

## 210 ベクトルカレントビューアによる電流分布の可視化

廣田 章博<sup>○</sup>, 早野 誠治, 齊藤 兆古 (法政大学)

堀井 清之 (白百合女子大学)

### Current Visualization by Vector Current Viewer

Akihiro HIROTA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

In recent years, PCBs (Printed Circuit Boards) are widely employed to work out the compact as well as lightweight electrical devices. However, inspection of their regularity is not so simple because of their complex electric circuit structures. One of the non-destructive tests to do that is to measure in the vicinity the electromagnetic fields essentially accompanying with their operation. Estimating the field sources from the measured fields becomes useful and important information not only for checking up their regularity but also for the EMC/EMI problems. According to this background, we are motivated to propose the current viewer, which makes it possible to visualize the current distributions in PCBs.

Previously, we have proposed the current viewer in order to visualize the current distribution on planar electric circuits. Operation principle of this current viewer is based on those of modified Rogowski coil method. The mechanical structure of this viewer is that the sensor solenoid coils does not cover all the circumferences of the target current carrying conductor, but covers a semicircle. In this paper, we propose the vector current viewer by combining two current viewers in orthogonal way. Our vector current viewer is capable of visualizing the magnitude as well as direction of target current along with the Lissajous diagram methodology.

Keywords: Current viewer, Current distribution, Printed circuit boards

#### 1. まえがき

近年、電子機器の小型軽量化を実現する方途として、電気・電子回路を印刷技術で構成するプリント基板が開発され、広汎に用いられている。結果として、精緻な電気・電子回路が平面上に実現され、高度な半導体集積回路の開発に伴って極めて小型軽量の電子機器の普及に繋がった。他方、産業廃棄物が社会問題となる中で、プリント基板は精緻な回路を実装するために故障診断が不可能に近く、不良となった基板は廃棄されるのが通例である。また、回路の健全性の検査工程においても人間の目視検査がせいぜいである。しかしながら、故障箇所が特定可能であれば、修復も可能であり、また、プリント基板の信頼性向上にも繋がる。

このような現状を鑑み、本論文は平面上に存在する電流分布を直接可視化するベクトルカレントビューアを提案する。ベクトルカレントビューアは、電流の大きさおよびその経路を可視化し、視覚的に電流分布状態の把握

を可能とすることで、故障診断や回路の健全性を評価可能とする。基本的な原理は、通常磁界測定に用いられるソレノイド型コイル型センサーでなく電流の流れる銅線の半周を覆う円弧状の変形ロゴスキーコイル（以下カレントビューア）をセンサーコイルとして採用する。カレントビューアは、アンペアの法則に基づき、平面状に分布した電流位置を推定する場合、ソレノイド型のサーチコイルよりも高感度に電流の作る磁界を効果的に測定可能とする。カレントビューアは平面の電流分布を測定するために、X, Y 方向に2回の走査と測定が必要である。

本稿で提案するベクトルカレントビューアは、平面上を1回の走査でX, Y方向の磁界を同時に測定可能とするセンサーである。また、カレントビューアでは平面に分布する電流から得られる信号を処理し、電流の可視化を行うが、ベクトルカレントビューアでは、X, Y方向の出力電圧をそれぞれオシロスコープの横軸・縦軸に入力して得られるリサージュ図形を描かせることで、リアルタイムで電流経路を可視化する。

## 2. ベクトルカレントビューア

### 2.1 センサーの形状

通常、磁界測定ではループ状のソレノイドコイルを用いて高解像度を実現しようとする場合、巻き数を増加し断面積を小さくする必要がある。これは、磁界源となる電流は線上に存在するが、ソレノイドコイルはコイル面に鎖交する磁束を測定する必要性に起因する。筆者等のグループは線上に存在する電流の位置推定精度の向上を図るため、形状が半円弧状のカレントビューアを提案した<sup>1)・4)</sup>。

