二方向性けい素鋼板の2次元磁気特性

Two-Dimensional Magnetic Properties of a Double-Oriented Silicon Steel Sheet

榎園正人・戸高 孝・川野慎一郎・岡崎靖雄*

大分大学工学部, 大分市旦野原 700 (〒870-11)

*新日本製鐵(株)鉄鋼研究所, 千葉県富津市新富 20-1 (〒229-12)

M. Enokizono, T. Todaka, S. Kawano, and Y. Okazaki*

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

*Steel Res. Lab., Nippon Steel Corp., 20-1, Shintomi, Futtsu, Chiba 299-12

Recently, the quantities of energy consumed by electrical machines have been increasing every year. As a result, it has become important to find new ways of saving energy, and to develop highly efficient electrical machines. The efficiency of an electrical machine depends on the iron loss of magnetic materials. We measured the two-dimensional magnetic properties of a sheet of double-oriented silicon steel with excellent properties. From the data thus obtained, we calculate the permeability tensor, the coercive force, and the iron loss, and compare the properties with those of a single-oriented silicon steel sheet.

Key words: double-oriented steel sheet, two-dimensional magnetic property, permeability tensor, coercive force, iron loss

1. ま え が き

二方向性けい素鋼板は(100)面の結晶粒を選択的に抽出した方向性けい素鋼板で、面内に磁化容易軸〈100〉方位を二方向に持つ二軸異方性を示す。また(110)面を抽出した一方向性けい素鋼板は、圧延方向に垂直な方向では〈110〉方位となり磁化特性が劣り、磁束ができるだけ圧延方向に流れるように工夫して使用されている。二方向性けい素鋼板では二方向に磁化容易軸を持つという磁気特性を利用することで、各種電気機器の高効率化および低損失化に大きく寄与できるものとして、次世代の電気鉄板として期待されている。しかし、製造法が複雑で条件が厳しく、また応用面への展開が進まず実用化となっていない¹⁾。他方、著者らはこれまで既存の無方向性、方向性鋼板についての二次元磁気特性について報告してきた²⁾。二次元磁気特性とは従来までのエプスタイン試験法、単板試験法とは異なり、二次元励磁および波形制御を行い所望の磁束条件下において、磁界強度 H と磁束密度 B をベクトル量として測定するものである^{2), 3)}。この測定法により、従来法では測定できなかった任意方向の磁気特性および回転磁束条件下における鉄損評価などが可能となる。また、二方向性けい素鋼板においては未だその詳細な検討結果は報告されておらず、二次元磁気測定により各種磁束条件下で得られた測定結果はこの鋼板の応用面を考える上で有用であると考えられる。

本報告では、二方向性けい素鋼板の全体的な特性の把握を行

うため、二次元磁気特性測定装置を用いて回転、交番磁束条件下において、測定結果を基に透磁率、保磁力、鉄損の算出を行い既存の新日本製鐵(株)製の方向性けい素鋼板(HI-B)と比較検討を行った結果を報告する。用いた材料は新日本製鐵(株)製の二方向性けい素鋼板 Cube (板厚 0.38 mm) である。

2. 二方向性けい素鋼板の構造

2.1 二方向性けい素鋼板の結晶粒の(100)極点図

本測定に用いた二方向性けい素鋼板試料の極点図 (Fig. 1) を示す¹⁾。鉄板板面および最終圧延方向からの各結晶粒の(100)面および〈100〉方位のずれを図のように a , b , c とすると、本測定に用いた試料は a の大きな結晶粒をもつ。

3. 二次元磁気特性

3.1 交番磁束条件下の任意方向の磁気特性

まず最初に交番磁束条件下における任意方向の二次元磁気特性について検討を行う。Fig. 2 は交番磁束条件下における磁束密度 B 、磁界強度 H の軌跡および x , y 方向のヒステリシスループを示す。最大磁束密度が 1.4 T で圧延方向からの傾き角を変化させた場合である。また、本測定では圧延方向を x 方向とし、励磁周波数 50 Hz で測定を行った。圧延方向からの B の傾き角が 45° のとき H が最も大きくなっており、困難軸〈110〉方位に一致している。傾き角 0° 方向と 90° 方向では x 方向と y 方向の相互作用が強く完全な交番磁束は得られていない。しかし、この2方向においてヒステリシスループの形は多少異なるが、ほぼ等しい特性を持つことがわかる。また、結晶構造から考えると 45° を中心に特性が対称になるはずであるが、そうになっていない。これは Fig. 1 に示したように測定に用いた試料が理想的組織からずれていることと、消磁を x 方向のみの交番

Fig. 1 Misorientation angles a , b , and c , and the orientation of double-oriented sheet.

Fig. 2 Loci of the B -, the H -vector, and the hysteresis ($B_{\max}$: 1.4 T). (B , (0.5 T)/div.; H , (100 A/m)/div.).

Fig. 3 Relation between the relative permeability, the inclination angle, and the magnetic flux density.

