

社団法人 日本応用磁気学会

第129回研究会資料

主題 磁気センサ・磁気計測技術の
最新動向

会場：中央大学駿河台記念館

2003年(平成15年)3月14日

可視化画像を用いた磁化特性モデリングとそのアプローチ

Visualized Image Based Magnetization Characteristic Modeling and Its Approach

遠藤 久 茂木 尚 藤倉昌浩 開道 力 早野誠治 齋藤兆古
(法政大学) (新日鐵) (法政大学)

H. Endo H. Mogi M. Fujikura C. Kaido S. Hayano Y. Saito
(Hosei Univ.) (Nippon Steel Corp.) (Hosei Univ.)

Abstract

This article deals with an image-based approach for magnetization characteristics modeling. An innovative domain image analysis methodology based on Helmholtz equations was developed to draw the magnetization curves from visualized domain images. The image Helmholtz equation is capable of converting discretely captured domain images into continuous domain dynamics, giving the local as well as global magnetization curves as its solution. Moreover, state transition characteristics among the domain images are represented in terms of the characteristic values of image Helmholtz equation. We describe that the state transition matrix corresponds to the well-known Preisach distribution function. A set of SEM images of a grain-oriented silicon steel sheet was investigated using this method.

1. はじめに

磁性材料の磁化特性評価法には磁気センシングの面で2方法に大別できる。一方は、振動試料型磁束計(VSM)などのようにサーチコイルの誘起電圧を利用した古典的方法。他方は、光学効果などを利用して材料の磁化状態を直接観察する方法である。前者は、測定対象の形状に起因する反磁界を勘案する必要がある反面、マクロな磁化特性をB-H曲線として得ることができる。後者は、マクロなB-H曲線を得ることが困難である反面、材料のミクロな詳細情報を映像形態として得ることが可能である。事実、磁性材料の磁区観察は、磁区・磁壁挙動を把握することを可能とし、材料使用法の最適化へ繋がる重要な鍵となっている⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、磁区観察により得られた磁区画像を計算機に取り込み、デジタル画像処理手法を適用する新しい磁性物理研究手法が勃興しつつある⁽³⁾⁽⁴⁾。このような背景を鑑み、筆者らは磁区画像データからミクロのみならずマクロな磁化特性を把握する動画像処理手法に関する研究を進めている。

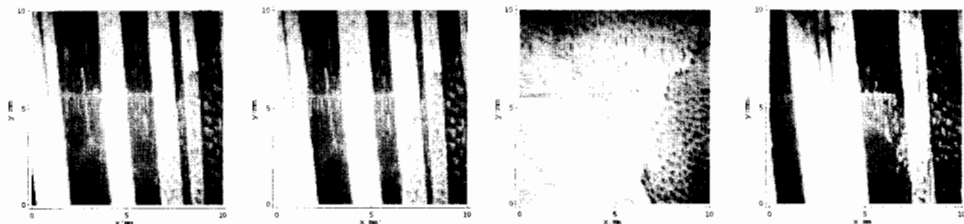
本稿では、方向性電磁鋼板磁区の走査型電子顕微鏡(SEM)画像を用いて、画像の Helmholtz 方程式法⁽⁵⁾によるB-H曲線推定法について述べる。まず、画像の Helmholtz 方程式法について述べ、次に、磁区 SEM 画像から算出された状態遷移行列の固有値を用いて方向性電磁鋼板の鉄損分布可視化をおこなひ、さらに、Preisach 型磁化特性モデルとの関係を与える⁽⁶⁾⁽⁸⁾。最後に、任意の励磁状態における磁区パターンを画像の Helmholtz 方程式の解から生成する。また、磁区 SEM 画像の濃淡の平均値を磁

