

## 磁区動画像生成法に関する考察

遠藤 久, 早野 誠治  
(法政大学)藤倉 昌浩, 開道 力  
(新日鐵(株))斎藤 兆古  
(法政大学)

## Consideration on the Dynamic Domain Images

Hisashi Endo and Seiji Hayano (Hosei University)  
Masahiro Fujikura and Chikara Kaido (Nippon Steel Corporation)  
Yoshifuru Saito (Hosei University)

## Abstract

This paper proposes an image processing approach for analyzing the magnetic domain behavior by means of image Helmholtz equation. According to our methodology, any magnetized domain states can be visualized as one of the animation frames from the finite number of scanning electron microscope (SEM) images. The microscopic magnetic domain behavior as well as macroscopic magnetization process are analyzed based on our image Helmholtz equation described in this paper. The state transition matrices derived from a series of distinct SEM images correspond to the Preisach's density functions. Thereby, the magnetic domain dynamics can be visualized as one of the animations.

In this paper, we apply our methodology to magnetic domain SEM images of a grain-oriented electrical steel. As a result, we have succeeded in clarifying and visualizing the iron loss generation mechanism.

キーワード：画像の Helmholtz 方程式, 方向性電磁鋼板, 走査型電子顕微鏡, 鉄損, Preisach 分布関数,  
(Image Helmholtz equation, Grain-oriented electrical steel sheet, Scanning electron microscope, Iron loss, Preisach density function)

## 1 まえがき

方向性電磁鋼板の低鉄損化は, 理想的に<100>{011}へ近づけること(特に, 潜り角 $\beta$ を小さくすること)が重要である。方位のずれ, すなわち $\beta$ がゼロでないこと, 鋼板の磁区が複雑となり, 還流磁区(ランセット等)が生じ, 鉄損を増大させる。電磁鋼板の低鉄損化のためには, 磁区構造や磁壁移動・挙動を正確に把握し, 鋼板条件の最適化を行うことが重要である。このことから, 磁区構造や磁壁移動・挙動を正確かつ客観的に評価する手法を開発することの社会的意義は大きい。

現在, 走査型電子顕微鏡(SEM)や Kerr 効果などの手法により, あらゆる電磁鋼板の磁区パターンをいわゆる可視化画像として計算機へ取り込むことが容易になった[1][2]。一方, 筆者らは, デジタル画像データを構成する画素をスカラーポテンシャルあるいはベクトルポテンシャルの一方成分とみなすことで画像における支配方程式を導出した[3][4]。その結果, 複数枚の静止画像(フレーム)で構成される動画像を Helmholtz 型偏微分方程式の解として生成可能とした。また, 動画像のフレーム間推移情報を状態遷移行列として得ることができる。多くのダイナミクスで状態遷移行列の固有値は, 系の物理定数などに対応することと同様に, 本論文で提案する画像処理手法は可視化された画像から系の特徴抽出が可能である。

本論文では, 複数の異なる磁化状態における方向性電磁

鋼板の SEM 画像を用いて, この電磁鋼板の特性抽出をおこなう。具体的に記述すれば, 微視的には, 画像の Helmholtz 方程式から導出される状態遷移行列の固有値から方向性電磁鋼板の磁区挙動解析をおこない, 鉄損発生部を可視化し, 局所的  $B-H$  曲線を計算する。巨視的には, 磁区挙動の解析結果と与えられた SEM 画像から任意の励磁状態に対する磁区パターンおよび, 電磁鋼板全体としての  $B-H$  曲線を計算する。

## 2 画像の Helmholtz 方程式

## &lt;2.1&gt; 画像の偏微分方程式

多くのダイナミクスは, Helmholtz 型偏微分方程式で記述できる。1 フレームの画像をスカラーフィールド  $U$  とみなし, 動画像を(1)式の Helmholtz 方程式で記述することを考える。

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

(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項は遷移方向 $\alpha$ 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 $\sigma$ は, 最終フレームに対するラプラシアン演算で得られる画像のソースデンシティである。よって, 最終フレーム  $U_{Final}$

は、(2)式の Poisson 方程式の解として与えられる。

$$\nabla^2 U_{Final} = -\sigma \quad (2)$$

これは、静止画像の方程式が Poisson 方程式で記述できることを意味している[4].

