

300 GHz CW Gyrotron FU CW I の動作特性解析

Analysis of oscillation characteristic of 300 GHz CW Gyrotron FU CW I

橋本 秀一, 立松 芳典, 斉藤 輝雄, 尾関 隆則

Shuichi Hashimoto, Yoshinori Tatematsu, Teruo Saito, Takanori Ozeki

福井大学遠赤外領域開発研究センター

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

Fukui 910-8507, Japan

Abstract

A 300 GHz CW Gyrotron FU CW I has been developed as a power source for the ceramic sintering and material surface modification with submillimeter wave. Up to now, the usual output power of FU CW I is 1.8 kW, which is rather smaller than the designed power of 3.5 kW. To examine the cause of this problem, we have considered the pitch factor and the misalignment of FU CW I. The pitch factor relates to the efficiency of the oscillation. We have already known the oscillation efficiency decreases with a large auxiliary coil current, I_{aux} because the pitch factor decreases. Then the experiments without auxiliary coil current have been carried out to improve the oscillation power. However the power did not improve because of increasing potential drop between the anode and the cathode. Moreover the misalignment of FU CW I has been pointed as the cause of the power shortage. For the cases that the axis of gyrotron tube is not parallel to that of the coil, oscillation power at the cavity exit has been calculated with a mode competition code. From the result of the calculations, it is found that the power hardly decreases even if a small misalignment exists in FU CW I.

1. はじめに

遠赤外領域開発研究センターでは、サブミリ波帯におけるセラミック焼結・表面改質研究のための光源として 300 GHz CW Gyrotron FU CW I の開発を行っている。FU CW I はビーム電圧 16 kV、ビーム電流 1.1 A のとき出力 3.5 kW のガウスビームを真空窓から出力するよう設計されている。しかし、現在の FU CW I の通常運転での出力は 1.8 kW 程度であり、設計出力を達成していない。研究をより有効に行うために、出力向上を図る必要がある。

出力不足の原因として、キャビティ入射電子のピッチファクター α の低下や、ジャイロトロン管軸とコイル軸のセッティング時のずれが考えられる。ピッチファクターは発振効率に関係し、最適値より小さくなると発振効率も下がる。FU CW I はアノード電流抑制のために設計段階では必ずしも必要でなかった補助磁場コイルを設置・使用している。さらに、高抵抗をアノードーアース間に挿入した。ピッチファクターの補助磁場コイル電流 I_{aux} 依存性を図 1-1 に示す。ここで、ピッチファクターの設計値を 1.3 と仮定した。現在の通常実験での補助磁場コイル電流値は 150 A である、このように、ピッチファクターは設計値より小さくなっている。そこで補助磁場コイルを用いずに実験を行い、ピッチファクターを下げないことで、出力が向上するか確かめる。

次に、セッティング時の軸ずれについて考える。これは以前から出力が上がらない原因として指摘されている。今回はこのずれを与え、発振出力計算を行うことで、ずれが発振に及ぼす影響を検証する。

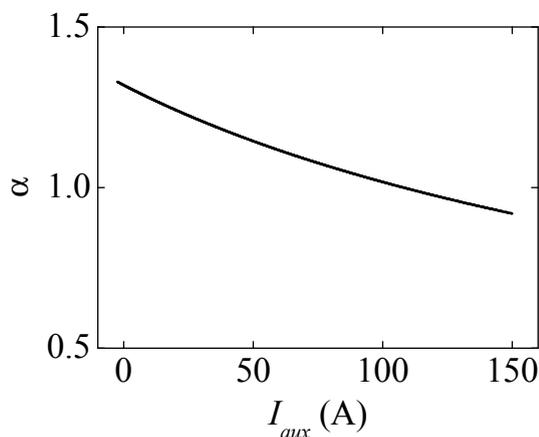


図 1-1. ピッチファクターの補助磁場コイル電流依存性

2. FU CW I の仕様

本実験で用いた 300 GHz CW Gyrotron FU CW I は、福井大学とロシア科学アカデミー応用物理研究所および Gycom により共同で開発された。FU CW I の動作モードは TE_{22,8} mode、ビーム電圧は最大 16 kV、ビーム電流は最大 1.1 A、設計出力は 3.5 kW である。また、本来の設計にはない、補助磁場コイルを増設している。

