

篠原佳直 早野誠治 斎藤兆古 (法政大学)

Estimation of the eddy current distributions by direct inversion
Y.Shinohara S.Hayano Y.Saito (Hosei University)

1. まえがき

誘導加熱は、その熱効率の良さなどから、金属加工から食品の調理まで幅広い分野で利用されている。熱分布制御は加熱対象の物性定数を変更する方法なども考えられるが、励磁コイルを変形させる方法、すなわち励磁コイル形状の最適設計が最も有効で現実的な方法であると考えられる。任意の熱分布を得るように励磁コイル形状の最適設計を行なうには、励磁コイル形状と加熱対象上に発生する渦電流分布の関係を把握する事が重要である。筆者等は、励磁コイル形状の最適設計の一環として渦電流分布測定方法を提案した。この方法は、渦電流に起因する磁界分布を測定し、電流密度ベクトル分布を求める[1]。しかしながら、この方法で求まる分布は電流密度ベクトルの分布であり、渦電流の絶対値を得るには表皮効果などを考慮して電流ベクトルに変換する必要がある。本稿では、渦電流ベクトルを直接求めるループ電流モデルを用いた直接逆行列法を提案する。

2. 電流分布計算
2.1. 直接逆行列法

図1のループ電流が与える法線方向の磁界は(1)式で与えられる。

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

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

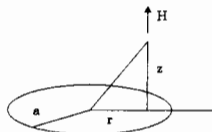


図1 ループ電流モデル
Fig.1. Loop current model

電流の分布する対象導体を図2に示すように微小正方形に分割し、分割された微小正方形内に円形電流ループを仮定する。ループ半径は(2)式によって決める。

$$a = \sqrt{\left(\frac{dx}{2}\right)\left(\frac{dy}{2}\right)} \quad (2)$$

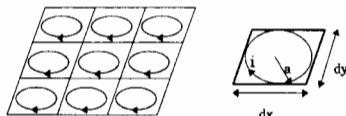


図2 ループ電流分布関数モデル
Fig.2. Loop current distributions

導体上の磁界測定点と各ループの中心が一致するように対象を分割しループ電流モデルを適用すると、システム方程式は次のように与えられる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}\mathbf{Y} \quad (3a)$$

または

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3b)$$

\mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 、 \mathbf{D} はそれぞれ測定磁界を要素とするベクトル、ループ電流の振幅を要素とするベクトル、そして(1)式から得られる係数を要素とするシステム行列である。このときシステム行列の逆行列を求めることが可能であれば、各ループ電流が計算できる。ループ電流は閉じた経路を流れているから、隣接するループ電流は差になる。よってループ電流分布を等高線で表すと、電流ベクトルはループ電流分布の等高線に沿った形で流れていることになる。さらに、ループ電流分布に対して回転演算をすることで対象導体上の電流ベクトル分布を得ることができる[2]。

2.2. 円形コイルでのシュミレーション計算

巻数20回の円形コイルに1[A]の電流を流した場合の法線方向磁界を計算し、それを用いて直接逆行列法から求めた電流ベクトル分布がどの程度妥当なのかを確認した。図3(a)が計算した電流ベクトル分布、図3(b)が電流ベクトルの大きさである。図3の円形の枠がコイルの位置を表している。図3(a)からコイルの電流はほぼ2本の大きなベクトルで表されていることがわかる。1[A]で巻数20であるからコイルは半径方向で断面に20[A]の電流が流れていると考えられる。図3(a)中の半径上にある2本のベクトルの和は8.49+12.70=21.19[A]となり、若干大きな値にはなるが、ほぼ20[A]であり、得られた電流ベクトル分布は妥当だと考えられる。

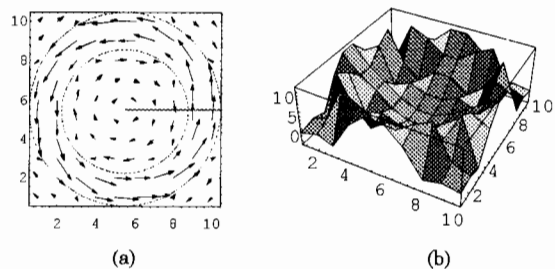


図3 電流ベクトル分布とベクトルの大きさ (a) 電流ベクトル分布 (b) 電流ベクトルの大きさ

Fig.3. The current vector distributions (a) The current vector distributions (b) Magnitude of vectors

2. 3. ベクトルウェーブレット変換

図3(a)では本来電流が流れていない場所にも電流ベクトルが発生している。これらはすべて誤差だと考えられる。こうした誤差を取り除く方法として本稿ではベクトルウェーブレット変換を用いる。ウェーブレット変換ではスペクトラムのマザーウェーブレット近傍に平均的な全体の情報が集まる。そこでマザーウェーブレット近傍だけを残し、他を零とする事で圧縮されたスペクトラムを逆変換することで、支配的なベクトル分布だけを抽出することが可能である[3]。

