

カレントビューワーの開発

—基礎原理と実験—

Development of Current Viewer

青木 誠^{*1)}、早野 誠治¹⁾、斎藤 兆古¹⁾、増田則夫²⁾、遠矢弘和²⁾

1) 法政大学 工学部

2) 日本電気 (株)

M.Aoki¹⁾, S.Hayano¹⁾, Y.Saito¹⁾, N.Masuda²⁾, H.Tohya²⁾

1) College of Engineering, Hosei University

2) NEC Co.Ltd

Abstract

In order to evaluate the magnetic field source distribution, two approaches can be considered. One is the inverse solution strategy evaluating the current distributions from the locally measured magnetic fields. The other is to develop the current viewer.

This paper proposes one of the methods for exploiting the current viewer. Key idea is to utilize the focusing property of the magnetic field enclosing a target current flowing region. Basic operating principle and initial experiment are described in the present paper.

キーワード：電流、可視化、サーチコイル
(current, viewer, search coil)

1. まえがき

半導体の高密度・高集積化技術はマイクロプロセッシングユニット(MPU)の超小型を可能とし、多種類のインテリジェンシを持つ小型・軽量電子機器の広汎な開発と普及をもたらし、その結果、現代文明に不可欠な利便性を提供している。インテリジェンシを持つ小型・軽量電子機器の広汎な普及はより高度なインテリジェンシと小型・軽量化を要求し、MPUのより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。この結果、MPUを構成する半導体は従来想像も出来ない駆動周波数で動作されようとしており、今世紀中に1GHzの駆動周波数を持つMPUが実用化されるであろうと予想されている。

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、ギガヘルツ帯の駆動周波数を持つMPUを搭載したインテリジェント小型電子機器は、それ自身が放送局となり周辺へ電磁波を放射し、周辺電子機器と相互作用を行い誤動作に繋がる可能性を否定できない。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。自動車の排ガス対策は、初期

では化学触媒を利用した対処療法的な方法であったが、近年ではクリーンな排ガスを生ずるようなエンジン開発がなされるなど、より根源的なものとなりつつある。第一世代の小型電子機器のEMC技術は、自動車の排ガス対策と同様に、まず、規定の動作を行う電子回路を構成し、電子機器の動作に伴う周辺放射電磁界に対してシールド材やフィルターの装着などであった。しかし、第二世代のEMC技術は、電子機器の動作に伴う放射電磁界を自己相殺する形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を設計する方法として、2方法が考えられる。一方は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である。他方は、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である。順問題反復型設計は得られる結果の信頼性が高い反面、トライアンドエラー型の試行錯誤が必要であり、収束条件や拘束条件などに多くのノウハウを伴う。他方、逆問題型は、解が一意的に得られるならば極めて高効率な設計法であるが、解が一意的に決まらない。

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、いわゆるソフトの方法である。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、いわゆるハードの方法である。

本稿は、局所的な電磁界分布から電磁界源をハード的

に求める方法に関する基礎理論と基礎実験の結果を述べたものである。従来、一組の差動コイルを用いることによって、磁界源となる電流の位置と波形等を測定可能であることが報告されている[1]。本稿では、プリント基板のような平面上にある直線導体の位置推定を行うため、円弧状のサーチコイルを提案し、このコイルの解像度及び位置推定についての基礎理論と検証実験を行った結果を述べる。

2. 基礎理論

2.1 基礎原理

単純なループ状のサーチコイルを用いて電流近傍の磁界を測定し、磁界から電流分布を推定する場合、ループコイルの指向性が少ないため、詳略な電流分布を求めるために何らかの逆問題的方法が必要となる。本稿では、ループコイルの指向性を強化するため、図1に示すような複数個のループコイルを組み合わせた同心円状のサーチコイルアレイを考える。

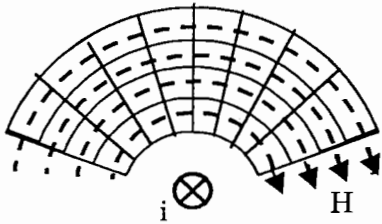


図1. 電流を中心として同心円上に配置されたサーチコイルアレイ

図1のコイルアレイでは、中心からずれた位置の電流*i*の作る磁界*H*は円弧状のサーチコイルへ局所的に鎖交する。しかし、中心部に位置する電流の作る磁界は円弧状のサーチコイルをすべて鎖交する。このため、電流の位置分解能が向上する。円弧の角度は大きいほど位置分解能が向上するが、電流の探索範囲が限定される。電流の位置分解能と探索範囲は互いにトレードの関係にあり、一方を向上すると他方は低下する。さらに、図2に示すように磁束通過面の厚みが異なる2個のサーチコイルアレイを考える。

