

## B203 バルクハウゼン現象の可視化法に関する一考察

勝又 理毅<sup>○</sup>, 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学)

堀井 清之 (白百合女子大学)

### A Study of Barkhausen Phenomenon Visualization

Masaki KATSUMATA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

Ferromagnetic materials, i.e., iron steel and its composites, are widely used as the frame parts of various artificial products and constructions such as a building, bridge and so on. Because of its mechanical property, iron steel is most popular in use for the frame materials to maintain their mechanical strength. On the other side, nondestructive testing of iron steel is an extremely important way in order to keep their mechanical safeness.

One of the deterministic differences between the ferromagnetic and non-magnetic materials is that all of the ferromagnetic materials when applying external magnetic field attracts major magnetic field; and also magnetization process of ferromagnetic materials always accompanies with the Barkhausen effects. Barkhausen effect is a phenomenon, which happens by movement of magnetic domain.

Magnetic domain structure evaluation of most magnetic material is performed in the uniform magnetic field distribution. In this paper, we propose a designing strategy of the optimal exciting coil as the first step of a nondestructive testing method employing Barkhausen phenomenon. Further, we propose one of the visualizing methodologies of the Barkhausen phenomenon as the second step.

**Keywords:** Magnetic domain, Magnetization characteristic, Magnetic domain dynamics

#### 1. 結論

飛行機の機体, 原子炉の熱交換器など, 装置中の部品検査, そして橋梁やトンネルなどの建設物の機械的強度を検査するために, 非破壊検査は重要な役割を持つ。すなわち, 主として金属の非破壊検査は, 人工的構築物の機械的信頼性を確保する決定的な方途である。

以上のような社会的必要性を鑑み, 我々は強磁性体が磁化される場合, 必然的に伴うバルクハウゼン効果による信号を利用する非破壊検査の一方法について研究・開発を行っている。

多くの金属材料中で, 鉄は最も広汎に使われる構造材である。鉄は機械的性質が制御可能であり, コスト的にも安価である。これが広汎に使われる理由であろう。磁性体の磁化過程は, 可逆的磁壁移動, 非可逆的磁壁移動, さらに可逆的回転磁化領域へ分類される。磁化曲線で考えれば, レイリーの法則が成り立つ範囲が可逆的磁壁移動による磁化過程範囲であり, 外部磁界に最も敏感に反応する磁化過程が非可逆的磁壁移動による磁化過程であり, この磁化過程は不連続な磁壁移動で磁化されるため

に再現性が無く, 周辺へ比較的高周波の磁界変化を与える。これがバルクハウゼン現象と呼ばれる磁性体特有の現象である。回転磁化領域は各磁区中の磁化ベクトルの回転による可逆的磁化過程である。

筆者らは, バルクハウゼン現象を可視化し, 再現性の無いバルクハウゼン現象に共通な特徴を抽出する鉄の非破壊検査装置開発を行っている。多くの磁性材料の磁化特性評価は均一磁界分布を前提とする。よって, 本論文では所望の均一磁界分布を生成する励磁コイルの設計法を述べる。所望の磁界分布を実現する励磁コイル設計は不適切な線形システムを解くことに帰する。この不適切な線形システムを解く一方法として, 本論文ではベクトル型 GVSPM 法 (Generalized Vector Sampled Pattern Matching) を採用する。<sup>1)</sup> また, 抽出したバルクハウゼン信号の可視化法の一方法として, 等価固有値法 (Equivalent Characteristic Value, 以下 ECV と略記) と固有パターン法を採用する。<sup>2)</sup> 前者は, 信号の固有特性を抽出し, 後者は ECV の時間位相の差異を削除し, ECV を可視化画像へ変換する方法である。

## 2. 励磁コイルの設計

### 2.1 システム方程式

変圧器や電動機は、多くの場合、珪素鋼板の積層コアで磁路を構成する。平面状の珪素鋼板の正方形部分を均一に磁化するため、ここでは、Fig.1 に示す装置を考える。上方の正方形部分が所望の磁界分布を実現する範囲であり、下方の正方形部分が磁界を生成する電流分布面である。所望の磁界分布を表すベクトルを  $\mathbf{Y}$  とし、求めるべき電流分布を表す電流ベクトルを  $\mathbf{X}$ 、そして、磁界ベクトル  $\mathbf{Y}$  と電流ベクトル  $\mathbf{X}$  間の関係を表す  $n$  行  $m$  列のシステム行列を  $\mathbf{C}$  とすれば、解くべきシステム方程式は式(1)で与えられる。<sup>1)</sup>

