

変形ロゴスキーコイルを用いた電流分布推定

青木 誠 早野 誠治 斎藤 兆古
法政大学工学部

本論文は、プリント基板上に存在する電流分布を推定するため、センサー及びソフト的处理方法としてデコンボリューション法を提案する。本論文で提案するセンサーは、アンペアの周回積分の法則を直接利用するロゴスキーコイルを変形した構造からなり、センシングコイルは電流が流れる銅線の全周を取り囲まない構造である。本論文では、同サイズのソレノイドコイルと比較することで、変形ロゴスキーコイルが電流の作る磁界を高い空間解像度に測定可能であることを示す。また、測定コイルによって得られる出力信号は電流と測定コイル間の空間特性を包含したものである。そこで予め測定コイルの空間特性を用意しておき、測定データから空間特性を取り除くデコンボリューション演算を用いることで電流分布の可視化が可能であることを報告する。

1. まえがき

近年の小型電子機器の広範な普及は、MPU(Micro Processing Unit)の小型化とMPUの動作を支える電子回路網の小型・軽量化によってなされたと言っても過言でない。MPUのみならず周辺の電子回路の小型・軽量化の多くは、従来のワイアを用いた配線を印刷技術で可能としたことでなされている。いわゆる、プリント基板(PCB, Printed Circuit Board)技術の進展によって小型軽量電子機器の開発が可能となった。しかし、電子回路の故障診断は、非破壊的に行うことが困難であり、結果として、電子回路中の特定個所の故障であっても基板全体を交換しなければならない状況である。

筆者等は、プリント基板のような平面上に存在する電流分布を推定するため、コイル形状を円弧状に変形したセンサーを提案した。また、予め測定コイルの空間特性を用意しておき、測定データからその空間特性を取り除く逆畳み込み演算を用いることで2次元電流ベクトル分布を推定した。本論文では、推定データの微小誤差ベクトルを除去し、支配的な電流分布を得るため、測定コイルの座標軸を回転させて測定し、座標変換した後にそれらのデータの畳み込み演算することで誤差ベクトルを除去する方法を提案する。その結果、誤差ベクトルを削除した主要電流ベクトルの可視化が可能であることを報告する。

2. 変形ロゴスキーコイル

図1に示すように、本論文で用いた変形ロゴスキーコイルは、アンペアの周回積分の法則を直接利用するロゴスキーコイルを変形した構造からなり、センシングコイルは電流が流れる銅線の全周を取り囲まない構造である。このため、変形ロゴスキーコイルはプリント基板表面で電流の作る磁界を最も効果的に測定可能とする磁気センサーである。図2は通常磁界測定に用いられるソレノイドコイルと提案するセンサー出力の比較図を示す。図2において、解像度として水平方向の幅を半値幅として定義し、両コイル出力間で比較したところ75%程度変形ロゴスキーコイルがソレノイドコイルより半値幅の値が小さいことが判明した。この結果から変形ロゴスキーコイルは、電流源を高解像度に推定できることがわかる。

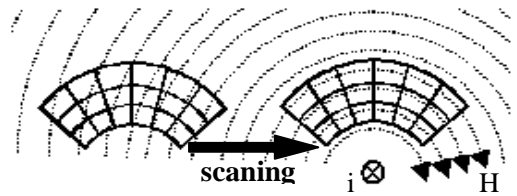


図1．変形ロゴスキーコイルの原理

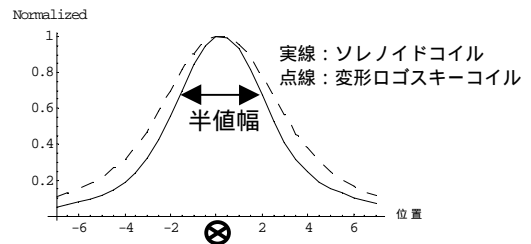


図2．センサー出力の比較

図3(a)に示すように直線電流に対して平行方向にコイルを走査した場合、電流位置にセンサーが到達すると電流から生じる磁束をすべて鎖交し、センサー出力は最大となる。しかし、図3(b)のように直線電流に対して垂直方向にコイルを走査しても磁束が鎖交しないため、センサー出力は得られない。表1に平行・垂直方向電流に対するセンサー出力例を示す。この結果より、変形ロゴスキーコイルは平行・垂直方向の出力信号間で直交性が成り立つことがわかる。

