2次元測定による磁気特性

Two-Dimensional Magnetization Characteristics

榎園正人・戸高 孝・金尾真一

大分大学工学部, 大分市旦野原 700 (〒870-11)

M. Enokizono, T. Todaka and S. Kanao

Faculty of Engineering, Oita Univ., 700 Dannoharu, Oita 870-11

In conventional magnetic measurement, only the same components of the magnetic flux density B and the magnetic field intensity H in the excited direction are measured. In short, the measured values are dealt with as scalars. Since it is well known that B and H have a phase difference in space, the values should be dealt with as vectors. We have used a two-dimensional magnetic measurement apparatus to understand the magnetization process of B and H precisely. In the conventional method, when the excited direction does not correspond to the rolling direction, the locus of the vectors of B is not an alternating flux; that is, it becomes a loop. Therefore, the iron loss in the conventional method is different from that in the two-dimensional measurement method.

Key words: magnetic measurement, one-dimensional measurement, two-dimensional measurement, vector relation, rolling direction, iron loss, permeability

1. ま え が き

省エネルギー化が唱えられている近年, 電気機器の効率向上のために, その鉄心などに用いられている磁性材料の磁気特性に重点が置かれるようになっている。ところで, 磁束密度 (以下, B と呼ぶ) と磁界強度 (以下, H と呼ぶ) の間には Fig. 1 に示すような空間的位相差があることは良く知られているが, 従来の磁気測定方法はその位相差を無視し, Fig. 1 に示す方法で, 印加磁界方向 (観測方向) と平行な成分のみの B と H を測定していた¹⁾。簡単に言えば, 測定値をスカラー値として処理していたことになり, それによって得られた特性で評価されていた。ここで, この測定方法を1次元磁気測定 (スカラー測定), その特性を1次元磁気特性と我々は呼ぶことにする²⁾。

果して, この測定で材料の特性を十分に表現できるのであろうか。先にも述べたように, B と H は位相差を持

つため, それぞれの値はベクトル値として測定し, 磁化過程についてそれとの関係で明確にするべきである。そこで, 我々は新概念として2次元磁気特性 (ベクトル磁気特性) を提示し, Fig. 2 に示す装置を2次元磁気測定 (ベクトル測定) 装置と称して測定に用いている³⁾。

我々は, これまで1次元磁気測定と2次元磁気測定の

Fig. 1 Conventional measurement method.

Fig. 2 Measurement apparatus.

比較検討をし、その結果両手法の測定結果の差は非常に大きく、無視しにくいことが明らかになった。そこで、本論文では特に交番磁束下の磁気特性についてその違いを明確にし、2次元磁気測定的重要性について述べるものである。

2. 測定方法

今回の測定に用いた試料は、新日鐵製の無方向性電磁鋼板 H 30 (板厚: 0.50 mm) と方向性電磁鋼板 23 ZDKH 90 (板厚: 0.23 mm) である。それぞれ圧延方向から、試料 (a) は 0° , (b) は 15° , (c) は 30° , (d) は 45° の傾き角をもって切り出しており、全部で8枚の試料を用いている。測定装置は、Fig. 2 に示す2次元磁気測定装置である。この装置の測定システムについては文献³などの多くの論文で発表されているので、ここでは省略する。測定は3通りの手法で行った。いずれの場合も、無方向性電磁鋼板は B の X 成分を 1.5 T、方向性電磁鋼板は 1.2 T に制御する。まず、{1} 2次元磁気測定は、 X, Y

両方向から励磁し (2次元励磁)、 X 方向に交番磁束が得られるように制御して行われた。勿論この時は、 B と H を X, Y 両方向の探りコイルでベクトル値として出力している。また、 X, Y 方向の試料と励磁鉄間のエアギャップはともに 0.1 mm である³⁾。

次に、{2} 従来法の2次元測定は、装置の X 方向からのみ励磁した (1次元励磁)。この時、 B と H の探りコイルによる出力値は X, Y 方向によるベクトル値である。なお、 Y 方向の励磁鉄を伝って磁束が流れ込むを防ぐため、Fig. 2 に示すように、試料と励磁鉄間のエアギャップは X 方向が 0.1 mm に対して、 Y 方向は 5.0 mm とした。また、{3} 上述の場合で、 X 方向の探りコイルのみを用いて B と H をスカラー値として測定した (従来法)。

以上の測定から、{1} 2次元磁気測定と {3} 1次元磁気測定の比較およびその違いについて考察を行った。また、{2} は従来法で測定した場合に B と H の Y 成分が確実に現れていることを証明するために行った。なお、励

Fig. 3 Dependence on the locus of the vectors of B and H for the inclination angle (non-oriented: $B = 1.5$ T).

