

キーワード

電磁機器解析, 磁化特性, 逆問題, 可視化技術

齋藤 兆古  
早野 誠治  
法政大学

## 1. はじめに

物理学の一分野として種々の電磁現象が観測され、現象の知見が蓄積されつつある時点で、産業革命による遠距離通信の必要性が電気通信機器の開発と実用化を促し、これが今日の電気・電子工学の発端となった。その後蒸気機関による動力の集中使用による大量生産体制は部品製造に動力の分散使用を必要とし、これが効率的なエネルギーの伝送を可能とする電力系統網の整備および動力の分散生成と使用を可能とする発電機・電動機の開発と普及をもたらした。すなわち、産業革命が電磁気学を単なる物理学の一分野から電気・電子工学の基礎学術へ変貌させた。

現代の電気・電子工学は、電気通信のみならず電力系統まで極めて広範な分野を網羅している。本稿は、現代文明の主エネルギーを担う大型回転機や静止器等の電気機器を含まない、狭義の電磁機器に関する解析手法の解説である。しかしながら、本解説は、磁性材料の非線形磁化特性等を解析へ取り込む方法も対象とするため、大型電気機器に関する解析の基礎的共通基盤を包含する。

電磁機器解析手法を述べる場合、計算機の果たす役割に関して言及せざるを得ない。1960年代の後半から爆発的な普及と高性能・小型・軽量化がなされた計算機は多くの工学機器解析の強力なツールである。計算機を前提とする現代電磁機器解析手法は、電磁機器の順問題的解析と逆問題的解析へ分類することができる。さらに、近未来的解析手法として、電磁界の可視化技術とその解析への応用が考えられる。

順問題的解析技術は、線形材料を前提とする簡潔な方法から何らかの非線形性を考慮したより精緻な解析へ変貌しつつある。換言すれば、計算機を前提とする解析となりつつある。

磁気装置は必然的に線形な記述では不可能な複雑な非線形性を呈する磁性材料を主要な構成材料とする。これらの非線形性を平均的に勘案し、汎用回路シミュレータを併用する電磁機器解析手法は、主として東北大学を中心とするグループによって開発され、ほぼ実用化レベルにある。

さらなる精緻な電磁機器解析を行う場合、必然的に磁気履歴特性を勘案しなければならない。スカラーの磁化履歴特性を勘案する解析手法は、既に教科書レベルまでの完成域に達している。しかし、現実問題として、多くの磁性材料は非等方磁化特性を有する。非等方磁化特性を勘案した解析を行う場合、非等方磁化特性を表現する何らかの構成方程式が必要である。非等方磁化特性を測定する標準化手法の提案、そして、非等方磁化特性を表現するE & Sモデル等が、大分大学や岡山大学のグループによって提案されている。

さらに、金属材料中の欠損を評価するECT(Eddy Current Testing)は、単純な非破壊検査技術から品質評価手法へ変貌しつつある。すなわち、逆問題解析手法の端緒であるECTは、電磁機器解析手法の常套手段となり、その適用分野を広げている。

以上のように、現代電磁機器解析手法は、計算機を前提とするため、磁性材料の非線形性を平均的に勘案することを可能としているが、磁気異方性を勘案した解析は、開発途中にあると言える。また、逆問題的解析手法は、局所的技術は成熟期を迎えつつあるが、本格的な解析手法として認知されるには、時間と実績が必要とされる。換言すれば、順問題的解析手法で磁気異方性問題と逆問題的解析手法は近未来解析手法の中間に位置し、近未来解析手法を実現する基幹技術と言える。

本解説では、従来の解析技術の延長線上にある現代電磁機器解析手法に関しては既に多くの論文が公表されていることに鑑み、近未来解析技術の一端である電磁機器の近傍電磁界解析手法について詳述する。

電磁機器の近傍電磁界系は、物理系のマクロとミクロの中間系であるメソスコピックな系と類似した集中定数系と分布定数系の中間的な系であり、過去に技術的・学術的知見が殆ど蓄積されていない。電磁界の可視化技術は、現代電気・電子機器の設計・開発の根幹技術となる近傍電磁界解析技術の一端をなすものである。何ごとも「百聞は一見にしかず」の格言と同様に、まずは、電磁界を可視化することが近傍電磁界解析技術開発の大きな手掛かりとなる。換言すれば、近傍電磁界現象を正確に把握する技術が電磁界可視化技術である。