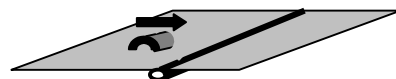


図3(a) 導体に対して平行方向に設置した場合



図3(b) 導体に対して垂直方向に設置した場合

表1 変形ロゴスキーコイルの出力例

	平行方向設置	垂直方向設置
出力	5.986[mV]	0.039[mV]

3. 逆畳み込み演算による電流分布推定

3.1 逆畳み込み演算とは

電流を非接触で観察するためには、電流を直接観察出来ないため、電流が発生する磁界を通して観察する。この場合、電流が源情報であり、情報を伝達する媒体が磁界に対応する。このため、人間が得られる情報は電流の情報と磁界の性質で変形されたものである。換言すれば、電流と磁界の性質を convolution (畳み込み演算) した情報が人間に与えられることを意味する。従って、人間が磁界を通して得た情報から磁界の性質を deconvolution (逆畳み込み演算) すれば、目的の電流情報を正確に把握できることとなる。このように信号が媒体を通じて伝達された場合、媒体の性質を取り除く作業を deconvolution するという。変形ロゴスキーコイルにおいて、測定データである変形ロゴスキーコイルの出力信号を Y とし、磁界の性質にあたる変形ロゴスキーコイルの空間特性を C として deconvolution を行い、源情報である電流の空間分布 X を推定する。図4に convolution と deconvolution の関係を示す。

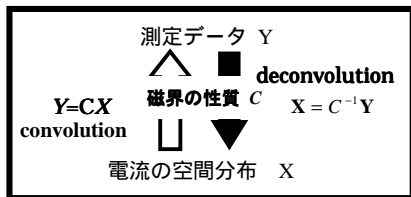


図4. convolution と de-convolution の関係

3.2 検証実験

縦・横共に15[cm]の正方形の推定対象プリント基板に等しい正方形の測定面を設け、変形ロゴスキーコイルを測定面に対してx方向、y方向に走査し磁界測定を行う。電流分布と磁界測定間隔の解像度は等しく1[cm]とし、離散化点は15×15点とする。実験の概略図を図5に示す。また、実験に使用した変形ロゴスキーコイルの諸定数を表2に示す。

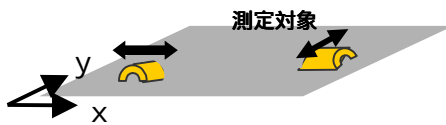


図5. 実験概略図

表2. 変形ロゴスキーコイルの諸定数

	半径 r[mm]	幅 d[mm]	長さ l[mm]	巻数 N
コイル	7.2	3.6	27	97

図6に検証実験用に設定した電流モデルを示す。さらに、図7(a),(b)に変形ロゴスキーコイルをx、y方向へ走査して得られた実験値を示す。

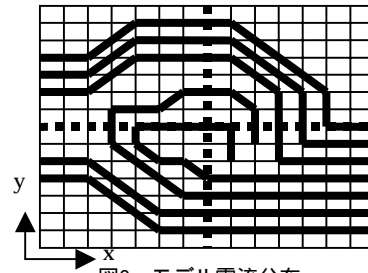
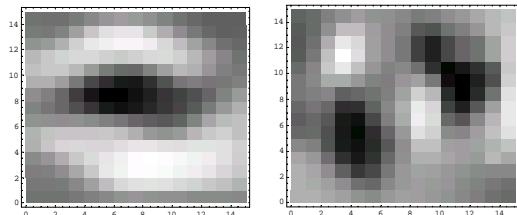
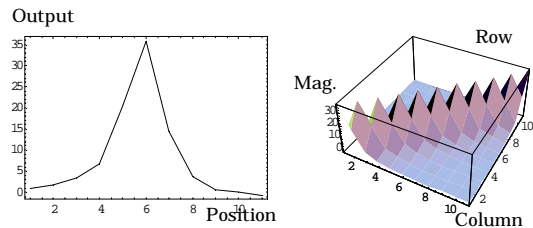


