

可視化画像による電磁界解析手法

Methodologies for Electromagnetic Field Analysis Using Visualized Field Images

遠藤 久・齋藤兆古 法政大学
H. Endo, Y. Saito, Hosei University

Image-based approaches for electromagnetic field analysis are introduced. Monochrome and color digital images visualize the scalar and vector potential distributions in the electromagnetic field, respectively. Two types of image equations express the visualized fields: Poisson and Helmholtz types of equations are considered as the governing equations of static and dynamic fields, respectively. The present article gives applications of the approaches in analyzing magnetic fields imaged by the sensor coils and scanning electron microscope. Finally, a methodology for image recognition demonstrates how magnetic field source elements can be identified.

Key words: digital image analysis, image Poisson equations, image Helmholtz equations, image recognition

1. はじめに

電磁界の可視化技術は、有限要素法に代表される数値計算結果の表示（ポストプロセス）技術として電気機器設計、環境電磁工学、さらには教育などの分野で重要な役割を担ってきた¹⁾。近年の計算機ハードウェアの発展は目覚しく、膨大なメモリ容量とCPUリソースを必要とする3次元ベクトル場解析は、もはや個人レベル、すなわちパーソナルコンピュータ(PC)で実行可能であり、汎用ソフトウェアパッケージにおいては、洗練されたポストプロセスツールによって解析結果が巧緻に表示されるまでになった^{2), 3)}。

一方で、われわれの周囲には多くの撮影機器が存在する。X線、MRI (magnetic resonance imaging) などの方法を用いたプロ仕様からCCD (charge-coupled device) などの比較的安価で汎用的なものまで多種多様であり、カバーする波長領域に応じてさまざまな物理現象の映像化が可能である⁴⁾。撮影機器からPCへ画像データを取り込み、映像化された物理現象に対して画像処理を施すことは、現象を把握する上でわれわれにとって大きな支援となっていることは言うまでもない⁵⁾。筆者らが意図する可視化技術の究極は、強力な計算機と撮影機器を前提に、映像化されたデータから規則性などの知的情報を抽出する方法論を提供することにある。

撮影機器によって映像化された画像、いわゆる可視化画

像は、静的、動的など多様な形態で表示される。これらに対して統一した考え方を導入するために筆者らは、古典物理学の集大成である場の理論を応用した画像のモデリングに関して研究を進めてきた。その基本的着想は、画像を構成する画素データを離散化されたスカラーポテンシャルあるいは、ベクトルポテンシャルとみなし、画像にベクトルの概念を導入することであり、画像データに勾配演算 (gradient)、発散演算 (divergence)、回転演算 (rotation) などの各種ベクトル演算子を適用することである⁶⁾。これは、ベクトル解析や微積分学に基づき可視化画像の解析が可能であることを意味している。画像処理の分野において、空間に関する2階の微分演算子であるラプラシアンは、画像内に存在するターゲットのエッジ抽出法として最もポピュラーに使われているが、同時にポアソン型偏微分方程式を適用できることを意味する。また、そのポアソン型方程式を解くことができれば、2階偏微分データから原画像を再構成可能であり、ポアソン型偏微分方程式は静的画像の支配方程式となる。さらに、ラプラシアン項と時間微分項の両方を考慮したヘルムホルツ型偏微分方程式を考えれば、動的画像の支配方程式としてアニメーション画像を解析することも可能である⁷⁾。

本稿では、可視化電磁界の具体的例題を通して、場の理論の根幹をなすベクトル微積分を可視化画像へ適用する方法を述べた後、可視化磁界画像を用いた電磁素子識別などの応用例を紹介する。対象とする画像として、2種類の可視化磁界画像を取り扱う。一方は、サーチコイル法で測定した磁界ベクトルの x, y, z 方向各成分値をカラー画像の構成要素である画素 (pixel) の赤、緑、青 (以下それぞれR, G, Bと略記) の各成分値に対応させ、ベクトルフィールドを可視化した画像⁶⁾。他方は、走査型電子顕微鏡 (以降SEMと略記) による方向性電磁鋼板の動的磁区のモノクロアニメーション画像である⁸⁾。

2. 静的画像の支配方程式と高解像度画像生成

2.1 モノクロ画像とカラー画像

筆者らが提案している画像のモデリングは、モノクロ画像の場合は、スカラーポテンシャルフィールド、カラー画像の場合は、光の3原色であるRGB3成分に分解できるから、ベクトルポテンシャルフィールドとみなすことであ

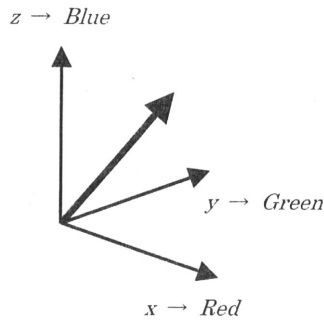


Fig. 1 Visualization of the vector field by color pixels.

