

電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システム

—原理と基礎実験—

Visualization of electromagnetic fields distribution
near the electric and electronic devices

—Principle and initial experiments—

宮原晋一郎^{*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)

S.Miyahara¹⁾, S.Hayano¹⁾, Y.Saito¹⁾, N.Masuda²⁾, and H.Toya²⁾

1) College of Engineering, Hosei University

2) NEC Co.Ltd

Abstract

This paper proposes a methodology for visualizing the electromagnetic field distributions vicinity of the electric devices. At first, we solve an inverse source problem in order to identify the electromagnetic field sources from locally measured electromagnetic fields. Second, we calculate the electromagnetic field distributions from the estimated electromagnetic field sources. Finally, we visualize the electromagnetic field distributions over the electric and electronic devices.

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 device can be visualized from the locally measured magnetic fields.

キーワード：電磁界、可視化、ループ電流モデル

(Electromagnetic fields、Visualization、Loop current model)

1. まえがき

半導体技術の発展は、電気・電子機器の小型軽量化のみならず、インテリジェント化を可能とし、爆発的な電気・電子機器の普及をもたらした。その結果、高周波で駆動される電気・電子機器は生産設備のみならず家電機器まで普及し、家庭、事務所、工場、その他あらゆる場所でパソコン、ファックス、携帯電話、空調機器、照明機器等の多くの電気・電子機器が設置され、必要不可欠な文明の利器として活用されている。それらの電気・電子機器が空間を占める密度は、従来想定不可能な密度である。この意味で、人工的な空間はあらゆる周波数の電磁界で満たされた空間と化している。この過酷な電磁環境中でも、電気・電子機器は誤動作をすることなく円滑にそれらの機能を発揮しなければ、人類の文明生活が維持できない状況に至っている。また、あらゆる周波数の電磁界で満たされた空間の中で人類は生活を強いられている状況である。電気・電子機器に対してだけでなく人類に対しても可能な限り、高周波の電磁界が分布しない自然な空間が望ましいことは言うまでもない。

筆者らは、このような状況に鑑み、電気・電子機器間の相互干渉による誤動作防止技術、および人工空間中における磁界の削減の基礎となる電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システム開発の根幹となる基礎理論と基礎検証実験について報告する。

2.1 システム構成

2.1.1 ハードウェア

目的は、ある人工空間内の電磁界分布を可視化すること、周波数ごとの電磁界分布の特徴抽出、そして最も支配的電磁界源の探査である。このため、個々の電気・電子機器が生ずる周辺電磁界分布の測定を行うセンサーアレイ、増幅器とスペクトラムアナライザーからなる電磁界測定部、各電気・電子機器の電磁界源を計算し、すべての電気・電子機器が同時に駆動された場合における電磁界分布の計算と表示、電磁界の特徴を表す3次元ウェーブレット変換とウェーブレットスペクトラムの表示、そして、支配的電磁界分布を与える電磁界源分布の抽出と表示を行う計算機部分が大きなハードウェアの構成である。図1参照。

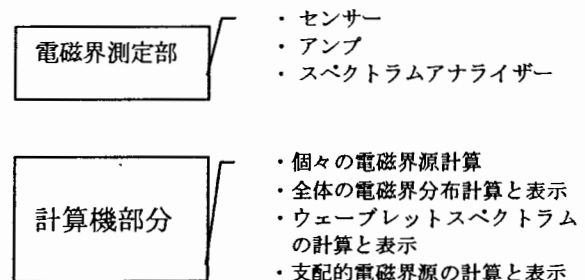


図1. 電磁界分布可視化システムのハードウェア構成の概要

2. 電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システム

2.1.2 ソフトウェア

ソフトウェアは大まかに、1) センサーからの信号をハンドリングする電磁界測定部分を制御するコントロール用ソフトウェア、2) 局所的な電磁界分布から電磁界源を計算する逆問題ソルバー用ソフトウェア、3) 3次元ウェーブレット変換と支配的電磁界源を抽出するデータ処理用ソフトウェア、4) 3次元電磁界源分布、ウェーブレットスペクトラム分布、さらに支配的電磁界源を表示する可視化用ソフトウェアに分類される。図2参照。