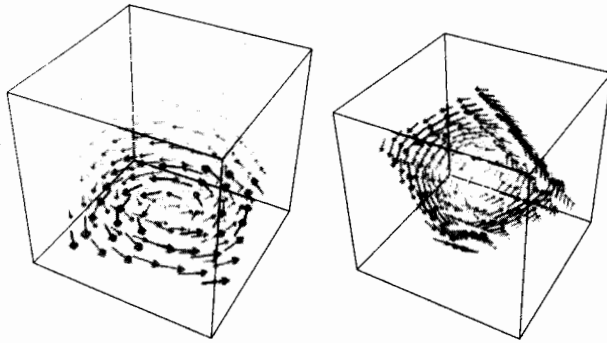


図 1 準 3 次元電流分布の例  
Fig. 1. Examples of the quasi-3D currents

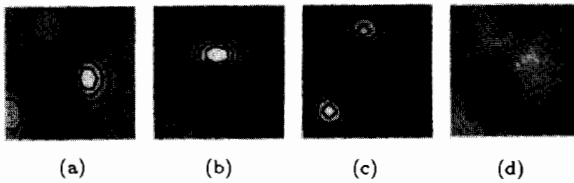


図 2 磁界の各成分と可視化画像  
Fig. 2. Each magnetic field component and visualized image. (a)  $x$ -component, (b)  $y$ -component, (c)  $z$ -component, and (d) visualized image

## 2. 近傍電磁界の可視化技術

### 2.1 近傍電磁界解析

近傍電磁界の可視化を可能とする方法は二種類へ分類される。最初は、電磁界源と空間・時間条件を既知として、周辺の電磁界を解析的に計算する順問題的方法である。他方は、周辺電磁界分布から電磁界源を推定し、推定された電磁界源から周辺電磁界分布を計算する逆問題的方法である。前者の順問題的方法は、実現される製品を忠実にモデル化可能であれば、有用な方法である。残念ながら、近傍電磁界問題の多くは、順問題のモデルで表現出来ない現象に起因する。他方、生産された製品が周辺へ与える近傍電磁界から電磁界源を推定する逆問題的手法は、解の一意性等、数学的基盤の弱さが存在する反面、計算機の強力な反復計算能力を前提とする方法が開発されつつある<sup>(1)~(3)</sup>。

本稿では、後者の逆問題的解析法を用いて近傍電磁界を可視化する。さらに、可視化された電磁界のイメージ処理について概説する<sup>(4)(5)</sup>。

### 2.2 電流分布の可視化

ここでは磁気誘導加熱調理器の周辺磁界測定から電流分布を可視化する例題を取り上げる。

励磁コイルを取り囲む一辺 16cm の立方体の各面に垂直な方向の磁界を測定し、立方体内の電流分布を推定する。実験に用いた励磁コイルは内半径 2cm, 外半径 10cm のドーナツ状であり、正弦波 100 KHz, 0.1A の電流を通電した。立方体各面へ垂直な磁界の測定点数は縦・横方向共に 8 点