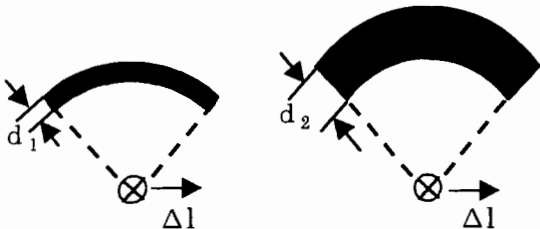


図2. 磁束通過面の厚みが異なるサーチコイルアレイ

磁束通過面の厚さ*d*が小さい場合と大きい場合を比較すると、直線導体をΔ*l*水平方向へずらした場合、サーチコイル幅の小さい方が誘起電圧の変化が顕著となる。すなわち、電流の位置推定精度は、サーチコイルの幅が

小さい方が、高解像度となる。

ここで、図1のサーチコイルアレイにおいて、電流がアレイの中心にある場合を考える。図3の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*b*の辺を導線軸に平行とし、軸からの最短距離が*d*の位置にある2辺*a*、*b*の長方形の部分を通る磁束を考える。

導線軸から*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。

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

*r*点での磁界はアンペアの法則より(2)式となり

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

$dS = b \cdot dr$ より微小面積*S*を通る磁界は(3)式で与えられる。

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

よって長方形を通る磁束は(4)式となる[2]。

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

電流がアレイの中心にある場合、長方形のコイルを通る磁束は一樣であるので、巻数を*N*とした鎖交磁束数λは*NΦ*である。これより、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)式を数値積分して全鎖交磁束数を求める。

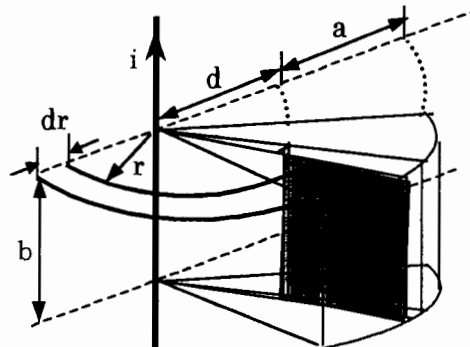


図3. サーチコイルアレイの鎖交磁束数の計算

3. カレントビューワーコイルの解像度分析

3.1 実験方法

図3に示すように、電流を中心とするサーチコイルアレイを試作した。サーチコイルアレイの存在する円弧角を90度、巻数*n*、半径*r*、幅*d*、さらに長さを*l*としたサーチコイルアレイであり、これを直線導体に対して直角方向に移動させた場合の誘起電圧を測定した。

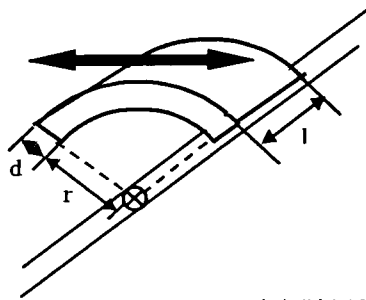


図3. 誘起電圧測定実験概略図

3.2 実験結果

3.2.1 半径 r を変化させた場合

幅 d を固定し、異なるコイル半径 r を有するサーチコイルアレイを、直線導体に直角方向に動かした時の誘起電圧の測定を行った。この実験で使用したコイルの諸定数を表1に示す。実験結果を図4、5に示す。ただし、実験結果は半径 r に依存して誘起電圧の最大値が異なる。このためそれぞれの最大値で正規化してある。

図4、5から、コイル半径 r が小さい程、位置に対する変化率は大きく高解像度となる事が判る。

表1. サーチコイルアレイの諸定数

	半径 r [mm]	幅 d [mm]	長さ l [mm]	巻数 N
コイル A	17.2	3.6	20	225
コイル B	22.2	3.6	20	290

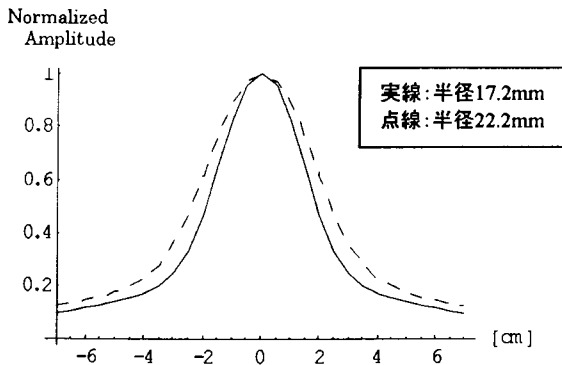


図4. 半径 r を変化させた場合の誘起電圧 (理論値)

