Magnetic Power Loss Characteristics of Non-oriented Electrical Steel Sheets under Stress

Y. Tani, A. Daikoku, M. Nakano, H. Arita, S. Yamaguchi, and Y. Toide

Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

The stress that acts on the core by installing a stator in a frame influences the performance of a motor. To reflect this influence in the equipment design, the stress dependence of the magnetic property was examined for non-oriented electrical steels, which are the core materials. This time, the stress dependence of the magnetic power loss in the range of ± 225 MPa was evaluated for high-grade non-oriented electrical steel sheets of 0.5 mm thickness, and the following results were obtained. (1) The influence on the magnetic power loss is larger under compression than under tensile stress. The loss increases rapidly with an increase in the compressive stress. However, when the stress exceeds ~ 50 MPa, the saturation tendency of the loss gradually becomes strong. (2) The influence of the stress on the magnetic power loss is different in the rolling direction and the traverse direction. (3) A greater magnetic power loss that occurs with compressive stress is mainly due to an increase in hysteresis loss, and the eddy current loss also increases slightly. It is thought that this slight increase in the eddy current loss that occurs with compressive stress depends on the change in the anomalous loss.

Key words: non-oriented electrical steel sheets, mechanical stress, magnetic power loss, hysteresis loss, eddy current loss

応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性

谷良浩・大穀晃裕・中野正嗣・有田秀哲・山口信一・都出結花利

三菱電機 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 (〒661-8661)

1. はじめに

モータの開発では、鉄心素材特性をもとに磁界解析技術を活用した磁気回路設計を行い、機器性能を事前に算定し、さらなる高性能化を図る手法が広く行われている。しかし、設計と実機では性能差が生じるケースが多い。差異が生じる原因の一つが製造工程での鉄心加工や組み立てに伴う鉄心磁気特性の劣化であり、固定子のフレームへの焼きばめ装着は劣化要因の一つに挙げられる¹⁾。焼きばめにより固定子コアバックの周方向に圧縮応力が発生する。その大きさは、機種、フレーム仕様により千差万別であるが、コアバック部の平均でも数十MPa、応力が集中する部位では150 MPa以上となるケースもある²⁾。応力が影響する機器設計に関わる素材磁気特性として磁化特性と鉄損が挙げられ、前者はモータのコギングトルク性能、後者は効率性能への影響が懸念される。

そこで筆者らは、印加応力に対する磁気特性の変化をモデル化した上で、構造解析による応力分布計算と磁界解析の連成によりモータ特性を計算する解析システムの開発を行い、コギングトルクへの応力の影響について検討を行った^{2), 3)}。この中で、解析の材料パラメータとなる素材磁気特性の弾性変形下での応力依存性を評価するため、励磁方向と平行に100 MPaを超える応力を試料に均一に付与した状態で計測が可能な磁気特性測定システムを製作し、無方向性電磁鋼板の磁化特性への影響を評価した^{4), 5)}。一方、鉄損については、機器効率化の対策として焼きばめ応力の低減法が検討されているが^{6), 7)}、応力の鉄損への影響を定量的に把握し設計に取り入れるまでには至っていない。そこで、この影響をモデル化し機器設計に反映すべく、各種無方向性電磁鋼板を対象に応力下での鉄損についてデータベース化を図っている。本稿では、0.5 mm厚のハイグレード電磁鋼板を対象に行った ± 225 MPa範囲での鉄損への影響について報告する。

2. 応力下での鉄損測定法

2.1 磁気試験器

磁気特性の測定には、一枚の平板試料を長手方向に励磁して磁気特性を評価する単板磁気試験器(SST)を用いた。このSSTに励磁方向と平行に試料を加圧可能な応力印加機構を設け、応力印加時の磁気特性を測定できるようにした。装置の構成をFig. 1に示す。磁気特性の測定部分はシングルヨーク型の磁路構成で、試料を交番励磁した時の磁界の強さ H と磁束密度 B を検出コイルにより測定する。2Hコイル構成のHコイルと空隙補償コイル付きBコイルを、励磁コイルの中心40 mmの範囲に設置した。

この試験器では、エプスタイン試験器の測定試料を測定対象に考慮しており、30 mm幅で180 mm～300 mm長の短冊試料が測定可能である。測定では試料の一部140 mmがヨークと接する。ヨーク接触部より両側に延びた試料の一端を固定クランプに拘束し、もう一方の端部はバネによる応力印加機構(最大印加応力は0.5 mm厚、30 mm幅試料換算で ± 330 MPa)に可動クランプを介し

Fig. 1 SST with stress application mechanism.

Table 1 Specification of test samples.

