

ビッター法による可視化磁区画像から周波数特性の抽出

Extraction of Frequency Characteristics from Visualized Magnetic Domain Images by Bitter Method

須永 高志*¹(学生員), 寺西 正晃*²(学生員), 齋藤 兆古*¹(正員)

Takashi SUNAGA(Stu.Mem.), Masaaki Teranishi(Stu.Mem.), Yoshifuru SAITO(Mem.)

The Bitter method is most commonly observing way of the magnetic domains situation even though it is possible to observe only the surface of specimen. To observe the magnetic domains by Bitter method, magnetic liquid is put on the target magnetic material after electrical field polishing process. Applying magnetic field to this magnetic material covered by magnetic fluid makes it possible to observe the magnetic domain dynamics by a microscope. We have previously reported that local magnetization characteristics could be obtained from the visualized magnetic domain dynamics. This paper extracts the $1/f$ fluctuations from the visualized magnetic domain dynamics.

Keywords: magnetic domain dynamics, local magnetization characteristic, visualized, magnetic domains situation, Bitter method.

1 緒言

磁性鋼板は電気・電子機器を構成する主要な材料である。一般に、磁性材料は磁区と呼ばれる微小磁石の集合で構成され、外部磁界に応じて材料中の磁気エネルギーが最小となるように磁区が変化する。すなわち、磁性材料の磁化過程は外部磁界に対する磁区挙動である。所望の磁化特性を持つ材料開発・評価に、磁区挙動の可視化は磁化過程を掌握するために重要な役割を担う。磁区挙動の可視化は、磁性コロイド溶液を用いたビッター法、電子顕微鏡に拠る方法、磁気光学効果を利用した方法等で行われる[1]。

ビッター法は手軽な方法であるが、磁区間の磁壁しか観察できない。また、磁気光学的方法は磁性体表面の磁区挙動可視化に限定される。電子顕微鏡に拠る方法は磁性体内部の磁区挙動を観察可能とするが、高価な機器を必要とする。従来、我々は磁区の電子顕微鏡画像から磁性体の磁化特性を抽出する全く新しい方法を提案した[2]。現在、我々は安価な設備で磁性体の磁壁を可視化可能とするビッター法を用いて磁性体の磁化特性を抽出する方法を開発している[3]。

本稿では、ビッター法で可視化した磁壁動画像から $1/f$ ゆらぎ周波数成分が分布する領域を抽出するを試みる。一般に、磁性体は磁気ノイズを電子回路へ与えることや磁気飽和による非線形特性を呈することが知られている。このなかで磁気ノイズ発生メカニズムを解明するため、ビッター法による磁壁の動画像の時間領域周波数特性から、特に磁気ノ

イズに関係すると考えられる $1/f$ ゆらぎ周波数成分分布の可視化を試みる[4]。

2 ビッター法による磁壁移動の可視化と磁化特性

2.1 ビッター法

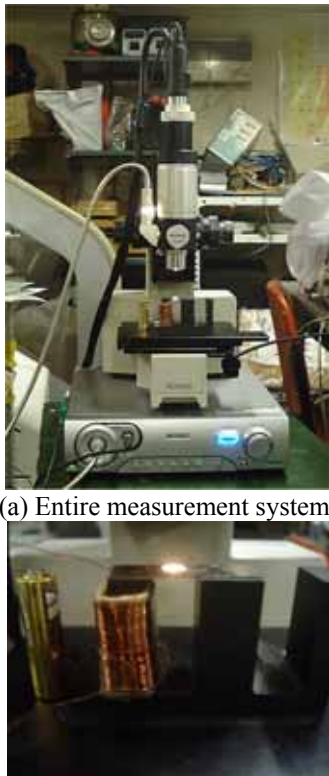
ビッター法による磁壁可視化の原理について述べる。試料表面の磁壁を観察するために、反射型の金属光学顕微鏡を用いる。顕微鏡の倍率は、通常、100~200 倍程度でもよいが、本稿では、機材の都合から、全て 750 倍で行った。試料台に試料を載せて、表面歪みを取り除いた研磨面にスポイトで磁性コロイド溶液をたらし、カバーガラスを載せて観察する。強磁性微粒子 (γ 酸化鉄) のコロイド液を強磁性体表面につけると、コロイド液内に分散していた酸化鉄の微粒子が、磁壁付近の急峻な磁化変化に起因する漏れ磁束の急激な勾配に反応し、表面近くの磁壁の観測ができる。この引き付けられた微粒子を光学顕微鏡で観察する[1,5,6]。

