



# 知的可視化情報処理\* —動画像処理とその応用—

齋藤 兆古\*\*, 遠藤 久\*\*\*

## Smart Visualized Information Processing —Dynamic Image Processing and Its Application—

Yoshifuru SAITO and Hisashi ENDO

### 1. 緒 論

数年前日本 AEM (応用電磁) 学会に知的可視化情報処理の解説を三回連載した<sup>1-3)</sup>。本稿はこの日本 AEM 学会誌に連載した解説の最後と位置付ける。当然であるが、日本 AEM 学会誌で触れていない動画像処理に関して述べ、知的可視化情報処理の纏めとする。

商用に販売されているソフトウェアを調べると、個々の画像の明るさやコントラスト等を編集するソフトウェアと動画像を編集するソフトウェアは別個のソフトウェアとして販売されていることが多い。

筆者の偏見かも知れないが、多くの読者諸賢は画像なる用語から1枚の画面に描かれた絵画等を連想すると考える。動画像と単純な画像なる用語の違いを考えれば、画像は1画面中で対象が静止している。他方、動画像は1画面中で対象が時間と共に変化する画像である。すなわち、静止画像は1画像、動画像は画面中で対象が時間と共に連続的に変化する複数個の画像からなる一連の画像セットである。この意味で、画像なる用語は動画像も包含するとも言える。

人間だけでなく生物の持つ視覚情報処理能力を前提とすれば、動画像と静止画像の区別は極めて曖昧である。人間の持つ視覚情報処理能力は1秒間に16コマ以上の速度で切り替えられる一連の静止画像(これをフレーム, Flame と呼ぶ。)を動画像としているが、他の生物の視覚情報処理能力が人間と同じであるかは疑問である。例えば、人間の良き友である犬の視覚情報処理能力は、静止画像よりも動画像を感知する能力(これを動物視力という。)が高いことが知られている。犬は1秒間に16フレーム以下の速度で変化する画像を動画像として感知するのかも知れないし、逆に16フレーム以上であっても、個々のフレームが識別可能で静止画像として感知するのかも知れない。視覚情報処理能力を持つ生物全体に対して成り立つ共通点は少なくとも画面中の同一対象が時間

変化する2フレーム以上の画像を動画像とみなす点にあると考えられる。但し、同時に複数個の画像を一覧としてみた場合、複数個の画像からなる1枚の静止画像である。

従って、本解説では、画面中の対象が時間軸に対して連続的に変化、若しくは背景が変化する2フレーム以上からなる一連の画像セットを動画像とする。

日本 AEM 学会誌で述べた解説その3に於ける画像処理とは動画像処理における1フレームに対して行われる<sup>3)</sup>。それでは、動画像処理とはどのような作業や過程を云うのであろうか? 多くの市販されている動画像処理ソフトは映画やアニメーションの編集作業に使われる事を前提としている。換言すれば、部分的に撮影若しくは作成された動画像を繋ぎ合わせたり、分離したりする作業や過程を動画像編集と称している。

本稿では市販の動画像処理ソフトウェアでなされる作業や過程を動画像処理と考えない。所詮、人間が製作する映画やアニメーションは人間の視覚情報処理能力であたかも対象が動いているように見える時間軸方向へ離散化した有限個のフレームから構成される複数の静止画像である。実際の物理現象は必ず時間軸方向へ連続であるから、人間が製作する映画やアニメーションは時間軸に対して離散化量である。この意味で、銀塩アナログ写真の複数フレームで構成される映画はデジタル計算機が出現する以前に連続量をサンプリングして得られる離散化量の原点と言えらるであろう。

多くの動画像はエンターテインメントや人間の視覚で感知可能な物理系のダイナミクスを前提としているが、本稿で解説している知的可視化情報処理は計算機スクリーン上に可視化された情報から規則性や法則を抽出する事が目的である。この目的を実現する数学的方法として古典物理の集大成である場の理論を採用している。

計算機スクリーン上に描かれる画像は画素の集合として与えられる。モノクロ画像の画素は0から1の数値であり、カラー画像の画素は光の波長に応じて分類される赤 (Red), 緑 (Green) そして青 (Blue) 成分からなり、それぞれの成分はモノクロ画像の画素と同様に0から1

