

電磁鋼板における回転磁界鉄損とその推定法

Rotational Iron Losses and Their Estimation in Electrical Steel Sheets

開道 力・脇坂岳顕

新日本製鐵(株), 富津市新富 20-1 (〒293)

C. Kaido and T. Wakisaka

Nippon Steel Co., Shintomi, Futtsu 293

The rotational iron loss, $W_R(B_L, B_C)$, of electrical steel sheets at two-dimensional flux densities B_L and B_C were compared with the sum of the alternating iron losses $W_L(B_L)$ and $W_C(B_C)$ at B_L and B_C , respectively. In the case of $B_L + B_C < 2$ T, $K \approx 1$, where K is the ratio of $W_R(B_L, B_C)$ to $W_L(B_L) + W_C(B_C)$. For $B_L + B_C > 2$ T, $K < 1$, the value of K is almost independent of the grade of a non-oriented steel sheet. K is higher in a grain-oriented steel sheet than in a non-oriented steel sheet, and is highest in a doubly grain-oriented steel sheet. The rotational iron losses can be approximately estimated from the alternating iron losses and the constant K . In a non-oriented steel sheet, which is polycrystalline, if $B_L + B_C$ is low, it is assumed that each crystal grain is mainly magnetized along the easy axis, even if the exciting field is rotational, and that the rotational iron loss is almost equal to the sum of the alternating iron losses in two directions.

Key words: electrical steel sheet, rotational iron loss, alternating iron loss, polycrystal

1. ま え が き

モータなどの電気機器において、高出力、小形軽量化や高効率化の要求が高くなり、電気機器は限界設計がなされるようになり、電気機器の磁心の最適化が重要になってきた。しかし、従来の設計法では、電気機器における磁心の性能推定法が確立されていないため、磁心の最適化がむずかしい。例えば、磁心について、回転磁界、加工歪み、磁気特性の非線形性などの取扱いが、従来法では不十分である¹⁾。また、市販の電磁鋼板は多結晶体であり、無方向性電磁鋼板の磁気特性は粒界の影響が大きいこと²⁾を考慮する必要がある。電磁鋼板の磁化機構が単結晶の磁気特性をもとに多く論じられ、多結晶体であることにより生じる結晶粒間の磁気特性の相違を考慮した検討が少ないようである。以上のように、電気機器の最適化のためには、従来の方法より、磁心性能が正確に推定できる手法が必要である。特に、回転磁界の取扱い方法の最適化が重要である。

モータなどの電気機器の性能を検討するためには、磁心における回転磁界の磁気特性、特に回転磁界鉄損を考慮する必要がある。市販の電磁鋼板や単結晶の SiFe などについて、多くの報告がされている^{3), 4)}。しかし、電気機器において、回転磁界鉄損を考慮し磁心の鉄損を推定するには、磁界が2次元であるため、多くのデータが必要となる。したがって、電気機器の鉄損推定において、回転磁界を考慮することは實際上、むずかしい。

そこで、著者らは、回転磁界鉄損と交番磁界鉄損を比較し、

交番磁界鉄損より、回転磁界鉄損を推定する方法を検討した。考察に当たっては、電磁鋼板が多結晶体であることを考慮して考察した。

2. 実験方法

試験材は 0.3~3%Si の無方向性電磁鋼板 (50A1300~50A290)⁵⁾、3%Si の高磁束密度の一方方向性電磁鋼板⁶⁾と二方向性電磁鋼板⁷⁾を使用した。実験に使用した 50A1300 は 0.3%Si で、粒径 10~30 μm であり、50A290 は 3%Si、粒径 0.1~0.2 mm である。磁気特性の測定は、電磁鋼板の圧延方向 (L 方向) とその直角方向 (C 方向) を 2 辺とする 55×55 mm の試料を用い、50 Hz で行った。交番磁界鉄損は単板試験器 SST (single sheet tester)⁸⁾ で測定し、回転磁界鉄損は、鉄損による温度上昇速度を検出するサーミスタ法⁹⁾により、試料の中央部で測定した。電磁鋼板の L 方向、C 方向の磁束密度 B_L, B_C は、それぞれの方向に対応した探りコイルを使用して、波高値で測定した。探りコイルは、試料の中心に直接巻いた。回転磁界は、2 方向の磁束密度 B_L, B_C を制御することにより励磁され、2 方向の磁束密度比率 $a = B_C/B_L$ を変化させた。