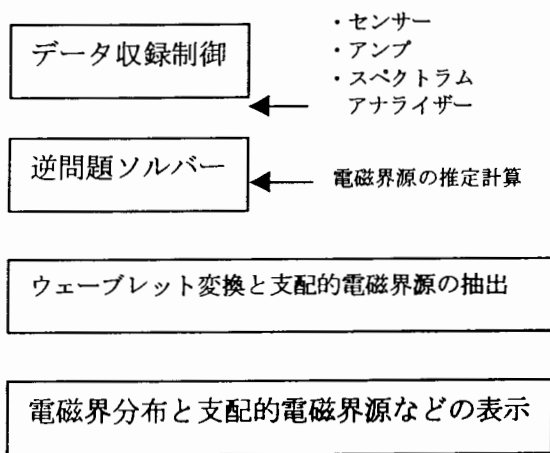


図2. 電磁界分布可視化システムのソフトウェア構成の概要

2.2 理論的基礎

2.2.1 電磁界センサー

電磁界センサーは磁界と電界センサーに分類される。いずれのセンサーもアンテナに誘起する起電力を測定する。磁界は閉回路を構成するループアンテナ中を通過する磁束の時間変化に起因する誘導電圧から測定される。他方、電界は半波長ダイポールアンテナ等の開回路に誘起する誘導電圧から測定される[1]。磁界は閉ループ面を通過する磁束から測定されるため、大きさと方向を持つベクトル量として測定可能である。他方、電界はベクトル量として測定することが比較的困難である。これは、磁界源となる電流密度がベクトル量であるのに対し、電界源となる電荷密度がスカラー量であることに起因する。すなわち、電気・電子機器中で磁界のz方向成分 H_z が測定されたとすれば、x、y方向の電流密度ベクトル J は $J = \nabla \times H_z$ 演算によって計算される。他方、電気・電子機器中でz方向の電界 E_z 成分が測定されたとすれば、 E_z 成分に寄与する電荷密度 ρ_z は $\rho_z = \nabla \cdot \epsilon E$ 演算によって、計算される。このため、x、y、z成分の電界が合成された電界 E が測定されたとすれば、 $\rho = \nabla \cdot \epsilon E$ 演算によって、全電荷密度 ρ を得ることが可能である。したがって、磁界と電界、それぞれに起因する誘導起電力の本質的な相違点はそれぞれの源の基本的な性質の相違に起因する。

磁界・電界センシング技術はほぼ確立していると考えてもよいであろう。問題は、電磁界源となる電流密度や

電荷密度が高精度に推定されるセンサー配置にある。

2.2.2 電磁界源分布の推定

電磁界分布可視化システム開発の最大の課題が電磁界源分布の推定法にあると考えてよいであろう。電気・電子機器の発生する電磁界は理論上無限遠点にまで分布する。このため、電磁界分布の測定は限られた局所空間でなされる。しかし、電磁界を生ずる電磁界源の分布する空間は無限に存在し得る。すなわち、情報は局所的に与えられ、無数に存在し得る情報源から現実に存在する情報源を求める必要がある。換言すれば、解が一意的に存在しない不適切問題を解く必要がある。このため、電磁界源を局所的電磁界分布から求める過程は、電磁界分布可視化システム開発の可能性をも左右する重要なキーポイントである。

ここでは、磁界から平面上の電流分布を計算する方法を検討する。以下の条件を前提とする。1) 2次元問題である、2) 測定面と電流分布面が平行している、3) 測定される磁界は測定面・電流分布面に垂直なz方向成分である、4) 計算対象の電流はx-y平面に分布する。

検討課題は、1) ループ電流モデルを採用する、2) 磁界の測定点数と同じ数のループ電流を求める、3) 計算方法は直接逆行列法を採用する[2]。

<a>モデル ここでは図3に示すように、ある平面導体に分布する電流密度 J を平面導体上の磁界 H を測定することによって求める問題を考える。

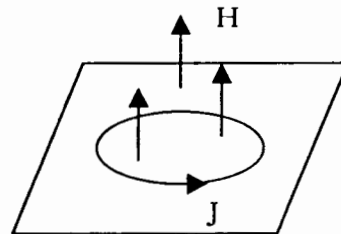


図3. ループ電流 J と磁界 H

ループ電流と磁界 さて、ここで変位電流密度 $\partial D / \partial t$ が無視できる系において電流密度 J は磁界 H と次式で関係づけられる。

