けい素鋼板の偏磁気特性の測定法

正員 榎園 正人, 非会員 竹島 豊* (大分大学)

Measurement Method on DC-biased Magnetic Properties of Silicon Steel Sheet

Masato Enokizono, Member, Yutaka Takeshima, Non Member (Oita University)

This paper presents magnetic properties of electrical steel sheets under DC-biased magnetization. We have practiced measurement of the mixing flux density between AC flux density and DC flux density (DC-biased flux density) by using the flux meter directly. The specimen was excited by voltage of sinusoidal, triangular and rectangular waves. When the amplitude of AC magnetic flux density was controlled to be constant, it was found that in the case of the rectangular exciting wave, that is, the smallest effective flux density value, the DC-biased flux density was larger than one of the other cases and the iron loss become smaller.

キーワード：電磁鋼板，偏磁，磁気特性

1. はじめに

電力用磁性材料は、一般に対称な正弦波励磁下で使用されることから、それらの励磁条件下で測定、評価されることが多い。しかし、近年のパワーエレクトロニクスの発達に伴い励磁条件も多様化してきた。また永久磁石モータや電磁超音波トランスデューサ(EMAT)のように直流と交流磁場の混在する機器や、インバータ波などで励磁される機器は鉄心に偏磁が発生する。この偏磁による損失増大や最大電流増加などの機器特性への悪影響、また鉄心が振動することによる騒音が問題視されるようになり、偏磁下での実際の材料特性について種々検討されている^(1~7)が、未だ不明な点が多い。とりわけ、その測定は困難である。

磁性材料内に生じる磁束密度 B の測定には、リング試料の場合、一般的には B コイルに生じる dB/dt に比例した誘起電圧を積分して算出される。しかし、直流成分に対しては安定に精度良く積分することができないため、偏磁状態での直流磁束密度の測定は困難であった。そのため、材料中の直流磁束密度成分、いわゆる偏磁量の測定法が確立されていなかったが、我々はフラックスメータを用いた偏磁気測定システムを提案し、正確な偏磁量の測定を可能にした⁽⁷⁾。

そこで本研究では、その測定システムの概要と、それを用いてさまざまな励磁条件下における磁気特性及び損失特性について検討したので、以下に報告する。

2. 測定方法

測定試料を図1に示す。方向性けい素鋼板30Zのリング状巻鉄心(内径90mm、外形110mm、幅25mm)を使用した。磁束密度測定用の B -coilは試料を絶縁テープでおおった上に巻き、励磁コイルはその上から隙間のな

いように、直流励磁用と交流励磁用の2種類のコイルが交互になるように巻いた。これにより、漏れ磁束はほとんどないといえ、その影響は無視することができる。

図1 測定試料

Fig. 1. Measurement specimen

測定系ブロック図を図2に示す。直流励磁電流は直流電源を用いて、交流励磁電流はコンピュータによって波形を作成したものをD/A変換して、パワーアンプを通して励磁用コイル($E1, E2: 120\text{Turn}$)に流される。これにより、試料に直流磁界と交流磁界を印加した。なお、交流励磁電圧波形は1周期1000点でサンプリングしている。材料中の実効磁界は、交流用、直流用のそれぞれの励磁回路に直列に接続したシャント抵抗($1\text{m}\Omega$)の端子間電圧をDCアンプで増幅し、A/D変換してコンピュータに取り込む。そして、アンペールの法則より磁界を計算し、各励磁回路から求められた磁界を加算することにより、試料内の磁界を求めた。実際には、交流励磁用コイルに流れる電流によって誘導された電流が直流励磁回路に流れて交流励磁の負荷となってしまうが、この方法を用いるとその負荷分を含めた磁界の測定が可能であり、正確な試料内の実効磁界を求めることができる。磁束密度は B コイル($B1: 40\text{Turn}$)に発生した誘起電圧をフラックスメータで磁束を求め、フルスケール $\pm 5\text{mV}$ で出力される信号をDCアンプで増幅し、A/D変換してコンピュータに取り込む。それぞれコンピュータに取り込む波形は10周

図2 測定システム

Fig. 2. Measuring system

期分を測定し、それをアベレーシングしているが、フラックスメータからの信号はノイズを除去しきれない。そこで、ノイズの振幅に対して磁束密度の値は十分大きいので、この信号からはアベレーシングした1周期分の波形の平均をとって直流成分のみを検出した。交流磁束密度成分に関しては別に設けたBコイル ($B_2: 20\text{Turn}$) から一般的な交流磁気特性測定法で測定し、加算することにより試料内の磁束密度を求めた。

