

勝又 理毅[○], 遠藤 久, 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学)

堀井 清之 (白百合女子大学)

Ferromagnetic Material Cognition by Smart Visualized Information Processing

Masaki KATSUMATA, Hisashi ENDO, 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 automobile, air plane, 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.

In the present paper, we propose a new nondestructive testing methodology for the ferromagnetic materials fully utilizing the Barkhausen effects along with smart visualized information processing.

Keywords: Equivalent characteristic value, Barkhausen noise, Visualization

1. まえがき

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¹⁾。

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センサー出力とする非破壊検査の一方法を本論文で提案する。

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。鉄は磁気的には強磁性体に属するため, 微視的には磁区構造を持つ。磁性体が磁化される場合, 磁区構造へ変化が生ずる。この磁区構造が変化する過渡的狀態で, バルクハウゼン現象が観察できる。バルクハウゼン現象を非接触で測定可能であれば, 鉄を構造材とするあらゆる人工

的構築物の非破壊検査が可能と考えられる。これは, バルクハウゼン現象が鉄の疲労度などで異なるためである。したがって, バルクハウゼン現象を利用した磁性体の非破壊検査法を考える場合, 個々のバルクハウゼン現象を識別することが最初の課題となり, 本論文で検討する。

より具体的には, バルクハウゼン現象に起因する個々のバルクハウゼン磁気信号を識別するため, 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。前者は, 磁気信号の特徴・固有特性抽出に用い, 後者は ECV の時間・空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. バルクハウゼン信号の測定

2.1 磁気センサー信号の前処理

2.1.1 測定装置

Fig.1 に, 本論文で採用した差動センサーの概略図を

示す。中心部に位置する 2 つのコイルがサーチコイルであり、外側が励磁コイルである。外側に位置する励磁コイルに交流電流を通電し、被測定対象物（ターゲット金属）の影響による磁界の差異を左右のサーチコイルに誘起する差動電圧によって感知する。本実験では、励磁電流の振幅と周波数はそれぞれ、2.9A と 100Hz に一定とした。

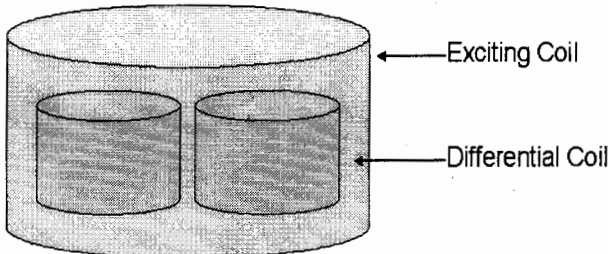


Fig. 1 Magnetic Sensor for Experiment

2.1.2 センサー信号

Fig. 1 のセンサー出力の例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 から、センサー出力信号は単純でなく、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。センサーが差動コイル方式であるため、センサー周辺の電磁ノイズも含まれるが、高周波数成分の大部分はバルクハウゼン効果に起因するバルクハウゼンノイズである。このバルクハウゼンノイズは Fig. 1 に示す励磁コイルによる磁界で強磁性体が磁化される過程で、差動コイルに誘起するパルス状の電圧信号である。このパルス状の電圧信号はバルクハウゼン効果、すなわち、磁性材料内に析出物や欠陥などのため、外部磁界によって磁壁が滑らかに移動せずに、不連続な移動に起因する。

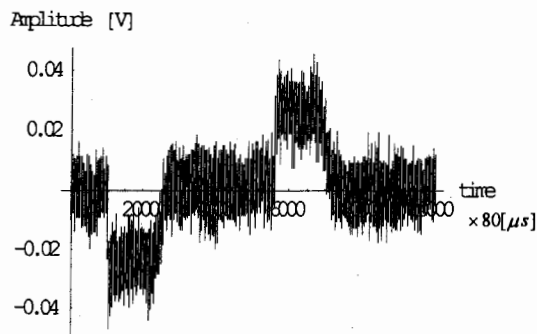


Fig. 2 Output Sensor Signal

2.1.3 フーリエ変換による信号抽出

バルクハウゼンノイズ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磁界成分とバルクハウゼンノイズを構成する高周波成分を分離する。フーリエスペクトラムの例を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、基本波の奇数倍調波はセンサー周辺の電磁ノイズを含む。しかし、他の高調波成分は大部分がバルクハウゼン効果に拠るものと考えられる。