図6. モデル電流分布



(a) x方向 (b) y方向
図7. x、y方向設置時のセンサー出力

図7の実験値に対して変形ロゴスキーコイルの空間特性を deconvolution することで電流ベクトル分布を推定する。図8は実測値による変形ロゴスキーコイルの空間特性とそのシステム行列である。



(a)空間特性 (b)システム行列
図8. 変形ロゴスキーコイルの空間特性及びシステム行列

図9は、図7(a),(b)、それぞれの変形ロゴスキーコイル出力を独立に図8のシステム行列を用いて deconvolution し、その結果を合成して得られた電流ベクトル分布を示している。図9から、ノイズベクトルを含有するが、図6の電流ベクトルが概ね再現されていることがわかる。

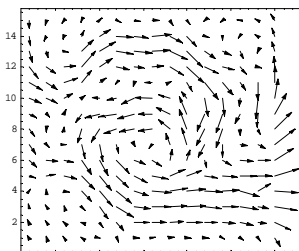


図9. 推定電流ベクトル分布

4. 支配的電流ベクトルの抽出

変形ロゴスキーコイル出力から空間特性を deconvolution することで図9の電流ベクトル分布を得た。この電流ベクトル分布には、本来導体が存在しない場所にも値の小さなベクトルが存在している。これは実験と計算、両者の誤差が反映したベクトルと考えられる。このようなノイズベクトル成分を取り除くため、測定条件を変更させて得た複数データの畳み込み演算及び、異なる基底関数を用いたベクトルウェーブレット変換結果の畳み込み演算によるノイズ除去を行う。

4.1 測定条件の変更によるデータの畳み込み

誤差ベクトルを除去するため測定条件を変更させた複数のデータからその畳み込み演算をすることで誤差ベクトルを除去する。ここでは、同測定領域において座標軸を基準座標の座標軸から 67.5 度まで 22.5 度ずつ回転させることで測定条件を変更し、推定電流ベクトル分布に座標変換を施したベクトルデータの畳み込み演算を行った。図 10、図 11 に x、y 測定磁界分布の単純和、deconvolution による推定電流ベクトルデータを示す。図 11 の推定電流ベクトル分布に対して座標変換を施し、データの畳み込み演算によってノイズとなる微小誤差ベクトルを除去した電流分布を図 12 に示す。ノイズの除去された良好な結果が得られていることがわかる。

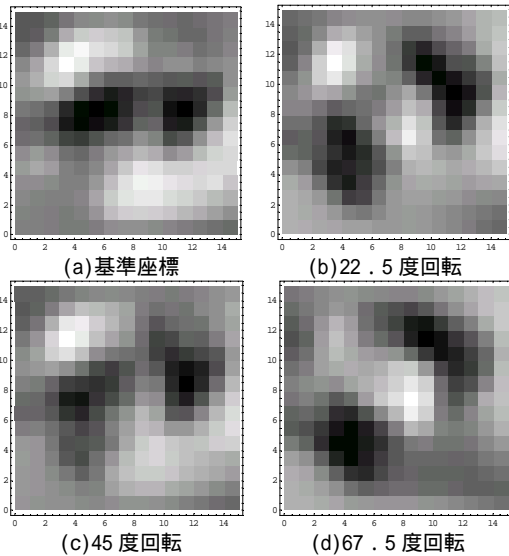
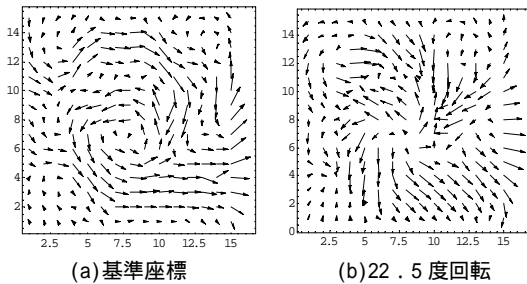
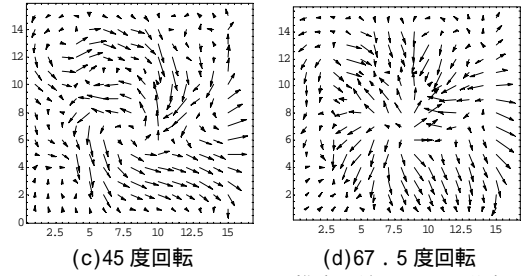