3. 実験結果

無方向性電磁鋼板の 50A1300 における回転磁界鉄損は、Fig. 1 より a で異なる。交番磁界鉄損では磁束密度に対して単調に増加するが、2 方向の磁束密度比率 $a = 1$ (完全な回転磁

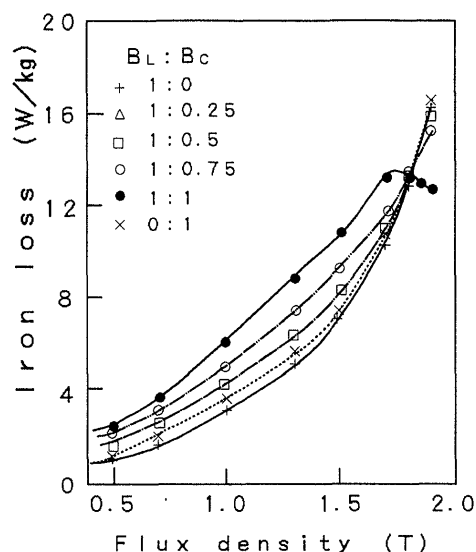


Fig. 1 Iron loss due to rotational flux (50A1300).

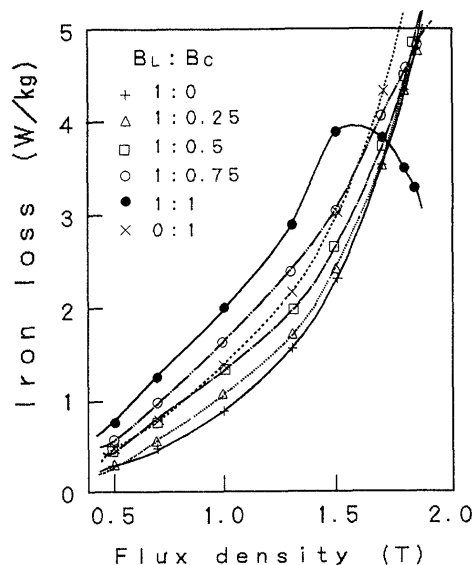


Fig. 2 Iron loss due to rotational flux (50A290).

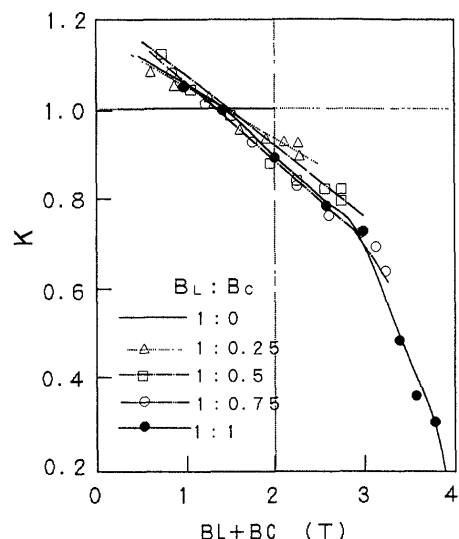


Fig. 4 Iron loss ratios of 50A290.

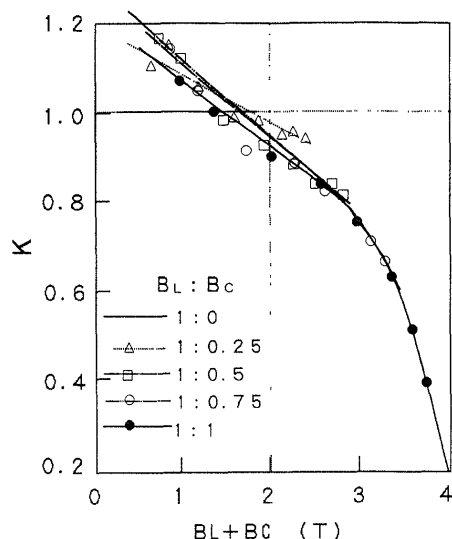


Fig. 3 Iron loss ratios of 50A1300.