この原理はマグネットビューワーと呼ばれる商品などに応用されており、比較的面倒な実験準備を必要とせずに磁壁を観察可能とする。Fig.1 は磁壁移動の可視化に使用した実験装置を示す。励磁コイルを使って周波数 1 [Hz] の交流磁界を観測対象に印加する。Table 1 に珪鉄と励磁コイルの仕様を示す。顕微鏡は KEYENCE 社の HD 中倍率ズームレンズ VH-Z75 に高精細クイックマイクロスコープ VH-5000 を接続したものである。動的磁壁移動を可視化した。Fig.2 は観測したフレーム画像の例を示す。

2.2 磁壁の可視化

連絡先：須永 高志, 〒184-8594 法政大学院工学研究科
電気工学専攻齋藤兆古研究室,
e-mail: sunaga@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

*¹法政大学大学院, *² 現在ブリジストンタイヤ(株)



(a) Entire measurement system.

(b) Yoke and exciting coil.

Fig.1 Experimental device for magnetic wall observation.

Table 1 Various constants used in the experiment.

	Number of turns	The diameter of a coil	The length of a coil
Magnetization coil	300[Turn]	10[mm]	30[mm]
Detector coil	100[Turn]	4[mm]	10[mm]

2.2.1 軟鉄

金属中で最も大きな飽和磁束密度を持つ軟鉄を 30[Hz]のフレームレートで撮影し、印加した外部磁界の周波数は 1[Hz]として実験を行った。

2.2.2 無方向性珪素鋼板

Fig.2 に示す軟鉄に珪素を添加し、飽和磁束密度は低下するが鉄損を削減した無方向性珪素鋼板、いわゆる電気鉄板と呼ばれる低損失珪素鋼板の磁区挙動を観察した。

Fig.3 は観測された磁区フレーム画像を示す。軟鉄と同様に、30[Hz]のフレームレートで撮影し、印加した外部磁界の周波数は 1[Hz]として実験を行った。

2.2.3 磁区画像から動的部分の抽出

ピッター法によって観察された磁区画像には、磁性流体の動き以外にも磁性流体の不動部分と珪素鋼板そのものの物理的な傷なども含まれているの

で、その不動部分を削除し、動画部分だけの抽出を行う。Fig.4 は無方向性珪素鋼板の磁区画像から不動部分を取り除いた動的部分の画像を示す。

Fig.4 を各画素単位でフレーム方向にフーリエ変換をすることによって周波数特性を求めることができる。ここでは、周波数特性がどのような傾向を示しているかを、非線形系で観察される 1/f ゆらぎで評価する。

2.3 モノクロ濃淡比

1 周期の外部磁界印加させた場合、動的部分の磁区画像を Fig.4 に示す。この画像の濃淡分布を構成する全画素値のフレーム方向への変化を Fig.5 に示す。

外部磁界 1 周期に対して、モノクロ濃淡比が 2 周期する。これは磁性流体が磁界、もしくは磁化の極性に関係なく吸着されるためである。すなわち、外部磁界の正と負の極性、それぞれで磁性流体の吸着がなされるためである[6]。