る。RGB成分は完全に独立でなく、波長が重なる成分もあるが、現実的には独立した色成分とみなすことができる⁹⁾。本稿においてカラー画像は、3個の独立したスカラーポテンシャルフィールドとして扱う¹⁰⁾。

2.2. カラー画像による電磁界の画像化

カラー画像が、RGB3成分に分解されるのに対し、電磁界などのベクトルフィールドも、直交座標系の x, y, z 方向成分に分解することができる。電磁界のベクトルフィールドを画像化する方法として、Fig. 1に示すようにベクトルの各方向成分値をカラー画素のRGBそれぞれの成分値に対応させる方法を採用する。Fig. 2(著者紹介後に掲載)は、サーチコイルを用いて測定したフィルム状変圧器直上の磁界分布をカラー画像によって画像化した具体例である¹¹⁾。Fig. 2(c)~(e)は、それぞれ磁界ベクトルの x, y, z 方向各成分の分布であり、5 mm 間隔、 x, y 方向にそれぞれ32点の測定点をもつ。したがって、Fig. 2(b)の画素数は、 $32 \times 32 = 1024$ である。

2.3. 画像のポアソン方程式

スカラーフィールドに対して、勾配演算、発散演算を施すとラプラシアンが導かれ、フィールド源密度であるソースデンシティーが得られる。画像データは、数値をマトリックス状に配置したものとみなして扱われる。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く単位長とみなせる。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、対象画像周辺の画素のみで比較的良好な精度を有する(1)式の9点差分公式より近似的に与えられる。

$$\begin{aligned} \nabla^2 U &= \frac{\partial^2 U_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{i,j}}{\partial y^2} \\ &\approx \frac{1}{6} [U_{i+1,j+1} + U_{i+1,j-1} + U_{i-1,j+1} + U_{i-1,j-1} \\ &\quad + 4(U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}) - 20U_{i,j}] \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 3は、Fig. 2のRGB各成分に対して独立に(1)式を実行した結果である。境界条件は、後述するように画像の外周にゼロ要素を追加し、画素値 $U=0$ のディリクレ型境界条件とした⁶⁾。(1)式のラプラシアンは、画像データの定数

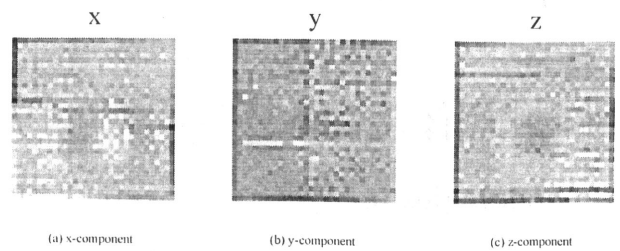


Fig. 3 Image source densities of Fig. 2(b)

項と空間の1次関数項を削除し、ソースデンシティー σ を導く。すなわち(2)式のポアソン型偏微分方程式を得る。

$$\nabla^2 U_{\text{color}} = -\sigma_{\text{color}}, \quad \text{color} = R, G, B, \quad (2)$$

ここでcolorは、色成分を表す。有限要素、有限差分などの数値解法で(2)式を解くことで画素値 U が厳密に再現されるとすれば、原画像の情報を全く失うことなく画像の圧縮が可能である。

2.4. 画像の再現と高解像度画像生成

実際に(1)式を $U_{i,j}$ について整理した連立方程式を解くことで画像が再現されるが、このときソースデンシティーの周囲に境界条件を設定しなければならない。画像の外周、すなわち境界の値を固定とするディリクレ型境界条件と境界の法線方向への変化率をゼロとするノイマン型境界条件である。すべての境界をノイマン型にすると連立方程式は不適切になり、解は一意的に決まらない。本例の場合、解である画像が与えられているため、境界条件は自由に設定することができる。ソースデンシティーを得るときも画像を再現するときも解が一意的に求まるようにディリクレ型境界条件をとればよい。

Fig. 4(著者紹介後に掲載)は、ソースデンシティーを用いて(2)式を解き、画像を再現した結果である。Fig. 4(a)は、画素数 32×32 のソースデンシティーから同じ画素数のカラー画像を再現したものであり、同図と原画像であるFig. 2(b)とは丸め誤差の範囲で同一であった。また、(2)式の微分方程式が成り立つならば、画像が低解像度で与えられても、画像のラプラシアンで得られたソースデンシティーに対して細かいメッシュシステムを用いて(2)式を解くことで高解像度画像を得ることが可能である。Fig. 4(b)~(d)は、ソースデンシティーの画素数に対して高解像度のメッシュシステムで画像を生成した結果である。ここで、Fig. 4(b), (c)は、一定間隔で画素を間引きしたFig. 2(b)に対して(1)式のラプラシアンを実行し、Fig. 2(b)と同画素数で画像を再現した結果である。Fig. 2(b)とFig. 4(b), (c)との相関係数はそれぞれ0.91, 0.81となり、6.25%のデータ量で0.8以上の相関をもつ磁界分布が推定される結果となった。Fig. 5は、本例において間引き画像からの再現性を相関係数でまとめたものである。

このような磁界分布の推定は、測定で得られる磁界データからフィールド源である電流を推定し、推定された電流分布から磁界分布を求めるいわゆる逆問題的手段が必要と

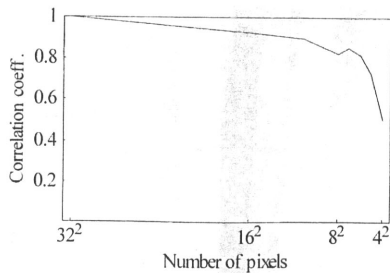


Fig. 5 Relation between the correlation coefficients and the resolution of the visualized magnetic field.