図 10 . 測定磁界分布の単純和



(a) 基準座標 (b) 22.5 度回転



(c) 45 度回転 (d) 67.5 度回転
図 11 . Deconvolution による推定電流ベクトル分布

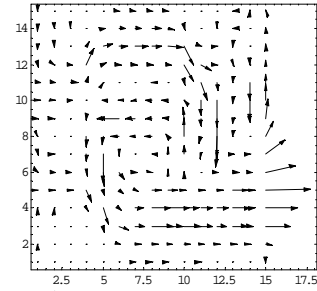


図 12 . ノイズ除去を施した推定電流ベクトル分布

4.2 ウェーブレット変換によるデータの畳み込み

4.2.1 ベクトルウェーブレット変換の原理

まず、(1)式で与えられる 2 次元ベクトル Z を考える。

$$Z = X + Y \quad (1)$$

ここで、ベクトル Z は互いに直交する成分 X, Y 成分からなる。よって(2)式が成り立つ

$$X \cdot Y = 0 \quad (2)$$

(1)式の両辺にウェーブレット変換行列 W を掛算して

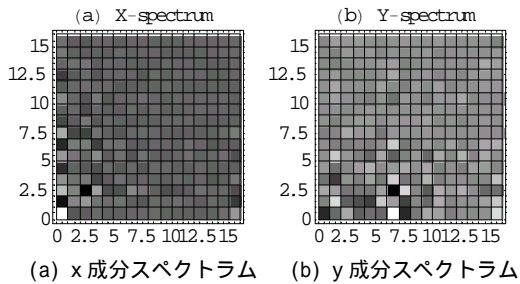
$$W \cdot Z \cdot W^T = W \cdot X \cdot W^T + W \cdot Y \cdot W^T \quad (3)$$

を得る。すなわち、ベクトルウェーブレット変換はベクトルを構成する成分毎にウェーブレット変換することでなされる。

4.2.2 ウェーブレット変換による主成分抽出

deconvolution によって得られた電流ベクトルからノイズを削減するために電流ベクトルに対してウェーブレット変換を行う。ウェーブレット変換は、ウェーブレット変換されるデータが縦・横共に 2 のべき乗個の配列に格納されていなければならない。このため、15×15 配列に格納された変形ロゴスキーコイルの出力信号にゼロ要素を追加し、見かけ上縦・横ともに 2 のべき乗個の配列 16×16 へ変形する。また、ウェーブレット変換に採用した基底関数は、ドビュッシーの 2, 4, 6, 8, 10 次を用いた。

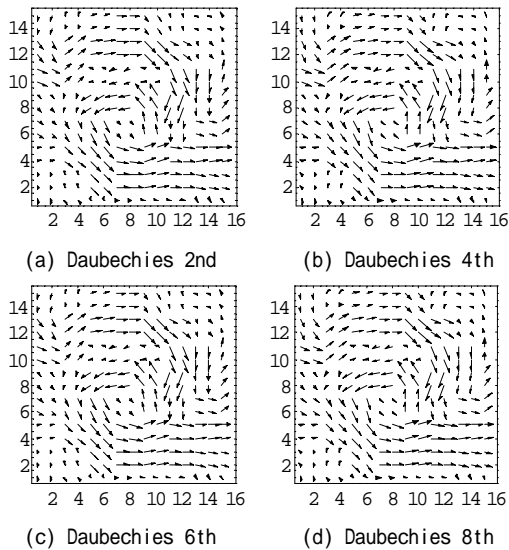
この手順によって測定条件を変更することなく、1つの測定データからノイズ除去を行うことが可能となる。ウェーブレットスペクトラムの計算例を図13に示す。



