カレントビューアに関する研究 : 電流分布のデコンボリューション

HAYANO, Seiji / SAITO, Yoshifuru / 斎藤, 兆古 / 早野, 誠治 / AOKI, Makoto / 青木, 誠

(出版者 / Publisher)
法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University

(巻 / Volume)
12

(開始ページ / Start Page)
33

(終了ページ / End Page)
39

(発行年 / Year)
1999-03-31

(URL)
https://doi.org/10.15002/00024825

カレントビューアに関する研究
―電流分布のデコンボリューション―

青木 誠、早野 誠治、斎藤 兆古
法政大学 工学部 電気電子工学科

プリント基板のような平面上の電流分布を推定するため、我々はカレントビューアを提案した。実験によって、通常用いられるソレノイド型コイルよりも良好な推定解を得たが、推定する導体間の距離が接近している場合には、なんらかのソフト的処理が必要となる事が判明した。本稿では、そのソフト的処理方法としてデコンボリューションを行い、さらに精度の高い電流の位置推定を行うため GSPM 法を用いた電流分布推定を行った結果を報告する。

1. まえがき

半導体の高密度・高集積化技術は MPU(マイクロプロセシングユニット)の超小型化を可能とし、多種類のインテリジェンシイを持つ小型･軽量電子機器の広汎な開発と普及をもたらし、現代文明に不可欠な利便性を提供している。しかし、より高度なインテリジェンシイと小型･軽量化の要求によって、MPU の高速化とメモリーの爆発的な増大、そして電源部の高周波化がなされている。

一般に高周波電流を導体に通電した場合、導体断面に電流は均一に分布せず、偏った電流分布となることが知られている。いわゆる表皮効果である。また、空間中を通過する変位電流は、低周波駆動では無視できるが高周波駆動では無視できない大きさとなることが知られている。すなわち、高周波駆動の小型電子機器は、周辺へ電磁波を放射し、周辺電子機器と相互作用によって誤動作に繋がる可能性が生じる。また、半導体チップ内の電流分布も単純に集中定数形電気回路的な取り扱いが困難であり、半導体チップ内の電気回路間の相互作用を勘案しなければならない。換言すれば、高周波動作を前提とする小型電子機器では、内部電子回路が放射する周辺電磁界を互いに相殺するように設計しなければならない。

このような背景からシールド材の適用、フィルターの装着等の EMC 対策が行われてきた。しかし、今後の EMC 技術はより根源的な対策として放射電磁界を自己相殺する電子回路を設計することで実現されるべきである。放射電磁界を自己相殺する電子回路の設計方法として、有限要素法で代表される数値電磁界解析技術を採用し、放射電磁界を相殺させる電子回路の幾何学的構造を反復的に探査する、いわゆる順問題反復型設計がある。または、放射電磁界分布から電子回路の幾何学的構造を探査する、いわゆる逆問題反復型設計がある。

逆問題の解析は局所的な電磁界分布から電磁界源分布を求めることに帰する。局所的な電磁界分布から電磁界源分布を求める方法は、大別して 2 方法へ分類される。一方は、与えられた局所的電磁界分布から電磁界源分布を解析的に求める、いわゆるソフト的方法である。他方は、与えられた局所的電磁界分布から実験的に電磁界源分布を求める、いわゆるハード的方法である。

本稿は局所的電磁界分布から電磁界源をハード的に求める方法として、カレントビューアに関する研究について述べたものである。通常、磁界測定に用いられるコイルとしてソレノイド型コイルが挙げられるが、筆者等は、磁界源となる電流位置を推定するために、円弧状のサーチコイル（以下、カレントビューアと略記）を提案し、そのコイルが平面上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圧倒的に有効である事を報告した[1]。一方で、カレントビューアにおいても、各導体間の距離が非常に接近している場合、磁界測定からだけで、電流の位置を特定することは不可能であった[1]。このような場合には、何らかのソフト的処理が必要となる。さらに、精度の高い電流の位置推定を行うためには、磁界の測定点数よりも電流が存在する推定空間の分割個数を多くする必要があり、その結果、不適切な線形システム方程式 (Ill Posed Linear System of Equations)を解くこととなる。本稿では、隣接する導体間の距離が非常に接近している場合、電流の位置を推定するためのソフト的処理方法について述べる。さらに不適切な線形システム方程式を解くために用いる一般化サンプルドパターンマッチング法(Generalized Sampled Pattern Matching, 以下 GSPM 法と略記)の理論を述べ、GSPM 法による電流分布推定の検証結果について報告する。