なるが、場の理論に基づく画像処理法は、ポアソン型方程式を解くという順問題的手法で磁界分布推定を可能とする¹²⁾。

3. 動的画像の支配方程式と磁区挙動解析

3.1 動的磁区の SEM 画像

Fig. 6 は、方向性電磁鋼板の SEM 画像である。使用した電磁鋼板は、板厚 0.23 mm の新日鐵(株)製方向性電磁鋼板 (オリエントコア・ハイビー) であり、加速電圧 160 kV の SEM 内で磁化容易軸 (紙面縦) 方向へ外部磁界を印加しながら観察した^{13), 14)}。外部磁界を印加したことによって磁束密度を表現する磁区パターンが変化し、電磁鋼板の磁化状態が可視化されている。一連の SEM 画像は、印加磁界に対して動的である。したがって、動的画像の支配方程式である画像のヘルムホルツ方程式を適用することができる。

3.2 画像のヘルムホルツ方程式

電磁界や量子力学におけるシュレディンガー方程式のように、多くのダイナミクスはヘルムホルツ型偏微分方程式で記述される。動的画像いわゆるアニメーションは、フレームと呼ばれる静的画像を複数枚切り替えることで得られる。1 フレームの画像 U は、前述のとおりポアソン型方程式で記述されるから、動的画像は、時間微分項を考慮したヘルムホルツ型方程式で記述できる。磁区動画像の場合、磁区パターンが外部磁界 H で変化するから、(3) 式が成立すると仮定する。

$$\nabla^2 U + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial H} = -\sigma \quad (3)$$

(3) 式で、左辺第 1 項は 1 枚の SEM 画像における空間の広がりを表す。第 2 項は外部磁界に関する偏微分演算を行うため、SEM 画像の遷移情報を与える。係数 ε は磁区・磁壁移動速度に関するパラメータとなるが、未知であることに注意していただきたい。

3.3 画像のヘルムホルツ方程式の解

画素を節点として有限要素または有限差分などで離散化した (3) 式について、モーダルアナリシス法で解くことを考える¹⁵⁾。磁区動画像の初期フレームと最終フレームをそ

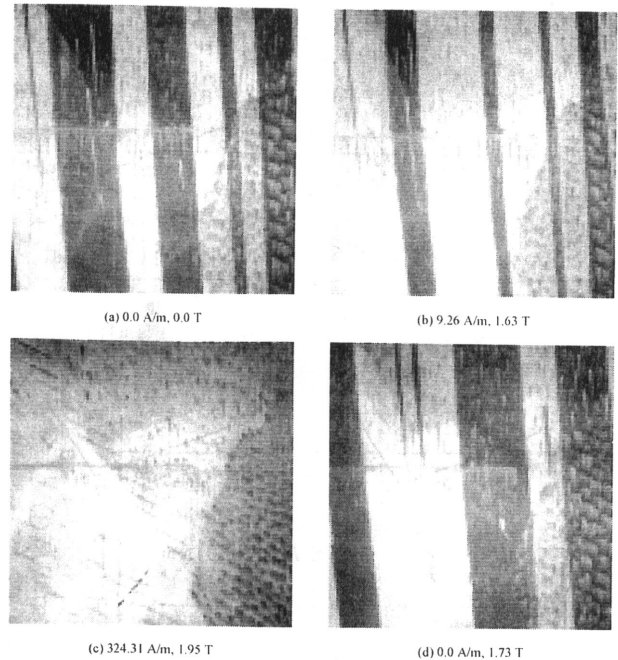


Fig. 6 SEM images of a grain-oriented electrical steel (ORIENTCORE HI-B, Nippon Steel) 100×100 pixels, 0.1 mm/pixel.

れぞれ U_{Start} , U_{Final} とすると、任意の印加磁界 H における磁区画像 U_H は、(4) 式で与えられる。

$$U_H = \exp(-\Lambda H)(U_{\text{Start}} - U_{\text{Final}}) + U_{\text{Final}} \quad (4)$$

ここで、 $\exp(-\Lambda H)$ は対角化された状態遷移行列である⁷⁾。(4) 式は、 $H=0$ で初期フレーム U_{Start} 、 $H \rightarrow \infty$ で最終フレーム U_{Final} となる。しかしながら、(3) 式におけるパラメータ ε が未知であるため、行列 Λ も未知である。そのため、与えられた動的画像のフレームから行列 Λ の要素を決定しなければならない。

3.4 行列 Λ の決定法

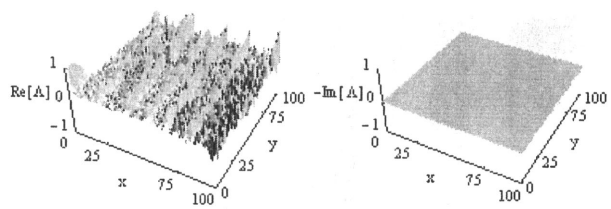
磁区画像 U_H を初期フレームと最終フレーム間に存在する動的画像の 1 フレームとみなすと、(4) 式を変形し、行列 Λ の要素を (5) 式で決定することができる。

$$\Lambda = -\frac{1}{H} \ln \left(\frac{U_H - U_{\text{Final}}}{U_{\text{Start}} - U_{\text{Final}}} \right) \quad (5)$$

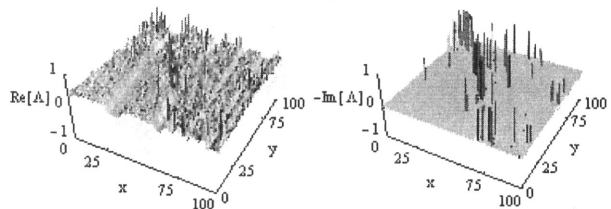
ここで、行列 Λ は対角行列であるから、(4) 式はすべての画素について独立に計算される。磁区動画像の行列 Λ は、連続する 3 フレームの異なる磁化状態の SEM 画像を用いて、各磁化区間の行列 Λ_i , $i=1, 2, \dots, n-2$ で表現される。

$$\Lambda_i = -\frac{1}{H_{i+1} - H_i} \ln \left(\frac{U_{i+1} - U_{i+2}}{U_i - U_{i+2}} \right), \quad i=1, 2, \dots, n-2 \quad (6)$$

