

電力用磁性材料の標準磁気特性試験法

Standard Test Methods for Measurement of Magnetic Properties of Power Magnetic Materials

藤原耕二・中野正典・石原好之* 岡山大学工学部・*同志社大学工学部

K. Fujiwara, M. Nakano, and Y. Ishihara,* Department of Electrical and Electronic Engineering, Okayama University and

*Department of Electrical Engineering, Doshisha University

Standard test methods for measurement of magnetic properties of power magnetic materials are described.

As one of the principal power magnetic materials, electrical steel sheet is used for magnetic circuits in various electrical machines. The Epstein tester is generally used to evaluate this material's magnetic properties because it has been used for a long time and the design theory was established based on an enormous amount of data measured by the Epstein tester. If the measured data are applied to precise evaluation of magnetic properties, however, the Epstein tester may be inadequate because of the configuration of the specimen and the method for calculating magnetic field strength by means of the magnetizing current method using a constant effective magnetic path length. As an alternative, a single sheet tester (SST) using the H-coil method was developed in Japan in the early 1970s. The SST can provide the nearly uniform magnetization of a wide region, and the H-coil method can directly estimate the magnetic field strength on the surface of the specimen. Therefore, the SST is favourable for preparing a database of magnetic properties for advanced design of magnetic circuits.

In electrical machines, structural steels are also used for brackets, bolts, supporting jigs, and so on. The specimen for structural steel is solid in general, and the SST cannot be applied. For a solid specimen, the permeameter was conceived. However, the electromagnet is very convenient because of its higher excitation and simpler preparation of the specimen.

Recently the magnetic properties of electrical steel sheet under applied stress have been discussed for accurate estimates of core losses, aiming at higher efficiency. As the relationship between mechanical and magnetic properties should be measured, more sophisticated measuring techniques are required.

Key words: power magnetic material, electrical steel sheet, structural steel, solid specimen, magnetic property, magnetic anisotropy, two-dimensional magnetic property, effect of mechanical stress application, standard testing method, single sheet tester (SST), electro-magnet

1. ま え が き

変圧器や回転機などの電気機器の主要磁気回路材料として使用されている電磁鋼板の標準磁気特性試験法としては、エプスタイン試験法が1961年にJIS化され¹⁾、商用取引に使用されてきた。その結果を利用して各種機器の設計方法が確立されたため、過去に蓄積されたデータとの整合性の観点から、現在でもエプスタイン試験法が使用されている。しかしながら、近年の機器の高性能化に対する要求に伴って、磁気特性をさらに詳細に把握しようとする、エプスタイン試験法は、試料の設置方法や磁界の強さの算出方法などの観点から、問題があるということが認識されるようになった。また、数値計算法の進歩および計算機性能の飛躍的向上によって、磁界解析技術²⁾を援用した設計方法が一般的に導入されるようになり^{3), 4)}、それに適した磁気特性の測定も望まれるようになると、同様な問題点が指摘されるようになった。つまり、複数枚の試料をロの字形に積層することから、四隅の接合部が磁気特性に与える影響は避けられない。さらに、磁界の強さは励磁電流から実効磁路長の概念を導入して算出するため、低鉄損化や薄板化などに伴って、試料内の磁束分布が変化し、実効磁路長が規定された値と異なることが予想される状況下では、精度の良い磁気特性の測定および磁界解析への適用は難しい。

一方、鋼板1枚を測定対象とし、鋼板近傍に設置されたサーチコイル(Hコイル)で、磁界の強さを直接測定するHコイル法を用いた単板磁気特性試験法が、1970年代前半に開発された^{5)~7)}。この試験法では、均一磁化領域において特性を評価することができる。さらに、鋼板1枚の特性が測定可能であるので、磁気特性データベースの作成に適している。さらに、二方向から励磁できるように試験器を改良することによって、鋼板の面内における磁気異方性(以下、2次元磁気特性⁸⁾と呼ぶ)も検討できるので、多様な観点からの評価が可能となり、磁気特性の標準試験法としては、非常に優れていると考えられる。

