原 著

マイクロ波加温用フェライト装荷導波管型アプリータ

豊福泰範 二川佳央 岡田文明

防衛大学校電気工学教室

Ferrite Loaded Waveguide Applicator for Microwave Heating

Yasunori Toyofuku, Yoshio Nikawa and Fumiaki Okada

Department of Electrical Engineering,
The National Defense Academy

Summary

It is difficult to heat deeper tumors using microwaves, because microwaves decrease rapidly in the muscle tissues. Nevertheless, it is possible to increase the penetration depth by controlling the electric field intensity and phase distribution on the aperture of the applicator in the range of low microwave frequency region.

In this paper, we developed the applicator at 430MHz which is partially loaded by the dielectric in the center and is loaded by the ferrites on the both sides of the dielectric. As ferrite permeability can be changed by applying the external D.C. magnetic field to the ferrites, the electric field distribution on the aperture of the applicator can be changed. Therefore, the radiated microwave from the applicator can be controlled only by changing the D.C. magnetic field intensity to the ferrites. The experimental results of the heating of phantom modeling material show that the applicator is available for the microwave heating for hyperthermia.

Key Words:

ハイパーサーミア	Hyperthermia
マイクロ波加温	Microwave heating
導波管型アプリータ	Waveguide applicator
フェライト装荷	Ferrite loaded
放射波の制御	Control of microwave radiation

1. はじめに

浅部の局所加温を目的としてマイクロ波を用いることは、加温を比較的容易に行うことが可能であることから、有効である¹⁾²⁾³⁾。一般にマイクロ波は組織内（特に筋肉媒質内）で急速に減衰するため、体表面を過度に温度上昇させずに深部加温を行うことは困難である。しかし、マイクロ波の中

でも低い周波数に属する 430MHz を用いて、表面冷却を併用しながら加温を行えば、適当な照射法を開発することにより、比較的深部の加温が可能となる⁴⁾⁵⁾。例えば、複数のアプリータによってアレイを形成し加温を行えば、より深部の加温には効果的であるが⁶⁾、給電方法、アプリータの装着等問題点も多い。単一のアプリータでも、

放射するマイクロ波を制御できれば、複数のアプリケーションと同様の効果が期待できる。

我々は、導波管にフェライト及び誘電体を装荷することにより、より深部加温が可能となり、また加温範囲も制御できる新しいアプリケーションを開発した。フェライトは、外部から直流磁界を印加すれば、透磁率が変化する特性を有している。この特性を用い、アプリケーション開口面上の電界分布を変化させ、アプリケーションより放射するマイクロ波の制御を行うことができる。以下、開口面上の電界分布制御の原理、及び本アプリケーションを用いた実験結果について報告する。

II. 電磁界分布の理論解析

アプリケーション開口部の電磁界分布を求めるため、Fig.1のように、無限長のフェライト板、及び誘電体（発泡スチロール）を装荷し、他の部分は水を充填した導波管中の電界分布について解析

を行った。

導波管内に複数の誘電体が装荷されたときの解析は、一般に複雑であり、フェライトを装荷した場合、フェライトの透磁率はテンソル値であるため、さらに解析が複雑になる。そこで、解析を容易にするため、以下に示す3つの条件下で解析を実施した。

第1に TE_{10} モードのように、導波管内の電界はY成分のみとし、電磁界はY方向には一様とする。

第2に導波管内の損失は無視し、位相定数 β は全領域で等しいとする。よって伝搬定数 $\Gamma = j\beta$ は一定である。

第3にフェライト内では、磁界は一様な楕円偏波をなすものとする。このとき、磁界の各成分は $H_x = jpH_z$, $H_z = -jqH_x$ (p :定数 $q = 1/p$) の関係が成立する。さらに、フェライトの透磁率 μ_f は次式で表される。

region 1,5 : water	$\epsilon = 78\epsilon_0$	$\mu = \mu_0$
region 2,4 : ferrite	$\epsilon = 10\epsilon_0$	$\mu = \mu_f' \mu_0$
region 3 : dielectric (styrofoam)	$\epsilon = \epsilon_0$	$\mu = \mu_0$

Fig. 1 Ferrites and dielectric loaded waveguide.

$$\mu_t = \begin{bmatrix} s & 0 & -jt \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ jt & 0 & s \end{bmatrix} \quad (1)$$