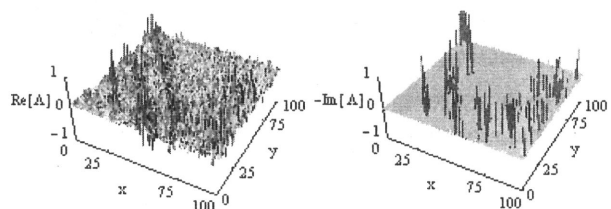
ここで、下添え字 i は、フレーム番号であり、 n は動的画像を構成しているフレームの枚数である。また、 U_i , U_{i+1} , U_{i+2} はそれぞれ (4) 式における U_{Start} , U_H , U_{Final} に対応する。よって、(6) 式を (4) 式に代入することで任意の磁化状態における磁区画像が生成可能である。逆に、(6) 式で決定



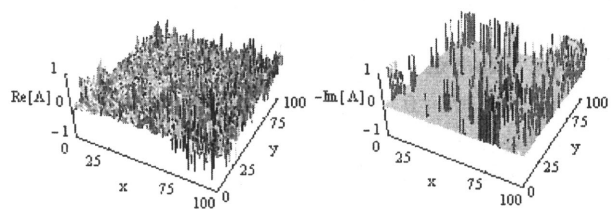
(a) Λ_1 : $0 \leq H < 2.85$ A/m



(b) Λ_2 : $2.85 \leq H < 9.26$ A/m



(c) Λ_3 : $24.16 \leq H < 30.23$ A/m



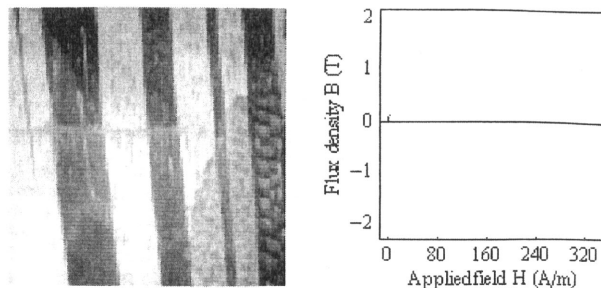
(d) Λ_6 : $160.69 \leq H < 236.32$ A/m

Fig. 7 Elements in matrix Λ . The left and right columns show the real and imaginary parts of Λ , respectively.

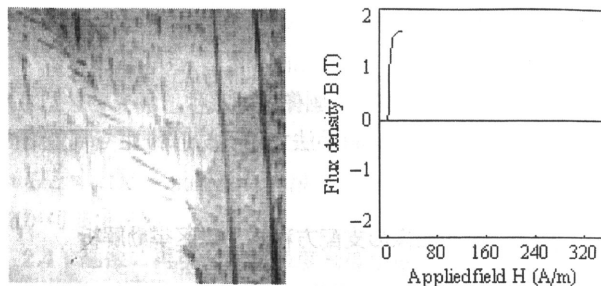
した行列 Λ を用いた解は、印加磁界 $H=H_{i+1}$ で必ず U_{i+1} を与える拘束条件となる。行列 Λ は、対角行列であるから磁区挙動を特徴づける等価的な固有値と考えられ、各画素で等価的な伝達関数の極推移を可視化することが可能である¹⁶⁾。

3.5 局所鉄損の可視化

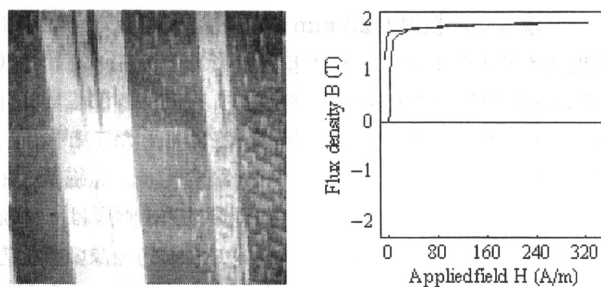
Fig. 7 は、(6) 式から求めた各区間における行列 Λ の実部 (左列) と虚部 (右列) を Fig. 6 の画素配置に対応させて図示したものである。ここで行列 Λ の実部と虚部の物理的意味を考えると、あらゆる動的系の状態方程式と同様に、行列 Λ の実部と虚部は、遷移変数である印加磁界 H に対して同位相成分と 90 度位相が異なる成分に対応するパラメータとなる。ゆえに、虚部に非ゼロの値が現れる部分では印加磁界 H に対して磁区・磁壁移動の遅れあるい



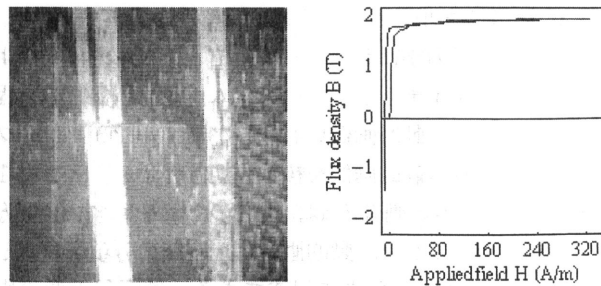
(a) 2.85 A/m, 0.10 T



(b) 24.16 A/m, 1.73 T



(c) -4.60 A/m, 1.22 T



(d) -7.45 A/m, -1.43 T

Fig. 8 Generated domain images and magnetization curves (100×100 pixels, 0.1 mm/pixel).