束密度と対応させることで局所的な磁化曲線が計算可能であることを示す。

2. 可視化磁区画像との動画像処理

2.1. SEM による方向性電磁鋼板磁区の可視化

SEM を用いた電磁鋼板の磁区観察は、①鋼板に研磨などの特殊な加工を特に必要としない、②実用となる板厚の鋼板のまま観察できる、すなわち、実装状態と同等な鋼板の磁区構造を維持して観察可能とする、③電子線の加速電圧を変化させることで、鋼板表面のみならず内部状態もある程度可視化する、という利点がある。このため、磁区・磁壁挙動を解明する場合、SEM 画像法は有効な磁区観察の 1 手法である。Fig.1 は各磁化状態における新日鐵製方向性電磁鋼板 ORIENTCORE HI-B の SEM 画像である^{(1),(3),(8)}。使用した電磁鋼板の板厚は 0.23mm。SEM 観察条件は、加速電圧 160 kV である。Fig.1 の白色部と黒色部はそれぞれ N 極と S 極に着磁した部分に対応し、そのパターンは印加磁界 H によって変化する。よって、一連の磁化状態を時間軸と見なせば、SEM 画像法は磁区動画像を与える。



(a) $H=0.0$ A/m, $B=0.0$ T (b) $H=2.9$ A/m, $B=0.1$ T (c) $H=236.3$ A/m, $B=1.9$ T (d) $H=0.0$ A/m, $B=1.73$ T

Fig.1 Magnetic domain SEM images of ORIENTCORE HI-B produced by Nippon Steel Corporation (100 x 100 pixels, 0.1 mm/pixel).

2.2. 画像の Helmholtz 方程式法

電磁界や量子力学における Schrödinger 方程式のように、多くのダイナミックスは Helmholtz 型偏微分方程式で記述される。画像の Helmholtz 方程式法は、離散化された Helmholtz 型偏微分方程式をベースにした動画解析法である⁽⁵⁾。複数枚の静止画像（フレーム）で構成される動画像から Helmholtz 型方程式における状態遷移行列の固有値を算出し、時間軸方向に対して離散的である動画像から連続量への変換を可能とする^{(6),(8)}。

画像の Helmholtz 方程式法は、動画像、いわゆるアニメーションの 1 フレームの画像をスカラー場 U とみなすことで、動画像を(1)式の Helmholtz 型偏微分方程式で記述することから出発する。

$$\nabla^2 U + \varepsilon \frac{\partial}{\partial \alpha} U = -\sigma \quad (1)$$

(1)式で、左辺第 1 項は 1 フレームにおける空間の広がりを表す。第 2 項は遷移変数 α の偏微分演算をおこなうため、フレームの遷移情報を与える。さらに、(1)式の右辺 σ は、最終フレームに対するラプラス演算で得られる画像のソースデンシティである。本稿で取り上げる磁区動画解析における画像の Helmholtz 方程式は、磁区画像を U 、遷移変数を印加磁界 H とするため、(1)式は(2)式となる。

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

(2)式で ε は磁区・磁壁移動速度に関するパラメタとなるが、未知であることを注意していただきたい。

2.3. 画像の Helmholtz 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(2)式について、モーダルアナリシス法で解くことを考える⁽⁹⁾。磁区動画像の初期フレームと最終フレームをそれぞれ 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、(3)式で与えられる。

$$U_H = \exp(-\Lambda H)(U_{Start} - U_{Final}) + U_{Final} \quad (3)$$

ここで、 $\exp(-\Lambda H)$ は対角化された状態遷移行列である⁽⁵⁾。(3)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、(2)式におけるパラメタ ε が未知であるため、行列 Λ も未知である。そのため、与えられた動画像フレームから行列 Λ の要素を決定しなければならない。

2.4. 行列 Λ の決定法

磁区画像 U_H が初期フレームと最終フレーム間に存在する動画像の1フレームとみなすと、(3)式を変形し、行列 Λ の要素を(4)式で決定することができる。

$$\Lambda = -\frac{1}{H} \ln \left(\frac{U_H - U_{Final}}{U_{Start} - U_{Final}} \right) \quad (4)$$