図4(a)は円形コイルの電流密度ベクトル分布である。ウェーブレット変換を施すために0を補完して16×16のデータにしてある。左側中央部にコイルエンドの影響によるベクトル分布の乱れがある。図4(b)は図4(a)のベクトル分布のウェーブレット変換スペクトラムを1/4に圧縮して得られたベクトル分布である。ウェーブレット変換により左側の乱れが補正されたことがわかる。また、誤差ベクトルの大きさが小さく均一になり、誤差ベクトルを明確に区別できる。

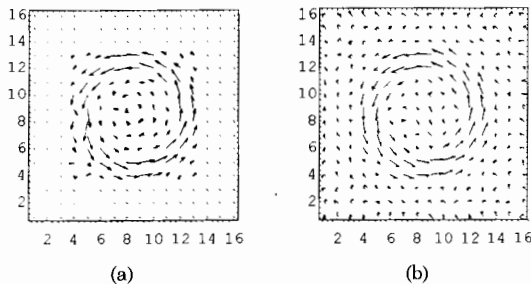


図4 ウェーブレット変換を施したベクトル分布(a) 変換前 (b)変換後
Fig.4..Current vector distributions (a)Original vector(b) After compressed

3. 円形コイルでの実験

コイル加熱対象間の磁界分布とコイル単体での磁界分布を測定し、それらを差し引きすることで渦電流に起因する磁界分布を求めた。直接逆行列法により渦電流に起因する磁界分布からその電流ベクトル分布を計算した。図5(a)は渦電流に起因する磁界分布から計算した渦電流ベクトル分布、図5(b)が図5(a)のベクトル分布の大きさの分布図である。

図5(a)の渦電流ベクトル分布は誤差を含んでいるものと考えられる。そこでこれにベクトルウェーブレット変換を施した。図6(a)が図5(a)のベクトル分布にウェーブレット変換を施し圧縮した後に逆変換して得た渦電流ベクトル分布である。さらにその結果で、一定値以下の誤差を取り除いたのが図6(b)である。図6(b)のベクトル分布は図5(b)の元の分布と比較すると滑らかな分布になったが若干拡散している。また半径方向でベクトルの大きさの和を考えるとウェーブレット変換した方が多少大きめになっている。

図5(a)及び図6(b)の円形の枠が励磁コイルの位置を示している。渦電流ベクトル分布は励磁コイル形状と相似であり、また、励磁コイルによる磁界から同様に計算した電流ベクトル分布と逆方向に流れている。これは従来までの回転演算で求めた電流密度ベクトル分布の特徴と同様である。

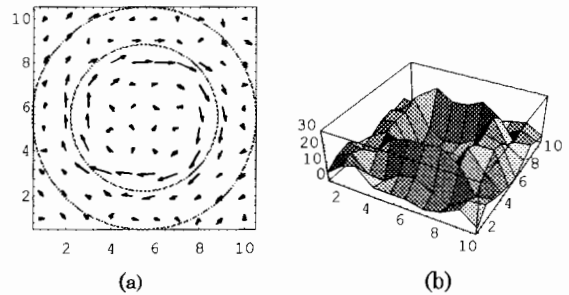


図5 渦電流分布(a)渦電流ベクトル分布(b)渦電流ベクトルの大きさ
Fig.5.The eddy current distributions (a)The eddy current vector distributions (b)Magnitude of the eddy current vectors

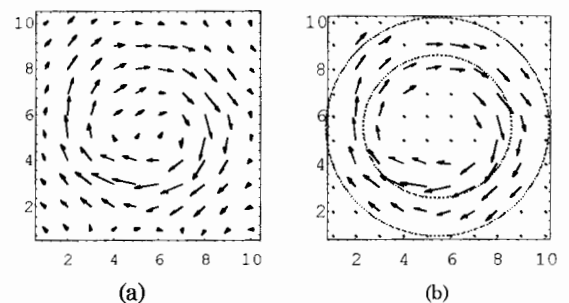


図6 ウェーブレット変換を施した渦電流分布 (a)ウェーブレット変換したベクトル分布 (b)誤差消去したベクトル分布
Fig.6.The eddy current distributions (a)Current vector distributions(b) Current vector distributions after compressed

4. まとめ

本稿では磁界から電流分布を求める直接逆行列法を提案した。さらに、実際に渦電流に起因する磁界を測定し、渦電流ベクトル分布を計算した。その結果、直接逆行列法を用いることで、渦電流ベクトル分布が求まり、誘導加熱分布制御研究を一歩進めることができた。

文献

[1] 原田,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", マグネティック研究会資料, MAG-96-187 (1996)
[2] Milos Stafil, "Electrodynamics of Electrical Machines", Iliffe Books Ltd., London, pp.124-127.(1967)
[3] 斎藤兆古, "Mathematica によるウェーブレット変換", 朝倉書店, pp.13-33.(1996)