

マイクロ波ロケット用 94 GHz ジャイロトロン出力向上への試み

An Attempt to Increase the Power of a 94 GHz Gyrotron for Microwave Rocket Development

○高瀬 芳貴(東大)・田畑 邦佳・真鍋 亜佑斗・森 映樹・小紫 公也・関根 北斗・小泉 宏之

○Yoshiki Takase (The University of Tokyo)・Kuniyoshi Tabata・Ayuto Manabe・Eiki Mori・Kimiya Komurasaki・Hokuto Sekine・Hiroyuki Koizumi

Abstract (概要)

Microwave Rocket is a space transportation system that generates thrust by utilizing millimeter-wave energy oscillated from gyrotrons on the ground. The University of Tokyo has developed a gyrotron with a frequency of 94 GHz and RF output power of 600 kW for millimeter-wave discharge experiments. The gyrotron tube axis was aligned with magnetic field axis and RF output power was improved by a factor of about 1.6. RF output power and oscillation efficiency were reproducible for a stable beam current and cathode voltage. In addition, output voltages of a pyro-electric detector at various oscillation parameters were compared, and high efficiency oscillation range at a magnetic flux density of 3.51 T was confirmed. RF output power was improved by a factor of 5.25 at a cathode voltage of 44.7 kV and beam current of 22.1 A, compared with that after alignment of the gyrotron tube's axis.

1. はじめに

マイクロ波ロケットは、地上のビーム基地から照射されるミリ波のエネルギーを推進機内部で圧力に変換し推力を得るビーミング推進機である^{1,2)}(図1)。ビーム基地では大電力(MW級)ミリ波源であるジャイロトロンをアレイ化することで、ロケット打ち上げに必要なGW級の出力を達成することができる^{1,3-5)}。マイクロ波ロケットは次の3つの理由から、宇宙空間への高頻度大量物資輸送に適した宇宙輸送システムとして期待されている。1つ目は、空気吸い込み式により周辺の空気を推進剤として利用するため、搭載推進剤が不要な点である。これにより、従来の化学ロケットに比べて高いペイロード比の実現が可能である。2つ目は、地上のビーム基地の再使用が可能であるため、打ち上げを繰り返すことで建設コストを償却できる点である。3つ目は、パルスデトネーションエンジンの採用によりターボポンプなどの複雑な機構を必要としない点である。機体構造が簡素になれば、その分軽量化やコストカットに期待できる。

パルスデトネーションエンジンにおける推力生成サイクルでは、推進機内部で集光したミリ波のエネルギーが空気の絶縁破壊を誘発し、その結果生じるプラズマがデトネーションを駆動することで高圧気体を推進機外部へ排気する。マイクロ波ロケットの推進性能はミリ波支持デトネーションの伝播速度および衝撃波構造に依存するが、その詳細については明らかになっていない^{6,7)}。現象解明のためにはミ

リ波放電プラズマに関する多くの実験データが必要であり、実験から得た知見を用いて現象を適当にモデル化することは、マイクロ波ロケットの推進性能評価にも非常に有効な手段である。そのため東京大学ではマイクロ波ロケット用94 GHz ジャイロトロン(UT-94)(図2)を開発し、大気圧ミリ波放電およびそれに伴うデトネーション現象を実験的に観測することで推力生成メカニズムを明らかにするべく研究を行っている。



図1 マイクロ波ロケットの打ち上げイメージ²⁾



図2 東大ジャイロトロン UT-94

2. 東大ジャイロトロン UT-94

2.1 UT-94 の開発 UT-94 の設計諸元を表1に示す.

表1 UT-94 の諸元

周波数	94 GHz
最大 RF 出力 (計算値)	600 kW
最大変換効率	37%
最大陰極電圧	65 kV
最大ビーム電流	25 A
共振器発振モード	TE _{10,8}
出力モード	Gaussian-like

発振周波数である 94 GHz の選定理由としては大気での透過率が高い周波数帯 (大気窓) に属することや、雲レーダーによる地上からの空間放射実績があることが挙げられる⁶⁻⁸⁾。94 GHz という周波数は大気中での長距離伝送に対して非常に有効でありながら、大気圧下での放電現象およびそれに伴うデトネーション現象の観測実験はこれまで行われてこなかった。そのためマイクロ波ロケットへの適用のためにも、これらの現象解明が必要とされる。

