

# 単板磁気試験器を用いた厚さ方向圧縮力と 磁気特性の相関に関する検討

Investigation of the Correlation between Compressive Force  
in the Thickness Direction and Magnetic Properties Using a Single-Sheet Tester

中岡將吉・高橋則雄・河邊盛男\*

岡山大学工学部, 岡山市津島中 3-1-1 (〒700-8530)

\*神鋼電機株式会社開発本部研究部, 伊勢市竹ヶ鼻町 100 (〒516-8550)

M. Nakaoka, N. Takahashi, and M. Kawabe\*

Faculty of Engineering, Okayama Univ., 3-1-1 Tsushima, Okayama 700-8530

\* R&D Laboratories, Shinko Electric Co., Ltd., 100 Takegahana, Ise 516-8550

The magnetic properties of a motor core are affected by the distortion due to the compression caused by bolt bundles. There have been few reports of such behavior being investigated systematically, although detailed examination of the behavior of magnetic properties is important. In this paper, the correlation between the compressive force of a silicon steel sheet and its magnetic properties is measured, using some single sheets compressed in the thickness direction. A special jig was prepared, and the magnetic field strength in the compressed region was measured using a Rogowski coil. The detailed behavior of the deterioration of the BH curve the iron loss due to cutting, and the compression caused by bolt bundles are illustrated.

**Key words:** electrical steel sheet, iron loss, deterioration, compressive force, bolt bundle

## 1. はじめに

電気鉄板メーカーのカタログ値を用いて、有限要素法などの数値解析法により電磁機器の磁気回路設計を行った場合、ボルト締めによるコアの締め付け圧力により、実機の特性は設計段階で推定した特性と異なることが問題になっている<sup>1)</sup>。機器の特性を精度良く推定するためには、この要因による磁気特性の変化を考慮する必要がある。そこで、本研究では、局所的に厚さ方向に圧縮力を加えている箇所のみの磁気特性の測定が可能な装置を開発し、本装置を用いて、コアの締め付け圧力が無方向性けい素鋼板の磁気特性に及ぼす影響の検討を行った。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に、作成した測定装置を示す。C形クランプを用いて試料に圧縮力を与えた。圧縮力の大きさは、クランプに設置した荷重変換器 (NEC 三栄社製、9E01-L43-1KN型) を用いて測定した。また、10 μm の分解能のスケールを備えたフライス盤を用いて、10 mm × 10 mm × 5 mm のガラスエポキシ板を作成し、これを試料に密着させて、その上から圧縮力を加えた。このようにすることで、ガラスエポキシ板の密着する部分 (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) の平面にかかる圧縮力から、試料に印加した圧力 (MPa) を求めることが出来る。このように、試料とクランプの間に非磁性のガラスエポキシ板およびアクリル板を挿入したので、鉄製のクランプは磁気特性の測定値の影響は与えないと考えられる。実際、0 MPaにおいて、鉄製のクランプありの場合となしの場合の結果を比較

した結果、その影響はなかった。

Fig. 1 に示すように、作成した測定装置は C形クランプで測定領域を局所的に加圧する構造であるため、Hコイルを試料へ設置することが出来ない。そこで、ゴム板を U字形に曲げ、両端を固定して磁路長を一定とし、これを巻枠とした 533 ターンのロゴスキーコイル（以下、特殊ロゴスキーコイルと呼ぶ）を作成した。C形クランプを避けるように、本特殊ロゴスキーコイルを試料に設置すれば、圧縮力が印加されている箇所の磁界を測定することができる。特殊ロゴスキーコイルの校正は、Hコイルと同様に、ソレノイドコイル中に設置して行った。

Bコイルは、試料に直巻きした 10 ターンのコイルを Fig. 1 に示すように 2 箇所設置し、これらを直列に接続して 20 ターンの直巻き Bコイルとして用いた。励磁巻線は、69 mm 長、65 ターン/層の 3 層構造のユニットを左右に 2 箇所設置して、各巻線を直列に接続した。

試料は、無方向性けい素鋼板 50A470、または 50A1300 を、Punch で 10 mm 幅、230 mm 長に切断したものを 5 枚積層したもの用いた。圧縮力を与えない場合、および  $\sigma = 1, 2, 3, 5, 7$  MPa の圧縮力を試料に与えた場合の磁気特性を測定した。「圧縮力を与えない場合」にも、実際はクランプを固定するための  $\sigma = 0.05$  MPa がかかる。B<sub>m</sub> は 0.1 T から 1.7 T まで 0.1 T 毎に変化させ、磁束正弦波の波形制御を行った。測定の順序としては、試料の劣化を考慮して、圧縮力の小さい場合から順に測定を行った。周波数は、50A470 では 50 Hz とした。50A1300 では、二周波法を用いた鉄損分離を行うために 30 Hz および 50 Hz とした。