### <2.2> 画像の Helmholtz 方程式の解

(1)式における初期値、すなわち初期フレームを  $U_{Start}$  とし、モーダルアナリシス法を用いて(1)式を解くと、任意の  $\alpha$  におけるフレーム  $U_\alpha$  は、(3)式で与えられる[4][5].

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

ここで、 $\exp(-\Lambda\alpha)$  は状態遷移行列である。(3)式は、 $\alpha=0$  で初期フレーム  $U_{Start}$ 、 $\alpha \rightarrow \infty$  で最終フレーム  $U_{Final}$  となる。しかしながら、実際は遷移変数  $\alpha$  が厳密に無限大とならないから、与えられたフレームを必ず満足する状態遷移行列の固有値  $\Lambda$  の値を決定する必要がある。

### <2.3> 状態遷移行列の固有値 $\Lambda$ の決定法

初期フレーム  $U_{Start}$  と最終フレーム  $U_{Final}$  間に存在する遷移値  $\alpha = \Delta\alpha$  におけるフレーム  $U_{\Delta\alpha}$  を定義すれば、(3)式を変形することで行列  $\Lambda$  の各要素を決定することができる。

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

よって、(4)式を(3)式に代入することで任意の  $\alpha$  におけるフレームを得ることができる。逆に、(4)式による解は、遷移値  $\alpha = \Delta\alpha$  で必ずフレーム  $U_{\Delta\alpha}$  を与えることを意味する。

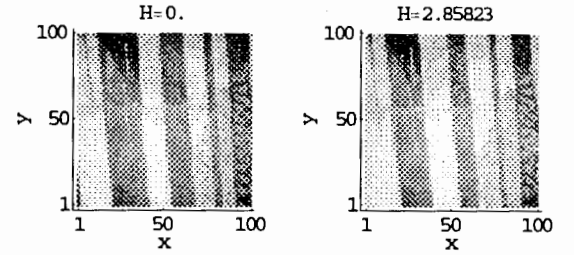
## 3 磁区挙動解析

### <3.1> 方向性電磁鋼板の SEM 画像

図 1 は各磁化状態における方向性電磁鋼板の SEM 画像である。その他の本論文で用いた SEM 画像の磁化状態を表 1 に示す。使用した電磁鋼板は、板厚 0.23 mm の高磁束密度方向性電磁鋼板 (オリントコア・ハイパー) であり、皮膜を除去したものをを用いた。SEM 観察条件は、加速電圧 160 kV である。

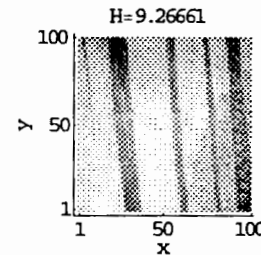
表 1 計算に用いた SEM 画像 ( $H$ :外部磁界,  $B$ :磁束密度)

No.	$H$ [A/m]	$B$ [T]	No.	$H$ [A/m]	$B$ [T]
1	0.00	0.00	13	214.13	1.93
2	2.85	0.10	14	160.37	1.92
3	9.26	1.63	15	98.68	1.91
4	24.16	1.73	16	54.66	1.84
5	30.23	1.78	17	28.53	1.83
6	54.59	1.84	18	3.73	1.77
7	84.92	1.86	19	0.00	1.73
8	115.39	1.88	20	-4.60	1.73
9	160.69	1.90	21	-5.95	-0.06
10	236.32	1.92	22	-7.45	-1.43
11	324.31	1.95	23	-9.07	-1.56
12	269.64	1.95	24	-11.50	-1.62

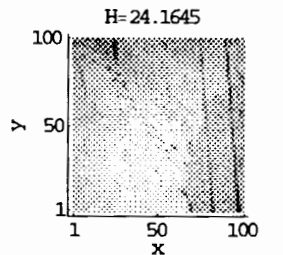


(a)  $H=0.00$ [A/m],  $B=0.00$ [T]

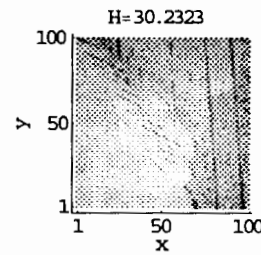
(b)  $H=2.86$ [A/m],  $B=0.10$ [T]



