

## けい素鋼板を用いた分割型回転機鉄心の鉄損

## Losses of Segment Cores Made of Silicon Steels in Motors

茂木 尚・開道 力

新日本製鐵鉄鋼研究所, 富津市新富 20-1 (〒293-8511)

H. Mogi and C. Kaido

Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi, Futtsu 293-8511

This paper describes iron losses in segment cores made of grain-oriented (50ZG) and non-oriented (50H350) silicon steels. The segment core shape does not make the magnetic flux distribution uniform, and the induction frequency makes it difficult to calculate the core loss in both materials. In the segment core of grain-oriented silicon steel where the rolling direction is parallel to the yoke in the segment, the core loss is lower than that in the segment core where the rolling direction is parallel to the teeth. It is also lower than that in a core made of non-oriented silicon steel at 1.5 T and 50 Hz.

**Key words:** segment core, silicon steel, magnetic anisotropy, stator

## 1. はじめに

分割コアは大型発電機から小型モータまで幅広く用いられ、打ち抜きの歩留り改善効果をもたらしているが、最近では高効率の観点から磁化容易方向を磁束の流れる方向に配置し、低鉄損、高トルク化を狙った固定子がつくられている<sup>1),2)</sup>。

磁束の流れは固定子形状だけではなく、材料の磁気異方性からも影響を受ける。また励磁周波数や磁束密度により、材料の磁気特性に応じて固定子鉄損が変化する。これらの現象や動作条件を含めた、最適材料の選択はあまり明確にされていない。

本研究においては上記条件を明確にするため、材料の磁気異方性を考慮し、方向性と無方向性けい素鋼板を用いて固定子を構成し、トルクを測定することで鉄損を評価した。鉄損の評価には、材料特性以外の外乱である鋼板への圧縮応力や層間短絡を可能な限り除き、固定子形状と材料磁気特性のみを評価できる、回転鉄損シミュレータ<sup>3)</sup>を用いた。

## 2. 実験方法

実験における固定子には、T型の分割片12個で構成された Fig.1 に示すコアを用いた。分割コアの寸法を Fig.2 に示す。バックヨークと歯は、ほぼ同じ幅にした。これは磁化容易方向を90°変えた場合、磁束密度への断面積の影響が少ないように構成したためである。また、歯の先端は励磁ヨークとのギャップが均一になるよう、R55の湾曲を持たせた。バックヨークと歯にそれぞれ10ターンのサーチコイルを巻き、磁束密度を測定した。

材料は無方向性けい素鋼板 50H350, 板厚 0.5 mm (JIS50A350)と方向性けい素鋼板 50ZG, 板厚 0.5 mmを用い、方向性けい素鋼板については圧延方向を円周方向に平行 (RD : yoke) と、歯方向に平行 (RD : teeth) の2条件で分割コアを構成した。分割片の剪断は歪みの影響が少ない

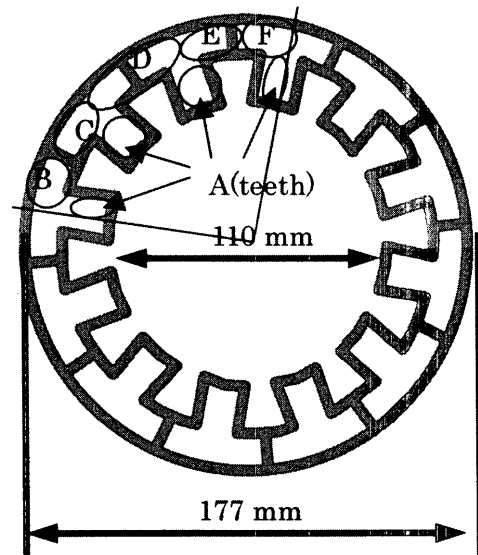


Fig. 1 Segment core.