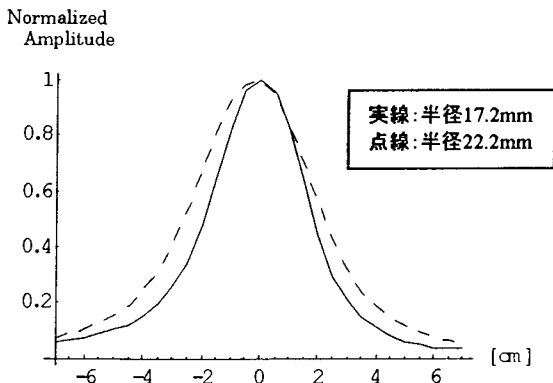


図5. 半径 r を変化させた場合の誘起電圧 (実測値)

3.2.2 幅 d を変化させた場合

半径 r を固定し、異なるコイル幅 d のサーチコイルを、直線導体に直角方向に動かした時の誘起電圧の測定を行った。この実験で使用したコイルの諸定数を表2に示す。実験結果を図6、7に示す。ただし、誘起電圧の最大値はコイル幅 d に依存するため、それぞれの最大値で正規化してある。

図6、7から、コイル幅 d が小さい程、位置に対する電圧の変化率が大きく高解像度となる事が判る。

表2. サーチコイルアレイの諸定数

	半径 r [mm]	幅 d [mm]	長さ l [mm]	巻数 N
コイル C	17.2	3.6	20	225
コイル D	17.2	8.6	20	225

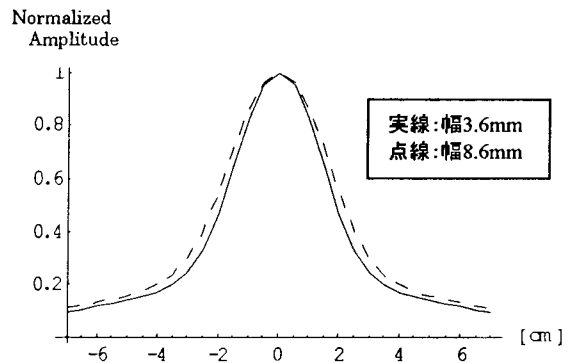


図6. 幅 d を変化させた場合の誘起電圧 (理論値)

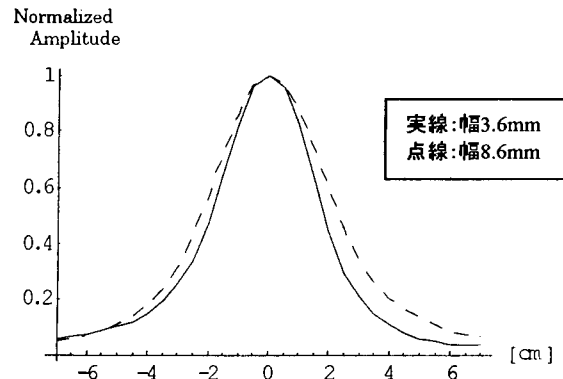


図7. 幅 d を変化させた場合の誘起電圧 (実測値)

以上の実験結果を x 軸に半径 r、y 軸に幅 d、z 軸に半値幅 x として整理し図8に示す。半値幅 x は、正規化した誘起電圧の図において、その最大値から -3 [dB] の点における x 軸方向の幅であり、その値が小さいほど波形が鋭い事を意味する。図8より半径 r、幅 d を共に小さくする程、解像度も向上する。しかし同時に、誘起電圧の最大値が低下する問題点もある。