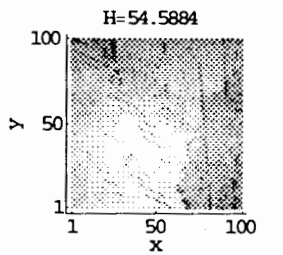
(c)  $H=9.27$ [A/m],  $B=1.60$ [T]



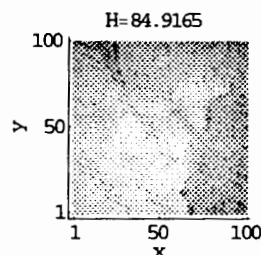
(d)  $H=24.16$ [A/m],  $B=1.73$ [T]



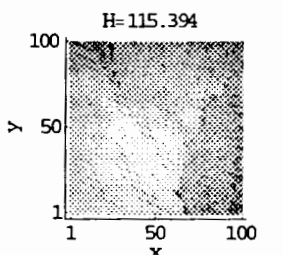
(e)  $H=30.23$ [A/m],  $B=1.78$ [T]



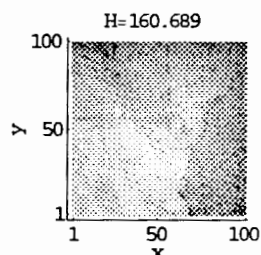
(f)  $H=54.60$ [A/m],  $B=1.84$ [T]



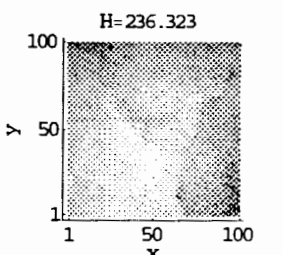
(g)  $H=84.92$ [A/m],  $B=1.86$ [T]



(h)  $H=115.39$ [A/m],  $B=1.88$ [T]



(i)  $H=160.69$ [A/m],  $B=1.90$ [T]



(j)  $H=236.32$ [A/m],  $B=1.92$ [T]

図 1 各磁化状態における方向性電磁鋼板の SEM 画像 (100x100 [pixel], 0.1 [mm/pixel], y 軸方向: 圧延方向)

### <3.2> 状態遷移行列の固有値 $\Lambda$

図1に示したSEM画像から画像の Helmholtz 方程式(1)式で磁区挙動解析をおこなう。この場合、SEM画像の濃淡を表す画素値の平均値を磁束密度とみなす。また、(1)、(3)式における遷移変数  $\alpha$  は、磁界の強さ  $H$  であるから (1)、(3)式はそれぞれ(5)、(6)式となる。

$$\nabla^2 U + \epsilon \frac{\partial}{\partial H} U = -\sigma \quad (5)$$

$$U_{ii} = \exp(-\Lambda H)(U_{Start} - U_{Final}) + U_{Final} \quad (6)$$

(5)、(6)式を適用するためには、(6)式の状態遷移行列の固有値  $\Lambda$  を与えられたSEM画像から決定しなければならない。ここでは、(7)式より連続する3フレームの異なる磁化状態のSEM画像を用いて、各区間の状態遷移行列の固有値  $\Lambda_i$ ,  $i=1,2,\dots,22$  を決定する。

$$\Lambda_i = -\frac{1}{\Delta H} \ln \left( \frac{U_{i+1} - U_{i+2}}{U_i - U_{i+2}} \right), i=1,2,\dots,22 \quad (7)$$

ここで、下添え字  $i$  は、表1に示すSEM画像の番号である。また、 $U_i, U_{i+2}, U_{i+1}$  はそれぞれ、(6)式における  $U_{Start}, U_{Final}, U_{Start}$  と  $U_{Final}$  間に存在する中間フレームである。

### <3.3> 固有値 $\Lambda$ の物理的意味

ここで、本解析例における状態遷移行列の固有値  $\Lambda$  の物理的意味を考える。強磁性体中における磁束密度と磁界との関係は(8)式で表現できる。

$$\frac{1}{\mu} B + \frac{1}{\Psi} \frac{\partial B}{\partial (H_e - H_c)} = H_e - H_c \quad (8)$$