\* 原稿受付 2005年8月19日

\*\* 正会員 法政大学大学院システムデザイン研究科

\*\*\* 非会員 東北大学流体科学研究所

の数値である。これらの数値をスカラーポテンシャル若しくはベクトルポテンシャルの1成分とみなし、場の理論における勾配演算や回転演算、そしてラプラシアン演算を適用し、画像ベクトルや画像のソースデンシティなどが得られ、これらの諸量を使うことでスケッチ画像の生成や画像の縮小・拡大が可能である<sup>1,2)</sup>。

時間軸方向の変化を考慮した動画像の場合、動画像の支配方程式は Helmholtz 方程式となる。Helmholtz 方程式の解は時間軸に対して連続である。従って、本稿での動画像処理とは時間軸方向へサンプリングされて得られる一連の静止画像から時間軸に対して連続な画像を得る方法に関する。換言すれば、本稿は観察された有限個のフレーム画像から如何に任意の時間に対するフレーム画像を生成するかの方法論やその物理系への応用を考える。

## 2. 動画像処理の考え方

### 2.1 動画像とは

動画像はだまかに2種類に分けることが出来る。一方は背景が同一で画像中の対象が各フレームで異なる場合であり、他方は画像中の対象が静止していても背景が各フレームで異なる画像である。前者は劇場の舞台上で役者が演技をする場合の動画像であり、後者はスーパーマンが空を飛んでいる動画像である。当然、両者が混在する動画像、すなわち、画像中の背景と対象も変化する動画像も存在するが、これは両者の混合動画像である。

本稿では画像中の対象物が変化する2フレーム以上の静止画像からなる動画像生成について考える。

### 2.2 ブレンディング

動画像の支配方程式は(1)式の Helmholtz 型方程式である。

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

(1)式の解は

$$U_t = U_0 + (U_\infty - U_0) \varepsilon^{-\frac{1}{\alpha} t} \quad (2)$$

で与えられる。但し、 $U_\infty$  は  $\nabla^2 U = -\sigma$  の解で与えられる最終フレームであり、 $U_0$  は最初のフレーム画像である。

いま、(2)式の指数部がテイラー展開の第2項までで近似可能とする。すなわち、

$$\varepsilon^{-\frac{1}{\alpha} t} \approx 1 - \frac{1}{\alpha} t \quad (3)$$

とすれば、(2)式は

$$U_t \approx U_0 + (U_\infty - U_0) \frac{1}{\alpha} t \quad (4)$$

と変形される。

いま、時間  $t=0$  から  $\Delta t$  間に画像が  $U_0$  から  $U_\infty$  へ変化するとすれば、(4)式の  $\alpha$  は

$$\alpha = \Delta t \quad (5)$$

として決定され、時間  $0$  から  $\Delta t$  間の任意の時刻  $t$  にお

けるフレームは

$$U_t \approx U_0 + (U_\infty - U_0) \frac{1}{\Delta t} t \quad (6)$$

で与えられる。

(6)式の線形補間で与えられる動画像はブレンディング画像と呼ばれ、最初のフレーム  $U_0$  と最後のフレーム  $U_\infty$  から簡単なアニメーションを生成する手段として使われる。Fig. 1 に最初  $U_0$  と最後  $U_\infty$  のフレーム、およびブレンディングで生成された中間フレームを示す。尚、ブレンディングは1画素・1カラー成分単位で行われるものとする。

(4)式を用いて生成された動画像は時間軸  $t$  に対して直線的に変化する。このため、実際の物理系の動きとはかなり異なることは否めない。例えば、Fig. 1(a)から Fig. 1(c)へ顔の表情が変化する場合、最終フレームに至るまで直線的でなく、(2)式から生成される動画像のように指数関数 (Hyperbolic function) 的に最終フレームへ到達するのが自然である。これは、多くの自然界の現象が偏微分方程式で記述され、その解が双曲線関数であることから当然の帰結である。よって、(2)式から動画像の生成を考えよう。(2)式を変形すれば、

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{U_t - U_\infty}{U_0 - U_\infty} \right) = \lambda \quad (7)$$

