

バルクハウゼンノイズのカオスアトラクタによる金属疲労評価

Fatigue Evaluation Based on Chaotic Attractors of Barkhausen Noise

槌田雄二・安藤隆宏・榎園正人

大分大学工学部, 大分市旦野原 700 (〒870-1192)

Y. Tsuchida, T. Ando, and M. Enokizono

Faculty of Engineering, Oita Univ., 700 Dannoharu, Oita 870-1192

This paper presents a fatigue evaluation of steel plates based on chaotic attractors of Barkhausen noise. The fatigue and degradation of magnetic materials affect the magnetic domain. Hence these can be evaluated by Barkhausen noise. Barkhausen noise from magnetic materials is a very complicated wave. Thus we need a special evaluation method to use it. The quantitative change of Barkhausen noise after a fatigue stress test can be found by the fractal dimension of the chaotic attractors constructed by the measured Barkhausen noise.

Key words: fatigue evaluation, Barkhausen noise, chaotic attractor, fractal dimension

1. はじめに

180 度磁壁移動の際にバルクハウゼンノイズが生じることが知られている。疲労の進展に伴い転位の集積が起こり、磁性材料においては磁壁移動に影響を及ぼすため、バルクハウゼンノイズを測定することによってき裂が発生する以前の疲労状態を定量的に評価できると考えられる。渦電流探傷などに代表される従来までの非破壊検査はき裂の発生を探るものであり、き裂発生以前の疲労状態評価は更に進んだ技術である。しかしながらバルクハウゼンノイズは複雑な時系列信号であり、測定できるバルクハウゼンノイズをどのような方法で処理することで磁性材料の疲労状態を定量的に評価するかが課題であった¹⁾³⁾。従来までは、1 周期におけるバルクハウゼンノイズのパワー値を計算し、その変化によって磁性材料に付加した応力等の定量的な評価が可能であるかの検討が行われてきた。著者らも微小な磁性をもつステンレス鋼の熱疲労をバルクハウゼンノイズのパワー値変化によって定量的に評価できないか検討し報告した¹⁾。熱疲労によって、パワー値に僅かな変化があることを明らかにした。1 周期全体のパワー値を計算するということは、各時刻での信号値を加算してしまい、信号の任意時刻の有用な情報を失ってしまうことになると考えた。より効果的な信号処理方法が必要であると考えてきた。非線形時系列信号であるバルクハウゼンノイズを評価する方法として、非線形現象を非線形のままで扱うことが出来るカオス理論に着目した²⁾。まず、バルクハウゼンノイズ自体をカオス現象として取り扱うことが出来るかどうかを検討した。けい素鋼板から得られるバルクハウゼンノイズについて、(1)時系列信号の複雑さ、(2)スペクトルの連続性、(3)自己相関関数の変化、(4)再構成されたアトラクタの自己相似性の4項目に関して検討を行った²⁾³⁾。その結果、

バルクハウゼンノイズについてカオス性があると結論付けしスクラッチを入れたけい素鋼板から測定したバルクハウゼンノイズのアトラクタ形状の変化を吟味することで、疲労状態を評価できる可能性を報告した³⁾。バルクハウゼンノイズのカオス性については、これまでに単結晶材や理論上では報告されているが⁴⁾⁵⁾、産業上への応用は行われていない。本稿では、一般構造用圧延鋼材 SS400 を対象試料とし、本試料に面外曲げ疲労試験を行った時の疲労状態をバルクハウゼンノイズから再構成されるアトラクタの相関次元(フラクタル次元)から定量的に評価することを検討した。

2. 金属疲労測定

2.1 測定試料および面外曲げ疲労試験

Fig. 1 に今回用いた試料の形状・寸法を示す。試料の材料は一般構造用圧延鋼材 SS400 である。寸法 90 x 20 mm, 厚さ 1.4 mm の板材に、面外曲げ応力が試料中央部に集中するように Fig. 1 に示すような形状とした。面外曲げ疲労試験には、島津製作所製平面曲げ疲労試験機 UF15 を用い、30 Hz の周期で両振りの面外曲げ応力を試料に印加した。バルクハウゼンノイズは、Fig. 1 に示す試料中央部の 1 点においてセンサを設置し測定を行った。また本測定で用いた試料は As rolled とした。

