

ウェーブレット変換による 3 次元電磁界分布可視化

宮原晋一郎、早野誠治、斎藤兆古 (法政大学)

Visualization of Electromagnetic Fields Distribution by Wavelet Transform

S.Miyahara, S.Hayano, Y.Saito (Hosei Univ.)

Abstract

This paper proposes a methodology for visualizing the electromagnetic field distributions vicinity of the electronic devices. At first, we solve an inverse source problem in order to identify the magnetic field sources from the locally measured magnetic fields. Second, we calculate the magnetic field distributions from the estimated magnetic field sources. Finally, we extract the most dominant magnetic field distributions using the 3D wavelet transform.

In the present paper, basic principle and initial experiments to verify our approach are described. As a result, it is revealed that the magnetic field distributions near the electronic devices can be visualized from the locally measured magnetic fields. Further, we have succeeded in extracting the major magnetic field vectors as well as their sources by the multi-dimensional analysis of the wavelet transform.

Keywords : Electromagnetic fields、Visualization、Direct inverse matrix method、Wavelet transform

1. まえがき

近年、わが国では多くの高層ビルが建設されている。このような高層ビルでは、防災上の観点から、直火の使用が禁じられている。短時間で高温を必要とする加熱は、直火以外では比較的困難であるにも拘らず、人類にとって必要不可欠な食品加工・調理に必然的なものである。排ガス等の環境汚染が少なく、且つ、比較的短時間で急速な加熱が可能な技術として、誘導加熱が注目され、既に多くの製品が実用に供されている。誘導加熱が広範に普及するに従い、誘導加熱に使われる磁界が人間に与える影響が懸念されている。たとえば、ペースメーカを取り付けた人間へ強力な高周波磁界が放射された場合などを考えれば自明であろう。

本論文は、磁気調理器などの電子機器が周辺へ拡散する磁界分布の可視化に関するものである。最近の電子機器は、ほぼ完全な密閉構造を持ち、さらに、単純に電子回路を目視することで、磁界の分布は可視化できない。このため、電子機器周辺の局所的磁界分布の測定から、磁界源となる電流分布を推定し、電流が与える周辺磁界を算出し、はじめて磁界分布の可視化が可能となる。本論文では、局所的に測定された磁界から電流分布を推定する逆問題へウェーブレット変換の特徴抽出特性が極めて有効であること、ならびに推定された電流分布が周辺へ与える 3 次元磁界分布の主成分抽出へ 3 次元ベクトルウェーブレット変換の多重解像度解析が効果的であることを報告する [1]。

2. 電流分布計算

2.1 直接逆行列法

ここでは図 1 に示すように、ある平面導体に分布する電流密度 \mathbf{J} を平面導体上の磁界 \mathbf{H} を測定することによって求める問題を考える。

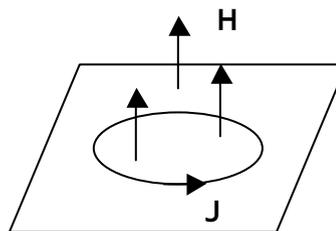


Fig. 1. Loop current \mathbf{J} and magnetic field \mathbf{H}

変位電流密度 \mathbf{D} / t が無視できる系で電流密度 \mathbf{J} は磁界 \mathbf{H} と次式で関係づけられる。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

従って、電流密度 \mathbf{J} は必ず次式を満足しなければならない。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

(2) 式の関係はキルヒホッフの節点則と等価であり、電流密度を面積について積分したある点に流入する電流 i は流出電流と等しいことを意味する。(2) 式を自動的に満足する電流の一例は図 1 に示す環状に循環するル

ープ電流 i である。これは環状導体の何れの部分でも必ず入る電流と出る電流が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。

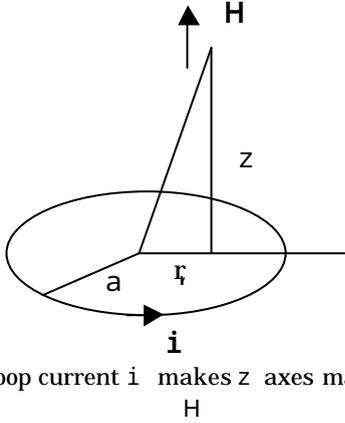


Fig. 2. Loop current i makes z axes magnetic field H

図2のループ電流 i が与える z 軸方向の磁界 H は (3a) 式で与えられる。これはループ電流 i が与えられれば、ループの中心からループ面に沿った距離 r 、ループ面からの高さ z における法線方向磁界 H がアンペアの法則と同様に (3) 式で計算できることを意味する。