また、電気機器内の磁気回路には、冷間圧延鋼板のSPC

は、横型ヨーク構造が便利である^{17), 18)}。試料中の平均的な磁束密度は、励磁巻線の巻枠に設置したサーチコイル (B コイル) によって測定する。磁界の強さは、試料に近接して (Fig. 1 では試料下方) 設置されたサーチコイル (H コイル) によって測定する。試料表面において、磁界の強さの接線方向成分は連続であるので、試料近傍の空間において、磁界の強さの分布が均一であれば、空間中で測定された磁界の強さを、試料表面の磁界の強さとみなすことができる。励磁巻線の寸法や試料の材質によって、磁束分布は空間中で必ずしも一様とみなせない場合があるが、幸いなことに、磁界の強さの長手方向成分は、試料表面からの距離に対してほぼ線形に変化するので、Fig. 1 に示すように、H コイルを 2 個並べて設置し、得られた結果を外挿して、試料表面の磁界の強さを算出すればよい。この方法を、2H コイル法と呼ぶ (2:「ダブル」と読む)。B コイルおよび H コイルの巻き長さは、励磁巻線の約 2/3 の 200 mm に設定してある。この領域では、試料を挿入せず空芯で励磁した場合に、磁界の強さのばらつきが $\pm 1\%$ 以内に収まっている。もし、所望の均一度が得られない場合は、励磁巻線端部に、補償巻線を設ければよい。なお H コイルの幅は、試料端部近傍領域では、磁束分布が不均一になる傾向があることを考慮して、試料幅の 85% に設定されている。B コイルは、試料中だけでなく、空間中の磁束も検出することになる。したがって、飽和の程度が大きい高磁束密度領域では、空間中の磁束量が無視できなくなるので、試料中の平均的な磁束密度を精度良く算出するためには、相互誘導コイルにより空隙磁束補償を行う必要がある。また、H コイルによる結果を利用して、計算により補償することも可能であるが、いずれが優れているかについては一概には言えず、JIS で規定されていない高磁束密度領域における測定を行う際には、注意を要する。ちなみに、JIS において、鉄損および皮相電力の特性を測定する場合の適用磁束密度範囲は、無方向性鋼板が 0.8~1.5 T、方向性および高配向性鋼板が 1.0~1.8 T である⁶⁾。

Fig. 2 に、高配向性鋼板 30P105 において、最大磁束密度 B_m が 1.0 T および 1.8 T におけるヒステリシスループの一部を示す。磁束正弦波条件で測定し¹⁹⁾、周波数は 50 Hz である。(a) 図の $B_m = 1.0$ T の場合には、磁化電流に対して、試料中を流れる渦電流の影響が顕著に現れ、磁束密度の最大値 B_m と磁界の強さの最大値 H_m の瞬間が異なっている。それに対して (b) 図の $B_m = 1.8$ T の場合には、磁化電流の影響が支配的になるため、 B_m と H_m の瞬間は一致している。図中に示す H_b とは、 B_m の瞬間の磁界の強さである。 B_m の瞬間では、鋼板中の平均的な磁束密度の時間的変化が零、つまり平均的な渦電流が零になるので、磁界解析用の直流的な特性としては、 (B_m, H_b) の方が (B_m, H_m) より優れている。ただし、機器としての励磁特性を検討する場合には、 (B_m, H_m) が必要である。なお電磁鋼板は、

xxYzzz のように表記するが、xx は厚さ (単位: mm) の百倍の値、Y は種別で無方向性は A、方向性は G、高配向性は P である。zzz は、無方向性では 1.5 T、50 Hz の鉄損 $W_{15/50}$ (単位: W/kg)、方向性および高配向性では 1.7 T、50 Hz 時の鉄損 $W_{17/50}$ の許容される上限の百倍の値を示す^{20), 21)}。したがって、30P105 とは、0.3 mm 厚の高配向性鋼板で、その $W_{17/50}$ の上限は 1.05 W/kg であることを示す。

Fig. 3 に、種々の B_m に対するヒステリシスループと、それらから得られた (B_m, H_b) に着目した磁化曲線および (B_m, H_m) に着目した磁化曲線を示す。(a) 図が 50 Hz、(b) 図が 0.01 Hz の場合である。(b) 図のような低周波の場合には、渦電流の影響はほとんど無視できるので、 B_m-H_b 曲線と B_m-H_m 曲線はよく一致している。それに対して、商用周波の (a) 図では、 B_m-H_b 曲線と B_m-H_m 曲線は、全く異なっている。(a) 図と (b) 図の B_m-H_b 曲線を比較すると、両者はほぼ一致している。S/N を上げて、測定精度を向上させるという観点からは、測定周波数は高い方が望ましいので、 B_m-H_b 曲線を磁界解析に利用する方法は有用である。

Fig. 4 は、IEC で推奨されている 500 mm × 500 mm の試料の測定が可能な大形 SST である^{6), 19)}。試料形状が正方形であるので、試料の設置方向を変更することにより、試料 1 枚で圧延方向およびその直角方向の特性を測定できる。また、切断に伴って試料端部の磁気特性が劣化することに対する影響の軽減や、平均的な特性の算出などの観点からは、Fig. 1 に示す大きさの SST よりは優れている。ただし、一体ものの H コイルを作製することは、困難であると考えられる。IEC では、磁界の強さの算出に励磁電流

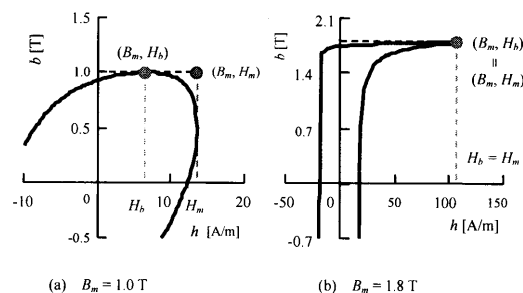


Fig. 2 Definitions of magnetization curves (30P105, 50 Hz).

