

誘導加熱コイルの最適設計に関する基礎的検討

原田佳直*、早野誠治、斎藤兆古

(法政大学 工学部)

Basic Studies of Optimal Induction Heating Coil Design

Y.Harada S.Hayano Y.Saito

(College of Engineering, Hosei University)

Generally, a control of heat distribution in induction heating is conceivable that an optimal design of induction heating coil shape is the most effective method. Thereupon, in this paper, as the first stage of an optimal design of a coil shape, we propose the measurement method of eddy current distribution in an induction heating object. As a result, the difference of eddy current distribution by various kinds of coil shape was clarified.

キーワード：誘導加熱 渦電流分布 局所加熱
(Induction heating, Eddy current distribution, Local heating)

1. まえがき

加熱による材料加工は、金属の加工のみならず陶器や磁器に至るまで汎用に行われている。最近では、誘導加熱加工技術が、金属やプラスチックの整形などに止まらず、食品を加工する技術として脚光を浴びている。食材を誘導加熱によって加工・調理する技術は、直火を使わないことや加熱の電氣的制御の容易さからますます広く応用されつつある。

電氣的に加熱する技術は、単純なヒータから始まり、誘導加熱の汎用化で直火を使用する加熱方式を置き換えつつある。この理由は、

- 1) 加熱対象を直接内部から加熱するため、効率が高く、直火では30%程度の熱効率が80%以上となる、
- 2) 加熱対象に直接接触する必要がなく加熱が可能である、
- 3) 直火の使用が禁止されている場所でも使用可能である、

等にあると考えられる[1, 2]。

誘導加熱技術は、上記のような利点を有する反面、加熱源となる渦電流分布を制御し、対象の熱分布を制御するのが比較的困難である。換言すれば、加熱対象に加わる全体としての熱量を制御するのは容易であるが、熱分布そのものを制御する技術が未開拓である。特に食品加工用誘導加熱は、従来の直火に近い局所的な加熱が強く望まれている。具体的な例を上げれば、炊飯器は均一な加熱ではなく局所的な加熱を行うことで、いわゆる“かきの穴”が複数形成される方が美味しい炊き上がりとなることが知られている。

誘導加熱による熱分布の制御は、

- 1) 加熱対象の導電率や透磁率を変更する方法、
- 2) 加熱対象の熱拡散条件を変更する方法、

3) 励磁コイルを变形する方法、
 等が考えられる。この中で、1) のいわゆる物性定数を変更する方式は対象の形状・重量・コスト等の面から実用化が困難である。2) の熱的境界条件を変更する方式は、対象の形状が任意であり、且つ重量的制限が無ければ可能である。現実には困難である。従って、3) の励磁コイル形状の最適化が可能な方法となる。

さて、局所的加熱を可能とする励磁コイルを設計するには、

- 1) 励磁コイル形状と渦電流分布の関係、
 - 2) 渦電流分布と熱分布の関係、
- を把握する必要がある。

本稿では、加熱対象に流れる渦電流分布の測定法と各種コイル形状による渦電流分布の相違を明らかにする。

2. 磁界測定および渦電流分布測定

2. 1. 原理

図1のように平面上にループ電流が流れているとする。この電流 I は平面状に磁界 H を発生する。この磁界 H を x - y 平面に平行に位置するサーチコイルで測定することを考える。いま、巻き数 n のサーチコイルに鎖交する磁束を ϕ とすれば、サーチコイルに誘起する電圧は、

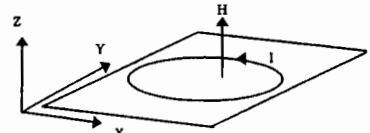


図1 電流 I と磁界 H

$$u = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

で与えられる。磁束 ϕ は、サーチコイルの断面積を S 、空気中の透磁率を μ_0 とすれば、

$$\phi = \mu_0 SH \quad (2)$$

であるから、(1)式の誘導起電力を

$$u = u_m \sin(\omega t - \pi/2) \quad (3)$$

とすれば、磁界 H は、

$$H = \frac{u_m}{\mu_0 n S \omega} \sin(\omega t) \quad (4)$$

で与えられる。

(4)式で得られる磁界が図1の z 方向成分 H_z のみであり、且つサーチコイルが電流 I の流れる面に密着しているとすれば、 x - y 方向の電流密度 J_x 、 J_y は、

$$\nabla \times \mathbf{H} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & H_z \end{vmatrix} = \mathbf{i} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \mathbf{j} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (5a)$$