Fig. 4 Dependence on the locus of the vectors of B and H for the inclination angle (grain-oriented: $B = 1.2$ T).

磁周波数は 50 Hz である。

3. 実験結果および考察

3.1 磁束密度と磁界強度の傾き角による変化

Fig. 3 には無方向性電磁鋼板の, B, H の軌跡の傾き角による変化を示す。左側は上述 {1} の場合, 右側は上述 {2} の場合であり, その違いについて述べる。また, (a) は傾き 0° , (b) は 15° , (c) は 30° , (d) は 45° の試料である。同様に, Fig. 4 には方向性電磁鋼板を示す。

まず, Fig. 3 の無方向性電磁鋼板では, {1} の場合 2 次元励磁によって B は完全な X 方向の交番磁束が得られている。一方, {2} の場合 B は圧延方向からの傾き角が大きくなると, 磁束は測定方向から傾いてくる。これは圧延方向に対して 90° をなす方向へ異方性があるためである。また, H は {1}, {2} による違いはほとんどなく, ともに圧延方向に切り出した試料は B との位相差がないが, それ以外の試料はわずかにループを描いて回転磁界を形成し位相差を持っている。

Fig. 5 Two- and one-dimensional magnetic properties (grain-oriented: $B=1.2 \text{ T}$).

次に、Fig. 4 の方向性電磁鋼板では、{1} の場合の B に関して、無方向性電磁鋼板と同様に交番磁束が完全に制御されている。しかし、{2} の場合の B は、圧延方向からの傾き角の増加に伴って大きく圧延方向に傾きながら回転磁束を形成しており、全く交番磁束になっていない。また、 H は {1}、{2} とともに似た傾向で、圧延方向に切り出した試料は B との位相差がなく、傾き角が大きい試料になってくると圧延方向に対して 90° をなす方向へ困難軸が現れてくる。また、傾き角がさらに大きい試料は困難軸が圧延方向に対して 60° をなす方向へ移る。

3.2 傾き角ごとの 1 次元および二次元磁気特性の違い

Fig. 5 には方向性電磁鋼板の B, H の軌跡、 X, Y 方向のヒステリシス・ループを示す。それぞれ (a) は傾き角 0° 、(b) は 15° 、(c) は 30° 、(d) は 45° の試料で、上段が上述の {1} の場合、中段が {2} の場合、下段が {3} の場合であり、これらの場合の違いについて述べる。

(a) の 0° の試料では測定方法による違いは現れない。(b) の 15° の試料では、{1} の場合、 B が圧延方向に対して 15° 傾いた交番磁束になっているが、{2} の場合、 B が圧延方向に対して約 5° 傾いた交番磁束になっているため、 H の軌跡が {1} に比べて小さく、 X 方向のヒステリシス・ループも小さく現れている。つまり、{1} の場合と {3} の場合では基本的な違いが現れている。(c) の 30° の試料は、 X 方向のヒステリシス・ループにも違いが現れているが、ここで重要なことは、無方向性電磁鋼板や方向性電磁鋼板の 0° や 15° の試料と違って、{2} の Y 方向のヒステリシス・ループが無視できないほどの形として現れていると言うことである。{3} の従来法ではこれを全く無視していたわけであるから、これまで表されてきた特性とは全く違ってくるはずである。(d) の 45° の試料も同様のことが言える。また、{1} の 2 次元励磁の場合と {2}、{3} の 1 次元励磁の場合では X 方向のヒステリシス・ループが全く違っている。以上のことを考えると、従来法の測定では、試料内に回転磁束が発生し、かつ B ベクトルと H ベクトルは平行になっていないため、測定方向が圧延方向からずれると真値を表しているとはいえない。

3.3 傾き角ごとのヒステリシス・ループの違い

Fig. 6 には無方向性電磁鋼板の {1} 2 次元磁気測定と {3} 1 次元磁気測定のヒステリシス・ループを同時に示し、その違いについて述べる。また、それぞれ (a) は傾き角 0° 、(b) は 15° 、(c) は 30° 、(d) は 45° の試料である。同様に、Fig. 7 には方向性電磁鋼板の場合を示す。

まず、Fig. 6 の無方向性電磁鋼板の場合、2 次元磁気

測定と 1 次元磁気測定との違いはあまりないと考えられる。また、(c) の 30° と (d) の 45° の試料で、2 次元磁気測定のヒステリシス・ループで段差がついているところがあるが、これは、 H が回転磁界を形成し値が 0 になる点がないからである。