フーリエスペクトラムで基本波・励磁周波数成分を削

除して、バルクハウゼン効果による信号のみを抽出する。Fig. 4 は Fig. 2 からバルクハウゼンノイズのみを抽出した結果である。

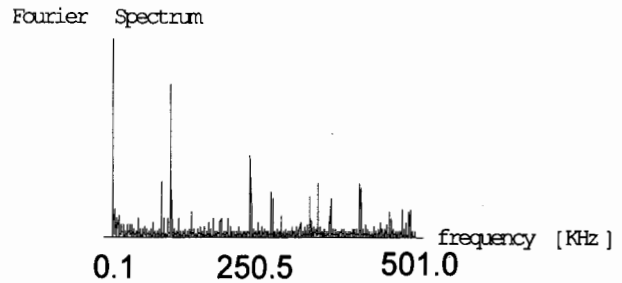


Fig. 3 Fourier Spectrum of Fig. 2

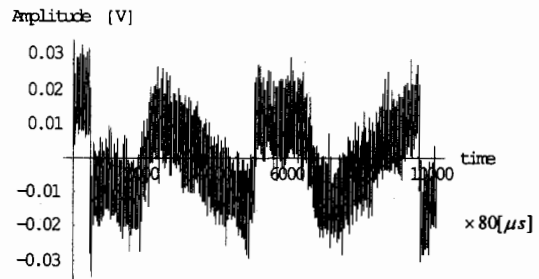


Fig. 4 Extracted Barkhausen Noise Wave Form

2.2 ECV によるバルクハウゼン信号の可視化

2.2.1 ECV (Equivalent Characteristic Value)

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。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¹⁾。ある物理系の時間領域出力信号を初期値問題の解と仮定して解析し、系に固有な特徴量として ECV を抽出し、解析する方法を等価固有値 (ECV) 法と呼ぶ。

2.2.2 電気回路の ECV

電気抵抗 R とインダクタンス L が直列に接続された電気回路へ直流電圧 V が印加された場合、出力電流は Fig. 5 のように時間変化する

Fig. 5 の任意の時点 $n\Delta t$ における電流 $i_{n\Delta t}$ は (1) 式で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + [i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}] e^{-\lambda\Delta t} \quad (1)$$

$R \cdot L$ 直列回路の等価固有値 ECV は (2) 式で与えられる。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right] \quad (2)$$

Fig. 5 の波形に (2) 式を適用して得られる ECV を Fig. 6 に示す。明らかに、線形なシステムから得られる ECV は一定値の実数である。

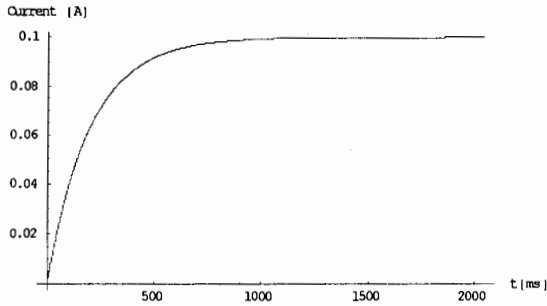


Fig. 5 Transient Current of a R-L Series Circuit

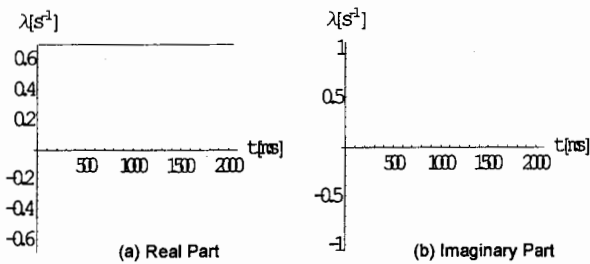


Fig. 6 Equivalent Characteristic Values. Evaluated from Fig.5 by means of Eq.2

2.2.3 加算平均 ECV

直流電圧の入力に対する応答から、ECVは正確に計算される。しかし、Fig. 7に示す交流入力に対する応答信号からは、Fig. 8に示すように信号の時間変化率が小さい部分で数値誤差に起因するノイズが生ずる。