## 3. 特殊ロゴスキーコイルの測定精度

Fig. 1 のように、C形クランプを避けるように変形させた特殊ロゴスキーコイルを用いて測定を行った。Fig. 2 に、通常用いられるロゴスキーコイル<sup>2)</sup> および今回用いた特殊ロゴスキーコイルの形状の違いを示す。ここでは、特殊ロゴスキーコイルの測定精度を、2Hコイル法<sup>3), 4)</sup> による結果と比較することにより検討する。

Fig. 1 の測定装置を用い、磁界の検出方法として特殊ロゴスキーコイルを用いた場合、および 2Hコイル法を用いた場合について測定を行った。No. 2 の試料 (50A1300) を用い、圧縮力を与えない状態で測定した。Hコイルの巻線ピッチおよび巻幅は、

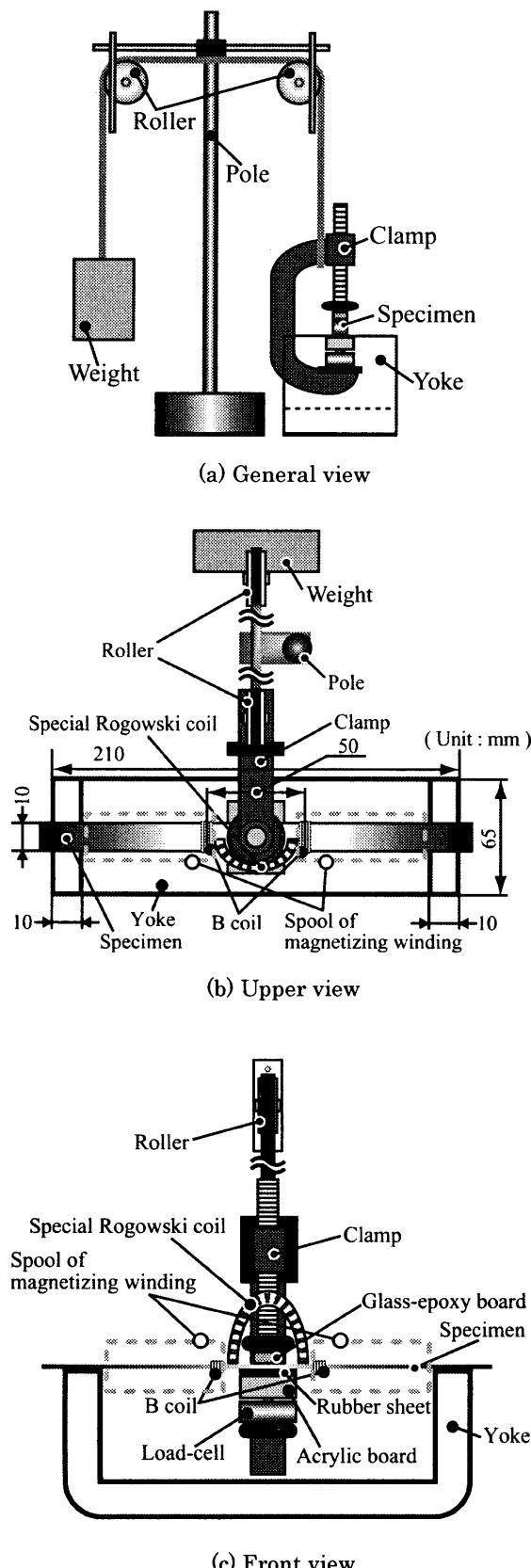


Fig. 1 Special SST for measuring magnetic properties under a compressive force.

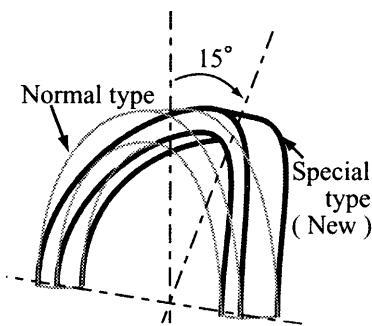


Fig. 2 Rogowski coils.

