回転バルクハウゼンノイズのカオス挙動 Chaotic Behavior of Rotational Barkhausen Noises

槌田雄二・吉富祐介・榎園正人

大分大学工学部電気電子工学科, 大分市旦野原 700 (〒870-1192)

Y. Tsuchida, Y. Yoshitomi and M. Enokizono

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita-shi, Oita 870-1192

(2000 年 10 月 10 日受理, 2001 年 1 月 24 日採録)

This paper describes the chaotic behavior of Barkhausen noise. We previously revealed that Barkhausen noises under a rotational magnetic field were different from those under an alternating magnetic field, and showed that the heat fatigue level of Inconel-600 steel plates could be detected by using the proposed Barkhausen noises. In this paper, we examine the latter chaotic behavior in order to apply it to the estimation of the fatigue level of metallic structures.

Key Words: Barkhausen noise, chaotic behavior, stress estimation, strange attractor

1. はじめに

構造物の安全性・保全のために非破壊検査が注目されるようになってきたが、その中心は、X 線、超音波、渦電流等を利用し、構造物内の傷の有無を事前に探査するものである。我々は、金属材料が疲労を受けている状態を電磁気学的方法で定性的・定量的に評価できないか検討してきた。バルクハウゼンノイズは、磁性体内部の 180 度磁壁の移動に伴い発生する信号である。通常は磁性体に交番磁界をかけて、その信号の測定を行うが、我々は、試料に回転磁界をかけることで、交番磁界下とは異なるバルクハウゼンノイズが発生することを明らかにし、これを回転バルクハウゼンノイズと名付けた¹⁾²⁾。更に、わずかに磁性を持つことが知られているインコネル 600 に熱疲労を与え、その疲労の度合いにより回転バルクハウゼンノイズのパワー値が若干ではあるが変化することを明らかにした¹⁾。しかしながら、バルクハウゼンノイズあるいは回転バルクハウゼンノイズは、連続スペクトルをもつ非線形信号であり、疲労の度合いとの因果関係を定性的・定量的に結びつけるのは困難であった。それで、回転バルクハウゼンノイズのカオス性を吟味することで、試料の疲労状態が定性的かつ定量的に評価できないかを検討した。磁壁のカオス運動に関する研究は実験・理論の両面から物理的に行われ報告されているが³⁾⁴⁾、その産業面への応用は少ない。まず、疲労を与えていない無方向性、方向性および二方向性けい素鋼板を試料とした場合に、それらの回転バルクハウゼンノイズ自体がカオス性を示すかどうかの検討を行った²⁾。その結果、回転バルクハウゼンノイズが完全にカオス性を示すとは言いきれないまでも、カオス性を示す要因を何点か明らかにすることができた²⁾。完全にカオス性を示すと言いきれない部分は、測定系その他の外乱が影響していると考えられるので、今回はこれまで用いたセンサの他、3つのセンサについて新たに検討を行った。また、けい素鋼板に意図的にスク

ラッチを入れることによって、カオス性を吟味できるアトラクタがどのように変化するか検討を行った。スクラッチと金属疲労は異なるが、磁性を示す金属材料が疲労を受けることによって、その内部の磁区構造が変化し、回転バルクハウゼンノイズが変化すると考えられるので、意図的に磁区構造を変化させた時の回転バルクハウゼンノイズの変化を検討するものである。

2. 測定システムおよび測定条件

2. 1 測定システムおよびセンサ

Fig. 1 に回転バルクハウゼンノイズのための測定システムを示す。本図下部に示すものが磁化器である。回転磁界を発生させるために、x 方向および y 方向に磁束発生用 $\phi 0.8\text{mm}$ ホルマル線が 250 ターンずつ巻いてあり、中央部に $80 \times 80\text{mm}$ の試料を設置するようになっている。初めに D/A コンバータによって生成した電圧波形を増幅器で増幅し、試料を励磁する。次に試料に巻いた B コイルによって試料中央付近の誘起電圧をトランジェントコンバータによって PC に取り込み、磁束波形を計算する。その誘起電圧波形が所望の波形に近づくように波形制御を繰り返す。その後、試料の中央に置かれたセンサから低ノイズ広帯域増幅器を介し、高速でデータ収録が可能なウエーブメモリーに波形を蓄え、PC に転送する。

これまで、バルクハウゼンノイズのセンサとしては、Fig. 2(a)に示す磁気ヘッドから成るものを用いてきた。磁気ヘッドのコアはパーマロイであり、コアでも多数のバルクハウゼンノイズが発生していると考えられるので、それがカオス性を明確にできない外乱となっていると考えた。そこで、今回、Fig. 2(b)~(d)に示すセン

Fig. 1 Measurement system for rotational Barkhausen noise.