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (1)$$

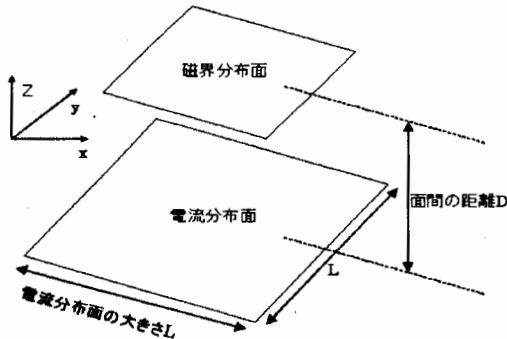


Fig. 1 Schematic Diagram of the Magnetic Field Distribution Control Device

### 2.2 GVSPM 法

#### 2.2.1 基礎方程式

式(1)は式(2)のように書き直される。

$$\mathbf{Y} = \sum_{i=1}^m \mathbf{X}_i \mathbf{C}_i$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3, \dots, \mathbf{C}_m) \quad (2)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_m)^T$$

式(2)の両辺を入力ベクトル  $\mathbf{Y}$  と列ベクトル  $\mathbf{C}_i$  をそれぞれのノルムで正規化し、式(3)を得る。

$$\frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|} = \sum_{i=1}^m \mathbf{x}_i \frac{|\mathbf{C}_i|}{|\mathbf{Y}|} \frac{\mathbf{C}_i}{|\mathbf{C}_i|} \quad (3)$$

or

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{C}'\mathbf{X}'$$

$$\mathbf{X}' = \left( x_1 \frac{\mathbf{C}_1}{|\mathbf{C}_1|}, x_2 \frac{\mathbf{C}_2}{|\mathbf{C}_2|}, \dots, x_m \frac{\mathbf{C}_m}{|\mathbf{C}_m|} \right)^T$$

$$\mathbf{C}' = \left( \frac{\mathbf{C}_1}{|\mathbf{C}_1|}, \frac{\mathbf{C}_2}{|\mathbf{C}_2|}, \dots, \frac{\mathbf{C}_m}{|\mathbf{C}_m|} \right)$$

$$\mathbf{Y}' = \frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|}$$

式(2)は入力ベクトル  $\mathbf{Y}$  が必ずシステム行列の列ベクトル  $\mathbf{C}_i$  との線形結合で与えられることを意味する。し

たがって、 $k$  回目の反復解が与える入力ベクトル  $\mathbf{C}\mathbf{X}^{(k)}$  と入力ベクトル  $\mathbf{Y}$  間の角度の余弦成分、

$$\begin{aligned} f[\mathbf{X}^{(k)}] &= \frac{\mathbf{Y} \cdot \mathbf{C}\mathbf{X}^{(k)}}{|\mathbf{Y}| |\mathbf{C}\mathbf{X}^{(k)}|} = \frac{\mathbf{Y} \cdot |\mathbf{Y}| \mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}}{|\mathbf{Y}| |\mathbf{Y}| |\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}|} \\ &= \mathbf{Y}' \cdot \frac{\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}}{|\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}|} \end{aligned} \quad (4)$$

を解の評価関数とし、

$$f[\mathbf{X}^{(k)}] \rightarrow 1 \quad (5)$$

とすることで、正規化したシステム方程式(3)を満足する  $k$  回目の反復解  $\mathbf{X}^{(k)}$  を得る。

#### 2.2.2 反復解の一般式

式(5)より、式(6)がゼロになる  $\mathbf{X}^{(k)}$  を求めるのが目標である。

$$1 - f[\mathbf{X}^{(k)}] = 1 - \mathbf{Y}' \cdot \frac{\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}}{|\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}|} \quad (6)$$

式(6)の両辺に正規化された入力ベクトル  $\mathbf{Y}'$  を掛け算すれば

$$\mathbf{Y}' \cdot \frac{\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}}{|\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k)}|} = 0 \quad (7)$$

を得る。

式(7)の反復計算の初期値を  $\mathbf{X}'$  とすれば、

$$\Delta \mathbf{Y}'^{(1)} = \mathbf{Y}' \cdot \frac{\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(0)}}{|\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(0)}|} = \mathbf{C}' \Delta \mathbf{X}'^{(1)} \quad (8)$$

