

A 3 1 1

## ビッター法による可視化磁区画像から 1/f ゆらぎの抽出

須永 高志<sup>○</sup>, 寺西 正晃, 齋藤 兆古(法政大学大学院)

堀井 清之(白百合女子大学)

### Extraction of 1/f Fluctuation from Visualized Magnetic Domain Images by Bitter Method

Takashi SUNAGA, Masaaki TERANISHI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

The Bitter method is most commonly observing way of the magnetic domains even though it is limited to the surface observation 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.

Final purpose of our research on visualized magnetic domain dynamics is to work out a fully automatic quality control system for the thin magnetic materials by visualizing the magnetic domain dynamics.

In the present paper, we try to extract the magnetic domain locations exhibiting 1/f fluctuated frequency movement from the dynamic magnetic domains because it may be considered one of the causes of magnetic noise as well as chaotic behaviors.

**Keywords:** Bitter method, Magnetic domain dynamics, 1/f-fluctuation frequency

#### 1. 序論

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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>2,3)</sup>。

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ことを試みる。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。このような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<sup>4)</sup>。

#### 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。金属試料の表面の磁壁を観察するためには、反射型の金属光学顕微鏡を用いる。この時、倍率は 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、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（ $\gamma$ 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よる表面への漏れ磁束の傾斜に引き付けられて集まり、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<sup>5,6)</sup>。

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。励磁コイルから周波数 1Hz の交流磁界を観測対象に印加する。Table 1 に継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。

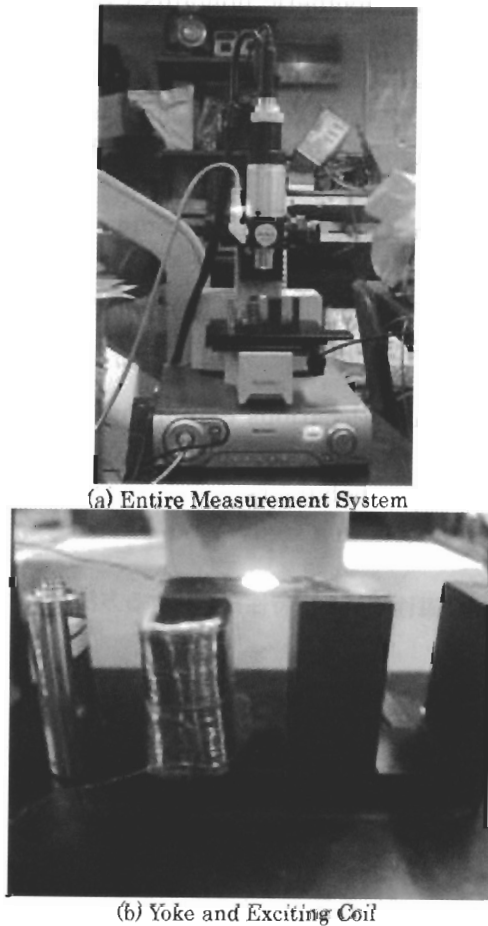


Fig. 1 Experimental device for magnetic wall observation

Table 1 Various Constants used in the Experiment

コイル	巻数	コイルの直径	コイルの長さ	コイルの素材
励磁コイル	300[Turn]	10[mm]	30[mm]	直径 0.5[mm]のホルマル線
検出コイル	200[Turn]	4[mm]	10[mm]	直径 0.4[mm]のホルマル線

## 2.2 磁壁の可視化

### 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の磁壁の動的移動を可視化した。Fig. 2 は観測したフレーム画像の例を示す。

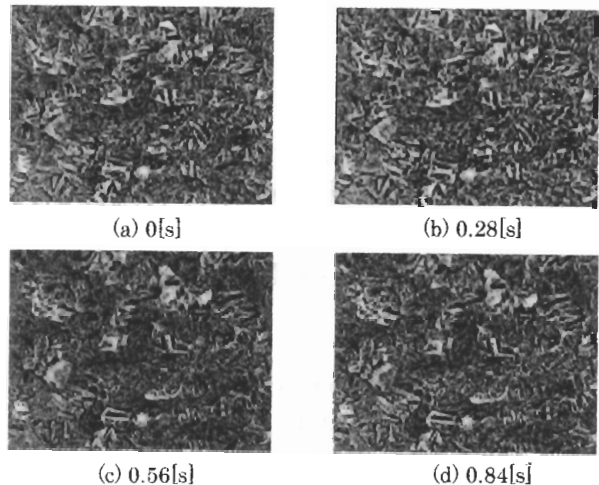


Fig. 2 Example of Magnetic Wall Flame Images  
Sample: Soft Iron

Fig. 3 は Fig. 2 に示されている軟鉄全体の磁区画像を 6 等分し、各部分の磁化特性を計算した結果であり、各部分が異なる磁化特性を呈する。しかし、それらの和で与えられる全体の磁化特性は不連続性が少ないきれいな B-H 特性である。