ここで、 $\mu, H_e, H_c$  はそれぞれ透磁率、磁性体内中の実効磁界、保磁力である。また、 $\Psi$  は Preisach の分布関数である[6]-[9]。ここで、図2は、(7)式から求めた各区間における状態遷移行列の固有値  $\Lambda$  の実部(左列)と虚部(右列)を図1の画素配置に対応させて示したものである。(5)、(8)式を比較してみると  $\Lambda$  は、Preisach の分布関数の逆数に関係していることがわかる。Preisach の分布関数  $\Psi$  は、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、固有値  $\Lambda$  の実部は、実部の透磁率の逆数に対応し、虚部は、損失に関係する虚部の複素透磁率の逆数に対応する。

まず、 $\Lambda$  の実部の挙動について考えると、低磁界では、S極(図1の黒色部)とN極(図1の白色部)に着磁している部分で、S極部分の移動部分の値がゼロに近く、主磁化過程が磁束移動であることがわかる。磁界を高くしていくと、実部は、全体的に大きな値を示すが、微視的にはランセット等のヒステリシスに対応して、大きな値を示している。さらに磁界を大きくすると、全体的にかつ平均的に大きな値を示すが、これは磁化回転が生じていることに対応する。(8)式

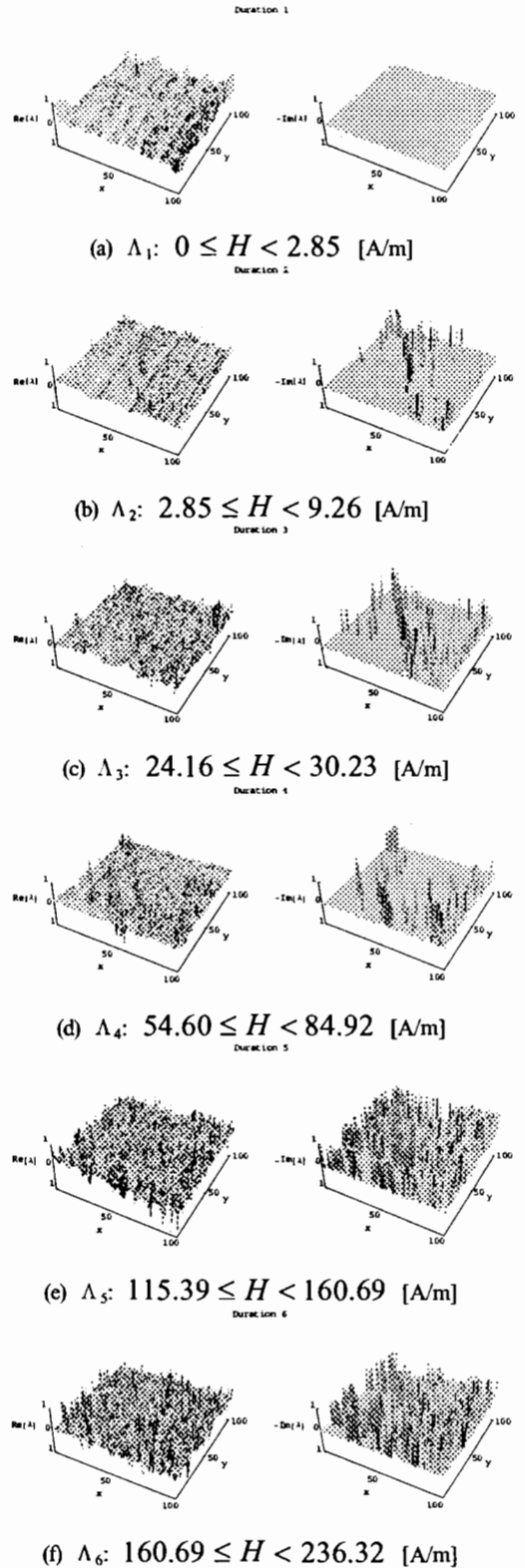


図2 各区間における固有値  $\Lambda$  の分布 (左列：実部、右列：虚部)