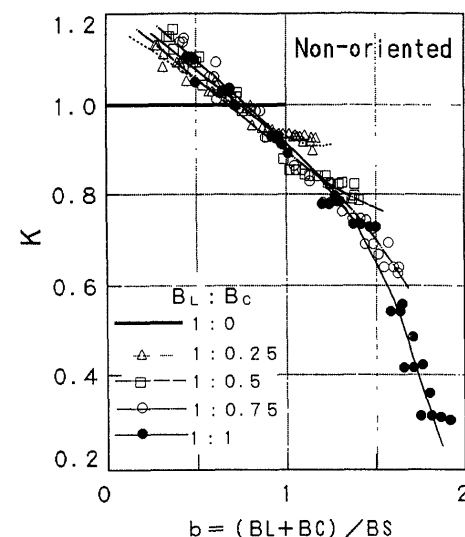


Fig. 5 Iron loss ratios in non-oriented steels.

界)では、磁束密度に対し、鉄損はピーク値を持つことが確認された。50A290における回転磁界鉄損をFig. 2に示す。鉄損は50A1300より低い、50A1300と同様な結果が得られた。

回転磁界鉄損を交番磁界鉄損と比較して見た。L方向、C方向の磁束密度が各々 B_L 、 B_C である回転磁界鉄損を $W_R(B_L, B_C)$ とし、L方向の磁束密度が B_L である交番磁界鉄損、C方向の磁束密度が B_C である交番磁界鉄損をそれぞれ $W_L(B_L)$ 、 $W_C(B_C)$ として回転磁界鉄損と交番磁界の鉄損比 K を、

$$K = \frac{W_R(B_L, B_C)}{W_L(B_L) + W_C(B_C)} \quad (1)$$

で表し、回転磁界鉄損を交番磁界鉄損の和 $W_L(B_L) + W_C(B_C)$ と比較した。また、回転磁界における2方向の磁束の拘束度合いを示す因子として、磁束密度の和 $B_L + B_C$ を用いた。

50A1300と50A290における鉄損比 K と磁束密度和 $B_L + B_C$ の関係を各々、Fig. 3, Fig. 4に示す。 $B_L + B_C$ が高くなると K は減少し、2 T以下では $K = 0.9 \sim 1.2$ であるが、2 T以上では $K < 1$ である。交番磁界鉄損と回転磁界鉄損はFig. 1, Fig. 2

のように a により2倍程度差があったが、 K の差はおおよそ20%以内である。

すべての無方向性電磁鋼板の鉄損比 K を比較してみる。飽和磁化 B_s の影響を考慮して、 $B_L + B_C$ を表す因子を、

$$b = \frac{B_L + B_C}{B_s} \quad (2)$$

を用いて、すべての無方向性電磁鋼板の鉄損比 K をまとめた結果をFig. 5に示す。 K は無方向性電磁鋼板の種類によらず、 a の影響が小さい。概略的に $b < 1$ では $K \approx 1$ 、 $b > 1$ では $K < 1$ で減少傾向を示す。

次に、電磁鋼板の集合組織の影響を調べるために、鋼板面が $\{110\}$ である一方向性電磁鋼板と、 $\{100\}$ である二方向性電磁鋼板について、 K と b の関係を調べた。その結果を、Fig. 6に示す。無方向性電磁鋼板の場合と同様に a の影響が小さく、概略的に $b < 1$ では $K \approx 1$ 、 $b > 1$ では $K < 1$ である。無方向性電磁鋼板と比較すると、 $b < 1$ では一方向性電磁鋼板、二方向性電磁鋼板は無方向性電磁鋼板と差がないが、 $b > 1$ では、二方向性電

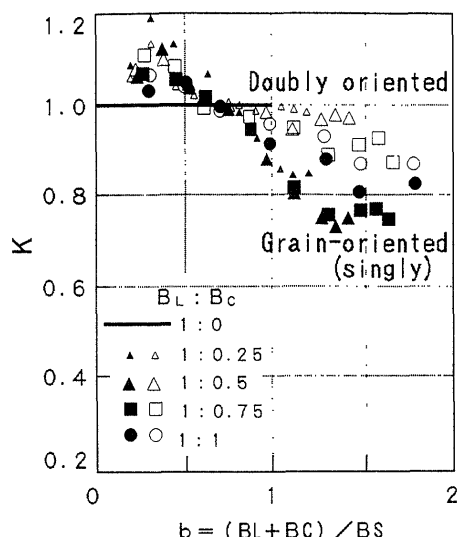


Fig. 6 Iron loss ratios in grain-oriented steels.