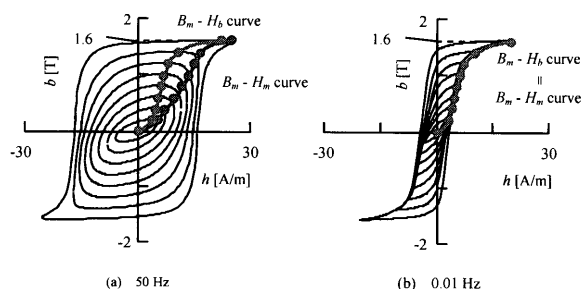


Fig. 3 Effect of frequency on hysteresis loops. (30P105).

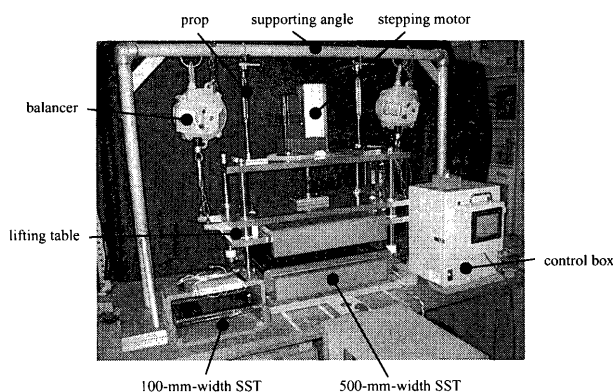


Fig. 4 Single sheet tester for a 500-mm-width specimen.

法を採用し、その場合に用いる実効磁路長は、450 mm と定めている。

Fig. 5 に、IEC が定める 450 mm 一定の実効磁路長の妥当性を検討した結果を示す。実効磁路長は、300 mm (長)×85 mm (幅)の H コイルを 1 段当たり並列に 5 個設置し、それらを 2 段にして 2H コイル法で算出した結果と、励磁電流法から算出した結果が同一になるように決定した。同一とした着目量が鉄損 W および磁界の強さの最大値 H_m に対する実効磁路長が、それぞれ l_w および l_{Hm} である。両者とも、磁束密度に対して変化しており、IEC が定めた 450 mm と異なっている。特に鉄損の観点から決定した l_w は、いずれの材質においても $l_w > 450$ mm になっているということは、450 mm 一定として励磁電流法

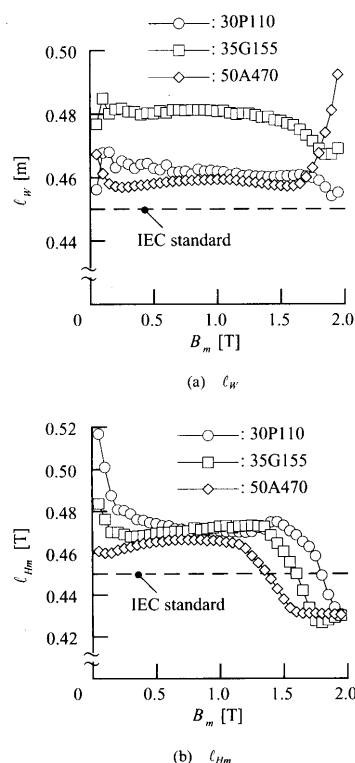


Fig. 5 Effective magnetic path lengths.

により算出した磁界の強さは大きくなることを意味している。したがって、励磁電流法を採用する IEC 方式の SST で鉄損を測定すると、大きく算定 (測定) されることになり、鋼板製造メーカにとっては、取引上、不利になると考えられるので、今後、十分な検討が必要である。

2.3 2次元磁気特性

磁性材料は、程度の差はあれ、必ず磁気異方性を有しており、磁性材料研究に従事する研究者にとって、避けて通ることのできない重要な課題である。異方性材料内では、Fig. 6 に示すように、磁束密度 B と磁界の強さ H のベクトルが、空間的に位相がずれ、そのずれは、 B の大きさや方向によって変化する。なお、図中の RD および TD は、それぞれ圧延方向およびその直角方向を示す。電磁鋼板の場合、通常、磁束は面内で振舞うように設計されていることから、一般的な 3 次元異方性を考える必要はない。この面内の異方性に起因する磁気特性は、2 次元磁気特性と呼ばれ、大分大学・榎園正人先生のグループによって、先駆的な研究が展開されている。しかしながら、測定の困難さから、1 次元用の試験法とは異なり、コンセンサスのとれた試験法は、現状では確立されていない。

Fig. 7 に、二方向励磁型 SST の一例を示す¹⁴⁾。Fig. 1 に示す 1 次元用 SST 2 個が直交して配置されていると考えれば良い。ただし、理解を容易にするため、上側のヨークは取り外してある。本試験器の大きな特長は、ほぼ完全な閉磁路構造を実現するために考案された励磁巻線と各種の補助ヨーク群である。

Fig. 8 に、各部の詳細を示す。(a) 図に示すように、励磁巻線は入れ子状になっている。しかしそのままでは、主要ヨークからの磁束を試料にスムーズに伝達することはでき

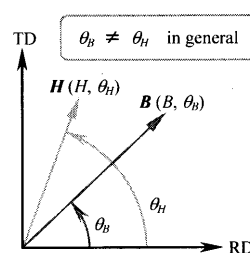


Fig. 6 Relationship between B and H .