を得る。ここで、 $\alpha$  と  $\lambda$  をそれぞれ画素の時定数 (Time constant) と固有値 (Characteristic value) である。

いま、Figs. 1(a), (b), (c)のフレームがそれぞれ  $U_0$ ,  $U_t$ ,  $U_\infty$  へ対応するとすれば、Fig. 1 からより自然な動作をする動画像が(8)式を用いて生成可能である。

$$U_t = U_\infty + (U_0 - U_\infty) \varepsilon^{-\lambda t} \\ \lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \left( \frac{U_{\frac{\Delta t}{2}} - U_\infty}{U_0 - U_\infty} \right) \quad (8)$$

(8)式で、Fig. 1(b)のフレームは時刻  $t = \Delta t/2$  とし、 $\lambda$  はフレームを構成する各画素に対して計算されるものとする。

Fig. 2 は Fig. 1 のフレームを用いて(8)式で計算された状態遷移行列の要素  $\lambda$  の分布を示す。実数部はゼロもしくは有限の値を持つが、虚数部は全てゼロである。これは Fig. 1(b)が単純な線形補間(4)式で生成されたフレームであるため時間位相が異なる部分存在しないことを意味する。

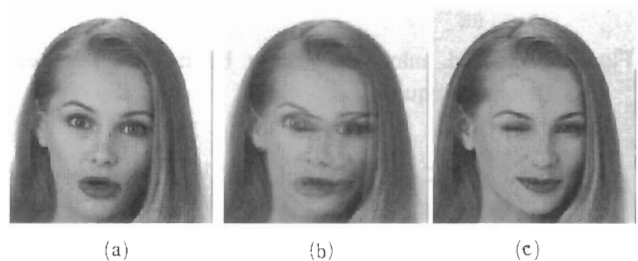


Fig. 1 Example of blending image. (a) start, (b) mid image by blending and (c) final image

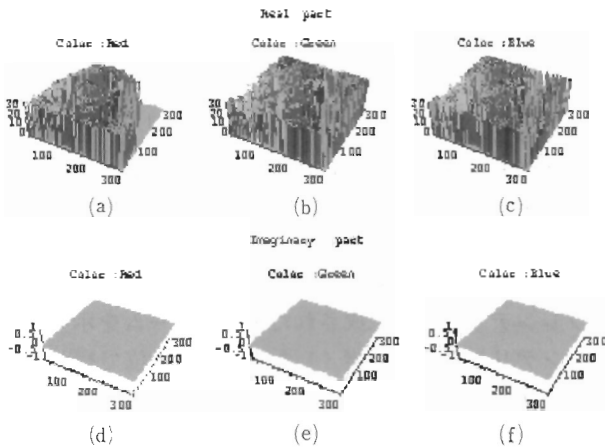


Fig. 2 Distributions of the elements in state transition matrix

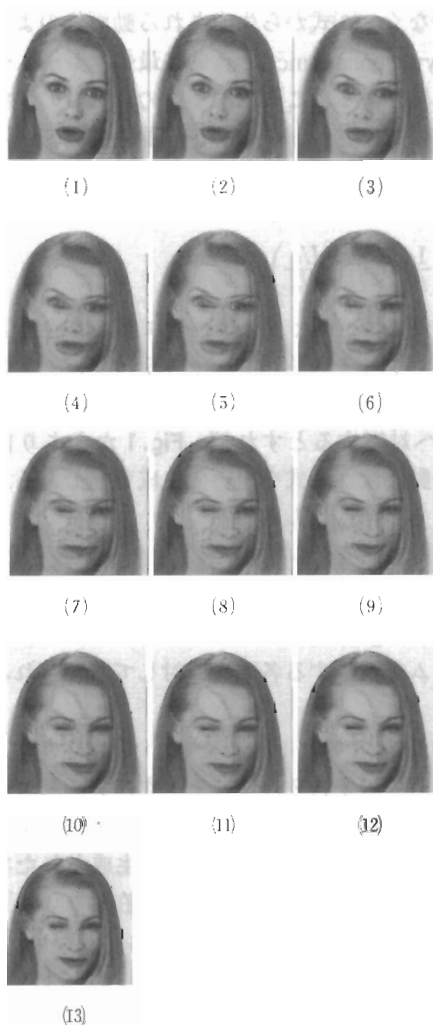


Fig. 3 Generated animation frames by means of image Helmholtz equation

Fig. 3は Fig. 2に示す $\lambda$ を(8)式に代入して生成されたフレームを示す。Fig. 3から、初期のフレーム中の対象画像に比較的大きな変化が見られるが、最終フレームフレーム中に近づくほどフレーム中の対象画像の変化が少なく、指数関数的に顔の表情が変化していることが判る。