2. Deconvolution とその概念

2.1 Deconvolution とは

一般に信号は何らかのビューワーを通して人間が観察できる視覚情報へ変換される。例えば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とになる。これは、電流が源情報であり、情報を伝達する媒体が磁界である。このため、人間が得られる情報は電流の情報が磁界の性質で変形されたものである。これは電流と磁界の性質を convolution（畳み込んだ）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。カレ

ントビューアにおいて、測定データにあたるカレントビューアの出力信号をYとし、磁界の性質にあたるカレントビューアの空間特性をCとしてdeconvolutionを行う事で、源情報にあたる電流の空間分布Xを推定する。図1にconvolutionとdeconvolutionの関係を示す。

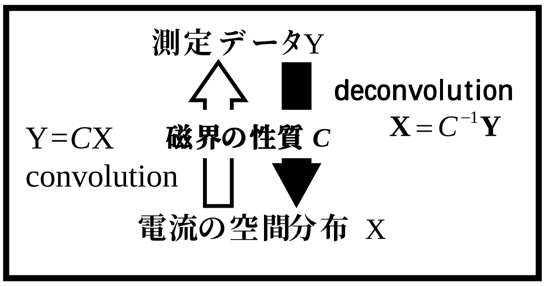


図 1.convolution と deconvolution の関係

Deconvolution の最大の利点はシステム行列に実測値を用いることが可能な点にある。そこで、カレントビューアにおけるシステム行列の作成手順を以下に示す。まず、測定領域及び推定領域は等しく、測定間隔及び推定間隔を 5 点として、図 2 に示すようなモデルを考える。

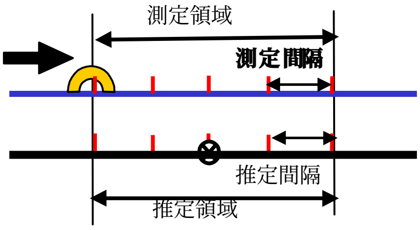


図 2. カレントビューアの実験モデル

単位値 1 の源が測定領域の中心にある場合、測定データ Y={0,a_1,a_2,a_3,0}が図 3 のように得られたとすると、源がある方向へシフトすれば、図 3 に示す波形も同方向にシフトするのは容易に理解できる。つまり、システム行列はシフトした源の各位置における測定データ Y の波形が図 3 の波形と同一となるように作成される。従って、源が測定領域の中心にある場合、行列の形式で表すと(1)式のようになる。さらに、(1)式中のシステム行列を図 4 に示す。

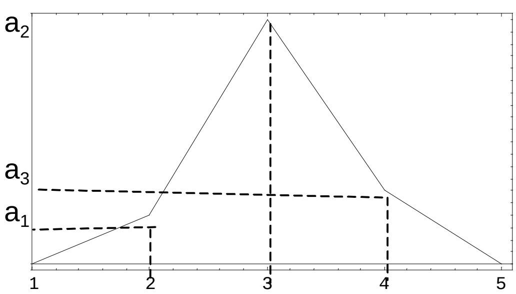


図 3. 仮定した測定波形

Y=CX
　または

$$\begin{pmatrix}0\\a_1\\a_2\\a_3\\0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a_2&a_3&0&0&0\\a_1&a_2&a_3&0&0\\0&a_1&a_2&a_3&0\\0&0&a_1&a_2&a_3\\0&0&0&a_1&a_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\\0\end{pmatrix} \tag{1}$$