ここで偏磁界のヒステリシスループから偏磁気特性の測定諸量について定義する。試料に与えた直流磁束密度の大きさを B_{DC} 、直流磁界の大きさを H_{DC} 、交流磁束密度波形を B_{AC} とする。図3に示す B_m は B_{AC} の振幅、直流偏磁量 ΔB は図のようにループの振幅の中心までの値とし、 H_{min} 、 H_{max} は、それぞれ試料にかかる実効磁界の最小値と最大値を示し、 B_{min} 、 B_{max} は磁束密度の最小値と最大値を示す。ここで、 B_{DC} と ΔB を別々に定義したのは、直流偏磁下においては、磁化上昇と磁化下降に關与する磁化率が、可逆であるか非可逆であるかによって、磁化上昇量の方が磁化下降量よりも大きくなるため、 B_{DC} よりも ΔB が高い値を示すと考えられているためである。^[3]

図3 測定諸量の定義

Fig. 3. Definition of measuring quantity

図4は測定手順をフローチャートで表す。まず、試料に直流磁界のみを与えて、そのときの実効磁界 H_{DC} と直流磁束密度 B_{DC} を測定する。このとき測定した B_{DC} は ΔB を評価するときの基準となる。次に交流磁界を加えてやり、 ΔB 、 B_{AC} 、そして実効磁界 H を測定し、これらのデータから次に示す式を用いて鉄損を計算した。

$$P_t = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left(H \cdot \frac{dB}{dt} \right) dt \quad (1)$$

ここで、 ρ は試料の密度で、 T は励磁波形の周期を表す。

図4 測定手順

Fig. 4. Measuring procedure

3. 結果と検討

本研究では、試料に与える交流励磁電圧波形を3つの異なる場合において測定を行った。図5に示すように、一つは一般的な正弦波励磁、それから今回新たに測定した三角波励磁、矩形波励磁の3種類である。測定条件は周波数が10Hzと50Hz、 B_m が0.3Tの場合について測定を行った。

図5 交流励磁波形

Fig. 5. Alternating current exciting wave form

(3.1) 偏磁量の評価 図6、図7は偏磁状態でのヒステリシスループに直流初磁化曲線を重ねて表した結果である。初め試料に印加した直流磁界は B_{DC} が0.1、0.5、0.9Tとなるように、後で印加した交流磁界は B_m が0.3Tとなるように励磁電圧を制御した。正弦波励磁の場合は偏磁ループの先端が初磁化曲線上にあり、これにより ΔB 自体を測定しなくても H_{max} の点が初磁化曲線と一致するところまで上方向に平行移動させることによりほぼ正確な評価ができるということが確認されている。^[7]そこで同じことが三角波や矩形波励磁の場合でも言えるかどうか検討してみたいと思う。

まず三角波励磁の場合では、周波数50Hz、 $B_{DC}=0.1$ Tのときは多少のずれがあるが、ほぼ偏磁ループの先端が初磁化曲線上に一致しているといえる。さらに、矩形波励磁の場合はばらつきがあって、0.05Tぐらいの誤差はあるが正弦波や三角波と同様のことがいえる。励磁電圧が正弦波や三角波の場合に比べて矩形波の場合に誤差が生

じるのは、矩形波の場合は図5に示すように、試料内に発生する磁束密度波形は三角波であるからBコイルに誘起される電圧波形は矩形波となるため、誘起電圧が最大値から最小値まで急激に変化して、フラックスメータがその変化に対応しきれないことが原因と思われる。従って、矩形波励磁の場合は本装置の積分感度では不十分で、より高感度なフラックスメータが要求される。

(III) 矩形波励磁
(III) Excitation of rectangular wave form

図6 偏磁ループと初磁化曲線の関係

($B_m=0.3$ T, $F=10$ Hz)

Fig. 6. Relationship between DC-biased loops and Initialized magnetization curve ($B_m=0.3$ T, $F=10$ Hz)

[I] 正弦波励磁

[II] 三角波励磁

[III] 矩形波励磁

[III] Excitation of rectangular wave form

図7 偏磁ループと初磁化曲線の関係

(B_m=0.3 T, F=50 Hz)Fig. 7. Relationship between DC-biased loops and Initialized magnetization curve (B_m=0.3 T, F=50 Hz)

(3.2) 偏磁気特性 図8は直流磁界H_{DC}と偏磁量ΔBの関係を示したものである。比較のために直流磁束密度B_{DC}(初磁化曲線)も表示した。どの励磁の場合にも共通していえることは、測定点が少ないため多少の誤差はあるが、周波数が異なってもΔBの軌跡はほぼ等しいといえる。正弦波励磁の場合と同様に、他の2つの励磁波形の場合も各H_{DC}においてB_{DC}よりもΔBの方が大きい値をとっていることがわかる。もともと試料に与えた

直流磁束密度よりも偏磁状態での直流磁束密度成分は大きくなることは交流励磁波形が異なっても言える。

また、本測定は偏磁量の基準としてB_{DC}を用いている。そこで、B_{DC}各点でΔBを3種類の励磁電圧波形の場合で比較したものを図9に示す。正弦波励磁と三角波励磁の場合、ΔBはそれほど差はないが、矩形波励磁の場合は他の2つの場合と比べてΔBはより大きい値をとっている。このことは、試料中の交流磁束密度の波形B_{AC}に関係があると思われる。B_{AC}はB_mが0.3Tとなるように励磁電圧を制御しているが、その実効値を考えると、矩形波励磁の場合はB_{AC}は三角波となり他の場合より小さくなる。このことから、試料内の交流磁束密度の実効値が小さいほど、ΔBはより大きい値をとるといえる。

