複合加熱方式電子レンジ用ヘリカルヒータの 端末部電磁波遮蔽機構の検討

正員 窪田 哲男* 非会員 箱山 明義*
非会員 長谷川靖信** 正員 越地 耕二***

Investigation of Electromagnetic Sealing for Helical Heater Terminal Used in Combination Heating Microwave Oven

Tetsuo Kubota*, Member, Akiyoshi Hakoyama*, Non-member
Yasunobu Hasegawa**, Non-member, Kohji Koshiji***, Member

A new sealing structure for helical heater terminal used in a combination heating microwave oven is suggested, and its sealing characteristics are investigated by analysis and measurement. The new structure is simply a conductor tube coaxially covering the heater at the input terminal. With an optimally-designed structure of this type, the transmission coefficient of the heater at 2450 MHz can be reduced to -47dB in TLM analysis and -50dB in measurement. When installed in a test set, the power leaking out from the heater terminal is found to be less than 0.2mW/cm^2 .

キーワード：電子レンジ，電磁遮蔽，ヒータ，チョーク

Keywords: microwave oven, electromagnetic sealing, heater, choke

1. まえがき

マイクロ波加熱装置（電子レンジ）では，加熱室内に導入されたマイクロ波電力がドア周辺部，加熱室を貫通して設けられているターンテーブル支持軸部から外部に漏洩しないような様々な電磁波遮蔽が行われている。また，加熱源として電気ヒータ（シーズヒータ）を併用しているマイクロ波加熱装置（複合加熱方式電子レンジ）においては，電力を供給するために加熱室を貫通して設けられているシーズヒータの引き出し部等に，いずれもチョーク方式の電磁波遮蔽機構が一般的に用いられている。シーズヒータは，一部のものを除いては調理中に赤熱しないが，最近の複合加熱方式電子レンジでは，調理の雰囲気を出すために赤熱

図1 ヘリカルヒータ

Fig. 1. Helical heater.

する加熱用ヒータが用いられている。このヒータは図1に示すような螺旋状ヒータ線を石英管内に収納したもので，ここではこれをヘリカルヒータと呼ぶことにする。ヘリカルヒータ引き出し部にもチョーク方式が適用できるが，構造が複雑で大型となる。

ここでは，電気ヒータを併用している複合加熱方式電子レンジにヘリカルヒータを適用し引き出し部の電磁波遮蔽機構としてヒータ外周囲に円筒導体を設けた機構を提案し，解析と測定によりその特性について述べている。

2. ヘリカルヒータ引出し部での電波漏洩防止

図2は従来のチョーク方式の問題点を解決するために提案されたもので，円筒導体を加熱室外部のヘリカルヒータ外周囲に設けた電磁波遮蔽機構を示したものである。

* 日立ホームテック設計部

〒277-0804 千葉県柏市十番二 3-1

Design Dept., Hitachi Hometec, Ltd.

3-1 Toyofuta, Kashiwa-shi, Chiba-ken 277-0804

** KCC 日本支店

〒151-0061 東京都渋谷区初台 1-51-1-404

Flomerics Electromagnetics Division, Tokyo Office, KCC Japan Branch.

1-51-1-404, Hatsudai, Shibuya-ku, Tokyo 151-0061

*** 東京理科大学理工学部

〒278-0804 千葉県野田市山崎 2641

Department of Electrical Engineering Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba-ken 278-8510

図2 ヘリカルヒータ引き出し部の電磁波遮蔽機構

Fig. 2. Structure of helical heater terminal with tubular seal.

図3 ヘリカルヒータ端末部電磁波遮蔽機構の等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of helical heater terminal with tubular seal.

この電磁波遮蔽機構は、円筒導体とヘリカルヒータを図3に示すような並列サセブタンスが伝送路に縦続接続された周期構造線路⁽¹⁾と見なすことができるので、螺旋状ヒータ線のピッチや外径等で特性の決まるフィルタと考えることができる。図3で $\bar{B}$ は正規化サセブタンスを、 $\bar{Z}$ は正規化インピーダンスを表しており直列に入る抵抗分とリアクタンス分からなる。

3. ヘリカルヒータ引出し部の等価回路

マイクロ波加熱装置内部のヒータ線引き出し部（図2でヘリカルヒータ端末が加熱室を貫通する円筒導体部）において、円筒導体に挿入されたヘリカルヒータの解析モデルを図4に示す。このヘリカルヒータは、マイクロ波においては分布定数線路としてふるまう。

図4で、

- C : 巻線間のキャパシタンス
- C' : 巻線と円筒導体間のキャパシタンス
- L : 巻線と円筒導体によるインダクタンス
- R : 円筒導体と巻線の損失抵抗

の4つのパラメータを用いてヘリカルヒータの単位区間を図5の等価回路で表すことができる。ただし、石英管と外

図4 円筒導体内に挿入されたヘリカルヒータ解析モデル

Fig. 4. Analyzed model of helical heater terminal with tubular conductor.