磁界で行った影響がでたのではないかと考えられる。消磁の影響については今後検討予定である。

3.1.1 透磁率テンソル 次に、透磁率テンソルについて検討を行う。交番磁束条件下における透磁率テンソルの非対角項は回転ヒステリシスによる位相差を表すので、交番磁束条件下においてはそれらはゼロになる⁴⁾。また、データは各方向の交番磁束の磁束密度が最大になるときの H の値を用いて次式により算出した。

$$\mu_{xx} = B_x / H_x, \quad \mu_{yy} = B_y / H_y \quad (1)$$

Fig. 3 は最大磁束密度、傾き角に対するそれぞれの項の変化を示す。高磁束密度領域において 45° 方向で透磁率が小さくなっており、最も強い磁化力が必要とすることがわかる。

3.1.2 保磁力 任意方向の交番磁束において、 B ベクトルがゼロのときの H ベクトルを保磁力と定義し⁴⁾、この定義を用いて次式により保磁力を算出した。

$$H_c = \sqrt{H_{cx}^2 + H_{cy}^2} \quad (2)$$

H_{cx} , H_{cy} はそのベクトルの x , y 成分である。Fig. 4 は傾き角と

Fig. 4 Relation between the coercive force of double- and single-oriented sheets, the inclination angle, and the magnetic flux density.

Fig. 5 Relation between the iron loss of double- and single-oriented sheets, the inclination angle, and the magnetic flux density.

磁束密度に対する保磁力の変化を示す。(a) は二方向性鋼板、(b) は一方向性鋼板 (HI-B) である。図中の H_c はそのベクトルの大きさである。圧延方向においてどちらの材料も最小値をとっており、この場合のみ HI-B の方が小さい。また、HI-B は傾き角が大きくなるにつれて急激に保磁力は大きくなっているが、二方向性鋼板はその差が小さく、傾き角が大きくなるほど、両者の差は大きくなっている。以上のことより、二方向性鋼板は HI-B と比べて圧延方向を除く任意方向において、より低磁力の材料であることがわかる。

3.1.3 任意方向の交番磁束鉄損の算出 は次式で行った。

$$P_t = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad [\text{W/kg}] \quad (3)$$

ただし、 T は励磁周期、 ρ は密度である。式 (3) の P_t は各方向成分のヒステリシスループの面積の和から得られる。Fig. 5 は傾き角と最大磁束密度に対する鉄損の変化を示す。(a) は二方向性鋼板、(b) は一方向性鋼板 (HI-B) である。一方向性鋼板は傾き角の増加に伴って鉄損が増加しているが、二方向性鋼板では傾き角の変化に対して鉄損の変化は少ない。

3.2 回転磁束条件下の磁気特性

Fig. 6 は回転磁束条件下における磁束密度 B 、磁界強度 H の軌跡ならびに容易軸からの B の角度 θ_b に対する B と H の位相差 θ_{bh} を示し、 H ベクトルが B ベクトルより回転方向に進んでいる場合正の値となる。 θ_{bh} が持つ意味については文献 5 に示されている。磁束密度を 0.5 T から 1.3 T まで 0.2 T おき

Fig. 6 Loci of the B -, the H -vector, and the phase difference between B and H . (B , (0.5 T)/div.; H , (100 A/m)/div.; θ_b and θ_{bh} , (45°)/div.).

に変化させた場合である。図より低磁束密度領域においては H ループの様子は HI-B とよく似た傾向を示すが⁶⁾、位相差は HI-B ほど激しく変化せず、45° 方向で B と H は、ほぼ平行になることがわかる。また、高磁束密度領域においては 45° と 135° 方向に磁化の困難性が増し、これらの方向において B と H は、ほぼ平行になる。高磁束密度領域では回転磁束下での磁区構造が変化するものと思われる。すなわち低磁束密度レベルでは、回転磁束に対して磁壁移動による磁化過程が進行するが、高磁束密度レベルになると磁壁の発生消滅過程⁶⁾が主となることが起因するものと考えられる²⁾。しかし、位相差において全磁束密度で HI-B のように、 H ベクトルが B ベクトルより回転方向に対して遅れた状態になることはなく、常に H ベクトルは B ベクトルに対して回転方向に進んだ状態にある。これは一方向性鋼板が 180° おきに容易軸を持つのに対して、二方向性鋼板は 90° おきに容易軸を持ったためだと考えられる²⁾。

3.2.1 透磁率テンソル 回転磁束条件下においては、交番磁束条件下と B と H の位相差において全く異なった特性になる。これは回転ヒステリシスによるものであり、この回転ヒステリシスが存在する場合、透磁率テンソルの非対角項はそれによる位相差を表すためゼロとならないことが分かっている。テンソルの算出は回転磁束のループ上においてテンソルの各成分は等しいと仮定し、ループ上の 2 点の B と H の値を用いて算出した⁷⁾。Fig. 7 は磁束密度に対する透磁率テンソルの変化を示す。この図よりテンソルの非対角項 μ_{xy} μ_{yx} は、 μ_{xy} が負の値、 μ_{yx} が正の値を示していることがわかる。共に約 1.1 T でそれぞれ最大、最小値となり反対の傾向を示す。

3.2.2 回転磁束鉄損 回転磁束鉄損は 3.1.3 で示した式 (3) と次式に示す 2 種類の算出により行った。

Fig. 7 Relation between the relative permeability and the magnetic flux density.

