

結線変更方式による誘導加熱分布制御

篠原佳直* 早野誠治 斉藤兆古
(法政大学 工学部)

Induction heating control by changing the exciting coil connection

Yoshinao Shinohara, Seiji Hayano, and Yoshifuru Saito
(College of Engineering, Hosei University)

Abstract

Induction heating system is extremely convenient and efficient methodology in order to use for the cooking devices. However, it is difficult to control the heat distributions, because of that the major heat distributions depends on the shape of exciting coil layout.

In order to remove this difficulty, this paper proposes a simple heat distribution control by means of the exciting coil connection. Initial experiment reveals a great possibility and flexibility of our method

キーワード：誘導加熱 電流分布推定 均一加熱

(Induction heating, Estimation of current distribution, Uniform heating)

1. まえがき

誘導加熱において、その熱分布は渦電流分布に依存する。加熱対象上に発生する渦電流は、励磁コイルによる磁界分布を打ち消すような影像電流となる。このことから、誘導加熱分布制御方法として励磁コイル形状の最適設計が最も有効な方法であると考えられる。筆者等は、最適設計に必要な渦電流分布推定法を提案し、いくつかの形状の異なる励磁コイルについて実験を行い渦電流分布を計算した。その結果、中心付近での局所加熱が可能である励磁コイル形状が判明した[1]。

しかしながら、このような局所的加熱に限定される励磁コイルでは食品加工等の利用において汎用性を低減する。このため、全体加熱と局所加熱を切り替えて使用できる加熱方法が望まれる。

以上のことから、励磁コイル自体は従来までの円形コイルと同様にスパイラル状に巻き、励磁コイルの内側と外側の結線方法を切り替える方式を考える。直列時には従来の円形励磁コイルと同様であり、並列に接続すれば外側コイルに比較して内側コイルのインピー

ダンスが小さいため内側コイルの励磁コイル電流が大きくなり内側の加熱が加速される。

本稿では、上記の結線方法変更による熱分布制御法について提案し、実験により結線方法の違いによる渦電流分布の相違を明らかにするものである。

2. 渦電流分布推定

2. 1. 磁界分布測定

磁界分布測定は円形サーチコイルを用いて行う。図1のような平面状のループ電流 I が発生する法線方向の磁界 H を、ループに平行なサーチコイルで測定する。磁界 H は(1)式で与えられる。

$$H = \frac{u_m}{\mu_0 n S \omega} \sin(\omega t) \quad (1)$$

ただし、 u_m はサーチコイルに誘起する起電力、 n と S はそれぞれサーチコイルの巻数と断面積、 μ_0 を空気中の透磁率とする。

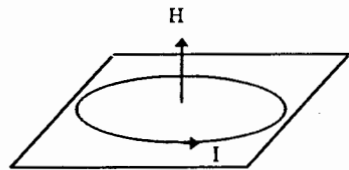


図1 電流Iと磁界H

渦電流に起因する磁界分布は次のように測定を行う。コイル・加熱対象間の磁界分布は図2のように励磁コイル単体での磁界分布と渦電流に起因する磁界分布の和になっている。よって、コイル・加熱対象間の磁界分布からコイル単体での磁界分布を差し引くことで渦電流に起因する磁界分布が得られる[1]。

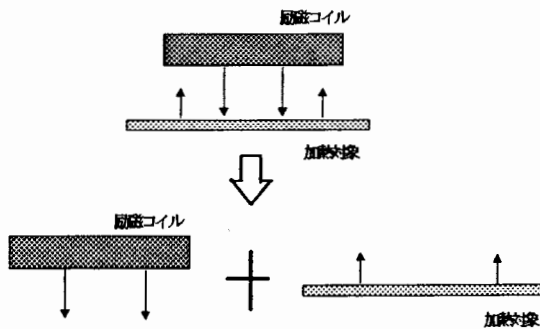


図2 コイル-加熱対象間の磁界

2. 2. 渦電流分布推定

平面導体に分布する電流密度Jを導体上の磁界Hを測定することによって求める問題を考える。変位電流が無視できる場合、電流密度Jと測定磁界Hは次式で関係付けられる。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

従って以下の式を満足しなければならない。

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

上式はキルヒホッフの接点則と等価であり、電流密度を面積について積分した点に流入する電流は流出電流と等しいことを意味する。(3)式を自動的に満足する電流の一例は図3の環状に循環するループ電流*i*である。これは環状導体の何れの部分でも入る電流と出る電流が必ず等しいことに起因する。ここでは、推定される電流が図2に示すループ電流でモデル化されると仮定する。