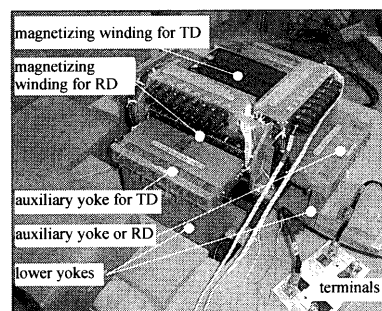


Fig. 7 Two-dimensional single sheet tester.

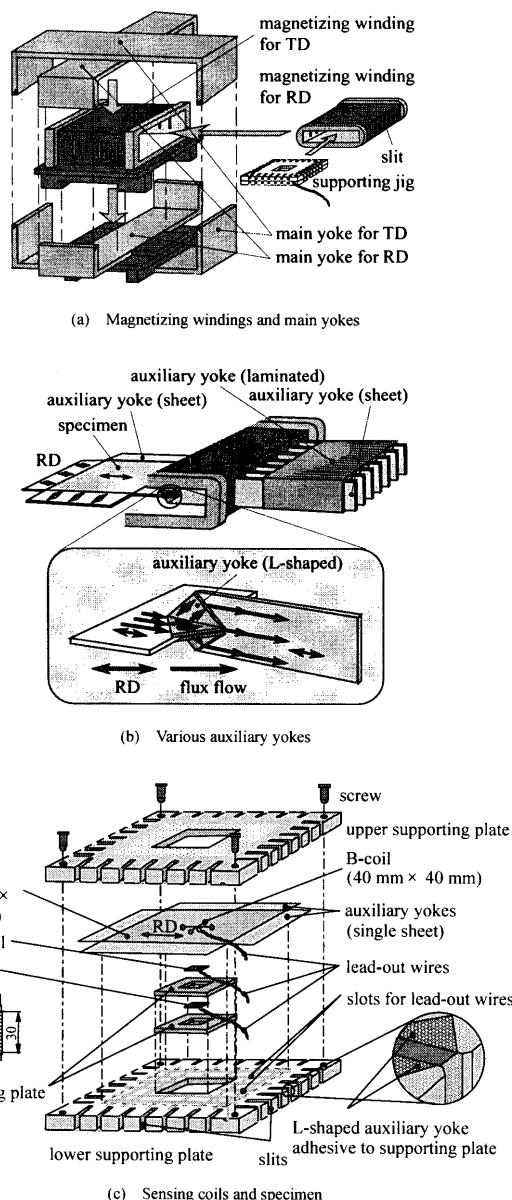


Fig. 8 Schematic diagram of two-dimensional SST.

ない。そこで、励磁巻線にスリットを設け、(b)図に示すように、シート状の補助ヨークをスリットに通して試料近傍に到達させ、L字形の補助ヨークを介して、試料に突合せ接合されたシート状の補助ヨークに接合されるように工夫されている。(c)図は、BコイルおよびHコイルと試料の関係を示す。本試験器は、製作に多大の労力を要するが、このような工夫によって、ほぼ完全な閉磁路構造が実現され、1次元用のSSTと同様に、2 T近傍の高磁束密度領域に至るまでの2次元磁気特性を評価することが可能になった。

Fig. 9に、交番磁束条件下において、圧延方向(RD)に対する B の方向 θ_B をパラメータにした場合の B の大きさと H の大きさの関係を示す。材質は35G165で、周波数は50 Hzである。約1.2 T以上の領域で、異方性の傾向がはっきりと現れている。

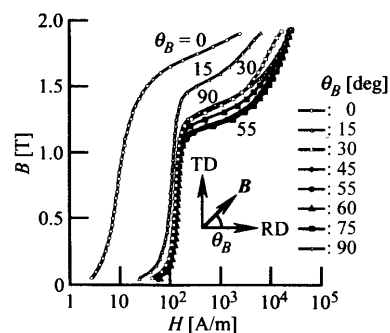
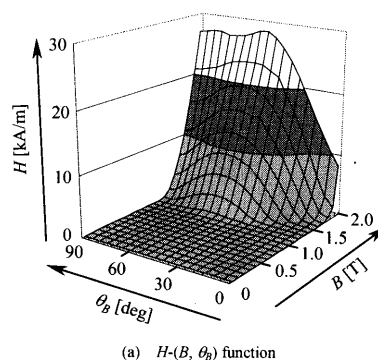


Fig. 9 B - H curves (35G165, 50 Hz).

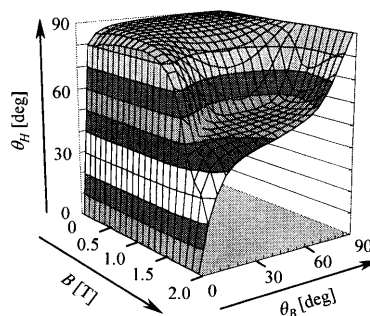
Fig. 10に、 B および θ_B に対する H と θ_H (H のRDに対する角度)の関係を示す。この特性を磁界解析で利用すれば、2次元磁気特性が機器の動作特性に与える影響を検討することが可能になる²³⁾。高磁束密度領域における鉄損に関しては、現在、十分な測定精度が得られていないが²⁴⁾、その原因が試料中の磁束分布の不均一性にあり、試料形状を円板状にすれば、改善が可能であるということが明らかになってきたので、実用的な精度の達成も間近いと考えられる。

3. 塊状試料の磁気特性試験法

SS材やSxxC材のような構造鋼は、透磁率が低いので、飽和領域までの磁気特性を測定するためには、10万 A/m程度の磁界を印加する必要がある。励磁巻線を大型化しなければならない。また試料として、電磁鋼板のような薄い単板を用意することは難しく、丸棒や角棒が一般的であ



(a) H -(B , θ_B) function



(b) θ_H -(B , θ_B) function

Fig. 10 Two-dimensional magnetization property.