このカレントビューアは大電流計測に用いられるロゴスキーコイルを部分的に利用する円弧状構造である。カレントビューアは Fig. 1(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鎖交磁束数が最大となり、出力も最大となる。しかし、Fig. 1(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。従って、カレントビューアは電流分布に対して平行方向のみの電流による磁界を検出するため、平行・垂直方向の出力信号間で直交性が成り立つ。



Fig. 1(a) Current Viewer Set in Parallel to a Current Carrying Conductor

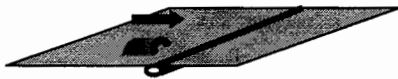


Fig. 1(b) Current Viewer Set in Perpendicular to a Current Carrying Conductor

ここでカレントビューアを互いに直交させたセンサーが本論文で提案するベクトルカレントビューアである。Fig. 2 に試作したベクトルカレントビューアを示す。



Fig. 2 Tested Vector Current Viewer

### 2.2 カレントビューアの動作原理

複数の角型コイルを組み合わせた同心円状のサーチコイルで構成されたカレントビューアは、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部分的に取り出した形状であり、センシング部分は電流が流れる導線を覆う構造となっている。このため、カレントビューアはプリント基板表面で、電流の作る磁界をコイルで囲むことなく効果的に測定可能とする磁気センサーである。

カレントビューアの動作原理を Fig. 3 を用いて説明する。カレントビューアを通電中の直線導体近傍で水平に走査した場合、センサーと導体中心が一致する時点で電流の作る磁界は半円弧状のコイルに鎖交する。しかし、センサーと導体の中心がずれた場所に位置する場合、電流  $i$  の作る磁界  $H$  は半円弧状のコイルの局所部分にのみ鎖交する。拠って、電流の位置推定度が向上する。

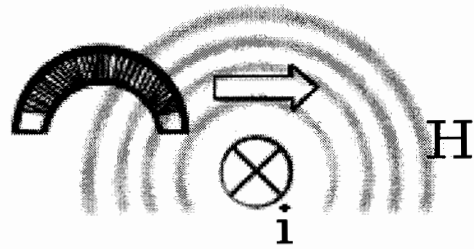


Fig. 3 Current Searching by Current Viewer

### 2.3 カレントビューアの出力

カレントビューアの鎖交磁束計算法について述べる。Fig. 4 に示すように、無限に長い直線導体に電流  $i$  が流れている場合、導線を含む平面内で長さ  $l$  の辺を導線軸に平行とし、軸からの距離が  $b$  の位置にある長方形の部分を通る磁束を考える。

線軸から  $r$  の距離に幅  $dr$  の微小面積  $dS$  を通る磁束は (1) 式で与えられる。

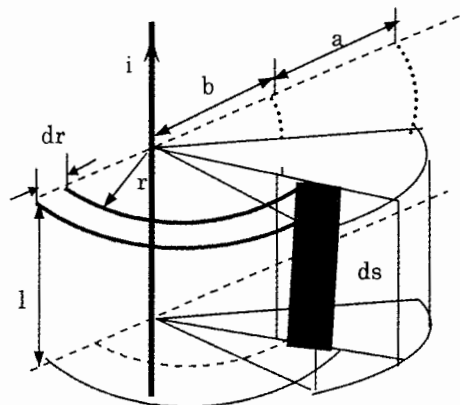


Fig. 4 Various Constants of Current Viewer for Sensor Output Calculation

$$d\phi = \mu_0 H dS \quad (1)$$

ここで  $\mu_0$  は真空中の透磁率である。r 点での磁界は(2)式のアンペアの法則で与えられ、

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (2)$$

$dS=l \cdot dr$  より微小面積  $S$  を通る磁束は(3)式で与えられる。

$$d\phi = \frac{\mu_0 i l}{2\pi r} dr \quad (3)$$

よって長方形を通る磁束は(4)式となる。

$$\Phi = \int_b^{b+a} d\phi = \int_b^{b+a} \frac{\mu_0 i l}{2\pi r} dr \quad (4)$$