図5 ヘリカルヒータ電磁波遮蔽機構の等価回路

Fig. 5. Equivalent circuit for helical heater seal.

図6 幾何学的寸法

Fig. 6. Geometrical dimension.

導体の間、およびヘリカルヒータ線間は空気層があり実効的な比誘電率は1とみなせる。

これらのパラメータは、図6に示すようなヘリカルヒータの円筒導体の長さ l 、ヘリカルヒータのピッチ P 、螺旋状ヒータ線の半径 a 、螺旋状ヒータ線と円筒導体との間隔 b の幾何学的寸法によって決まる。

4. 等価回路

図5の等価回路において、伝搬定数 γ は式(1)で与えられる。

$$\gamma = \sqrt{ZY} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Z , Y は

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} + R \dots\dots\dots (2)$$

$$Y = j\omega C' \dots\dots\dots (3)$$

で表され、式(2), (3)から

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\left(R + j\omega \frac{L}{1 - \omega^2 LC}\right)(j\omega C')} \\ &\approx \sqrt{\frac{\omega^2 LC'}{\omega^2 LC - 1}} \quad (R \text{ が十分に小さいとき}) \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

となる^{(2)~(4)}。また、伝搬定数 γ は、減衰定数 α と位相定数 β を用いて式(5)のよう書ける。

$$\gamma = \alpha + j\beta \dots\dots\dots (5)$$

式(4)において、 $R=0$ のとき、

$$\omega = \omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (6)$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (7)$$

を境にして根号内の符号が入れ替わる。この ω_c , f_c はそれぞれ遮断角周波数、遮断周波数であり、これを境にして高周波側と低周波側では、式(5)の位相定数と減衰定数は入れ替わる。これらの式を用いて、遮断特性を満足するようにパラメータ C , C' , L , R を求める。

5. パラメータ C , C' , L , R の検討

図4の円筒導体内に挿入されたヘリカルヒータを管軸方向に切り開き、円筒導体を平面として近似する。

また、内部のヘリカルヒータは円環として近似し、円環それぞれを切り開き、切り開いた隣り合う円環を平行線路として近似する。これらの近似を用いて各パラメータ C , C' , L , R を幾何学的パラメータ l , p , a , b から求める。

図7はこの様子を示したものである。ヒータ線単位長さあたりの電荷 $+\lambda$ と $-\lambda$ それぞれの無限直線を囲む等電位の無限長円筒面を仮定し、二つの円筒面の内部を導体で置き換える。 $+\lambda$ の円筒導体の電位を V_+ 、 $-\lambda$ の円筒導体の電位を V_- とすると、

円筒導体間の静電容量 C は、

$$C = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{p+2a+\sqrt{(p+2a)^2-4a^2}}{2a}\right\}} \cdot \frac{2\pi rl}{p+2a} \dots\dots\dots (8)$$

となる⁽⁶⁾。ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 p はヒータのピッチ、 a はヒータ線の断面の半径、 r はヒータ線の半径、 l は円筒導体の長さである。

同様に、切り開かれた円筒導体とヒータ線との間の静電容量 C' は円筒導体の長さを1として、

図7 平行線路として近似したヘリカルヒータ引き出し部
Fig. 7. Helical heater terminal approximated to Parallel line.