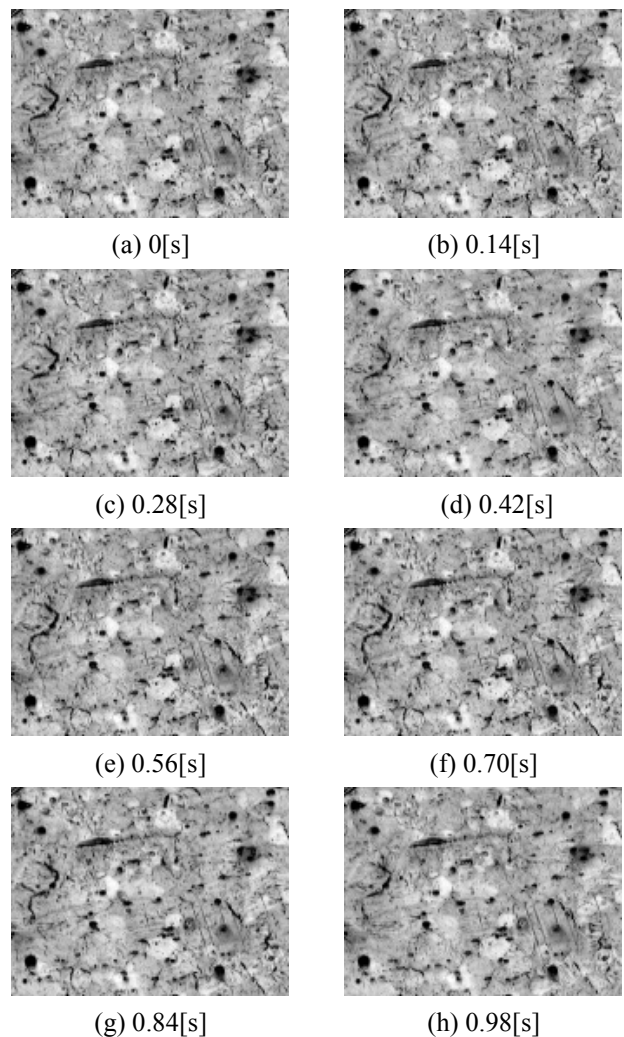


Fig.2 Frame images of magnetic wall sample: soft iron.

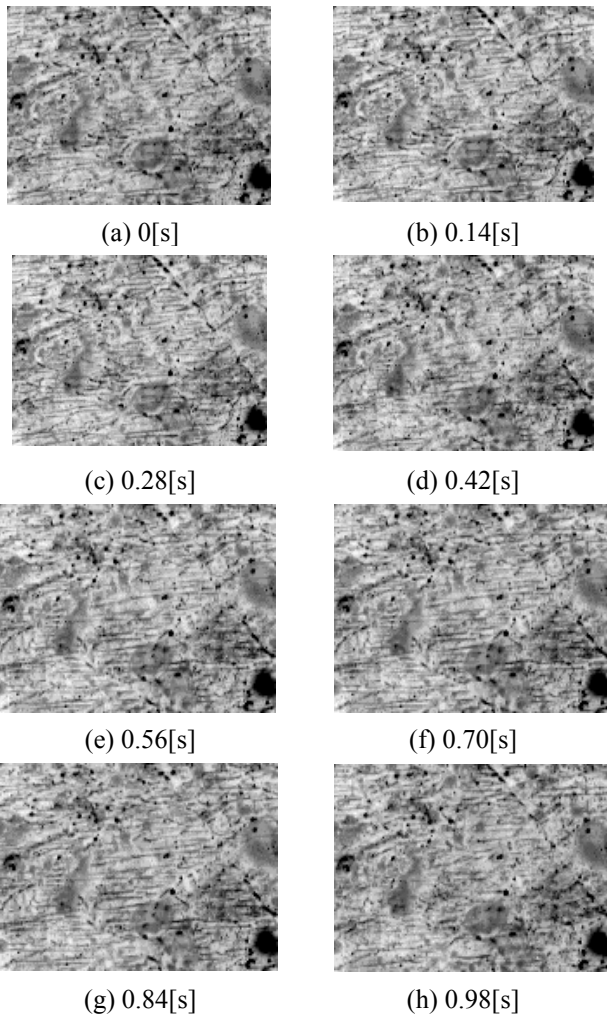


Fig.3 Frame images of magnetic wall, sample: silicon steel.