磁鋼板の K が最も高く、 $K=0.8\sim 1$ であり、一方向性電磁鋼板の K は、無方向性電磁鋼板と二方向性電磁鋼板の間である。

4. 考 察

以上の結果より、電磁鋼板の回転磁界鉄損は、交番磁界鉄損 $W_L(B_L)$, $W_C(B_C)$ と b をパラメータとする K により、次式より推定できる。

$$W_R(B_L, B_C) = K(B_L + B_C) \cdot \{W_L(B_L) + W_C(B_C)\} \quad (3)$$

$b < 1$ では、概略的に $K \approx 1$ であるので、

$$W_R(B_L, B_C) \approx W_L(B_L) + W_C(B_C) \quad (4)$$

となる。したがって、回転磁界でも、鉄損は近似的に、励磁する2方向を個別に取り扱うことができる。

$b > 1$ でも、無方向性電磁鋼板では種類に関係なく、同じ依存性を示し、方向性電磁鋼板になると、 K は無方向性電磁鋼板より1に近く、特に二方向性では $K > 0.8$ である。

これらの結果より、電磁鋼板が多結晶体であることを考慮して、磁化挙動を推察してみる。

b が小さい場合は Fig. 7 のように、電磁鋼板を回転磁界励磁しても、各結晶内では磁化しやすい方向のみ磁化され、交番的な挙動をしていると推定される。C 方向、L 方向の交番励磁では Fig. 8, Fig. 9 のように励磁方向に向いている結晶粒のみ磁壁移動すると考えられる。したがって、回転磁界の場合の Fig. 7 は、交番磁界の Fig. 8, Fig. 9 の和であると考えられるので、回転磁界鉄損は、それぞれの交番磁界の鉄損の和となると考えられる。

一方、 $b > 1$ になると、Fig. 10 のように、主な磁化過程が磁壁移動から磁化回転になる。そのため、磁壁移動により生じる渦電流損が減少するので、 b が大きくなるほど、回転磁界鉄損は減少すると推定される。

このように、磁化回転が生じると考えられる $b > 1$ において、回転磁界鉄損がほぼ b で決定される理由は明らかでないが、次のように考えることもできる。回転磁界の磁化過程が回転磁化になる領域の比率が b に依存するとすれば、回転磁化領域における回転磁界鉄損も b に依存すると考えられる。回転磁化領域

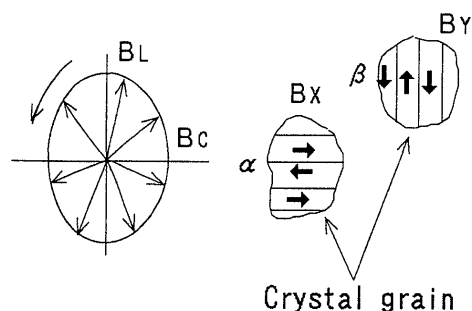


Fig. 7 Crystal grains and magnetic process in a rotational field ($b < 1$).

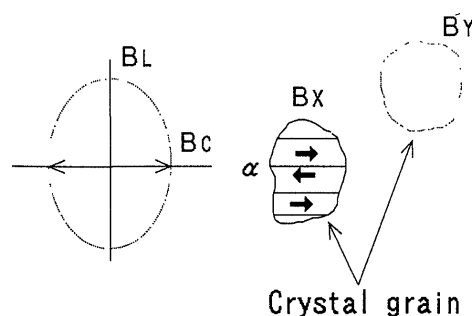


Fig. 8 Crystal grains and magnetic process in a C-directional field ($b < 1$).

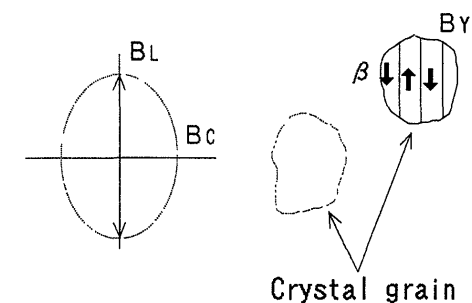


Fig. 9 Crystal grains and magnetic process in an L-directional field ($b < 1$).