2.2 センサおよび測定システム

バルクハウゼンノイズ測定用のセンサとして、これまでにいくつかのセンサについて検討を行ってきた¹⁾³⁾。それらの検討結果から今回の測定では Fig. 2 に示す形状・寸法のものを用いた。コアとして広帯域フェライトを用いた。フェライトコアにおけるバルクハウゼンノイズがほとんど影響しないことをこれまでに明らかにしている²⁾³⁾。

Fig. 3 にバルクハウゼンノイズの測定システムを示す。本図に示すように、Fig. 1 に示した試料を 2 つの U 字形鉄心コアで挟む形で励磁を行った。波形発生器で作成された励磁信号はパワーアンプを通して励磁コイルに供給される。励磁は 100 Hz の正弦波波形で行った。Fig. 2 に示したセンサにより測定された信号は、プリアン

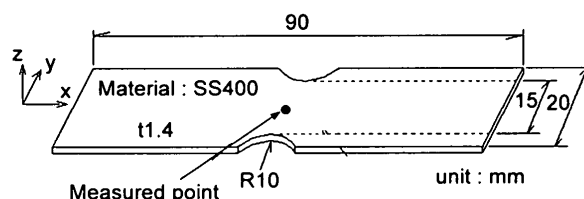


Fig. 1 Structural steel plate for bending fatigue test.

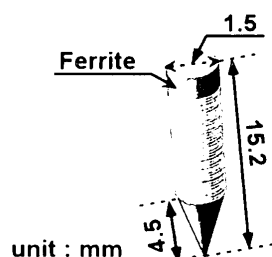


Fig. 2 Sensor to measure Barkhausen noise.

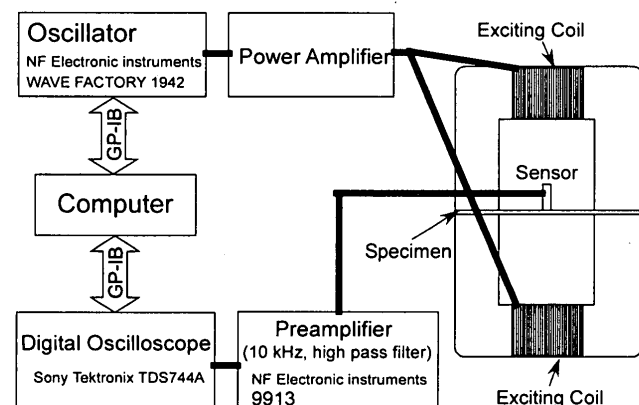


Fig. 3 Measurement system for Barkhausen noise of fatigued steel plates.

プで増幅される。プリアンプには 10 kHz のアナログハイパスフィルタが内蔵されており、励磁信号周辺の周波数帯域における信号はカットされることになる。バルクハウゼンノイズは、その後デジタルオシロによってデジタル化され、PC に蓄積されることになる。

3. カオスアトラクタとフラクタル次元

3.1 バルクハウゼンノイズのカオス性

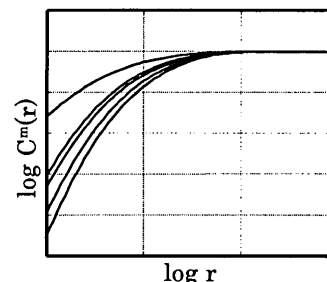
時系列データであるバルクハウゼンノイズのカオス性は以下の 4 項目について吟味することができる^{2), 3), 6)}。