から、実部・虚部、いずれの $\Lambda$ に対しても $\Lambda$ の値が大きい値をとることは、透磁率の磁界に対する変化率が小さく、線形な透磁率を意味する。逆に、 $\Lambda$ の値が小さい値をとることは、透磁率の磁界に対する変化率が大きく、非線形な磁化過程を意味する。

次に、 $\Lambda$ の虚部の挙動について考えると、低磁界では、実部が磁壁移動に対応した部分が大きな値をとるが、虚部は小さい値である。すなわち、複素透磁率の磁界に対する変化が大きい。これは、磁壁が磁界に対応して、あまりピンニングされずに動いていることを示している。しかし、磁界が高くなり、ランセットなどの発生消滅が生じると、ランセット発生消滅部分で、虚部の値が大きくなり、鉄損発生に影響していることがわかる。換言すれば、複素透磁率の磁界に対する変化が小さく一定の損失発生状態である。さらに磁界が高くなり、主な磁化過程が磁化回転である領域になると、虚部も実部と同様に全体的に大きい値を示している。これは、透磁率の実部も虚部も磁界に対する変化率が小さく、磁化回転も鉄損発生に無関係でなく相互に関連していることを意味する。

電磁鋼板では、残留磁化以上で磁化回転が生じるが、この磁束密度域でヒステリシスループの幅が極めて大きくなり、ヒステリシス損増加に関係することが報告されている[10]。図2の高磁界域で、虚部が平均的に大きくなっていくことは、虚部の複素透磁率が磁界に対してほとんど変化せずほぼ一定値を保ち、鉄損が増加することを意味し、参考文献[10]の結果を裏付けている。高磁界で、磁化が回転すると、 $\beta$ による鋼板表面の磁極も小さくなるので、それに伴い、鋼板表面ではミクロな磁区構造変化（磁壁移動、還流磁区の消滅等）が生じるため、損失を伴うものと考えられる。磁気飽和が強くなると、 $\Lambda$ の虚部も実部と同様に小さくなっていく。以上より、180度磁壁移動と90度磁壁（還流磁区/ランセットの発生消滅）移動における損失発生挙動の違いが明確に示された。

### <3.4> 磁化曲線と磁区画像の再構成

(7)式によって求めた各区間の状態遷移行列を(6)式に代入し、任意の磁界 $H$ 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 $B$ - $H$ 曲線を計算する。

図3は(6)式により生成した磁区画像(右列)と画像の濃淡の平均値から計算した $B$ - $H$ 曲線(左列)である。結果として複数枚の磁区画像から任意の磁界 $H$ 時の磁区画像が生成可能であることがわかる。

### <3.5> 局所的磁化曲線

図1に示したSEM画像を構成する任意の一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。図4で番号づけされている個所の磁化曲線を図5~7に示す。また、図4は、図1(a)の画像の一部を10倍に拡大したものである。図4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度磁区部分の残留磁束密度(図5)は、ランセット磁区部分(図6)、物理的な歪が存在する部分(図7)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