サにおいて新たに検討を行った。センサ A, B のコアには $\phi 1.5\text{mm}$ のフェライトを用いた。ピックアップコイルには $\phi 0.08\text{mm}$ のホルマール線を用い、それぞれ 950 ターン巻いた。これらのセンサコアに用いたフェライトは、非常に多くの磁区に分かれているため、180 度磁壁移動が起こりにくく、コアからのバルクハウゼンノイズが低減される。そのため、パーマロイからなる磁気ヘッドよりも試料で発生するバルクハウゼンノイズのみを検出するのに好都合であると思われる。また、センサ A のコアは円柱形状であるのに対して、センサ B のコアは試料と接する部分を尖らせた。このようにした理由は、センサ A においては、センサの周りで発生する広い範囲の磁壁運動によって生じるバルクハウゼンノイズを検出するのに対して、センサ B では、より狭い範囲でのバルクハウゼンノイズを観測できるからである。これらのセンサで得られる出力をできるだけそろえるために、巻数は同じターン数とした。センサ C は、センサコア自体が発生するバルクハウゼンノイズの影響を調べるために空芯コイルとした。センサ C では $\phi 1.0\text{mm}$ のアクリルにセンサ A, B と同じ $\phi 0.08\text{mm}$ ホルマール線をピックアップコイルとして施した。出力が小さくなることが予想されるので巻数を 2000 ターンとした。

2. 2 測定試料および測定条件

測定試料としては、回転・バルクハウゼンノイズとカオス性の関係を定性的・定量的に調べるために、けい素鋼板を用いた。用いた試料は三種類あり、無方向性けい素鋼板 H10 ($80\text{mm} \times 80\text{mm} \times t 0.5\text{mm}$)、方向性けい素鋼板 23ZH ($80\text{mm} \times 80\text{mm} \times t 0.23\text{mm}$) および二方向性けい素鋼板 Cube ($80\text{mm} \times 80\text{mm} \times t 0.4\text{mm}$) である。励磁波形としては、比較検討のため、回転磁界のみではなく、交番磁界も用いた。また、軸比が 1 である真円の回転磁界のみに限らず、 x 軸に対して傾きを持つ楕円形状の回転磁界においても測定を行った。軸比 α の定義については、 B_{short} および B_{long} を Fig. 3 に示すように定義すると、

$$\alpha = \frac{B_{short}}{B_{long}}, \quad (1)$$

となる。けい素鋼板に印加する磁束密度については、試料の種類により透磁率が異なるので、H10 では $0.1 \sim 1.3\text{T}$ 、23ZH では $0.1 \sim 1.0\text{T}$ および Cube では $0.1 \sim 1.2\text{T}$ の範囲で測定を行った。回転磁界下では軸比 0.3 と 1.0 の 2 種類で測定を行い、軸比が 0.3 の回転磁界と交番磁界では、傾き角は 15 度おきに $0 \sim 165$ 度の範囲で測定を行った。また、サンプリング周期は 0.1ms と設定した。

3. カオスについて

3. 1 カオスであるための条件

ある現象がカオス性を示すかどうかは次の 4 つについて検討する必要がある⁹⁾。

- (1) 時系列データに周期性が見られない複雑な波形をしている。
- (2) パワー・スペクトルが離散的な線スペクトルを持たず、連続スペクトルを持つ。

Fig. 2 Sensors for rotational Barkhausen noise.

Fig. 3 Definitions of axis ratio and inclination angle.

- (3) 自己相関関数が時間発展により、0 に近くなる。
- (4) アトラクタがストレンジアトラクタとなる(自己相似性をもったストレンジアトラクタとなる)。

3. 2 埋め込み法

本稿では実際に測定した時系列のバルクハウゼンノイズより、アトラクタを構成するために、埋め込み法(時間遅れの方法)を用いた⁹⁾。時系列データが、Fig. 4(a)に示されるように離散データであるとする、適当なサンプリング間隔 τ おきにデータを取り、データを再構成する。新しいデータ組の要素数を埋め込み次元と呼び、Fig. 4(b)では、埋め込み次元を 3 とし、3 次元空間においてアトラクタを構成したことになる。本稿では、バルクハウゼンノイズからのアトラクタの構成には、埋め込み次元を 2 とし、平面上でのアトラクタの再構成を行った。

4. スクラッチを入れた試料

(a) Time series data

(b) Construction of attractor

Fig. 4 Embedding method to construct attractors from time series experimental data.

