簡易 2 次元磁気特性測定装置

Simplified Two-Dimensional Magnetic Measurement Apparatus

榎園正人・田邊郁雄

大分大学工学部, 大分県大分市旦野原 700 (〒870-11)

M. Enokizono and I. Tanabe

Faculty of Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-11

To measure the properties of a specimen with a conventional two-dimensional magnetic measurement apparatus, it is necessary to make a rectangular sample sheet by cutting off the superfluous parts so that place the materials can be placed in a space formed by yokes, simplified apparatus that can be applied to any sample size is needed for use in the manufacturing process of magnetic materials. This paper presents as simplified measurement system and describes its basic characteristics.

Key words: two-dimensional magnetic measurement, two-dimensional magnetic properties, electrical steel sheet, rotating flux, stylus probe method, H-coil, B-coil, iron loss

1. はじめに

従来, 電気機器鉄心に用いられている磁性材料の磁気特性は, 主にエプスタイン試験器や単板磁気試験器を用いて測定されていた。エプスタイン試験法は短冊状試料で閉磁気回路を構成し, 電圧と電流の関係から磁束密度 B と磁界強度 H を推定する方法で, 単板磁気試験法は励磁コイルと平行な方向の探りコイルによって直接的に B と H を測定する方法である。いずれの測定も, B と H は大きさのみのスカラー値として取り扱われており, 交番磁束条件下の測定が主体であった。つまり, 任意方向の交番磁束や回転磁束のような大きさと向きを併せもつ特性測定は, これらの方法では不可能となる。そこで, 一般的な任意方向の測定や回転磁束条件下での H ベクトルと B ベクトルとの関連としての磁気特性測定のため, Fig. 1 に示すような 2 次元磁気測定装置 (本研究にて用いる装置を簡易 2 次元磁気測定装置と呼ぶことにし, 従来のこの装置を精密 2 次元磁気測定装置と呼ぶことにする) が開発された。この装置により, 試料に任意の回転磁束あるいは交番磁束を印加したときの試料の鉄損, 透磁率などの特性をベクトル的に測定することが可能となった^{1)~3)}。

しかし, この装置で磁性材料の磁気特性を測定しようとする場合, 試料を測定用に加工する必要がある。そのため, 製造プロセス中での測定のオンライン化が困難, 面積の広い試料の局所部分の相対的特性差を得るには困難であるなどの問題がある。そこで, これらの問題を解決するためにも, 試料の加工を必要とせず, 鋼板上に装置を配置するだけで測定が可能となるような装置の開発が必要であると言える。本研究では, 簡易 2 次元磁気特性測定装置の開発に当たり, 簡易装置の試作を行い, 測定精度の基礎的検討を行った実験結果について報告する。

Fig. 1 Structure of an accurate two-dimensional magnetic apparatus.

2. 装置の構造および測定システム

Fig. 2 に今回試作を行った簡易 2 次元磁気測定装置を示す。ここで, 図中の X 方向および Y 方向はそれぞれ圧延方向および圧延方向に対して直角方向を示す。まず, 高さの異なる 2 個の U 字型ヨーク (断面積: $10 \times 50 [\text{mm}^2]$) を試料の上に交差させるように配置し, それぞれに励磁コイルを施す。励磁コイルは $0.3 [\text{mm}\phi]$ のホルマール線をアクリルの巻枠に 700 ターン巻いたものを, 2 か所に配置し並列に接続している。それぞれの励磁コイルに同位相あるいは逆位相の適当な電圧を印加することにより試料中に任意の交番磁束または回転磁束を発生させる。

センサーは, Fig. 3 に示すような探針と H コイルを X 方向および Y 方向にそれぞれ備えた 2 次元センサーを用いる。本センサーの構造は, まずセンサー中央下部に H コイルを配し,

Fig. 2 Simplified apparatus.

Fig. 3 Two-dimensional magnetic sensor.

Fig. 4 Uniform field.

磁界強度 H を測定する。H コイルは $1 \times 18 \times 18 [\text{mm}^3]$ のアクリルに $0.18 [\text{mm}\phi]$ のホルマール線を使用し、 H_y コイル上に直交して H_x コイルを巻いている。それぞれの有効エリターンは H_x コイルが $59.09 [\text{cm}^2]$ 、 H_y コイルは $91.78 [\text{cm}^2]$ である。また、H コイルの外側に磁束密度測定用に探針を配置している。

探針法での磁束密度の測定原理は、Fig. 4 に示すように、試料内が X 方向に一樣に磁化されていると $V = V'$ となり、磁区 の存在を無視して考えると探針間距離を $1/2$ ターンのコイルと等価として扱えるというものである⁴⁾。しかし、今回試作した簡易測定装置の場合、片方の面から試料面に垂直に励磁を行うため、磁束が試料断面内に一樣に入りにくい。ここで、Fig. 4 で 1-2-3-4-1 を 1 ターンのコイルと等価とすると、簡易装置の場合、

Fig. 5 Size and construction.

Fig. 6 Measurement system.

$$\int_{4-1} E(y) dy > \int_{2-3} E'(y) dy \quad (1)$$

$$V > V' \quad (2)$$

となり、 V を $1/2$ ターンのコイルと仮定することが、不可能となる。したがって、両面からの探針の誘起電圧、 V と V' を用いて

$$V + V' = -NS \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

$$B = -\frac{1}{S} \left(\int V dt + \int V' dt \right) \quad (4)$$

とする必要がある。

今回の実験で用いたセンサーの配置を Fig. 5 に示す。図のようにセンサーをコイルの内側に配置し測定する場合を A (センサー A)、ヨークに対して試料の裏側に配置し測定する場合を B (センサー B) として実験を行った。また、検証のため探針の内側 $24 [\text{mm}]$ の領域に $0.6 [\text{mm}\phi]$ の穴を開けコイル (B コイル) を 3 ターン施している。そして、それぞれの磁束密度測定の評価を行った。

測定システムのブロック図を Fig. 6 に示す。本システムは、ホストコンピュータに 16 ビット D/A コンバータ (TEAC 社製、PS9000 型) とデジタルオシロスコープ (Nicolet 社製、420 型) を GP-IB ケーブルで接続するのみである。

測定方法は、まずコンピュータに交番磁束あるいは回転磁束

Fig. 7 Waveforms, locus, and phase differences of the flux density.