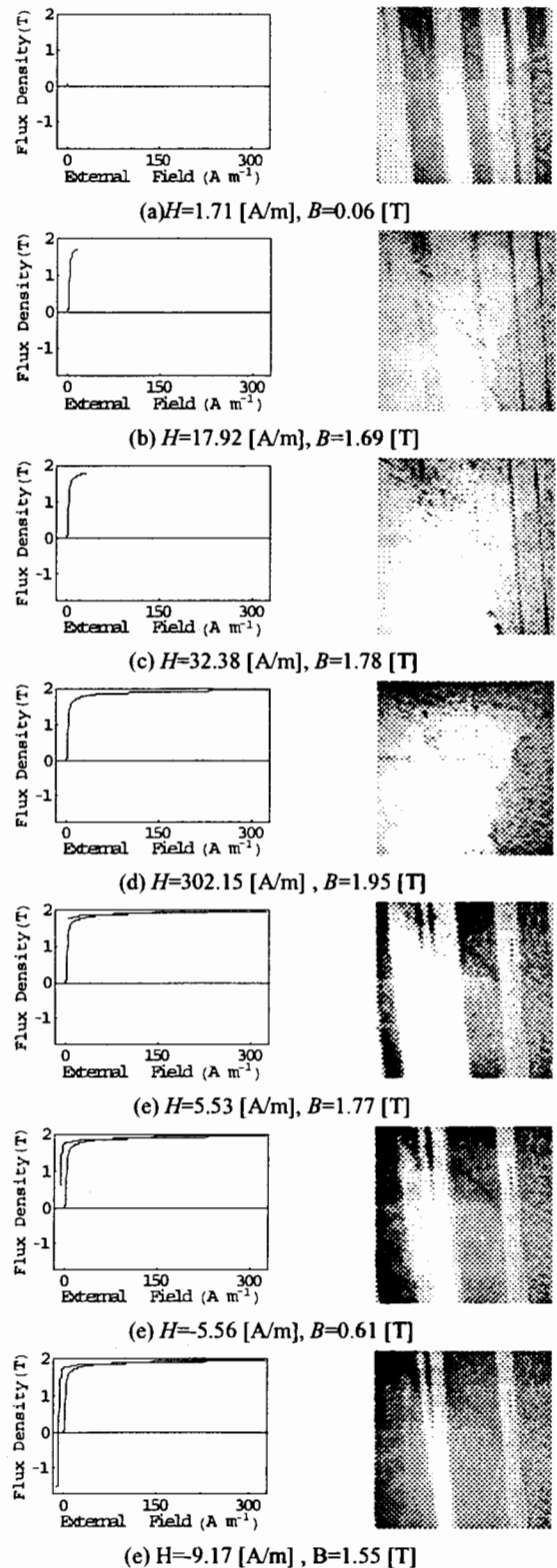


図3 画像の Helmholtz 方程式による磁区画像の再構成(右列)と磁化曲線(左列) (100x100 [pixel], 0.1 [mm/pixel])

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。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消滅が起りやすい回転磁化領域に入る部分で不連続な磁化曲線が生成されている。最後に、図7は、鋼板に対する物理的なストレスによって不連続な磁化曲線が生成されることがわかる。

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ことが判明した。

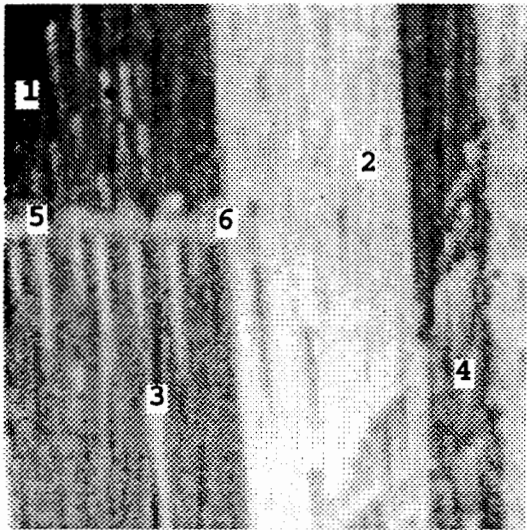


図4 局所的磁化曲線の計算に用いた電磁鋼板上の位置  
(256x256 [pixel], 0.01 [pixel/mm])  
番号 1, 2: 純粋な 180 度磁区部分  
番号 3, 4: ランセット磁区部分  
番号 5, 6: 物理的な歪が存在する部分

#### 4 まとめ

本論文では磁性材料の新しい評価法として、磁区画像を用いた画像処理的手法を提案した。フレームの遷移方向に離散的に与えられる動画像を Helmholtz 型偏微分方程式で記述し、離散量を連続量に変換することが可能であることを示した。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、磁区挙動解析では、それが Preisach の分布関数に関係していることを示した。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鉄損解析などの物性評価に有効であると考えられる。今回の評価で、鉄損発生にはランセットなどの発生消滅が大きく影響していることが示され、方向性電磁鋼板の低鉄損化の一指針が示された。また、磁区挙動解析結果から材料の全体的、あるいは局所的な磁化曲線が生成可能であり、これは磁化特性の評価法として有効であると考えられる。