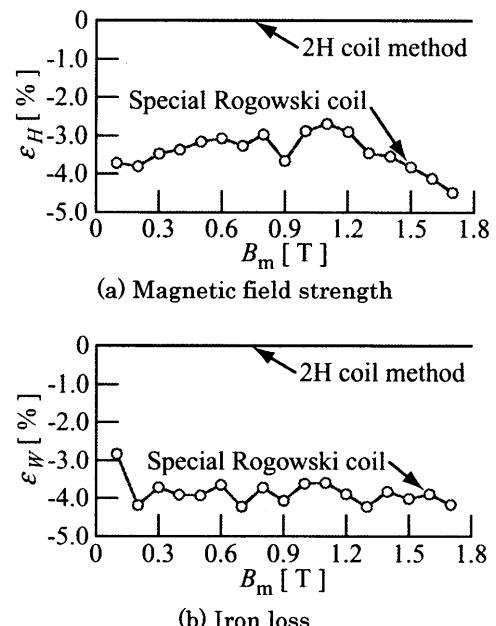


Fig. 3 Error of a special Rogowski coil.

特殊ロゴスキーコイルの巻線ピッチおよび測定領域と同じく、0.15 mm および 30 mm とし、ターン数は 200 とした。

Fig. 3 に測定精度を示す。Fig. 3 より、特殊ロゴスキーコイルを用いた結果は、2H コイル法を用いた結果よりも磁界および鉄損について、いずれも 4 % 程度低くなった。しかも、図に示すように、全ての磁束密度についてほぼ同程度の誤差が生じている。

2H コイル法を用いる場合、励磁巻線内の磁界が試料表面からの距離にほぼ比例する範囲内で、2 つの H コイルを設置しないと、誤差を生じる<sup>4)</sup>。そのため、2H コイル法と特殊ロゴスキーコイル法のどちらが精度良く測定できているかについては、励磁枠内の磁界分布について測定を行い、今後さらに検討する必要がある。ここでは、圧縮力による磁気特性の変化を絶対評価することは避け、これを相対評価して検討を行う。

#### 4. 圧縮力による磁気特性の変化

Fig. 4 に  $\mu_s \cdot B$  曲線を、Fig. 5 に鉄損曲線を示す。また、Fig. 6 および 7 に、圧縮力による透磁率の変化率  $\Delta \mu$  および鉄損の変化率  $\Delta W$  を示す。 $\Delta \mu$  および  $\Delta W$  は、次式で定義する。

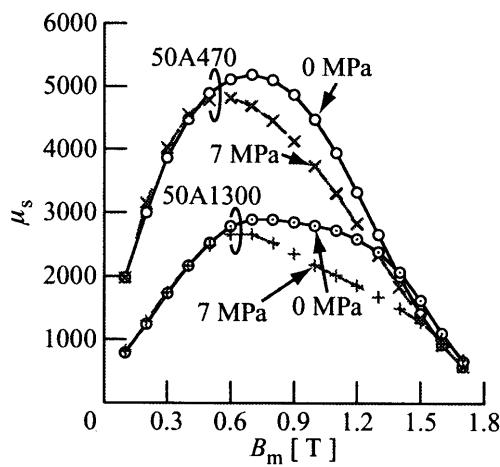
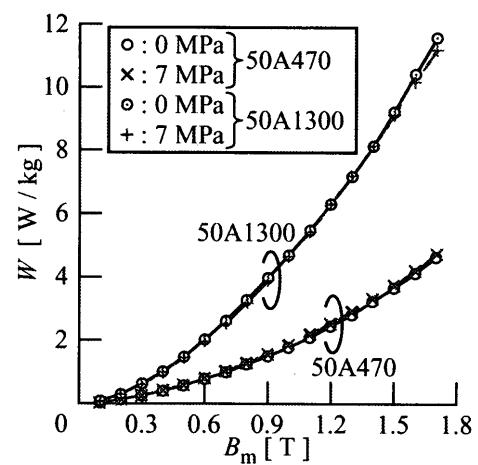
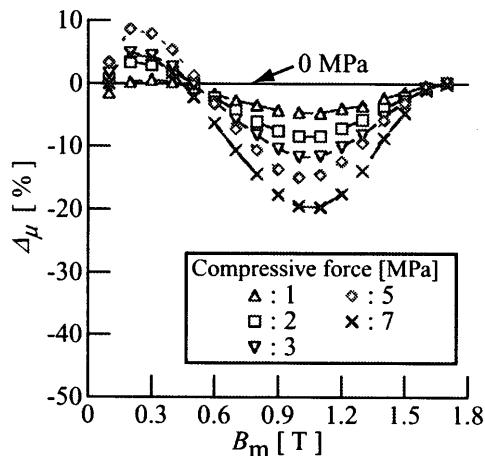
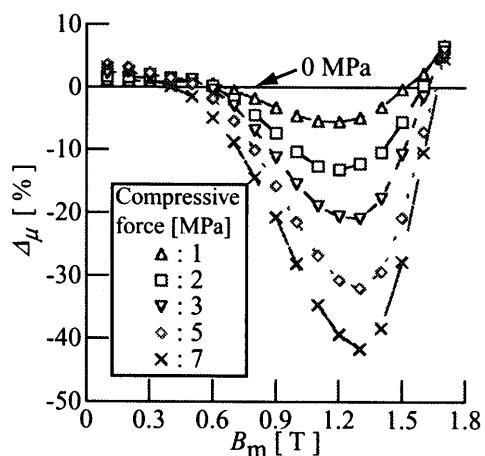
Fig. 4  $\mu_s$  -  $B$  curves.

