バルクハウゼン信号による無方向性電磁鋼板の非破壊応力評価

Non-destructive Stress Evaluation by Measuring Barkhausen Signals on Non-oriented Electrical Steel Sheet

槌田 雄二^{*1} (正員), 榎園 正人 (正員)^{*1,*2}

Yuji TSUCHIDA (Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

The Barkhausen signal was used for the non-destructive evaluation methods in order to evaluate residual stress levels in ferromagnetic materials. However, it cannot be said that this technique has been established completely because the evaluation is usually not done under controlled magnetic flux conditions. When the magnetic field is applied into the materials by the exciting coil, material characteristics will change, therefore, controlling the magnetic flux condition is required for the precise evaluation of magnetic materials. Some results of the residual stress level evaluation using Barkhausen signals under the controlled magnetic flux condition measured from different tensile stressed specimens are shown and discussed them for high efficiency motors in this paper.

Keywords: Magnetic loss, High efficiency motors, Stress measurement, Barkhausen signals.

(2016 年 5 月 13 日受付)

1 緒言

一般的に、モータなど、磁性材料を使用した電気機器を製造する際、製造工程で機械加工が必要である。製造時、モータ鉄心部では、打抜き、積層、巻き線、圧入時等の機械加工により応力を発生してしまう。その際、製造工程によって、引張応力、圧縮応力、せん断応力による残留応力が生じ、残留応力が発生した部分では、多くの場合、磁気特性が劣化してしまうため、応力が原因で製品の性能や効率が減少してしまう(磁束が発生する方向に 10~30 (MPa)程度の引張応力が発生する場合のみ、磁気特性が改善することが分かっている)。これらの問題を改善するには、残留応力が発生する部分の応力分布を検出し、磁性材料の磁気特性が劣化しない機械加工方法を検討する必要がある。更に、製造工程時に磁気特性が改善する引張応力を能動的に印加する機械加工が実現出来れば、モータの低損失・高効率化に繋がる。

これまで、我々の研究室では、非破壊的な材質評価方法として X 解析法を用いて残留応力の評価を行ってきた [1]。X 線を用いれば、結晶構造のミクロなひずみ情報が詳細に測定出来る。しかしながら、その反面、原理上、膨大な測定時間が必要になる。また、X 線残留応力計測システムは非常に高価で大型であるため、

モータ製造ラインに導入する事は困難である。したがって、製造ラインにおいても、残留応力を評価可能な簡便な評価方法が必要となる。そこで、磁気センサを用いて磁性材料に発生する残留応力を評価する手法について検討を行った。本論文では、磁気センサで測定可能な物理量であり、応力に鋭敏に相関があるバルクハウゼン信号に着目した。

バルクハウゼン信号は強磁性体を磁化する際に、180 度磁壁移動に伴い、不連続に発生する磁気信号であると考えられている。これまでも、バルクハウゼン信号は、非破壊検査法の一つとして提案され、残留応力評価に関する研究も行われてきている [2]。これまでの研究では、鉄系鋼板に対して、引張応力に関するバルクハウゼン信号の評価の報告がある。西原らは、電磁鋼板において引張応力を印加するとバルクハウゼン信号は増加すると報告し、M. J. Sablik らは、ケーブル用の高炭素鋼の場合は、バルクハウゼン信号が減少したと、異なる傾向が報告されている [3, 4]。バルクハウゼン信号は複雑な信号であり、応力の大小とバルクハウゼン信号増減の相関については、まだまだ議論の余地があると考えられる。差異が生じる 1 つの要因として、バルクハウゼン信号を測定する際に、磁束条件を一定に保って測定していない点が挙げられる。磁性材料は引張応力等の外部応力を加えると磁気特性が劣化してしまい、異なる材料に変化したと同じ事になる。このため、応力印加前後で、磁束条件を同一にして、

