

# バルクハウゼン現象の可視化法に関する考察

勝又 理毅 早野 誠治 斎藤 兆古  
法政大学大学院工学研究科

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状态で、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、鉄を構造物とするあらゆる人工的構造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と異なるためである。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。

## 1. はじめに

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、人工的構造物の機械的信頼性を確保する決定的な方途である<sup>[1]</sup>。

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を利用した非破壊検査の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物である。鉄は機械的加工が容易であり、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程で、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、鉄を構造物とするあらゆる人工的構造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と異なるためである。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。

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・固有特性抽出の1方法であり、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. バルクハウゼンノイズの測定

### 2.1 磁気センサー信号の前処理

#### 2.1.1 測定装置

Fig.1 は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個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电し、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励磁コイル中に位置する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、0.75Aと100Hzに一定とした。

#### 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現象に起因するバルクハウゼンノイズと仮定する。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、磁性材料中の析出物、介在物、結晶粒界、各種欠陥などのため、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。

#### 2.1.3 フーリエ変換によるバルクハウゼン信号抽出

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である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を含んだ高調波成分を抽出する。Fig.4はFig.2から高調波成分のみを抽出した結果である。

## 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<sup>[1]</sup>。また、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、系に固有な特徴量としてECVを抽出して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-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。

### 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に示す正弦波入力電圧に対する過度応答信号からは、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。

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 と同一 ECV 値へ収束する。他方、虚数部は励磁入力の角周波数へ対応する ECV 値へ収束する。

Fig.10はFig.4に示されているバルクハウゼンノイズを含有した高調波に対する加算平均 ECV 値である。明らかに、バルクハウゼンノイズを含有した高調波の ECV 値の実数部は正の一定値をとる。他方、ECV 値の虚数部はバルクハウゼンノイズを含有した高調波の周波数へ比例した値へ収束する。すなわち、ECV 値の実数部は磁性体のバルクハウゼン効果を反映した系固有の値である。

## 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、予め測定されたバルクハウゼンノイズを含有した高調波信号から個々の信号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 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<sup>[2]</sup>。

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。

### 2.3.2 システム方程式

固有パターンは、それぞれ  $32 \times 32$  画素からなるため、1次元配列に並べ替え、 $32 \times 32 = 1024$  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  $32 \times 32$  列の長方形システム行列  $C$  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

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m] \quad (5)$$

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、 $32 \times 32$  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  $\mathbf{X}$  を(7)式で計算する。

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

### 2.3.4 バルクハウゼンノイズの識別

24 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。

## 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1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識別を行った。その結果、極めて良好な結果を得、第1課題は概ね解決した。現実問題として、単純に励磁周波数成分のみならず環境ノイズや磁気飽和に起因する高調波成分の除去等を如何に行うかが次の課題となる。

## 参考文献

- [1]茂田幸康,早野誠治,齋藤兆古"ウェーブレット変換による信号処理の一方法",可視化情報学会誌、Vol.20、No.1、pp.273-276、2000年。
- [2]妹尾勇,早野誠治,齋藤兆古,"時間領域信号の三次元可視化画像への変換とその応用",可視化情報学会誌、Vol.21、pp.239-242、2001年。