次に、Fig. 7 の方向性電磁鋼板の場合、(a) の 0° の試料は 2 次元磁気測定と 1 次元磁気測定は全く同じになっているが、他は全く違うループを描いている。Fig. 5(b), (c), (d) の {1}、{3} を見ると、2 次元磁気測定も 1 次元磁気測定も B の Y 成分がなく、 B, H の X 成分は同じになるので、上に述べる違いは H の Y 成分があるかないかによって現れる。したがって、この点からも 2 次元磁気測定によって B, H をベクトル値として測定することの重要性が認識される。

3.4 傾き角ごとの鉄損の違い

Fig. 8 には無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板の {1} 2 次元磁気測定と {3} 1 次元磁気測定の場合の鉄損を同時に示し、その違いについて述べる。また、鉄損はヒステリシス・ループの面積から算出するため以下に示す式を用いた。

Fig. 6 Hysteresis loop for the inclination angle (non-oriented: $B=1.5 \text{ T}$).

Fig. 7 Hysteresis loop for the inclination angle (grain-oriented: $B = 1.2$ T).

$$P = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad [\text{W/kg}]$$

ただし、 T は励磁周期、 ρ は密度である。

まず、無方向性電磁鋼板の場合、いままで述べてきた理由から2次元磁気測定と1次元磁気測定ではその差は小さいことがわかる。

次に、方向性電磁鋼板の場合、Fig. 7 と見比べながら考えると、2次元磁気測定による鉄損の方が1次元磁気測定によるものよりも大きく、従来法のそれは真値より小さめに測定されている。

また、どちらの試料も傾き角が0°の試料では、2次元磁気測定の場合と1次元磁気測定の場合はほとんど同じ値を示している。

3.5 傾き角ごとの透磁率の違い

Fig. 9 には無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板の{1} 2次元磁気測定と{3} 1次元磁気測定の場合の透磁率を同時に示し、その違いについて述べる。また、透磁率は2次元磁気測定と1次元磁気測定の違いを明白にするため Fig. 6, Fig. 7 に示すヒステリシス・ループの B, H の最大値から算出した。

まず、無方向性電磁鋼板の場合、傾き角が15°と30°

Fig. 8 Relationship between iron loss and inclination angle.

Fig. 9 Relationship between permeability and inclination angle.

の試料でわずかな相違が見られる程度である。

次に、方向性電磁鋼板の場合、無方向性電磁鋼板の場合と同様に Fig. 7 と見比べながら考えると、ヒステリシス・ループに大きな違いが現れているため、傾き角が 15° の試料の透磁率の値に最も大きな差が現れ、2 次元磁気測定を行った場合の方がかなり小さくなっている。他の 30° と 45° の試料もループは全く違っているが、最大磁束密度と最大磁界強度の値が近くなってくるので、透磁率の差は小さくなっている。

また、どちらの試料も傾き角が 0° の試料では 2 次元磁気測定の場合と 1 次元磁気測定の場合はほとんど同じ値を示している。

4. む す び

方向性電磁鋼板に容易軸と異なる方向に励磁した場合、交番磁束とならず回転磁束を形成してしまう。したがって、2 方向からの励磁（2 次元励磁）によって、完全な交番磁束を形成するように制御する必要がある。これは、異方性が強い材料では、磁界の変化に伴う磁化の変化が大きさだけでなく、方向を変えているためである。

以上のことを含め、2 次元磁気測定を行った場合と 1 次元磁気測定（従来法）を行った場合の特性で以下のような違いを示したので列挙する。

(1) 無方向性電磁鋼板では、鉄損や透磁率などの特性を表す上で両手法の差は小さい。

(2) 異方性の強い方向性電磁鋼板では、1 次元磁気測定の場合、傾き角の大きい試料ほど磁束密度が回転磁束のようなループを描き、正しい交番磁束条件下で測定できない。

(3) 方向性電磁鋼板では、上記のような理由から真値と言えず、鉄損や透磁率などのそれとの差は大きい。

(4) 圧延方向に切り出した試料は、無方向性および方向性電磁鋼板の区別なく、2 次元磁気特性と 1 次元磁気特性は同じ特性を示すため、従来の測定値を使用可能である。

以上の点から、これまでの磁気特性表現を改め、2 次元磁気測定を用いることにより、磁性材料の真の特性が表現できると考える。

文 献

- 1) M. Enokizono: Proceedings of International Workshop, pp. 5~13, Oita (1992).
- 2) 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).
- 3) 榎園正人, 鈴木毅浩, J. D. Sievert: 日本応用磁気学会誌, **14**, 455 (1990).

1992 年 11 月 19 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録