

高周波誘導加熱におけるコイル形状の改良

Improvement of the Coil Construction in High-Frequency Induction Heating

榎園正人・戸高 孝・中村 斉・福田龍吉郎*

大分大学工学部, 大分県大分市旦野原 700 (☎870-1124)

*株式会社フジマック, 福岡県粕屋郡古賀町大字鹿部字小牧 246-1 (☎811-3100)

M. Enokizono, T. Todaka, H. Nakamura, and R. Fukuda*

Faculty of Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-1124

*FUJIMAK Corporation, 246-1 Komaki, Shishibu, Koga, Kasuya, Fukuoka 811-3100

This paper deals with the design, based on the finite element method, of a high-frequency induction coil shape used in an electromagnetic heating device. In the case of gas heating, the center of a pan placed on the device can be effectively heated. In the case of heating with a conventional exciting coil, the heating condition is not uniform. Therefore, we improved the exciting coil shape for uniform heating by means of three-dimensional eddy current analysis under the thin plate approximation and by conducting an experiment.

Key words: high-frequency induction heating, uniform heating, eddy current, three-dimensional eddy current analysis

1. はじめに

高周波誘導加熱装置は渦電流を利用したもので、機械部品の表面焼入れ、鋼管の溶接、溶解などに幅広く用いられている。近年、省エネルギー、無公害、高効率、火災防止などの観点から、民生用の電磁調理器に適用されるようになってきた。ところが、電磁調理器の設計は、均一加熱や局所加熱に関する経験をもとにした実験によるものがほとんどである。しかし、工業用ではあまり問題にならないが、民生用となると使い良さということが重要となる。そのため、装置の設計を行うためには、渦電流の詳細な分布を知ることができる数値シミュレーションによる設計支援が必要となっている。そこで、本論文では、T法を用いた有限要素法によって、中華鍋用の誘導加熱レンジにおける均一加熱の検討を行った。Fig. 1に、その装置図を示す。さまざまなコイル形状による解析を行う必要があるため、ここでは3次元渦電流解析を行った¹⁾。

誘導加熱レンジにおいてもガスレンジと同様な温度分布が要求されるが、Fig. 2に示すように、ガスレンジが鍋の中心部分を加熱するのに対し、従来の誘導加熱レンジは既存の誘導加熱装置の技術をそのまま応用しているため、中心部分が加熱されないという欠点がある。従来の誘導加熱レンジで鍋の中心部分が加熱されなかった理由は、鍋の中心部分に渦電流が流れていなかったからである。渦電流分布を変える方法としては、磁束収束板を用いる、鍋の材質を部分的に変更する、励磁コイル形状を改良するなどさまざまな方法がある。しかし、磁束収束板を用いると、比加熱物がない場合には電力を消費しないという誘導加熱の長所が失われ、比加熱物がなくても磁束収束板が

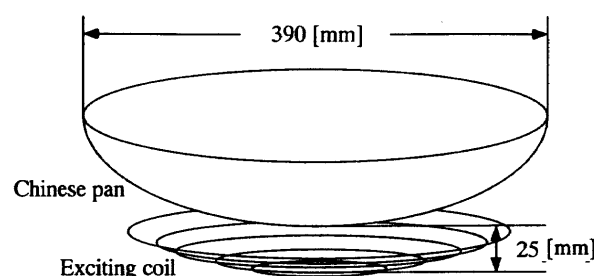


Fig. 1 High-frequency induction heating apparatus.

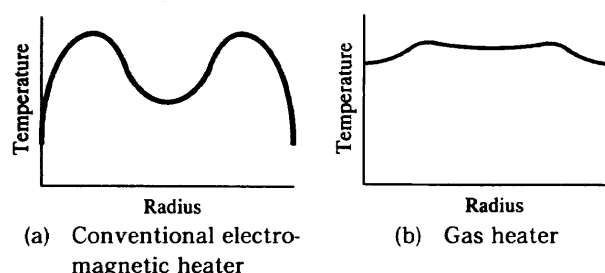


Fig. 2 Temperature distribution.