る。そのような試料の磁気特性測定には、パーミアメータを用いた方法が提案されている^{25), 26)}。しかしながら、既存のヨークに対応する寸法および形状の試料が用意できない場合も多く、各試料に合わせてヨークを個別に作製する必要がある、非常に煩雑である。それに対して電磁石は、特殊なヨークを必要とせず、かつ容易に十分大きな磁界が印加可能であるので、好都合である^{15), 26)}。

Fig. 11 に、磁極間隔可変型電磁石を示す。磁極間隔は、試料の長さに応じて 0~100 mm の範囲で可変である。磁極面の平坦部の直径は、100 mm である。また、試料によって磁極面が損傷することを防止するために、磁極面には補助磁極板 (SS400 製、厚さ 4 mm、直径 100 mm) が取り付けられている。周波数は、磁極に流れる渦電流の影響を考慮すると、最大で 20 mHz 程度である。

Fig. 12 に、試料およびセンサの配置を示す。磁束密度は、試料中央部に直巻した B コイルで測定する。磁界の強さは、ホールプローブで測定する。磁極間に試料を挟むと、材質が異なる磁性体が接合されることになり、反磁界が発生する。この反磁界によって、試料近傍の空間中における磁界の強さの空間的分布は不均一になり、測定誤差の要因となる。

Fig. 13 に、磁束分布の均一性を調べた結果を示す。測定に用いる試料は、反磁界の影響が比較的顕著な透磁率が高いパーメンジュールとし、磁束密度は、透磁率がほぼ最大になる $B_h = 0.70$ T (B_h : 磁界の強さが最大 (H_m) になる瞬間の磁束密度) とした。ギャップに起因する反磁界が試料近傍の磁束分布に与える影響を検討するために、厚さ 5 μm のポリプロピレンシートおよび厚さ 25 μm のカプトンシートを用いて故意にギャップを設けてある。試料寸法

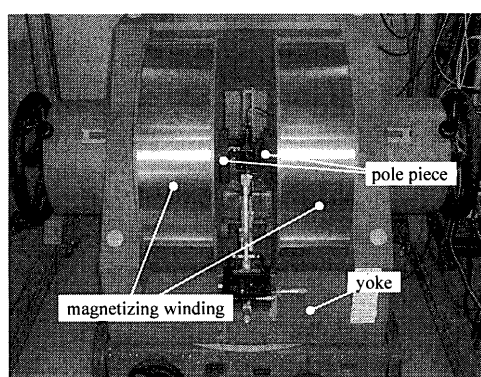


Fig. 11 Electromagnet.

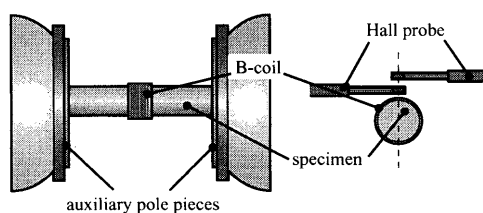
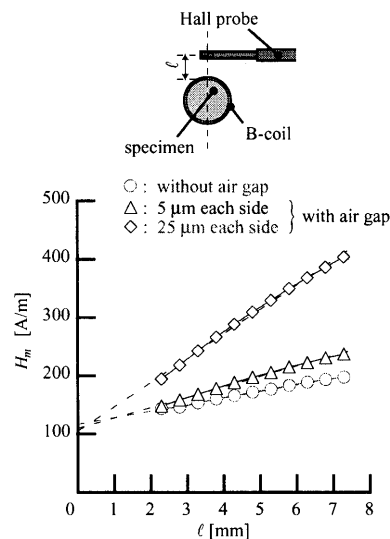
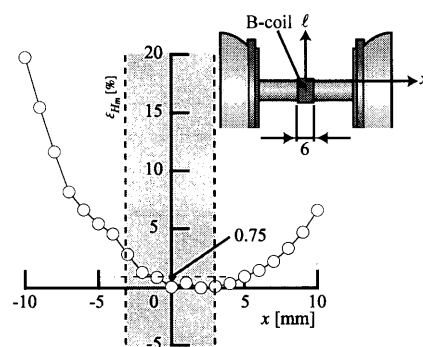


Fig. 12 Configuration of specimen and sensors.



(a) Radius direction



(b) Longitudinal direction

Fig. 13 Magnetic field distributions.