但し

$$s = \mu_0 + \frac{\omega' \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2)$$

$$t = \frac{\omega' \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (\text{領域 2 で +, 領域 4 で -}) \quad (3)$$

$$\omega_0 = -\gamma H_0 \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

$$\omega' = -\gamma M_s \quad (6)$$

μ_0 : 真空の透磁率

ω : 角周波数

H_0 : 外部直流磁界

γ : 磁気回転比

$(-7\pi \times 10^4 [1/s \cdot AT/m])$

M_s : フェライト飽和磁化

よって

$$\mu_t H = \begin{bmatrix} s & 0 & -jt \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ jt & 0 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s-qt & 0 & 0 \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & s-pt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = (s-qt \mu_0 s-pt) \begin{bmatrix} H_x \\ 0 \\ H_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

となり, μ_t はベクトルとして扱うことができる。

(外部磁界 200 Oe, フェライトの飽和磁界 1500 Gauss のとき $p=0.84 \pm 0.04$ となる。ここで, p は X の関数であるが, フェライトは非常に薄いため, p はほぼ一定と考えることができる。よってこの条件下で解析を行う。)

以下の条件下で, 導波管内の電界 E_y を求める。まず Maxwell 方程式及び境界条件より

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y + K^2 E_y = 0 \quad (8)$$

$$E_y(X = X_0) = 0 \quad (9)$$

$$E_y(X = X_5) = 0 \quad (10)$$

但し

$$K = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \quad (11)$$

式(8)~(11)を満足する E_y を, 係数 $A, B, C, \dots$ H を用いて, 次のように定める。但し, $\exp(j\omega t)$, $\exp(-j\beta z)$ は計算を簡単にするため省略した。

$$E_y = A \sin K_w(X - X_0) \quad : \text{領域 1} \quad (12)$$

$$E_y = B \sin K_f(X - X_1) + C \sin K_f(X - X_2) \quad : \text{領域 2} \quad (13)$$

$$E_y = D \sin K_d(X - X_2) + E \sin K_d(X - X_3) \quad : \text{領域 3} \quad (14)$$

$$E_y = F \sin K_f(X - X_3) + G \sin K_f(X - X_4) \quad : \text{領域 4} \quad (15)$$

$$E_y = H \sin K_w(X - X_5) \quad : \text{領域 5} \quad (16)$$

但し

$$K_w = \sqrt{78 \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2} \quad (17)$$

$$K_f = \sqrt{10 \omega^2 \epsilon_0 \mu_f - \beta^2} \quad (18)$$

$$K_d = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2} \quad (19)$$

磁界の Z 成分 H_z は, $\nabla \times E = -j\omega \mu H$ より次のように求められる。

$$-j\omega \mu_0 H_z = A K_w \cos K_w(X - X_0) \quad : \text{領域 1} \quad (20)$$

$$-j\omega \mu_0 H_z = B \frac{K_f}{\mu_f'} \cos K_f(X - X_1) + C \frac{K_f}{\mu_f'} \cos K_f(X - X_2) \quad : \text{領域 2} \quad (21)$$

$$-j\omega \mu_0 H_z = D K_d \cos K_d(X - X_2) + E K_d \cos K_d(X - X_3) \quad : \text{領域 3} \quad (22)$$

$$-j\omega \mu_0 H_z = F \frac{K_f}{\mu_f'} \cos K_f(X - X_3) + G \frac{K_f}{\mu_f'} \cos K_f(X - X_4) \quad : \text{領域 4} \quad (23)$$

$$-j\omega \mu_0 H_z = H K_w \cos K_w(X - X_5) \quad : \text{領域 5} \quad (24)$$

ここで μ_f' はフェライトの比透磁率の Z 成分であり, これを変数とし, 電界分布を制御する。

境界条件より, 各領域の境界部で電磁界の接線成分が連続なので, $X = X_1, X_2, X_3, X_4$, で境界条件を適用して

$$A S_w + C S_f = 0 \quad (25)$$

$$A K_w C_w - B \frac{K_f}{\mu_f'} - C \frac{K_f}{\mu_f'} C_f = 0 \quad (26)$$

$$B S_f + E S_d = 0 \quad (27)$$

$$B \frac{K_f}{\mu_f'} C_f + C \frac{K_f}{\mu_f'} - D K_d - E K_d C_d = 0 \quad (28)$$

$$D S_d + G S_f = 0 \quad (29)$$

$$D K_d C_d + E K_d - F \frac{K_f}{\mu_f'} - G \frac{K_f}{\mu_f'} C_f = 0 \quad (30)$$