$$H = \frac{1}{2p} \left[\frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[\frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) + K(k) \right] \right] \quad (3a)$$

$$k^2 = \frac{4ra}{(r+a)^2 + z^2} \quad (3b)$$

図1のループ電流を微小ループ電流モデルに置き換える。電流の分布する対象導体を図3に示すように微小長方形に分割し、分割された微小長方形中に電流ループを仮定する。

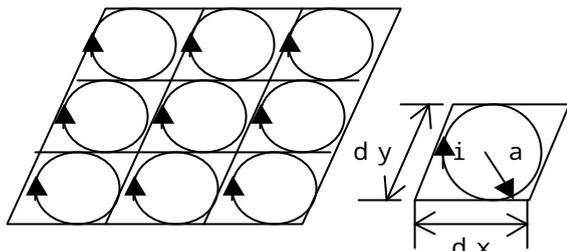


Fig. 3. Consider of microscopic loop model

図3の微小長方形中を循環する電流を同図中に示す円形ループで置き換える。円形ループの半径は (4) 式によって決める。(4) 式で決まるループ半径 a は微小長方形で縦横比が等しい正方形に内接する円を意味する。この場合、問題対象全体を通して各正方形の中心とモデルループの中心が一致し、最も良い近似となる。縦横比が異なる微小長方形では、各長方形の中心と (4) 式で決まる半径を持つループの中心を一致させることから問題全体の形状を正方形に変形して考えることになる。従って、ループ電流分布モデルを適用する場合、分割され

た微小領域は正方形とすべきである。これは、例えば問題対象が長方形の場合、縦と横で分割数を変えることで実現される。

$$a = \sqrt{\left(\frac{dx}{2}\right)\left(\frac{dy}{2}\right)} \quad (4)$$

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。

$$X = DY \quad (5a)$$

または

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

X , Y , 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(3)式から得られる係数を要素とするシステム行列である。システム行列 D 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の等高線に沿った形で流れていることになる。従って、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][3]。

2.2 基礎実験

2.2.1 実験モデル

< a > 励磁コイル 測定面の x , y 方向の長さをそれぞれ 20cm、電流分布面の x , y 方向の長さもそれぞれ 20cm とする。図4に示すように、通電範囲は内側の半径 2cm から半径 10cm のドーナツ状の部分である。通電電流は 0.1 A である。

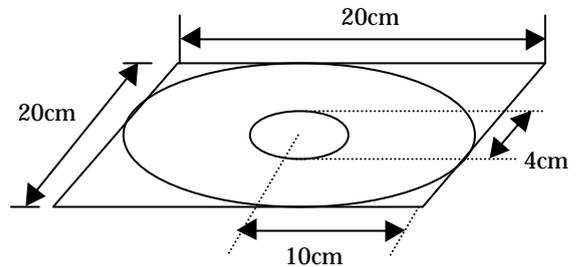


Fig.4. Circle stimulate coil

< b > サーチコイル 円形コイル面に法線方向の磁界を測定するため、図5に示すサーチコイルを作成した。サーチコイルの諸定数を表1に示す。磁界の測定点数は縦・横、共に 10 点とした。したがって、全体の磁界測定点数は $10 \times 10 = 100$ 点である。

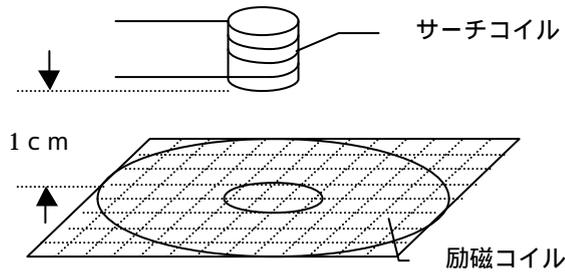


Fig. 5. Schematic diagram of the experiments

Table.1. Various constants of search coil

巻き数 (Turn)	半径 (mm)	線の太さ (mm)
90	5	0.2

2.2.2 電流ベクトル分布

測定された磁界分布の等高線を図6に示す。色が濃いほうと薄いほうそれぞれ磁界方向の負と正に対応し、紙面の奥から読者方向を正方向としている。図7に直接逆行列法で得られた電流ベクトル分布を示す。