は進みが生じていると考えられる。換言すれば、鉄損発生部が可視化されているものと考えられる¹⁷⁾。

3.6 磁区動画生成

(6) 式によって求めた各区間の行列 Λ を (4) 式に代入し、任意の印加磁界 H 時の磁区画像を動画のフレームとして生成する。また、画像の濃淡の平均値から鋼板全体としての磁化曲線を計算する。Fig. 8 は、(4) 式により生成した磁区画像 (左列) と画像の濃淡の平均値から計算した磁化曲線 (右列) である。また、Fig. 9 は、実験と計算それぞれ

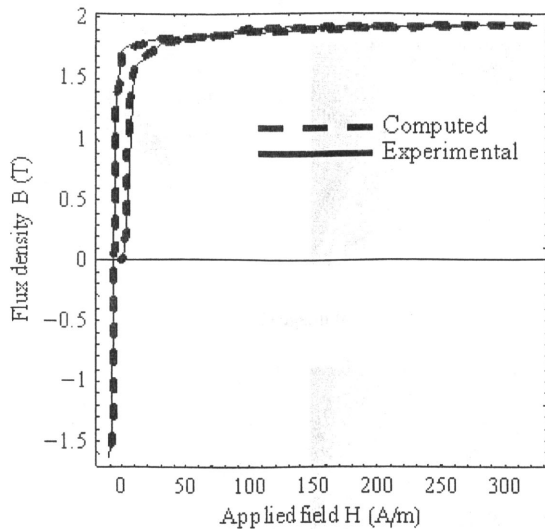


Fig. 9 Calculated magnetization curve compared with experimental results.

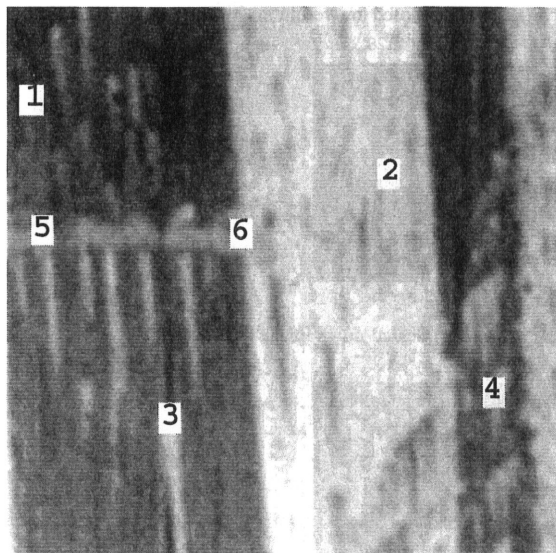


Fig. 10 Selected pixel positions for drawing microscopic magnetization curves. The background domain image is the same as in Fig. 1(a). Positions 1 and 2 are in the 180° domains. Positions 3 and 4 are in the lancet domains. Positions 5 and 6 are in the strained areas.

で得られた磁化曲線を示す。結果として複数枚の異なる磁化状態の磁区画像から任意の磁化状態の磁区画像が生成可能であることがわかる。

3.7 局所的磁化曲線

Fig. 6 に示した磁区画像を構成する任意の 1 画素について注目すれば、局所的な磁化曲線が生成可能である⁸⁾。Fig. 10 で番号づけされている個所の磁化曲線を Fig. 11~13 に示す。また、Fig. 10 は、Fig. 6(a) の画像の一部を 10 倍に拡大したものである。Fig. 10 において、番号 1, 2 は、純粋な 180° 磁区部分、番号 3, 4 は、ランセット磁区部分、番号 5, 6 は、物理的な歪が存在する部分である。結晶性の

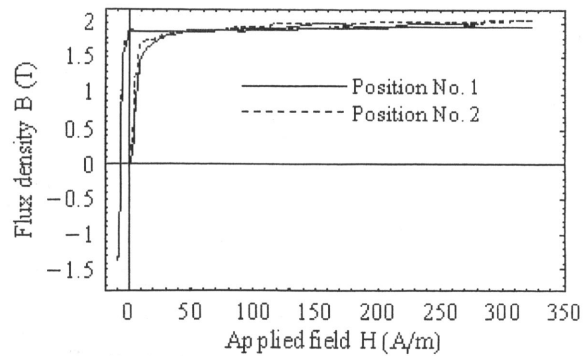


Fig. 11 Magnetization curves in the 180° domains in Fig. 10.

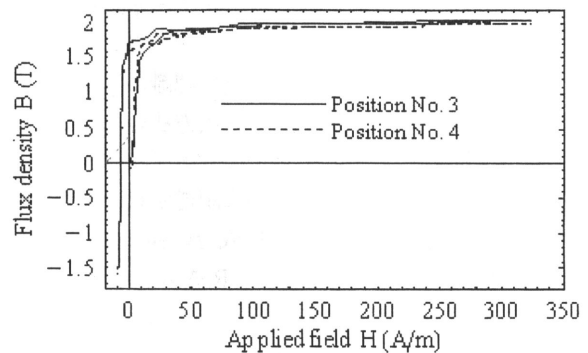


Fig. 12 Magnetization curves in the lancet domains in Fig. 10.

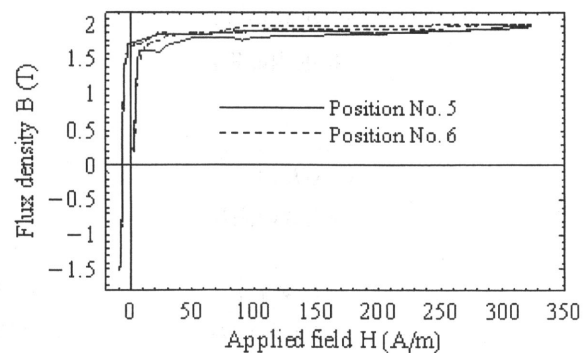


Fig. 13 Magnetization curves in the strained parts in Fig. 10.