加熱されるため火災防止などの観点から、民生用には適用しにくい。また、鍋の材質を部分的に変更すると、鍋を買い換えなければならないので民生用には適用しにくい。そこで、本論文では、使用者の立場から見て従来のものと同様に使用することできるように、コイル形状の改良を行うことにより、渦電流分布の改良を行った。本論文では、いくつかの励磁コイルに対する渦電流分布および温度分布の解析ならびに実験結果について述べる。

2. 渦電流解析

変位電流の項を無視した準静的なマクスウェル方程式は、

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial}{\partial t} (B_0 + B_e) \quad (2)$$

ここで、 H は磁場、 J は電流密度、 E は電場、 B_0 は印加磁束密度、 B_e は渦電流のつくる磁束密度である。構成方程式 $B = \mu_0 H$ 、 $J = \sigma E$ 、および $J = \text{rot } T$ (T : 電流ベクトルポテンシャル) と (2) 式より

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times T = - \frac{\partial}{\partial t} (B_0 + B_c) \quad (3)$$

が得られる。

Biot-Savart の法則と Helmholtz の定理および $\text{div } T = 0$, $n \times T = 0$ より

$$\mu_0 T = B_c - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S (n \cdot T) \nabla' \cdot \frac{1}{R} dS' \quad (4)$$

(4) 式を (3) 式に代入すると、T 法の支配方程式が得られる¹。

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times T + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} T \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S T n \nabla' \cdot \frac{1}{R} dS' = - \frac{\partial}{\partial t} B_0 \end{aligned} \quad (5)$$

導体の厚さが表皮深さよりも薄いとき (5) 式は次のようになる

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{1}{\sigma} \nabla T n + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} T n \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} n \cdot \int_S T n \nabla' \cdot \frac{1}{R} dS' = - \frac{\partial}{\partial t} n \cdot B_0 \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式に Galerkin 法を適用して

$$\begin{aligned} h \int_S Ni \left(\nabla \cdot \frac{1}{\sigma} \nabla T n + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} T n \right. \\ \left. + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} n \cdot \int_S T n \nabla' \cdot \frac{1}{R} dS' + \frac{\partial}{\partial t} n \cdot B_0 \right) dS = 0 \\ \frac{1}{\sigma} \int_S Ni \cdot \nabla \cdot \nabla T n dS + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_S Ni \cdot T n dS \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S Ni \cdot n \cdot \int_S T n \nabla' \cdot \frac{1}{R} dS' dS \\ = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S Ni \cdot n \cdot B_0 dS \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 Ni は内挿関数、 h は導体の厚さである。

3. 結果と検討

Fig. 3 に解析モデルの要素分割図を示す。図のように中華鍋と励磁コイルのみとした。要素数 5400、節点数 2886 である。表皮効果を考慮するために、薄板を 6 枚積層し解析を行った。解析条件は、透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 、導電率 $\sigma = 1 \times 10^7$ [S/m]、周波数 $f = 20$ [kHz]、励磁電流 $I = 8$ [A] とした。

Fig. 4 に解析に用いた励磁コイル形状を示す。(a) が従来から用いられている励磁コイルである。(b), (c), および (d) が、改良した励磁コイルである。(b) は、8 の字形に巻いたもので、中心部分が最も磁束が強くなるようにしている。(c) および (d) は、1/4 ずつ巻いたものである。(c) は、(b) の 8 の字コイルと同じ働きをするものを二つ配置している。(d) では、(c) と同様の 1/4 コイルを用いているが、磁束の向きを変更し隣合うコイルがそれぞれ影響して、強め合うように配置している。

Fig. 5 から Fig. 8 にそれぞれの励磁コイルにおける解析結果を示す。(a) は渦電流分布、(b) は渦電流の大きさの 2 乗に導体の抵抗を掛けて求めた熱源分布である。

Fig. 5(a) より、Coil-1 を用いると中心にはほとんど渦電流が流れていないことがわかる。そのために、中心部分は発熱していないことが (b) よりわかる。

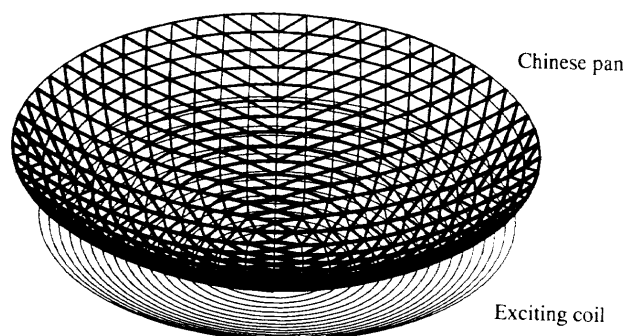


Fig. 3 Arrangement of triangular elements.