最大 RF 出力に関しては先行研究⁹⁾に基づき、プラズマ構造を観測する直径 10 波長程度の円形断面において、デトネーションの駆動に必要な平均電力密度 1 GW/m² を実現できる値として 600 kW に決定した^{6,7)}。

UT-94 の電力供給系には 0.85 μF のコンデンサー (東栄電機), 高電圧電源 (WK Series; Glassman High Voltage Inc.), IGBT スイッチ (SEM150GB17E4; Semikron) から構成される高圧パルス回路が用いられ、ダミー抵抗による動作確認試験が行われた^{6,7,10)}。また、これまでに行われた開発試験として超電導磁石 (Superconducting Magnet: SCM)

(JMTD-8T100; ジャステック) の磁場分測定, UT-94 の電子ビーム引き出し試験, ミリ波発振試験, ビームプロファイル測定, 大気圧放電プラズマの進展観測実験などが報告されている^{7,10-13)}。

SCM の磁束密度 B_c については, 計算結果および Pyro 素子を用いた出力強度の測定結果から, 設定陰極電圧 40 kV

において RF 出力電力が最大となる値として 3.51 T に設定している¹⁴⁾ (図3)。

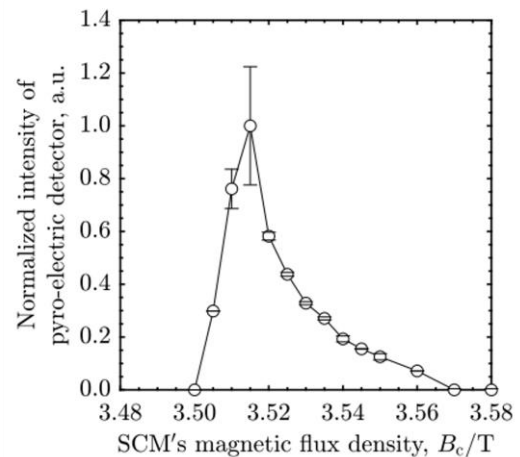
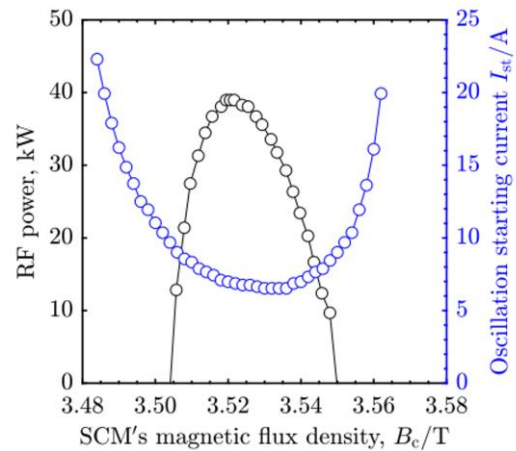


図3 RF 出力電力と発振開始電流 I_{st} の SCM 磁束密度 B_c に対する依存性の計算結果 (上) と RF 出力電力の B_c 依存性に関する実験結果 (下)¹⁴⁾

2.2 UT-94 の発振原理 UT-94 の構成図を図4に示す。陰極である電子銃への電圧印加は, コンデンサーに溜めたエネルギーを用いたパルス入力によって行う。本ジャイロトロンではバリウム含侵型のタングステン電子銃 (キャノン電子管デバイス) を使用しており, 電圧印加により熱電子放出が行われる。放出された電子は超電導コイルが生成する磁力線に沿ってジャイロトロン管内部を進み, 陽極であるコレクターで捕集される。途中で通過する空洞共振器において, 電子のサイクロトロン運動が有するエネルギーの一部が高周波のエネルギーに変換される (サイクロトロン共鳴メーザー原理)。このときに発振されるミリ波のモードは TE_{10,8} であるが, ジャイロトロン管内蔵のモード変換ミラーによってガウシアンモードに変換される。

