法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

バルクハウゼン現象の可視化法に関する考察

HAYANO, Seiji / SAITO, Yoshifuru / 斎藤, 兆古 / 早野, 誠 治 / KATSUMATA, Masaki / 勝又, 理毅

(出版者 / Publisher)法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University

(巻 / Volume) 16 (開始ページ / Start Page) 101 (終了ページ / End Page) 105 (発行年 / Year) 2003-03-20 (URL)

https://doi.org/10.15002/00024982

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 クハウン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, 個々のバルクハウンゼン現象を識別 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を利用した非破壊検 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,/いレクハウゼン現象が観察できる. バレ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,バレ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,バレ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,個々のバレ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、パルクハウゼン現象に起因する個々のパルクハ 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^[1].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

$$\dot{i}_{n\Delta t} = \dot{i}_{(n+1)\Delta t} + \left[\dot{i}_{(n-1)\Delta t} - \dot{i}_{(n+1)\Delta t}\right] \varepsilon^{-\lambda\Delta t}$$
(1)

R-L直列回路の等価固有値 ECV は(2)式で与えられる.

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right]$$
(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,パ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 らのマの声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的加算 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.

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,32×32 = 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 **C**_i, *j*=1,2,...,*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.

$$C = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, ..., \mathbf{c}_m] \tag{3}$$

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.

$$\mathbf{Y} = C \mathbf{X}$$
 (4)
(4) 式で解ベクトル \mathbf{X} の要素を

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ..., \mathbf{x}_m]$$
(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,32×32 > 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

$$\varepsilon = \|\mathbf{Y} - C\mathbf{X}\| \tag{6}$$

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Xを(7)式で計算する.

$$\mathbf{X} = \left(C^T C\right)^{-1} C^T \mathbf{Y}$$
(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.4. Extracted Higher Harmonic Waveform







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





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





<u>キーワード.</u>

等価固有値法、バルクハウゼンノイズ、可視化

Summary.

Visualization of a Barukhausen 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