Sample grade	50A290	
Measurement direction	Rolling direction (RD)	Traverse direction (TD)
State and shape of samples	The state cut with the shearing machine. T0.5 x W30 x L300 mm	
Yield point	400 MPa or more	
Specific resistance ($\mu\Omega\text{m}$)	0.59

Fig. 2 Magnetic power loss characteristics of test specimens without applied stress at 50 Hz. The difference of the magnetic property of the TD material and the RD material is shown in the TD/RD ratio. **Fig. 3** Mechanical strain characteristics of samples due to applied stress in SST.

て接続している。拘束・接続のための掴み代は片側 20 mm で、ロードセルが可動クランプとバネとの間に配され、加圧力を検出する。圧縮時に発生する試料の反り変形を防止するため、ガラスエポキシ製バックリング防止板により試料を励磁棒との間にはさみ平坦性を保持した。なお、防止板の保持はその両端 2 カ所を機械的に拘束した。

鉄損測定は、デジタルフィードバックによる波形制御を行い、

磁束誘起電圧の波形率が $1.11 \pm 1\%$ となる磁束正弦波条件にて行った。以後、この応力印加機構付き SST を S-SST (SST with stress application mechanism) と呼称する。

2.2 評価試料と応力印加状態

今回測定対象とした電磁鋼板は JIS グレード 50A290 で、Table 1 に示したように、幅 30 mm、長さ 300 mm サイズの試料長手を圧延方向 (RD)、あるいは圧延直交方向 (TD) にシャー裁断し測定に供した。無方向性電磁鋼板は弱いながらも磁気異方性を有しており、異方性の大小はグレードにより異なる。供試材は 0.5 mm 板厚のグレードでは磁気異方性の大きい素材である。応力無印加での RD と TD の 50 Hz 鉄損の差異を Fig. 2 において両供試材の鉄損と鉄損比率にて示す。そこで、磁気異方性の存在も考慮し、鉄損の応力依存性をエプスタイン試験と同じく圧延方向と圧延直交方向の二方向にて評価した。

S-SST での応力印加はバネを介した応力制御であり、測定を弾性領域で行うために応力印加上限を測定対象試料の降伏点の半分に設定した。今回の試料では降伏点が 400 MPa 以上あり、応力印加上限を ± 225 MPa とした。試料への応力印加状態を確認するため、磁気測定範囲となる試料中央部に金属歪みゲージを接着すると共にバックリング防止板にも歪みゲージ測定用窓を設け、応力・歪み特性を測定した。Fig. 3 に加圧時の測定結果を示す。なお、S-SST のバックリング防止機構は圧縮時のみ使用した。RD、TD 何れの試料もバックリング防止機構を稼働した圧縮下では直線性が若干乱れるが、応力・歪み曲線に特に問題となるような大きな変化は起きていない。また、図中に記した応力・歪み曲線の傾きより求めたヤング率相当値はメーカー公表値に近い値であること、引張と圧縮時の値はほぼ同じであることなどの点より、応力は試料長手方向の面内に適切に印加されその大きさも試料の弾性範囲内であると考えられる。

3. 測定結果・考察

3.1 応力下での交流 B-H ループと鉄損 (50 Hz)

応力下で 50 Hz 励磁した B-H ループの変化を圧延方向材 (RD) の最大磁束密度 $B_m = 1.0$ T を例に、引張応力の場合を Fig. 4 に、圧縮応力の場合を Fig. 5 にそれぞれ示す。

引張、圧縮の応力が増加すると、磁界の強さの最大値と保磁力は増加し、逆に残留磁束密度は低下する。特に圧縮時、磁界の強さの変化は引張時より一桁程度大きく、保磁力も応力無印加状態に比較し 2 倍以上大きくなっている。この保磁力増加の影響により磁束密度 0.3 T 以下でのループ面積の広がりが見え立つなど、低磁束密度において圧縮応力の影響が顕著に表れている。

Fig. 6 に圧延方向の磁束密度・鉄損曲線を示す。◆記号の応力無印加に対し、引張応力を 200 MPa 加えても鉄損はわずかに増減するだけであるが、圧縮では 50 MPa の応力でも鉄損は大きく増加した。

3.2 鉄損の応力依存性 (50 Hz)

磁束密度・鉄損曲線のうち $B_m = 0.5, 1.0, 1.5$ T を代表点に選び、50 Hz での鉄損の応力依存性を Fig. 7 に示す。さらに、応力無印加状態に対する鉄損の変化率を Fig. 8、圧延方向に対する圧延直交方向の鉄損比の変化を Fig. 9 にそれぞれ示す。

Fig. 4 Comparison of ac B-H curves under tensile stress for 50A290-RD at 50 Hz.

Fig. 5 Comparison of ac B-H curves under compressive stress for 50A290-RD at 50 Hz.

