

ビッター法による磁区画像の鉄損分布の可視化

Iron Loss Distribution Visualization in Magnetic Domain Images by the Bitter Method

須永高志¹⁾, 齋藤兆古²⁾
Takashi SUNAGA

¹⁾ 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻
²⁾ 法政大学工学部システムデザイン学科

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. Applying magnetic field to this magnetic material covered by magnetic fluid makes it possible to observe the magnetic domain dynamics by a microscope.

This paper reveals that the parts exhibiting $1/f$ fluctuation frequency characteristic give high the iron loss while not exhibiting $1/f$ fluctuation parts, i.e. containing much silicon, give low iron loss. Thus, it is revealed that the mixture rate of iron and silicon determines the optimal silicon steel composing most of the electrical machines.

Keyword: Bitter method, Magnetic domains visualization, $1/f$ Fluctuation

1. はじめに

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の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ットで磁性コロイド溶液を垂らし、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

原稿受付 2008年2月29日
発行 2008年3月31日
法政大学情報メディア教育研究センター

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]。



(a) 実験装置



(b) 励磁コイル

Fig.1 ビッター法による磁壁移動可視化の実験装置

表1 励磁コイルと検出コイルの寸法

	巻数 [Turn]	コイルの 直径 [mm]	コイルの 長さ [mm]	線 [mm]
励磁コイル	300	10	30	0.5
検出コイル	200	4	10	0.4

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。表 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。交流磁界は試料を磁化するための励磁コイルに 0.10[V]~1.00[V]まで 0.05[V]単位で印加電圧を変えて与えた。また、試料が全く磁化されていない状態も観察した。

2.2 磁区挙動の可視化

2.2.1 軟鉄の磁区挙動

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。倍率は 100~200[倍]程度でよいとあるが、本研究では、倍率 300[倍]と 750[倍]で実験を行い、Fig.2 に示す。

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]として実験を行い、Fig.3 に示す。



(a) 0.00[V]

(b) 1.00[V]

倍率：300[倍]



(c) 0.00[V]

(d) 1.00[V]

倍率：750[倍]

Fig.2 ビッター法による磁壁移動可視化 軟鉄。



(a)0.00[s]

(b)1.00[V]

倍率：300[倍]



(c)0.00[s]

(d)1.00[V]

倍率：750[倍]

Fig.3 ビッター法による磁壁移動可視化 珪素鋼板

軟鉄、珪素鋼板においては、外部磁界によって変化する筋状の模様が磁壁部分に観察される。

2.2.3 磁化特性

測定された誘起電圧波形を積分することで磁束密度の変化を算出することができる[3][4]。各試料を磁化させるための印加電圧を 1.00[V]の時の磁化特性を求めると、Fig.4 , Fig.5 のようになる。

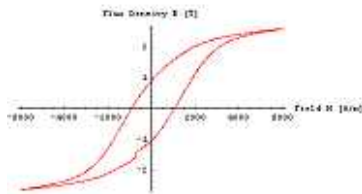


Fig.4 実験結果による磁化特性 軟鉄

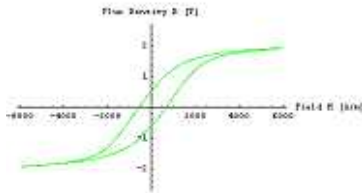


Fig.5 実験結果による磁化特性 珪素鋼板

軟鉄に珪素を添加したため、軟鉄に比べ、珪素鋼板の飽和磁束密度が低くなっていることが判る。

3. 磁区画像の周波数特性

3.1 1/f ゆらぎ

「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。

任意の周期関数 $f(t)$ をフーリエ級数で表現すると、式(1)となる。

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cos(i2\pi ft) + b_i \sin(i2\pi ft)] \\
 &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \cos\left[2\pi f i t - \tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right)\right] \\
 &= a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \cos\left[2\pi f i t - \tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right)\right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