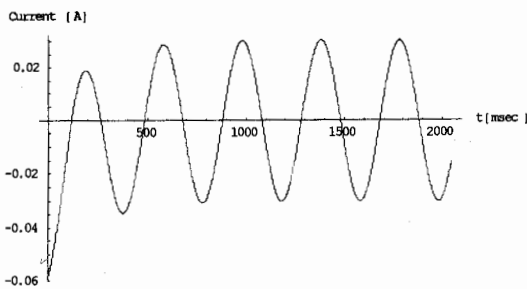


Fig. 7 Transient Current of a R-L Series Circuit when Impressing AC Voltage

このノイズを削減するため、Fig. 9に示すように ECV を加算平均処理する。Fig. 9から明らかなように、実数部の ECV 値は Fig. 6 と同じ ECV 値へ収束する。他方、虚数部は交流入力の角周波数へ対応する ECV 値へ収束する。

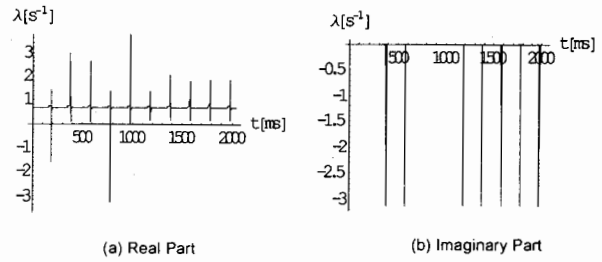


Fig. 8 ECV Evaluated from the AC Response Current in Fig. 7.

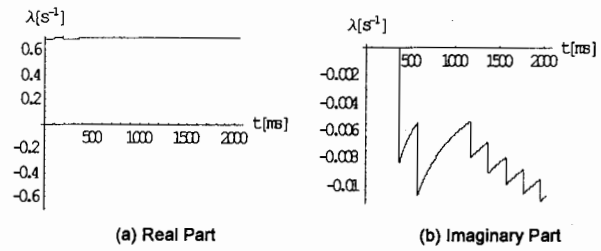


Fig. 9 Averaged ECV of Fig.8

Fig. 10はFig. 4に示されているバルクハウゼンノイズに対する加算平均 ECV 値である。明らかに、バルクハウゼンノイズの ECV 値の実数部は正の一定値をとる。他方、ECV 値の虚数部は励磁周波数へ収束する。すなわち、ECV 値の実数部は磁性体の磁壁移動や消滅などに起因するバルクハウゼン効果を反映する。

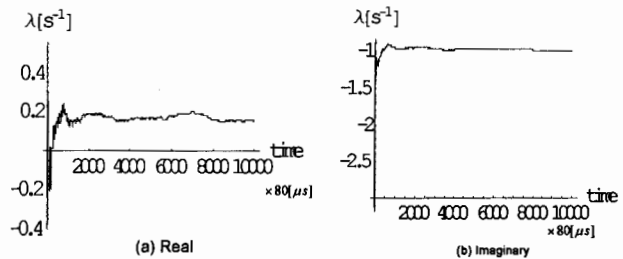


Fig. 10 ECV Evaluated from the Barkhausen Noise in Fig.4

2.3 バルクハウゼンノイズの識別

本論文では、バルクハウゼンノイズを利用した強磁性体の非破壊検査システム開発の第1段階として、個々のバルクハウゼンノイズが識別可能かを吟味する。

2.3.1 固有パターン

磁気センサーからの出力信号には周辺ノイズやバルクハウゼンノイズ、磁性体の種類、ターゲットからの距離など様々な情報が含まれている。本論文では、フーリエ変換を用いて、励磁・基本波周波数成分以外の高調波成分全てをバルクハウゼン効果に起因するバルクハウゼンノイズと見なした。さらに、個々のバルクハウゼンノイズの固有の特徴を抽出する方法として、ECV法を適用した。