良い部分では、残留磁束密度が高くなっていることや、ランセット磁区などの還流磁区部分では、高磁束密度領域でヒステリシスループの幅が広がっていることなど、SEM 画像を構成する画素について注目すれば、磁区の物理的な状態に依存した磁化曲線が生成可能である。逆に磁化曲線を生成すれば、ランセットや物理的歪部分が抽出されると考えられる^{7), 18)}。

4. 画像認識手法を用いた電磁素子認識

4.1 カラー画像の固有パターン

画像の固有パターン法は、可視化画像からハードウェアに依存しない普遍量抽出を目標としている¹⁹⁾。その内容は、①画像の画素数に依存しない ②画像内のターゲット

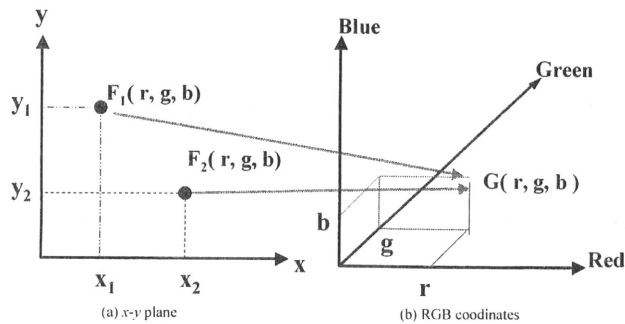


Fig. 14 Transformation x - y image into RGB coordinates.

の位置、角度に依存しない成分の抽出である。このような普遍量の抽出が可能ならば、データベースをシステム方程式化し、入力された画像に対して画像認識が可能となる。

本稿では、画像の固有パターン抽出方法の一例として、Fig. 14 に図示するように x - y 座標系から RGB 座標系へ投影したデータを考える。具体的に記述すれば、カラー画像の固有パターンは、画像中の R 成分の強度値、G 成分の強度値、B 成分の強度値で与える。R 成分分布を I_R とすると、

$$I_R \in R_k \quad k=1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

は画像の R 成分分布を意味する。R 成分分布 I_R をダイナミックレンジ D の分布に正規化した正規化 R 成分分布 I_R^D を式 (8) で定義する。Round [*] は括弧内の値を整数化する演算、Max [*] は括弧内の集合における最大値の要素を求める演算を示す。

$$I_R^D \in \text{Round} \left[D \times \frac{R_k}{\text{Max}[I_R]} \right] \quad k=1, 2, 3, \dots, D \quad (8)$$

(8) 式によって、異なる画素数の画像でも D 個の要素をもつデータに整理される。

次に、式 (8) で求められたダイナミックレンジ D の正規化 R 成分分布 I_R^D において 1 から D までの数値の出現頻度を求めヒストグラム化する。

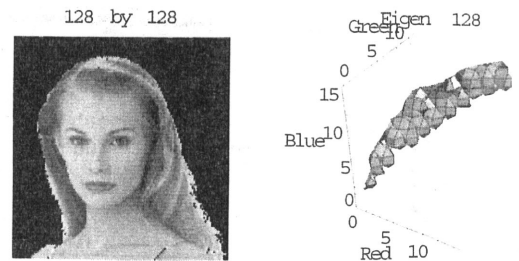
$$E_R \in \text{Count} [I_R^D, p] \quad p=1, 2, 3, \dots, D \quad (9)$$

ここで、Count[*], p] は括弧内の集合における数値 p の個数を数える演算である。これによってターゲット形状の情報は、陽的に削除され、面積割合として陰的に表現される。(9) 式で求められた E_R を R 成分固有ベクトルと言う。G 成分、B 成分についても同様にして固有ベクトルを算出する。

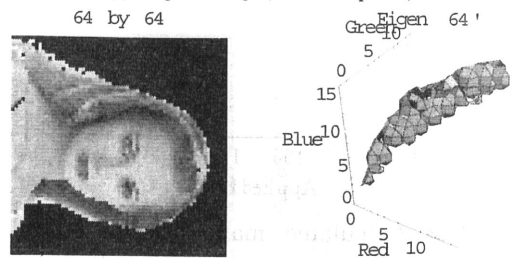
固有パターンを E とすると固有パターン E は R 成分固有パターン、G 成分固有パターン、B 成分固有パターンの固集合からなり式 (10) で与えられる。

$$E \in E_R, E_G, E_B \quad (10)$$

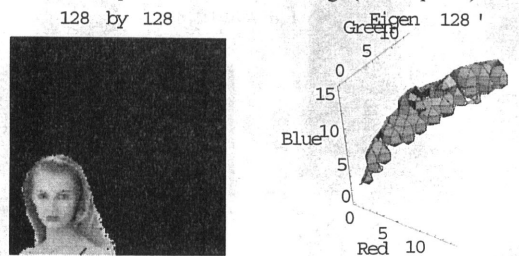
Fig. 15 に静的画像の固有パターンの例を示す。Fig. 15(a) を原画像として、Fig. 15(b)~(d) は解像度、角度、位置を変更した場合であるが、Fig. 15(a) の固有パターンと Fig. 15(b)~(d) の固有パターンの相関係数は、0.999 であった。



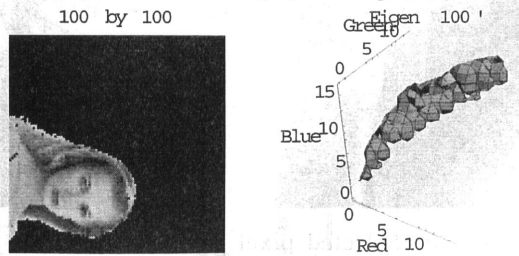
(a) Original image (128 x 128 pixels)



(b) Transposed low-resolution image (64 x 64 pixels)



(c) Scaled-down image (128 x 128 pixels)



(d) Scaled-down low-resolution image (100 x 100 pixels)

Fig. 15 Examples of eigen patterns in a color image. The left and right columns show the target images and the corresponding eigen patterns, respectively.