FU CW I の特徴として、モードコンバータが内蔵されている。このモードコンバータは準光学放射器と 4 枚の分布整形ミラーで構成されている。モードコンバータによって、超高次

モードである $TE_{22,8}$ mode はガウスビームに変換され、真空窓から出力される。また、このモードコンバータは上から見て左回りの回転モードのみを真空窓から出力する。現在、FU CW I の磁場は下向きなので、共振器で発振するモードのうち出力されるのは counter rotating mode である。counter rotating mode は、電磁波構造の回転方向が電子の回転方向とは反対方向のモードであり、順方向のモードを co rotating mode という。

3. 出力測定

FU CW I の出力測定は、水負荷を用いて行う。水負荷をジャイロトロンに取り付けた際の写真を図 3-1 に示す。ジャイロトロンの真空窓に取り付けた水負荷は、内部の SiC で電磁波を吸収する。SiC で発生した熱は、外周部に流れている冷却水に移動する。温度によって抵抗値が変化する測温抵抗体を冷却水の出口に置き、その抵抗値の変化 ΔR から出力 P を求める。

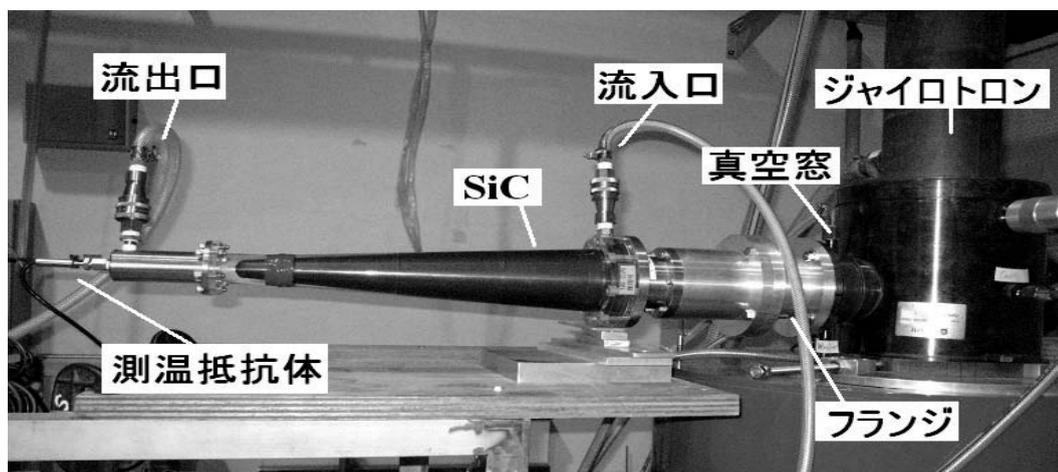


図 3-1. 水負荷

4. 補助磁場コイル電流による発振の変化

FU CW I は運転開始当初、アノードに流れる電流が大きく、アノードに負荷がかかっていた。そこで補助磁場コイルを設置・使用して、電子の軌道を変化させ、アノード電流を抑制した。また、アノード - カソード間に高抵抗を挿入することで、さらにアノード電流を抑制している。抵抗を挿入したことで、補助磁場コイルを用いずに実験を行うことができるようになった。

補助磁場コイルはカソード部での磁場を変え、キャビティ入口における電子ビーム入射位置 R_b を変化させる。共振器断面での電磁波構造と R_b のイメージを図 4-1 に示す。また、 R_b によって電子と電磁波モード間の結合係数 C は変化する。動作モードである $TE_{22,8}$ mode の結合係数の R_b 依存性を図 4-2 に示す。ある実験条件において、結合係数の大きい方の回転モードが発振する。現在実験を行っている $I_{aux} = 150$ A のとき $R_b = 3.93$ mm であり、 $I_{aux} = 0$ A のとき $R_b = 3.71$ mm である。図 4-2 から、 $I_{aux} = 150$ A のとき counter rotating mode が発振し、 $I_{aux} = 0$ A のとき co rotating mode が発振することがわかる。