を得る。

従って、 $\mathbf{I}_m$  を  $m$  次の単位正方行列とすれば、式(8)の  $k$  回目の  $\mathbf{X}'^{(k)}$  を与える GVSPM 法の一般式は式(9)で定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}'^{(k)} &= \mathbf{X}'^{(k-1)} + \mathbf{C}'^T \Delta \mathbf{Y}'^{(k-1)} \\ &= \mathbf{C}'^T \mathbf{Y}' + \mathbf{I}_m - \frac{\mathbf{C}'^T \mathbf{C}'}{|\mathbf{C}'\mathbf{X}'^{(k-1)}|} \mathbf{X}'^{(k-1)} \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.3 目標磁界分布

#### 2.3.1 均一磁界分布

Fig. 1 のモデルは、磁界分布面を固定とすれば、変更可能なパラメータは磁界分布面と電流分布面間の距離と電流分布面の大きさに限定される。磁界分布面が正方形であるから、電流分布面も正方形とすれば、変更可能なパラメータは、面間の距離  $D$  と電流分布面の縦または横の長さ  $L$  となる。これらのパラメータが無限小から無限大の値を取ることは実際の制作上の観点から不可能である。すなわち、 $D$  と  $L$  の値は実現可能な範囲に限定される。面間の距離  $D$  は、大きすぎれば磁界の値が小さくなり、均一分布が実現可能であっても非現実的である。同

様に、電流分布面の大きさLも一定の大きさを超えては非現実的である。

以上の条件を勘案して、8cm<sup>2</sup>の平面にFig.2に示すz軸方向へ均一磁界を生成する最適パラメータを計算する。面間の距離Dを1cmから1.5cm、電流分布面の大きさLを15cmから25cmとする。

### 2.3.2 電流分布

生成された電流分布を評価するために、所望の磁界分布と推定電流分布が生成する磁界分布との一致度合いを表す評価関数を式(10)で定義する。

$$f_z = \frac{|\mathbf{H}_z|}{|\mathbf{H}_x| + |\mathbf{H}_y| + \sum_{i=2}^n |\mathbf{H}_i|} \quad (10)$$

ここで、 $|\mathbf{H}_x|, |\mathbf{H}_y|$  は、x,y 方向磁界成分のノルムであり、所望の磁界分布以外の成分である。更に、 $|\mathbf{H}_i|, \sum_{i=2}^n |\mathbf{H}_i|$  は、Fig.2に示す所望の均一磁界分布成分と不均一磁界分布成分のノルムである。 $\mathbf{H}_i, \sum_{i=2}^n \mathbf{H}_i$  は、ドビッシーの2次基底関数を用いた離散値系直交ウェーブレット変換による多重解像度解析を適用して分離される。従って、式(10)の評価関数  $f_z$  の値が大きいほど良好に所望の磁界分布が生成可能であることを意味する。

Fig.3は、DとLに対する評価関数  $f_z$  の変化を示し、評価関数の最大値は、設計パラメータ D=1cm, L=25cmで、 $f_z=18.4$ をとる。

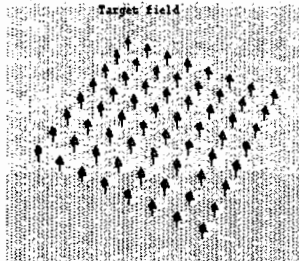


Fig. 2 Desired Magnetic Field Distribution

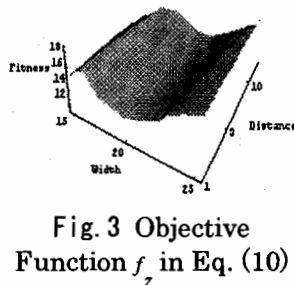


Fig. 3 Objective Function  $f_z$  in Eq. (10)

Figs. 4,5は、設計パラメータ D=1cm, L=25cmにおける推定電流分布と推定電流分布が生成する磁界分布を示す。推定された電流分布が生成する磁界分布は、Fig.2に示す所望の磁界分布を良好に再現していることがわかる。以上の結果から、我々が提案した逆問題的手法により、所望の磁界分布を実現する電流分布を良好に生成可能であることが判明した。

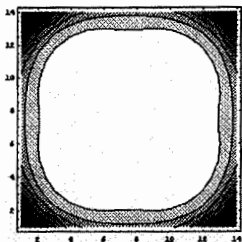


Fig. 4 Computed Current Distribution

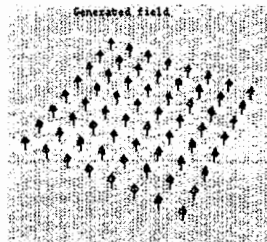


Fig. 5 Computed Magnetic Field Distribution

### 2.4 均一磁界を生成する励磁コイルの作成

試作した Fig.6 の励磁コイルはホルマル銅線 (直

径:0.8mm) を Fig.5 の濃淡の中間部へ12回巻いた平面形励磁コイルである。

この励磁コイルに周波数1kHzの正弦波電流を通電し、測定された磁界分布をFig.7に示す。この磁界分布に対する評価関数の値は  $f_z=3.6$  である。理論値には及ばないが、ほぼ所望の磁界分布を再現することが確認できた。