電流がサーチコイルアレイの中心にある場合、長方形のコイルを貫く磁束は(4)式から求められ、角型コイルの個数を  $N$  とした鎖交磁束数  $\lambda$  は  $N\Phi$  である。よって、センサー出力の誘起電圧はファラデーの法則より(5)式で表される。

$$v = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

電流  $I$  の位置が円弧の中心からずれた場合は、(4)式の解析的な積分が困難であるため、(4)式を数値積分して全鎖交磁束数を求める。

### 3. 電流分布推定

#### 3.1 ベクトルカレントビューアの校正

本論文の実験では、Fig. 2 で示したベクトルカレントビューアを用いた。その仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of One of the Tested Vector Current Viewer

半径 $r$ [mm]	厚さ $a$ [mm]	長さ $l$ [mm]	巻き数 $N$ [turn]
15	1.5	10	200

本実験は供試ベクトルカレントビューアの指向性と精度を評価し、X、Y 軸方向出力の校正データを得るために行う。

10kHz、0.5A の電流を通电している直線導体上に、供試ベクトルカレントビューアの中心を位置し、ベクトルカレントビューアの中心を軸として、直線導体に対してカレントビューアを 0、45、90、135、180 と 225 度さらに 270 度に回転させて X、Y 方向の出力電圧をそれぞれオシロスコープの横軸・縦軸に入力しリサージュ図形を得る。

この実験で、0 と 180 度、45 と 225 度、90 と 270 度のリサージュ図が同じならば、供試ベクトルカレントビューアは、互いに直交する 2 個のカレントビューアの出力が同等であり、高精度な機械的構造と評価できる。実際の実験結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、Y 軸方向のカレントビューアは 0 度と 180 度で幅が異なり多少の指向性を持つことが判る。さらに、X 軸方向も 90 度と 270 度で幅が異なり、多少の指向性を有することが判る。これらの指向性を利用して最終結果を校正することとする。

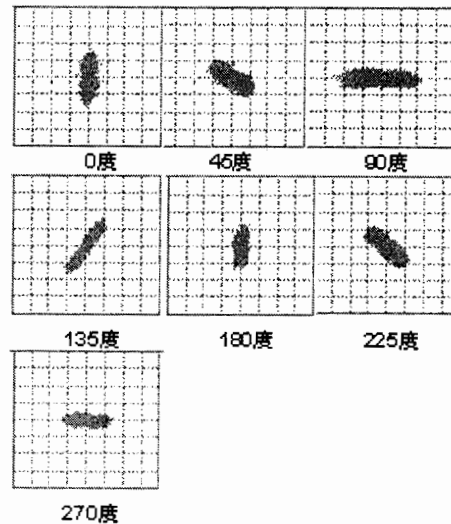


Fig. 5 Lissajous Diagram at Each of Vector Current Viewer Angles

#### 3.2 電流探査実験

カレントビューアの電流位置推定精度は、サーチコイル直径程度が限界であることが報告されている<sup>4)</sup>。そのため、正方形（一辺 30mm×30mm）の Fig. 6 に示す供試電気回路を構成し、10kHz、0.5A の電流を通电する。正方形上を等間隔に X、Y 方向、それぞれ 10 点測定し、合計 100 点でベクトルカレントビューアの出力を観測した。各点でのベクトルカレントビューアの X、Y 方向の出力を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。