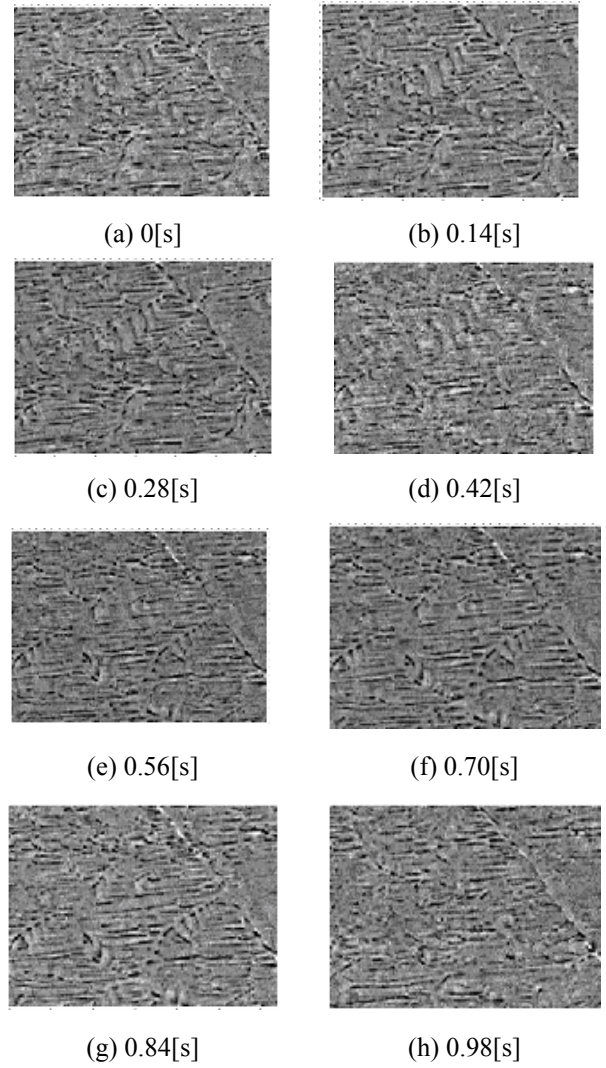


Fig.4 Frame images of dynamic parts sample: silicon steel.

3 磁区画像の周波数特性

3.1 1/f ゆらぎ周波数

「1/f ゆらぎ」は自然界に多く存在し、例えば小川のせせらぎ、小鳥の囀り、爽やかなそよ風などの心安らくリズムが相当する。同様に、心地良い音楽を聴いたり、快い感じを抱いたり、安静にしているときの脳波にも「1/f ゆらぎ」が存在する。

全フレームの各画素値をフレーム順に時系列に並べた1次元データに対してフーリエ変換を適用し、フーリエ・パワースペクトラムの周波数に対する変化率からゆらぎの特徴を求める。

より具体的には、ある信号へ離散フーリエ変換(DFT, Discrete Fourier Transform)を適用し、各周波数に対するパワースペクトラムを計算する。周波数の低下とともにパワースペクトラムが増加するような信号の中で、パワースペクトラムの振幅が周波数に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。視覚的に判りやすくするために、よく行われる方

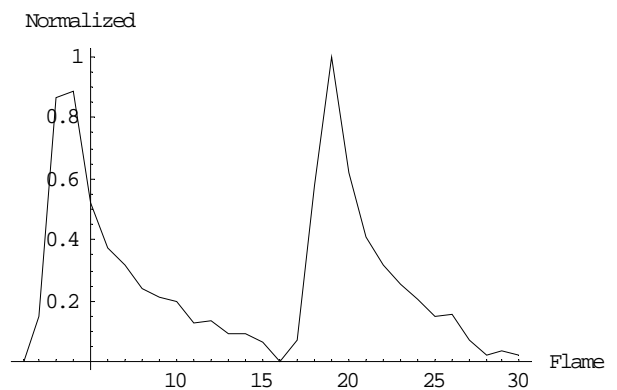


Fig.5 Pixel values histogram of domain dynamic image.