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

従って、電流密度 J は必ず次式を満足しなければならない。

$$\nabla \cdot \nabla \times H = \nabla \cdot J = 0 \quad (2)$$

(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3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4に示すループ電流でモデル化されると仮定する。

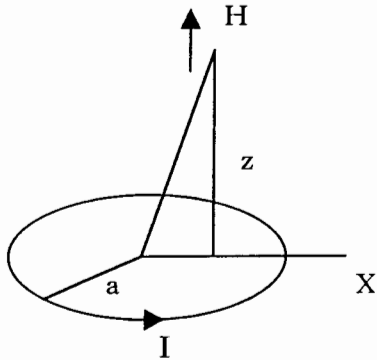


図4. ループ電流 I の作る z 軸方向の磁界 H

図4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な形 (3) 式で計算できることを意味する。

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

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

<c>微小ループ電流モデル 図3の問題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5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。

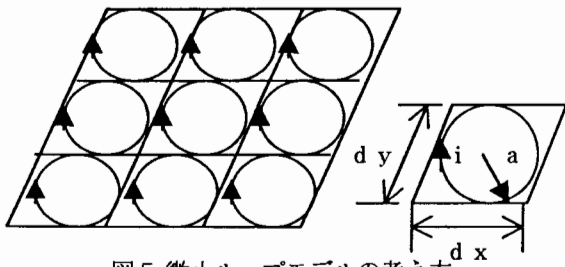


図5. 微小ループモデルの考え方

図5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表現される。

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

<d>例題 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。ここでは $10 \times 10 = 100$ 点の磁界測定点から、 $10 \times 10 = 100$ 個のループ電流を求める問題を考える。図6にモデルとなる磁界分布の等高線を濃淡で示す。色が濃いほうと薄いほうそれぞれ負と正に対応し、紙面の奥から読者方向を正方向としている。

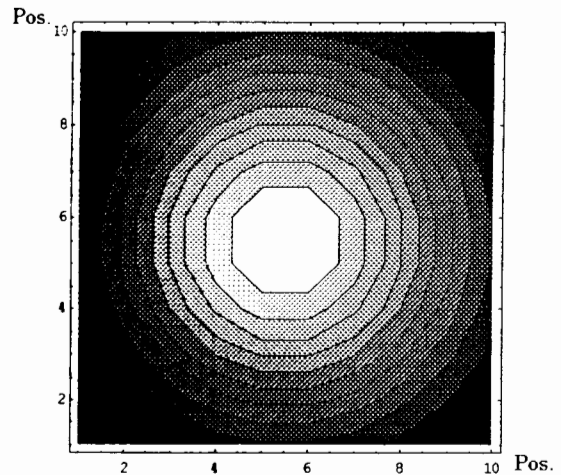


図6. モデル磁界分布

次に、磁界からループ電流分布ベクトルを直接逆行列法で求める。図8が直接逆行列法によるループ電流分布である。図6のモデルを完全に再現していることが判る。図9が電流ベクトルである。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り、結局、電流ベクトルはループ電流分布の等高線に沿って流れていることとなる。