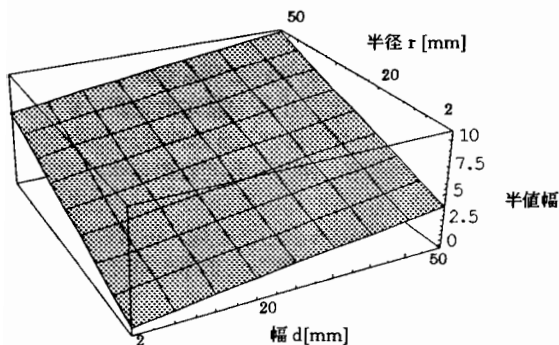


図8. 半径 r 及び幅 d に対する半値幅 x の関係

4. カレントビューワによる位置推定基礎実験

前項の実験より、サーチコイルは半径 r 及び幅 d が限りなく小さい程高解像度な位置推定が可能であることを示した。そこで、製作可能な範囲で半径 r 、幅 d が小さいコイルを作成し、直線導体が2本存在する場合の位置推定基礎実験を行う。さらに、直線導体が複数本存在する場合に高周波電流を通電し、誘起電圧を測定する事で表皮効果の傾向を評価する。

4.1 位置推定基礎実験

4.1.1 実験方法

図9に示すように、電流を中心とするサーチコイルアレイを製作した。サーチコイルアレイの存在する円弧角を90度、巻数 n 、半径 r 、幅 d 、さらに長さを l としたサーチコイルアレイであり、製作可能な範囲で半径 r 、幅 d を小さくした。ここで、距離 x だけ離れた直線導体を測定点の中心から等しい距離に2本設置し、導体間距離 x を10, 2, 1[cm]と変化する。各導体間距離について、導体に対して直角方向にサーチコイルアレイを移動させた場合の誘起電圧を測定した。この実験で使用したサーチコイルアレイの諸定数を表3に示す。

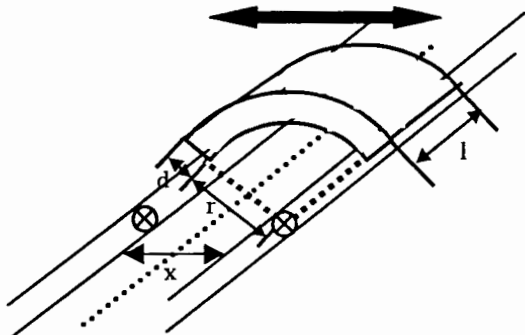


図9. 複数導体の位置推定実験概略図

表3. サーチコイルアレイの諸定数

	半径 r [mm]	幅 d [mm]	長さ l [mm]	巻数 N
コイルE	7.2	3.6	20	97

4.1.2 実験結果

実験結果を図10, 11, 12に示す。ただし、実験結果は誘起電圧の最大値が異なるためそれぞれの最大値で正規化してある。また、図中上部に示す2個の点が直線導体の位置を示している。

図10において、導体間距離が10[cm]の場合、隣接する直線導体の影響がほとんど無視できるため、良好な位置推定が可能であることが判る。しかし、導体間距離が近づくと隣接する導体の影響が無視できない。図11に示すように導体間距離が2[cm]の場合、実際の電流位置と1[mm]程度の位置推定誤差が生ずる。

図12に示す導体間距離が1[cm]の場合は導体の位置推定を行うことが不可能となる。すなわち、サーチコイルアレイの直径程度が電流位置推定の限界解像度である。

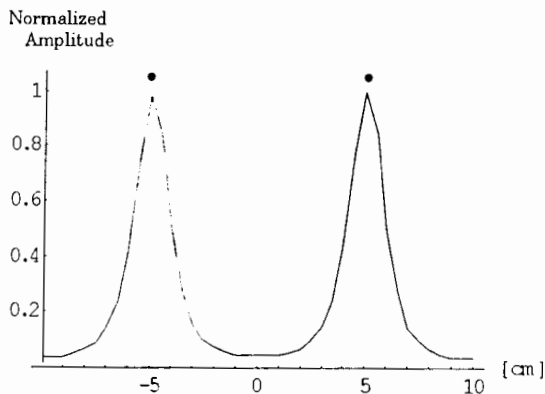


図10. カレントビューワによる位置推定測定結果(間隔 $x=10$ [cm])