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{b+a+\sqrt{(b+a)^2-a^2}}{a}\right\}} \cdot \frac{2\pi rl}{p+2a} \dots\dots\dots (9)$$

となる。なお式(8), (9)の導出については省略する。

ヒータ線と切り開かれた円筒導体によるインダクタンスは、ヒータ線の巻線に沿う方向の単位長さ当たりのキャパシタンスを C'' 、真空中の波の速度を v_p とすると

$$L = \frac{1}{C''v_p^2} \dots\dots\dots (10)$$

であり、 C'' は

$$C'' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{b+a+\sqrt{(b+a)^2-a^2}}{a}\right\}} \dots\dots\dots (11)$$

であるから、

$$L = \frac{\ln\left\{\frac{b+a+\sqrt{(b+a)^2-a^2}}{a}\right\}}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{v_p^2} \cdot \frac{2\pi rl}{p+2a} \dots\dots\dots (12)$$

となる。ただし、

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

ここで μ_0 は真空中の透磁率である。

以上から、インダクタンス L は

$$L = \frac{\epsilon_0\mu_0 \ln\left\{\frac{b+a+\sqrt{(b+a)^2-a^2}}{a}\right\}}{2\pi} \cdot \frac{2\pi rl}{p+2a} \dots\dots\dots (13)$$

と表すことが出来る。

次に、円筒導体と巻線の損失抵抗 R を求める。周波数を f 、透磁率を μ 、導電率を σ とすると表皮の厚さ δ は、

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots (14)$$

と表され、表皮抵抗 R_s は、 $a \gg \delta$ とすれば、

$$R_s = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma} \quad (15)$$

となる。したがって、管軸方向の単位長さ当たりの抵抗 R は、

$$R = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma} \cdot \frac{2\pi r}{p+2a} \quad (16)$$

となり、円筒導体の長さを l とすると、損失抵抗 R は

$$R = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma} \cdot \frac{2\pi r l}{p+2a} \quad (17)$$

となる⁽⁶⁾。

式(8), (9), (12)は、円筒導体に挿入されたヘリカルヒータを等価回路で表した時の C , C' , L を表すパラメータであるが、これらは式の導出の際には、それぞれのパラメータは図7に示すような平行線路の近似によって求めた。

電磁波遮蔽特性は式(4), (5)において

$\omega > 1/\sqrt{LC}$ ($\beta=0, \alpha \neq 0$) とすることによって求められるが、式(8)~(17)は近似を用いて求めているために、ここでは補正係数として k_a, k_b, k_c を求め式(8), (9), (12)に導入した。ここで新たに式(8), (9), (12)を

$$C = k_a \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \left\{ \frac{p+2a + \sqrt{(p+2a)^2 - 4a^2}}{2a} \right\}} \cdot \frac{2\pi r l}{p+2a} \quad (18)$$

$$C' = k_a \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \left\{ \frac{b+a + \sqrt{(b+a)^2 - a^2}}{a} \right\}} \cdot \frac{2\pi r l}{p+2a} \quad (19)$$

$$L = k_c \frac{\ln \left\{ \frac{b+a + \sqrt{(b+a)^2 - a^2}}{a} \right\}}{2\pi \epsilon_0} \cdot \frac{1}{V^2} \cdot \frac{2\pi r l}{p+2a} \quad (20)$$

とおき、係数 k_a , k_b , k_c を変化させて解析を行った結果、マイクロ波加熱装置の動作周波数 2,450 (MHz) において、 $k_a=30$, $k_b=60$, $k_c=1.25 \times 10^{-4}$ の時に十分に電磁波遮蔽性能が得られることがわかった。

6. ヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の設計

3., 4., 5. 章の検討結果をもとに、マイクロ波加熱装置の動作周波数 2,450 (MHz) において、-40 (dB) 以上の十分な減衰特性が得られるようなヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構を計算により設計すると、各幾何学的寸法は表1のようになる。

このときのヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の減衰特性の計算結果を図8に示す。

また、このヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の設計の妥当性、すなわち図7に示すような平行線路近似の妥当性を確認するために、透過特性 S_{21} と電力分布を TLM 法 (Transmission Line Modeling) を用いた電磁界解析 [TLM 電磁界解析ソフトウェア Micro-Stripes] により解析した。

TLM 法は解析空間をメッシュ切りして離散化し、離散点間を一次線路と仮定して、各格子点で散乱行列を定義し、波動を逐次的に計算する手法である。

表1 最適ヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の計算による設計寸法

Table 1. Optimally-designed dimension of helical heater sealing with calculation.

factor	length(mm)
p: pitch of heater wire	1.1
a: radius of section for heater wire	0.4
b: space between wire and tubular outer conductor	2.0
r: radius of heater wire	5.6
l: length of tubular outer conductor	20

図8 ヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の減衰特性

Fig. 8. Attenuation characteristics of helical heater sealing.