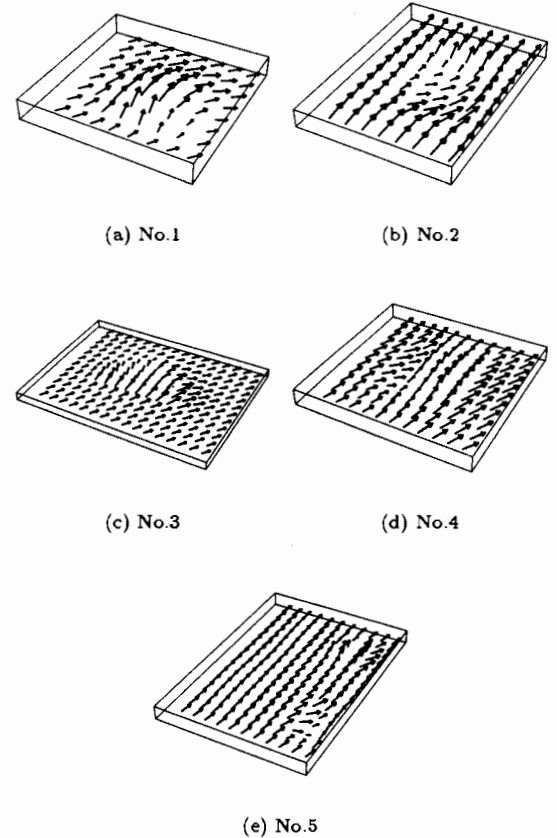


図 3 局所的に測定された 3 次元磁界分布  
Fig. 3. Locally measured 3D magnetic fields.

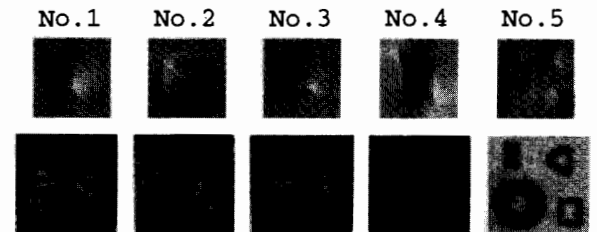


図 4 再現された画像 (上段) と 認識された供試コイル (下段)  
Fig. 4. Upper: Recoverd images, Lower: Identified coils.

とした。従って、全体の磁界測定点数は  $6 \times 8 \times 8 = 384$  点である。図 1 に推定された電流分布の例を示す。尚、計算は直接逆行列法を採用した。磁界の測定面に平行な面上の 2 次元電流を 6 面について計算し、それらを組み合わせて準 3 次元電流を推定した。また、電流の主要部分を抽出するため、予めシミュレーションで決定した閾値を用いて閾値演算を行った<sup>(3)</sup>。

### 2.3 磁界分布の固有パターン

磁界はベクトル量であるから、互いに直交する  $x, y, z$  成分で表される。磁界を可視化するため、磁界の  $x, y, z$  方向成分をそれぞれ光の 3 原色、赤 (以下、 $R$  と略記)、緑 (以

下,  $G$  と略記), 青 (以下,  $B$  と略記) に対応させて図 2 へ示すように可視化する。図 3 にサーチコイルを用いて測定された磁界分布を示す。図 4 上段は磁界を可視化した画像例を示す。

このようにして可視化された磁界は既にベクトル量ではないため, カラー画像として取り扱いが可能となる。カラー画像は, カラー画像を構成する RGB 情報を抽出することが可能であり, このカラー画像の RGB 情報が構成するパターンを画像の固有パターンと呼ぶ。予め既知の画像情報が与えられていれば, 画像の固有パターンを用いて低解像度画像から高解像度画像の再構成や認識が可能である<sup>(4)</sup>。

従って, 可視化された磁界の画像から磁界の固有パターンが抽出でき, 局所的な磁界から全体の磁界分布の再構成や励磁コイルの形状が認識可能である。

具体的な例として, 図 3 に示す磁界分布から励磁コイルの形状を認識する問題を考える。図 3 に示す磁界分布から図 4 に示すような可視化画像を生成し, 最小自乗法を用いて図 4 の上段に示す高解像度の磁界画像が再構成される。また, 図 4 の下段に示すように回路構成を認識できる。この手法は, 回路構成を認識するよりも, むしろ, 磁界の固有パターンから電気・電子機器内の電気・電子回路の健全性を評価する非破壊検査に有用である。

#### 2.4 画像の支配方程式

画像データは, 数値をマトリックス状に配置した画素 (pixel) と呼ばれるもので構成されている。通常のディスプレイの場合, 縦方向, 横方向の画素間の距離は等しい。カラー画像の RGB 各成分において,  $i$  行  $j$  列目の画素の値を  $U_{i,j}$  とすれば, 画像のラプラシアンは, (1) 式の有限差分で近似的に与えられる<sup>(5)</sup>。実際に (1) 式の有限差分を実行する場合, 画像の周囲に境界条件を設定しなければならない。本稿では, 画像の周囲へゼロ要素を追加した画素値  $U = 0$  の固定境界条件を採用した。

$$\begin{aligned} \nabla^2 U \simeq \frac{1}{6} [ & U_{i-1,j-1} + 4U_{i-1,j} + U_{i-1,j+1} \\ & + 4U_{i,j-1} + 4U_{i,j+1} + U_{i+1,j-1} \\ & + 4U_{i+1,j} + U_{i+1,j+1} - 20U_{i,j} ] \dots \dots (1) \end{aligned}$$