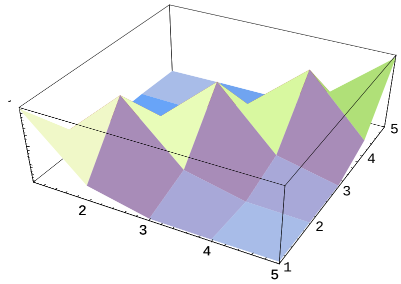


図 4. 作成したシステム行列

2.2　GSPM 法の理論

カレントビューアによる測定データから精度の高い電流の位置推定を行うためには、測定点数に比べて電流が存在する推定空間の分割数を多くする必要があり、deconvolutionをする際にシステム行列Cは横長の長方行列となる。この場合、システム行列Cの逆行列が単純に計算できないため、本稿では、GSPM法を採用する。以下にGSPM法の理論の概略を述べる。

2.2.1基礎方程式

GSPM法は不適切な線形システム方程式（Ill Posed Linear System of Equations）を解く方法である。このため、ここでは次式で与えられる一般的な線形システム方程式を考える。

$$\mathbf{Y}\ =\ C\ \mathbf{X} \tag{2}$$

(2)式で、$\mathbf{Y}$はn次の入力ベクトル、$\mathbf{X}$はm次の解ベクトル、そしてCはn行m列のシステム行列である。(2)式は(3)式のように書き直すことも可能である。

$$\mathbf{Y}=\sum_{i=1}^{m}x_i\mathbf{C}_i \tag{3}$$

$$C=(\mathbf{C}_1,\mathbf{C}_2,\mathbf{C}_3,\cdots\mathbf{C}_m) \tag{4}$$

$$\mathbf{X}=(x_1,x_2,x_3,\cdots x_m)^T \tag{5}$$

(3)式で、n次の列ベクトル$\mathbf{C}_i$は(4)式に示されているようにシステム行列Cを構成する列ベクトルである。また、x_iは、(5)式に示すようにベクトル$\mathbf{X}$を構成する要素である。

(3)式の両辺を入力ベクトル$\mathbf{Y}$と列ベクトル$\mathbf{C}_i$、それぞれのノルムで正規化して、次式を得る。

$$\frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|}=\sum_{i=1}^{m}\frac{|\mathbf{C}_i|}{|\mathbf{Y}|}x_i\frac{\mathbf{C}_i}{|\mathbf{C}_i|}=\sum_{i=1}^{m}x'_i\mathbf{C}'_i$$

ここで

$$\mathbf{X}'=(x'_1,x'_2,x'_3,\cdots x'_m)^T \qquad x'_i=\frac{|\mathbf{C}_i|}{|\mathbf{Y}|}x_i \tag{6}$$

従って、正規化したシステム方程式は

$$\mathbf{Y}'=C'\mathbf{X}' \tag{7}$$

となる。「'」（プライム）はベクトルや行列が正規化されていることを示す。

(3)式は入力ベクトル**Y**が必ずシステム行列の列ベクトルC_iの線形結合で与えられることを意味する。従って、k回目の反復解$X^{(k)}$が与える入力ベクトル$C\,X^{(k)}$と入力ベクトル**Y**間の内積、

$$f\left[\mathbf{X}^{(k)}\right]=\frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|}\frac{C\mathbf{X}^{(k)}}{\left|C\mathbf{X}^{(k)}\right|}=\frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|}\frac{|\mathbf{Y}|C'\mathbf{X}'^{(k)}}{|\mathbf{Y}|\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|}=\mathbf{Y}'\frac{C'\mathbf{X}'^{(k)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|} \tag{8}$$

を解の評価関数とし、

$$f\left[\mathbf{X}^{(k)}\right]\rightarrow 1 \tag{9}$$

とすることで、$X^{(k)}$を探査する考え方がGSPM法の基本的着想である。

2.2.2 スカラー型GSPM法

X_0'を初期値として解ベクトル**X'**を

$$\mathbf{X}'^{(k)}=\mathbf{X}'_0+\sum_{i=1}^{k}\mathbf{I}^{(k)} \tag{10}$$

と仮定する方法である。ここで、(10)式中のm次のベクトル$I^{(k)}$は、単位値1がm回毎に循環する次式で与えられるベクトル

$$\mathbf{I}^{(1)}=\begin{pmatrix}1\\0\\\cdot\\0\end{pmatrix},\quad \mathbf{I}^{(2)}=\begin{pmatrix}0\\1\\\cdot\\0\end{pmatrix},\quad \cdot\;\cdot\quad \mathbf{I}^{(m)}=\begin{pmatrix}0\\0\\\cdot\\1\end{pmatrix},$$