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。

$$\Lambda_i = -\frac{1}{H_{i+1} - H_i} \ln \left(\frac{U_{i+1} - U_{i+2}}{U_i - U_{i+2}} \right), \quad i=1,2,\dots,n-2 \quad (5)$$

(5)式で、 n は総フレーム数、 U_i は第 i 番目の SEM 画像を表す。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、(5)式を(3)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、(5)式による解は、印加磁界 $H=H_{i+1}$ で必ず U_{i+1} を与えることを意味する。

2.5. 行列 Λ の物理的意味

Fig.2 は、(5)式から求めた各区間における行列 Λ の実部(左)と虚部(右)を Fig.1 の画素配置に対応させて図示している。Fig.2 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タとなる。ゆえに、虚部に非ゼロの値が現れる部分では磁区・磁壁移動の遅れあるい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。

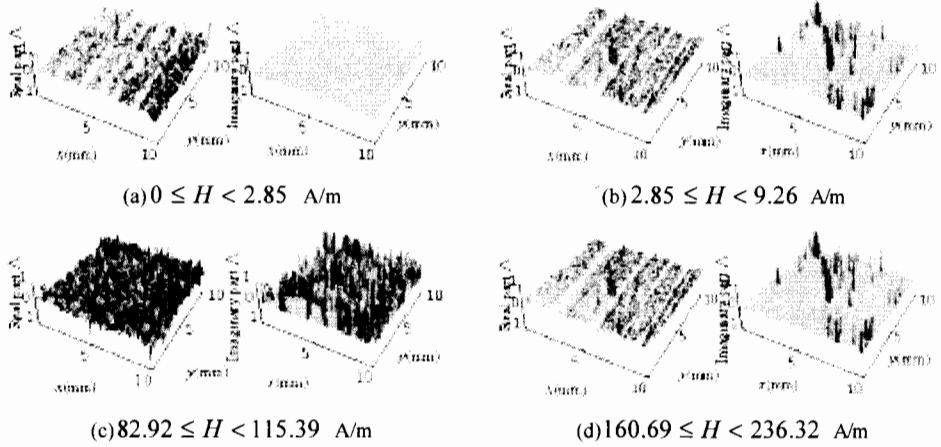


Fig.2 Real (left side) and imaginary (right side) parts of characteristic value distributions.

2.5. 行列 Λ と磁化特性モデルとの関係

行列 Λ と磁化特性モデルとの関係について考える。早野らによって提案された動的磁化特性モデルである Chua 型モデルの構成方程式は(6)式で与えられる^{(10),(11)}。

$$\frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \frac{dB}{dt} = H + \frac{\mu_r}{s} \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

ここで、 s 、 μ 、 μ_r はそれぞれヒステリシス係数(Ω/m)、理想磁化曲線から得られる透磁率、可逆透磁率である。また、ヒステリシス係数 s と Preisach の分布関数 Ψ との関係は(7)式で与えられる⁽¹²⁾。

$$s = \Psi \frac{dH}{dt} \quad (7)$$

(6)式を(7)式に代入し、 μ_r/Ψ を保持力 H_c とすると(8)式を得る。

$$\frac{1}{\mu} B + \frac{1}{\Psi} \frac{dt}{dH} \frac{dB}{dt} = H + \frac{\mu_r}{\Psi} \frac{dt}{dH} \frac{dH}{dt}, \quad B + \frac{\mu}{\Psi} \frac{\partial B}{\partial H} = \mu(H - H_c) \quad (8)$$

(8)式の左辺第1項が材料全体の磁束密度をあらわすとすれば、(2)式におけるパラメタ ε は、Preisach 分布関数の逆数に関係することがわかる。すなわち、(5)式で求められる行列 Λ の各磁化区間で理想磁化曲線による透磁率 μ が一定値で近似可能ならば、磁区画像から Preisach の分布関数を求めることが可能であることを意味する。Preisach の分布関数 Ψ は、磁気履歴を含む透磁率の磁界に対する変化率であるから、複素透磁率で考えれば⁽¹³⁾、行列 Λ の実部は、実部の複素透磁率の逆数に対応し、虚部は、損失に関する虚部の複素透磁率の逆数に対応する。

