電磁鋼板の結晶粒の影響による鉄損分布と2次元磁気特性

Iron Loss Distribution by Influence of Crystal Grain in Electromagnetic Steel Sheet and Its Two-Dimensional Magnetic Properties

榎園正人・橋本芳典・茂木尚*

大分大学, 〒870-1192 大分県大分市旦野原 700 番地

*新日本製鐵, 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1

M. Enokizono, Y. Hashimoto, and H. Mogi*

Oita University, 700 Dannoharu, Oita, 870-1192

*Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu, Chiba, 293-8511

(2000 年 10 月 10 日受理、2001 年 1 月 24 日採録)

Recently, the efficiency of electromagnetic machinery and apparatus has progressed day by day, as a result of significant advances in the production of electromagnetic steel. However, a large decrease of the iron loss is necessary for further improvement of the efficiency. To achieve this, it is necessary to determine the magnetic properties of every crystal grain and its behavior at grain boundary, because the size of a crystal grain in grain-oriented silicon steel is relatively large. Though determination of the two-dimensional magnetic properties has been recognized as a useful method in magnetic analysis, ordinary two-dimensional magnetic measurement is not suitable for local measurement, owing to the properties of the measurement method. We therefore carried out local measurement by the needle probe method, and make it clear the magnetic properties of the crystal grains and grain boundary.

Key words: two-dimensional magnetic properties, needle probe method, crystal grain, local iron loss, silicon steel

1. はじめに

近年、電磁鋼板の著しい発展により、電気機器の効率は日々進歩してきている。しかし、これから更なる効率の向上を果たすためには、これまで以上の鉄損の低減が必要である。電磁鋼板の中でも、一方磁性電磁鋼板は結晶粒の大きさが比較的大きいため、結晶粒ごとの磁気特性や結晶粒界での磁束や磁界の振る舞いを把握することが鉄損減少のために必要である。これまでのエプスタイン法や単板磁気試験法ではスカラー量でしか表されなかった磁束密度や磁界強度が、2次元磁気測定によってベクトル的に観測されるようになり、磁界解析のみならず、材料の改良の有効な手がかりを得る上で有用な手法であることが認められつつある。通常の2次元磁気測定は探りコイル法で行われる。探りコイル法とは、試料となる鋼板に水平方向及び垂直方向にそれぞれ2つずつ穴をあけ、その間にコイルを巻きそのコイル内を通る磁束から電磁誘導の法則よりコイル内の平均磁束密度を求める方法である。しかしこの方法では、コイルを通すことで測定領域が固定されるため、鋼板の局所的な磁気測定には不向きである。また鋼板に穴をあけることによる応力により鋼板の磁気特性を変えかねず、またあけた穴の空気領域のため測定領域の磁気特性が変化する恐れがある。これに対し探針法では、鋼板の上にセンサーを配置するだけで測定が可能となるため、鋼板や測定領域の磁気特性を変える恐れもなく、

測定が容易になる。本論文では、探針法を用いた2次元磁気測定により局所測定を行い、結晶粒や粒界の磁気特性を明らかにする。

2. 探針法による2次元磁気測定の問題点

探針法では、鋼板内の磁束変化に伴い発生する渦電流の探針間の電圧降下分を出力として2本の探針で取り出し、その出力を探りコイル法の1/2ターンの出力と等価として導き出す方法である。¹⁾しかし、探りコイル法が、コイルの内部を通過した磁束そのものから磁束密度制御しているのに対し、探針法では探針間の渦電流損による出力から磁束密度制御しているため、鋼板の性質が測定精度に大きく影響を与える。そこで探りコイル法と探針法の測定精度を確かめるために、2つの測定法を同時に行いそれぞれを比較した。測定試料として、無方向性電磁鋼板 H60 と一方磁性電磁鋼板 23ZH の2つの試料を用いた。また、探針法では鋼板表面の絶縁皮膜があると、その皮膜により鋼板内の渦電流が遮断され探針から出力が得られない。そこで今回は探針法での測定領域である鋼板中央の15[mm]四方を紙やすりで削って、絶縁皮膜を取り除いた。Fig.1はH60の、Fig.2は23ZHの結果である。測定条件はそれぞれ、最大磁束密度 B_{max} が1.0[T]、励磁方向の圧延方向からの傾き角 Inc が0, 30, 60, 90[deg]である。Fig.1, Fig.2とも実線が探りコイル法、破線が探針法の測定結果である。波形制御は探りコイル法から行った。この結果から探針法の精度として、無方向性電磁鋼板では探りコイル法と探針法の2つの結果は、多少の誤差は見られるがほとんど一致しており、無方向性電磁鋼板では探針法での測定は可能であると思われる。また誤差については、探りコイルをよけて探針を配置したので、探針法での測定領域が多少中心からずれていたことが考えられる。さらに紙やすりで絶縁皮膜を取り除いたことも原因に挙げられると思われる。一方、一方磁性電磁鋼板では、圧延方向である $\text{Inc}=0[\text{deg}]$ では、2つの結果はほぼ一致しており、測定可能であると思われるが、励磁方向を圧延方向から傾けると、2つの結果に大きな違いが表れた。この原因として、一方磁性電磁鋼板を磁化する際、圧延方向に励磁する場合は180度磁区の移動によって磁化が行われるが、圧延方向から傾けて励磁する場合、磁化過程で180度磁区の中に補助磁区が形成され、これにより渦電流が複雑になることが原因の一つと考えられる。今回は、結晶粒ごとの磁気特性の傾向を明らかにするために探針法を用いて測定した。探針法の性質上、試料の圧延方向以外ではデータの信頼性は劣ると思われるが、結晶粒ごとの