又は、

$$J_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad J_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (5b)$$

で与えられる。

次に、磁界 H_z が図2に示すように H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 の4点で測定されたとすれば、同図中の電流密度 J_x 、 J_y はそれぞれ、

$$J_x = \frac{(H_2 + H_3)/2 - (H_1 + H_4)/2}{\Delta y} \quad [\text{A}/\text{m}^2] \quad (6a)$$

$$J_y = \frac{(H_1 + H_2)/2 - (H_3 + H_4)/2}{\Delta x} \quad [\text{A}/\text{m}^2] \quad (6b)$$

で近似的に与えられる。

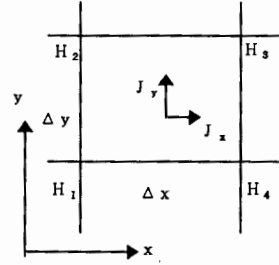


図2 J_x 、 J_y の計算

2. 2. 測定用サーチコイルの校正

サーチコイルで磁界を測定する場合、サーチコイルを形成する導体は有限の寸法であり、サーチコイルの面積 S も有限である。このため、予めサーチコイルを校正する必要がある。半径 a を有する 1 巻きコイルの中心磁界は、

$$H = \frac{I_m}{2a} \sin \omega t \quad (7)$$

であるから、誘起起電力の理論値は

$$u = \frac{\mu_0 S I_m}{2a} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

となる。この理論値と実際に作成したサーチコイルの実測誘起電圧から図3に示す校正曲線が得られる。図3から誘起電圧の振幅は周波数に対して変化する、校正する必要があることがわかる。他方、位相は無視できる程度の誤差である。