出力窓からジャイロトロン外部へ取り出される RF 出力電力は, 電子と電磁波間のエネルギー変換効率 η_e , 共振器から出力窓までの伝送効率 η_r , 陰極電圧 V_K , ビーム電流 I_B の積で表すことができる。そのため, 変換効率 η_e の改善は出力向上にとって効果的な方法である。

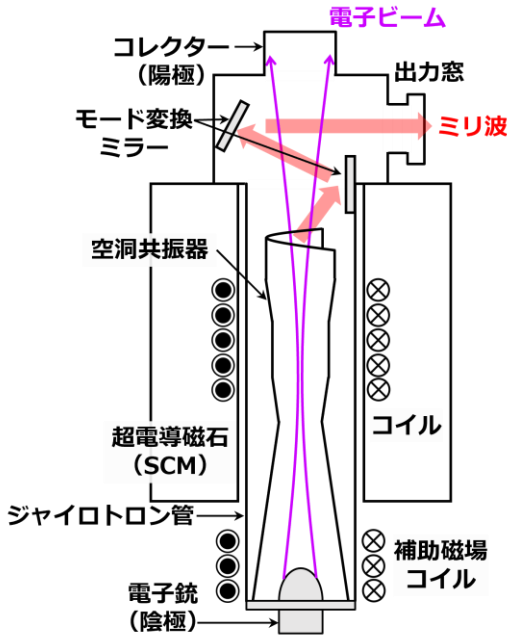


図 4 東大ジャイロトロン UT-94 の構成図

2.3 ジャイロトロン管の軸合わせと発振効率 空洞共振器内部を電子ビームが通過するべき最適な軌道はジャイロトロン管の設計時に決定されている。UT-94 の場合は $TE_{10,8}$ モードが他の競合モードから孤立し、結合係数が最大となるようなビーム半径を最適な軌道として設計している¹⁰⁾ (図 5)。したがって、環状ビームの中心軸を決定する SCM の磁気軸と空洞共振器を内蔵するジャイロトロン管の軸を揃えることで、空洞共振器内での最適なビーム軌道を実現することができる。

SCM 上面の系の様子を図 6 に示す。ジャイロトロン管の位置を(a)軸方向に動かしながら Pyro 素子による相対的な出力強度測定を行った結果、発振効率に山なりのピークを持つ位置依存性を確認した¹⁵⁾ (図 7)。ジャイロトロン管軸と SCM の磁気軸とのずれに伴う結合係数¹⁶⁾の減少傾向¹⁰⁾ (図 8) から、得られた位置依存性の形状については妥当性があるものと考えられる。一方で、図 7 では測定日によって発振効率の違いも見られた。図 7 中 A, B, C は、ミリ波発振時のジャイロトロン管の位置および設定陰極電圧について同条件とみなすことができる 3 点であるが、得られた発振効率には大きな差異が見受けられる。これらは陰極電圧 V_k やビーム電流 I_B のばらつきが原因であると考えられ、出力測定における再現性の検討は重要な課題として挙げられている¹⁵⁾。

以上から本研究では、ジャイロトロン管の軸合わせを行うとともに、Pyro 素子を用いた出力強度測定における再現性を評価した。また、UT-94 の出力向上および高効率化を目指し、異なる発振条件に対する Pyro 素子の出力電圧を相対的に比較することで、最適な発振パラメータに関する検討を行った。