$$\mathbf{I}^{(m+1)}=\begin{pmatrix}1\\0\\\cdot\\0\end{pmatrix},\quad \mathbf{I}^{(m+2)}=\begin{pmatrix}0\\1\\\cdot\\0\end{pmatrix},\quad \cdot\;\cdot\quad \mathbf{I}^{(2m)}=\begin{pmatrix}0\\0\\\cdot\\1\end{pmatrix} \tag{11}$$

である。

(10)式でベクトル$I^{(k)}$が追加される毎に(8)式の評価関数を計算しておき、十分な個数のkについて計算した後、(9)式の条件を最も満たすベクトル$I^{(k)}$の組み合わせを解とする。

この解法をGSPM法の中で、スカラー追加型GSPM（Scalar Generalized Sampled Pattern Matching)法と呼ぶ。スカラー型GSPM法は、解ベクトル**X'**の1要素に対して逐次(9)式を評価する必要がある。このため、計算速度の向上を図ることが困難である。しかし、不連続点に比較的強い解を与えることが最大のメリットである。

2.2.3 ベクトル型SPM法

スカラー型解法は評価関数(9)式を逐次評価する解法である。これに対してベクトル型反復解法は一斉評価型の解法である。(9)式から、次式がゼロになる$X^{(k)}$を求めるのが目標である。

$$1-f\left[\mathbf{X}^{(k)}\right]=1-\mathbf{Y}'\frac{C'\mathbf{X}'^{(k)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|} \tag{12}$$

(12)式の両辺に正規化された入力ベクトル**Y'**を掛け算すれば

$$\mathbf{Y}'-\frac{C'\mathbf{X}'^{(k)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|}=0$$

または

$$\mathbf{Y}'=\frac{C'\mathbf{X}'^{(k)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|} \tag{13}$$

を得る。

(13)式の反復計算の初期値を$X'^{(0)}$とすれば、

$$\Delta\mathbf{Y}'^{(1)}=\mathbf{Y}'-\frac{C'\mathbf{X}'^{(0)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(0)}\right|}=C'\,\Delta\mathbf{X}'^{(1)} \tag{14}$$

を得る。(14)式の近似解を$\Delta X'^{(1)}=C'^{T}\Delta Y'^{(1)}$とすれば、$I_m$を$m$次単位正方行列として、

$$\begin{aligned}\mathbf{X}'^{(1)}&=\mathbf{X}'^{(0)}+\Delta\mathbf{X}'^{(1)}=\mathbf{X}'^{(0)}+C'^{T}\Delta\mathbf{Y}'^{(1)}\\&=\mathbf{X}'^{(0)}+C'^{T}\left[\mathbf{Y}'-\frac{C'\mathbf{X}'^{(0)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(0)}\right|}\right]\\&=C'^{T}\mathbf{Y}'+\left[\mathbf{I}_m-\frac{C'^{T}C'}{\left|C'\mathbf{X}'^{(0)}\right|}\right]\mathbf{X}'^{(0)}\end{aligned} \tag{15}$$

が成り立つ。

従って反復解の一般式は次式で与えられ

$$\begin{aligned}\mathbf{X}'^{(k)}&=\mathbf{X}'^{(k-1)}+C'^{T}\Delta\mathbf{Y}'^{(k-1)}\\&=C'^{T}\mathbf{Y}'+\left[\mathbf{I}_m-\frac{C'^{T}C'}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k-1)}\right|}\right]\mathbf{X}'^{(k-1)}\end{aligned} \tag{16}$$

となる。

解ベクトル$X'^{(k)}$の評価は、(8)式より

$$f\left[\mathbf{X}^{(k)}\right]=\mathbf{Y}'\frac{C'\mathbf{X}'^{(k)}}{\left|C'\mathbf{X}'^{(k)}\right|} \tag{17}$$