Coil-2 を用いると、中心部分には大きな渦電流が流れるが、その他の部分にはほとんど渦電流が発生していないことが Fig. 6(a) よりわかる。よって、(b) に示すように中心部分だけが加熱され他の部分の温度が上がらないと予想される。そこで、熱源が広がるように 8 の字コイルを二つ用いたのが Fig. 7 である。

Coil-3 を用いると、渦電流が集中している部分が 2 カ所あり熱源が広がっているが、渦電流が互いに逆向きに発生する部分があり、弱め合う部分があることが Fig. 7(a) よりわかる。そのため (b) に示すように、渦電流が弱め合っているところは、熱が発生していないことがわかる。

Fig. 8 では、Coil-3 を改良し、渦電流が互いに逆向きに発生する部分をなくすようにコイルを配置したため (a) のように均一な渦電流分布を得ることができた。(b) に示すように Coil-4 を用いればほぼ均一な温度分布が得られると思われる。

次に実験結果について示す。Fig. 9 に測定システムを示す。波形発振器で周波数 20 kHz の正弦波をつくり、パワーアンプに入力し 8 A で中華鍋を励磁した。温度測定には、サーモグラフィカメラを用いた。励磁コイルは Fig. 4 の (a), (b), (d) を用いた。実際の装置では、電圧一定で励磁を行っているが、今回の測定では、解析と同条件で行うために電流一定で行った。そのため、効率などは検討せずに温度分布のみの検討を行った。

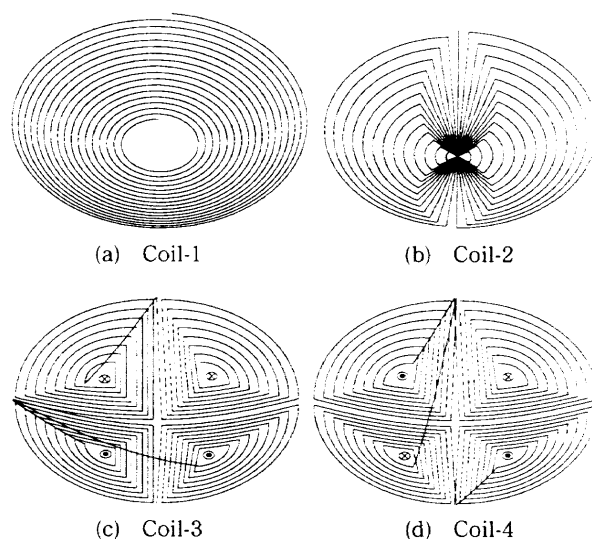
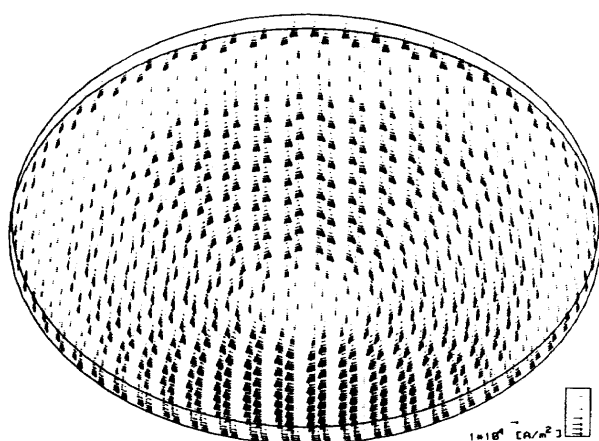
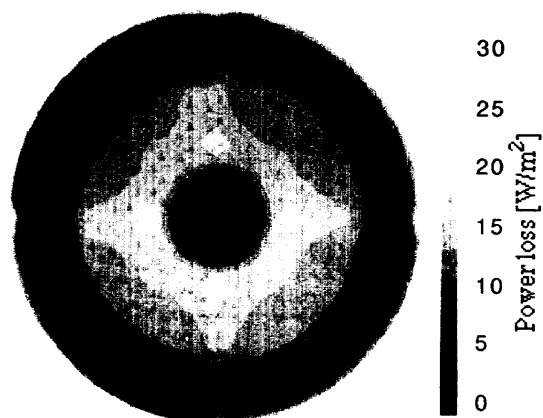


Fig. 4 Exciting coil shapes.

