

高効率と負荷安定性の改善とを実現した 電子レンジ用マグネトロン2M403/E4500

2M403/E4500 Magnetron with High Efficiency and Improved Load Stability for Microwave Ovens

加藤 直也

■ KATO Naoya

省エネへの機運が世界的に高まるなか、省エネ目標の達成度合いを表示する省エネラベリング制度が2008年にわが国で導入され、2010年には中国でも導入された。欧州も独自のラベリング制度の導入へ向けた動きがある。こうした省エネ化へのニーズは電子レンジでも同様であり、東芝ホクト電子(株)は、高効率マグネトロン2M303を2007年に製品化した。2M303は使用電源に制約があり、主にインバータ仕様のハイエンドモデルに採用されている。

今回当社は、電源制約のない扱いやすいマグネトロンを目標に、2M303の高効率を維持しながら負荷安定性を改善した電子レンジ用マグネトロン2M403/E4500を開発した。

Accompanying the increased momentum toward energy conservation, attention has been focused on energy-saving labeling programs worldwide. Such programs were introduced in Japan in 2008 and in China in 2010, and a similar movement has subsequently been taking place in Europe. In response to this situation, Toshiba Hokuto Electronics Corporation launched the 2M303 high-efficiency magnetron for energy conservation in microwave ovens in 2007. The 2M303 model has mainly been applied to high-end systems using inverters due to power supply restrictions.

We have now developed the 2M403/E4500 magnetron balancing high efficiency with improvement of load stability. In comparison with the previous 2M303 model, the new 2M403/E4500 magnetron does not require a complex power control mechanism, while it has the same level of efficiency as 2M303 model.

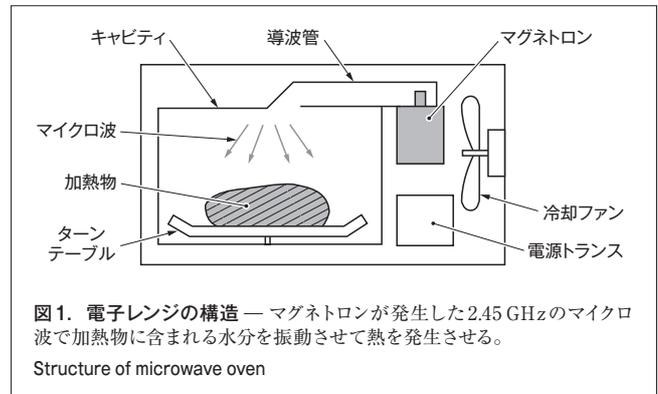
1 まえがき

電子レンジの加熱原理は、マイクロ波で加熱物に含まれる水分子を振動させて熱を発生させる、マイクロ波誘電加熱を用いるものである(図1)。

マイクロ波加熱は、加熱物だけにエネルギーが吸収され効率的な加熱が行えるため、加熱時間が圧倒的に短い調理機器で広く普及している。そのマイクロ波は、マグネトロンと呼ばれるデバイスで発生させている。マグネトロンは一種の二極真空管であり、負荷変動によるエネルギーの反射に強いことが特長である。

近年、省エネへの機運が世界的に高まるなか、省エネ目標の達成度合いを表示する省エネラベリング制度が2008年にわが国で導入され、2010年には中国でも導入された。欧州でも独自のラベリング制度の導入へ向けた動きがある。こうした省エネ化へのニーズは電子レンジでも同様であり、出力効率のより高いマグネトロンが求められている。

ここでは、マグネトロンの原理、課題と従来行ってきた対策、及び東芝ホクト電子(株)が今回開発した、高効率を維持しながら負荷安定性を改善した電子レンジ用マグネトロン2M403/E4500について述べる。