特性を比較することを前提として測定を行った。

Fig.1 Comparison of the search coil method and needle probe method in non-oriented silicon steel. The scale of B is 0.5 [T]/div. The scale of H is 50 [A/m]/div.

Fig.2 Comparison of the search coil method and needle probe method in grain-oriented silicon steel. The scale of B is 0.5 [T]/div. The scale of H is 50 [A/m]/div.

3. 測定システムと測定試料

Fig.3に2次元磁気センサーを示す。探針間の距離はX,Y方向ともに15[mm]であり、中央に配置されているHコイルは10[mm]×10[mm]、Hxコイル及びHyコイルの有効エリターンはそれぞれ22.5[cm²]、24.5[cm²]である。

Fig. 3 Two-dimensional magnetic sensor.

今回の測定には新日本製鐵製の実験用に結晶粒径を大きくした3%Si-Fe鋼板を用いた。鋼板の板厚は、Specimen1が0.16[mm]、Specimen2が0.20[mm]である。Fig.4に測定に用いた2枚の鋼板を、Table 1に結晶粒の磁気特性を示す。

Fig. 4 Specimens.

Table 1 Crystal grain data.

crystal	Thickness[mm]	α [deg]	β [deg]
1	0.16	-5.5	0.1
2	0.16	-6.2	-1.6
3	0.16	-5.7	-0.6
4	0.20	-3.2	0.2
5	0.20	-3.2	0.2
A	0.16	6.9	1.5
B	0.20	-0.7	1.0
C	0.20	6.4	1.0

ここでFig.5に示すように、 α 角は、試料表面の<1 0 0>方位に対する結晶粒の磁化容易方向の傾き角で、時計回りで正となる。 β 角は、試料の水平方向に対する結晶粒の磁化容易方向の傾き角のことで、試料の表面方向で正となる。またFig.6に測定システムを示す。まず探針からの出力と励磁電圧から試料内の磁束密度を制御し、その後、2次元磁気センサーを用いて測定を行った。

次に測定条件を示す。まず圧延方向からの励磁方向の傾き角

(Inc)は0,15,30,45[deg]で、試料内の磁束密度はInc=0[deg]の時は、0.5,1.0,1.5,1.7[T]、それ以外の傾き角の時は、0.6,0.8,1.0[T]の条件で測定を行った。

Fig. 5 Meanings of the angles α and β .

Fig. 6 Measurement system.

4. 測定結果と考察

Fig.4に示すように、結晶粒のある一点にセンサーを配置して測定を行った。測定点の中には、探針間の距離に比べて結晶粒の大きさが十分大きくない場合があったが、探針法では探針間の平均磁束密度を算出するため、探針間の大部分を同一の結晶粒が占めている場合は、その結晶粒の磁気特性として評価した。

Fig.7にSpecimen 1の結晶粒1~3での測定結果を示す。結晶粒の磁気特性や測定点によって波形がかなり異なっており、特にHy方向の磁気特性の相違が顕著であることがわかる。

Fig.8~Fig.10に各磁束密度に対する、結晶粒1, 2, 3の鉄損を表している。この結果より、結晶粒1の鉄損が他の結晶粒の鉄損に比べて大きいことがわかる。この原因の一つとして β 角が小さいことが挙げられる。一般に、 β 角が大きいと試料表面に磁極ができ、静磁エネルギーが増大する。そのため、この静磁エネルギーを緩和するために180度磁壁が細分化され、それが180度磁壁移動の際の損失を低く抑え、結果的に鉄損が減少すると思われる。^{2,3}つまり β 角が小さいということは、それだけ180度磁壁の幅が大きくなるので鉄損が増加する原因になると思われる。

Fig.7 Differences in the loci of all the crystal grains. The scale of B is 0.1 [T]/div. The scale of H is 25 [A/m]/div.