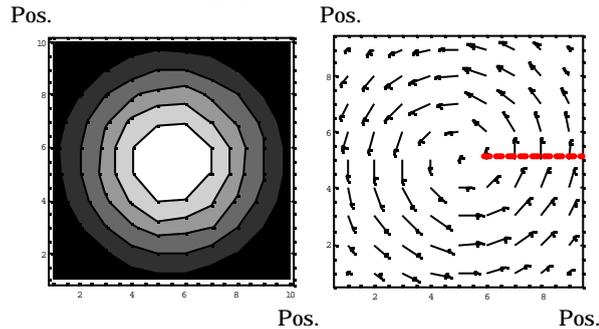


Fig. 6. Magnetic distributions by measurement

Fig7. Current vector distributions

巻き数 92 回のドーナツ状円形コイルに 0.1[A]の電流を流した場合の法線方向磁界を測定し、この磁界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であるかを確認した。図7は計算によって得られた電流ベクトル分布である。コイルは 0.1[A]で巻き数 92 回であるから、コイルには中心から半径方向の断面に合計 9.2[A]が流れていることとなる。図7の半径上にある4個の電流ベクトルの和は $1.84+3.4+3.24+3.11=11.59[A]$ となり、若干大きな値である。電流ベクトル分布は同心円状となり、妥当な結果である。

2.2.3 電流分布

図8でシミュレーションによる電流分布モデルを設定し、計算によって求められた6面の電流分布を重ね合わせることで得られる3次元電流分布を図9(a)に示す。図9(b)では主要な電流分布以外を閾値演算によって取り除く。シミュレーションで得られた閾値を用いて実測値から計算した電流分布図10(a)から主要な電流分布を抽出した結果を図10(b)に示す。

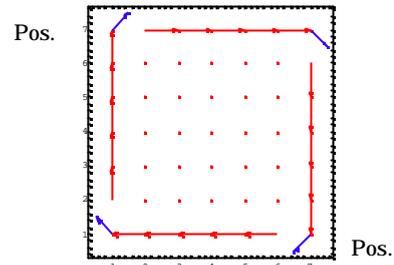


Fig. 8. Current vector model

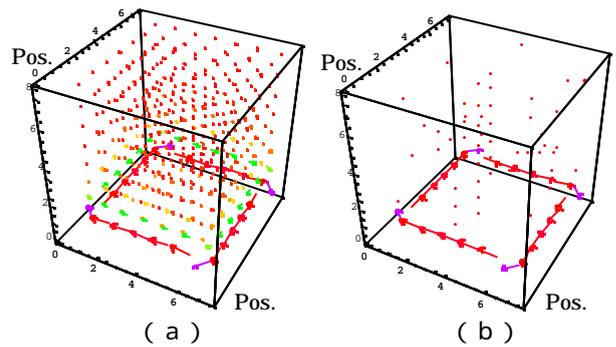


Fig. 9. 3 dimensions current vector model

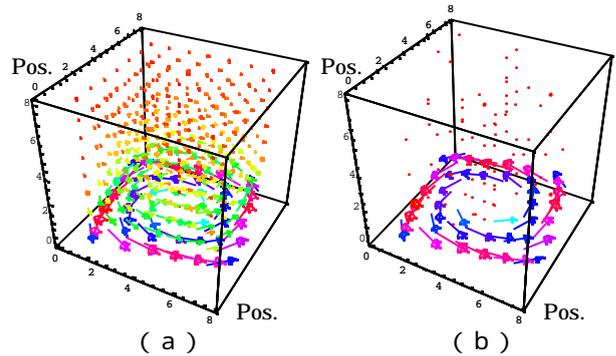


Fig.10. 3dimensions current vector

2.2.4 周辺磁界分布

図10(b)の電流ベクトルから生ずる周辺磁界分布を図11(a)に示す。ウェーブレット変換する都合上、z方向の高さを4段階にした結果を図11(b)に示す。

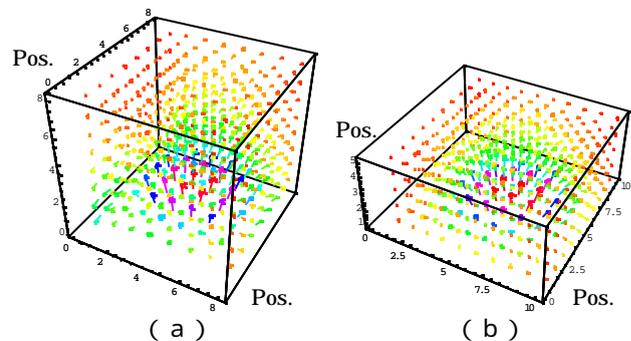


Fig.11. Magnetic field distributions

3.3 次元ウェーブレット変換

3.1 理論

一般に、3次元のウェーブレット変換は、3次元マトリックスの転置行列を

$$[H_{lmn}]^T = H_{nlm} \quad (6)$$

で表すと、

$$S = [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot H_{lmn}]^T]^T]^T \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 S はウェーブレットスペクトラム、 H は $l \times m \times n$ の直方マトリックス、 W_l 、 W_m 、および W_n はそれぞれ $l \times l$ 、 $m \times m$ 、 $n \times n$ のウェーブレット変換マトリックスである。ここで、 H の各要素が x 、 y 、 z 方向の3成分からなるベクトル

$$H = X + Y + Z \quad (8)$$

である時、(7)(8)式より

$$S = [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot (X + Y + Z)]^T]^T]^T \quad (9)$$