2 マグネトロンの構造と動作原理、及び課題

2.1 マグネトロンの構造と動作原理

マグネトロンは、円筒形の陽極(アノード)と、その中心に配置された熱電子を放射する陰極(カソード)で構成され、円筒状のアノードを上下からマグネット挟んで軸方向に磁界を加える、一種の二極管である(図2)。カソードから放射された熱電子は電界によりアノード方向に加速されるが、通常の二極管とは異なり、磁界により軌道を曲げられてアノード・カソード間で周回運動をする(図3)。この熱電子流と、アノードに設けた共振器との相互作用の結果、2.45 GHzのマイクロ波が発生する。

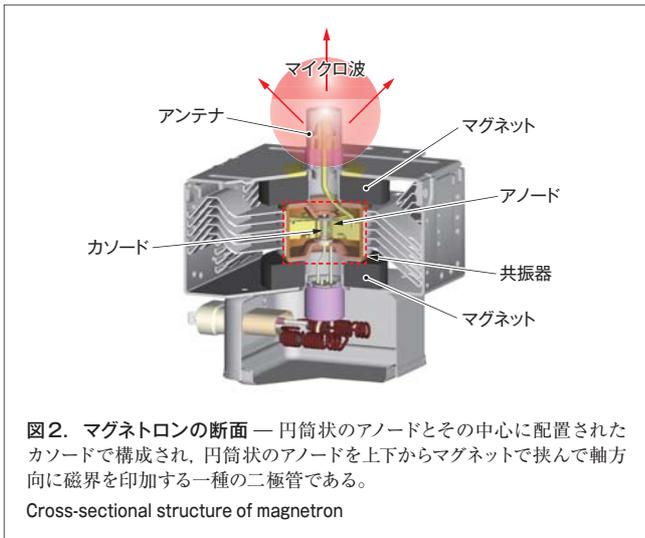


図2. マグネトロンの断面 — 円筒状のアノードとその中心に配置されたカソードで構成され、円筒状のアノードを上下からマグネットで挟んで軸方向に磁界を印加する一種の二極管である。
Cross-sectional structure of magnetron

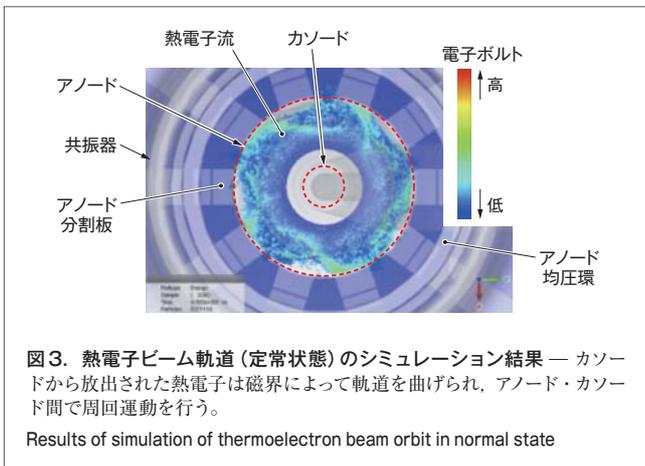


図3. 熱電子ビーム軌道(定常状態)のシミュレーション結果 — カソードから放出された熱電子は磁界によって軌道を曲げられ、アノード・カソード間で周回運動を行う。
Results of simulation of thermoelectron beam orbit in normal state

2.2 マグネトロンの異常発振

マグネトロンの出力特性を表す方法として図4に示すリーケ線図を用いる。図4はマイクロ波回路に負荷を接続した際の定在波位相と定在波比に対する出力効率と周波数の関係を示したものである。

マグネトロンは、定在波位相と負荷状態により様々な異常発振を起こすことがある。正常発振と代表的な異常発振のアノード電流波形を図5に示す。異常発振のうち、発振モードがジャンプして位相が移り、発振状態が不安定になる現象を“モーディング”と呼ぶ。モーディングにはエミッション性のものと負荷性のものがある。エミッション性は電子放出量が少なく発生する異常モードであり、また、負荷性は接続した負荷の影響により反射されたエネルギーでマグネトロン内部の高周波電界が乱されて発振できなくなる異常モードである。