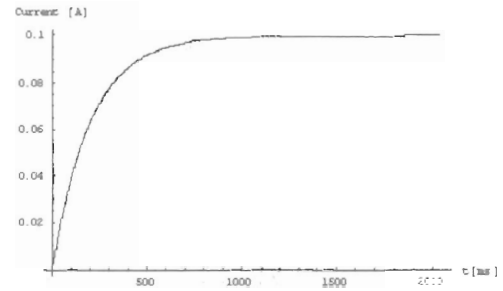


Fig. 4 Step response of a R-L series circuit



Fig. 5 Characteristic values of a R-L series circuit

2.3 画素の固有値  $\lambda$

Fig. 4に示す電気抵抗RとインダクタンスLからなる直列電気回路のステップ応答電流が1画素としよう。Fig. 4で、時刻  $t, t+\Delta t, t+2\Delta t$  における電流をそれぞれ  $i_t, i_{t+\Delta t}, i_{t+2\Delta t}$  とし、1画素の固有値を(8)式にならって計算するとすれば、1画素の固有値は(9)式で与えられる。(9)式を用いて Fig. 4の電流から計算された固有値を Fig. 5に示す。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left( \frac{i_{t+\Delta t} - i_{t+2\Delta t}}{i_t - i_{t+\Delta t}} \right) \tag{9}$$

Fig. 4に示す回路の固有値は  $1[\text{1/sec}]$ であるのに対し、Fig. 5の固有値の実数部は1ではなく1以下の一定値である。従って、画像から得られる固有値の値は必ずしも実際の物理系のそれと一致しないが一定値を取る。Fig. 4の応答電流は線形R-L直列回路から得られているから、(9)式から計算される固有値の実数部は系が線形であることを意味する。換言すれば、可視化された物理系の動画像に対する(8)式の演算で得られる実数部が一定値を取れば、可視化された物理系は線形な系であることを示し、逆に(8)式の演算で得られる実数部が一定値とならない場合、可視化された物理系は非線形な系であることを意味する。

3. 動画像処理の応用

3.1 磁性体の磁区画像への応用

単純な CCD カメラで収録可能な画像でなく、SEM (Scanning Type Electron Microscope) で得られる磁性体の磁区画像を考えよう。

磁性体は原子レベルで磁化を持つ。磁化はNSの磁極を持つため必然的に磁気エネルギーを持つ。通常、外部から磁性体に磁界が加えられない場合、磁性体は磁性体自身の磁気エネルギーを最小、すなわち、全体としての

磁化がゼロになるように磁区を構成する。このような磁化状態を消磁状態 (Demagnetized state) という。この消磁状態を変化させるために必要な最小磁界を保持力  $H_c$  と呼ぶ。磁性体へ外部から磁界  $H$  が加えられた場合に得られる磁束密度  $B$  との関係は、

$$H = H_c + H_e = \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{\psi} \frac{dB}{dH} \quad (9)$$

で与えられる<sup>9)</sup>。(9)式で、 $H_c$ 、 $\mu$  および  $\psi$  はそれぞれ、有効磁界、理想磁化曲線の透磁率、さらにプライザッハ (Preisach) の分布関数である。

(9)式で  $\mu$  と  $\psi$  を一定値と仮定すれば、磁束密度  $B$  は、 $B_0$  を磁束密度の初期値として

$$\begin{aligned} B &= B_f + \varepsilon^H [B_0 - B_f] \\ B_f &= \mu H \end{aligned} \quad (10)$$

で与えられる。

### 3.2 動的磁区画像

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 の新日鐵製方向性電磁鋼板 (オリエンタコア・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。外部磁界を印加したことによって磁束密度を表す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、動画像の支配方程式である画像の Helmholtz 方程式を適用することができる。