4.2 画像認識

電磁素子周辺の磁界をカラー画像で可視化すれば、そのまま、解像度、角度、位置に依存しにくい画像の固有パターン法を用いて電磁素子認識を行うことができる。結果として、固有パターンのデータベースで構成したシステム行列 C を入力画像の固有パターン E_x で解く (11) 式の連立方程式で画像認識が実行される。

$$E_x = CX, \quad C = [E_1, E_2, \dots, E_l] \quad (11)$$

ここで、 X は解ベクトルであり、最大値を示す要素が認識された画像に対応する²⁰⁾。データベースの個数 l とダイナ

ミックレンジ D の設定によって条件が変わるが, (11) 式のシステム行列 C は長方形列となる. これを解く方法として最小自乗法や GVSPM 法などの解法がある^{21), 22)}.

4.3 電磁素子認識

Fig. 16 (著者紹介後に掲載) は, 画像の固有パターン法を用いて, あらゆる電流経路をもつコイル素子の認識を行った結果である. データベースとなるコイル素子の磁界分布は, 100 個. (8) 式のダイナミックレンジ D は 255 と設定した. したがって, システム行列 C は, 765 行 100 列の縦長の長方形列となり, 最小自乗法を用いた. 認識結果は, (11) 式で得られる解ベクトルで最大値をとる要素である.

用いたデータベースにはあらかじめ詳細に測定した磁界分布データが記憶されている. 認識実行時に少ない測定点で画像化された磁界分布が入力されたとしても高い精度で認識することが可能である.

5. ま と め

本稿では, 可視化画像を用いた電磁界解析手法として, 画像の微分方程式法と画像認識手法を用いた電磁素子認識について記述した.

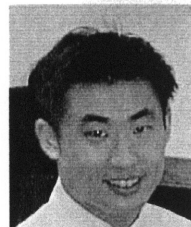
カラー画像の RGB 各成分を磁界ベクトルの x, y, z 方向各成分値に対応させ, 磁界分布を画像化した. 画像のラプシアンで得られるソースデンシティは, 画像のもつ本質的なデータの形態であり, 静的画像の支配方程式を解くことで低解像度の測定磁界分布を高解像度に精練することが可能であることを示した. また, カラー画像の固有パターン法を用いれば, 画素数, 画像内に存在するターゲットの位置や角度に依存しにくく, 画像認識に応用できることを示した. 方向性電磁鋼板の動的磁区 SEM 画像には, ヘルムホルツ型方程式を応用し, 磁区画像の生成, 磁化曲線の生成, さらに, 局所的鉄損分布の可視化について記述した.

参 考 文 献

- 1) 山下英生: 電学誌, **119**, 169 (1999).
- 2) 藤原耕二: 日本応用磁気学会誌, **25**, 133 (2001).
- 3) 藤代一成: 日本 AEM 学会誌, **6**, 225 (1998).
- 4) 齋藤兆古: 日本 AEM 学会誌, **9**, 470 (2001).
- 5) 例えば, S.-B. Choe and S.-C. Shin: *Phys. Rev.*, **62**, 8684 (2000).
- 6) 遠藤 久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰: 電学論, **120-A**, 1089 (2000).

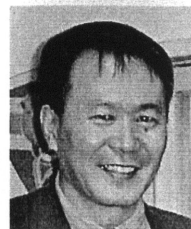
- 7) 遠藤 久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰: 電学論, **120-A**, 913 (2000).
- 8) H. Endo, S. Hayano, Y. Saito, C. Kaido, and M. Fujikura: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2727 (2001).
- 9) 新世代出版研究所編著: DTP 用語辞典 '01-'02, ビー・エヌ・エヌ刊 (2001).
- 10) I. Marinova, H. Endo, S. Hayano, and Y. Saito: *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.*, **15**, 403 (2001/2002).
- 11) T. Ogawa, H. Saotome, S. Hayano, and Y. Saito: *Elektrotechn. CAS*, **44**, 238 (1993).
- 12) 例えば, 増田則夫, 緑川洋一, 齋藤兆古, 遠矢和弘: 電学論, **119-A**, 997 (1999).
- 13) 山本孝明, 野沢忠生, 松尾征夫: 日本応用磁気学研究資料, 6-4, 1980.
- 14) A. Hubert and R. Schäfer: "Magnetic Domains," Springer, Berlin (2000).
- 15) 齋藤兆古, 中沢良浩, 早野誠治: 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-90-20, RM-90-32 (1990).
- 16) Y. Shigeta, S. Hayano, and Y. Saito: *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.*, **15**, 349 (2001/2002).
- 17) H. Endo, S. Hayano, H. Mogi, M. Fujikura, C. Kaido, and Y. Saito: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 1377 (2003).
- 18) 開道 力, 脇坂岳顕, 藤倉昌浩, 山崎二郎, 野沢忠生: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-173 (1999).
- 19) 若林健一, 早野誠治, 齋藤兆古: 電学論, **120-A**, 902 (2000).
- 20) 佐藤隆紀, 早野誠治, 齋藤兆古: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-222 (2001).
- 21) 関島大志郎, 宮原晋一郎, 早野誠治, 齋藤兆古: 電学論, **120-A**, 907-912 (2000).
- 22) 遠藤 久, 早野誠治, 齋藤兆古: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-70 (2001).