連絡先：槌田 雄二, 〒870-1123 大分市大字旦野原 700,
大分大学工学部電気電子工学科,
e-mail: tsuchida@oita-u.ac.jp

^{*1} 大分大学 ^{*2} バクトル磁気特性技術研究所

バルクハウゼン信号を測定する必要がある。

ここで、Fig. 1 (a)に、測定試料内の磁束密度が最大値 1.0 (T)の正弦波波形となるように波形制御を行った場合の磁束密度波形とその条件下で測定したバルクハウゼン信号を示す。また、Fig. 1 (b)には、磁束密度の最大値を 1.0 (T)と同一にしているが、正弦波波形制御を行っていない場合の磁束密度波形とその条件下で測定したバルクハウゼン信号を示す。最大値が同一の磁束密度であっても波形形状を正弦波に制御するか否かによって測定出来るバルクハウゼン信号が大きく異なることが分かる。応力により磁気特性が変化すると、このような変化が顕著に表れるので、応力条件を変える場合は、厳密に磁束密度波形条件を同一にした上で

評価を行う必要がある。そこで、本論文では試験片の磁束条件が一定となるように磁束密度波形の制御を行い、試料内部の磁束条件を一定にした上で、バルクハウゼン信号変化の測定を行った。その後、測定試料に異なる引張応力を印加し、バルクハウゼン信号を測定し、応力との相関について考察・検討を行った。

2 バルクハウゼン信号の測定システムと測定条件

2.1 測定システム

バルクハウゼン信号の測定システムを Fig.2 に示す。Fig.2 に示すように、まず、PCで生成したデジタル励磁波形をD/A コンバータにてアナログ電圧へ変換した後、パワーアンプで増幅、励磁コイルに印加し、励磁

(a) Under controlled waveform of magnetic flux density at $B = 1.0$ (T).

(b) Under non-controlled waveform of magnetic flux density at $B = 1.0$ (T)

Fig. 1 Barkhausen signals measured under controlled and non-controlled waveforms of magnetic flux density.

Fig. 2 Measurement system for Barkhausen signals.

ヨーク及び測定試料に磁束を発生させる。次に測定試料に巻いた B コイルによって、試料中央部の誘導起電力を A/D コンバータによって集録し、PC にて磁束密度波形を変換する。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し行う。これにより磁束密度波形が所望の波形になった後、Fig. 2 右部のように、試料表面上に設置している BS センサによってバルクハウゼン信号を集録する [5]。集録した信号から誘起電圧波形以外の高周波成分のみを取り出すため、バンドパスフィルタを通し、プリアンプでバルクハウゼン信号のみを増幅し、A/D コンバータを介してバルクハウゼン信号を PC へ取り込む。励磁ヨークには電磁鋼板を用い、測定試料上下に設置し、閉磁路を形成した。ダブルヨーク式とすることで測定試料測定部の磁束均一化を図った。電磁鋼板コアの上下に励磁コイルとして $\phi 1.0$ (mm) のホルマル線を 80 ターン巻いた。印加応力値はおもりと試料断面積から算出した。

バルクハウゼン信号を測定するための BS センサの構造を Fig. 3 に示す。本センサは、フェライトコアに $\phi 0.08$ (mm) のホルマル線を 960 ターン巻いたものである。フェライトコアを用いる事で高感度化が可能であり、フェライトコアで発生するバルクハウゼン信号は、ほぼ無視出来る事をこれまでに確認している [3]。

測定条件を Table 1 に、Fig.4 に試料の寸法を示す。測定試料は無方向性電磁 H12 (20 mm×200mm×t 0.5 mm) を用い、圧延方向が長手方向に対して、 $\theta = 0, 45, 90$ (°) と異なるものを用意した(以下、それぞれの測定試料名を Sample-0°, Sample-45°, Sample-90° とする)。実際のモータコアの多くは磁束発生方向に対して圧延方向が様々な方向となり、測定部位により圧延方向が異なるため、より実用的にバルクハウゼン信号を評価するために、以上の測定試料を用意した。励磁周波数は、 $f = 50$ (Hz)一定とし、波形制御のための B コイルは $\phi 0.1$ (mm) のホルマル線を 10 ターン巻いた。波形制御する磁束密度は $B = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ (T) とし、印加する応力は $\sigma = 0, 15, 30$ (MPa) とし、各測定条件でのバルクハウゼン信号の測定を行った。