### 3.3 動磁区画像の支配方程式

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 Helmholtz 型偏微分方程式で記述される。動画像、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、ポアソン型方程

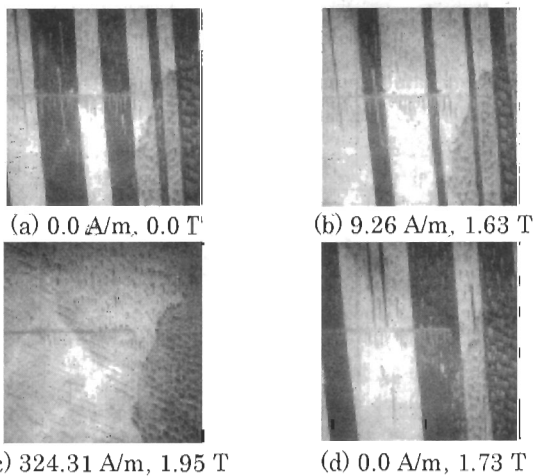


Fig. 6 SEM images of a grain-oriented electrical steel (ORIENTCORE HI-B, Nippon Steel) 100×100 pixels, 0.1 mm/pixel

式で記述されるから<sup>2)</sup>、動画像は、時間微分項を考慮した Helmholtz 型方程式で記述される。磁区動画像の場合、磁区パターンが外部磁界  $H$  で変化するため、(11)式が成り立つと仮定する。

$$\nabla^2 U + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial H} = -\sigma \quad (11)$$

(11)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  $\varepsilon$  は磁区・磁壁移動速度に関するパラメタであり未知数である。

### 3.4 磁区画像の生成

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(11)式をモーダルアナリシス法で解くことを考える。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、(12)式で与えられる。

$$U_H = \exp(-\Lambda H)(U_{Start} - U_{Final}) + U_{Final} \quad (12)$$

ここで、 $\exp(-\Lambda H)$  は対角化された状態遷移行列である。(12)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、(11)式におけるパラメタ  $\varepsilon$  が未知であるため、状態遷移行列  $\Lambda$  も未知である。よって、与えられた動的画像のフレームから行列  $\Lambda$  の要素を決定する。

### 3.5 状態遷移行列 $\Lambda$

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、(12)式を変形し、行列  $\Lambda$  の要素を(13)式で決定することができる。

$$\Lambda = -\frac{1}{H} \ln \left( \frac{U_H - U_{Final}}{U_{Start} - U_{Final}} \right) \quad (13)$$

ここで、行列  $\Lambda$  は対角行列であるから、(12)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  $\Lambda$  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  $\Lambda_i$ 、 $i=1, 2, \dots, n-2$  で表現される。

$$\begin{aligned} \Lambda_i &= -\frac{1}{H_{i+1} - H_i} \ln \left( \frac{U_{i+1} - U_{i+2}}{U_i - U_{i+2}} \right) \\ i &= 1, 2, \dots, n-2 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、下添え字  $i$  は、フレーム番号であり、 $n$  は動画像を構成している総フレーム数である。また、 $U_i$ 、 $U_{i+1}$ 、 $U_{i+2}$  はそれぞれ(12)式における  $U_{Start}$ 、 $U_H$ 、 $U_{Final}$  に対応する。よって、(14)式を(8)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、(14)式で決定した行列  $\Lambda$  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  $\Lambda$  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が可視化可能であることを意味する。

### 3.6 鉄損の可視化

Fig. 7は、(14)式から求めた各区間における行列  $A$  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  $A$  の実部と虚部の物理的意味を考える。あらゆるダイナミックな系の状態方程式と同様に、行列  $A$  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。従って、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は進みが生じていると考えられる。換言すれば、虚部は鉄損発生部を可視化していると考えられる。

### 3.7 磁区動画像

(14)式で求めた各区間の行列  $A$  を(12)式に代入し、任意の印加磁界  $H$  時の磁区画像を動画像のフレームとして生成する。また、画像の濃淡値の平均から鋼板全体としての磁化曲線を計算する。Fig. 8は、(12)式により生成した磁区画像 (左列) と画像の濃淡値の平均から計算した