カラー画像を構成する RGB 各成分に (1) 式を適用する<sup>(6)</sup>。これは, 各カラー画像の画素値をスカラーポテンシャル  $U$  とみなせば, RGB 各成分のフィールドソースを計算することを意味している。以上のことから画像の支配方程式は (2) 式のポアソン型方程式となる。

$$-\nabla^2 U_p = \sigma_p, \quad p = R, G, B \dots \dots \dots (2)$$

画像は, (2) 式のポアソン方程式を満足する。画像データが低解像度であっても画像の支配方程式を解くことで高解像度画像を生成することが可能である。厳密に言えば, ポテンシャル分布が低解像度で与えられても, そのラプラシアン演算で得られたフィールドソースに対し細かいメッシュシステムを用いて支配方程式を解くことで高解像度のポテ

DC DC Converter

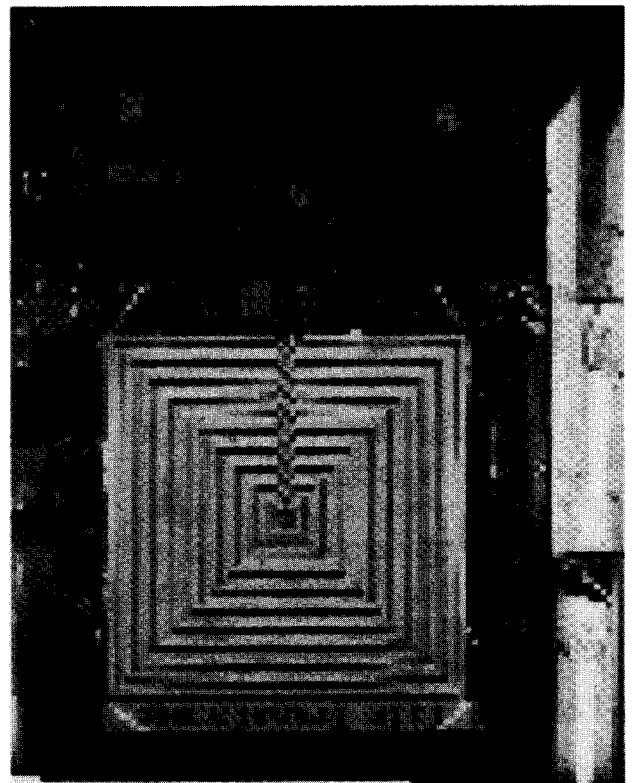


図 5 フィルムトランスを用いた DC/DC コンバータ

Fig. 5. DC/DC converter using film transformer.

Measured 32by32

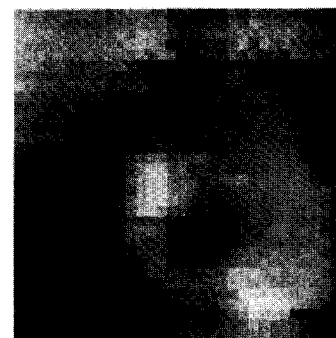


図 6 DC/DC コンバータ上の磁界分布 (解像度:32 × 32)

Fig. 6. Visualized magnetic field image over the DC/DC converter having 32 by 32 resolution.

ンシャル分布を得ることが可能である。これは, 単なる線形補間ではなく, 画素間を双曲線関数で補間することを意味する。

検証実験として, スイッチング動作中のフィルムトランスを用いた DC/DC コンバータ<sup>(7)</sup> 直上の磁界を  $x, y, z$  各方向についてソレノイド型サーチコイルで測定した。測定

From 16 by 16 From 8 by 8 From 4 by 4

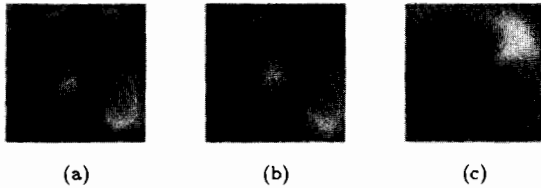


図7 低解像度の磁界分布から高解像度の磁界分布の再構成, 解像度:(a)16×16から32×32 (b)8×8から32×32(c)4×4から32×32

Fig. 7. Recovered magnetic field images; from (a)16 by 16, (b)8 by 8, and (c) 4 by 4 to 32 by 32 resolutions.