$$F S_f + H S_w = 0 \quad (31)$$

$$F \frac{K_f}{\mu_f'} C_f + G \frac{K_f}{\mu_f'} - H K_d C_d = 0 \quad (32)$$

但し

$$S_w = \sin(K_w \times L_a) \quad (33)$$

$$C_w = \cos(K_w \times L_a) \quad (34)$$

$$S_f = \sin(K_f \times L_b) \quad (35)$$

$$C_f = \cos(K_f \times L_b) \quad (36)$$

$$S_d = \sin(K_d \times L_c) \quad (37)$$

$$C_d = \cos(K_d \times L_c) \quad (38)$$

式(25)～(38)より電磁界の係数 $A, B, C, \dots, H$ が計算され、導波管内の電磁界が求められる。しかし、 $S_w, S_f, \dots$ 等はすべて β の関数なので、係数 $A, B, C, \dots, H$ を計算するため β を求める。そのため式(25)～(32)を $A, B, C, \dots, H$ で整理して、行列で表す。 $A, B, C, \dots, H$ が0以外の解を持つためには、この行列式が零となることが必要十分条件である。よって式(39)より β が求められ、導波管内の電磁界が解析される。

$$\begin{vmatrix} S_w & 0 & S_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_w C_w & \frac{K_f}{\mu_f} & \frac{K_f C_f}{\mu_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_f}{\mu_f} & 0 & 0 & S_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_f C_f}{\mu_f} & \frac{K_f}{\mu_f} & -K_d & -K_d C_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_d & 0 & 0 & S_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_d C_d & K_d & \frac{K_f}{\mu_f} & \frac{K_f C_f}{\mu_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_f & 0 & S_w \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_f C_f}{\mu_f} & \frac{K_f}{\mu_f} & -K_w C_w \end{vmatrix} = 0 \quad (39)$$

実際に電界分布を求めてみる。一例として、以下の場合で計算を行う。

導波管の幅 $L: 120 \text{ mm}$

フェライト板の幅 $L_b: 4 \text{ mm}$

誘電体の幅 $L_c: 22 \text{ mm}$

フェライトの比透磁率 $\mu_f: 1 \sim 10$

この時、 β は $61.6 \sim 67.3 [\text{rad/m}]$ となり、 E_y は Fig. 2 に示す分布となる。フェライト板の幅は、導波管のわずか7%以下であるが、 μ_f により大きく変化することがわかる。

III. 電界分布測定の結果

III-1 実験の概要

Fig. 3 に、今回開発したフェライト装荷導波管型アプリケーションを示す。内部にはフェライト、及び誘電体（発泡スチロール）を装荷し、 μ_f を制御するため外部より直流磁界 H_0 をフェライトに垂直に印加する。また他の部分には水を充填させ、外部に取り付けた恒温槽とポンプにより、アプリケーション内部に一定温度 (20°C)

Fig. 2 Calculated value of electric field intensity inside the waveguide.

Fig. 3 Schematic view of the ferrite loaded waveguide applicator.

の水が供給されるように設定した。これにより、アプリータの小型化、生体組織とのインピーダンス整合、生体表面の冷却等の面で性能の向上を図った。

アプリータの幅 L を大きくすれば TE_{30} モードが発生し、アプリータ内の磁界は複雑かつ不安定となる。よってここでは、基本モードのみが発生し、かつ開口面上の電界分布の変化を最大にするため、アプリータの幅を充分に大きくとり $L=120\text{ mm}$ とした。

次に、本実験の概要を Fig. 4 に示す。マイクロ波は図のアプリータの下方より給電され、上方の開口面より水槽へ放射される。水槽には、0.4 % NaCl 水溶液 (430 MHz で、筋肉組織とほぼ同一の誘電損率を有する⁷⁾⁸⁾) で充填した。測定面は、アプリータ開口面上と、それに垂直な面 (以下放射方向測定面とする) を選び、本アプリータより放射するマイクロ波の分布を測定し、検討を行った。

Fig. 4 Experimental setup for the measurement of electric field intensity inside 0.4% NaCl solution.

Fig. 5 SAR distributions along X-axis ($Y=0$) of the aperture.

III-2 開口面上の電界分布測定

開口面中央の電界分布を Fig.5 に示す. この測定結果は理論解析とほぼ一致し, フェライトに磁界を印加すると, 理論解析において μ_r を変化させた場合と同様の变化がみられた (Fig. 2 参照). なお電界分布は比較を容易にするため, 開口面中心を SAR=100 % に正規化した (以降も同様).

III-3 放射方向の電界分布測定

放射方向測定面上の, SAR 分布を Fig.6 に示す. Fig.6 (a), (b)を比較してみると, フェライトに直流磁界を印加することにより, 放射

電磁界を制御できることが確認された. 特に放射方向の中心軸 (Z軸) 上に着目すれば, $Z=4$ cm の位置で, フェライトに磁界をかけない場合 SAR=32 % に減衰したが, 磁界を印加した場合 SAR=45 % の減衰にとどまり, フェライトに直流磁界を印加することにより, 電界の減衰を抑えられることが確認された.