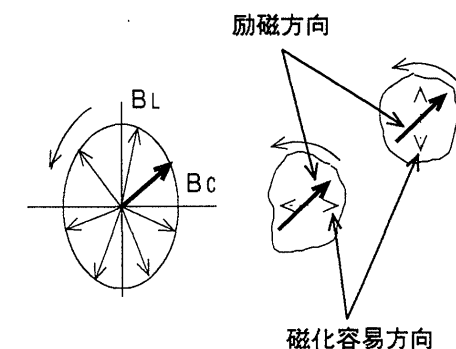


Fig. 10 Crystal grains and magnetic process in a rotational field.

以外で、磁壁移動領域の回転鉄損は、すでに述べたように b に依存すると考えられる。

鋼板面に磁化容易軸 $\langle 100 \rangle$ を含む方向性電磁鋼板では、 $b > 1$ でも鉄損比 K が無方向性電磁鋼板より高く、1に近い。これは、方向性電磁鋼板の主な磁化過程が、無方向性電磁鋼板の場合より、高い b まで磁壁移動であるためと推定される。

鉄損を測定したすべての電磁鋼板において、 $b < 1/2$ では、 K に対する a の影響は小さいが、 $a=0$ で $K=1$ 、 $a>0$ で $K>1$ であり、 a により K が少し変化する。この理由は次のように推定する。交番磁界における磁壁移動は、主に 180 度磁壁の移動であると考えられるが、回転磁界磁化過程においては、180 度磁壁移動だけでなく、90 度磁壁の移動も生じていると推定する。180 度磁壁移動では磁歪による磁気弾性エネルギーの変化はないが、90 度磁壁移動においては、磁歪による磁気弾性エネルギーが関係する。そのため、 b が小さい場合には、回転磁界鉄損はそれぞれ 2 方向の交番磁界鉄損の和より大きくなると推察する。

5. ま と め

今回、電磁鋼板の回転磁界鉄損と 2 方向の交番鉄損と比較してみた。2 方向の磁束密度 B_L, B_C の交番磁界鉄損 $W_L(B_L), W_C(B_C)$ に対して、2 方向の磁束密度が B_L, B_C である回転磁界鉄損 $W_R(B_L, B_C)$ は、

$$W_R(B_L, B_C) = K \{W_L(B_L) + W_C(B_C)\} \quad (5)$$

で表すと、二方向の磁束密度の和 $B_L + B_C$ が 2 T 以下では、 $K \approx 1$ であり、 $B_L + B_C$ が 2 T 以上では $K < 1$ である。無方向性電磁鋼板では、ほとんど種類に依存しない。方向性電磁鋼板では、 $B_L + B_C$ が 2 T 以下では、 $K \approx 1$ であるが、2 T 以上では、無方向性電磁鋼板の K より高い。特に 2 方向性電磁鋼板では、 $K =$

0.8~1 である。電磁鋼板は多結晶体であることを考えると、回転磁界の磁束密度が低い場合には、各結晶粒は主に磁化しやすい方向に励磁されるので、回転磁界鉄損は 2 方向の交番磁界の鉄損の和となると考えることもできる。

謝 辞 最後に、日頃、有益な御指導、御助言をして頂いております九州工業大学山崎二郎教授に深く感謝します。

文 献

- 1) 開道：'96 モータ技術シンポジウム資料，A-2，③（日本能率協会，1996）。
- 2) J. Sievert, J. Xu, L. Rahf, M. Enokizono, and H. Ahlers: *Anales de Fisica, Serie B*, **86**, 35 (1990).
- 3) K. Sato and B. Fukuda: Proc. of the Second International Workshop on 2-Dimensional Magnetic Measurement and Its Properties, p. 101, Oita (Japan Society of Applied Electromagnetics, Tokyo, 1992).
- 4) T. Shimazu *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1972 (1990).
- 5) 日本工業規格：無方向性電磁鋼帯 JIS C 2552 (1986).
- 6) 日本工業規格：方向性電磁鋼帯 JIS C 2553 (1986).
- 7) 岡崎：電気学会論文誌 A, **112**, 513 (1992).
- 8) T. Yamamoto and Y. Ohya: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-10**, 157 (1974).
- 9) 山本，大宅，野沢：電気学会論文誌 A, **98**, 43 (1978)

1996 年 10 月 15 日受理，1997 年 1 月 16 日採録