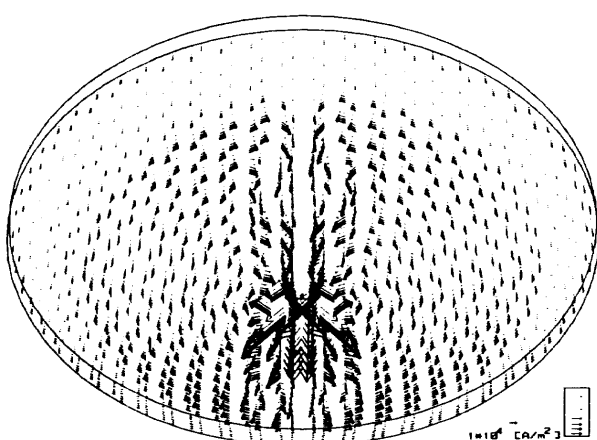


(a) Eddy current density distribution

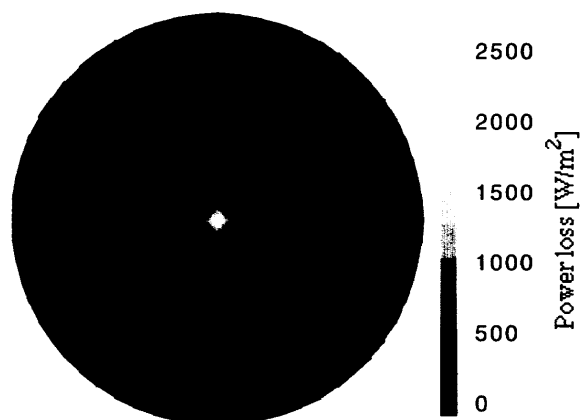


(b) Heat source distribution

Fig. 5 Coil-1.

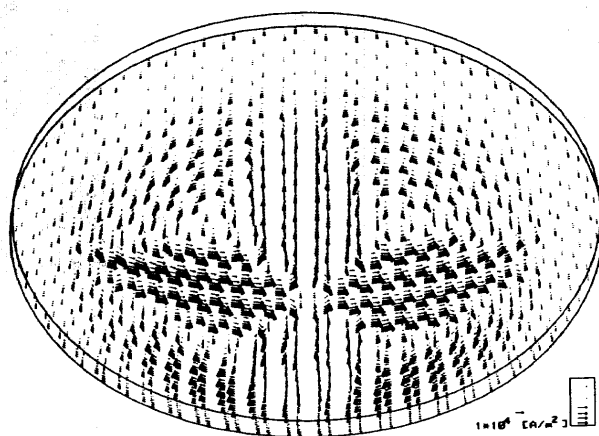


(a) Eddy current density distribution



(b) Heat source distribution

Fig. 6 Coil-2.



(a) Eddy current density distribution



(b) Heat source distribution

Fig. 7 Coil-3.

Fig. 10 に測定結果を示す。(a)は、Coil-1を用いた結果である。Fig. 5(b)の熱源分布と同じように、鍋の中心部分の温度が他の部分に比べて低いことがわかる。(b)は、Coil-2を用いたものである。Fig. 6(b)の熱源分布と同じく、中心部分の温度のみ上昇している、他の部分の温度が上がっていないことがわかる。(c)は、Coil-4を用いたものである。熱源分布では、