が得られる。ここで X 、 Y 、 Z はそれぞれ直交するベクトルであるから(9)式は

$$S = [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot X]^T]^T]^T + [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot Y]^T]^T]^T + [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot Z]^T]^T]^T \quad (10)$$

となる。すなわちベクトルデータのウェーブレット変換スペクトラムは各成分のウェーブレット変換スペクトラムを成分とするベクトルである[4]。

3.2 周辺磁界分布

図11(b)で示した周辺磁界分布をモデルベクトルデータとする。このベクトルデータについて3次元ウェーブレット解析を行う。図12(b)に示したベクトルデータを成分ごとにウェーブレット変換し、ウェーブレットスペクトラムを求める。ここでは基底関数にドビッシーの2次を使用した。ウェーブレットスペクトラムをベクトルで表示したのが図12(a)である。ここで最も支配的なウェーブレットスペクトラムを抽出した結果を図12(c)、(e)に示す。図12(a)は $8 \times 8 \times 4 = 256$ のウェーブレットスペクトラムからなるベクトルデータである。図12(c)、(e)はそれぞれ図12(a)から3本、8本のウェーブレットスペクトラムを抽出したものである。このウェーブレットスペクトラムを逆変換して再現されたベクトルデータを図12(d)、(f)に示す。再現されたデータの再現性は相関係数を用いて評価される。再現性(相関係数)は図12(d)で0.74、図12(f)で0.90となり、よい再現性を示している。

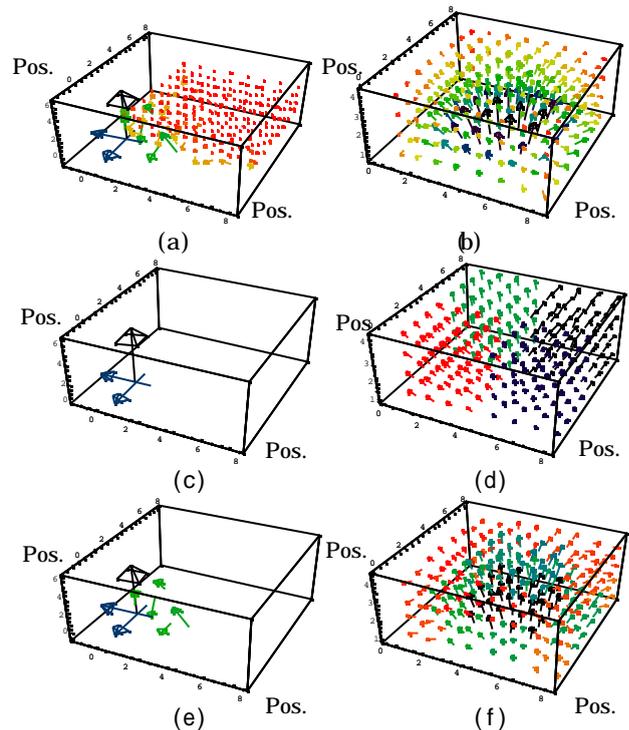


Fig.12. Wavelet spectrum and major magnetic field vector

4. まとめ

本稿では、3次元周辺電磁界分布可視化システムについて、以下の考察を行った。

- 1) 周辺磁界分布の主成分抽出、
- 2) 2次元の電流計算から重ね合わせによって3次元電流分布を表示し、3次元磁界分布の可視化

以上の結果、ウェーブレット変換によって3次元磁界分布のウェーブレットスペクトラムを示し、そのスペクトラムの支配的なベクトルのみを抽出し、一見、複雑なベクトル分布も本質的には25%以下の主要なベクトルで表現できることが判明した。

参考文献

- [1] 斎藤兆古 著：「ウェーブレット変換の基礎と応用」、朝倉書店、1998年。
- [2] 篠原佳直 著：「誘導加熱用励磁コイルに関する考察」、法政大学修士論文、1997年。
- [3] 宮原晋一郎、早野誠治、斎藤兆古、増田則夫、遠矢弘和：「電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システム」、マグネティックス研究会資料、1998年、MAG-98-45-112。
- [4] 松山佐和、小口雄康、宮原晋一郎、斎藤兆古：「3次元ウェーブレット変換の応用」、日本シミュレーション学会、1998年、2-3。