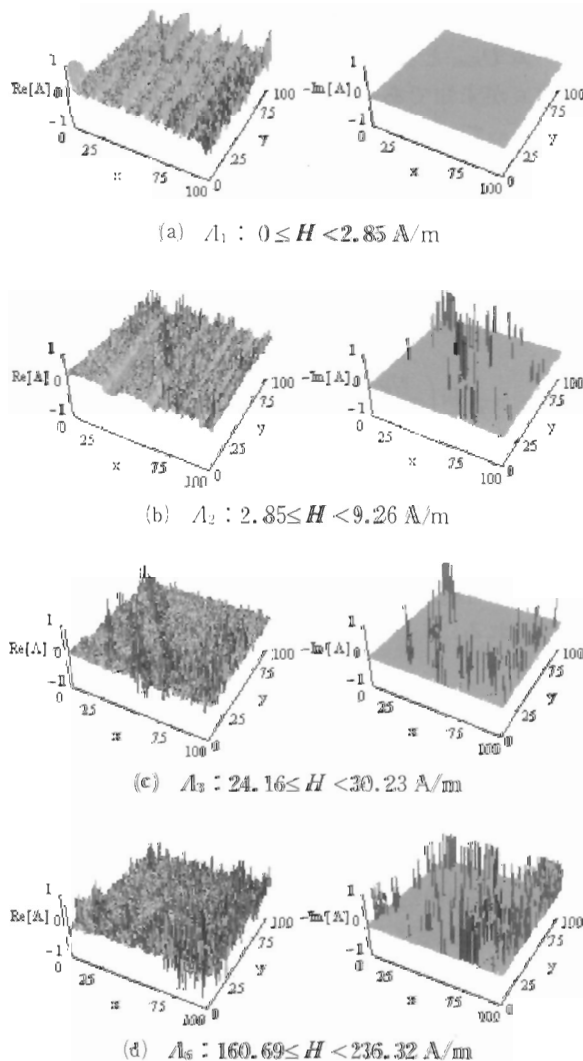


Fig. 7 Elements in matrix  $A$ . The left and right columns show the real and imaginary parts of  $A$ , respectively

磁化曲線 (右列) である。Fig. 9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。

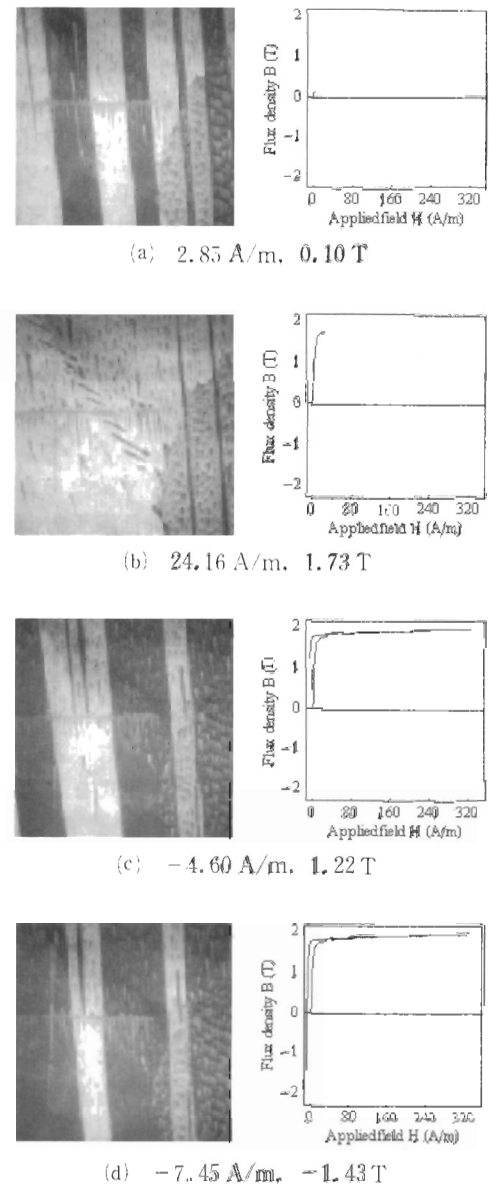


Fig. 8 Generated domain images and magnetization curves (100×100 pixels, 0.1 mm/pixel)