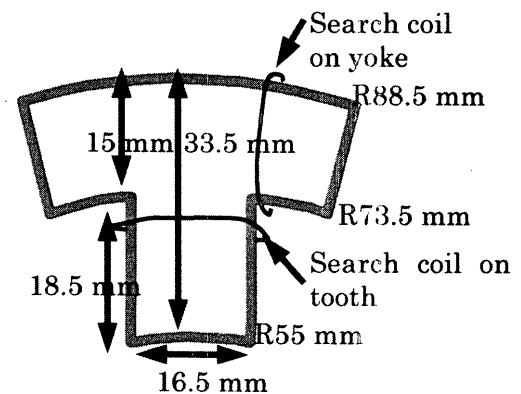


Fig. 2 A piece of the segment core.

ワイヤーカットで行った。分割コアはテフロンフレームにはめ込み、プラスチックの押さえで固定した。このフレームは、分割片間の隙間が開かないように設計され、異なる材料の分割片を容易に交換できる。

分割コアの鉄損は、Fig.3 に示す回転鉄損シミュレータで測定した。本装置は単板または数層からなる固定子が回転し、鉄損により発生するトルクを測定して、鉄損を評価できる。トルク計は小野測器製 TS-900A, 発信器とアンプは NF 回路設計ブロック製 FG-124, S-4750, 波形測定用デジタルオシロスコープは横河電機製 DL-708 を用いた。

分割コアの中には Fig.4 で示す励磁ヨークが入る。励磁ヨークは 10.5 mm 幅の 16 個の鉄心からなり、それぞれに巻線が施してある。本実験では 2 極で励磁しているの、回転磁界を発生するには U, V 2 相で励磁する。したがって、1 から 8 の鉄心は直列につながれ U 相の正側に、9 から 16 の

鉄心は直列に U 相の負側に接続される。一方、13 から 16 と、1 から 4 の鉄心は V 側の正側、5 から 12 の鉄心は V 側の負側に接続され、U 相と V 相の位相を 90° ずらした正弦波を加えることにより、回転磁界を発生することができる。また、回転磁界の周波数により、分割コアの磁束の周波数を設定することができる。

以下に回転鉄損シミュレータの鉄損測定の原理を示す。ヨークを励磁しないと、分割コアのフレームは一定の回転数 (300 rpm) で回り、トルクは発生しない。ヨークを励磁すると、コアに吸引力が加わり、トルクが発生する。測定系として鉄損で失われる電気エネルギー  $W$  と発生したトルクによる機械エネルギーが主で、他のエネルギーは無視できるほど小さいので、これがバランスして (1) 式による単位重量あたりの鉄損が得られる。

$$W = \frac{2\pi fT}{M} \quad (1)$$

ここで  $W$ : 鉄損,  $f$ : 分割コアへの励磁周波数,  $T$ : トルク,  $M$ : 鉄心の重量である。

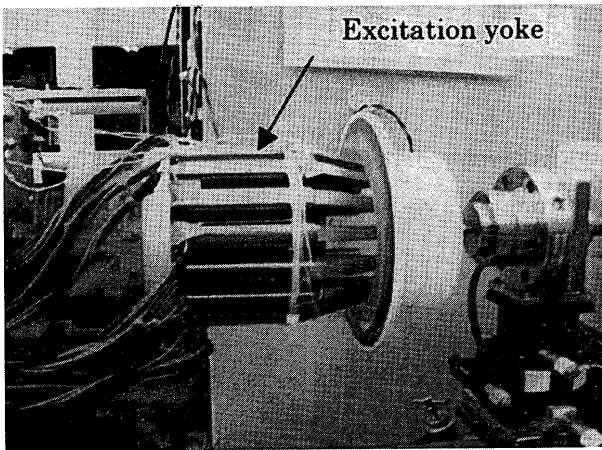


Fig. 3 Rotational iron loss simulator.

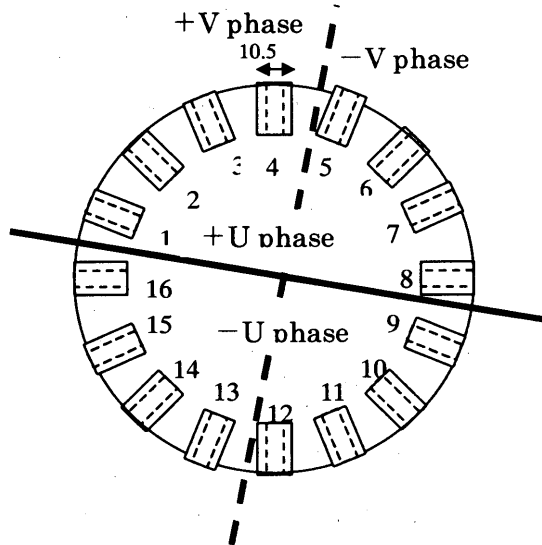


Fig. 4 Excitation yoke.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 分割コアの鉄損