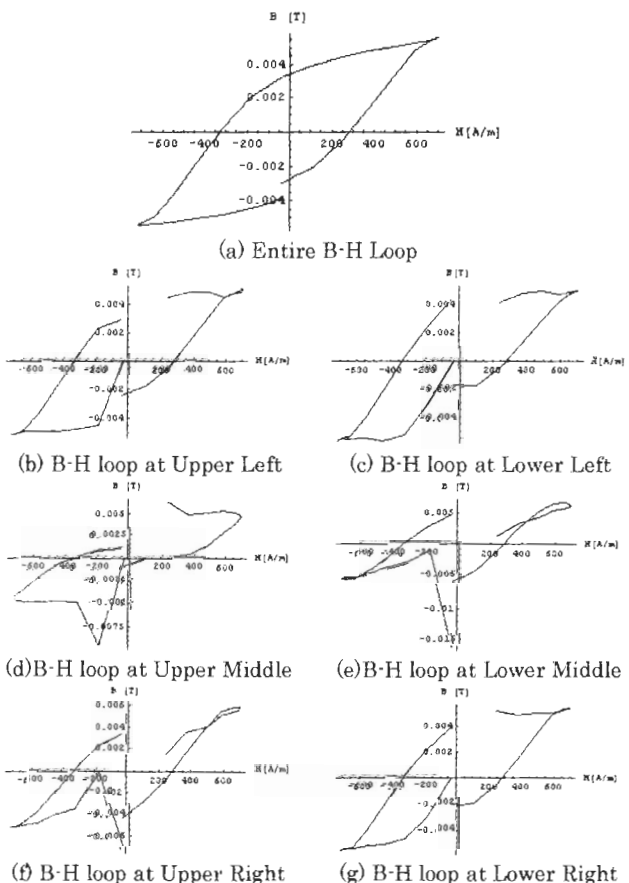


Fig. 3 Entire and Local B-H Loops of the Tested Soft Iron

### 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. 4 は観測された磁区フレーム画像を示す。

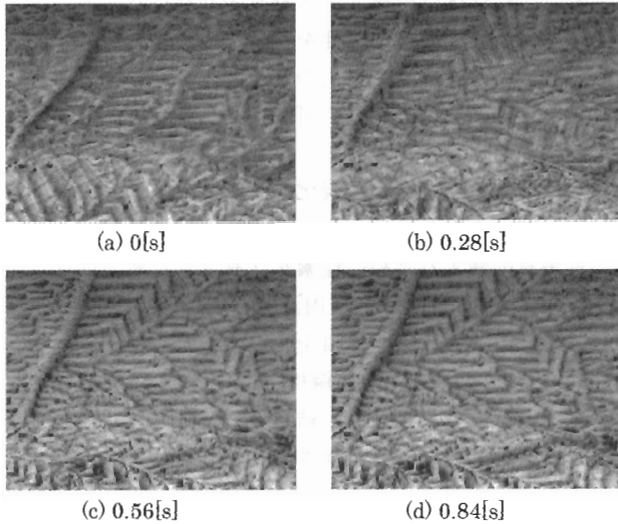


Fig. 4 Example of Magnetic Wall Flame Images  
Sample: Silicon Steel

Fig. 5 は Fig. 4 に示す無方向性珪素鋼板を 6 等分した場合全体の磁化特性と各部分の磁化特性を示す。

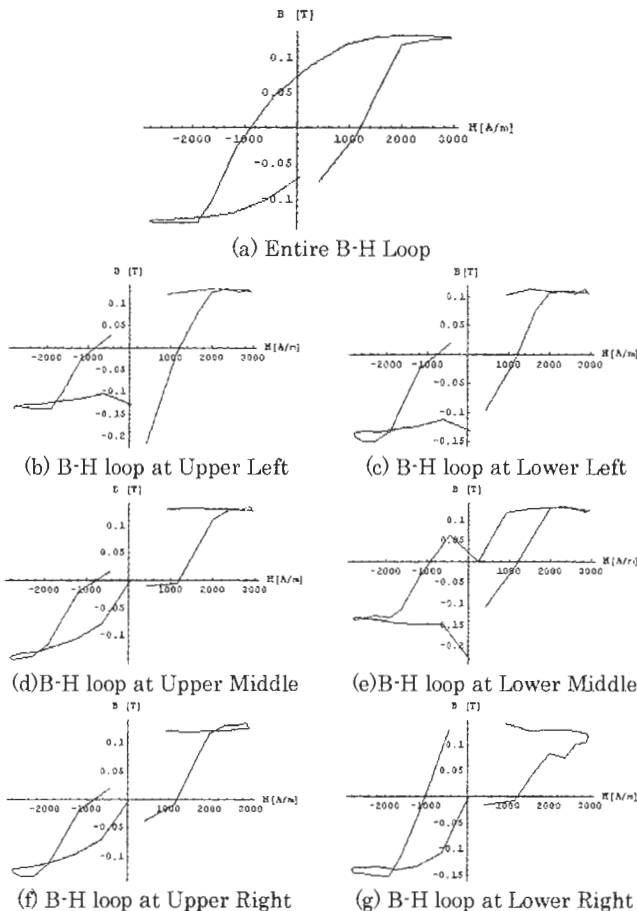


Fig. 5 Entire and Local B-H Loops of the Tested Silicon steel.