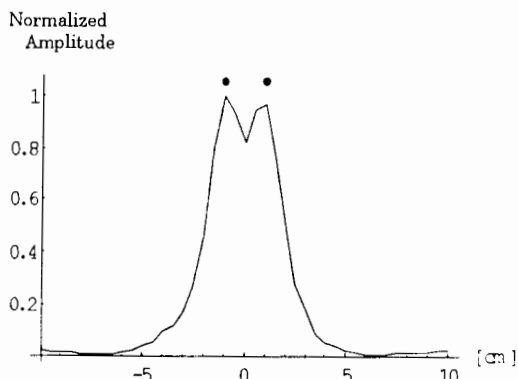


図11. カレントビューワによる位置推定測定結果(間隔 $x=2$ [cm])

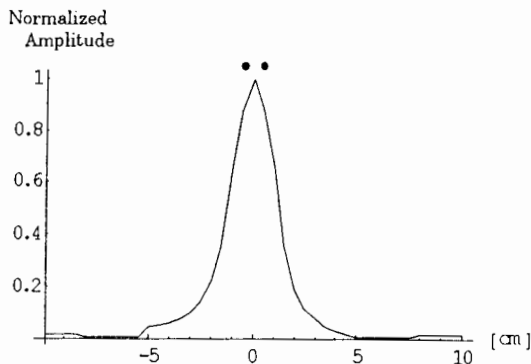


図12. カレントビューワによる位置推定測定結果(間隔 $x=1$ [cm])

4.2 直線導体が複数個の場合

4.2.1 実験方法

図 13 に示すように、表 3 に示すサーチコイルアレイを用いて、直線導体が複数本存在する場合の表皮効果を吟味する。ここでは、直線導体の数は 16 本であり、200[KHz]の周波数を持つ電流を通電した。

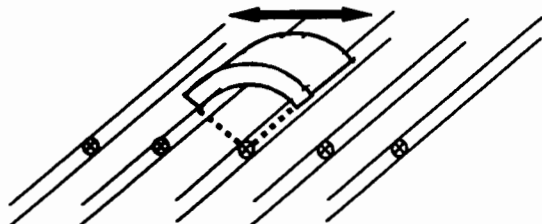


図 13. 複数個の導体が存在する場合の実験概略図

4.2.2 実験結果

実験結果を図 14 に示す。図中に示す波形は各位置における誘起電圧の値であり、点は直線導体の位置とその振幅である。表皮効果によって両端の導体に電流が多く流れているため、磁界に起因する誘起電圧も両端の値が大きくなっていることが判る。

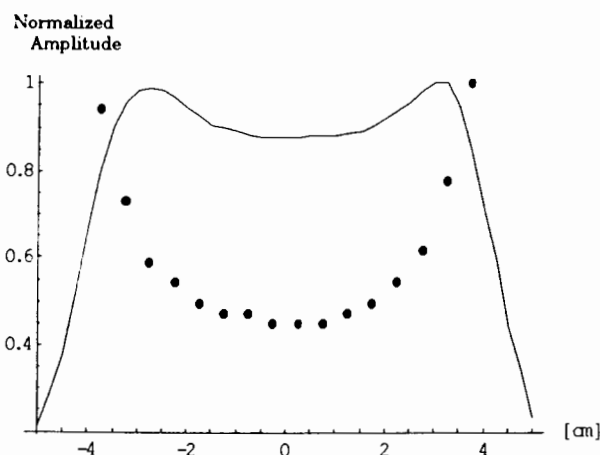


図 14. 導体が複数個存在する場合の誘起電圧測定結果

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、本稿では円弧状のサーチコイルを提案し、その解像度及び位置推定基礎実験を行った。その結果

- (1)基礎原理に基づき、円弧状のサーチコイルを作成し解像度分析を行った結果、コイル半径 r 及びコイル幅 d の値が小さい程、位置推定の解像度は向上する。
- (2)直線導体が複数存在する場合、隣接する導体の影響を受けるため、何らかのフィルタリング作業が必要となる。ただし、隣接する導体の影響が無視できる

場合、換言すれば、円弧状サーチコイルアレイの直径に比較して、直線導体の導体間距離が充分大きい場合は良好な位置推定結果を与える。

参考文献

- [1] 松村 仁・早野誠治・斎藤兆古
「差動コイルを用いた電流推定」
電気学会マグネティクス研究会
MAG-95-117 (平成 7)
- [2] 後藤健一・山崎修一郎 共編
「詳解 電磁気学演習」 共立出版
初版 1970 年 12 月 15 日発行
- [3] 山田直平 「電磁気学」 電気学会
第二次改訂版 1979 年 3 月 5 日発行

原稿受付日	平成 10 年 7 月 24 日
-------	------------------