が単位値1に等しいかどうかで行われる。

3. カレントビューアの周波数特性

10KHz、1A 通電した導体が測定点の中心に存在する場合の誘起電圧の理論値と実測値を図 5 に示し、その誤差率を図 6 に示す。本来、コイルの誘起電圧は左右対称が望ましいが、製作上限界があるためコイルは位置に対して校正する必要がある。この誤差率の周波数特性を図7(a)及び(b)に示す。

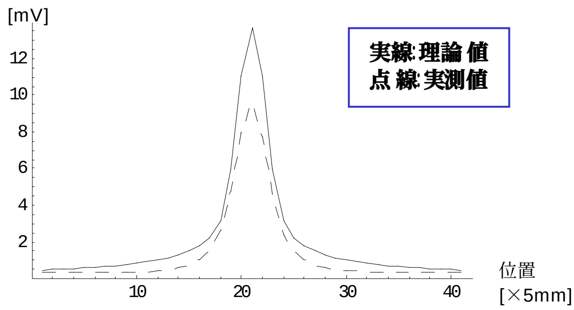


図５　カレントビューアの位置特性

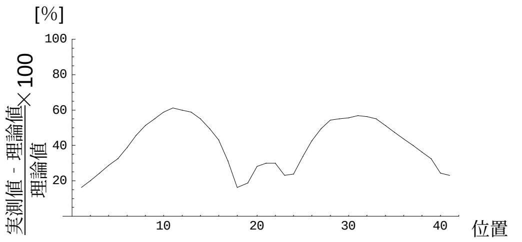


図 6　カレントビューアの位置特性 [×5mm]

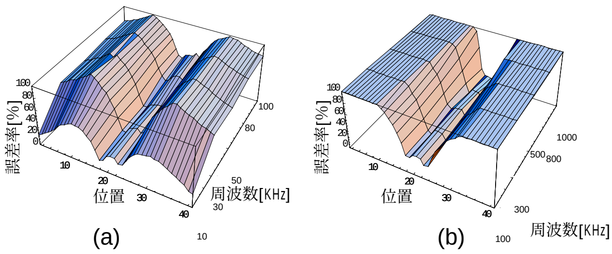


図 7. カレントビューアの位置及び周波数特性

10KHz から 100KHz までの周波数領域の誤差率を図 7(a)に、100KHz から 1 MHz までの周波数領域の誤差率を図 7(b)に示している。中心付近の誤差は共に 20%から 30%程度であることがわかる。

4. 電流の空間分布に関する deconvolution

ここでは、誘起電圧の測定データからカレントビューアの空間特性を deconvolution することで、電流の空間分布 X の推定が可能であるかをシミュレーション及び実測データを用いることによって吟味する。さらに、カレントビューアの空間特性で、半値幅と推定結果の関係について検討する。この実験で用いた電流の空間分布 X を図 8 に示す。図 8 は導体間の距離が非常に小さい 2 本の直線導体が並んだ場合を示している。

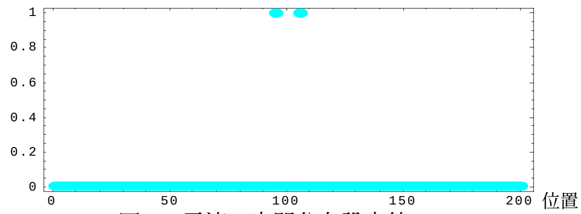


図 8　電流の空間分布設定値

4.1　deconvolution のシミュレーション

ここでは、検証実験の諸定数に近いモデルを設定し、deconvolution のシミュレーションを行う。仮定したカレントビューアの空間特性 *C* を図 9 に示す。

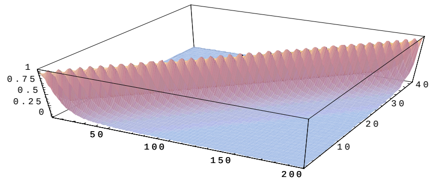


図 9 カレントビューアの空間特性

まず、図 8 に示すような、導体間距離が小さい 2 本の直線導体が平行に並んだ場合の電流分布を推定する。(2)式（Y=*C* X）より計算した誘起電圧の波形を図 10 に示す。