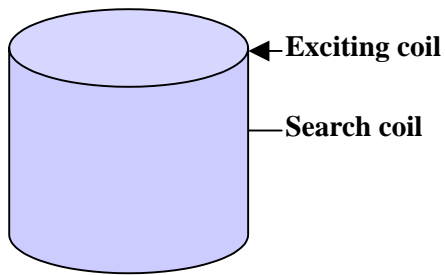


Fig.1. Magnetic Sensor for Experiment

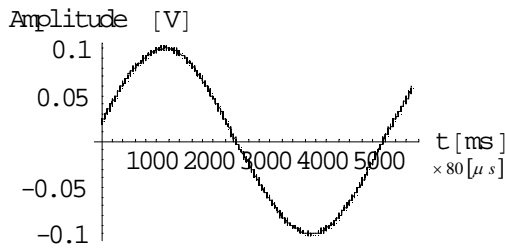


Fig.2. Sensor Output Signal

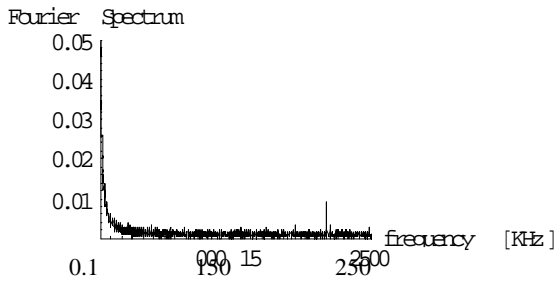


Fig.3. Fourier Spectrum

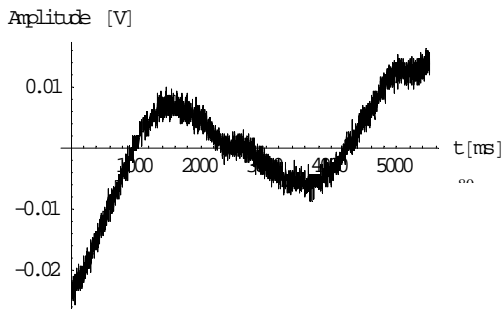


Fig.4. Extracted Higher Harmonic Waveform

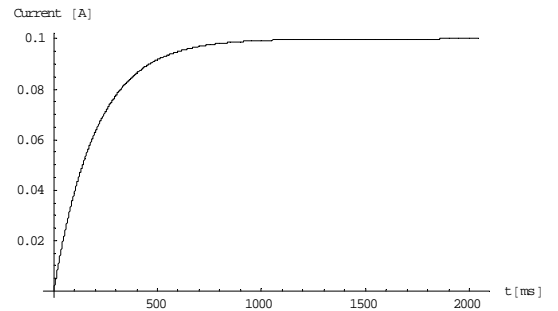


Fig.5. Transient Current of a R-L Series Circuit

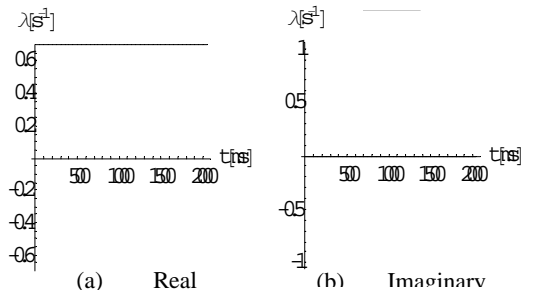


Fig.6. Equivalent Characteristic Values. Calculated from Fig.5 by Means of Eq.2

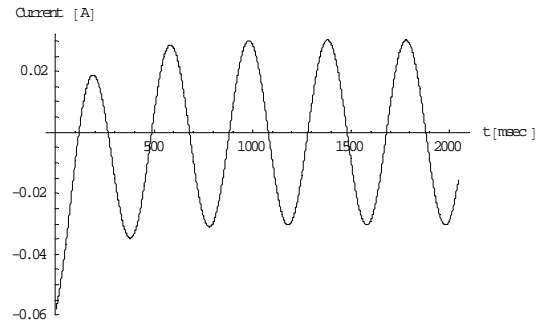


Fig.7. Transient Current of a R-L Series Circuit when Impressing AC Voltage

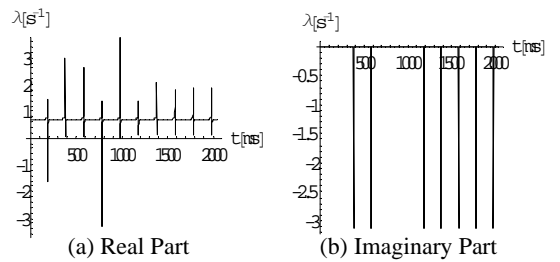


Fig.8. ECV Calculated from the AC Response Current in Fig.7.

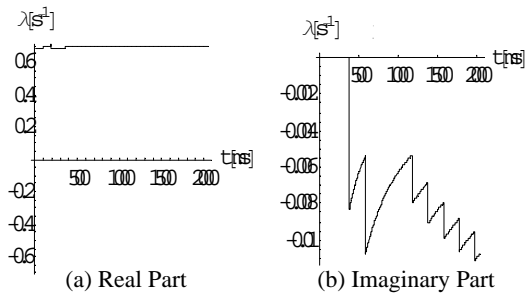


Fig.9. Averaged ECV of Fig.8

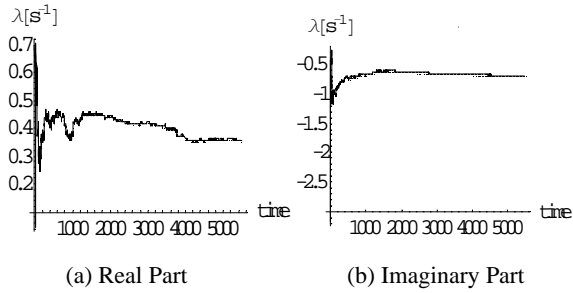


Fig.10. ECV Calculated from the Higher Harmonics Including Barkhausen noise in Fig.4

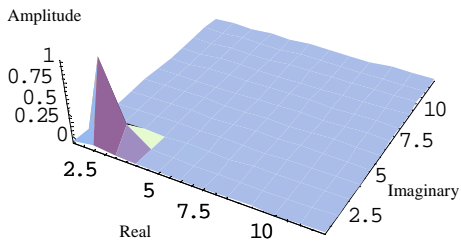


Fig.11. Eigen Pattern Computed by ECVs in Fig.10

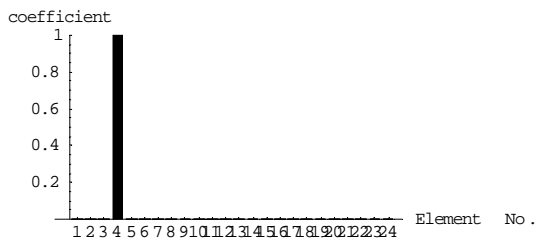


Fig.12. Elements of a solution vector, where the No. 4 target signal was identified

キーワード.

等価固有値法、バルクハウゼンノイズ、可視化

-----

Summary.

## **Visualization of a Barkhausen Signal**

Masaki Katsumata    Seiji Hayano    Yoshifuru Saito  
Graduate School of Engineering, Hosei University

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 technology; and also magnetization process of the 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 to check up their mechanical reliability.

Our new methodology is based on the visualization of Barkhausen effects in a two dimensional plane. As an initial test of our methodology, we have tried to visualize the Barkhausen effects in a two dimensional plane and carried out the identification in each of the Barkhausen effects.

Keywords.

Equivalent characteristic value, Barkhausen noise, Visualization