen Florian, 原田祐貴, 中村友祐, 柿沼薫, 福成雅史, 小紫公也, 小泉宏之: マイクロ波ロケットにおけるマッハ 2 飛行時の空気吸気性能に関する数値計算, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017.
- 15) A. L. Vikharev, V. B. Gil'denburg, S. V. Golubev, B. G. Eremin and O. A. Ivanov: Nonlinear dynamics of a freely localized microwave discharge in an electromagnetic wave beam, *Sov. Phys. JETP*, **67**, 4 (1988), pp. 724-728.
- 16) Y. Hidaka, E. M. Choi, I. Mastovsky, M. A. Shapiro, J. R. Sirigiri and R. J. Temkin: Observation of Large Arrays of Plasma Filaments in Air Breakdown by 1.5-MW 110-GHz Gyrotron Pulses, *Physical Review Letters*, **100**, 035003 (2008).
- 17) J. P. Bouef, B. Chaudhury and G. Q. Zhu: Theory and modeling of Self-Organization and Propagation of Filamentary Plasma Arrays in microwave Breakdown at Atmospheric Pressure, *Physical Review Letters*, **104**, 015002 (2010).
- 18) Harada, Y., Nakamura, Y., Komurasaki, K. Minami, R., Kariya, T., Imai, T., Shimamura, K. and Fukunari, M.: Structural Change of Plasma at Various Ambient Pressure in 28 GHz Millimete-Wave Discharges, *Frontier of Applied Plasma Technology*, **10**, 1 (2017), pp. 7-10.

- 19) Nakamura, Y., Fukunari, M., Yamaguchi, T., Komurasaki, K. and Koizumi, H.: Numerical Analysis of Comb Shaped Plasma Propagation in Millimeter-Wave Discharge under Atmospheric Pressure, 47th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Washington D.C., U.S, 2016.