これまで得られた結果をふまえ、分割コアの鉄損を測定した。無方向性けい素鋼板の鉄損を Fig. 5 に示す。鉄損は 50 から 400 Hz まで測定し、これを基準として方向性けい素鋼板の鉄損と比較した。

圧延方向を円周方向に平行にした時の、方向性けい素鋼板の分割コア鉄損を Fig. 6 に示す。1.5 T, 400 Hz における鉄損は無方向性けい素鋼板の 40 % で、大きな低減が見られた。これは円周方向の鉄損が低く、分割コアの効果が見れている。

一方、圧延方向を歯方向に平行にした分割コアの場合は、1.5 T 以上の励磁ができず、したがって、Fig. 7 では Fig. 6 で示した 1.5 T の点はない。これはバックヨーク部分で磁束が流れにくく、大きな励磁電流が必要になるためである。

本実験条件の 2 極励磁の場合、鉄損の低い歯部より鉄損の高いバックヨーク部の方がほとんどの磁路を占めるので、上記の結果が得られたと考えられる。鉄損は 1.3 T, 400 Hz において無方向性けい素鋼板よりも約 1.7 倍大きい。

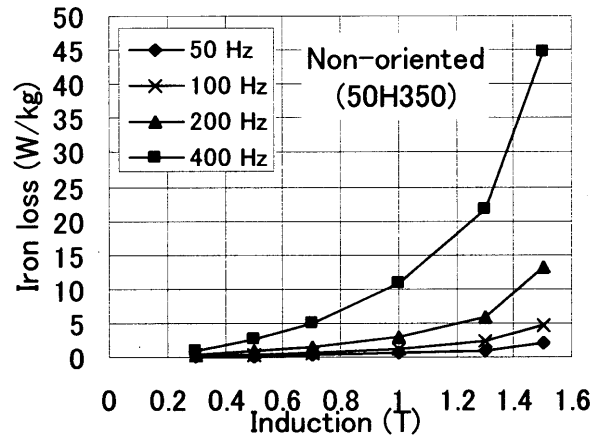


Fig. 5 Iron loss of the segment core (non-oriented silicon steel).

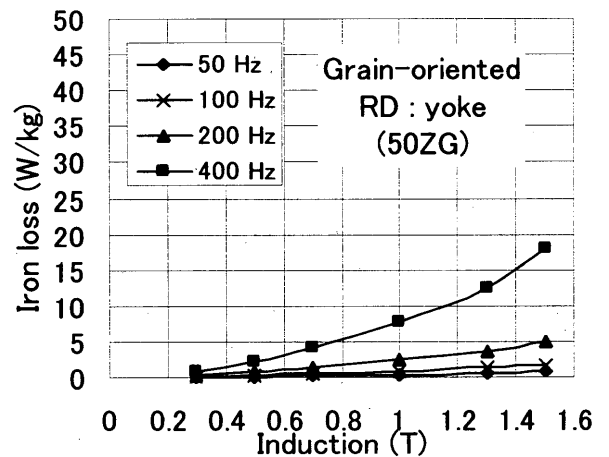


Fig. 6 Iron loss of the segment core (grain-oriented silicon steel, RD : yoke).