法は、フーリエ・パワースペクトラム対周波数の両対数グラフを描き、描かれる線図の傾きによってゆらぎの種類を大別する方法である。

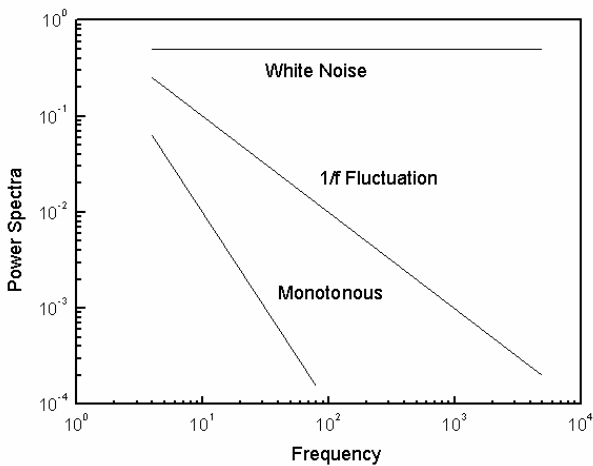


Fig.6 Typical Fourier power spectra.

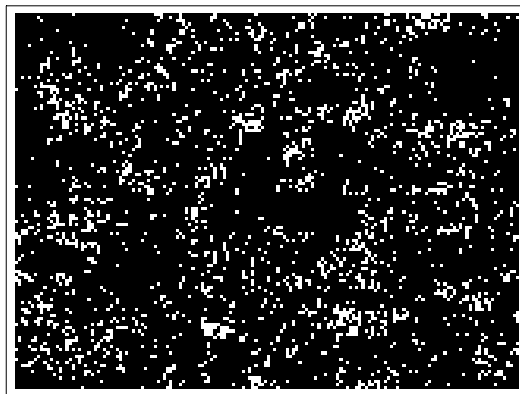
Fig.6 にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す。Fig.6 において、直線の傾きが 0 の場合は主にホワイトノイズである。また、直線の傾きが急になる程単調な信号である。そしてホワイトノイズと単調な信号の中間的な信号で傾きが約-1 の場合を「1/f ゆらぎ」と呼び、人間が心地よいと感じる信号と言われている。

3.2 1/f ゆらぎ周波数部分の可視化

飽和磁束密度は最も高いが鉄損も大きい軟鉄における 1/f ゆらぎ周波数成分(厳密には周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗)分布を調べた結果を Fig.7 に示す。Fig.7 では見易くするため、周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗を 1, それ以外を 0 と二値化した。白色の点部が 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁壁部分を示す。

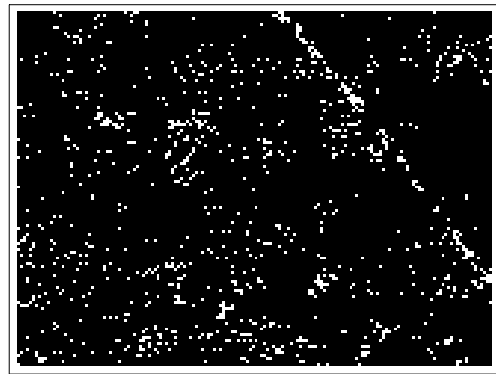
Fig.7 から、通常の軟鉄では 1/f ゆらぎ周波数成分は材料全体の磁壁に分布することが判る。

Fig.8 は無方向性珪素鋼板の 1/f ゆらぎ周波数分布を示す。Fig.8 の結果は Fig.7 と同様に見易くするため、周波数 f に対して-0.95 乗から-1.05 乗の画素値



White : 1/f frequency

Fig.7 Extracted 1/f frequency fluctuation parts in soft iron.



White : 1/f frequency

Fig.8 Extracted 1/f frequency fluctuation parts of silicon steel.