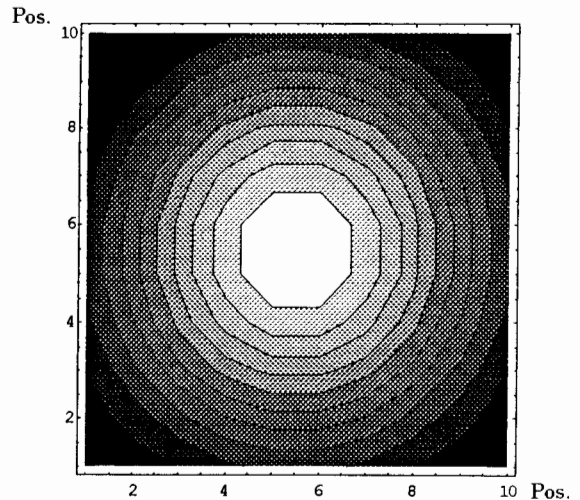


図7. 直接逆行列法による電流分布

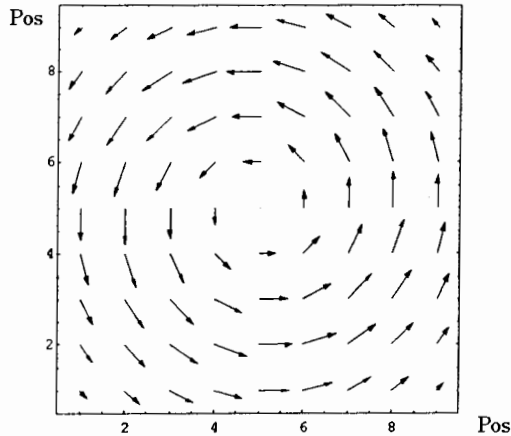


図 8. 直接逆行列法による電流ベクトル

2.2.3 周辺磁界分布

図 9 に図 8 の電流ベクトルが生ずる周辺磁界分布を示す。

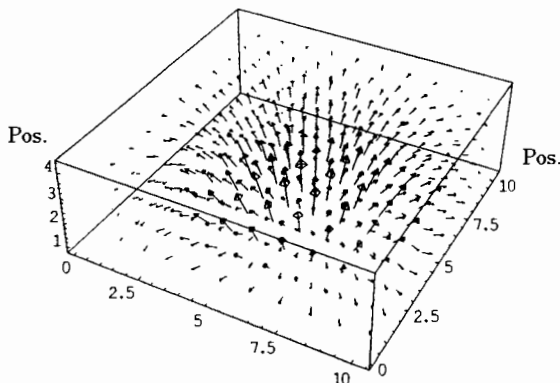


図 9. 電流ベクトル分布が生ずる周辺磁界分布

2.3 基礎実験

ここでは 2.2 節のシミュレーション結果について実験的検証を行う。

2.3.1 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 10 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 0.3A である。

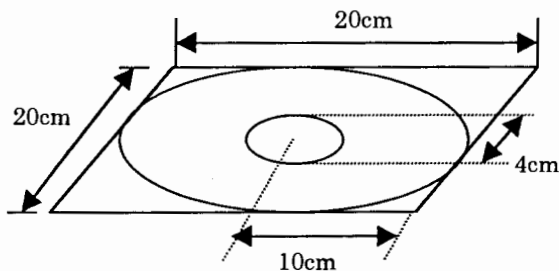


図 10. 円形励磁コイル

< 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 11 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。