負荷性モーディングは図4に示したシンク領域で発生しやすく、また、マグネトロンの出力効率が高くアノード電流が大きい領域もシンク領域付近にあるため、電子レンジの動作点をこの領域に設定する際は、マグネトロン側で負荷性モーディングに

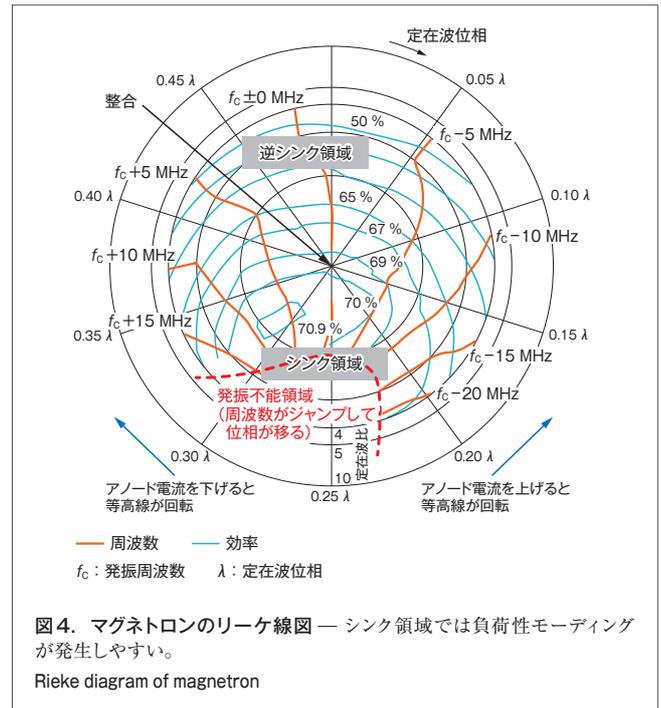


図4. マグネトロンのリーケ線図 — シンク領域では負荷性モーディングが発生しやすい。
Rieke diagram of magnetron

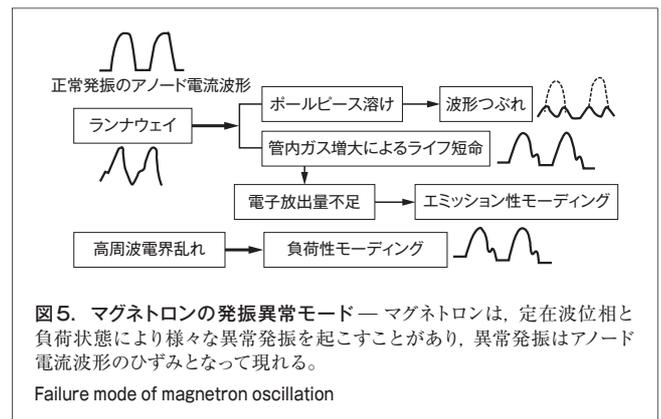


図5. マグネトロンの発振異常モード — マグネトロンは、定在波位相と負荷状態により様々な異常発振を起こすことがあり、異常発振はアノード電流波形のひずみとなって現れる。
Failure mode of magnetron oscillation

対する耐力改善を行う必要がある。

2.3 電子レンジの電源回路とモーディングの関係

マグネトロンは、アノード電圧が交流、整流した脈流、及び平滑した直流のいずれでも動作可能である。直流電源を用いれば負荷性モーディングの発生を抑えられるがコストを増加させるため、通常の電子レンジではコストの低減を重視して、安価な半波倍電圧電源回路を採用している(図6)。この方式では、電流波形が脈流になりリップル率が大きく、アノードピーク電流 i_b はアノード平均電流 I_b の4倍になる(図7(b))。

出力を増大させるために I_b を大きくすると i_b も大きくなり、モーディングが発生しやすくなる。

2.4 マグネトロン構造から見た負荷安定性

マグネトロン内の電界と磁界の分布をシミュレーションして、断面図にプロットした結果を図8に示す。赤枠の部分がアノード・カソード間で熱電子が周回運動する領域である。電界と