Fig. 8 Relation between the rotational iron loss and the magnetic flux density.

$$P_r = \frac{\omega}{\rho T} \int_0^T (\mathbf{H} \times \mathbf{B}) dt$$

$$= \frac{\omega}{\rho T} \int_0^T (H_x B_y - H_y B_x) dt \quad [\text{W/kg}] \quad (4)$$

式 (4) の P_r は $\mathbf{H}$ ベクトルと $\mathbf{B}$ ベクトルの間のトルクを 1 周期積分して得られる鉄損を示す。Fig. 8 は磁束密度に対する回転磁束鉄損を (4) 式に従って算出した結果である。この場合これは (3) 式に従って計算した結果と変わらない。共に無方向けい素鋼板 H30 と方向性けい素鋼板 HI-B との比較を示す。二方向性鋼板は全磁束密度において他の二つの材料より回転鉄損が小さいことがわかる。

3.3 楕円磁束条件下の磁気特性

前項では軸比が 1 の場合の回転磁束について検討を行ったが、ここでは $\mathbf{B}$ ベクトルの軌跡が楕円になる場合について検討を行う。

3.3.1 透磁率テンソル 最大磁束密度を 1.0 T に固定し、傾き角 (容易軸に対する長軸の傾き角度)、軸比 (短軸/長軸) を変化させた場合の透磁率テンソルの各項の変化を Fig. 9 に示す。 μ_{xx} は傾き角が 45° の時に最大値をとり、135° の時に最小値をとっている。 μ_{yy} は μ_{xx} と反対に 45° の時に最小値をとり、135° の時に最大値をとっている。さらに、 μ_{xy} 、 μ_{yx} は傾き角が圧延方向の時に最小値をとり、それと垂直なときには最大値をとることがわかる。また、軸比が小さくなるにつれ、傾き角に対する変化が大きくなっている。この傾向は H30、HI-B でも同様の傾向を示すことが確認されている⁷⁾。

3.3.2 鉄損 前に述べた二つの式を用いて評価を行った。透磁率テンソルの場合と同様に最大磁束密度を 1.2 T に固定し、

Fig. 9 Relation between the relative permeability, the inclination angle, and the axis ratio ($B_{\max}$: 1.0 T).

Fig. 10 Relation between the iron loss (P_r and P_t), the inclination angle, and the axis ratio ($B_{\max}$: 1.2 T).

傾き角，軸比を変化させた場合の回転鉄損 P_r と全鉄損 P_t の変化を Fig. 10 に示す。回転鉄損 P_r は 30° 付近で最小値を 150° 付近で最大値をとり，軸比の減少に伴って傾き角に対する変化が大きくなっている。また，全鉄損 P_t は軸比の減少に伴って鉄損は減少しており，傾き角に対してさほど変化していないことがわかる。

4. む す び

二方向性けい素鋼板について交番磁束，回転磁束条件下の二次元磁気特性を測定した結果を以下に要約する。

(1) 二方向性けい素鋼板は一方方向性けい素鋼板 (HI-B) と比べ，回転磁束条件下および圧延方向への交番励磁を除いた交番磁束条件下において鉄損は小さく，交番磁束条件下では磁束密

度の圧延方向からの傾き角が大きくなるほど両者の鉄損の差は大きくなる。

(2) 二方向性けい素鋼板は一方方向性けい素鋼板 (HI-B) と比べ，圧延方向への交番励磁を除き低保磁力であり，鉄損と同様に磁束密度の傾き角が大きくなるほど両者の保持力の差は大きくなる。

以上より二方向性けい素鋼板は二次元磁気特性においても，優れた磁気特性を示すことが確認できた。さらに，回転磁束および圧延方向から傾いた交番磁束が発生する電気機器にこの材料を適用すれば，高効率および低損失化が図れるものと期待できる。

文 献

- 1) 岡崎靖雄：電学論 A, **112**, 513 (1992).
- 2) 榎園，白川，鈴木，J. Sievert：日本応用磁気学会誌，**15**, 265 (1991).
- 3) A. J. Moses and T. Meydan: The Proceedings of International Workshop—Oita, pp. 60–76 (1992).
- 4) M. Enokizono, S. Kanao, and S. Kawano, *J. MMM*, **133**, 212 (1994).
- 5) M. Enokizono, T. Todaka, S. Kanao, and J. Sievert: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3550 (1993).
- 6) F. Brailford: *Proc. IEEE*, **177**, 1052 (1970).
- 7) M. Enokizono, S. Kanao, and K. Yuki, *J. MMM*, **133**, 209 (1994).

1994 年 10 月 12 日受理，1995 年 1 月 20 日採録