2.2 バルクハウゼン信号の評価方法

バルクハウゼン信号は複雑な信号であるため、印加した応力とバルクハウゼン信号の相関を定量的に評価するため、今回は、応力印加前後でのバルクハウゼン信号の実効値を算出した。ここで、BS センサにより測定可能なバルクハウゼン信号の電圧値を $v(t)$ (V) とす

ると、1 周期の実効値は次式より計算出来る。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} . \quad (1)$$

Fig. 3 Sensor for Barkhausen signals named as BS Sensor.

Fig. 4 Specimens and their rolling directions.

Table 1
Measurement Conditions of Barkhausen Signals.

Measurement material	Non-oriented electrical steel sheet (H12)
Number of B-coil	10 (turn)
Applied tensile stress	0, 15, 30 (MPa)
Magnetic flux condition	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 (T)
Excitation frequency	50 (Hz)
Rolling direction	$\theta = 0, 45, 90$ (deg.)

Fig. 5 RMS values of Barkhausen signals to amplitudes of the magnetic flux density and rolling directions.

3 測定結果とその検討

3.1 印加応力に対するバルクハウゼン信号測定結果

各サンプルに対して、Table 1 に示したすべての磁束密度条件下で測定したバルクハウゼン信号の実効値を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から分かるように、磁束密度 B を高くなると、同信号の実効値は増加する事が分かる。また、バルクハウゼン信号は磁化困難軸方向に磁化する時に磁化のモーメントの動きを妨げる要因が大きいため、バルクハウゼンジャンプが大きくなり、誘起起電力が大きくなると考えられる [5]。Fig. 5 より、圧延方向に対して、バルクハウゼン信号の実効値は異なる事が明らかである。この時のバルクハウゼン信号の時系列信号を次に示す。Fig. 6 に最大磁束密度 $B = 1.0$ (T) の正弦波となるように波形制御した条件で、Sample-0°、Sample-45°、Sample-90° のバルクハウゼン信号波形をそれぞれ示す。Fig. 6 のバルクハウゼン信号を見ると、Sample-0° に比べ、Sample-45°、Sample-90° となるにしたがって信号の振幅が大きくなっており、Fig. 5 の結果と一致する。

次に、Sample-90° において、磁束密度 $B = 0.2, 0.6, 1.0$ (T) 時のバルクハウゼン信号測定結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 のそれぞれの信号を見ると、磁束密度が増加するにつれてバルクハウゼン信号の振幅は大きくなっている。Sample-0° でも同様であるが、磁束密度が増加すると磁化モーメントが大きくなるため、バルクハウゼンジャンプによる誘導起電力も増加するためであると考えられる。

更に、Sample-0°、Sample-45°、Sample-90° の内、応力に対して最も鋭敏に信号変化を示した Sample-

(a) $B = 1.0$ (T), $\theta = 0^\circ$.

(b) $B = 1.0$ (T), $\theta = 45^\circ$.

(c) $B = 1.0$ (T), $\theta = 90^\circ$.

Fig. 6 Barkhausen signals depending on the rolling directions.

90° について、磁束密度 $B = 1.0$ (T)、印加応力 $\sigma = 0, 15, 30$ (MPa) をそれぞれに加えた時のバルクハウゼン信号変化を Fig. 8 に示す。Fig. 8 の波形を見ると印加応力が増加するにつれて、バルクハウゼン信号波形の振

(a) $\theta = 90^\circ$, $B = 0.2$ (T). (b) $\theta = 90^\circ$, $B = 0.6$ (T). (c) $\theta = 90^\circ$, $B = 1.0$ (T).

Fig. 7 Barkhausen signals depending on the amplitude of the magnetic flux density.