Fig.7 は測定面上での位相分布であり, この等位相線はZ軸上を中心とする同心円をなしている. 放射電磁波は等位相線に垂直に伝搬すると考えられるため, 本アプリケーションより放射した電磁波は中央に指向することがわかる.

Fig. 6 SAR distributions on the measured plane.
(a) The case of non-magnetizing the ferrites.
(b) The case of magnetizing the ferrites.

Fig. 7 Phase distribution of the radiated electric field on the measured plane.

III-4 加温実験

本アプリケーションを用いて、生体の筋肉組織を模擬したファントムモデルに対し加温実験を実施した。実験方法は Fig. 4 において、NaCl 水溶液の代わりに、ファントムモデル (組成: 0.35 % NaCl, 0.05 % NaN_3 , 4.0 % Agar, 95.6 % H_2O) を水槽に入れ、入射電力 200 W で加温した。加温後ファントムモデルを X-Z 面 ($Y=0$) で切断し、ファントム内の放射方向測定面 (切断面) の温度上昇を測った。結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から特にフェライトに磁界を印加した場合、温度上昇の最大点は Z 軸上には表れず、Z 軸の左右に発生しているものの、深さ 5 ~ 6 cm まで十分に加温されており、効果的な深部加温が期待できるものと思われる。なお、直流磁界を加えない場合、深さ 5 ~ 6 cm の深部加温は困難になる。

IV. まとめ

フェライト及び誘電体を装荷した、マイクロ波加温用、導波管型アプリケーションについて基礎的な検討を行った。

本アプリケーションは、装荷物を取り替えることなく、外部より直流磁界を印加するだけで、アプリケーション内の電磁界分布を変化できる。この原理を用い、アプリケーションより放射するマイクロ波の分布を容易に制御することが、理論解析及び実験結果より実証された。

また、外部磁界は 200 Oe 程度で、電界分布を変化でき (フェライトの共振磁界はマイクロ波周波数 430 MHz で約 150 Oe)、市販されている磁石で得られる磁界でも十分に制御可能である。そのため、本アプリケーションを用いた加温装置は、従来の導波管型アプリケーションと同様、軽量になり得るものと考えられる。さらに、本アプリケーションより放射されるマイクロ波は、中央に指向しており、効果的な患部加温が期待できる。

しかしながら、開口面上の電界分布は、中央より両側が強くなるため、放射方向の電界強度は、Z 軸上よりその左右が強くなる傾向がある。体表面はアプリケーションの表面冷却作用より、温度上昇は抑えられるものの、生体内部においては、温度上昇最大点が中心軸上以外で発生してしまう。今後、装荷する誘電体の誘電率、フェライトの位置

Fig. 8 Temperature elevation distributions in the phantom model.
 (a) The case of non-magnetizing the ferrites.
 (b) The case of magnetizing the ferrites.

等を変化させ、開口面上の電界分布を最適化し、より効果的な深部加温が行えるよう検討を行う予定である。

文 献

- 1) 柄川順, 石岡邦明, 早川吉則, 川田祥裕, 内田雄二, 梅垣洋一郎, 平福三吉, 内藤紘: Hyperthermia を目的としたマイクロ波加温装置 —小口径アプリータの検討—. 癌の臨床 27(1): 1-6, 1981.
- 2) Uzunoglu, N.K., Angelikas, E.A., and Cosmidis, P.A.: A 432-MHz local hyperthermia system using an indirectly cooled, water-loaded waveguide applicator. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-35, No2: 106-111, 1987.
- 3) Kantor, G.: Evaluation and survey of microwave and radio frequency applicators. J. Microwave Power, 16: 135-150, 1981.
- 4) 二川佳央, 菊地真, 寺川隆成, 吉田翼, 松田忠義: 電波レンズ型 430 MHz マイクロ波加温装置の開発に関する研究 (第 I 報) —電波レンズ型アプリータの開発—. 日本ハイパーサーミア誌 4 (2): 156-161, 1988.
- 5) Nikawa, Y., and Okada, F: Dielectric-loaded lens applicator for microwave hyperthermia. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-39, No.7: 1173-1178, 1991.
- 6) Turner, R.F.: Regional hyperthermia with an annular phased array. IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-31: 106-114, 1984.
- 7) Stuchly, N.A., and Stuchly, S.S.: Dielectric properties of biological substances—tabulated. J. Microwave Power, 15, 1: 19-26, 1980.
- 8) Nikawa, Y. and Okada, F.: Measurement of temperature depending dielectric constant of human modeling materials. The 3rd Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 845-848, 1990.