3. 磁区動画生成と磁化曲線

3.1. 磁区動画生成と全体的磁化曲線

(5)式によって求めた各区間の行列 Λ を(3)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。さらに、生成された各フレーム画像の濃淡の平均値から鋼板全体としての

磁束密度を計算する。Fig.3 は、(3)式により生成した磁区画像(右)と画像の濃淡の平均値から計算した磁化曲線(左)である。また、Fig.4 は、実験と計算それぞれ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。

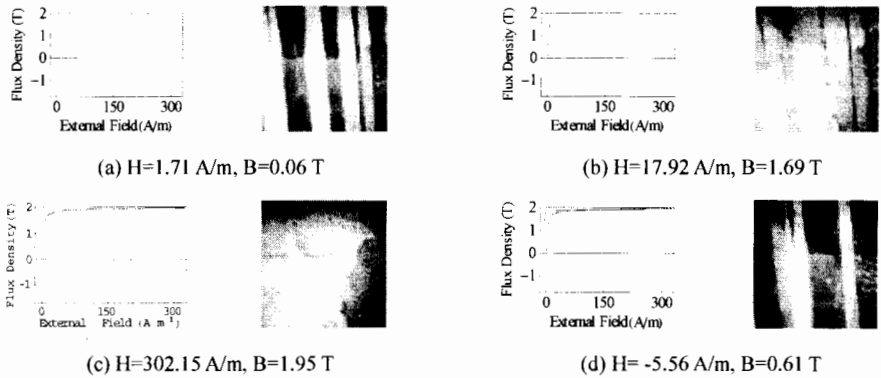


Fig.3 Generated domain images and magnetization curves (100 x 100 pixels, 0.1 mm/pixel).

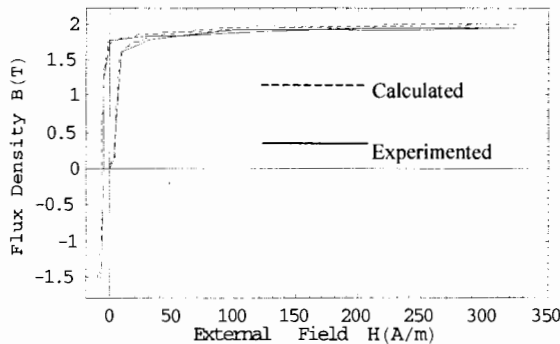


Fig.4 Calculated magnetization curve compared with experimental results.

3.2. 局所的磁化曲線

Fig.1 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。Fig.5 で番号づけされている個所の磁化曲線を Figs.6~8 に示す。また、Fig.5 は、Fig.1 (a)の画像の一部を10倍に拡大したものである。Fig.5において、番号1,2 は、純粋な180度磁区部分、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。

まず、残留磁束密度について注目すると、純粋な180度磁区部分(Fig.6)の残留磁束密度は、ランセット磁区部分(Fig.7)と物理的な歪が存在する部分(Fig.8)の残留磁束密度に比べて高くなっている。しかしながら、純粋な180度磁区部分では、残留磁束密度付近でのヒステリシスループ幅が広がっていることがわかる。これは、180度磁区付近では高い静磁エネルギーを保持するために磁区が動きにくくなる

ていることに起因していると考えられる。次に、ランセット磁区部分について注目すると、ランセット磁区の発生活滅が頻繁となる非可逆的磁壁移動から回転磁化領域へ遷移する部分で不連続な磁化曲線が生成されている。最後に、Fig.8 は、電磁鋼板に対する物理的な歪はランセット磁区部分と同様な不連続な磁化曲線を生成することがわかる。

以上、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に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。

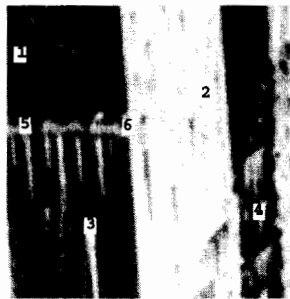


Fig.5 Selected pixel positions for drawing microscopic magnetization curves.