Fig. 5 の結果は、無方向性珪素鋼板も Fig. 3 と同様に個々の領域で異なった磁化特性を呈するが、全体としては滑らかに変化する B-H 特性をもつことが判る。これは磁性体の発生するノイズが材料全体としては小さいが材料の場所に拠ってはかなり大きいことを意味する。

### 3. 1/f ゆらぎ周波数部分の可視化

#### 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ぐリズムが相当する。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 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。

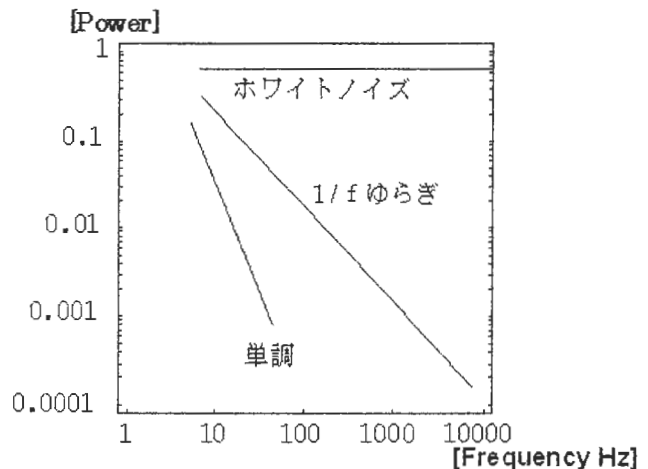


Fig. 6 Typical Fourier Power Spectra

#### 3.2 磁性体の 1/f ゆらぎ周波数部分の可視化

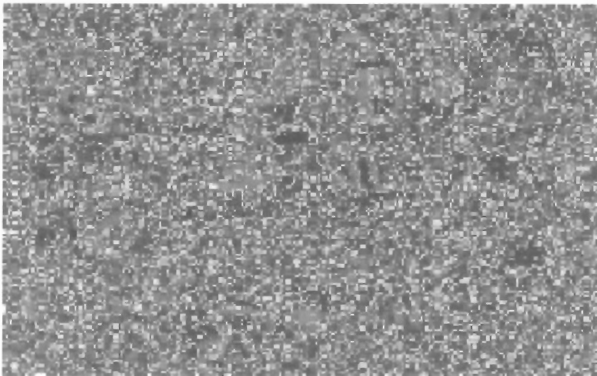
飽和磁束密度は最も高いが鉄損も大きい軟鉄における 1/f ゆらぎ周波数成分 (厳密には周波数 f に対して-0.95

乗から-1.05 乗) 分布を調べた結果を Fig. 7 に示す. Fig. 7 では, 見易くするため明度とコントラストを調整してある. 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. 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に渡りの磁壁が  $1/f$  ゆらぎ周波数で運動することが判る.

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に明度とコントラストが調整されている. また, Fig. 7 と同様に白色の点部が  $1/f$  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色の点部が削減され,  $1/f$  ゆらぎ周波数で運動する磁壁が少ないことが判る.



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

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  $1/f$  ゆらぎ周波数特性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. この可能性の検証は, Figs. 7, 8 の白色部などのより細かい部分に対する Figs. 3, 5 に示す局所的 B-H 磁化特性を詳細に吟味する必要がある. すなわち, Fig. 7, 8 の白色部の B-H 磁化特性が大きな不連続などを呈すれば,  $1/f$  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.

#### 4. まとめ

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し可視化を試みた.

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. このような磁気ノイズ発生の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る.

#### 参考文献

- 1) H. Endo, S. Hayano, H. Mogi, M. Fujikura, C. Kaido and Y. Saito: Estimation of Iron Loss Distribution by Image Helmholtz Equation Method, IEEE Trans. Magn., Vol. 39 No. 3, pp. 1377-1380, (2003年3月)
- 2) 大窪雄亮, 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之: 球状永久磁石を用いて模擬した磁性鋼板の動的磁区挙動の可視化, 可視化情報, Vol. 23, No. 1 (2003) pp. 263-266.
- 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, 2005年7月, B211.
- 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, 可視化情報学会シンポジウム, 2005年7月, B108.
- 5) Alex Hubert, Rudolf Schaefer: "Magnetic Domains" (Springer, 1998).
- 6) 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).