は、 $\phi 15$ mm $\times$ 60 mm である。(a) 図からわかるように、いずれの場合も H_m は、試料表面からの距離に比例して、直線的に増加している。ギャップがない場合でも、試料表面の H_m に比べて大きくなっている。したがって、電磁鋼板の磁気特性測定用の SST で採用されている 2H コイル法と同様な方法が有効である。ここでは、2H プローブ法と呼ぶことにする。また (b) 図より、磁極間における磁界分布について、試料中心における H_m を基準として比較すると、試料中央部の磁界分布の均一性は良く、B コイルを設置した範囲におけるばらつきは、最大で 2.5%，平均で 0.75% であり、磁束密度の測定範囲としては妥当であると考えられる。なお、磁界分布が試料中心に対して対称ではないが、これは、両側のギャップ長の違いによると思われる。以上の結果が示すように、磁極と試料間のギャップに留意し、2H プローブ法を適用すれば、電磁石を利用して、塊状試料の磁気特性測定が可能であると考えられる。

Fig. 14 に、S45C 材の測定に適用して得られた μ_s -B 曲線 (μ_s : 比透磁率) を示す。Fig. 11 に示した電磁石による結果とパーミアメータ²⁶⁾による結果を比較した。全く異なる試験器や測定システムにより測定したにもかかわらず、

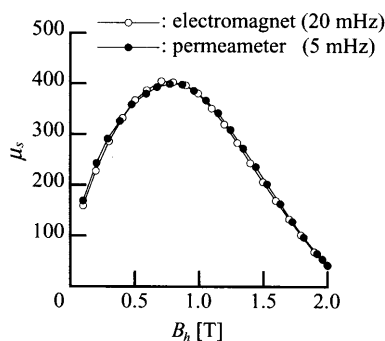


Fig. 14 μ_s - B_m curves (S45C).

両者は非常によく一致しており、十分な精度が実現できていると考えられる。

4. 応力印加時の磁気特性試験法

電磁鋼板に応力が印加された場合の磁気特性の変化は、従来から種々検討されているが、磁化機構と磁歪の関係を把握し、それを新規材料の開発に役立てようという観点からの検討が主であったように思われる。ここで説明する応力印加時の磁気特性試験法は、回転機の固定子鉄芯のように、構造上の制約から、磁気特性が劣化するような応力、特に圧縮応力が印加された場合について検討することを目的とする。この試験法において最も難しいと考えられる点は、圧縮応力を印加した場合に、弾性変形の範囲にもかかわらず、試料の取付けの不具合で、試料が座屈することである。実際の回転機では、部分的に圧縮応力が 100 MPa を超えている領域があるとのことなので、単板試料にそのように大きな圧縮応力を印加することは、非常に高度な技術が必要である。それを克服するために、試料として積層鉄芯を使用することが考えられている。

Fig. 15 に、圧縮応力印加時の磁気特性測定装置を示す。試料の厚さは、約 20 mm である。応力印加装置は、磁気測定装置の設置の関係で、横型になっているが、本質的な問題ではなく、一般的に市販されている縦型でも差し支えない。

Fig. 16 に、無応力下におけるヒステリシスループを示す。無方向性鋼板 50A1300 の圧延方向を、最大磁束密度 B_m が 0.8 T、周波数が 50 Hz で励磁した場合の結果である。単板の場合、積層鉄芯で切断加工したままの状態で測

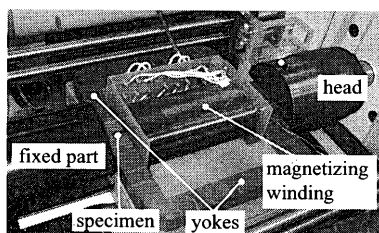


Fig. 15 Equipment for measuring magnetic properties during stress application.

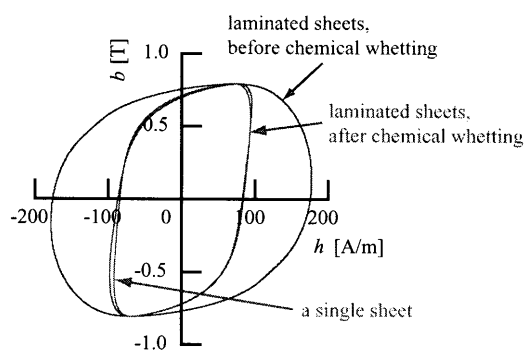


Fig. 16 Hysteresis loops.

定した場合、および切断後、端面を錆落としにより化学的に研磨し、短絡を除去した状態で測定した場合を比較している。切断加工により端面が短絡していると、積層鉄芯全体にわたって渦電流が流れるため、ヒステリシスループは、単板の結果とは、大きく異なっている。それに対して、化学研磨を施すことにより、短絡は除去され、積層鉄芯と単板を用いて得られたヒステリシスループは、ほぼ一致している。