Fig. 8 Locus of the B , H -vector and the hysteresis loop of the X , Y components and phase differences.

を発生させるためのパラメータを入力する。そのパラメータより初期励磁関数を計算し、D/A コンバータとパワーアンプを介して励磁コイルに供給する。波形制御の段階では、磁束密度測定用の電圧波形と励磁電圧波形をデジタルオシロスコープを介しコンピュータに取り込み、誤差の反復修正を行う。磁束密度の波形制御が完了すると、探針または、B コイルの磁束密度の電圧波形と H コイルの電圧波形を取り込み、磁束密度、磁界強度、鉄損などの計算処理を行う。

3. 実験方法

まず、センサー配置の違いによる磁束密度測定値の差異を知るために、Fig. 5 に示すように、探針のセンサーを個別に A, B のように配置した場合の磁束密度測定値と、試料中央部に十字型に巻かれた B コイルの磁束密度測定値の比較を行った。比較の仕方は、B コイルで試料内の磁束密度を任意の大きさの回転磁束密度に制御した後、B コイルとセンサー A、または B コイルとセンサー B を用いて磁束密度の測定を行った。

今回の実験は、軸比=1 (正円) の回転磁束条件下、また励磁

周波数: 50 [Hz], サンプル周期: 50 [μ s], サンプル期間: 8 周期で測定を行った。

測定試料には 0.5 mm 厚の無方向性けい素鋼板 (H50) を用いた。

4. 実験結果

Fig. 7 に磁束密度測定値の比較を示す。ここで、 θ_B は B コイルでの測定値の 1 周期分の位相であり、 θ_N は探針での測定値の B コイルの測定値に対する位相差である。探針での測定値の方が位相が進んでいるとき θ_N をプラスとする。(a) では試料断面の平均磁束密度である B コイルの測定値よりも、試料表面付近の磁束密度であるセンサー A の探針の測定値の方が最大値付近で 1.5 倍程度大きくなっている。また、(b) のセンサー B を B コイルの測定値と比較すると、最大値付近で 1/2 程度の大きさになっている。これらの原因としては、励磁を試料に垂直に行うため、試料内で渦電流が発生し、試料断面内に磁束が一樣に入らず試料表面に偏るためであると思われる。そこでこの装置の場合、(4) 式のように測定すれば、(c) のようになり、B コイ

Fig. 9 Comparison of the measured iron losses.

ルの測定値と比較すると、大きさ、位相ともほぼ一致することが分かった。

次に、試料に巻いた B コイルで測定部分の磁束を正円の回転磁束に制御し、その後それぞれのセンサーの H コイルで磁界を測定し比較を行った。その結果を Fig. 8 に示す。ここで、 θ_B は B コイルでの測定値の 1 周期分の位相であり、 θ_p は H の B に対する位相差である。磁界測定の位置は、(a) はセンサー A のみ、(b) はセンサー B のみ、(c) はセンサー A とセンサー B の平均であり、(d) は Fig. 1 の精密測定装置で測定した結果である。磁界の軌跡は (a) と (b) で異なっており、試料表側の方が大きい。これも磁束分布の偏りが原因であると思われる。(c) を (d) と比較してみると、磁界の軌跡、位相差とも精密装置による測定値とほぼ一致している。

Fig. 8 に示した 4 種類の B - H カーブから、式 (5) を用いて鉄損を求める。

$$P = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad (5)$$

ここで、 ρ は材料の密度、 T は励磁周期である。

その結果を Fig. 9 に示す。精密装置の値と比較すると、低磁束密度領域では、差異は少ないが、磁束密度が高くなるにつれて、表側の loss 2 (▲) は精密測定値の loss 1 (●) よりも大きくなり、裏側の loss 3 (◆) は loss 1 よりも小さくなっている。表と裏の平均磁界強度を用いた loss 4 (■) は、かなり loss 1 の値に近くなっている。

5. ま と め

今回の実験で得られた結果を以下に示す。

(1) 試料内に一様に磁束が入らない条件下で、探針を用いて試料内の平均磁束密度を正確に測定しようとする場合、試料の両面から同時に探針で測定し、その両方の誘起電圧を加算した値を、B コイルで測定した場合の誘起電圧と等価とみなす。

(2) 同様に、磁界強度測定は両面の H コイルの測定値の平均を取れば、精密装置で測定した値とほぼ一致する。

(3) 今後の課題としては、両面のセンサーの同時測定による実験、数値解析を用いての励磁ヨーク形状と試料断面内の磁束分布の関係などについての検討が必要であると考えている。

文 献

- 1) 榎園正人, J. D. Sievert: 日本応用磁気学会誌, **13**, 403 (1989).
- 2) M. Enokizono, T. Suzuki, J. D. Sievert, and J. Xu: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 5 (1990).
- 3) 榎園正人, 白川五郎, 鈴木毅浩, J. D. Sievert: 日本応用磁気学会誌, **15**, 265 (1991).
- 4) T. Yamaguchi, M. Imamura, K. Senda, and M. Ishida: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-265 (1992).

1996 年 10 月 16 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録