図3のようなループ電流が与える法線方向の磁界は以下の式で表される。

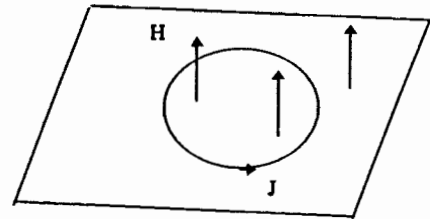


図3 ループ電流Jと磁界H

図4のループ電流*i*が与える法線方向の磁界Hは以下の式で与えられる。

$$H = \frac{i}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[\frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) + K(k) \right] \right\} \quad (4a)$$

$$k^2 = \frac{4ra}{(r+a)^2 + z^2} \quad (4b)$$

ここで、K(k)、E(k)は第一種、第二種完全楕円積分、zは測定点の高さ、aはループの半径である[2]。

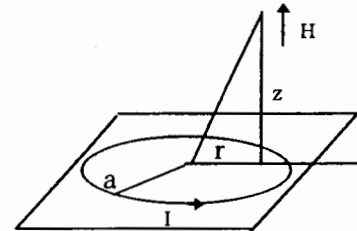


図4 ループ電流モデル

次に図5のように電流が分布している対象面を微小正方形で分割し、それぞれに内接するようにループ電流を仮定する。

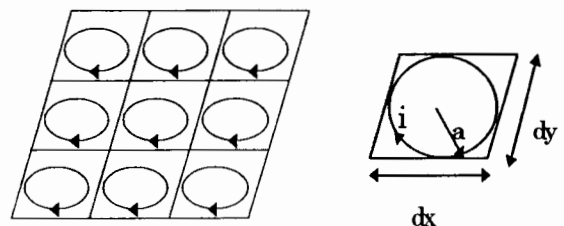


図5 ループ電流分布関数モデル

各ループの中心と磁界測定面上の各測定点位置を一致するように設定すると、離散化されたシステム方程式が次のように与えられる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}\mathbf{Y} \quad (5a)$$

または、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (5b)$$

Yは測定磁界を要素とするベクトル、Xは各ループ電流の大きさを要素とするベクトル、Dが式(4a)から得られるシステム行列である。

システム行列Dの逆行列が計算可能であれば各ループ電流の大きさが計算でき、ループ電流分布が得られる。このループ電流分布に回転演算を施し対象導体上の電流ベクトル分布を得る[3][4]。

3. 実験

3. 1. 励磁コイル

励磁コイルとして図6のコイルを用いた。巻数一定ならば内側コイルの方がインピーダンスが小さくなることと仮定し、内側、外側を同じ巻数20回にした。外側コイルの内径と内側コイルの外径をほぼ等しくして互いに重ならないようにしてある。