- (1) 時系列データ自体の複雑性
- (2) 周波数領域スペクトルの連続性
- (3) 自己相関関数の減少性
- (4) 再構成されたアトラクタの自己相似性

けい素鋼板から得られるバルクハウゼンノイズにおいて上記 4 項目について検討を行い、バルクハウゼンノイズをカオス現象であると結論付けた^{2), 3)}。一般構造用圧延鋼材 SS400 から得られるバルクハウゼンノイズについても同様な結果が得られた。本稿では SS400 から得られるバルクハウゼンノイズはカオス現象であるとし、面外曲げ疲労を印加した後の信号から得られるカオスの特徴変化から鋼材の疲労度合いを定量的に評価する。

3.2 アトラクタの再構成

複雑な挙動を示す現象は、座標と速度の状態空間図(相図)を作成し、そのカオス性を吟味することができる。時系列データに対しては時間遅れ τ ごとの m 個のデータを 1 組に取ることで、 m 次元ベクトルを N 個新たに再構成することが出来る。いま、サンプリング総数 N_s 個の時系

Fig. 4 Correlation integral depending on increase of embedding dimension m .

列データが、

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s}, \quad (1)$$

のようにあるとする。新たな 2 次元ベクトルを N 個再構成するためには、

$$(x_1, x_{1+\tau}), (x_2, x_{2+\tau}), (x_3, x_{3+\tau}), \dots, (x_N, x_{N+\tau}), \quad (2)$$

のように要素 2 のデータ組を再構成すればよい。要素 m のデータ組を N 個再構成すれば m 次元ベクトルの新たなデータとなる。このように時系列データからアトラクタを再構成する方法は埋め込み法と呼ばれ、時系列データのカオス性を吟味するために用いられている⁶⁾⁻⁹⁾。

3.3 相関積分とフラクタル次元

再構成されたアトラクタよりカオスの特徴を評価する方法として、(1)相関次元(フラクタル次元)解析、(2)リヤプノフスペクトル解析の 2 点がある⁹⁾。本稿では、前者の方法を用いてバルクハウゼンノイズから再構成されるアトラクタの特徴を評価し、試料の疲労状態との関連性を吟味した。前項に示した埋め込み法により、サンプリング点 i において m 次元ベクトルを再構成し、以下のように表せるとする。

$$\mathbf{X}(i) = (x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}), \quad i = 1 \dots N. \quad (3)$$

この時、次式を相関積分と呼ぶ。

$$C^m(r) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^N I(r - |\mathbf{X}(i) - \mathbf{X}(j)|), \quad (4)$$

r は任意の値である。ここで、

$$I(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}, \quad (5)$$

であり、これはヘビサイドの関数と呼ばれるものである。つまり(4)式は、再構成された 2 つのベクトル $\mathbf{X}(i)$ と $\mathbf{X}(j)$ の距離が、半径 r 内の超球内にあるかどうかの総和を表している⁹⁾。埋め込み次元 m を 2 から増やしていくと、Fig. 4 に示すようなグラフになる。 m を増やしていくと、傾きが緩やかなグラフから傾きが急なグラフへと変化していく。この時、それぞれの傾きを $\nu(m)$ で表し、これを相関指数と呼ぶ。埋め込み次元 m を増やしていった時、この相関指数 $\nu(m)$ がある一定の値に飽和するならば、これを相関次元(フラクタル次元)と呼ぶ。以上の方法によってアトラクタのフラクタル次元を求める方法を相関積分法あるいは G P 法と呼ぶ⁷⁾⁻⁹⁾。

4. 測定結果と考察

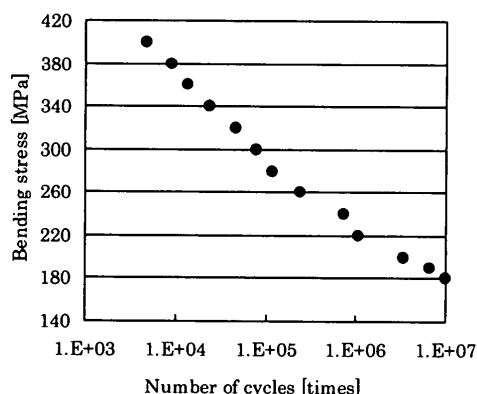


Fig. 5 S-N curve of bending stress.