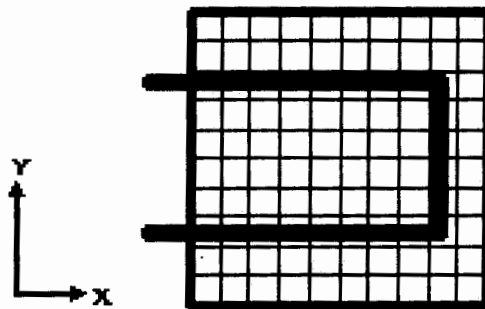


Fig. 6 Electric Current Model for Current Distribution Tracing

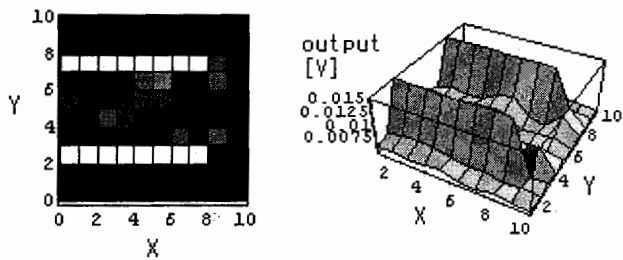


Fig. 7 Output Signal Distribution of X Direction

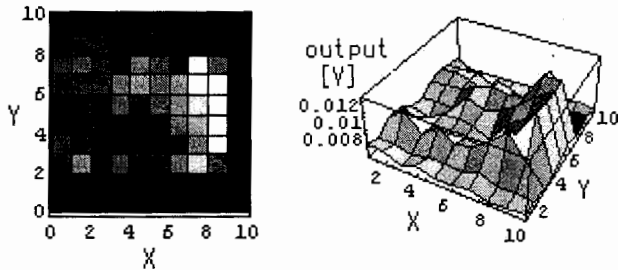


Fig. 8 Output Signal Distribution of Y Direction

従来型のカレントビューアの場合、X、Y それぞれの方向へスキャンする必要があるが、ベクトルカレントビューアを用いた場合、Fig. 7 と Fig. 8 の結果が 1 回のスキャンで得られる。さらに、ベクトルカレントビューアを正方平面上で走査することにより、Fig. 5 に示すリサージュ図形から直接に電流の大きさと通電方向をリアルタイムで可視化可能である原理がここで検証された。

検査対象となる PCB の寸法が固定されている場合、PCB の寸法に合わせてベクトルカレントビューアを所望の精度に必要な個数を配置し、個々のベクトルカレントビューア出力を AD コンバータを介して計算機に入力し、予め 3.1 節で得た校正データを用いて校正し、計算機ディスプレイへ表示すれば、瞬時に PCB の健全性が可視化情報として評価可能な非破壊検査システムが構成可能であろう。

#### 4. まとめ

従来型のカレントビューアでは、平面の磁界分布を測定する場合、X、Y 軸方向へ 2 回の走査が必要であり、さらに、X、Y 軸方向の測定値を個々に組み合わせて電流分布を可視化した。そのためリアルタイムでの電流分布可視化は困難であった。

この問題を解決するため、本論文は、単一センサーに X、Y 方向の電流を同時に測定可能とする変形ロゴスキーコイルを直交して配置したベクトルカレントビューアを提案した。

最終的には検査対象となる PCB の寸法に合わせてベクトルカレントビューアを所望の精度に必要な個数を配置し、個々のベクトルカレントビューア出力を AD コンバータを介して計算機に入力し、予め測定しておいた校

正データを用いて個々の出力を校正し、計算機ディスプレイへリサージュ図形を物理的ベクトルカレントビューアの配置と同一に表示することで、瞬時に PCB の健全性が可視化情報として評価可能な非破壊検査システムを構築するのが本研究の目的である。

本論文では、上記非破壊検査システムの原理検証実験を主として検討した。その結果、PCB の非破壊検査法として期待できることが判明した。

#### 参考文献

- 1) 青木誠, 斎藤兆古 : 変形ロゴスキーコイルを用いた電流分布推定, 法政大学計算科学研究センター研究報告, (2000), 第 13 巻.
- 2) 青木誠, 斎藤兆古, 早野誠治 : カレントビューアによる二次元電流分布の測定, 電気学会マグネティックス研究会資料, (1999), MAG-98-113.
- 3) 青木誠, 斎藤兆古, 早野誠治 他 : カレントビューアの開発—基礎原理と実験—, 電気学会マグネティックス研究会資料, (1998), MAG-98-113.
- 4) 青木誠, 斎藤兆古, 早野誠治 : カレントビューアに関する研究—その 2 電流分布のデコンボリューション—, 電気学会マグネティックス研究会資料, (1998), MAG-98-265.