40x40[cm]の珪素鋼板を加熱対象とし、この中心付近 20x20[cm]の領域内に励磁コイルを約 2[mm]離して設置してある。

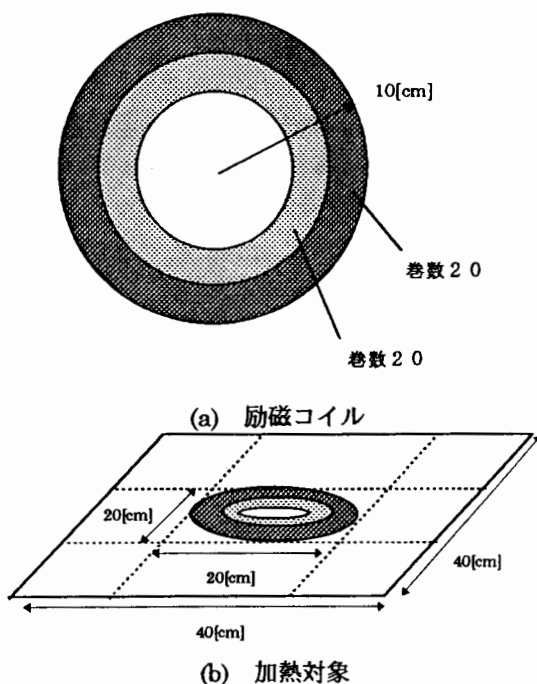


図6 励磁コイル形状と加熱対象

	外径	内径	線径	巻数
内側コイル	20[cm]	16[cm]	0.8[mm]	20
外側コイル	16[cm]	12[cm]	0.8[mm]	20

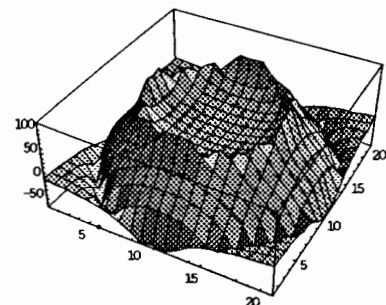
表1 励磁コイル詳細

3. 2. 磁界分布

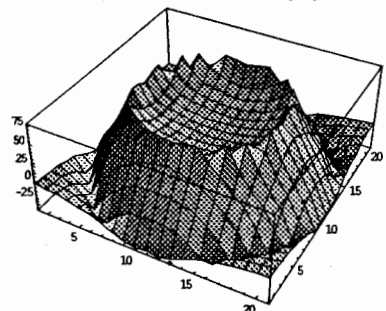
各接続方法において磁界分布測定を行った。

<a>直列接続 直列接続はコイルの電流値が一定であるから通常の円形コイルと同様であると考えられる。そこでループ電流モデルを用いて同じ巻数の円形コイルによる磁界分布を計算し、その理論値と直列接続したコイルによる磁界分布との比較を行った。図7(a)は円形コイルによる磁界分布(理論値)、図7(b)が直列接続したコイルによる磁界分布である。両者の相関係数は0.988と高い数値が出ている。よって直列接続時の磁界分布は通常の円形コイルによる磁界分布と同様である

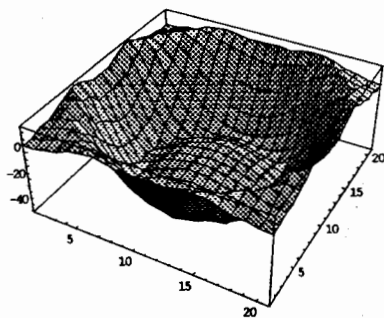
図7(c)は渦電流による磁界分布である。励磁コイルによる磁界分布を打ち消す方向に磁界が発生している事が確認できる。



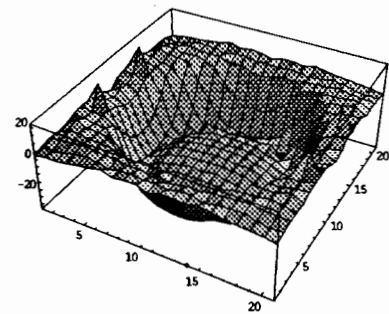
(a)円形コイルによる磁界分布



(b)直列接続したコイルによる磁界分布



(c)渦電流による磁界分布
図7 直列接続時の磁界分布



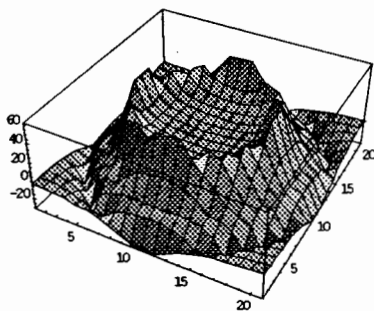
(c)渦電流に起因する磁界分布
図8 並列接続時の磁界分布

〈b〉並列接続 測定される磁界分布の妥当性を検証するために実験における入力電流値及び測定した各コイルのインピーダンスからループ電流モデルを用いて並列接続時の励磁コイルによる磁界分布を計算した。図8(a)がループ電流モデルを用いて計算した磁界分布、図8(b)が測定により得られた励磁コイルによる磁界分布である。測定値の方が立ち上がりの勾配が若干急であり、ピークの絶対値がやや小さくなっている。両図とも端部において段差がみられる。両者の相関係数は0.981であり、測定された励磁コイルによる磁界分布はほぼ妥当なものと考えられる。

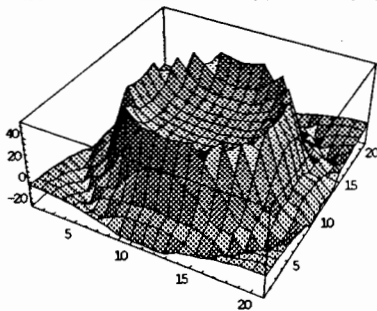
図8(c)は渦電流に起因する磁界分布である。直列接続時に比較して全体的に中央部に寄っていることが確認できる。