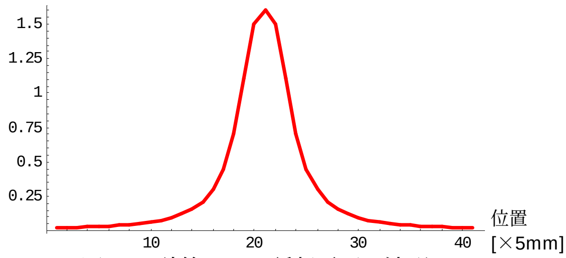


図 10　計算による誘起電圧の波形

図 10 から判るように誘起電圧の波形からだけでは、電流の位置は特定できない。この誘起電圧の波形からカレントビューアの空間特性を deconvolution することで、電流の空間分布を推定する。ここで、測定点数が 41 点であるのに対し、電流の空間分布は 201 点であるため、カレントビューアの空間特性に相当するシステム行列 *C* の逆行列は単純に計算できない。そこで、スカラー型及びベクトル型 GSPM 法によって電流の空間分布を推定する。スカラー型 GSPM 解を図 11(a)に、ベクトル型 GSPM 解を図 11(b)に示す。尚、図中の実線が GSPM 解を示し、上部の点が正しい電流の位置と振幅を示している。

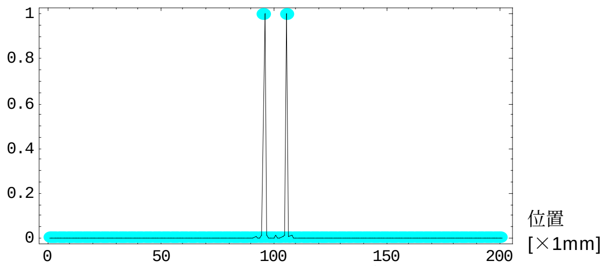


図 11(a)　スカラー型 SPM 解

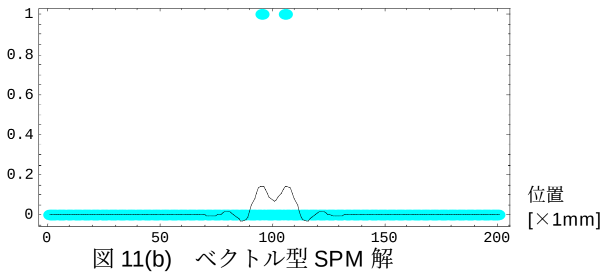


図 11(b)　ベクトル型 SPM 解

スカラー型 GSPM 解はほぼ厳密な位置推定を可能としている事が判る。一方、ベクトル型 GSPM 解もピークの頂点が電流位置を示し、良好な位置推定がなされている。しかし、振幅の計算誤差が大きい。スカラー型およびベクトル型 GSPM 法は互いにバータの関係にあり、スカラー型 GSPM 法は計算時間が長い。しかし、非常に良好な解が得られる。一方、ベクトル型 GSPM 法は計算時間が短い。しかし、スカラー型 GSPM 解に比べ良好な解は得られない。

4.2　実測値を用いた deconvolution

シミュレーションより、誘起電圧の測定データからカレントビューアの空間特性を deconvolution し、電流の空間分布を推定できることを示した。ここでは、誘起電圧の測定データ及びカレントビューアの空間特性に実測値を用いて、スカラー型及びベクトル型 GSPM 法によって電流の空間分布を推定する。実験で使用したカレントビューアの空間特性を図 12 に示す。