幅は減少している。これは引張応力を加えることで磁化モーメントが動きやすい向きに応力が加わり、磁化モーメントが動きやすくなることで、バルクハウゼンジャンプが少なくなり、それに伴う誘導起電力が小さくなったと考えられる。実用的な電磁鋼板の磁壁

(a) $B = 1.0$ (T), $\theta = 90^\circ$, $\sigma = 0$ (MPa). (b) $B = 1.0$ (T), $\theta = 90^\circ$, $\sigma = 15$ (MPa). (c) $B = 1.0$ (T), $\theta = 90^\circ$, $\sigma = 30$ (MPa).

Fig. 8 Barkhausen signals depending on the applied tensile stress.

移動の観察等から、本現象の本質的な要因を解明する必要がある。

以上のように、バルクハウゼン信号の実効値と印加応力値との相関を、磁束密度ごとに並べた結果を Fig. 9(a)から(c)に示す。Fig. 9 を見てみると $B = 0.6$ (T)

以上では応力値が増加すると実効値変化はどの測定試料でも減少傾向を示した。また印加応力に対する実効値の減少傾向が得られている中で磁束密度 B が高くなるにつれて応力値 σ に対しての実効値変化量は大きくなった。それに対し、Sample-0° では印加応力値が増加するごとに実効値は増加し Sample-45° では減少した。また、Sample-90° では $\sigma=15$ (MPa) では実効値は増加し $\sigma=30$ (MPa) では減少した。圧延方向が異なることで磁化モーメントの変化量が異なることを先程述べたが、同じ印加応力値を加えたにも関わらず圧延方向ごとの実効値の変化の傾向に違いがあるとは考えがたい。このような結果になった原因としては、磁束密度 B が低い領域では、ノイズの影響を強く受け、S/N 比が悪くなるためであると考えている。

以上のことからバルクハウゼン信号で応力を評価する際には磁束密度 B が高いところで評価すれば、印加応力に対する実効値に減少傾向が得られ、バルクハウゼン信号の実効値による引張応力の定量的評価が可能になると考えられる。実用化のためには、サンプル数を増やす、測定条件を増やす等の追加検討が必要である。

4 結言

本論文で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 圧延方向の違いからバルクハウゼン信号の波形が異なること明らかにした。
- (2) 磁束密度 B が増加すると磁化モーメントも増加し、バルクハウゼン信号波形の振幅が大きくなる。
- (3) 圧延方向が試料長手方向に対して $\theta=90^\circ$ の時、応力に対して、バルクハウゼン信号波形の実効値が最も減少することが分かった。
- (4) $B=0.6$ (T) 以上では、どの測定試料においても応力値が増加するとバルクハウゼン信号波形の実効値が減少する。また、この傾向は磁束密度 B が高い程、顕著であることが分かった。

以上の結果を基に、高効率・低損失モータ開発のために、オンライン上で、電磁鋼板の残留応力評価が可能なシステムを開発して行く予定である。

謝辞

本研究の一部は科研費（基盤研究(C) 26420391）の助成によるものです。

(a) $\theta = 0^\circ$

(b) $\theta = 45^\circ$

(c) $\theta = 90^\circ$

Fig. 9 Changes of RMS values depending on the rolling direction from the applied tensile stress under the different magnetic flux density.

参考文献

- [1] K. Kojima, H. Nishihara, H. Maeda, Y. Shindo, N. Ohtsuka, Barkhausen Noise from 45 Permalloy Thin Plates Applied of Tensile Stress, *Kansai branch seminar lecture dissertation collection*, Vol. 9, No. 1, pp. 83, 2008.
- [2] M.J. Sablik and B. Augustyniak, The effect of mechanical stress on A Barkhausen noise signal integrated across a cycle of ramped magnetic field, *Journal of applied physics*, 79(2), pp. 963-972, 1996.
- [3] Y. Tsuchida and M. Enokizono, Stress Evaluation of Steel Plates by Chaos of Barkhausen Noise, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 38, No. 5, pp. 3210-3212, 2002.
- [4] Y. Tsuchida, M. Enokizono, and Y. Yoshitomi, Chaotic Behavior of Rotational Barkhausen Noises, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 4, No. 2, pp. 1099-1102, 2001.