離散値系フーリエ変換では、定数項と余弦波の項が実部、正弦波の項が虚部へそれぞれ対応する。スペクトラムの振幅は実部と虚部のノルムとなる。

(1)式のパワースペクトラムの振幅 c_i が周波数 if に対して反比例する信号を「1/f ゆらぎ」と呼ぶ。フーリエ・パワースペクトラム対周波数の関係を両対数グラフに描き、描かれた線の傾きによってゆらぎの種類を大別する。

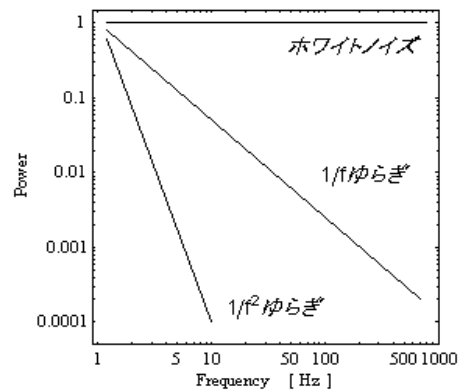


Fig.6 フーリエ・パワースペクトラムの例

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 Fig.6 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。

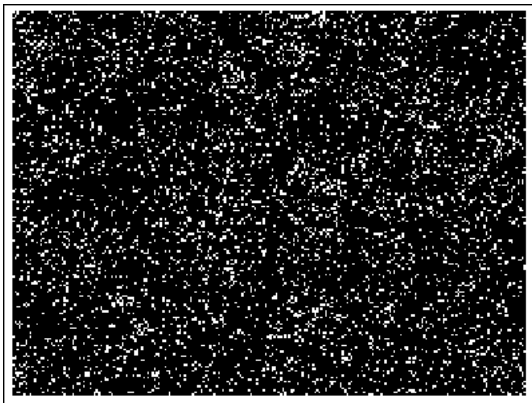
3.2 1/f ゆらぎ周波数部分の可視化

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-0.975 乗から-1.025 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。

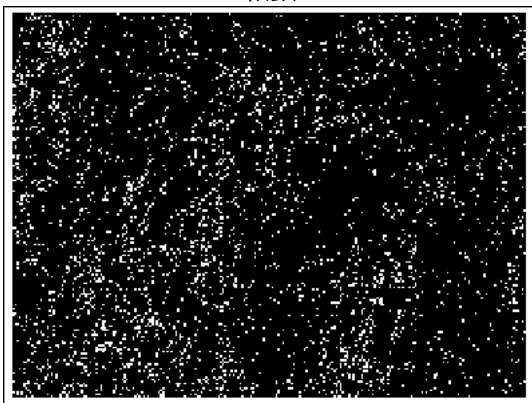
Fig.7 から、通常の軟鉄では 1/f ゆらぎ周波数成分は材料全体の磁壁に分布することが判る。

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 -0.975 乗から -1.025 乗の画素値を 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。



1/f ゆらぎ : 4776[個]

Fig.7 1/f ゆらぎの二値化分布図 750[倍]
軟鉄



1/f ゆらぎ : 3291[個]

Fig.8 1/f ゆらぎの二値化分布図 750[倍]
珪素鋼板

よって、Fig.7, Fig.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 Fig.7, Fig.8 の白色部に対する B-H 磁化特性を詳細に吟味する必要が有る。すなわち、Fig.7, Fig.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。