表 1. サーチコイルの仕様

巻き数 (Turn)	半径 (mm)	線の太さ (mm)
90	5	0.2

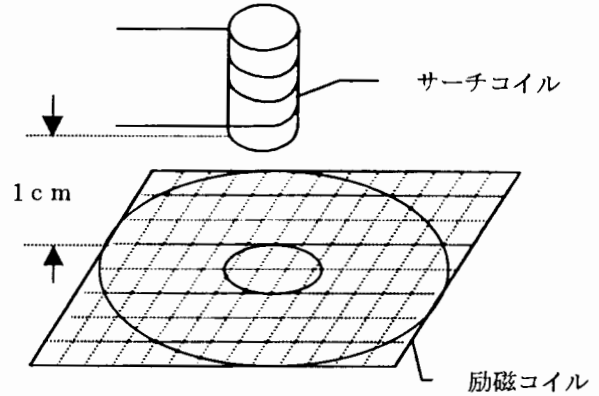


図 11. 実験装置の概略図

2.3.2 電流ベクトル分布

測定された磁界分布の等高線図を図 12 に示す。図 13 は直接逆行列法で得られた電流ベクトル分布である。

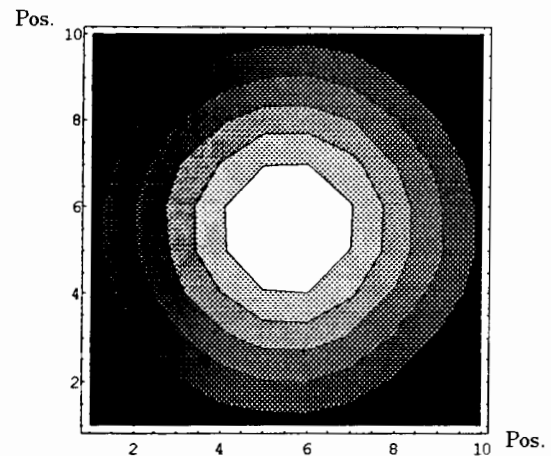


図 12. 測定による磁界分布

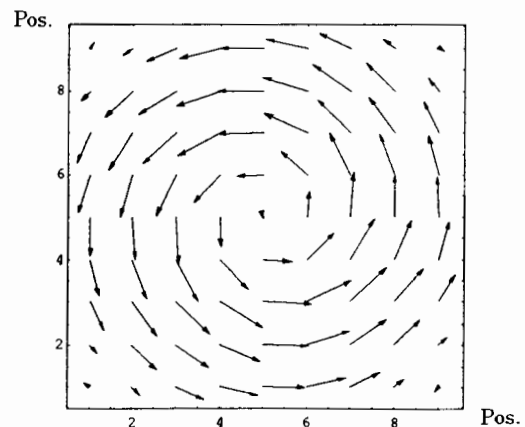


図 13. 電流ベクトルの分布

2.3.3 計算による周辺磁界分布

図 14 に図 13 の電流ベクトルが生ずる周辺磁界分布を示す。z 方向成分の高さは 4 段階である。磁界の最大値は 224[A/m]である。

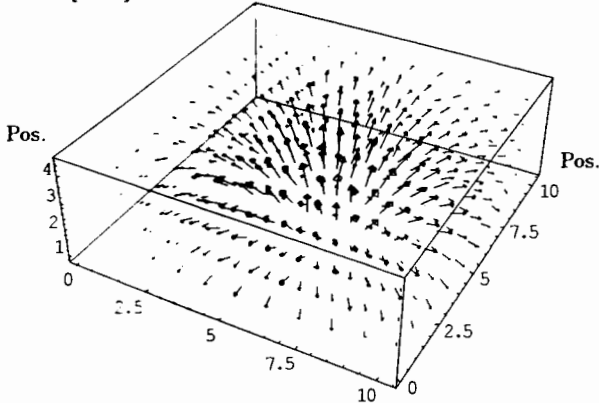


図 14. 周辺磁界分布 (計算値)

2.3.4 実験による周辺磁界分布

図 11 の実験装置で、電流分布面と測定面の高さを変更して磁界ベクトルの x、y、z 3 成分を測定した。z 方向成分は 1cm 毎に 4 段階高さを変更して測定した。結果を図 15 に示す。図 15 の分布は図 14 のそれとほぼ一致している。磁界の最大値は 290[A/m]である。

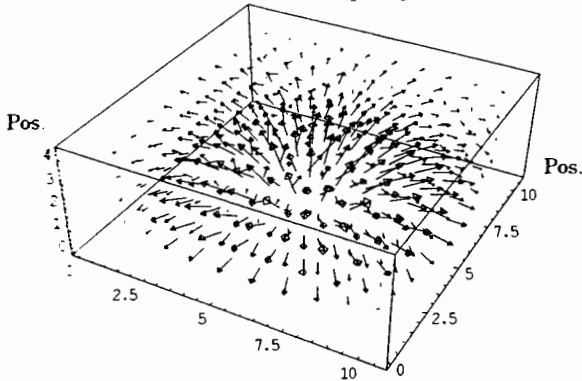


図 15. 周辺磁界分布 (実測値)

3. まとめ

本稿では、電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システム開発について、以下の考察を行った。

- 1) ハードウェアの構成
- 2) ソフトウェアの構成
- 3) シミュレーションによる周辺磁界分布に関する検討
- 4) 実験による周辺磁界分布に関する検討

以上の結果、電気・電子機器の周辺電磁界分布可視化システムで、周辺磁界分布の可視化はある程度可能である事が判明した。

参考文献

- [1] 「EMCブルーブの取り扱い説明書」EMCO社
- [2] 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)

[3] 篠原佳直 著

「誘導加熱用励磁コイルに関する考察」
(修士論文、1997年3月)

原稿受付日

平成 10 年 7 月 24 日