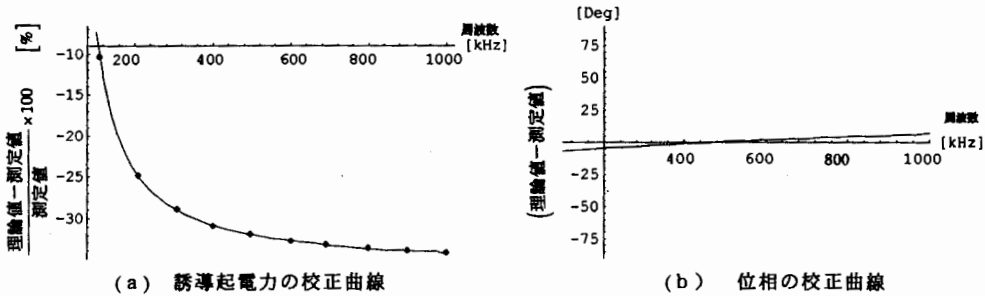


図3 サーチコイルの校正

3. 磁界分布と電流分布

3. 1. 測定装置

図4に示すように加熱対象と励磁コイル間にサーチコイルを挿入する装置を作成した。励磁コイルには円形、くし形、X字形コイルの3パターンを用いた。

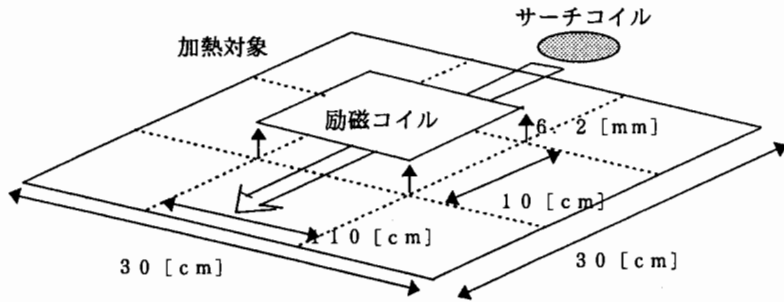


図4 実験装置

3. 2. 円形励磁コイル

3. 2. 1. 渦電流による磁界分布 まず、最初に測定される磁界分布の妥当性を調べるために、図5に示す円形励磁コイルによる磁界分布を測定し、理論値の磁界分布と比較する。図6(a)が理論値による磁界分布であり、図6(b)が実測値による磁界である。両者の相関係数は0.976であり、ほぼ正確に磁界分布が測定されることが確認できた。

次に、励磁コイルと加熱対象間の磁界分布を測定した。その結果を図6(c)に示す。図6(c)の磁界分布は励磁コイルの磁界と対象上の渦電流による磁界の和となる。従って、図6(c)の磁界分布から図6(b)の磁界分布を引き算することで、渦電流に起因する磁界分布、図6(d)が得られる。図6(d)で、濃い部分は負で、白色に近い薄い部分は正の値を示すから、渦電流による磁界は図6(b)に示す励磁コイルによる磁界を打ち消す方向であることがわかる。

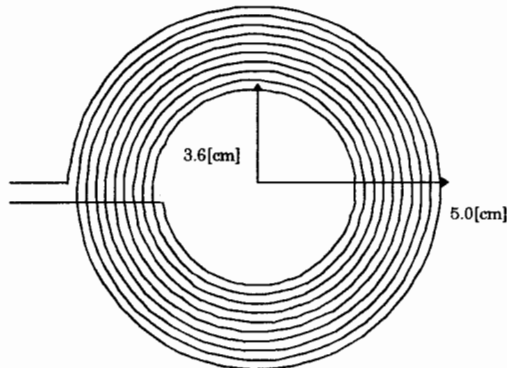
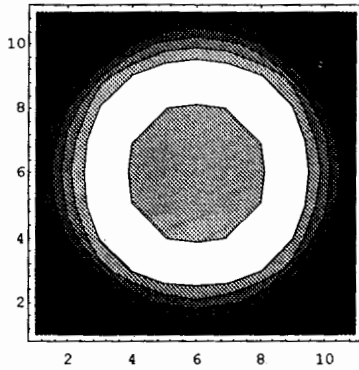
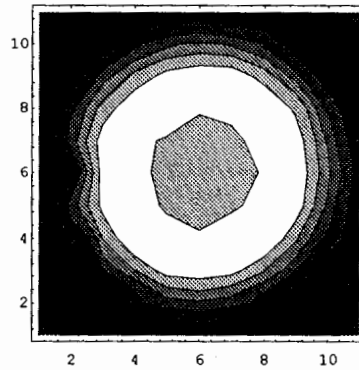


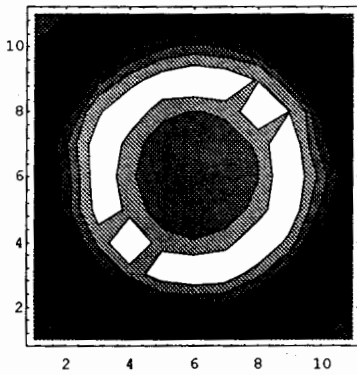
図5 円形コイル 巻数20回



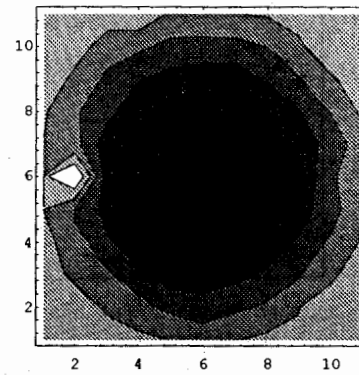
(a) 磁界分布 (理論値)



(b) 磁界分布 (実測値)