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。

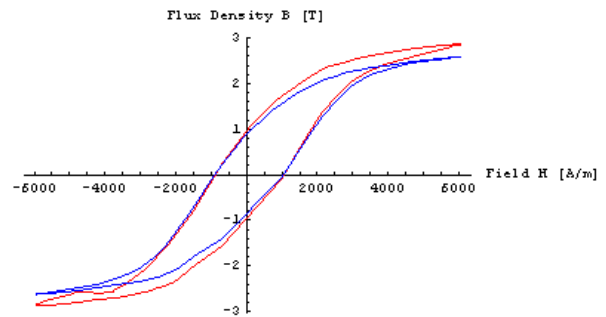


Fig.9 1/f ゆらぎによる磁化特性 軟鉄

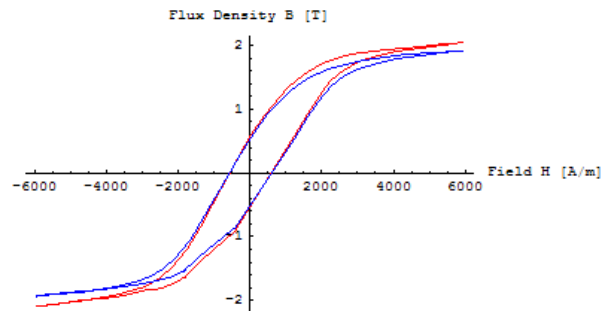


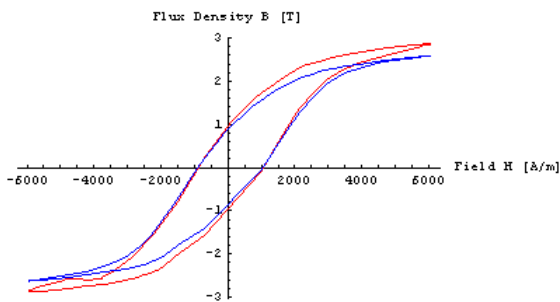
Fig.10 1/f ゆらぎによる磁化特性 珪素鋼板

各画素単位の磁化特性を求め、1/f ゆらぎ呈する部分と 1/f ゆらぎ呈さなかった部分の平均的磁化特性を求めると Fig.9, Fig.10 のようになる。赤のグラフが 1/f ゆらぎ呈する部分、青のグラフがそれぞれ 1/f ゆらぎ呈さなかった部分の平均的磁化特性となっている。

3.3 1/f ゆらぎと鉄損の関係

3.2 で求めた磁化特性より、1/f ゆらぎ呈する部分と 1/f ゆらぎ呈さなかった部分それぞれの鉄損を求め、両者を比較する。鉄損は B-H ループの面積であるので、B-H ループで囲まれる面積を積分することで求めることができる。B-H ループで囲まれる面積を求める積分は、B-H ループを上昇と下降部分に分割することにより、積分が容易になる。1/f ゆらぎを呈する部分と呈さない部分それぞれの平均的

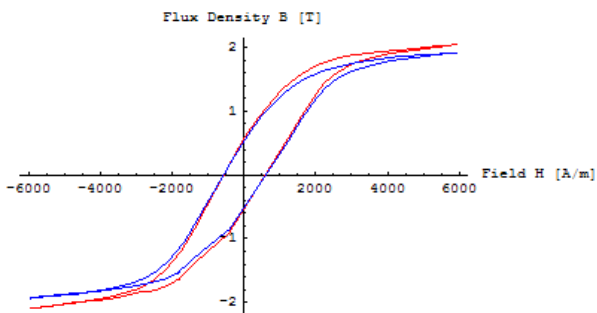
磁化特性から求めると、Fig.11 , Fig.12 のようになる。



青・・・1/f ゆらぎ あり: 8648.97 [J/m²]

赤・・・1/f ゆらぎ なし: 7025.53 [J/m²]

Fig.11 1/f ゆらぎによる鉄損 軟鉄



青・・・1/f ゆらぎ あり: 3272.33 [J/m²]

赤・・・1/f ゆらぎ なし: 3038.98 [J/m²]

Fig.12 1/f ゆらぎによる鉄損 珪素鋼板

同様に軟鉄、珪素鋼板の青の 1/f ゆらぎを呈する部分は赤の呈さない部分に比べ、鉄損が高いことがわかった。

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。

また、1/f ゆらぎ周波数特性を呈する磁性体は、飽和磁束密度が高いが、鉄損も大きくなり、1/f ゆらぎ周波数特性は磁気ノイズの原因になっていると明らかになった。

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, ビ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.