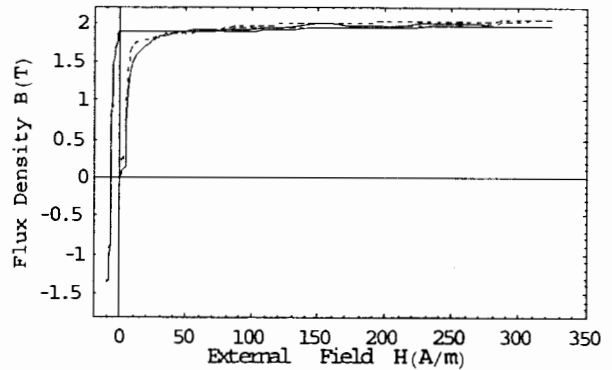


図5 純粋な 180 度磁区部分 (番号 1, 2) における局所的磁化曲線 (実線: 番号 1, 破線: 番号 2)

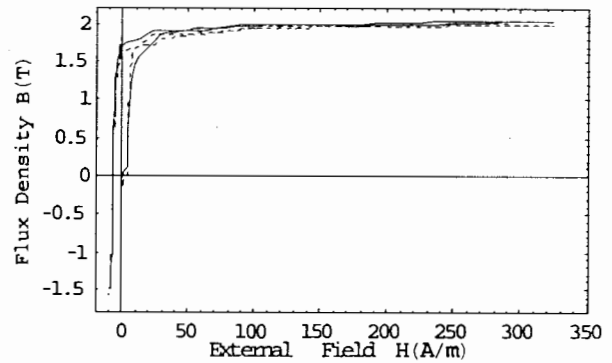


図6 ランセット磁区部分 (番号 3, 4) における局所的磁化曲線 (実線: 番号 3, 破線: 番号 4)

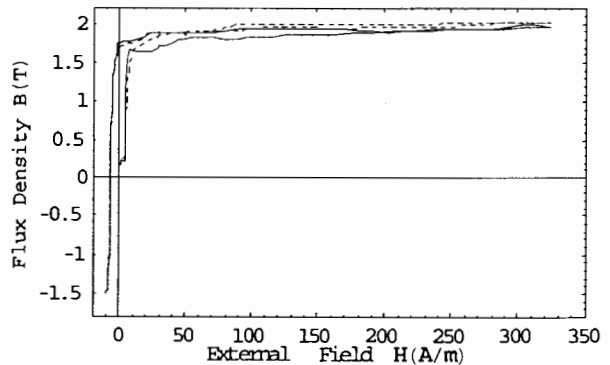


図7 物理的な歪が存在する部分 (番号 5, 6) における局所的磁化曲線 (実線: 番号 5, 破線: 番号 6)

## 5 参考文献

- [1] A. Hubert and R. Schäfer, "Magnetic Domains," Springer, Berlin, 2000.
- [2] 山本孝明, 野沢忠生, 松尾征夫, "SEM による方向性珪素鋼板の磁区模様を観察," 日本応用磁気学研究資料, 164, 1980.
- [3] 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, 佐久間正剛, 堀井清之, "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.
- [4] 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, "画像処理の方法とその動磁界解析への応用," 電学論, Vol.120-A, pp.913-918, 2000.
- [5] 齋藤兆古, 中沢良浩, 早野誠治, "渦電流問題の非スプリアス有限要素解," 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-90-20, RM-90-32, 1990.
- [6] 早野誠治, "磁性材料の構成方程式に関する研究," 法政大学学位論文, 1995.
- [7] L. Liozou, B. Phelps, and D. L. Atherton, "Macroscopic models of Magnetization," IEEE Trans. Magn., Vol.36, No.2, pp.418-427, 2000.
- [8] Y. Saito, S. Hayano, and Y. Sakaki, "A parameter representing eddy current loss of soft magnetic materials and its constitutive equation," J. Appl. Phys., Vol.64, No.1, pp.5684-5686, 1988.
- [9] Y.Saito, K.Fukushima, S.Hayano and N.Tsuya, "Application of a Chua type model to the loss and skin effect calculation," IEEE Trans. Magn., Vol.23, No.5, pp.2227-2229, 1987.
- [10] 開道力, 脇坂岳顕, 藤倉昌浩, 山崎二郎, 野沢忠生, "無方向性電磁鋼板の磁気特性についての一考察," 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-173 1999.

原稿受付日	平成 12 年 10 月 17 日
-------	-------------------