図9 TLM 解析モデル

Fig. 9. A model analyzed by TLM for helical heater sealing.

図10 透過特性 S_{21} の解析結果

Fig. 10. Frequency characteristics of transmission coefficient S_{21} with analysis.

図 11 解析モデルの電力分布解析結果
Fig. 11. Analyzed Power distribution of a model.

図 12 試作ヘリカルヒータ電磁波遮蔽機構
Fig. 12. Helical heater sealing made on an experimental basis.

図 9 は解析モデルを示しているが、解析に用いた各部寸法は表 1 の設計値を用いた。図 10 は透過特性 S_{21} 、図 11 は電力分布の解析結果を示している。図 10 よりヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構による電磁波遮蔽効果は、周波数 2,450MHz において約 -47 (dB) である。

また、図 11 は図 12 の断面の電力分布を示したものであり、右端入力側から入ったマイクロ波電力はヘリカルヒータの一巻き部あたりまではマイクロ波電力の分布 (図中明らかに表示されている部分) が見られるが、左端出力側ではこれはなく、入力側から入ったマイクロ波電力が出力側では遮断されていることがわかる。

以上の解析結果から、設計したヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構が十分に遮蔽効果があり、図 7 に示す平行線路近似が有効であることが確かめられた。

7. 試作伝送線路での電磁波遮蔽特性の測定

6. 章で解析した結果を利用して設計したヘリカルヒータ

図 13 試作ヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の減衰特性
Fig. 13. Frequency characteristics of transmission coefficient S_{21} for helical heater made on an experimental basis.

用電磁波遮蔽機構の電磁波遮蔽特性を検討するために、図 12 に示すような解析に用いたのと同じ構造の伝送線路を試作し、ネットワークアナライザを用いて S_{21} を測定した。測定結果を図 13 に示す。

図 13 からマイクロ波加熱装置の動作周波数 2,450 (MHz) における減衰量は約 -50 (dB) であり解析値に近い値が得られ、電磁波遮蔽が十分可能であることが解析と測定により確認された。

8. 実機モデルへの適用

設計・試作モデルで得られたヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構の結果をもとに、マイクロ波加熱装置の実機モデルにヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構を適用しその実用性能を確認した。図 14 にヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構を組み込んだ実機モデルを示す。

図 15 にはヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構部の拡大図を示している⁽⁷⁾。

マグネトロンの高周波出力は 500 (W) としている。ハザードメータを用い JIS 規格に準拠して、ヘリカルヒータ引き出し部 (図 14 で波線で囲んだ部分) からの距離 50 (mm) の位置で最大漏洩電力を測定した。その結果、漏洩電力は 0.2 (mW/cm²) 以下で、電子レンジの電波漏洩に関する電気用品取締法に基づく技術基準値以下であった⁽⁸⁾。

9. まとめ

本章では、特に電気ヒータを併用しているマイクロ波加熱装置 (オープンレンジ) に食品加熱用ヒータとして最近用いられてきた、ヘリカルヒータの電磁波遮蔽機構としてヒータ端末部外周囲に円筒導体を設けた機構を提案し、そ

図 14 ヘリカルヒータ用電磁遮蔽機構を組み込んだ実機モデル

Fig. 14. Combination microwave oven with helical heater sealing.

図 15 ヘリカルヒータ用電磁波遮蔽機構

Fig. 15. Magnification helical heater sealing used in combination microwave oven.

の特性について述べた。その結果、ここで提案した機構が試作モデルによる解析値で -47 (dB)、実測値で -50 (dB)、また、実機での漏洩電力は 0.2 (mw/cm²)以下となり十分な電磁波遮蔽効果のあることが解析と測定により確認された。

今後の解決すべき課題として、

- (1) ヒータの半径が大きくなったときの遮蔽効果の確認。
 - (2) それぞれのパラメータ寸法の許容値の確認。
- などがあげられる。

(平成 14 年 9 月 30 日受付, 平成 15 年 1 月 27 日再受付)

文 献

- (1) T.Kubota, H.Nakano, K.Koshiji, E.Shu, I.Kikuchi, and K.Sugimoto: "Electromagnetic Sealing for Helical Heater Terminal Used in Combination Microwave Oven", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers IEICE Transactions on Communications, Vol.E80-B, No.5, pp.706-708 (1997-3)
- (2) R.E.Collin: "Foundations for Microwave Engineering", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, pp.363-379 (1966)