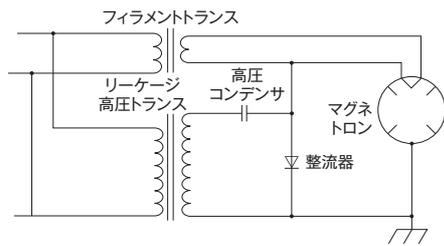


図6. 半波倍電圧電源回路—普及型の電子レンジで広く採用されている。
Half-phase double-voltage rectifier circuit

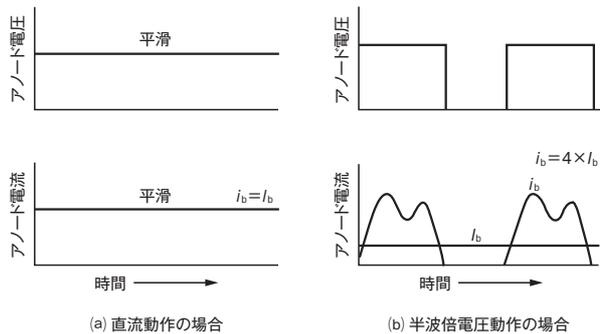


図7. マグネトンのアノード電圧・電流波形—低コスト化のため半波倍電圧電源回路を用いると、アノード電流のリップル率が大きくなり、負荷性モーディングが発生しやすくなる。

Anode current and anode voltage waveforms of magnetron

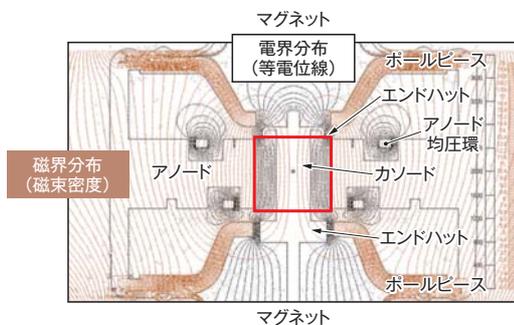


図8. 電界及び磁界分布のシミュレーション結果—アノード・カソード間の電界及び磁界をシミュレーションして、電子の漏えいとそれを抑制する構造を検討した。

Result of electromagnetic field simulation of magnetron

磁界が直交する領域(図8で磁力線と等電位面が平行の領域)を拡大するほど負荷安定性が良くなる。しかしその一方で、電子の空間内抑制力がなくなり、カソードとアノードの間隙から電極間外へ漏れる電子の増大と、出力効率の低下という特性悪化を引き起こす。これを避けるため、カソードの両端部に円盤状のシールド(エンドハット)を設けて電子の漏えいを抑制する構造としている。

また、構造上、マグネットを軸上に配置できないため、ドー

ナツ状のマグネットを両端に配置し、すり鉢状の円盤(ポールピース)で磁束をエンドハットとポールピースの間隙に収束させているが、磁力線が鼓状になり電子が漏えいしやすくなる。そのため、エンドハットを非常に大きくしなくてはならないという問題がある。