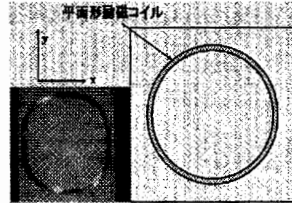


Fig. 6 Tested Exciting Coil



Fig. 7 Measured Magnetic Field Distribution

## 3. バルクハウゼン信号の測定

### 3.1 磁気センサー信号の前処理

#### 3.1.1 測定方法

Fig.8に本研究で用いたバルクハウゼン信号測定装置の概略図を示す。波形発生器で正弦波を生成し、それを増幅して励磁コイルに入力する。本実験では正弦波の周波数を100Hz、振幅を2.5A一定とした。サーチコイルはアクリル製のポビン(高さ:40mm、半径:13mm)に高さ方向がコイルの軸方向に平行になるようにホルマル線(直径:0.2mm)を300回巻いて作成した。

本実験で用いた被測定対象は、ワイヤー形状(長さ:40mm)のU社製盗難防止装置用の磁性タグを用いた。

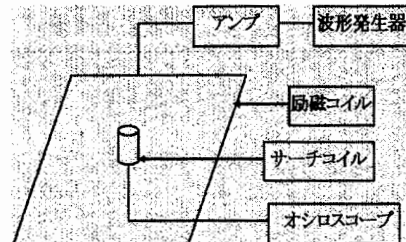
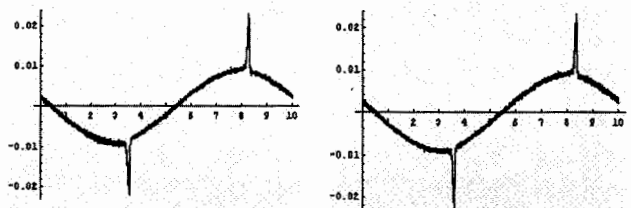


Fig. 8 Schematic Diagram of Measurement

#### 3.1.2 センサー信号

Fig.8のセンサー出力の例をFig.9に示す。Fig.9からセンサー出力は単純ではなく、励磁電流以外の多くの高周波数成分を含んだ波形で有ることが判る。センサーには周辺の電磁ノイズが含まれるが、高周波成分の大部分はバルクハウゼン現象に起因するバルクハウゼン信号と仮定する。



(a) First Result of the Experiment

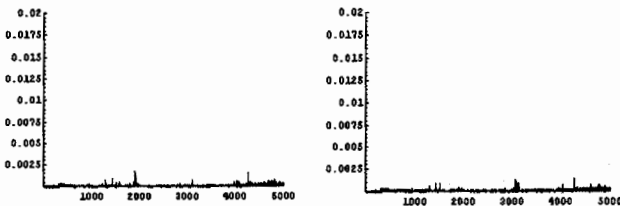
(b) Second Result of the Experiment

Fig. 9 Examples of Output Sensor Signal caused by Magnetic Tag

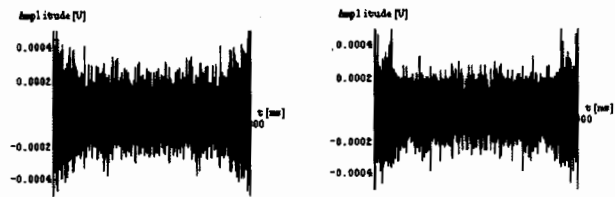
### 3.1.3 フーリエ変換による信号抽出

バルクハウゼン信号の振幅は基本波に比較して小さいので、フーリエ変換を用いて励磁周波成分とバルクハウゼン信号を構成する高周波成分を分離する。また、バルクハウゼン信号から振幅と周波数成分が変わらないと仮定した環境ノイズを削減するため、ターゲットが挿入されている状態のフーリエスペクトラムから、空心のサーチコイルに誘起する電圧のフーリエスペクトラムを差分する。

Fig. 10 は、Fig. 9 (a), (b) に上記の処理を行ったフーリエスペクトラムを示す。Fig. 11 は Fig. 10 (a), (b) をそれぞれを逆フーリエ変換した波形である。



