

C 2 0 7

ビッター法による磁性材料の鉄損分布の可視化

須永 高志[○], 齋藤 兆古(法政大学大学院) 堀井 清之(白百合女子大学)

Iron Loss Distribution Visualization in Ferromagnetic Materials by Bitter Method

Takashi SUNAGA, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

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. 緒論

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、磁気光学的方法是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¹⁾。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^{2,3)}。

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も試みた⁴⁾。

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可視化することを

試み、ゆらぎ周波数を呈する部分と呈しない部分の磁化特性を評価し、鉄損とシリコン含有率との関係を明らかにせんと試みる。

2. 磁壁の可視化

2.1 無方向性珪素鋼板

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.1 は観測された磁区フレーム画像を示す。

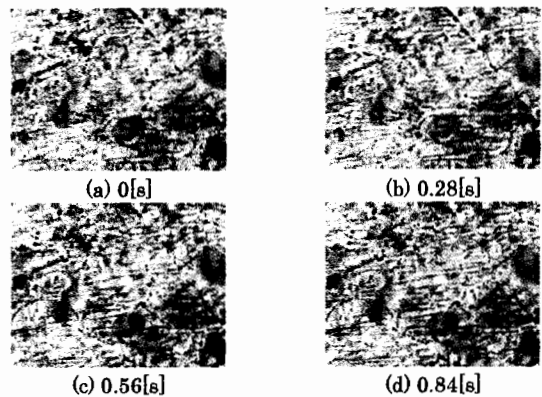


Fig. 1 Example of Magnetic Wall Flame Images
Sample: Isotropic Silicon Steel.

いずれの珪素鋼板も後述の Figs. 3, 4 に示すよう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は材料全体として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. 2 にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す。Fig. 2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。

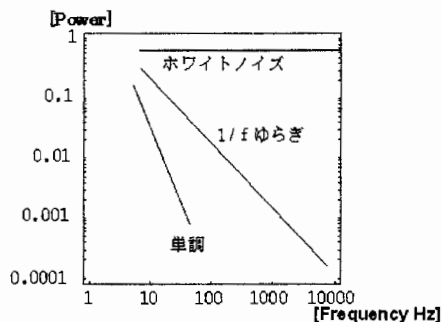


Fig. 2 Typical Fourier Power Spectra.

4. 実験結果

可視化された無方向性珪素鋼板の1/f ゆらぎ周波数分布部分を抽出し、1/f ゆらぎを呈する部分と呈しない部分の平均画素値から求めたB-H特性をFigs. 3,4に示す。Fig. 3に比べFig. 4の1/f ゆらぎを呈する部分は最大飽和磁束密度が高いことが判る。

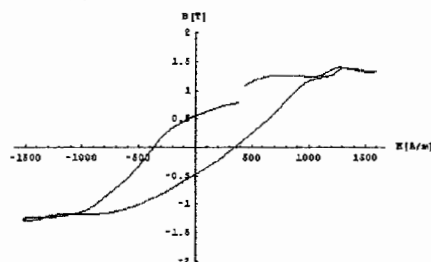


Fig. 3 Local magnetization characteristics not exhibiting 1/f fluctuation:

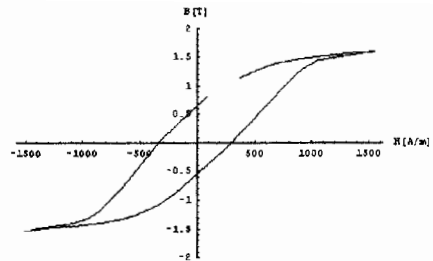


Fig. 4 magnetization characteristics exhibiting 1/f fluctuation.

4. まとめ

本稿では、ビット法で可視化した磁壁動画像から1/f ゆらぎ周波数成分を呈する部分と呈しない部分のB-H特性を比較することで、

1. シリコンリッチ部分は1/f ゆらぎ周波数を削減する。さらに最大飽和磁束密度を低下させ、結果として鉄損を削減する。
2. シリコン非リッチ部分は1/f ゆらぎ周波数を呈するが、最大磁束密度も低下しない。結果として鉄損が多い部分と考えられる。
3. 従来から、珪素鋼板のシリコン含有率は6.5%が最適と言われているが、これは最大飽和磁束と鉄損の最大妥協点と考えられる。

以上の考察は珪素鋼板の元素分布分析が可能ならば妥当性が詳細に検討できると考えられる。

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)
- 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) 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, 可視化情報シンポジウム (2005) B108.
- 5) Alex Hubert, Rudolf Schaefer: "Magnetic Domains" (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).