を 1, それ以外の画素値を 0 と二値化してある。白色の点部が 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁壁部分を示す。Fig.8 から、無方向性珪素鋼板は Fig.7 に示されている軟鉄よりも白点部が削減され、1/f ゆらぎ周波数で運動する磁壁が少ないことが判る。

拠って、Figs.7,8 の比較は、鉄損を削減するためにシリコンを含有させた無方向性珪素鋼板は 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁区を削減し、結果として磁性体から生ずるノイズを削減している可能性が判明した。この検証には、後に示す Figs. 7,8 の白色部に対する局所的 B-H 磁化特性(Fig.10,11)を詳細に吟味する必要が有る。すなわち、Figs.7,8 の白色部の B-H 磁化特性が大きな不連続性や飽和磁束密度の増加などを呈すれば、1/f ゆらぎ周波数特性が磁気ノイズに寄与している可能性は極めて大きいと考えられる。

3.2 局所的磁化特性

モノクロ画像の濃淡を与える画素値とサーチコイルから得られる平均的磁束密度を対応させて、全体的な磁化曲線を描く。具体的には画像の画素値の平均値と実測磁束密度との比から換算係数を計算し、モノクロ画素値を磁束密度に比例した画素値へ変換する。

Fig.9 は平均的磁化特性, Fig.10(b)と Fig.11(b)はそ

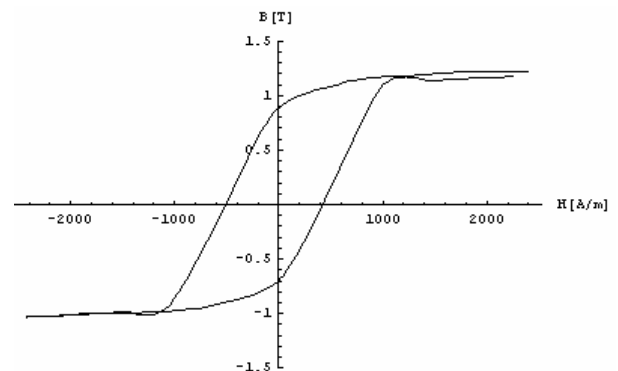
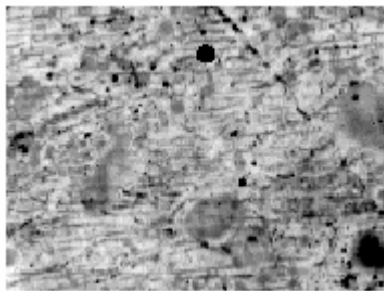
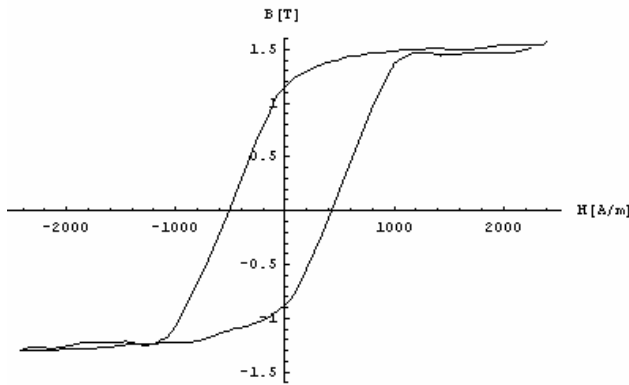


Fig.9 Average magnetization characteristic.

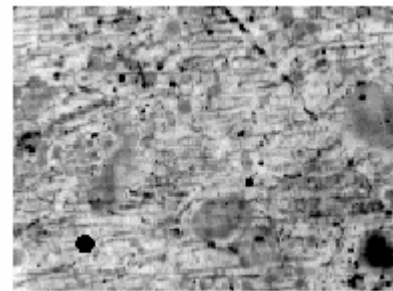


(a) A frame image of magnetic wall sample: silicon steel.