対象としたDC/DCコンバータを図5に示す。また、磁界画像を図6に示す。測定点数を32×32点とした。従って、図6は32×32画素の解像度を持つ画像となる。画像が低解像度であっても、画像の支配方程式を用いて、画素間を双曲線関数で補間した高解像度画像が生成することができる。測定した磁界分布データを一定間隔で間引きすることで低解像度測定データを生成する。図6の32×32画素のカラー画像をそれぞれ16×16、8×8、4×4画素に間引きして低解像度画像を作成した。それぞれの低解像度画像に対し、(1)式のラプラシアン演算を用いてフィールドソースを求めた。さらに、所望の画素数と等しい節点数のメッシュシステムで画像の支配方程式(2)式を解き、磁界分布を再構成した。低解像度画像からそれぞれ32×32の解像度を持つ画像を再構成した結果を図7に示す。図6に示した画像と図7で得られた画像データ間の相関係数は、間引き画像の画素数が16×16、8×8さらに4×4に対してそれぞれ、0.91、0.80、0.50となった。よって、6.25%のデータ量で0.8の相関係数を持つ磁界分布を再構成することができた<sup>(5)</sup>。

### 3. まとめ

本稿では現代・近未来電磁機器解説手法に関する概要を述べた後、現代と近未来を繋ぐ新しい電磁機器解析の一手法として、電磁界の可視化技法とその応用について要約し、その考え方を解説した。具体的例題として、電磁機器の周辺磁界から電流分布の可視化、そして、磁界ベクトルをカラー画像として可視化する手法を述べ、その結果、画像認識の技法が電気・電子機器の設計や非破壊検査へ有用であることを述べた。さらに、画像の支配方程式を導き、この支配方程式から任意の解像度を持つ画像が再構成可能であることも述べた。

(平成12年7月10日受付)

### 文 献

- (1) 増田, 緑川, 斎藤, 遠矢: "電子回路基板中の電流分布推定に関する研究," 電学論A, Vol.119-A, No.7, pp.997-1004 (1999).
- (2) 関島, 早野, 斎藤, 園井, 澤田, 堀井: "一般化SPM法による二次元電流分布推定," 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-151,

(1999).

- (3) 宮原, 早野, 斎藤: "準3次元電流分布測定法とその応用," 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-153, (1999).
- (4) 若林, 早野, 斎藤, 園井, 佐久間, 堀井: "画像の固有パターンと磁界分布解析への応用," 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-142(1999).
- (5) 遠藤, 早野, 斎藤, 園井, 佐久間, 堀井: "電磁界分布解析への画像処理的方法," 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-141 (1999).
- (6) 赤坂 隆: "数値計算," コロナ社, (1968).
- (7) T.Ogawa, H.Saotome, S.Hayano and Y.Saito: "Realization of a coreless transformer and its application to a DC/DC converter," Elektrotechn.CAS, 44, No.7, pp.238-241 (1993).

齋藤 兆古 (正員) 1946年7月24日生。1975年3月法政大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手, 1976年同講師, 1978年同助教授, 1987年同教授, 現在に至る。主として, 計算電磁力学に関する研究に従事。工学博士。日本AEM学会著作賞受賞 (*Mathematica*によるウェーブレット変換, 朝倉書店)。International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Editorial Board. IEEE, 電子情報通信学会, 応用磁気学会, 日本生体磁気学会, 日本AEM学会, Electromagnetics Academy (MIT) 会員。



早野 誠治 (正員) 1947年7月6日生。1977年3月法政大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学助手, 1993年同専任講師, 1996年同助教授, 現在に至る。主として, 計算電磁力学, 磁気工学に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 応用磁気学会, 日本生体磁気学会, 日本AEM学会会員。