(a) First Result of the Experiment (b) Second Result of the Experiment  
Fig. 10 Examples Fourier spectrum



(a) First Result of the Experiment (b) Second Result of the Experiment  
Fig. 11 Examples of the extracted Barkhausen signal waveform

## 3.2 ECV によるバルクハウゼン信号の可視化

### 3.2.1 加算平均 ECV

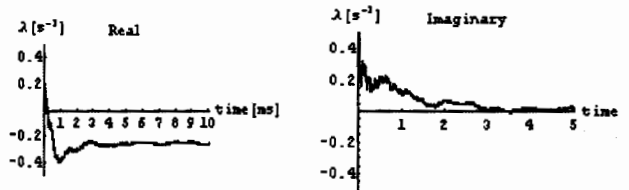
時間・空間領域信号の特徴量を抽出する方法として、本論文では信号の特性を双曲線関数の指数値として抽出する方法を採用する。<sup>2)</sup> この指数値は初期値問題の固有値へ対応するため、本論文では等価固有値 (ECV) と呼ぶこととする。ECV は、信号が双曲線関数の指数部を計算可能な最小離散化点数 3 点毎に計算可能である。<sup>2)</sup>

Fig. 12 は Fig. 11 (a), (b) に示されているバルクハウゼン信号の加算平均 ECV 値である。時間領域信号に対する ECV 値で、実数部は系の固有値へ対応し、他方、虚数部は入力信号と位相情報へ対応する。すなわち、ECV 値の実数部はバルクハウゼン信号の本質的特徴を反映している。

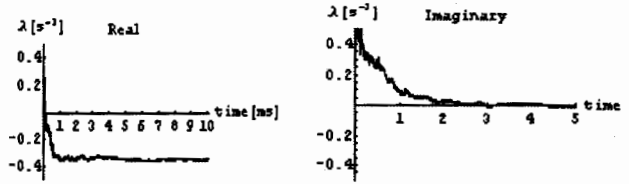
### 3.2.2 固有パターン

抽出された ECV 値を可視化する一方法として固有パターン法を適用する。固有パターンは ECV 値の実数部分と虚数部分で修正リサージュ図形である。この修正リサージュ図形は従来のリサージュ図形と異なり、同一座標値を取る軌跡に対してヒストグラムの加算を行うため、固有パターンと呼ぶ。<sup>3)</sup>

Fig. 12 (a), (b) の ECV 値を用いて得られた固有パターンを Fig. 13 に示す。

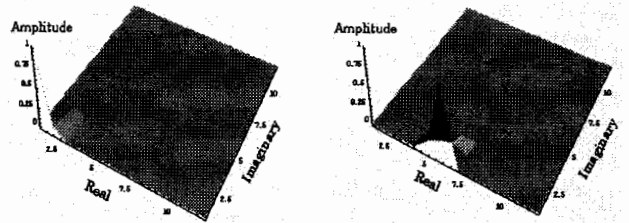


(a) First Result of the Experiment



(b) Second Result of the Experiment

Fig. 12 Examples of ECVs from the Signals on Fig. 11



(a) First Result of the Experiment (b) Second Result of the Experiment  
Fig. 13 Examples of the Visualized Eigen Patterns of Barkhausen Signal in Fig. 11

## 4. まとめ

本論文では、再現性の無いバルクハウゼン現象に共通な特徴を抽出する鉄の非破壊検査装置開発の第一段階として、均一磁界分布を生成する励磁コイルの設計・試作を行い、バルクハウゼン信号に相当すると考えられる信号フーリエ変換を用いて抽出した。再現性の無いバルクハウゼン信号に共通な特徴を抽出する一方法として ECV 法を採用して時間位相の差異を削除し、可視化する固有パターン法を適用した。その結果、ある程度、バルクハウゼン信号を 2 次元平面上に可視化できることを示した。

## 参考文献

- 1) 江間晃, 早野誠治, 斎藤兆古: 磁界分布のウェーブレット変換による評価, 可視化情報, Vol. 20, Suppl No. 1 (2000) pp. 277-280.
- 2) 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古: ウェーブレット変換による信号処理の一方法, 可視化情報, Vol. 20, Suppl. No. 1 (2000) pp. 273-276.
- 3) 妹尾勇, 早野誠治, 斎藤兆古, 堀井清之: 時間領域信号の三次元可視化画像への変換とその応用, 可視化情報, Vol. 21, Suppl. No. 1 (2001) pp. 239-242.