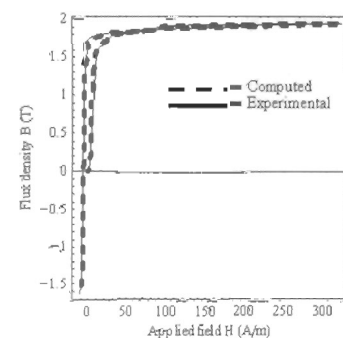


Fig. 9 Calculated magnetization curve compared with experimental results

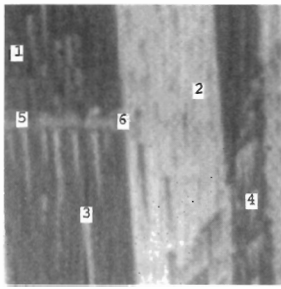


Fig. 10 Selected pixel positions for drawing microscopic magnetization curves. The background domain image is the same as in Fig. 1(a). Positions 1 and 2 are in the  $180^\circ$  domains. Positions 3 and 4 are in the lancet domains. Positions 5 and 6 are in the strained areas.

### 3.8 ローカルな磁化曲線

Fig. 6 に示した磁区画像を構成する任意の 1 画素に注目すればローカルな磁化曲線が生成可能である。Fig. 10 で番号づけされている画素の磁化曲線を Fig. 11~13 に示す。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  $180^\circ$  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。すなわち、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対応する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<sup>2)</sup>。

## 4. まとめ

本稿では、掲載誌は異なるが知的可視化情報処理に関する解説の纏めとして動画像処理とその物理系への応用について述べた。

動画像を 2 次元の Helmholtz 型偏微分方程式で表現すれば、動画生成や物理系の動画から物性などが抽出され、従来、習熟した人間の目視検査に依存する作業の自動化が期待できることを示した。

### 参考文献

1) 斎藤兆古：知的可視化情報処理(解説論文)－その 1 概念と考え方－, 日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 4(2001)pp. 470-

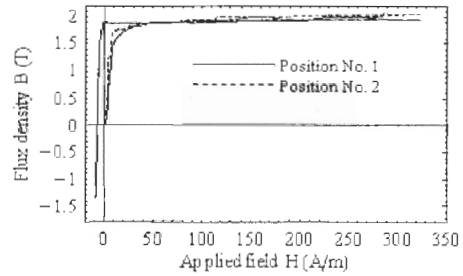


Fig. 11 Magnetization curves in the  $180^\circ$  domains in Fig. 10

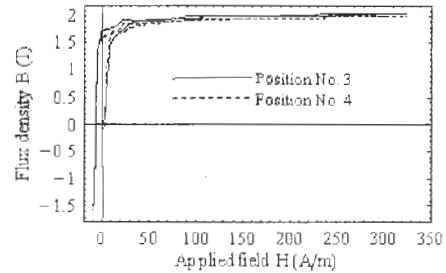


Fig. 12 Magnetization curves in the lancet domains in Fig. 10

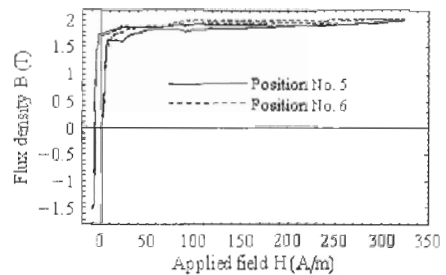


Fig. 13 Magnetization curves in the strained parts in Fig. 10

475.

- 2) 斎藤兆古：知的可視化情報処理(解説論文)－その 2 画像の支配方程式－, 日本 AEM 学会誌, Vol. 10, No. 1(2002)pp. 41-52.
- 3) 斎藤兆古：知的可視化情報処理(解説論文)－その 3 画像処理・圧縮－, 日本 AEM 学会誌, Vol. 10, No. 2(2002)pp. 170-177.
- 4) 遠藤久, 斎藤兆古：可視化画像による電磁界解析手法, 日本応用磁気学会誌, Vol. 28, No. 1(2004)pp. 15-22.
- 5) Jackson J. D.: Classical Electrodynamics 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York (1998).