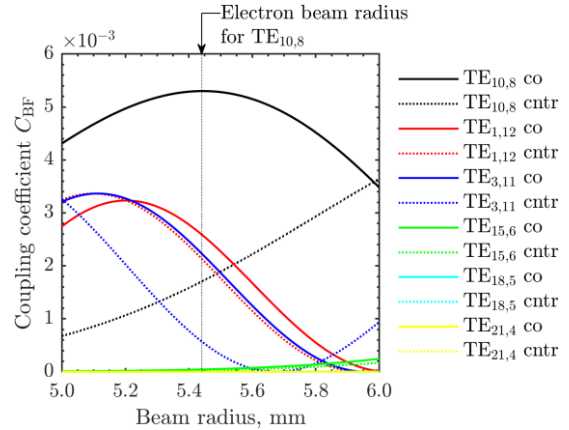


図 5 競合モードの結合係数¹⁴⁾

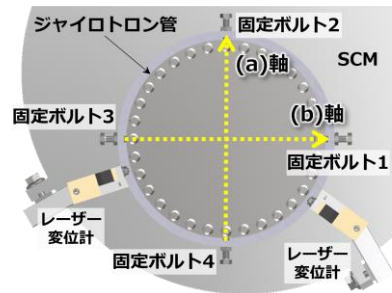
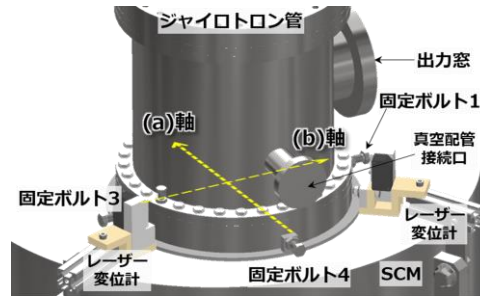


図 6 SCM 上面の系の構成図 (上) と同じ系を上から見たときの様子 (下)

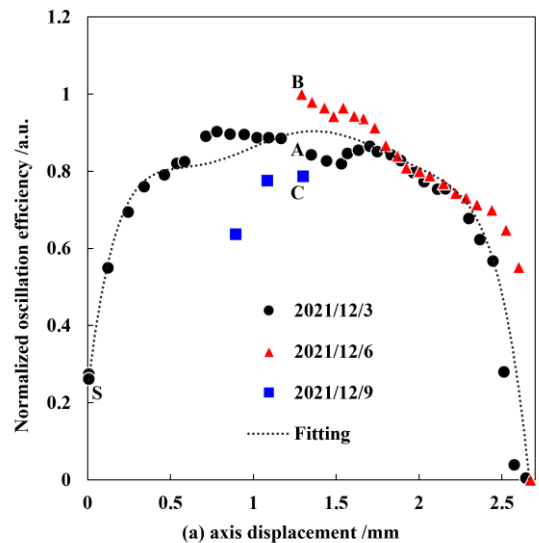


図 7 (a)軸方向における発振効率¹⁵⁾

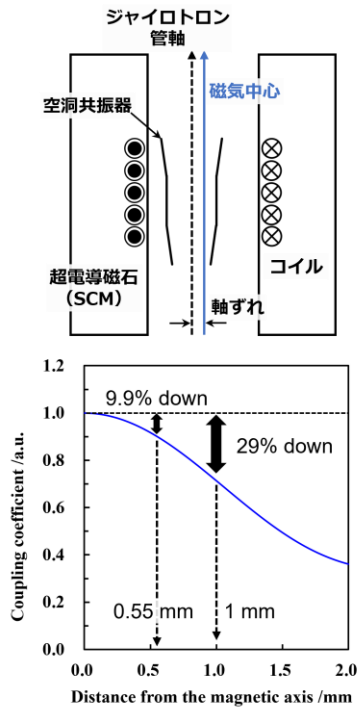


図 8 軸ずれの概念図 (上) とそれに伴う結合係数の減衰 (下) ¹⁰⁾

3. 実験結果

3.1 ジャイロトロン管の位置調整 ジャイロトロン管の位置調整には図 6 に示す系を用いた。ジャイロトロン管の周囲には 4 本の固定ボルトを 90 度毎に配置しており、ジャイロトロン管の位置をボルト軸方向に動かすことができる。ここで、固定ボルト 2 と 4 のボルト軸を (a) 軸、固定ボルト 1 と 3 のボルト軸を (b) 軸と定義した。

図 7 に示した発振効率の位置依存性が (a) 軸、(b) 軸のどちらにおいても適用可能であると、発振効率が最大となる位置を見つけることを目的として以下の操作を行った。(I) (b) 軸方向にジャイロトロン管の位置を移動させながら各位置でミリ波発振 (設定陰極電圧 40 kV) を行い、Pyro 素子の出力電圧を測定した。(II) 発振効率が (b) 軸上で最大となる位置から (a) 軸方向にジャイロトロン管を動かし、(I) と同様の操作を行った。(III) 発振効率が (a) 軸上で最大となる位置でジャイロトロン管を固定した。