(2003 年 9 月 29 日受理)



遠藤 久 えんどう ひさし

平 13 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了, 同年 同大学院博士後期課程入学, 現在に至る.
専門 画像計算力学



齋藤兆古 さいとう よしふる

昭 50 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程終了, 同年 同大学助手, 昭 53 同助教授, 昭 62 同教授, 現在に至る.

専門 計算電磁力学 (工博)

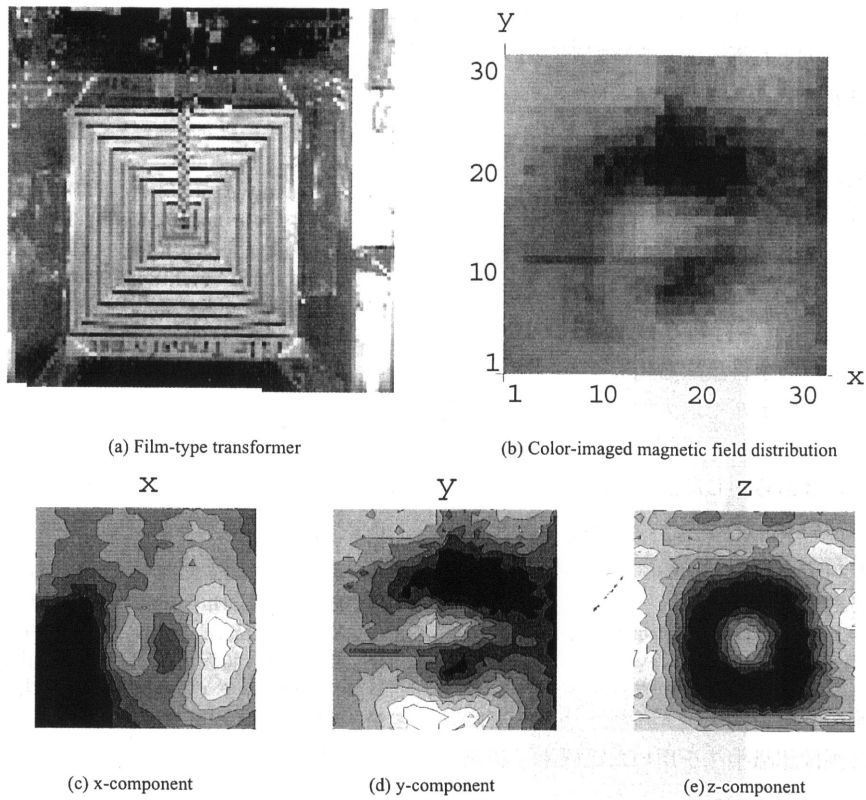


Fig. 2 Visualized magnetic field distribution on a film-type transformer.

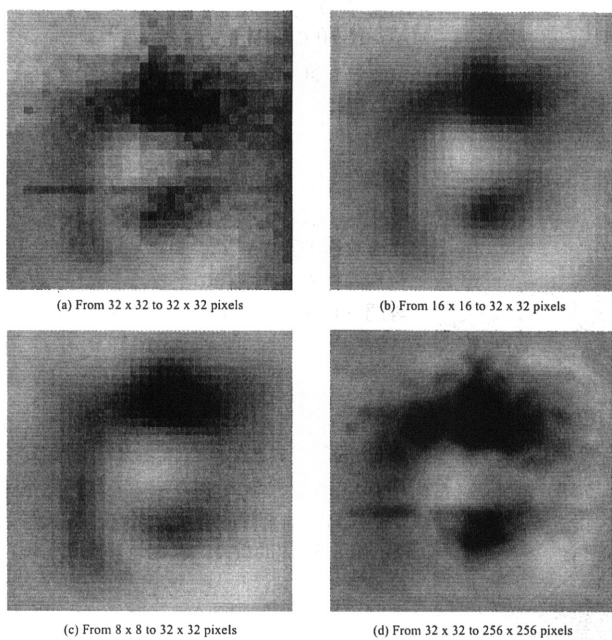


Fig. 4 Reconstruction of the magnetic field distribution from the image source densities in Fig. 3.

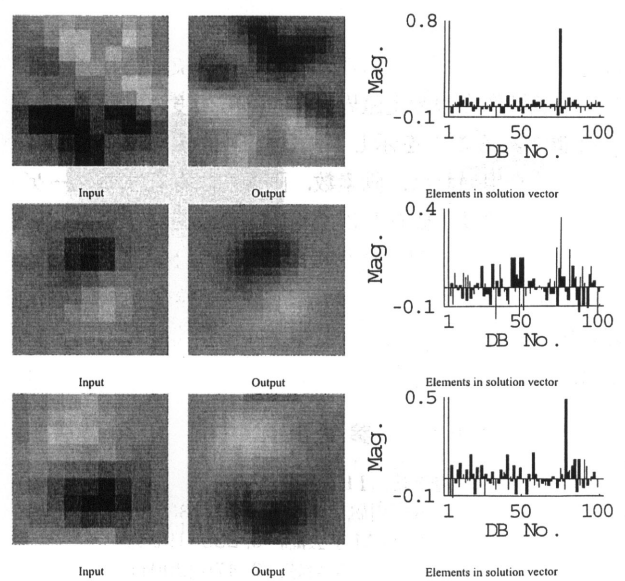


Fig. 16 Examples of image recognition for magnetic field source elements.