モードコンバータの特性により、上から見て左回りの回転モードのみが真空窓から出力されるため、 $I_{aux} = 0 \text{ A}$ で運転するときには磁場の向きを上向きにして出力測定を行い、 $I_{aux} = 150 \text{ A}$ で運転するときには磁場の向きは下向きで出力測定を行った。ビーム電圧毎に出力が最大になるよう主磁場強度を調整しながら測定した結果を図 4-3 に示す。補助磁場コイルを用いなければピッチファクターの低下がなく、出力が上がることを期待したが、図 4-3 から I_{aux} に関係なく出力はほとんど変化しなかった。その原因として、アノード電流による電圧降下が考えられる。出力測定を行った際のアノード電流のビーム電圧依存性を図 4-4 に示す。図 4-4 から、補助磁場コイルを用いない場合、ビーム電圧 15 kV でアノード電流が 4 mA ほど大きくなるのがわかる。アノード - カソード間には 500 k Ω の抵抗が挿入されているため、アノード電流が 4 mA 増えると、補助磁場コイルを使用した場合より、さらに 2 kV の電圧降下が起きる。アノード - カソード間電圧のビーム電圧依存性を図 4-5 に示す。アノード - カソード間電圧が低くなるほど、キャビティ入口での磁力線に垂直方向の電子のエネルギーが小さくなるため、ピッチファクターは上昇せず、出力が上がらなかったと考えられる。