4.1 バルクハウゼン信号と疲労度合い

Fig. 5 に面外曲げ応力と疲労破壊した繰返し回数の関係を表す S-N 曲線を示す。本図から今回用いた SS400 の疲労限は 180 MPa 前後であることが分かる。本稿では曲げ応力として、320 MPa を用いた。Fig. 5 より、この面外曲げ応力では 5 万回前後の繰返し回数で疲労破壊することが分かる。

面外曲げ疲労試験を行う前の試料から測定されたバルクハウゼンノイズを Fig. 6(a) に、320 MPa の面外曲げ応力で 20,000, 40,000, 60,000 回平面曲げ疲労試験を行った後の試料から測定されたバルクハウゼンノイズを Fig. 6(b) から (d) にそれぞれ示す。これらのバルクハウゼンノイズを測定した時の励磁コイルに供給した正弦波の周波数は 100 Hz であり、それぞれの図には励磁波形 1 周期の間に測定されたバルクハウゼンノイズが示されている。バルクハウゼンノイズは励磁磁束の変化が大きいところで発生するので、Figs. 6 に表れているように、1 周期間に 2 箇所多く発生

する。それぞれの図を比較して見ると、疲労試験前後においてバルクハウゼンノイズ波形自体は、ほぼ同じような形であり、バルクハウゼンノイズ波形自体からは試料の疲労度合いを評価することはできない。

4.2 アトラクタと疲労度合い

3.2 節で述べた埋め込み法により Figs. 6 に示したバルクハウゼンノイズの時系列データからアトラクタを再構成したものを Figs. 7 に示す。それぞれのアトラクタは、ほぼ自己相似形状になっており、カオスの特徴が表れていると言える。疲労前、および各疲労回数後においてアトラクタの形状に変化は見られるが、形状変化から疲労度合いを定量的に評価することは困難であることが分かる。

4.3 相関次元と疲労度合い

バルクハウゼンノイズの時系列データより、3.3 節(4)式で示される相関積分の値を計算した。ここで埋め込み次元 m は 2 から 10 まで変化させた時のそれぞれのグラフを Figs. 8 に示す。3.3 節の Fig. 4 で述べたのと同様に、埋め込み次元が 2 の時に一番傾きが緩やかなグラフになり、 m を大きくして行くと、傾きが急なグラフとなる。Fig. 8(a) は疲労

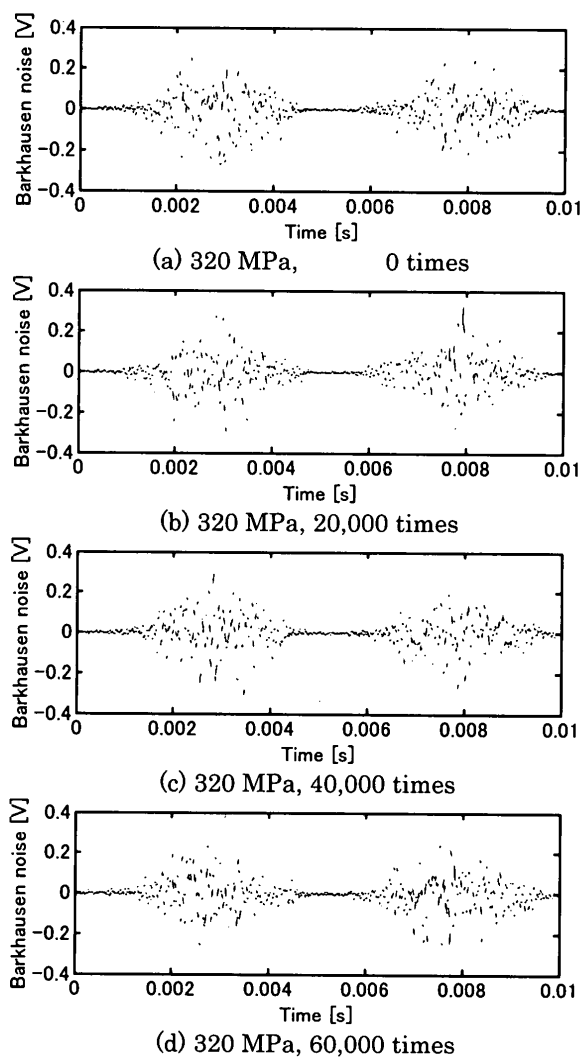


Fig. 6 Barkhausen noise before and after fatigue test.