Fig. 5 Loss curves.

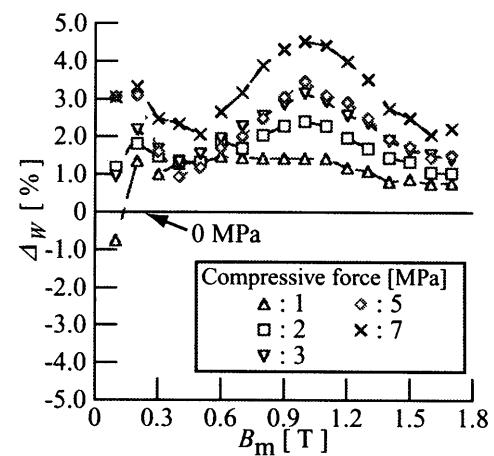


(a) Specimen No. 1 (50A470).

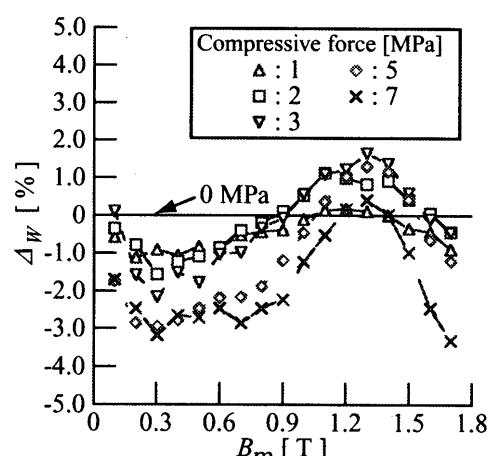


(b) Specimen No. 2 (50A1300).

Fig. 6 Change in permeability due to compressive force.

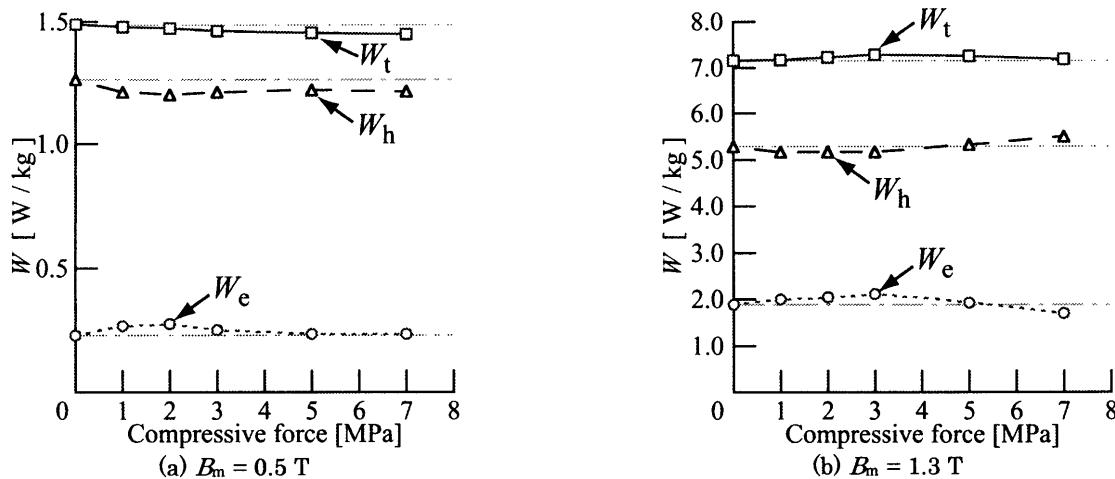


(a) Specimen No. 1 (50A470).



(b) Specimen No. 2 (50A1300).

Fig. 7 Change in iron loss due to compressive force.