(c) コイル-加熱対象間の磁界



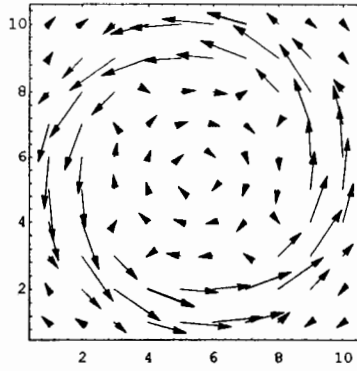
(d) 渦電流による磁界

図6 円形励磁コイルの磁界

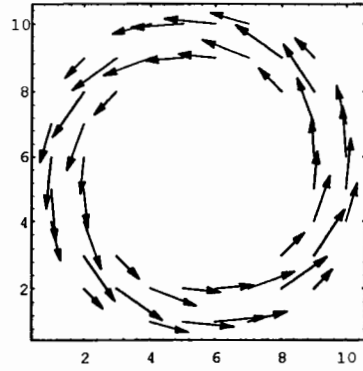
3. 2. 2. 渦電流分布 渦電流分布は図 6(d)に示す磁界分布を用いて(6a)、(6b)式により計算される。しかし、(6a)、(6b)式は空間微分の近似演算であるため、誤差を拡大する可能性がある。このため、予め既知の電流分布に対して(6a)、(6b)式の妥当性を吟味する必要がある。

図 7(a)は、図 6(a)に示す磁界分布の理論値に(6a)、(6b)式を適用して求めた電流密度分布である。この結果は、コイルが存在しない励磁コイルの中心部分にも電流密度ベクトルが存在することを意味する。換言すれば、電流密度ベクトルの絶対値が小さい部分は(6a)、(6b)式による近似計算誤差である。従って、電流密度ベクトルの絶対値が一定値以上の部分のみ取り出せば、図 7(b)に示すように励磁コイル上の正確な電流分布となる。

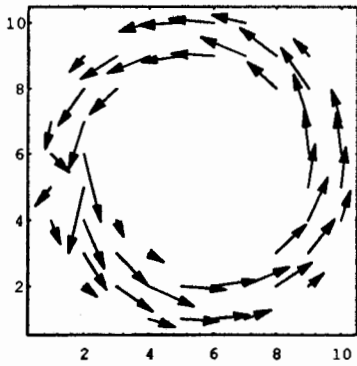
図 7(c)は図 6(b)の実測磁界分布から求めた励磁コイルの電流分布であり、ほぼ妥当な結果と考えられる。図 6(b)の左端中央部における電流密度分布の乱れは、コイル端子部分であることを示している。図 7(d)は図 6(d)の磁界分布から求めた渦電流分布である。図 7(c)の励磁コイル中の電流分布に対して、逆方向に流れる電流分布となり、励磁コイル幅よりも広く拡散した径路を流れることがわかる。



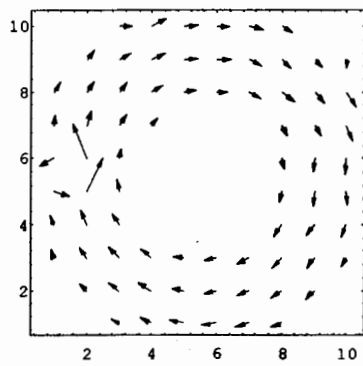
(a) 励磁コイルの磁界（理論値）による電流密度ベクトル分布



(b) 誤差を除いた励磁コイルの磁界（理論値）による電流密度ベクトル分布



(c) 励磁コイルの磁界（実測値）による電流密度ベクトル分布



(d) 渦電流密度ベクトル分布

図7 円形励磁コイルの電流密度分布

3. 3. くし形励磁コイル

図8に試作したくし形励磁コイルを示す。このコイルは、渦電流分布が励磁コイル形状と相似となることを考慮して、互いに逆方向に電流が流れるスリット間に高磁界分布を形成し、局所的に大きな渦電流密度を得ることを意図したものである。