Fig. 6 Change in magnetic power loss due to applied stress for 50A290-RD at 50 Hz.

Fig. 7 Stress dependence of the magnetic power loss at 50 Hz.

Fig. 8 Change rate of magnetic power loss from the state of no stress due to mechanical stress at 50 Hz.

Fig. 9 Change in the TD/RD ratio of the magnetic power loss due to mechanical stress at 50 Hz.

Fig. 7 から、引張と圧縮での鉄損は異なる傾向が見られる。引張では、応力の増加と共に鉄損は一旦減少した後増加に転じる。圧延方向の $B_m = 0.5, 1.0$ T では、さらに大きな応力を加えると、無印加時よりも鉄損が増加する。しかし、鉄損の変化は後で述べる圧縮下での影響に比べ遙かに小さい。圧縮下では小さな応力でも大きな鉄損変化を与え、応力の増加と共に鉄損は増加する。圧縮応力に対する鉄損の変化は無印加から -50 MPa 付近までは概ね比例と見なせるが、さらに応力が大きくなると増加は緩やかとなり徐々に飽和傾向を強める。

Fig. 8 より、応力に対する感受性は、圧縮に対しては圧延方向 (RD)、引張に対しては圧延直交方向 (TD) がより敏感である。フレームが焼きばめされた固定子では、一般にコアバック部周方向に圧縮応力が分布する。圧縮側だけに着目すれば、RD、TD いずれの供試材においても -50 MPa 以下の応力では鉄損変化が大きく、-50 MPa 以上では徐々に飽和傾向を強め、-100 MPa を超える領域では大きな変化は無い。また、低磁束密度ほど圧縮応力に対する変化率が大きく、応力に対してより敏感である。

Fig. 9 より、応力無印加状態では 2 倍近い RD 方向と TD 方向の鉄損の異方性は応力の印加に伴い低下し、同一値に近づく。異方性の低下は概ね ± 50 MPa までの応力印加で起きる。この傾向は磁束密度が低いほど顕著で、特に圧縮応力下では RD と TD の大小関係が逆転している。

3.3 鉄損の構成成分の応力依存性

鉄損はヒステリシス損 (W_h) と渦電流損 (W_e) で構成される。機器設計はこれらの鉄損成分をもとに磁界解析による鉄損推定が行われており、各成分への応力影響の把握は非常に重要となる。そこで、鉄損の変化率が大きかった圧縮時の圧延方向について、鉄損の構成成分への応力影響を調べた。各鉄損成分は、 B_m と応力が同じで励磁周波数 (50, 75, 100 Hz) が異なる鉄損 W_{pl} を測定し周波数分離にて求めた。Fig. 10 に鉄損成分の分離例として $B_m = 1.0$ T の場合を示す。なお、Fig. 11 以降の図では、周波数分離で得た W_h , W_e の係数を基に各鉄損成分を 50 Hz での損失に換算し示す。

鉄損分離した結果を磁束密度・鉄損成分曲線にて Fig. 11 に示す。応力無印加でのヒステリシス損は圧縮応力の印加に対し大きな増加を示すと共に磁束密度 B との依存関係も変化した。そこで、各ヒステリシス損の変化を磁束密度の累乗関数として近似し、近似式と近似曲線 (点線) を図中に示す。一般に応力無印加でのヒステリシス損は磁束密度の 1.6 乗から 2 乗の値をとるが (今回の測定結果でも 1.72 乗)、圧縮応力下でのそれは 1 以下となった。応力の増加に伴い累乗係数は減少し、ヒステリシス損の磁束密度に対する依存度が高磁束密度側で弱まり、低磁束密度側で強まる傾向となった。渦電流損も圧縮応力に対し微増しているが、Fig. 6 での圧縮時の鉄損増加の主因はヒステリシス損にあるといえる。

Fig. 7, Fig. 8 に対応するヒステリシス損、渦電流損の応力依存性を Fig. 12 に、圧縮応力による変化率を Fig. 13 に示す。ヒステリシス損、渦電流損とも 50 MPa 以下では応力印加に比例した損失の増加を示し、それよりも大きな圧縮応力では飽和していく。また、低磁束密度ほど応力の影響を受けやすい。応力無印加に対する変化率ではヒステリシス損は渦電流損の 2 倍以上大きい。

Fig. 11 での渦電流損が圧縮下で微増した点をより詳細に検討す

るため、薄板均一励磁での古典的渦電流損 W_{ce} を (1) 式より求め Fig. 12 に示す。

$$W_{ce} = (\pi \cdot t \cdot f \cdot B_m)^2 / (6 \cdot \rho \cdot \sigma) \quad (1)$$