- (3) Y.Shizawa, N.Kanai, S.Nakanishi, H.Takashima, T.Kubota, H.Nakano, E.Shu, and K.Koshiji: "Theoretical investigation on microwave sealing characteristics of Helical Heater inside tubular conductor", 1997 National Convention Record of IEE Japan, No.1077 (1997-3) (in Japanese)
志澤義信・金井教朗・中西正吾・高島 宏・窪田哲男・中野英樹・越地耕二・周 英明:「円筒導体内に挿入されたヘリカルヒータのマイクロ波シール特性の理論的検討」, 電気学会全国大会, 1077, pp.4-479 (1997-3)
- (4) Y.Shizawa, T.Kubota, H.Nakano, E.Shu, K.Koshiji, and I.Kikuchi: "Study of microwave sealing characteristics for helical heater used in Microwave Oven", Technical Report of IEICE Japan, EMCJ97-30, pp.51-56 (1997) (in Japanese)
志澤義信・窪田哲男・中野英樹・周 英明・越地耕二・菊池徹夫:「電子レンジにおけるヘリカルヒータのマイクロ波シール特性の検討」, 電子情報通信学会技術報告, EMCJ97-30, pp.51-56 (1997)
- (5) Y.Shizawa: "Study of microwave sealing for Helical Heater Terminal used in Microwave Oven", Master thesis of Faculty of Science and Technology, Tokyo Science University (1998-3) (in Japanese)
志澤義信: 電子レンジにおけるヘリカルヒータ線引き出し部の電磁遮蔽に関する研究, 東京理科大学理工学部電気工学科, 修士論文 (1998)
- (6) H.Kumagaya and T.Arakawa: "Electromagnetic theory", Asakura publishing Co., Tokyo, pp.181-187 (1967-6) (in Japanese)
熊谷寛夫・荒川奉二: 電気磁気学, 朝倉書店, pp.181-187 (1967-6)
- (7) Y.Kasai: "Microwave Engineering", Ohm Publishing Co., Tokyo, pp.56-61 (1960-12) (in Japanese)
香西 寛: マイクロ波工学, オーム社, pp.58-61 (1969)
- (8) T.Kubota, H.Nakano, K.Koshiji, and E.Shu: "Prevention of Microwave leakage from Helical Heater terminal for combination Microwave Oven", Technical Report of IEICE Japan, EMCJ96-21, pp.25-29 (1996-7)
窪田哲男・中野英樹・越地耕二・周 英明:「ヘリカルヒータ端末部における電波漏洩の防止」, 電子情報通信学会技術報告, EMCJ96-21, pp.25-29 (1996-7)
- (9) M.Fukuyama: "JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (Microwave Ovens)", Japanese Standards Association, JIC 9250, pp.4-5, p.18 (1992-4) (in Japanese)

窪 田 哲 男

(正員) 1949 年 10 月 16 日生まれ。72 年 3 月千葉工業大学工学部電子工学科卒業。98 年 3 月東京理科大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。72 年 4 月日立ホームテック入社。小型マイクロ波加熱装置の研究・開発・設計に従事。現在同社商品本部設計部主任技師。工博。電気学会, 電子情報通信学会, IEEE, 日本家政学会, 日本電磁波応用研究会会員。マイクロ波応用技術研究会企業委員

箱 山 明 義

(非会員) 1948 年 5 月 11 日生まれ。71 年 3 月北海道大学工学部電子工学科卒業。73 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。73 年日立製作所入所。ノンインパクトプリンタ開発業務等に従事。現在, 日立ホームテック商品本部取締役設計部長。電子情報通信学会, 日本信頼性学会会員。

長谷川 靖 信

(非会員) 1965年4月17日生れ。86年法政大学経済学部経済学科中退, 90年-94年, CAEを利用した人工衛星の構造解析の研究に従事。95年, 日商岩井ハイテック株式会社入社。電磁波シミュレータの販売・サポートに従事。現在 KCC 日本支店支店長。

越 地 耕 二

(正員) 1947年7月5日生まれ。78年3月東京理科大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。電波システム, 環境電磁工学, 医用電子工学の研究に従事。現在同大学理工学部教授。工博。IEEE, ASAIIO, 電子情報通信学会, 日本人工臓器学会, 日本 ME 学会, 回路実装学会等の会員。