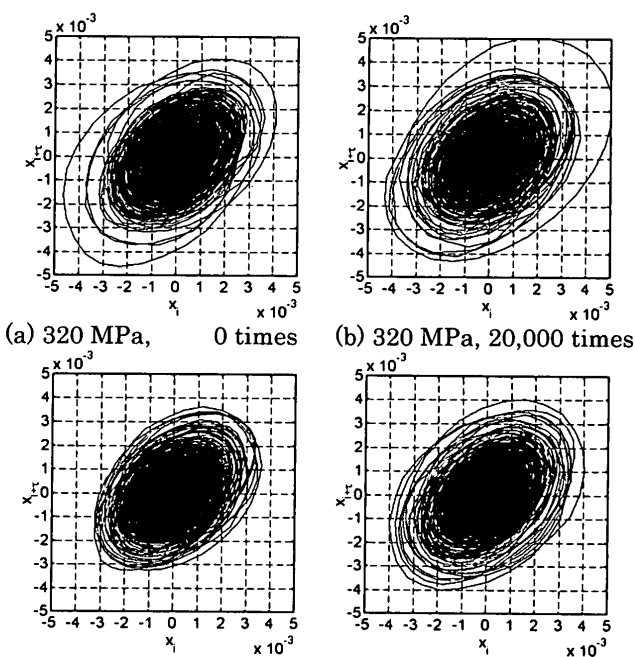
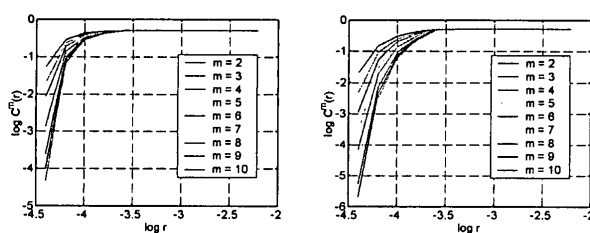


Fig. 7 Constructed attractor from Barkhausen noise before and after fatigue test.



(a) 320 MPa, 0 times (b) 320 MPa, 60,000 times
Fig. 8 Graph of correlation integral before and after fatigue test.

試験前の場合であり、Fig. 8(b)は 60,000 回面外曲げ疲労を行った場合である。両者を比較してみると、それぞれの埋め込み次元 m におけるグラフの傾き $\nu(m)$ が異なることが分かる。20,000 回、40,000 回疲労試験後の相関積分も計算したが、Fig. 8(a)に示す疲労前の場合とほとんど変わらないグラフとなった。

埋め込み次元 m が 10 次元の時、その傾きに相当する相関指数 $\nu(m)$ が飽和するとし、その値を相関次元とした。この時、各疲労回数に対する相関次元の値をプロットしたものを Fig. 9 に示す。この図より、面外曲げ疲労 40,000 回までは相関次元の値はほとんど変化せず、面外曲げ疲労 60,000 回の時に大きく変化することが分かる。Fig. 5 に示した S-N 曲線より、320 MPa の面外曲げ応力を 60,000 回繰り返した状態は試料が破断する直前であると考えられるので、相関次元は破断する直前で大きく変化することが分かる。実際に面外曲げ疲労 60,000 回繰り返した試料を CCD 顕微鏡で 50 倍に拡大した写真を Fig. 10 に示す。Fig. 10 左に示した試料形状の内、点線で囲った部分、つまり面外曲げ応力が集中する試料中央部の拡大写真である。本写真にあるように試料中央部の両端くぼみ部で微小なき裂が観察できた。これらのき裂は 40,000 回までは観測できなかった。したがって、本試料は破断する直前であると推測することができる。バルクハウゼンノイズを測定している点の周辺部ではき裂等の外部変化は観測することは出来なかった。Fig. 9 における変化はき裂が発生する前の疲労状態をバルクハウゼンノイズによって測定し、その変化を相関次元によって定量的に表すことができたと考えられる。