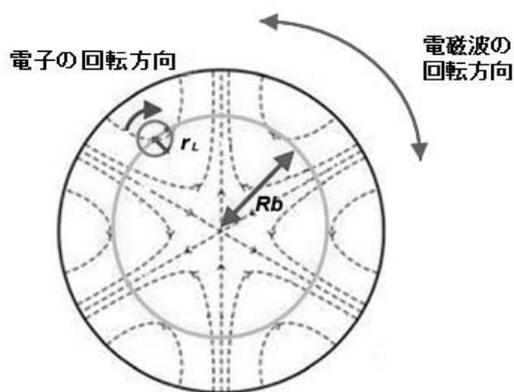


図 4-1. 電子ビーム入射位

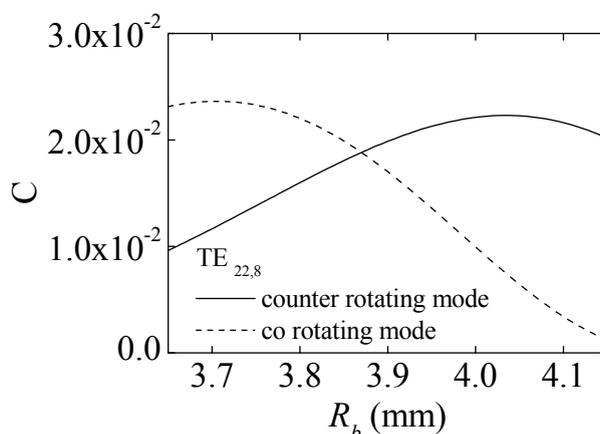


図 4-2. 結合係数の R_b 依存

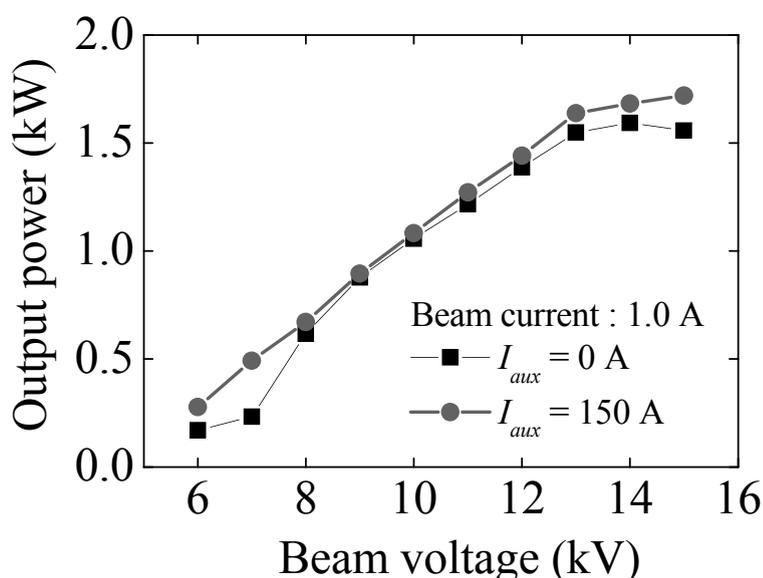


図 4-3. 出力のビーム電圧依存性

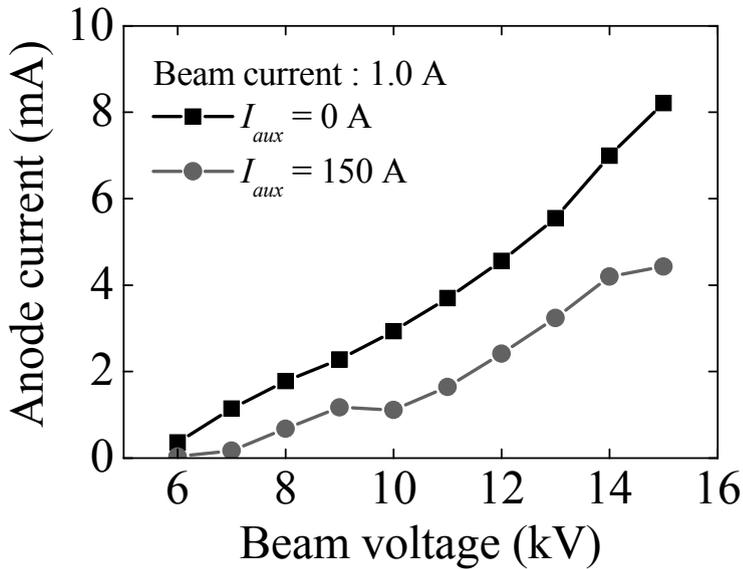


図 4-4. アノード電流のビーム電圧依存性

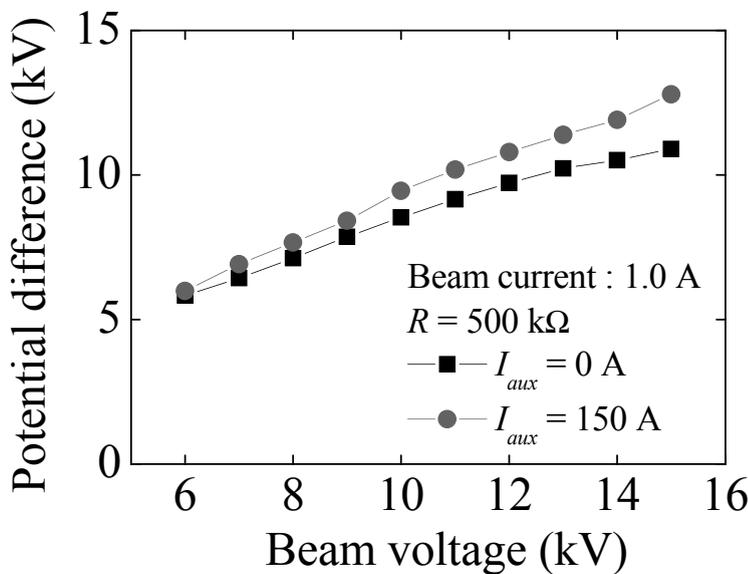


図 4-5. アノード - カソード間電圧のビーム電圧依存性

5. セッティング時の軸ずれが発振に及ぼす影響

ジャイロトロン管軸とコイル軸が一致していない場合を考え、発振出力計算を行う。その準備として、2つの軸のずれを図 5-1 に示すように仮定した。コイル軸を z 軸、2つの軸のなす角を φ 、キャビティ中心 - コイル中心間の x, y, z 軸方向の距離を d_1, d_2, d_3 とした。今回は $d_3 = 0$ mm の場合について考える。また、エミッタリングエリアから 32 個の電子が等間隔に放出され、かつ電子は磁力線に沿って進むものとする。このように仮定すると、電子が放出される点を通る磁力線のキャビティ入口における位置は各電子の R_b と等しいと言える。この R_b を用いてキャビティ内の *co rotating* と *counter rotating* モード間のモード競合計算を行う。