Fig. 17 に、圧縮応力印加時の磁気特性測定結果の一例を示す。圧縮応力の上限が 48 MPa になっているのは、応力印加装置の性能のためであり、これ以上の圧縮応力を印加すると、試料が座屈したということではない。(a) 図は、無応力下で透磁率がほぼ最大となる $B_m = 1.0$ T の場合のヒステリシスループである。印加する圧縮応力が大きくなるに従って、磁界の強さの最大値は増加しており、ヒステリシスループの形状も特徴的な変化を示している。(b) 図の B_m - H_b 曲線において、例えば、 $B_m = 1.0$ T 付近に着目し、 $\sigma = 0$ と -48 MPa を比較すると、 H_b は約 10 倍になっている。(c) 図の W - B_m 曲線の $B_m = 1.5$ T に着目すると、鉄損は約 4 割増加している。測定された 50A1300 材は、低級グレードであるため、応力感受性がそれほど大きくないとされているので 35A300 材のような応力感受性が強い高級グレードでは、鉄損増加率は、相当大きくなると考えられる。なお、引張応力印加時に磁気特性を検討する場合には、磁気特性測定装置としては、座屈の心配がないので、SST が使用可能である¹¹⁾。本例のような検討は、始まったばかりである。単板試料を用いて ± 150 MPa の範囲で応力を印加することができる装置が、最近開発されたこともあり¹²⁾、今後の進展が期待できる。

5. むすび

本稿では、電気機器の磁気回路に使用される電磁鋼板および構造鋼の磁気特性を評価するための標準試験法について、詳細な磁気特性の把握だけでなく、得られた結果を磁界解析に取込み、計算機援用設計に活用するという観点からも説明した。1 次元用の単板磁気特性試験法は、JIS 化されて 10 年弱であり、改善すべき事項、例えば、高磁束密度

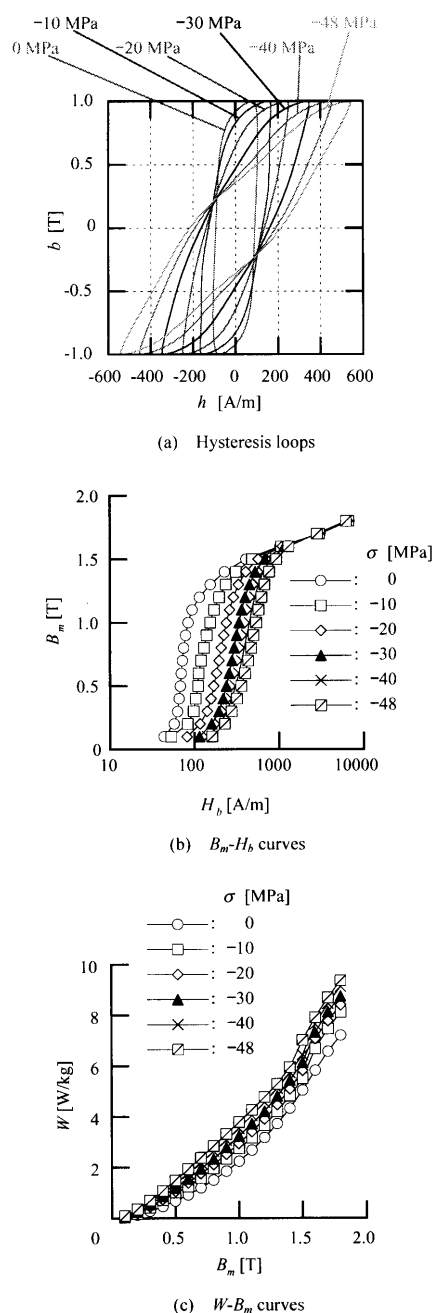


Fig. 17 Magnetic properties during stress application (50A1300, 50 Hz).

領域における空隙磁束補償や高周波化の問題が残されている。2次元用の試験法については、長年の基礎的研究が実り、ようやく実用化に向けた本格的な研究段階に入りつつあるように思われる。塊状試料の試験法に関しては、ほとんど議論されていないように思われるが、電磁石を保有している機関は多数あると思われるので、是非ご検討いただき、問題点を洗い出していきたい。電磁鋼板に応力を印加した場合の磁気特性の評価に関しては、回転機を扱う上では必要不可欠であるので、省エネに向けて高効率化への要求がますます厳しくなっている状況を考えると、今後研究が活発化すると考えられる。

計算機の高性能化によって、磁界解析技術は長足の進歩を遂げたが、実機に対応した解析を行うためには、機器に使用される磁性材料の磁気特性を精度よく評価し、解析に適した磁気特性モデリングを行う必要がある。そのためには、誰でもが比較的容易に使用することができる標準的な試験法を確立することは重要である。