(a) x成分スペクトラム (b) y成分スペクトラム
図13. ウェーブレットスペクトラム
(Daubechies 2nd)

図13から、バラツキはあるが、平均的にはマザーウェーブレット近傍に値の大きなウェーブレットスペクトラムが集まることがわかる。

ウェーブレット変換で常套的に用いられる領域法で電流ベクトルの主成分を抽出する。本稿では、マザーウェーブレット近傍の8×8のスペクトラムを残し、残りを零とする。図14に領域法から得られた主要電流ベクトル分布を示す。



(a) Daubechies 2nd (b) Daubechies 4th
(c) Daubechies 6th (d) Daubechies 8th
図14. 各基底関数によるウェーブレット変換
主要電流ベクトル分布.

4.2.3 電流ベクトルの畳み込み演算

図14に示す異なる基底関数を用いて抽出した主要電流分布ベクトルで、何れの基底関数に対しても共通となる不変な電流ベクトルを抽出する。

異なる基底関数を用いたウェーブレット変換で抽出された支配的電流成分、それぞれの最大値を1へ正規化した後、電流成分を格納した配列要素間の積を計算する。

すなわち、ウェーブレット変換で抽出された支配的電流間の畳み込み演算を行うことで何れのウェーブレット変換基底関数に対しても共通となる不変な電流分布を抽出する。図15が結果である。電流ベクトルの大きさに相違があるが、図6のモデル電流ベクトル分布を良好に再現しており測定条件を変更することなく、ウェーブレット変換における異なる基底関数を用いることで畳み込み演算でノイズ除去が行われていることがわかる。

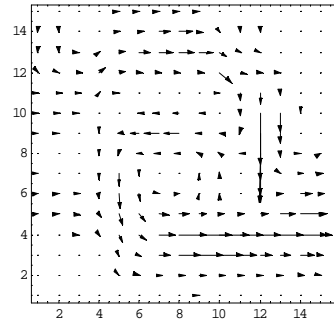


図15. ノイズ除去を施した推定電流ベクトル分布

5.まとめ

本稿では、電流に対する指向性の強い変形ロゴスキーコイル及びデコンボリューションを用いて電流分布の可視化を試みた。測定・計算に伴う誤差ベクトルを削減する方法として、測定条件を変更させて複数データを得ることでそれらの畳み込み演算によってノイズベクトルを除去する方法及び、異なる基底関数を用いたウェーブレット変換を用いて主要電流ベクトルを抽出した後、何れのウェーブレット変換基底に対しても共通となる電流ベクトルを畳み込み演算によって抽出する方法を提案した。その結果、プリント基板上に存在する電流ベクトル分布の可視化に成功した。

参考文献

- [1]青木誠、他：「カレントビューアの開発」、電気学会マグネチックス研究会資料、1998年、MAG-98-113.
- [2]青木誠、他：「カレントビューアに関する研究」、電気学会マグネチックス研究会資料、1998年、MAG-98-265.
- [3]青木誠、他：「ウェーブレット変換によるカレントビューア信号の多重解像度解析」、可視化情報学会、Vol.19、No.1(1999)、PP.203-206.
- [4]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4月)
- [5]篠原佳直 著：「誘導加熱用励磁コイルに関する考察」、法政大学大学院工学研究科修士論文、1997年3月.

キーワード.

電流、可視化、畳み込み演算

Summary.

Estimation of Current Distribution using a Modified Rogowski Coil

Makoto Aoki, Seiji Hayano, Yoshifuru Saito
College of Engineering, Hosei University

We have proposed the modified Rogowski coil, which has a focusing function like a lens. Because of the physical limitations of the materials and constructions, we have confronted to the difficulty realizing an ideal sensor having an infinitely high resolution. However, we have overcome to this difficulty by means of the deconvolution methodology. We have applied our approach to the visualization of the currents on a printed circuit. In order to remove the noise vectors, we have carried out a convolution among the different processed current vectors. As a result, we have succeeded in visualizing the current distributions on the printed circuit boards.

Keywords.

Current, Visualization, Convolution