$d_1 = d_2 = 0$ mm における counter rotating mode の発振出力の計算結果を図 5-2 に示す。図 5-2 において counter rotating mode の発振出力がゼロの範囲では、co rotating mode が発振している。 φ が大きくなるにつれて、 I_{aux} が小さな値においても counter rotating mode が発振することがわかる。この計算結果と比較するために、水負荷を用いて出力測定を行った。ジャイロトロン管を管軸回りにわずかに回転させ、その前後で counter rotating mode の出力測定を行った結果を図 5-3 に示す。図 5-3 から、実際に counter rotating mode の発振する I_{aux} が変化することがわかる。以上のことから、ジャイロトロン管軸とコイル軸は一致しておらず、ジャイロトロン管を回転させる際に、 φ 、 d_1 、 d_2 がわずかに変化している可能性がある。しかし、図 5-3 の実験結果を満たすためには $\varphi = 0.3^\circ$ までジャイロトロン管が傾かなければいけない。このとき、カソード中心はコイル軸に対して 2.27 mm ずれる。この値は大きすぎるため、現実にはこのようなずれはない。

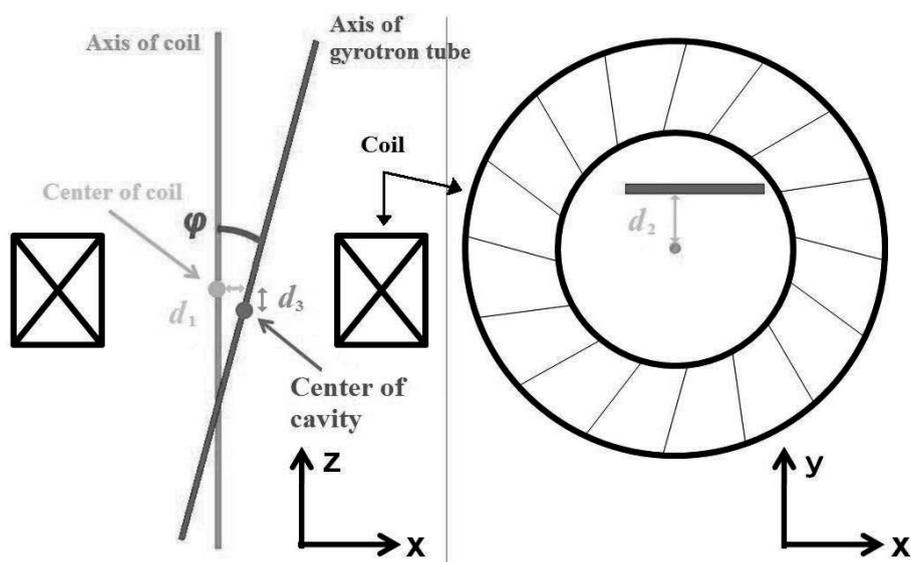


図 5-1. セッティング時の軸ずれ

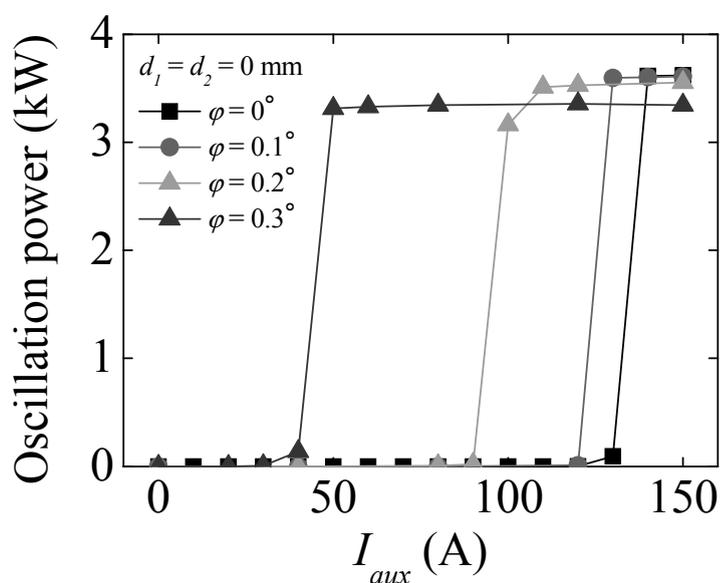


図 5-2. $d_1 = d_2 = 0$ mm における counter rotating mode の発振出力の補助磁場コイル電流依存性