Figs. 5 に示すように、けい素鋼板の圧延方向に対して、0, 45, 90 度の方向にスクラッチを 5mm 間隔で入れた。また、スクラッチを入れない試料に対しては、励磁周波数として 80Hz を用いたが、スクラッチを入れた試料に対しては、5000Hz での高い周波数励磁での検討も行った。

5. 結果およびその検討

まず、交番磁界下でのバークハウゼンノイズと回転磁界下でのバークハウゼンノイズをそれぞれ Fig. 6(a)と(b)に示す。試料は無方向性 H10 である。Fig. 6(a)より交番磁界下では、磁束の変化が激しいところでバークハウゼンノイズが発生し、磁束の変化がないところでは、あまり発生しないことが分かる。これに対して、回転磁界下では、Fig. 6(b)から分かる通り、連続したバークハウゼンノイズが発生していることが分かる。方向性 23ZH 及び二方向性 Cube でも同様な結果が得られるが、方向性がある鋼板では、困難軸の方向で多くのバークハウゼンノイズが発生することが分かっている²⁾。

様々な測定条件下で測定を行った結果、どの種類の鋼板においても、3 節で言及したカオスの条件を大方満たすことを明らかにしてきた²⁾。しかしながら、必ずしもカオスであると断言するまでには至っていない。特にアトラクタの再構成によって、ストレンジアトラクタを示すものの、カオス性を有すると断言できるもの

Fig. 5 Embedding method for constructing attractors from time series experimental data.

(a) Barkhausen noise under an alternating magnetic field

(b) Barkhausen noise under a rotational magnetic field

Fig. 6 Barkhausen noises under an alternating magnetic field and a rotational magnetic field.

ではなかった。Fig. 7(a)は、これまで用いていた磁気ヘッドによって測定した回転バークハウゼンノイズからアトラクタを再構成したものである。概して傾き角 45 度の楕円形状をしており、その軌跡が同心状の相似な楕円形状になっている。これはストレンジアトラクタの特長である自己相似な軌跡であると言える。しかしながら、本図形左下及び右上部で、相似な楕円軌道から外れている軌跡が見受けられる。これは外乱によるものであると考え、先で述べたセンサ A, B, C によって、回転バークハウゼンノイズを測定し、アトラクタの構成をしたものが、それぞれ Fig. 7(b), (c), (d) である。Fig. 7(b)においては、左下及び右上部で若干相似軌道から外れている軌跡も見受けられる。センサ B と C、特にセンサ C によって測定したものでは、それぞれの軌跡がほぼ相似であることが分かる。これは、カオスの特長である自己相似なアトラクタがきれいに現われていると言える。センサ A とセンサ B との比較が

Fig. 7 Attractors constructed from rotational Barkhausen noises by proposed sensors.

ら、試料の狭い領域での信号を拾った方がアトラクタを再構成した際に、自己相似な軌跡を描くことが明らかになった。またセンサBとセンサCとの測定結果では、ほとんど差異が見られなかったため、より大きな信号値が測定できるセンサBを以後用いるものとする。

センサBを用いて、5000Hzの励磁周波数により、回転磁界下でスクラッチなし及び3種類のスクラッチを入れた試料についてアトラクタを構成したものがFigs. 8になる。これまでのような低周波励磁80Hzでは、スクラッチによるアトラクタ形状変化を顕著に認めることができなかったため、5000Hzの励磁周波数を用いた。Figs. 8では、それぞれの場合で、アトラクタの軌跡がきれいな相似性をもった図形を描いていることが分かる。また、明らかにアトラクタ自体の形状がスクラッチの施し方によって異なることが分かる。したがって、試料の磁区構造に変化を与えることで、定性的には、アトラクタが変化することが分かる。

6. 結論

本稿での結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 無方向性、方向性、二方向性けい素鋼板において測定したバルクハウゼンノイズより、カオス的な性質を示唆する要因が見受けられた。
- (2) これまで測定に用いた磁気ヘッドセンサよりフェライトコアを用いたセンサの方が、バルクハウゼンノイズから再構成したアトラクタ形状に自己相似性がよく見られた。

Fig. 8 Attractors constructed from rotational Barkhausen noises without scratches and with scratches.

(3) 高い励磁周波数下で測定したバルクハウゼンノイズから再構成したアトラクタにおいても自己相似性を持つ図形を描くことができ、スクラッチの種類によりアトラクタの形状に変化が見られた。これにより金属疲労の度合いをアトラクタ形状によって評価できる可能性があることが明らかになった。

また今後の課題としては、

- (1) バルクハウゼンノイズのカオス性を定性的かつ定量的に評価する方法を模索し、その評価方法を金属材料の疲労推定へと応用していく。

文 献

- 1) M. Enokizono and A. Nishimizu: *J. of M. M. M.*, 133, 599 (1994).
- 2) M. Enokizono, T. Todaka and Y. Yoshitomi: *J. of M. M. M.*, 215-216, 43 (2000).
- 3) V. S. Gornakov, V. I. Nikitenko, I. A. Prudnikov, and V. T. Synogach: *Phys. Rev. B*, 46, 10829 (1992).
- 4) H. Okuno and T. Homma: *IEEE Trans. Magn.*, 29, 2506 (1993).
- 5) P. ペルジェ, Y. ポモウ, Ch. ビダル: カオスの中の秩序, 相澤洋二訳, (産業図書, 東京, 1992).