中心部分は発熱していないが、熱伝導により、ほぼ均一な温度分布が得られていることがわかる。

4. ま と め

薄板近似の3次元有限要素法により、高周波誘導加熱レンジの渦電流解析を行った。得られた結果から熱源分布の計算を

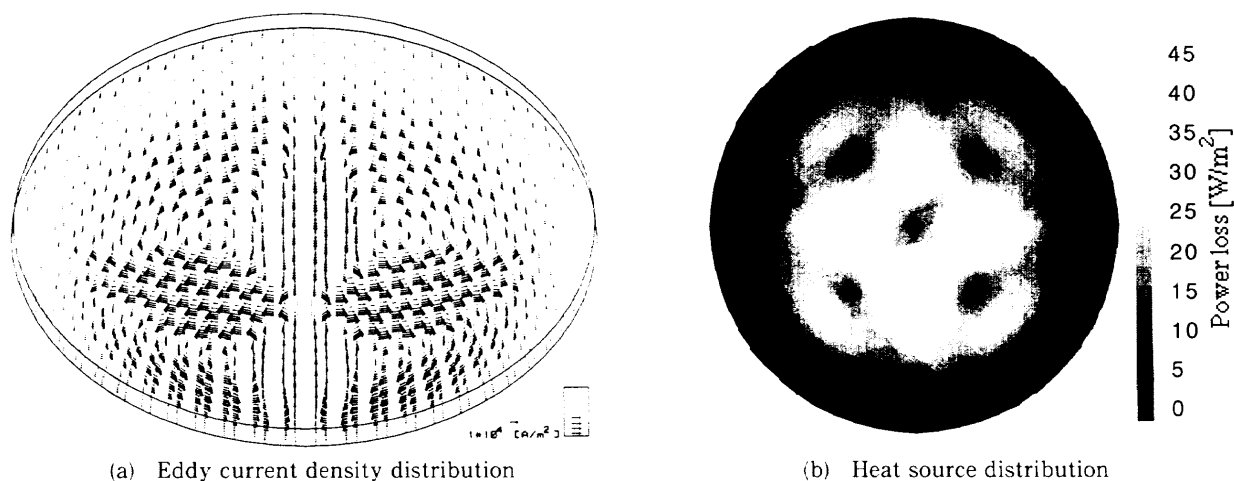


Fig. 8 Coil-4.

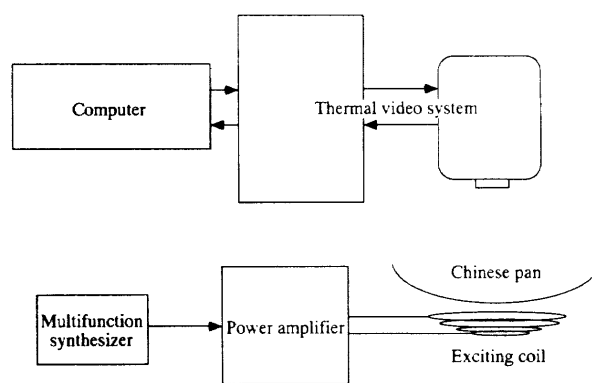


Fig. 9 Temperature measurement system.

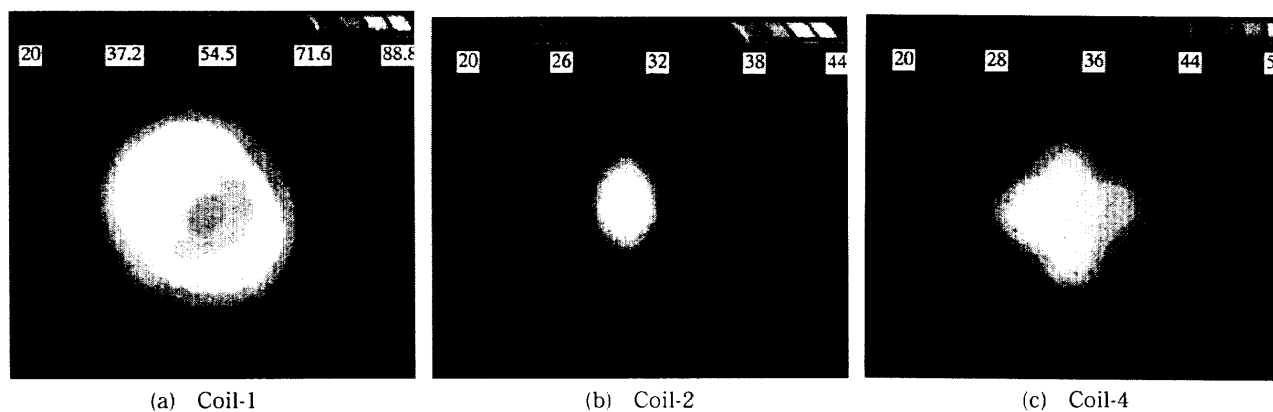


Fig. 10 Temperature distributions.

行った。また、解析に用いた励磁コイルを作製し、温度分布の測定を行った。解析および実験結果から、均一加熱を実現するほぼ最適なコイル形状を得た。

さらに現実的な解析を行うために、磁界と温度の連成解析を行う必要がある。

文 献

- 1) 宮田浩一, 杉浦寿彦, 橋爪秀利, 宮 健三: 電気学会回転機・静止器合同研究会資料, SA-87-39, RM-87-76 (1987).

1997 年 10 月 29 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録