Pyro 素子は UT-94 のビーム軸上に設置し、ジャイロトロン管の移動距離は SCM 上面に設置した 2 台のマイクロレーザ測距センサ (HG-C1030; パナソニック) を用いて 0.01 mm の精度で計測した。軸ずれによる結合係数の減少率を 10% 未満とするために、軸合わせの目標精度を 0.55 mm 以内とした。また、高電圧印加によるジャイロトロン管内部の真空度悪化を最小限に抑えるため、移動点と発振回数を可能な限り減らして操作を行った。

ジャイロトロン管の位置に対する発振効率を相対的に比較した (図 9)。図 9 中の番号は各点への移動順を表し、移動点の間隔は最大で 0.38 mm である。x 軸および y 軸の定義については図 10 の通りである。図 9 において、発振効

率が最大となった位置 (図 9 中⑤) と最終位置 (図 9 中⑨) との間には 0.15 mm の間隔があるが、目標精度の 0.55 mm 以下であるため、(III) の操作は問題なく実行できたと判断した。最終位置では、軸合わせ前と比較して RF 出力電力および発振効率がおおよそ 1.6 倍に向上した。

図 9 における移動点①～⑨に対して各点で 3 回ずつ、計 27 回のミリ波発振を行った。各位置での発振効率、 V_K 、 I_B の測定結果を図 11 に示す。RF 出力電力、発振効率ともに再現性が高く、両者は非常に類似した分布を示すことが確認できた。これは各位置での入力電力が安定しており、加えて合計 27 回の発振の中でも値が大きく変動していないことが要因である。実際に V_K と I_B は各位置では勿論、発振回数を重ねても安定した値を示していることが分かる。

発振効率に差が見られた図 7 中 A, B, C の 3 点に関して、設定陰極電圧 45 kV に対する V_K と I_B の入力時間履歴を図 12 に示す。各点で V_K の値に大きな違いは見られないが、 I_B のばらつきが 11–15 A と顕著であった。対して今回得られた結果では、設定陰極電圧 40 kV に対する I_B のばらつきが 27 回の発振を通して 7.9–8.4 A と非常に小さかった。設定陰極電圧に対する I_B の変動は電子銃表面の活性状態に起因し、表面状態の安定が I_B および RF 出力電力の再現性に寄与していると考えられる。