〈c〉並列接続(逆方向) 内側コイルを外側コイルに対して通電方向が逆になるように並列接続して実験を行った。通常のスパイラルに巻いた円形コイルでは中心付近の磁界がピークより小さくなる。また、外径から少しでも離れると磁界の大きさはほとんどゼロである。巻き方向を逆にした並列接続時の磁界分布は、径の異なる円形コイル磁界を互いに逆向きになるようにして合成したものに等しいと考えられる。以上のことから、この接続では磁界分布に互いに逆向きの大きなピークが発生するものと考えられる。

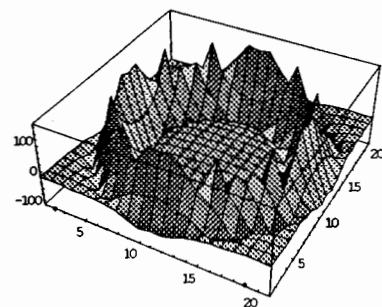
通常の並列時と同様にループ電流モデルを用いて計算した磁界分布と実験値の比較を行った。図9(a)がループ電流モデルを用いて計算した磁界分布、図9(b)が測定により得られた励磁コイルによる磁界分布である。測定値の方が若干絶対値が小さく出ている。両者の相関係数は0.976とやはり高い数値が出ている。内側コイルによる磁界が外側の逆向きに発生しているため、中央付近が大きく陥没した分布になっている。図9(c)が渦電流に起因する磁界分布である。



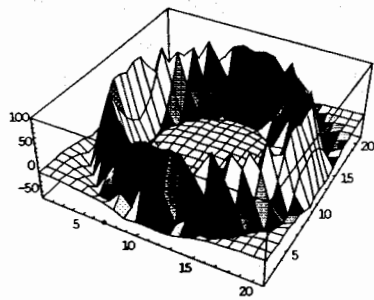
(a)ループ電流モデルを用いて計算した磁界分布



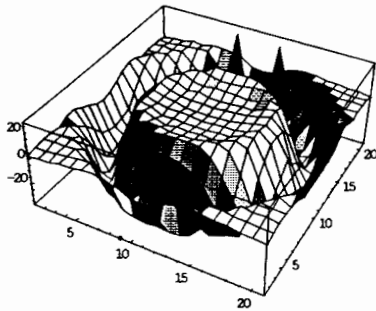
(b)励磁コイルによる磁界分布



(a)ループ電流モデルを用いて計算した磁界分布



(b)励磁コイルによる磁界分布

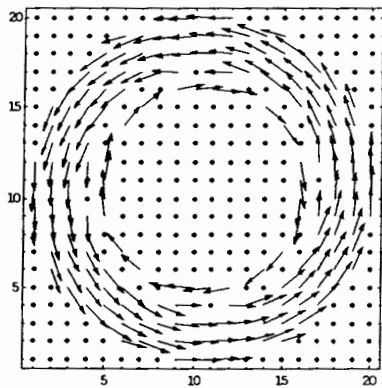


(c)渦電流に起因する磁界分布
図9 並列接続時の磁界分布

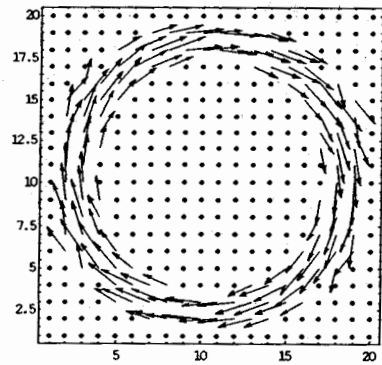
3. 3. 電流分布

測定した各磁界分布から直接逆行列法を用いて、励磁コイル磁界による電流分布と渦電流分布を計算した[3]。

(a)直列接続 図10(a)は励磁コイル磁界から計算した電流分布である。内側に一巡だけ逆方向のベクトルが発生しているのは、測定誤差に起因する。図10(b)は渦電流分布である。通常のコイルを励磁コイルにした場合と同様に、分布は励磁コイル形状に相似である。