(1) 式において、 t は試料厚み、 f は励磁周波数、 B_m は磁束密度振幅、 ρ は固有抵抗、 σ は密度である。圧縮応力での板厚変動は小さく古典的渦電流損は応力の影響を受けないとすれば、圧縮応力の印加に伴う渦電流損の増加は、渦電流損と古典的渦電流損の差、即ち異常渦電流損が圧縮応力の変化に伴い増加したものと考えられる。

ヒステリシス損の応力に対する変化は、磁歪を介した磁気弾性エネルギーの増減による磁区構造の変化として定性的には説明可能である。鉄の磁化容易軸 <001> の飽和磁歪は正である。励磁方向に圧縮応力が作用した場合、励磁方向に近い <100> では磁気弾性エネルギーの増加を抑えるよう磁化が向くため、180 度磁壁が応力方向と直交する磁区構造の割合が増える。逆に、引張応力で

Fig. 10 Frequency dependence of the magnetic power loss in a magnetic flux density of 1 T for 50A290-RD.

Fig. 11 Change in magnetic power loss elements (that is, hysteresis and eddy current loss) due to compression stress for 50A290-RD at 50 Hz.

は応力方向に 180 度磁壁が揃う磁区構造の割合が増えると考えられる。このため、圧縮時はヒステリシス損の増加等、磁気特性の劣化が顕著になる。また、異常渦電流は磁壁の移動に伴い発生することから、圧縮時の磁区構造の変化が異常渦電流の増加につながったものと推察される。

Fig. 12 Stress dependence of the hysteresis, eddy current, and classic eddy current losses for 50A290-RD at 50 Hz.

Fig. 13 Change rate of hysteresis and eddy current losses from the state of no stress due to compressive stress for 50A290-RD at 50 Hz.

4. まとめ

無方向性電磁鋼板 50A290 の圧延方向及び圧延直交方向の鉄損の応力依存性を評価するため、最大±225 MPa までの均一応力を試料に印加しながら各応力下での鉄損を測定し、以下の結果を得た。

- (1) 直交する 2 方向の試験材を作製したが、いずれの方向でも圧縮応力では鉄損が急増し、引張応力では僅かに減少後、微増に転じた。鉄損への影響は圧縮時の方が遙かに大きく、低い磁束密度ほど顕著である、しかし、圧縮応力が 50 MPa を超えると徐々に飽和傾向が強まる。
- (2) 鋼板の圧延方向と圧延直交方向を比較すると、前者は圧縮応力に対し敏感なのに対し、後者は引張応力に対し敏感で、より応力の影響を受け易い。このため、応力の印加方向における材料の磁気異方性は無印加時より低下する。
- (3) 圧縮応力での鉄損劣化の主因はヒステリシス損の増加によるが、渦電流損の微増も認められた。この渦電流損の微増は異常渦電流損によるものと考えられる。ヒステリシス損の磁束密度への依存関係では、圧縮応力の増加と共に高磁束密度での影響度が低下し低磁束密度での影響度が増した。これら鉄損を構成する成分の圧縮力に対する変化は、応力による磁区構造の変化に起因するものと考えられる。

謝辞 本研究の遂行にあたり S-SST の製作にご尽力いただきました東英工業の北邦郎氏を始めとする関係者の皆様に深く感謝いたします。

References

- 1) K. Yamamoto, E. Shimomura, K. Yamada, T. Sasaki : *TIEE Japan*, **117-A**, 311 (1997)(in Japanese).
- 2) A. Daikoku, M. Nakano, S. Yamaguchi, Y. Tani, Y. Toide, T. Yoshioka, H. Arita, C. Fujino : *IEEEJ*, SA-03-72 / RM-03-74 (2003) (in Japanese).
- 3) M. Nakano, A. Daikoku, S. Yamaguchi, Y. Tani, H. Arita, Y. Toide, T. Yoshioka, C. Fujino : *IEEEJ*, SA-04-16 / RM-04-16 (2004) (in Japanese).
- 4) Y. Tani, A. Daikoku, H. Arita, M. Nakano, S. Yamaguchi, Y. Toide, T. Yoshioka, C. Fujino : *IEEEJ*, MAG-03-191 (2003) (in Japanese).
- 5) Y. Tani, A. Daikoku, M. Nakano, H. Arita, Y. Toide, T. Yoshioka, S. Yamaguchi, C. Fujino : *IEEEJ*, MAG-04-91 (2004) (in Japanese).
- 6) H. Hiwaki, Y. Yoshikawa, T. Funatsu, T. Tamamura, H. Murakami, Y. Honda : *IEEEJ*, RM-04-63 (2004) (in Japanese).
- 7) M. Satoh, S. Kaneko, M. Tomita, S. Doki, S. Okuma : *JIASC2003*, 3-91 (2005) (in Japanese).

2005年10月19日受理, 2005年12月16日採録