本稿が、電力用磁性材料の標準磁気特性試験法の概要を知る上で参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) JIS, "Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip," C2550 (1992).
- 2) T. Nakata and N. Takahashi, *The Finite Element Method for Electrical Engineering*, Morikita Shuppan Co., Ltd. (1982) (in Japanese).
- 3) T. Nakata, S. Ito, and Y. Kawase, *Design of AC and DC Electromagnets by Using the Finite Element Method*, Morikita Shuppan Co., Ltd. (1991) (in Japanese).
- 4) S. Ito and Y. Kawase, *CAE for Electrical and Electronic Devices by Using the Latest Finite Element Method*, Morikita Shuppan Co., Ltd. (2000) (in Japanese).
- 5) T. Yamamoto and Y. Ohya, "Single Sheet Tester for Measuring Core Losses and Permeabilities in a Silicon Steel Sheet," *IEEE Trans. Magn.*, MAG-10, no. 2, pp. 157-159 (1974).
- 6) JIS, "Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Magnetic Steel Sheet and Strip by Means of a Single Sheet Tester," C2556-1996.
- 7) JIS, "Methods of the Magnetic Properties of Amorphous Metals by Means of a Single Sheet Tester," H7152-1996.
- 8) M. Enokizono, "Two-Dimensional Vector Magnetic Property," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 27, no. 2, pp. 50-58 (2003) (in Japanese).
- 9) S. Owaku, *Introduction to JIS Ferrous Materials*, Taiga Shuppan Co., Ltd. (1978) (in Japanese).
- 10) N. Takahashi *et al.*, "Advanced Technology of Electromagnetic Field Analysis for Rotating Machines," *Technical Report of IEE Japan*, no. 942 (2004) (in Japanese).
- 11) T. Uda, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "A Method of Measurement of Magnetic Properties of Stress-Loaded Silicon Steel Sheets," *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, no. MAG-01-83 (2001) (in Japanese).
- 12) Y. Tani, A. Daikoku, H. Arita, M. Nakano, S. Yamaguchi, Y. Toide, T. Yoshioka, and C. Fujino, "Measurement of Magnetic Characteristic Under Stress of Magnetic Steel Sheets," *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, no. MAG-03-191 (2003) (in Japanese).
- 13) M. Nakano, A. Daikoku, S. Yamaguchi, Y. Tani, H. Arita, Y. Toide, T. Yoshioka, and C. Fujino, "Measurement of Magnetic Characteristic Under Stress of Magnetic Steel Sheets," *The Papers of Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan*, no. SA-04-16, RM-04-16 (2004) (in Japanese).
- 14) H. Nishimoto, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "Improvements of Single Sheet Testers for Measurement of 2-D Magnetic Properties Up to High Flux Density," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 3965-3967 (1999).
- 15) H. Hirano, M. Nakano, and K. Fujiwara, "Improvements

- of a Method of Measurement of Magnetic Properties of Solid Specimens by Using an Electromagnet," *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, no. MAG-03-193 (2003) (in Japanese).
- 16) For example, H. Nishio, K. Takebuchi, C. Ishizaka, H. Taguchi, A. Fukuno, and H. Yamamoto, "Precise Measurements of the Hysteresis Curves of High-Coercivity Nd-Fe-B Sintered Magnets," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 27, no. 9, pp. 971-975 (2003) (in Japanese).
 - 17) T. Nakase, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "Measuring System for Magnetostriction of Silicon Steel Sheet under AC Excitation Using Optical Methods," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4, pp. 2072-2074 (1998).
 - 18) M. Hirano, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka, and K. Fujiwara, "A Study on Measurement of Magnetostriction of Silicon Steel Sheet with Laser Displacement Meter," *Trans. IEE of Japan*, vol. 123-A, no.9, pp. 851-856 (2003) (in Japanese).
 - 19) T. Nakase, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "Method of Digital Waveform Control for Measuring Magnetic Properties by Means of a Single Sheet Tester," *Trans. IEE of Japan*, vol. 119-A, no. 7, pp. 1019-1025 (1999) (in Japanese).
 - 20) JIS, "Non-Oriented Magnetic Steel Sheet and Strip," C2552-1986.
 - 21) JIS, "Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet and Strip," C2553-1986.
 - 22) IEC, "Magnetic Materials—Part 3: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Magnetic Sheet and Strip by Means of a Single Sheet Tester," 60404-3 (2002).
 - 23) K. Fujiwara, T. Adachi, and N. Takahashi, "A Proposal of Finite-Element Analysis Considering Two-Dimensional Magnetic Properties," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 889-892 (2002).
 - 24) H. Mimura, M. Nakano, and K. Fujiwara, "Frequency Dependence of 2-D Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets," *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, no. MAG-03-196 (2003) (in Japanese).

- 25) R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, D. van Nostrand Company, Inc. (1951).
- 26) M. Sone, K. Iwata, T. Masuzawa, M. Nakano, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "Comparison of Methods of Measurement of Magnetic Properties of Solid Specimens by Means of an Electromagnet and a Permeameter," *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, no. MAG-00-296 (2000) (in Japanese).

(2004年3月2日受理)



藤原耕二 ふじわら こうじ

昭59 岡山大学大学院工学研究科電気工学専攻修了, 同年 同大学大学院研究生, 昭60 三井造船(株)入社, 昭61 岡山大学工学部助手, 平6 同助教授, 現在に至る.

専門 計算電磁気学, 磁気応用工学(工博)



中野正典 なかの まさのり

昭39 岡山県立笠岡工業高等学校電気科卒業, 同年 中国機械(株)入社, 昭40 岡山大学工学部技術員, 昭42 同技官, 平10 同技術専門官, 現在に至る.

専門 磁気計測工学



石原好之 いしはら よしゆき

昭39 同志社大学工学部電気工学科卒業, 同年~ 岡山大学工学部助手, 講師, 助教授を経て, 昭56 同志社大学工学部助教授, 昭60 同教授, 現在に至る.

専門 電気機器学, 磁気応用工学 (工博)