5. 結論

面外曲げ疲労試験を行った前後の一般構造用圧延鋼材 SS400 についてバルクハウゼンノイズの測定を行い、そのカオスの特徴から SS400 の疲労状態を定量的に評価できないか検討を行った。その結果として、

(1)バルクハウゼンノイズの波形自体には、疲労度合いによ

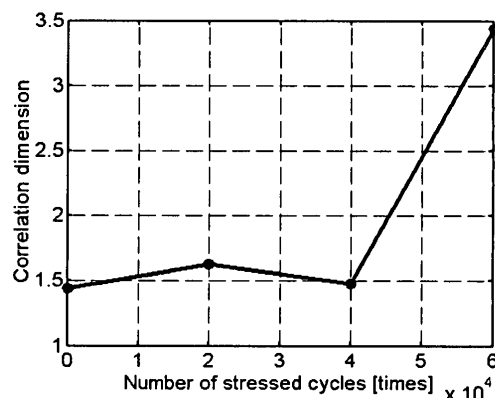


Fig. 9 Relationship between number of applied stress cycles and correlation dimension.

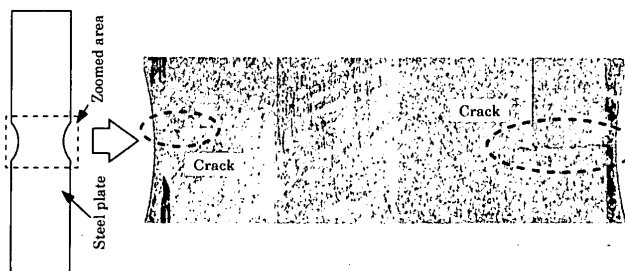


Fig. 10 Crack observation on fatigued part after 60,000-time cycles (x 50).

って変化を見出すことができなかった。

(2)バルクハウゼンノイズから再構成されるアトラクタは、疲労度合いによってその形状が変化するが、その形状から疲労度合いを定量的に評価するまでには至らなかった。

(3)バルクハウゼンノイズの相関次元を調べることによって、疲労度合いと相関次元が定量的な関係があることが分かった。

文 献

- 1) M. Enokizono and A. Nishimizu: *J. of Magn. Magn. Mat.*, 133, 599 (1994).
- 2) M. Enokizono, T. Todaka and Y. Yoshitomi: *J. of Magn. Magn. Mat.*, 215-216, 43 (2000).
- 3) Y. Tsuchida, Y. Yoshitomi and M. Enokizono: *J. of Magn. Soc. of Jpn.*, 25, 1099 (2001).
- 4) V. S. Gornakov, V. I. Nikitenko, I. A. Prudnikov, and V. T. Synogach: *Phys. Rev. B*, 46, 10829 (1992).
- 5) H. Okuno and T. Homma: *IEEE Trans. Magn.*, 29, 2506 (1993).
- 6) T. Shimojo: *Chaos rikigaku nyumon*, (Kindaikagakusya, Tokyo, 1992).
- 7) P. Berge, Y. Pomeau and Ch. Vidal: *L'ordre dans le Chaos*, trans. into Japanese by Y. Aizawa (Chaos no nakano chitsuijiyo, Sangyotosho, Tokyo, 1992).
- 8) K. Aihara: *Chaos seminar*, (Kaibundou, Tokyo, 1994).
- 9) T. Ikeguchi, T. Yamada and M. Komuro: *Chaos jikeiretsukaiseki no kiso to ouyou*, ed. by K. Aihara (Sangyotosho, Tokyo, 2000).

2001 年 10 月 09 日受理, 2002 年 02 月 07 日採録