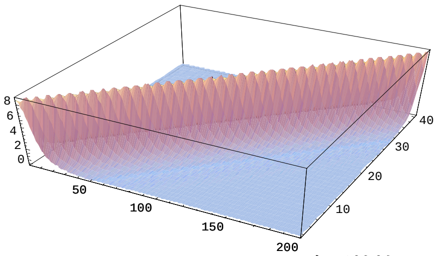


図 12　カレントビューアの空間特性

4.2.1　実験方法

20㎝の測定領域に対し、測定間隔を 5㎜とし全体で 41 点、導体と直角方向にカレントビューアを移動させた場合の誘起電圧を測定する。一方、推定領域は測定領域と同様に 20 ㎝であるが、推定間隔 1㎜計 201 点とする。測定データにカレントビューアの空間特性を deconvolution して、電流分布を推定する。実験概略図を図 13 に示し、この実験で使用したカレントビューアの諸定数を表 1 に示す。また、この実験において、導体間距離 X は 1cm としている。

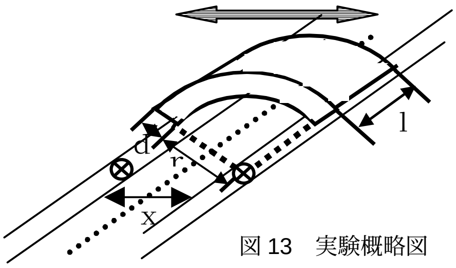


図 13　実験概略図

表 1.　カレントビューアの諸定数

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

4.2.2　導体間距離が小さい 2 直線導体の電流推定

図 14 に測定した誘起電圧の波形を示す。この測定データを用いて、スカラー型及びベクトル型 GSPM 法により電流の空間分布を求め、それぞれ図 15(a),(b)に示す。尚、図中の実線が GSPM 解を示し、上部の点が正確な電流の位置と振幅を示している。シミュレーションと同様に良好な位置推定が行われているが、図 11 に比較して図 15 はノイズの影響がみられる。これは、図 12 に示したカレントビューアの空間特性 *C* の歪み等の影響であると考えられる。ベクトル型も同様である。

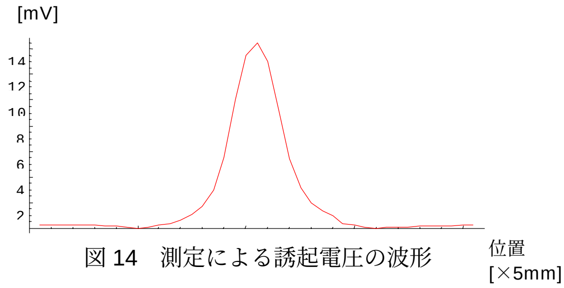


図 14　測定による誘起電圧の波形

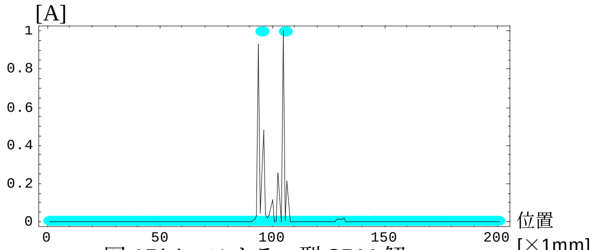


図 15(a)　スカラー型 SPM 解

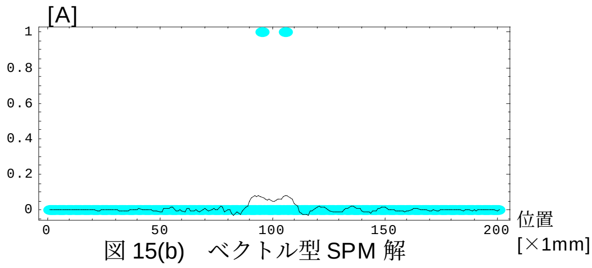


図 15(b)　ベクトル型 SPM 解

4.3　半値幅の影響

前稿において、半値幅を比較することでカレントビューアの解像度がソレノイド型コイルより良好である事を示した[1]。ここでは、4.1 節と同様のシミュレーションを行うことで deconvolution 問題における半値幅の影響を示す。