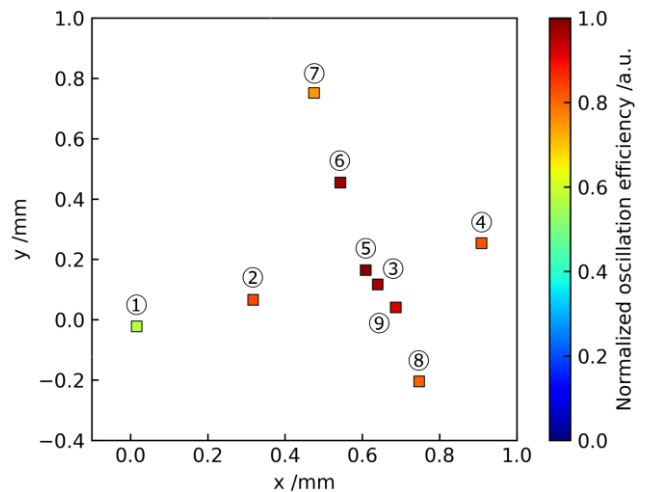


図 9 ジャイロトロン管の移動位置に対する発振効率の相対比較

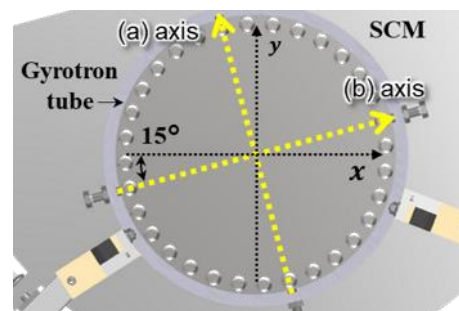


図 10 座標軸の定義

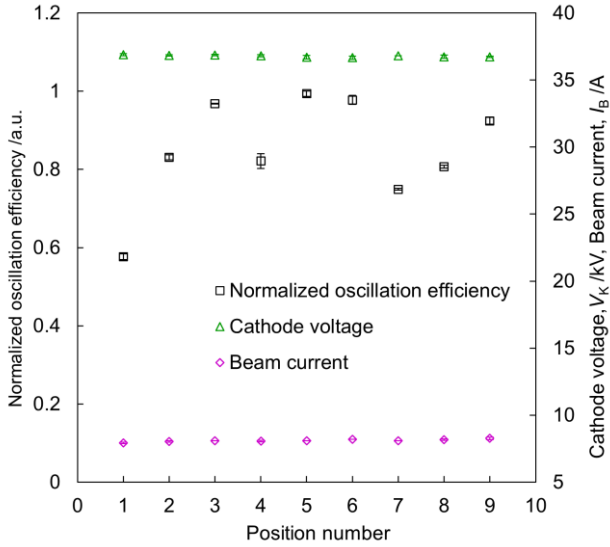


図 11 各移動位置において測定された発振効率, 陰極電圧, ビーム電流

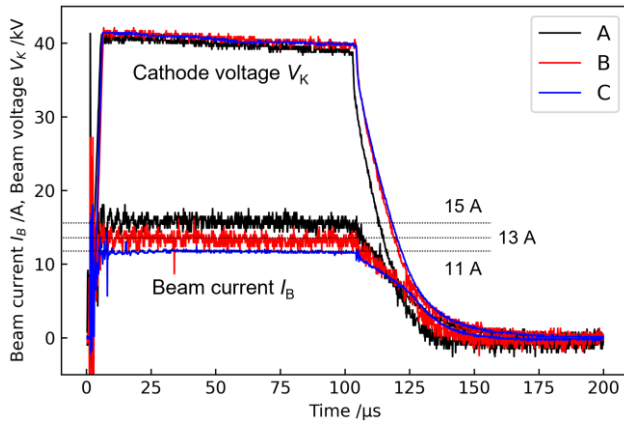


図 12 A, B, C での陰極電圧とビーム電流の入力時間履歴

3.2 Pyro 素子を用いた発振領域測定 軸合わせを行った後, V_K と I_B を様々に変化させて Pyro 素子による出力強度測定を実施した. 各発振条件に対して得られた RF 出力電力および発振効率の比較結果をそれぞれ図 13 と図 14 に示す.

図 13 から, RF 出力電力は基本的に V_K に依存して増大する傾向にあることが分かる. これは V_K 増加により電子銃から放出される電子の初速度が増大するため¹⁶⁾, その結果電子が持つサイクロトロンエネルギーが増大することに起因する. 図 14 では, 発振効率が $V_K \approx 42$ kV, $I_B \approx 13$ A の領域で最大となり, その領域から離れるにつれて減少する傾向が確認された. また, 軸合わせ後 (設定印加電圧 40 kV, $V_K = 36.8$ kV, $I_B = 11.4$ A) と比較して RF 出力電力は設定電圧 51 kV, $V_K = 44.7$ kV, $I_B = 22.1$ A のときに 5.25 倍, 発振効率は設定電圧 45.5 kV, $V_K = 41.7$ kV, $I_B = 13.1$ A のときに 2.34 倍となった.

図 13, 図 14 において, RF 出力電力および発振効率が周

囲に比べて急激に低下している 2 点が左上に存在する. これは, 発振パラメータが $B_c = 3.51$ T における発振可能領域から外れたことが原因であると考えられる. SCM の磁束密度 B_c は結合係数に影響する¹⁶⁾ことから, 今回得られた発振領域もまた B_c に依存すると推測される. したがって, 異なる B_c での高効率発振領域, 発振可能領域の変化を比較することで, UT-94 の設計値である $V_K = 65$ kV, $I_B = 25$ A において高効率出力を実現する最適な B_c の値を実験的に見つけることができると考えられる.