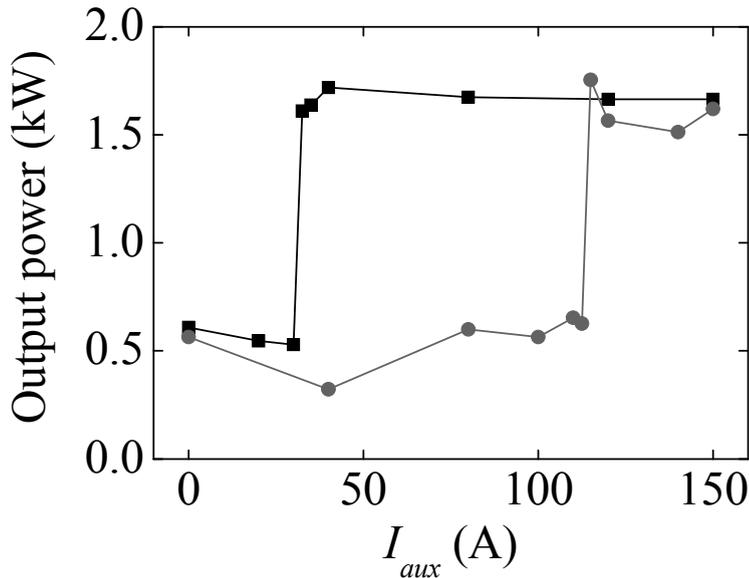


図 5-3. ジャイロトン管を回転させる前後での、出力の補助磁場コイル電流依存性

$d_1 = d_2 = 0.1$ mm における counter rotating mode の発振出力の計算結果を図 5-4 に示す。 $d_1 = d_2 = 0$ mm の場合と同様に、 φ が大きくなるにつれて、 I_{aux} が小さな値においても counter rotating mode が発振することがわかる。また、傾きによる変化が大きく、実験結果を満たすために 0.3° まで傾けなくてもよいことがわかる。しかし、カソード中心はコイル軸に対して少なくとも 1.4 mm ずれる。

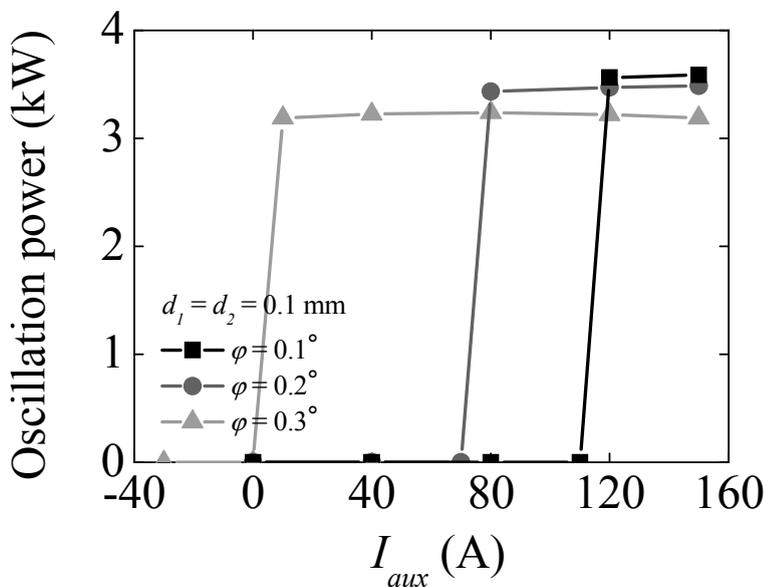


図 5-4. $d_1 = d_2 = 0.1$ mm における発振出力の補助磁場コイル電流依存性

$\varphi = 0.1^\circ$ 、 $d_2 = 0.1$ mm における counter rotating mode の発振出力のシミュレーション結果を図 5-5 に示す。 d_1 が大きくなるにつれて、 I_{aux} が小さな値においても counter rotating mode が発振することがわかる。実験結果を満たすためには $d_1 = 0.3$ mm までジャイロトン管がずれる

必要がある。このとき、カソード中心はコイル軸に対して 0.47 mm ずれる。この値は十分小さく、このような条件でジャイロトン管とコイルが置かれている可能性がある。