[I] 正弦波励磁

[I] Excitation of sinusoidal wave form

[II] 三角波励磁

[II] Excitation of triangular wave form

[III] 矩形波励磁

[III] Excitation of rectangular wave form

図8 H_{DC}とΔBの関係Fig. 8. Relationship between H_{DC} and ΔB

(a) $F = 10$ [Hz]

(b) $F = 50$ [Hz]

図9 ΔB の励磁波形依存性 ($B_m = 0.3$ [T])

Fig. 9. ΔB dependence on exciting wave form ($B_m = 0.3$ [T])

(3.3) 損失特性 図10に ΔB による損失値の変化を示す。30Z材ではどの場合においても、周波数が高い方が損失値は大きく、 ΔB が0.9T程度から増加の割合が増し、2次曲線的な増加傾向を示す。これは材料の特性から偏磁ループの最大磁束密度 B_{max} の値が飽和磁束密度を上回ることがないため、飽和磁束密度から交流磁束密度振幅 B_m を引いた値付近に ΔB は収束していくことが図8からもわかる。よって、同じ間隔で試料に印加する直流磁界を増加していくとすると、 ΔB の変化の割合がその収束値に近づくにつれ小さくなるので損失特性にも影響を及ぼすと考えられる。

そして、図11は図9と同様の表示方で、異なる励磁電圧波形の場合に B_{dc} に対する損失がどのように違うか比べたものである。これらの結果からは図9の場合とは逆に、 B_{ac} の実効値が小さいほど鉄損は小さい値を示しているといえる。

(a) 正弦波励磁

(a) Excitation of sinusoidal wave

(b) 三角波励磁

(b) Excitation of triangle wave

(c) 矩形波励磁

(c) Excitation of squareness wave

図10 ΔB に対する損失特性

Fig. 10. Iron loss on ΔB

図 11 損失の励磁波形依存性

Fig. 11. Iron loss dependence on exciting wave form

4. まとめ

本研究では、方向性けい素鋼板 30Z 材の偏磁状態下での磁気特性を明らかにした。3 種類の交流励磁波形について測定を行ったわけであるが、交流励磁波形が偏磁気特性の測定結果に影響を及ぼしていることがわかった。これを具体的に以下のようにまとめる。

- (1) 偏磁ループの先端が直流初磁化曲線上にあるという評価法は、励磁電圧波形の変化が急激であるとずれが生じるので、あらゆる励磁条件で適用することができない。
- (2) 偏磁量 ΔB は交流励磁波形の実効値が小さいほど大きい値を示すといえる。
- (3) 交流励磁波形の実効値が小さいと鉄損も小さい値を示す。

(平成 10 年 10 月 12 日受付, 平成 11 年 6 月 28 日再受付)

文 献

- 1) 増本・中野・福永・太田・掛橋・小笠原:「直流偏磁下におけるフェライトの磁気特性」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-88(1995)
- 2) 高田・佐々木・安田:「直流偏磁下におけるけい素鋼板の磁気特性」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-89(1995)
- 3) 浅野・高田・佐々木・岡崎:「偏磁状態における電磁鋼板の磁気特性測定法」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-89(1997)
- 4) 浅野・高田・佐々木・岡崎:「電磁鋼板の偏磁状態における磁気特性」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-175(1997)
- 5) 内山・西水・斎藤:「鉄心の直流偏磁測定方法の検討」、平成 9 年電気学会全国大会資料, MA-57-523
- 6) 浅野・柳瀬・岡崎・佐々木:「偏磁下における電磁鋼板の磁気特性」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-61(1998)
- 7) 榎園・竹島:「偏磁状態下の磁気特性測定法」、電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-62(1998)

榎園 正人

(正員) 1949 年 2 月 19 日生。1979 年 1 月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。同年工学部研究生を経て、1980 年 2 月大分大学工学部助手、1981 年 4 月講師、1982 年 4 月同大学工学部助教授、1987.9~1988.12 までアレクサンダー・フォン・フンボルト招聘研究員(ドイツ国立物理工学総合研究所: 通称 PTB)、1995 年 4 月教授となり、現在に至る。工学博士。この間、磁性材料、電気機器、磁界解析を中心とする磁気工学の研究に従事。

竹島 豊

(非正員) 1975 年 1 月 20 日生。1997 年 3 月大分大学工学部電気電子工学科卒業、1999 年 3 月大分大学大学院工学研究科修了、同年 4 月住友重機械工業株式会社に入社し、現在に至る。この間、電磁超音波トランスデューサーの磁界解析、偏磁気特性の研究に従事する。