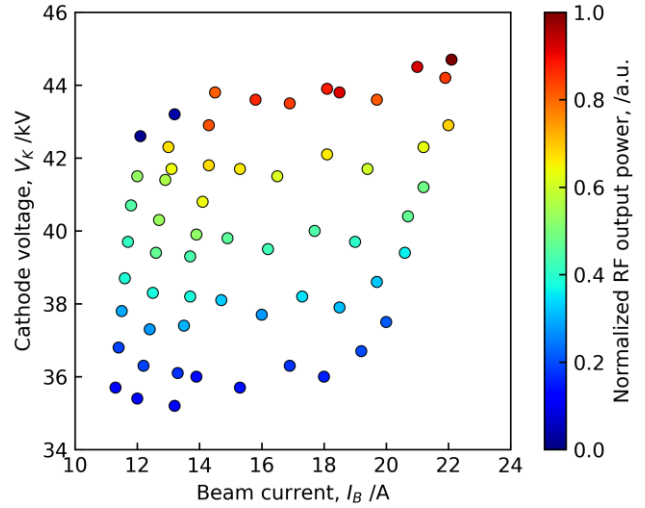


図 13 各発振条件に対する RF 出力電力の相対比較 (SCM の磁束密度 $B_c = 3.51$ T)

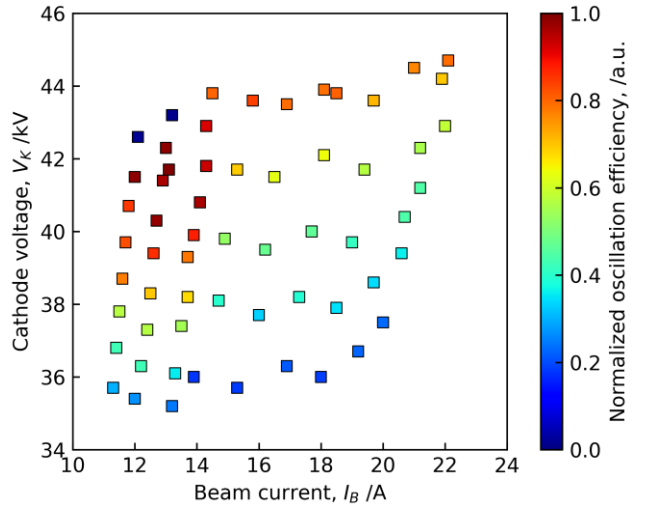


図 14 各発振条件に対する発振効率の相対比較 (SCM の磁束密度 $B_c = 3.51$ T)

4. まとめ

本研究では、Pyro素子による相対的な出力強度測定を用いて軸合わせを行い、RF出力電力および発振効率に関して再現性の高い結果を得た。この結果は変換効率に対する陰極電圧 V_K およびビーム電流 I_B のばらつきによる影響が極めて小さいため、ジャイロトロン管の位置による影響をよく反映している。測定値の再現性には設定陰極電圧に対する I_B の安定性が影響しており、 I_B の安定は電子銃表面の活性状態に起因していると考えられる。なお、軸合わせ前後でRF出力電力は約1.6倍に向上した。

軸合わせの後、 V_K と I_B を変化させることでSCMの磁束密度 $B_c = 3.51$ Tにおける高効率発振領域を確認するとともに、軸合わせ後 ($V_K = 36.8$ kV, $I_B = 11.4$ A) と比較してRF出力電力を5.25倍 ($V_K = 44.7$ kV, $I_B = 22.1$ A)、発振効率を2.34倍 ($V_K = 41.7$ kV, $I_B = 13.1$ A) に向上することに成功した。また、今回測定された発振領域の B_c に対する依存性についても示唆された。

5. 今後の展望

ダミーロードを用いた水負荷試験による出力測定方法の確立が試みられている。RF出力電力や変換効率の絶対評価は、UT-94の性能評価や軸合わせ精度の検討に応用することができる。

3.2節の結果に関して、今後はSCMの磁束密度 B_c を変えながら発振領域測定を行い、UT-94における高効率なミリ波発振に向けて最適な B_c , V_K , I_B の値を実験的に模索していく。

図10から V_K の増加がUT-94の出力向上に効果的であることが確認できるが、 V_K 増加のボトルネックとしてはジャイロトロン管内壁からのアウトガスに起因する異常放電がある。そのため、真空度のさらなる改善による耐電圧性能の向上が必要となる。