ここでは、抽出された等 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を作成する。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²⁾。

Fig. 10 の ECV 値を用いて得られた固有パターンを Fig. 11 に示す。

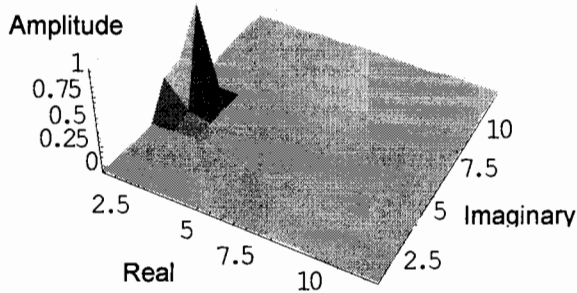


Fig. 11 Eigen Pattern Computed by ECVs in Fig.10

2.3.2 システム方程式

固有パターンは、それぞれ 32×32 画素からなるため、1次元配列に並べ替える、 $32 \times 32 = 1024$ 次のベクトルとなる。このようにして得られる m 個の固有パターンベクトル $\mathbf{c}_j, j=1, 2, \dots, m$ を使って、(3)式から m 行 32×32 列の長方システム行列 C が構成できる。

$$C = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_m] \quad (3)$$

いま、任意のセンサー信号の固有パターンを1次元配列へ並べ替えて得られる入力ベクトルを \mathbf{Y} とすれば、解くべき線形システム方程式は(4)式で与えられる。

$$\mathbf{Y} = C\mathbf{X} \quad (4)$$

(4)式で解ベクトル \mathbf{X} の要素を

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m] \quad (5)$$

とすれば、最大値を取る要素が識別された信号とする。

2.3.3 最小自乗解

(3)式のシステム方程式は m 個の未知数に対し、 32×32 個の式の数であり、 $32 \times 32 > m$ とすれば、全ての式を同時に満足する解は特別な場合を除いて存在しない。このため、誤差ベクトルのノルム

$$\varepsilon = \|\mathbf{Y} - C\mathbf{X}\| \quad (6)$$

を最小にする解ベクトル、すなわち、最小自乗法による解ベクトルを(7)式から計算する。

$$\mathbf{X} = (C^T C)^{-1} C^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

2.3.4 バルクハウゼンノイズの識別

10 個のバルクハウゼンノイズからそれぞれの固有

パターンを生成し、(3)-(7)式を用いて個々のバルクハウゼンノイズの識別を行った。その結果、全て正確に識別することに成功した。解ベクトルの一例を Fig. 12 に示す。

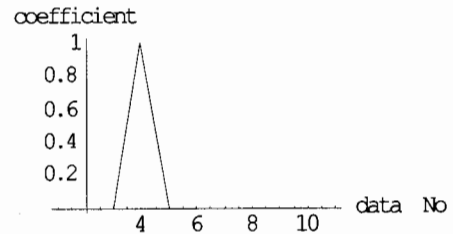


Fig. 12 Elements of a Solution Vector, where the No. 4 Target Signal was Recognized

3. まとめ

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。鉄は磁気的には強磁性体に属するためバルクハウゼン現象を呈する。バルクハウゼン現象が鉄の疲労度などで異なるため、バルクハウゼン現象を非接触で測定可能であれば、鉄を構造材とするあらゆる人工的構築物の非破壊検査が可能である。本論文では、バルクハウゼン現象を利用した磁性体の非破壊検査法を提案し、個々のバルクハウゼン現象を識別することを最初の課題とした。

本論文では、実際に差動磁気センサーを製作し、強磁性体である鉄の出力信号を測定した。バルクハウゼンノイズの特徴を抽出する方法として ECV 法、時間位相の差異を削除し ECV 値を可視化する固有パターン法を採用した。さらに、得られた固有パターンから線形システム方程式を導き、最小自乗法を用いて近似解を導き、バルクハウゼンノイズの認識を行った。その結果、極めて良好な認識結果を得た。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.