

## 薄手電磁鋼板の応力下磁気特性の測定

杵掛暁史・城門由人・池田哲  
電磁力担当

### Measurement of magnetic properties of thin electrical steel sheet under tensile and compressive stress

Akifumi KITSUKAKE・Yukihito KIDO・Tetsu IKEDA  
Electromagnetic Section

#### 要 旨

モータやトランスなどの電気機器の効率に影響する電磁鋼板は、それに掛かる応力によって磁気特性が変化することが知られている。高効率機器の開発において、応力下での電磁鋼板の磁気特性は材料の選定や電磁界解析時の条件に活用するなど重要なデータとなる。本報では、板厚が 0.2mm である薄手の無方向性電磁鋼板の単板試料を対象に、引張および圧縮応力下での磁気特性を測定した事例について報告する。

#### 1. はじめに

電磁鋼板の磁気特性は、電磁力応用機器の性能や効率に大きく関与する。よって、高効率高出力機器の設計開発では、機器に最適な磁気特性を有する鋼種を選択するため、また実機特性に近い高精度な磁界解析を行うために、電磁鋼板の正確な磁気特性が必要となる。また、電気機器の製造過程では加工やカシメ、焼き嵌めなどの影響で電磁鋼板に様々な応力が加わり、その結果磁気特性が変化するため、応力下での磁気特性の測定に関する研究開発が盛んに行われている<sup>(1)~(3)</sup>。我々も、引張および圧縮応力下の電磁鋼板の正確な磁気特性が測定可能な応力負荷型単板磁気試験器を開発<sup>(4)</sup>し、県内外企業からの磁気特性測定依頼に活用している。

一方、電気機器の低損失化のために、電磁鋼板は薄手化の傾向がある。例えば、無方向性電磁鋼板はこれまで板厚が 0.5mm や 0.35mm の鋼板が主に使われてきたが、近年は 0.2mm や 0.15mm, 0.1mm の鋼板が電気機器に利用されるようになった。さらには、板厚が 0.025mm 以下のアモルファス金属材料やナノ結晶材料を用いた機器も製品化されている。より高性能な電気機器の開発過程では、これら薄板の応力下での磁気特性が求められる。しかし、磁気特性の測定時に試料の変形がないように応力を印加すること、特に圧縮応力を印加することは、板厚が薄くなればなるほど難しくなる。

本稿では、薄手の電磁鋼板として板厚 0.2mm の無方向性電磁鋼板を対象に、引張応力および圧縮応力を印加して磁気特性を測定した事例について報告する。

#### 2. 応力負荷型単板磁気特性試験器

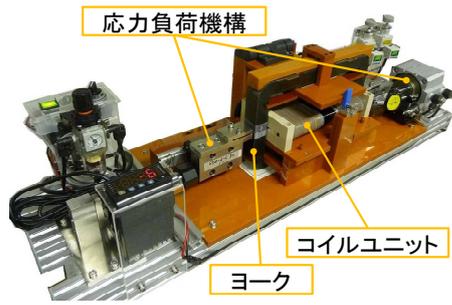
##### 2.1. 応力負荷型単板磁気試験器 (S-SST) の概要

応力下の磁気特性の測定に用いたのは、Fig. 1 (a) に示す単板磁気試験器で、我々は応力負荷型単板磁気試験器 (Stress load type-Single Sheet Tester) と呼んでいる。試料は短冊状で、当所には試料幅 100mm と 30mm に対応する試験器があるが、本報では 30mm 幅の試料と試験器を使用した。この場合の試料長は、305mm である。以下、この単板磁気試験器を S-SST と表記する。

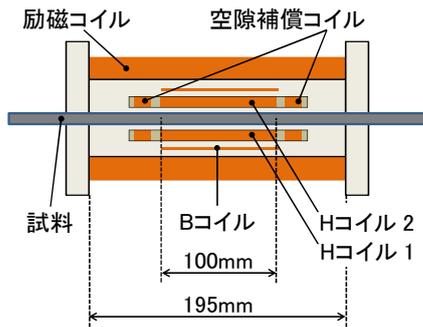
S-SST は、JIS<sup>(5)</sup>で示される縦型複ヨーク式の単板磁気試験器を基本構造としている。Fig. 1 (b) は、試料への磁界の印加 (励磁) および磁界を検出するコイルユニットの断面図である。S-SST の励磁コイルには、ポリフェニレンサルファイド製コイル枠の長手方向全域の 195mm 長に平角銅線 1.0×1.0mm を計 8 層、計 1142 回の巻線を施した。7 層目と 8 層目は、励磁コイル内の磁界強度分布を均一にするための補償コイルである。各層の巻線は、直列に接続した。磁気特性の測定領域は、均一な磁界強度が得られる励磁コイルの長手方向中央部分の 100mm である。ここに発生する均一な磁界強度領域に、磁束密度測定用の B コイルと空隙補償コイル、磁界強度測定用の H コイルを配置した。