さらに結晶粒1の鉄損が大きい原因としては、結晶粒Aの存在が考えられる。結晶粒界の局所鉄損を考える場合、隣接する結晶粒同士の相対的な α 角が大きいと粒界に磁極が生じ、その磁極により局所的な透磁率が低下するため、鉄損が増加することが考えられる。^{4,5}結晶粒Aの α 角が6.9[deg]で、結晶粒1の α 角5.5[deg]に対してかなり大きいため、上述の原因による鉄損が考えられる。しかし、結晶粒2の α 角も結晶粒Aの α 角との差が大きく測定点も粒界に近いが、鉄損値はそれほど大きくないことからこの影響はわずかであると思われる。

次に結晶粒2と結晶粒3の鉄損については、磁束密度によらず、Incが小さい時は結晶粒3の鉄損の方が大きい、Incが大きくなるにつれて結晶粒2の鉄損値が逆転して大きくなっている。この鉄損値の逆転の原因として、 β 角の大きさの差が挙げられる。Incが小さい時は、 β 角が大きい結晶粒2では静磁エネルギーを抑えるために、磁区幅が細分化されるため鉄損が小さくなる。しかしIncを大きくすると、 β 角が大きい結晶粒2の方はランセット磁区の発生や、励磁方向が磁化容易軸と大きくずれるため磁区構造が複雑になることが鉄損値の急激な増加につながっていると思われる。⁶

また先述した結晶粒界の鉄損に与える影響を確かめるために、同一結晶粒内で粒界の影響を受ける部分と粒界の影響を受けない部分を比較した。Fig.4に示すように、粒界の影響を受ける測定点

Fig. 8 Iron loss distribution when the magnetic flux density is 0.6 [T].

Fig. 9 Iron loss distribution when the magnetic flux density is 0.8 [T].

Fig. 10 Iron loss distribution when the magnetic flux density is 1.0 [T].

Fig. 11 Iron loss distribution of crystal grains 4 and 5.

4と粒界の影響を受けない測定点5で測定を行った。Fig.11に測定点4、5の鉄損分布を示す。この結果から両方の鉄損値に差がでるのはInc=60[deg]の時、Incがそれより小さい場合はほとんど変化がないことが確認できた。つまり、結晶粒界の影響が表れるのは励磁角が特に大きい場合のみで、励磁角がそれほど大きくない時はその影響は小さいと思われる。

5. まとめ

本論文では、2次元磁気センサーを用いて結晶粒ごとの鉄損分布や結晶粒界における局所鉄損について測定を行った。結晶粒の磁気特性ごとに鉄損値が異なり、隣接する結晶粒との相互作用による鉄損値への影響も確認できた。今後、変圧器等の電気機器の鉄損を改善していく上で、結晶粒や粒界の相互作用による局所鉄損の評価は非常に重要であると思われる。今後の課題としては、粒界近傍の鉄損値と磁区構造との関係や、ランセット磁区の発生について具体的に磁区観察等を行う必要があると思われる。

文献

- 1) 榎園正人, 田邊郁雄: 日本応用磁気学会誌, Vol. 22, No. 4-2, 901-904 (1998)
- 2) 栢修一郎, 石山和志, 我妻成人, 荒井賢一: 電気学会研究会資料, MAG-98-55 (1998)
- 3) 千田邦浩, 石田昌義, 黒澤光正, 小松原道郎: 電気学会研究会資料, MAG-98-162 (1998)
- 4) 新井聡, Alex Hubert: 電気学会研究会資料: MAG-96-129 (1996)
- 5) 千田邦浩, 高宮俊人, 石田昌義, 小松原道郎: 電気学会研究会資料: MAG-96-115 (1996)
- 6) 黒澤光正, 佐藤圭司, 小松原道郎, 福田文二郎, 菅孝宏: 電気学会研究会資料 MAG-91-121 (1991)