参考文献

- 1) 小紫公也, 嶋村耕平, 福成雅史, 小田靖久, 今井剛, 高橋聖幸, 葛山浩, 大西直文: 小特集. ミリ波ビームが飛ばす“マイクロ波ロケット”, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **93** (2017), pp.465-490.
- 2) Komurasaki, K. and Tabata, K.: Development of a novel launch system microwave rocket powered by millimeter-wave discharge, *International Journal of Aerospace Engineering*, **2018** (2018).
- 3) 小紫公也, 福成雅史: マイクロ波ロケットの現状と展望, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **92** (2016), pp. 323-331.
- 4) 柿沼薫, エンギエイエンフロリアン, 福成雅史, 小紫公也, 小泉宏之: ビーム推進打ち上げ機へのミリ波アクティブフェーズドアレイアンテナの適用, *宇宙太陽発電*, **3** (2018), pp.30-37.
- 5) 柿沼薫, エンギエイエンフロリアン, 福成雅史, 小紫公也, 小泉宏之: マイクロ波ロケットによるフェーズドアレイ送電アンテナに関する考察, *宇宙太陽発電*, **3** (2018), pp.1-3.
- 6) 谷口知平, 田畑邦佳, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 小田靖久, 福成雅史, 坂本慶司: マイクロ波ロケット研究に向けた大電力ミリ波光源ジャイロトロンの開発方針, *宇宙太陽発電*, **5** (2020), pp.3-6.
- 7) 真鍋亜佑斗, 玉川俊幸, 田畑邦佳, 谷口知平, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 小田靖久, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 林一生, 池田亮介, 梶原健, 高橋幸司, 坂本慶司: 東大ジャイロトロンの電子ビーム引き出し試験, *宇宙太陽発電*, **6** (2021), pp.34-47.
- 8) Lhermitte, R.: A 94-GHz doppler radar for cloud observations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **4**, 1 (1987), pp.36-48.
- 9) Nakamura, Y., Komurasaki, K., Fukunari, M. and Koizumi, H.: Numerical analysis of plasma structure observed in atmospheric millimeter-wave discharge at under-critical intensity, *Journal of Applied Physics*, **124**, 033303 (2018), pp.1-6.
- 10) Tabata, K., Kariya, T., Oda, Y., Minami, R., Fukunari, M., Ikeda, R., Hayashi, K., Taniguchi, T., Harada, Y., Takeuchi, T., Imai, T., Sakamoto, K., Komurasaki, K., Tatematsu, Y., Yamaguchi, Y., Kajiwara, K. and Takahashi, K.: Development of a high power gyrotron prototype for GW-class microwave beam source study, 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (2020), pp.1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370906.
- 11) Tabata, K., Manabe, A., Komurasaki, K., Kariya, T., Minami, R., Imai, T., Oda, Y., Fukunari, M., Yamaguchi, Y., Tatematsu, Y., Hayashi, K., Ikeda, R., Kajiwara, K., Takahashi, K. and Sakamoto, K.: High-power microwave oscillation of a 94 GHz gyrotron for air-breakdown plasma observations in Microwave Rocket, 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (2021), pp.1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567447.
- 12) 田畑邦佳, 真鍋亜佑斗, 高瀬芳貴, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 小田靖久, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 林一生, 池田亮介, 梶原健, 高橋幸司, 坂本慶司: 94 GHz ジャイロトロンの大電力化とそれにより駆動されるデトネーション波の観測, 第65回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2021-4715 (2021).
- 13) 真鍋亜佑斗, 田畑邦佳, 高瀬芳貴, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 小田靖久, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 林一生, 池田亮介, 梶原健, 高橋幸司, 坂本慶司: 94 GHz ジャイロトロンのビームプロファイル推定及びビームを用いた大気放電進展観測, 第65回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2021-4454 (2021).
- 14) Tabata, K.: Study on atmospheric millimeter-wave discharge using gyrotron, Ph.D. thesis, The University of Tokyo (2022).
- 15) 高瀬芳貴, 田畑邦佳, 真鍋亜佑斗, 小紫公也, 関根北斗, 小泉宏之: マイクロ波ロケット用94 GHz ジャイロトロンの600 kW出力実現に向けて, *宇宙太陽発電*, **7** (2022), pp.1-5.
- 16) 立松芳典, 齊藤輝雄: ジャイロトロンの発振の原理, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **84**, 12 (2006), pp.855-860.