ヨークには、低鉄損の方向性電磁鋼板 (23ZDKH90 相当品) を用いた。ヨークの寸法は、試料寸法に合わせて幅 30mm、磁極間の内寸が 230mm で外寸が 280mm とした。

B コイルには、ポリウレタン銅線 (UEW)  $\phi$  0.1mm を 20 回、測定領域長 100mm の間に 1 層均一に巻線を施し



(a) S-SSTの外観写真



(b) コイルユニットの構造図

Fig. 1 30mm幅試料用の応力負荷型単板磁気試験器 (S-SST)

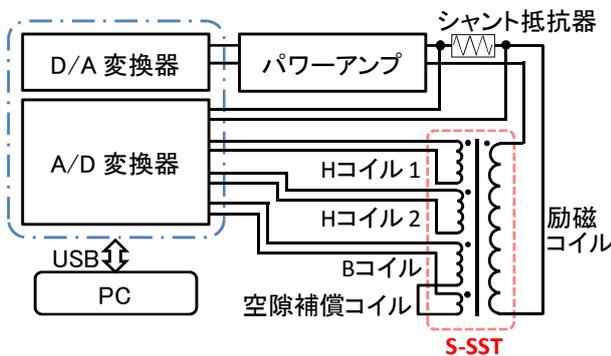


Fig. 2 磁気特性測定系のブロック図

た。Bコイルの空隙補償は、Hコイル枠にHコイルとは別に巻線したコイルを逆相に接続して行った。

S-SSTは、磁界強度の測定法としてHコイル法と励磁電流法の両手法を扱うことができる。Hコイル法は原理的に、励磁電流法に比べより正確な測定を行える。Hコイルは、幅90mm×長さ140mm×厚さ1mmのガラスエポキシ製のHコイル巻枠にUEWφ0.04mmを1666回、測定領域長100mmの間に1層均一に巻線した。Hコイルの誘起電圧を安定して取得するため、同一Hコイル巻枠に巻いた空隙補償コイルとHコイルをエポキシ系樹脂で固めている。無応力下での測定は通常、Fig.1(b)のように試料を挟み込むように配置した2つのHコイルを用いるが、本報では試料上方に配置したHコイルのみを使用し

た。その理由は、試料下方のHコイルが配置される箇所 (Fig.1(b)中のHコイル1の部分)に、圧縮時の試料変形防止のためのセラミックス板を挿入したためである。

圧縮および引張応力は、試料の両端を金属板でクランプし、片側を固定、反対側をエアシリンダによって微小させることによって印加する。応力値は、固定側に設置したロードセル (エー・アンド・デイ LC-1205) により計測した。

## 2.2. 磁気特性測定システム

Fig. 2は、測定系のブロック図である。S-SSTの励磁には、D/A変換器 (横河電機 WE7282) と電力増幅器 (高砂製作所 AA2000XG2) を、BコイルとHコイルの誘起電圧の取得には、A/D変換器 (横河電機 WE7275) を用いた。なお、取得波形のノイズ低減のため、A/D変換後の取得波形に対して励磁周波数の高次高調波をソフトウェアにより除去した。励磁電流検出用のシャント抵抗は、1.0Ω (アルファ・エレクトロニクス PSBX1R000B) とした。

## 3. 薄手電磁鋼板の応力下磁気特性

### 3.1. 測定条件

電磁鋼板の磁気特性は、磁束正弦波条件下で測定される<sup>(5)</sup>。測定時の収束条件は、磁束密度波形の振幅率を目標値の0.05%以下、ひずみ率を0.5%以下とした。励磁周波数は50Hzとして、磁気特性の比較範囲は最低磁束密度0.1Tから最大1.8Tまで、0.05T刻みで測定した。

応力の印加条件は、引張応力および圧縮応力ともに最大60MPaとした。

### 3.2. 測定結果

Fig. 3は、板厚0.2mmの無方向性電磁鋼板の引張および圧縮応力下での磁気特性の測定例である。図中の凡例において、正の応力は引張応力を、負の応力は圧縮応力を示す。無応力は0MPaである。Fig.3(a)～(c)は、それぞれ磁化特性と鉄損特性、1.8T、1.0Tおよび0.5Tにおける応力-鉄損特性を示す。これらから、引張応力印加時には磁気特性が改善 (透磁率が増加、鉄損が減少) し、圧縮応力印加時には磁気特性が劣化 (透磁率が減少、鉄損が増加) することが分かる。このような測定によって、今回用いた電磁鋼板の場合、60MPa圧縮時の損失は、応力印加無し (0MPa) の時に比べて数十%増加することなどが明らかになる。また、1.0T時のヒステリシスループをFig.3(d)に示す。応力の影響によって、ヒステリシスループの傾きの変化が確認できる。また同図では分かりにくいですが、圧縮応力が増加すると保持力も増加することなども分かる。