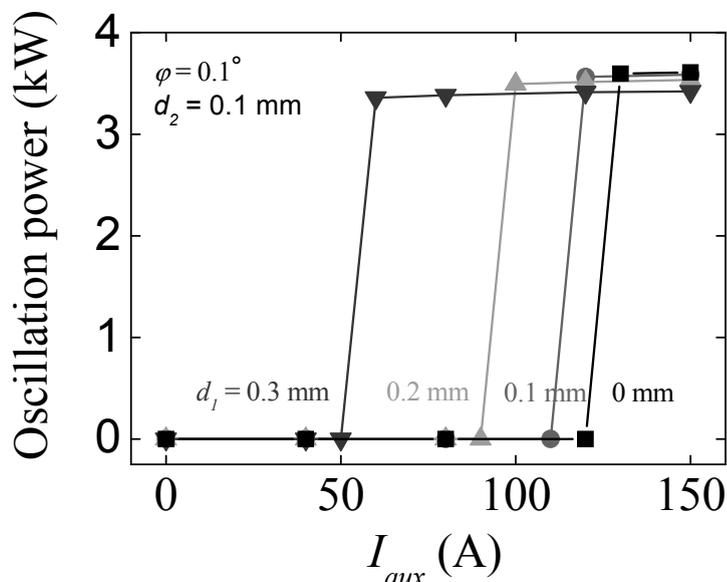


図 5-5. $\varphi = 0.1^\circ$ 、 $d_2 = 0.1\text{ mm}$ における発振出力の補助磁場コイル電流依存性

次に、出力の値について考える。 φ 、 d_1 、 d_2 の値を少しずつ変化させ、比較したものを図 5-6 に示す。どの計算結果においても、ジャイロトン管軸とコイル軸が一致している場合と比較して、大きく発振出力が低くなることはなかった。

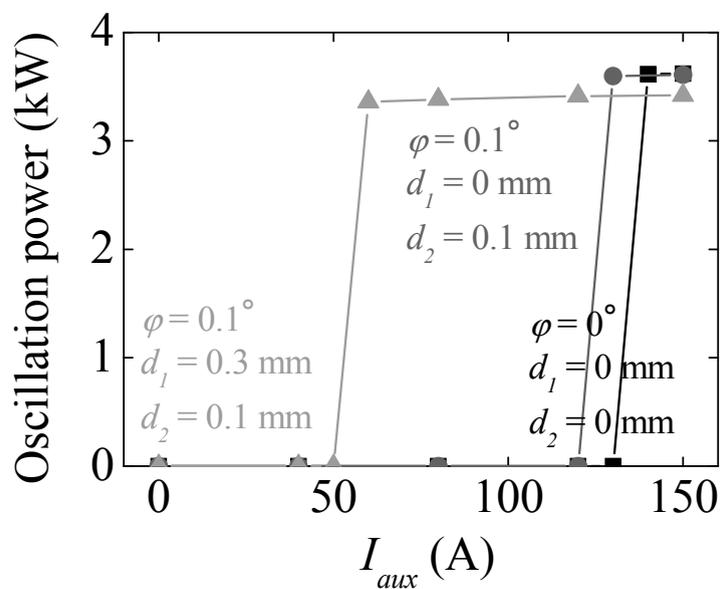


図 5-6. 発振出力の比較

6. まとめ

補助磁場コイルを用いないことで、ピッチファクターの低下を防ぎ、出力が向上するかを確認した。補助磁場コイルによる抑制がない分アノード電流が流れ、かつ、アノード - カソード間に高抵抗が挿入されているため、アノード - カソード間電圧が大きく下がり、その結果ピッチファクターは上昇せず、出力の向上は達成されなかった。今回、出力の向上はならなかったが、アノードに電源を設置するなどしてアノード - カソード間電圧を調節できるようになれば、出力が向上すると思われる。

次に、数値計算によりジャイロトロンとコイルの軸のずれが発振に及ぼす影響について考えた。わずかにジャイロトロン管軸とコイル軸がずれていることで、補助磁場コイル電流に対して発振する回転モードが変化する実験結果を説明できることを確認した。しかし、発振出力に対する影響は小さく、軸のずれが出力低下の主要な原因でないことがわかった。

参考文献

- [1] 中野智彰：遠赤外領域開発研究第 10 巻 p52(2009)