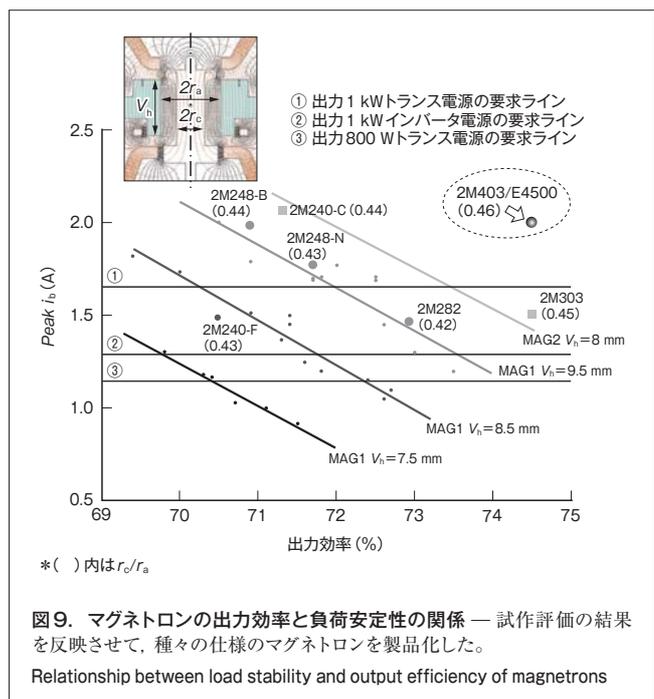
3 負荷安定性を向上させるための従来の施策

種々のマグネトンの、出力効率と負荷安定性の関係を図9に示す。負荷安定性は、モーディングが発生しない限界となるアノード電流のピーク値 $Peak\ i_b$ を指標として表す。 $Peak\ i_b$ が大きいほど負荷安定性が良いことを示している。

MAG1は試作評価品であり、アノード共振器の分割板 V_h の軸方向の長さ V_h を3通りに変え、それぞれの場合でアノード径 $2r_a$ とカソード径 $2r_c$ の比率 r_c/r_a を0.41 ~ 0.45の範囲で変化させたときの結果である。カソードなどの寸法は V_h との比率が同じになるように設計している。評価の結果から、 V_h が大きいほど負荷安定性が良くなるが、出力効率は低下することがわかった。

こうした試作評価の結果に基づいて開発した、当社のマグネトロン製品の特性も、図9に併せてプロットしてある。2M248系、2M282、及び2M303は1 kW出力対応、2M240系は800 W対応の製品群である。

マグネトロンを安定して発振させるため、経験上 r_c/r_a が0.43以上になるように設計しており、2M248-Nでは0.43、2M248-Bでは0.44である。ただし、2M282は効率重視の設計で0.42としている。2M240-Fは0.43である。



* ()内は r_c/r_a

図9. マグネトンの出力効率と負荷安定性の関係—試作評価の結果を反映させて、種々の仕様のマグネトロンを製品化した。

Relationship between load stability and output efficiency of magnetrons

基本設計仕様は、 V_h を、1 kW対応製品で9.5 mm、800 W対応製品で8.5 mmとして、トランス電源方式の場合に要求されるPeak i_b をカバーし負荷安定性を確保している。

2M282は、高効率の要求に応じて2000年に製品化した機種である。Peak i_b が低いため、電源制御に優れたインバータ電源を用いたハイエンドモデルに限定して採用された。

その後、わが国の市場における省エネの要求は更に強まり、当社はMAG2による試作評価に基づいて設計した高効率機種である2M303を2007年に製品化した。基本設計仕様は $V_h=8$ mmとして負荷安定性の点では不利であったが、ポールピースの形状を変えて磁束密度分布を最適化し、2M282と同等の負荷安定性を維持しながら出力効率を向上させることができた。わが国の市場では、省エネ、小型、及び電源制御に優れているインバータ電源が既に主流となっており、負荷安定性に関しては実用レベルで問題はなく採用された。

2M303と同じ基本仕様で、MAG2による試作評価に基づいて開発した2M240-Cを同年に製品化した。800 W出力対応であるがコンパクト化し、高さを8%、質量を9%削減した。

近年、欧州でも省エネへの要求が強まり、高効率機種の市場が拡大することも予想されるが、電子レンジの庫内も大きく、高出力化の要求も高い。また、トランス電源が主流であり、2M303の負荷安定改善が必要とされる。

4 2M403/E4500の基本設計

4.1 基本設計の目標値

前述した要求に応えた新製品2M403/E4500を開発するに際して、現行の高効率マグネトロン2M303の出力効率74%を維持しながら、負荷安定性を更に改善して、Peak i_b が2 A以上という目標値を設定した。

4.2 改善のポイント

負荷安定性を改善するため、電界と磁界が直交する領域を拡大することで安定発振領域の拡大を図った。その結果として生じる漏えい電子増大の抑制対策も講じた。また、最大磁束密度は現行機種である2M303と同等のレベルを確保できる磁気回路設計とし、アノード・カソード間の電子効率も2M303と同等レベルの共振器設計を行い、出力効率と負荷安定性のバランスを図った。2M403の設計仕様は $V_h=7.5$ mm、 $r_c/r_a=0.46$ である。