図 16 にカレントビューアの空間特性 *C* を示す。また、図 17 (a)にカレントビューアの空間特性 *C* の中心部における特性を示す。図 17(b)には 4.1 節で用いた特性を示す。図 17 から判るように、ここでは、半値幅の大きいカレントビューアを用いる。図 18(a)、(b)にスカラー型及びベクトル型 GSPM 解を示す。4.1 節と同様な電流の空間分布を設定しているが、カレントビューアの空間分布の半値幅が大きいため、スカラー型 GSPM 解は 4.1 節に比べ良好ではない。さらに、ベクトル型 GSPM 解では、位置推定が不可能となっていることがわかる。尚、この場合に実測値を用いて deconvolution を行ったが、推定される電流分布はノイズが存在するにも拘らず、ほぼシミュレーション結果と同等の結果が得られた。

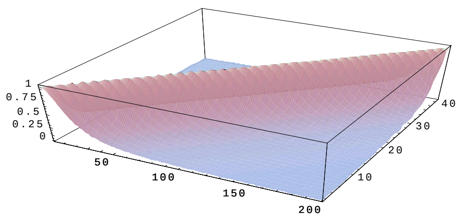
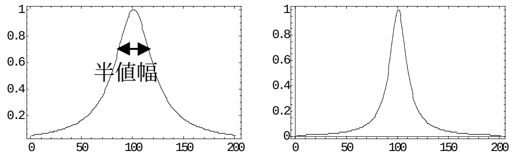


図 16 カレントビューアの空間特性



(a) (b)

図 17 カレントビューアの半値幅比較図

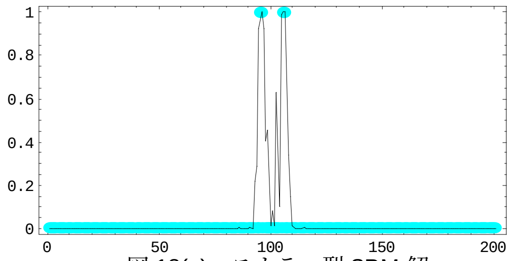


図 18(a) スカラー型 SPM 解

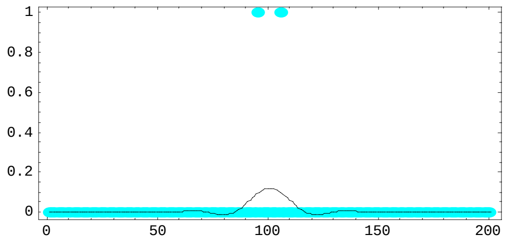


図 18(b) ベクトル型 SPM 解

5. まとめ

局所的な電磁界分布から電磁界源をハード的に求める方法として、本稿では、磁界測定のみでは電流の位置を特定できない場合に、deconvolution を行う方法を提案した。deconvolution を行う場合に生ずる不適切な線形システムに対して GSPM 法を採用した。その結果

(1) 磁界測定のみでは電流の位置を特定できない場合に deconvolution を行うことで電流の位置推定が可能となる。
(2) 磁界の測定点数よりも推定空間の分割個数が多い場合、不適切な線形システム方程式となるが、GSPM 法を用いる事で良好な電流の位置推定結果が得られる。
(3) deconvolution を行う場合にカレントビューアの空間特性として半値幅の小さいものを用いることで良好な解が得られる。

参考文献

[1] 青木誠、早野誠治、斎藤兆古、増田則夫、遠矢弘和：「カレントビュウワーの開発」、電気学会マグネティクス研究会、MAG-98-113.
[2] 後藤健一、山崎修一郎 ：「詳解 電磁気学演習」、共立出版、1970 年.
[3] G.ストラング：「線形代数とその応用」、産業図書、1978 年.

キーワード.

電流、可視化、畳み込み

Summary.

A study of Current Viewer -Deconvolution of the current distributions-

Makoto Aoki, Seiji Hayano, Yoshifuru Saito
Department of Electronics and Electrical Engineering,
College of Engineering, Hosei University

Previously, we have proposed a current viewer in order to evaluate the current distributions in the electronic circuits. As an initial experiment, we have succeeded in obtaining the good results. However, it has been essential that the evaluated results include more or less the space as well as frequency characteristics of a current viewer coil.

In the present paper, we try to remove the characteristics of viewer coil by means of the decomvolution method. As a result, we have succeeded in obtaining the fairly improved results.

Keywords.

current ,viewer, convolution