図9(a)に励磁コイルによる磁界分布を示す。図9(b)は励磁コイル中の電流密度分布である。ほぼ同じ絶対値の電流密度ベクトルが励磁コイルに沿って流れていることがわかる。図9(c)は渦電流に起因する磁界分布であり、励磁コイルのスリット部に対応する位置に大きな磁界が得られていることがわかる。図9(d)は図9(c)から計算された渦電流分布である。渦電流分布は励磁コイルに相似で拡散した分布となるから、励磁コイルのスリット部に渦電流が集中する分布となる。図9(d)はスリット部の電流密度ベクトルが他の部分と比較して大きな値となることを示している。このことから、中心付近で局所的な加熱が可能なのではないかと考えられる。

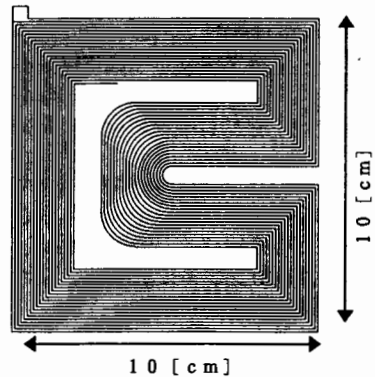
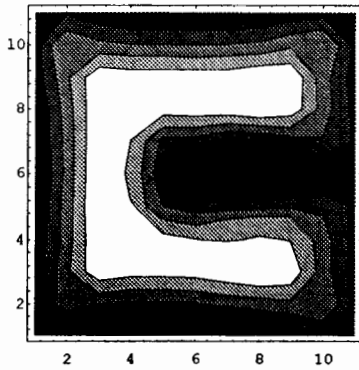
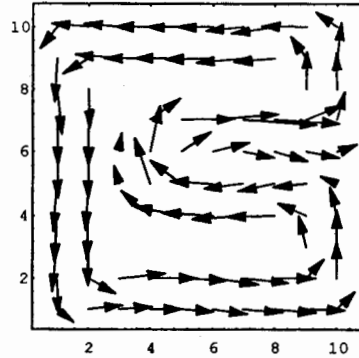


図8 くし形コイル 巻数20回

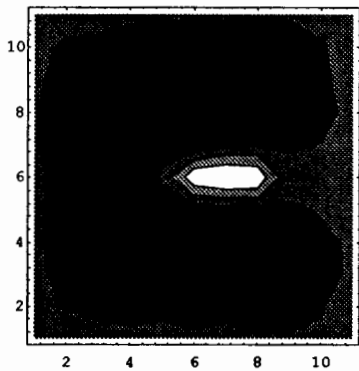
このことから、中心付近で局所的な加熱が可能なのではないかと考えられる。



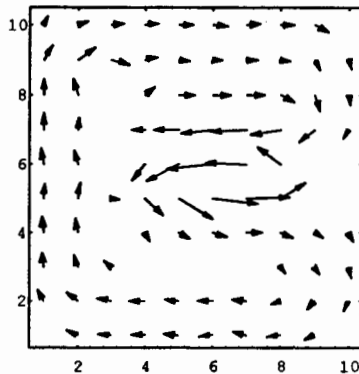
(a) 励磁コイルによる磁界分布



(b) 励磁コイルによる電流密度ベクトル分布



(c) 渦電流による磁界分布



(d) 渦電流ベクトル分布

図9 くし形励磁コイル磁界と渦電流分布

3. 4. X字形励磁コイル

図10に試作したX字形励磁コイルを示す。このコイルは、くし形励磁コイルで互いに逆方向に電流が流れるスリット間で大きな渦電流分布を生じることを利用して、複数個所に大きな渦電流分布を生じさせることを意図したものである。

図11(a)に励磁コイルによる磁界分布を示す。図11(c)は渦電流に起因する磁界分布を示す。図11(a)はほぼ目的とする磁界分布が図10の励磁コイルによって形成されることを示している。他方、図11(c)の磁界分布は図9(c)に比較して局所的に大きい磁界分布にならないことを示している。図11(b)は励磁コイル中の電流分布であり、妥当な結果である。図11(d)は図11(c)から計算した渦電流分布である。この渦電流分布は、励磁コイルの外側方向へ拡散するため、励磁コイルのスリット間に大きな電流密度分布が期待できないことを示している。