Fig. 8 Changes in  $W_h$  and  $W_e$  due to compressive force (Specimen No. 2, 50A1300).

$$\Delta\mu = \frac{\mu_\sigma - \mu_0}{\mu_0} \times 100 [\%] \quad (1)$$

$$\Delta W = \frac{W_\sigma - W_0}{W_0} \times 100 [\%] \quad (2)$$

0.6 T 以上の磁束密度領域では、圧縮力が大きくなると透磁率は減少した。7 MPa の場合に 50A470 では最大 20 % 程度、50A1300 では最大 45 % 程度減少した。50A1300 の透磁率は、50A470 の 2 倍程度減少している。また、0.5 T 以下の磁束密度領域では、逆に、圧縮力が大きくなると透磁率はやや増加した。

50A470 の試料では、圧縮力が大きくなると鉄損は増加し、7 MPa の場合に最大 4.5 % 程度増加した。50A1300 の試料では、約 0.9 T ~ 1.5 T の範囲外で、圧縮力とともに鉄損が減少した。また、約 0.9 T ~ 1.5 T では圧縮力によって鉄損が増加しているが、50A470 のように一意的な傾向は見られなかった。

従って、7 MPa 以下の締め付けであれば、圧縮力がコア材の鉄損に及ぼす影響は、5 % 程度以下であると考えられる。

## 5. 圧縮力によるヒステリシス損および渦電流損の変化

4 章で述べたように、50A470 では圧縮力が大きくなると鉄損が増加した。ところが、50A1300 では圧縮力と鉄損との関係が一意であるようには見られなかった。Fig. 7(b) のように、50A1300 の鉄損は、 $B_m = 0.5$  T のときに圧縮力によって最も減少し、1.3 T のときに最も増加した。

以下では、No. 2 の試料 (50A1300) の 30 Hz および 50 Hz における鉄損を用いて、二周波法により鉄損分離を行い、圧縮力によるヒステリシス損および渦電流損の変化について検討を行う。Fig. 8 に、 $B_m = 0.5$  T および 1.3 T での、圧縮力によるヒステリシス損  $W_h$ 、渦電流損  $W_e$  および全鉄損  $W_t$  の変化を示す。全鉄損は各  $B_m$  についてそれぞれ異なる変化をしている。ヒステリシス損および渦電流損は、全鉄損とは対照的に  $B_m = 0.5$  T および 1.3 T のいずれについても、圧縮力が 2 ~ 3 MPa よりも小さい範囲では、圧縮力が大きくなるとヒステリシス損は減少し、渦電流損は増加した。圧縮力がそれよりも大きい範囲では、圧縮力が大きくなるとヒステリシス損は増加し、渦電流損は減少した。

## 6. むすび

本研究で得られた知見を要約すると、以下のようにになる。

- (1) C 形クランプを避けて磁界を測定可能な可変形の特殊ロゴスキーコイルを作成し、圧縮力が印加されている箇所の磁気特性の測定が可能な単板磁気試験器を開発した。なお、2H コイル法と比較することにより、本特殊ロゴスキーコイルの測定精度を検討した結果、全ての磁束密度で同程度の誤差を生じた。しかし、2H コイル法では、励磁巻線内の磁界の空間的分布によって誤差を生じるため、測定精度について再検討を行う必要がある。
- (2) 0.6 T 以上の磁束密度領域では、圧縮力が大きくなると透磁率は減少し、減少割合は材質によって異なる。50A470 では最大 20 % 程度、50A1300 では最大 45 % 程度減少した。
- (3) 7 MPa 以下の締め付け力であれば、圧縮力がコア材の鉄損に及ぼす影響は、5 % 程度以下であることを示した。50A470 の場合は、圧縮力が大きくなると鉄損は増加したが、50A1300 の場合は、圧縮力と鉄損との関係が一意であるようには見られなかった。

実機の圧縮力は、ボルトの限界座面圧<sup>5)</sup>より数 100 MPa 程度ある可能性があると思われる。今後は、さらに大きな圧縮力が印加できる装置を製作して、広い範囲での磁気特性変化の詳細測定を行う予定である。

## 文 献

- 1) H. Mogi: *Journal of JSASEM*, vol.10, no.3, pp.257 ~ 262 (2002).
- 2) D. Ishihara, M. Nakano, K. Fujiwara, N. Takahashi and K. Yamazaki: *1998 National Convention Record, IEE Japan*, no.476 (1998).
- 3) *Japanese Industrial Standard, JIS C 2556* (1996).
- 4) H. Yano, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi: *The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan*, MAG-96-241, pp. 57 ~ 66 (1996).
- 5) *JSME Mechanical Engineers' Handbook*, JSME, pp.B1-77 ~ 78 (1987).

2003 年 12 月 7 日受理、2004 年 3 月 11 日採録