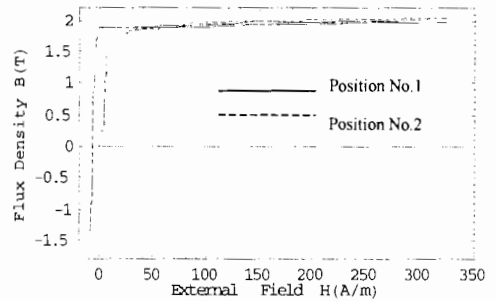


Fig.6 Magnetization curves at the 180° domains in Fig.5.

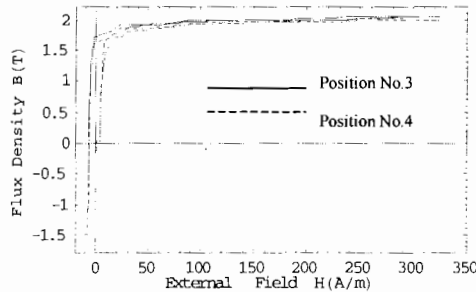


Fig.7 Magnetization curves at the lancet domains in Fig.5.

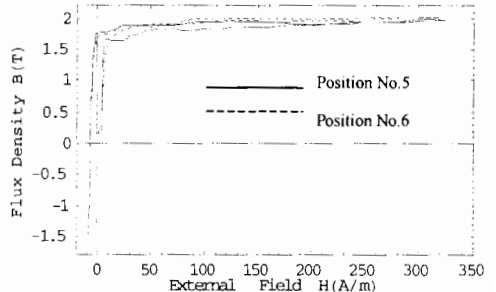


Fig.8 Magnetization curves at the strained parts in Fig.5.

おわりに

本稿では磁性材料の新しい評価法として、可視化された磁区画像を用いた動画像解析手法を提案した。離散的に与えられる一連の磁区画像を Helmholtz 型偏微分方程式で記述し、磁区動画像を連続的に生成する方法について述べた。その結果として、電磁鋼板の全体的・局所的な磁化曲線の算出を可能とした。また、磁区画像フレーム間の遷移情報は状態遷移行列の固有値として表現され、その虚部が鉄損分布を可視化し、さらに Preisach の分布関数に関係していることを述べた。状態遷移行列の固有値を考察することは複雑な現象を有する磁性材料の磁区構造並びに鉄損解析などの物性評価に有効であることが自明である。

[参考文献]

- (1) 山本孝明, 野沢忠生, 松尾征夫: 日本応用磁気学研究資料, 16-4, (1980).
- (2) 開道 力, 他: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-173 (1999).
- (3) A. Hubert and R. Schäfer: *Magnetic Domains*, Springer, Berlin, (2000).
- (4) 例えば, S. -B. Choe and S. -C. Shin, Phys. Rev. **62**, 8684 (2000).
- (5) 遠藤 久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰: 電学論, 120-A, 913 (2000).
- (6) 遠藤 久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰: 可視化情報学会誌, 20, Suppl. 1, 141 (2000).
- (7) 茂田幸康, 早野誠治, 齋藤兆古: 電気学会マグネティックス研究会試料, MAG-00-116 (2000).
- (8) 遠藤 久, 他: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-257 (2000).
- (9) 齋藤兆古, 他: 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-90-20, RM-90-32, (1990).
- (10) 齋藤兆古, 早野誠治: 日本応用磁気学会誌, 13, 5, 594, (1989).
- (11) 早野誠治: 法政大学学位論文 (1995).
- (12) Y. Saito, S. Hayano, and Y. Sakaki: J. Appl. Phys., **64**, 1, 5684 (1988).
- (13) Y. Saito, K. Fukushima, S. Hayano and N. Tsuya: IEEE Trans. Magn., **23**, 5, 2227 (1987).

2003年2月17日受理