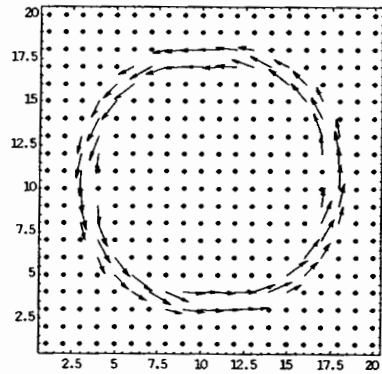
(a)励磁コイル磁界からの電流ベクトル分布



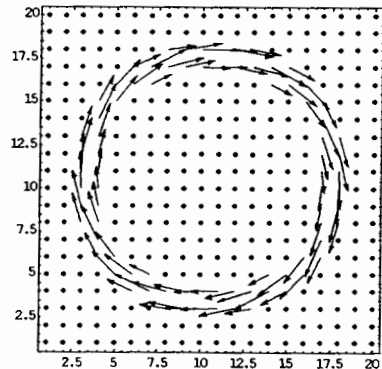
(b)渦電流ベクトル分布

図10 電流分布

並列接続 図11(a)が励磁コイル磁界から計算した電流分布、図11(b)が渦電流分布である。図11(a)から、並列接続によりインピーダンスの小さい内側コイルにより多くの電流が流れたため見掛けほとんど内側コイルのみによる電流が流れている分布となっている。一方、渦電流分布は直列接続時とは異なり、かたちとしては励磁コイル磁界から計算した電流分布のほぼ正確な映像電流になっている。以上の事から並列接続することで、コイルのインピーダンス値が異なり、結果として励磁コイル電流の大きさが変更でき、渦電流分布を制御することが可能となる。



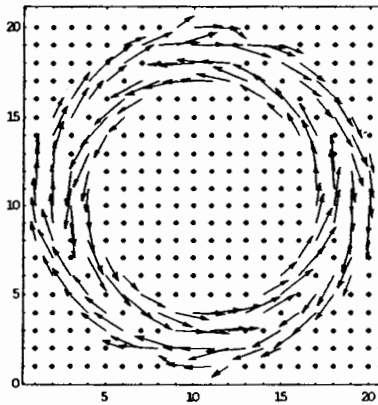
(a)励磁コイル磁界からの電流ベクトル分布



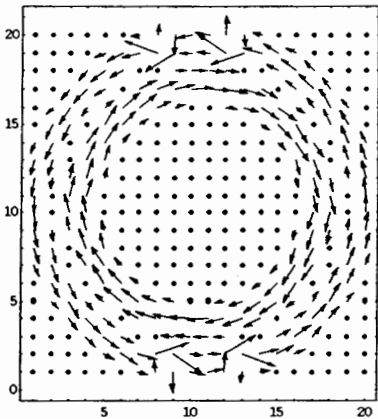
(b)渦電流ベクトル分布

図11 電流分布

<c>並列接続（逆向き） 図 12(a)が励磁コイル磁界から計算した電流分布、図 12(b)が渦電流分布である。図 12(a)から逆方向に接続したため、内側と外側で電流が逆向きに流れていることが確認できる。同じ方向で並列接続した場合と異なり励磁電流の大きさの違いから内側だけの分布にはならない。渦電流分布は励磁コイル電流分布を拡散した形となっている。この場合、互いに逆向きに流れるループの境界が明確に判定できる。内側のループが拡散した結果、直列、並列と比較して均一加熱が可能な分布が得られた。ただし、励磁コイル自体が大きさに比較して中心付近まで巻いていないので限界はある。



(a) 励磁コイル磁界からの電流ベクトル分布



(b) 渦電流ベクトル分布

図 12 電流分布

4. まとめ

励磁コイル自体は従来と同様に円形スパイラル状に巻き、内側コイルと外側コイルの結線方式を変えることで対象導体上の渦電流分布、すなわち熱分布を制御する方法について提案し、実験を行った。結果として以下のことが判明した。

(1) 並列に接続することで、通常の円形コイルよりも

渦電流の分布を内側に制御することが可能である
 (2) 並列接続かつ内側と外側の巻き方向が逆向きになるように接続することである程度均一な加熱が期待できる。

参考文献

- [1] 篠原, 早野, 斎藤, “誘導加熱コイルの最適設計に関する基礎的検討”, マグネティクス研究会資料, MAG-96-187
- [2] Milos Stafil, “Electrodynamics of Electrical Machines”, Iliffe Books Ltd. London, pp.124-127
- [3] 篠原, 早野, 斎藤, “直接逆行列法を用いた渦電流分布推定”, 平成9年電気学会全国大会, 542, pp.2-348-2-349

原稿受付日

平成9年6月20日