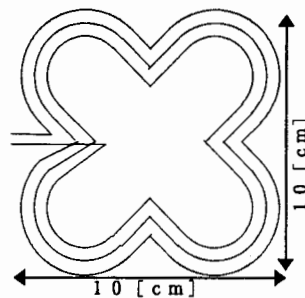
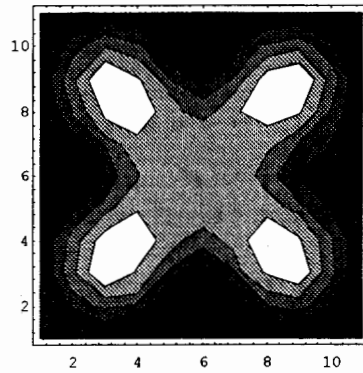
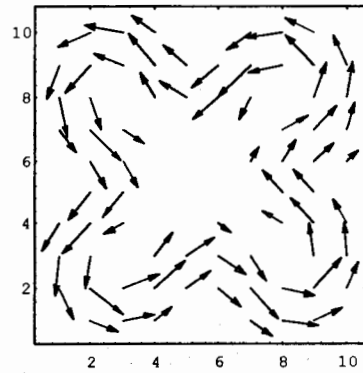


図10 X字型コイル 巻数18回

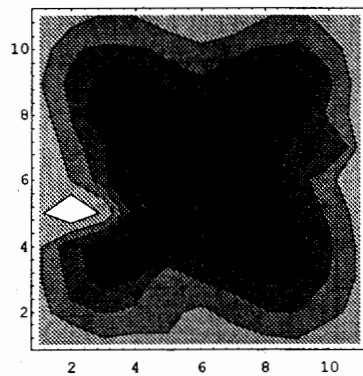
図10 X字型コイル スリット間に大きな電流密度分布が期待できないことを示している。



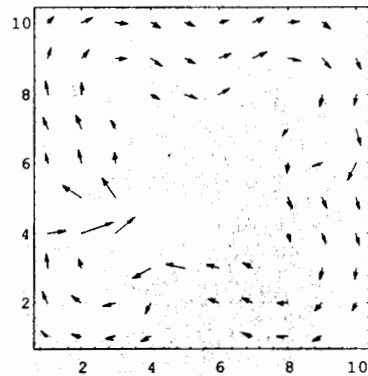
(a) 励磁コイルによる磁界分布



(b) 励磁コイルによる電流密度ベクトル分布



(c) 渦電流による磁界分布



(d) 渦電流密度ベクトル分布

図 1 1 X 字形励磁コイルの磁界と電流密度分布

4. まとめ

本稿では、励磁コイル最適設計の第 1 段階として、渦電流分布測定法の確立と、励磁コイル形状と渦電流分布の関係を把握することを試みた。

その結果、以下のことが判明した。

- 1) 対象表面上を流れる渦電流分布は、サーチコイルを対象に密着させることにより測定可能である。
- 2) 対象表面にサーチコイルを密着できない場合、サーチコイルを校正することにより、ほぼ正確な渦電流分布が測定可能である。
- 3) 従来実現されていなかった局所加熱が可能な励磁コイル形状が判明した。

参考文献

- [1] 菅沼, 菅見, 中山 “工業電気加熱ハンドブック,” 電気書院, pp.4-12., pp.281-282. (1968)
- [2] 中路, “電熱工学,” 電気学会, pp.71-74, (1984)
- [3] K.Watanabe, et al., “Analysis of activation sequence by isomagnetic and vector arrow maps,” Biomagnetism '87. Tokyo Denki Univ.Press. (1988)
- [4] 佐々木, 原田, “プリント回路基板近傍における高周波磁界の時間軸波形計測,” マグネティックス研究会資料, MAG-96-48, (1996)
- [5] Milos Stafil, “Electrodynamics of Electrical Machines,” Iliffe Books Ltd., London, pp.124-127. (1967)

原稿受付日

平成 8 年 10 月 1 日