図10に示すとおり、 V_h 、ポールピース間距離 P_L 、及びカソードの長さ C_L の各パラメータの値と各部品の配置を変更することで入力側での電界と磁界の直交領域を拡大して低減し、同時に安定発振領域の拡大を図った。

電界強度のシミュレーション結果の例を図11に示す。入力側の電界強度の分布が従来管に比べて小さくなっていることから抑制力も小さくなっていると推測でき、負荷安定性も改善

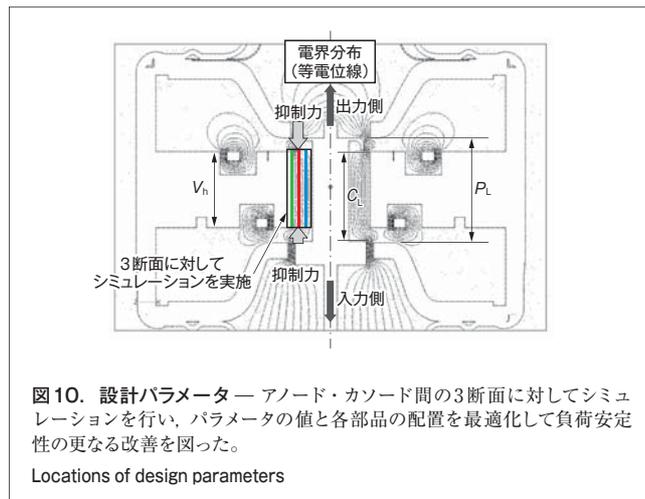


図10. 設計パラメータ — アノード・カソード間の3断面に対してシミュレーションを行い、パラメータの値と各部品の配置を最適化して負荷安定性の更なる改善を図った。

Locations of design parameters

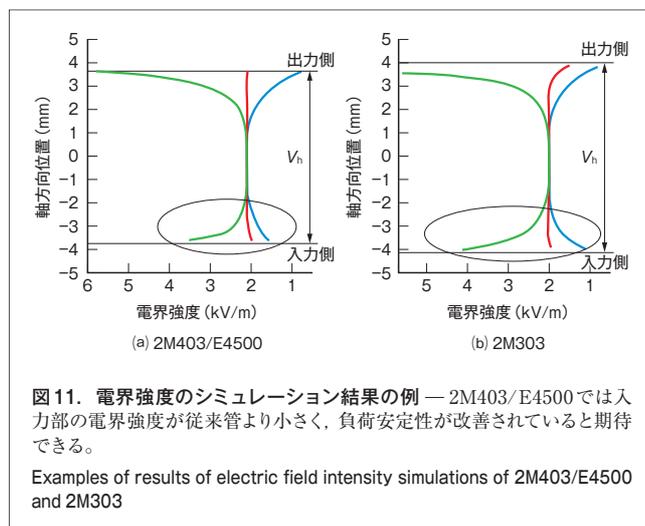


図11. 電界強度のシミュレーション結果の例 — 2M403/E4500では入力部の電界強度が従来管より小さく、負荷安定性が改善されていると期待できる。

Examples of results of electric field intensity simulations of 2M403/E4500 and 2M303

されているものと期待できる。

今回開発したマグネトロン2M403/E4500の出力特性を、図9に併せてプロットしてある。この結果から現行2M303と同等の出力効率を維持しながら、負荷安定性も目標値どおりに改善されていることがわかる。

5 あとがき

使用電源に制約のない扱いやすい電子レンジ用の高効率マグネトロン2M403/E4500を開発した。省エネ市場の拡大に向けて、2015年4月からの本格生産を計画している。



加藤 直也 KATO Naoya

東芝ホクト電子(株) マグネトロン事業部 マグネトロン技術グループ長。電子レンジ用マグネトロンの設計・開発に従事。Toshiba Hokuto Electronics Corp.