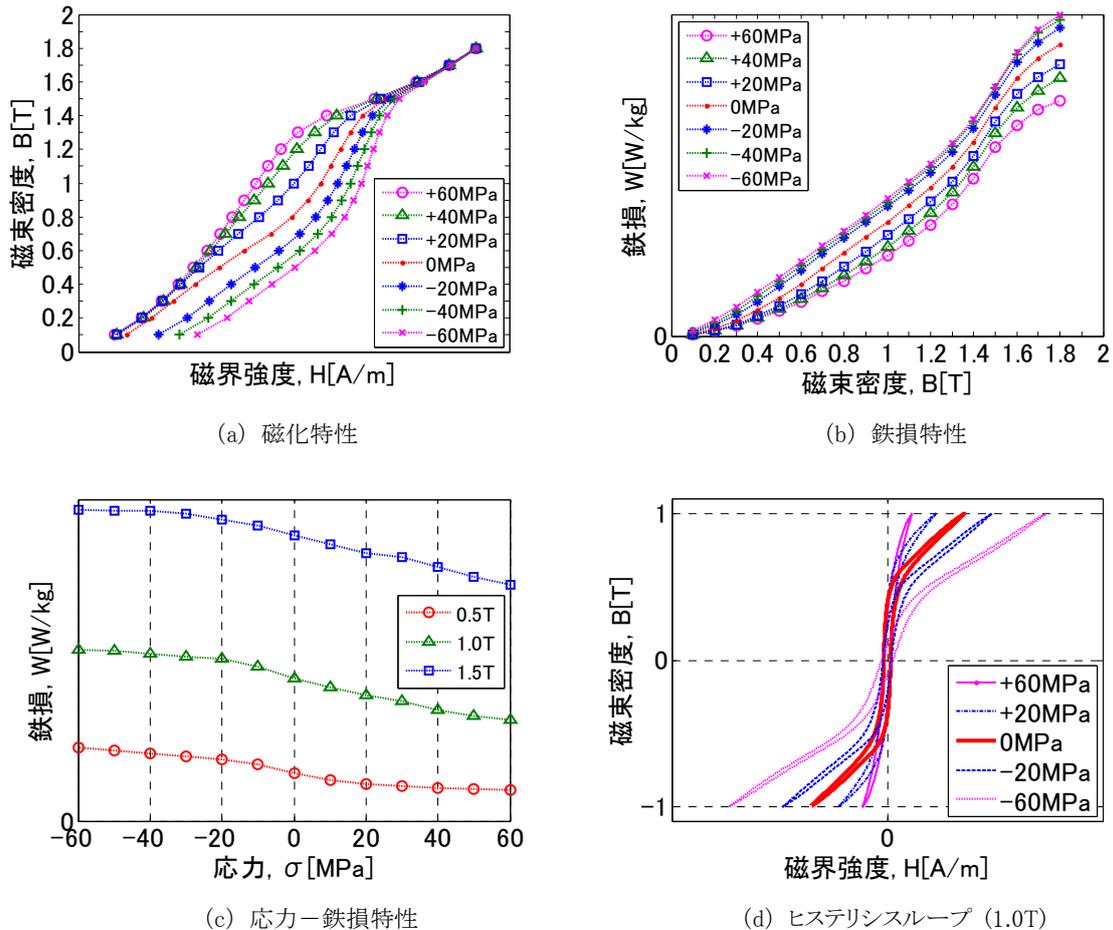


Fig. 3 板厚 0.2mm の無方向性電磁鋼板の応力下磁気特性の測定結果

#### 4. まとめ

本報では、薄手電磁鋼板の応力下磁気特性の測定事例として、板厚 0.2mm の無方向性電磁鋼板の測定結果を示した。圧縮応力が印加し難くなる薄板に対して、今回の測定試料では圧縮応力 60MPa で応力下の磁気特性測定が可能であることを確認した。

今後は、無方向性電磁鋼板だけでなく、方向性電磁鋼板を含めた各種の薄手電磁鋼板や 0.025mm 以下の薄帯試料等について応力下の磁気特性を測定し、S-SST の応力印加の適用範囲を明らかにする。また、より大きい圧縮応力を印加可能な機構等を検討し、S-SST の適用範囲を拡げ産業界のニーズに対応していく。

#### 参考文献

- (1) 谷, 大毅, 中野, 有田, 山口, 都出: 「応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 196-200 (2006)
- (2) 藤倉, 開道, 久保田: 「電磁鋼板の応力下の磁気特性」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-07-31, pp. 25-28 (2007)

- (3) 千田, 藤田, 本田, 黒木, 八木: 「無方向性電磁鋼板の応力下での磁気特性と磁区構造」, 電気学会論文誌 A, Vol. 131, No. 10, pp. 884-890 (2011)
- (4) 杓掛, 城門, 池田, 榎園: 「電力用磁性材料の評価測定技術」, 平成 25 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会資料, 13-A-p-2, pp. 7-12 (2013)
- (5) 日本工業規格: 「電磁鋼板単板磁気特性試験方法」, JIS C2556 (1996)