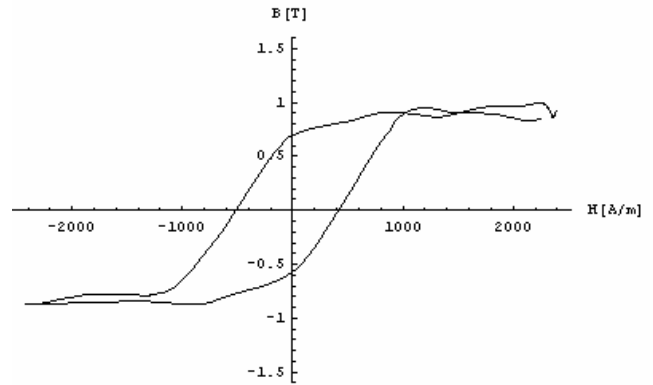


(b) Magnetizing properties of a point “ ”.

Fig.10 Local magnetization characteristics exhibiting 1/f fluctuation points.



(a) A frame image of magnetic wall sample: silicon steel.



(b) Magnetizing properties of a point “ ”.

Fig.11 Local magnetization characteristics not exhibiting 1/f fluctuation points.

れぞれ Fig.10(a)と Fig.11(a)の画像中の黒点部の局所的磁化特性である。黒点部は 1/f ゆらぎが検出された部分とされなかった部分のそれぞれの位置を示す。

1/f ゆらぎ周波数特性が検出されなかった点では、Fig.11(b)に示すように、飽和磁束密度が Fig.9 のいずれと比較しても低い。この結果は、1/f ゆらぎ周波数特性が検出されなかった点には非磁性体である珪素が多く含まれている部分と考えられる。逆に、Fig.10(b)では、飽和磁束密度が Fig.9 の平均的磁化特性の飽和磁束密度に比べて高い。これは、1/f ゆらぎ周波数特性が検出された点には、非磁性体である珪素がほとんど含まれていない軟鉄部分と考えられる。

4 結言

本稿では、ビッター法で可視化した磁壁動画像から 1/f ゆらぎ周波数成分が分布する部分を可視化した。

一般に、磁性体は磁気ノイズを電子回路へ与えることや磁気飽和による非線形特性を呈することが知られているが、この中で磁気ノイズ発生メカニズムを解明するため、ビッター法による磁壁の可視化動画像の周波数特性から、特に磁気ノイズに関係

すると考えられる 1/f ゆらぎ周波数成分分布領域の可視化を試みた。

本稿では、金属中で最も飽和磁束密度が高い軟鉄と軟鉄の鉄損を削減するために珪素を含有させた無方向性珪素鋼板に対する 1/f ゆらぎ周波数分布特性を可視化して吟味した。その結果、鉄損を削減するためにシリコンを含有させた無方向性珪素鋼板は 1/f ゆらぎ周波数で運動する磁区部分を削減し、結果として磁性体から生ずるノイズを削減している可能性が判明した。このノイズに関する仮説の検証にはより詳細な局所的磁化特性と 1/f ゆらぎ周波数特性で動く磁壁の関係を吟味する必要があり、これが次の研究課題の一つである。

(2006年11月15日受付, 2007年2月15日再受付)

参考文献

- [1] Alex Hubert, Rudolf Schaefer, Magnet Domains, Springer, 1998.
- [2] H. Endo, S. Hayano, Y. Saito, M. Fujikura, and C. Kaido, Magnetization Curve Plotting from the Magnetic Domain Images, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp.2727-2730, 2001.
- [3] 藤咲忠春, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, ビッター法による可視化画像から磁化特性の抽出, 可視化情報学会シンポジウム, B211, 2005.

- [4] 寺西正晃,丸山和夫,早野誠治,齋藤兆古,堀井清之,
自然界の画像が持つ $1/f$ 周波数成分の可視化,可視化
情報シンポジウム,B108,2005.
- [5] 川西健次,近角聰信,櫻井良文,磁気工学ハンドブッ
ク,朝倉書店,1998.
- [6] 須永高志,寺西正晃,齋藤兆古,堀井清之,ピッター
法による可視化磁区画像から $1/f$ ゆらぎ抽出,可視化
情報シンポジウム,A311,2005.