### 3.2 鉄損分離

得られた鉄損から、渦電流損とヒステリシス損を計算した。Fig. 8で示されるように周波数 50 Hz, 磁束密度 0.7 Tにおいて、無方向性けい素鋼板と方向性けい素鋼板 (RD : yoke) の鉄損差は大きくはないが、方向性けい素鋼板 (RD : teeth) の鉄損は大きい。

Fig. 9に示されるように、磁束密度の高い 1.5 T, 50 Hzでは無方向性けい素鋼板と方向性けい素鋼板 (RD : yoke) に大きな差が見られ、ヒステリシス損、渦電流とも差が大きい。これは方向性けい素鋼板の特徴である、圧延方向に高透磁率で低鉄損の材料特性が現れているためと考えられる。またこの条件では、(RD : teeth) のコアは 1.5 Tまで励磁出来なかった。

同様に周波数の高い 400 Hz で、鉄損の評価を Fig. 10に示す。0.7 Tにおいて、50 Hzと比較して渦電流損の割合が増加し、方向性けい素鋼板の鉄損は無方向性けい素鋼板の鉄損に近づく。一方、Fig. 11に示されるように 1.5 Tで方向性けい素鋼板は無方向性けい素鋼板より小さい値になる。

以上の結果より全体の鉄損は、低周波・高磁束密度 (50 Hz, 1.5 T) において方向性けい素鋼板の圧延方向を円周方向に平行にした場合で最も鉄損が低く、次に無方向性けい素鋼板、最後に方向性の歯と圧延方向が平行である方向性けい素鋼板が最も大きい鉄損を示す。この差は磁束密度が低く、また周波数が高くなると小さくなる。

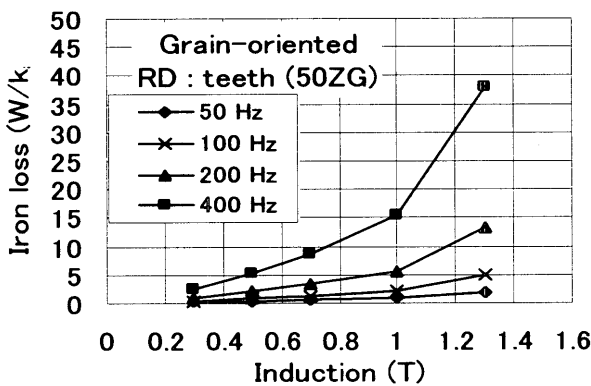


Fig. 7 Iron loss of segment core (grain-oriented silicon steel, RD : teeth).

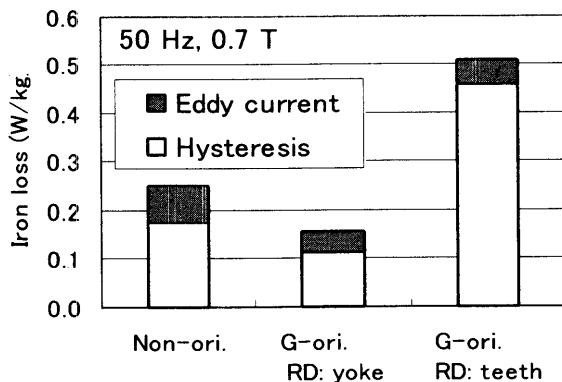


Fig. 8 Loss separation of the segment core (50 Hz, 0.7 T).

無方向性と方向性けい素鋼板の電気抵抗率はほぼ同等であり、素材特性では方向性の渦電流損失が大きい。しかし、今回の実測において、渦電流損失は方向性より無方向性の方が大きく、コア形状あるいは加工が方向性けい素鋼板素材へ影響を与えていると考えられる。

### 3.3 モデル計算

上記で得られた鉄損の結果を比較するため、モデルより鉄損を計算した。モデルは Fig. 1に示したコアをティース

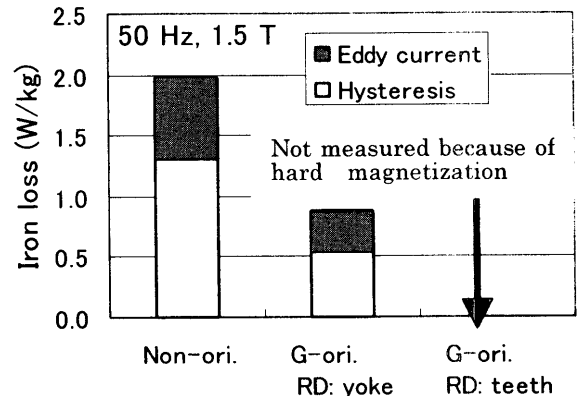


Fig. 9 Loss separation of the segment core (50 Hz, 1.5 T).

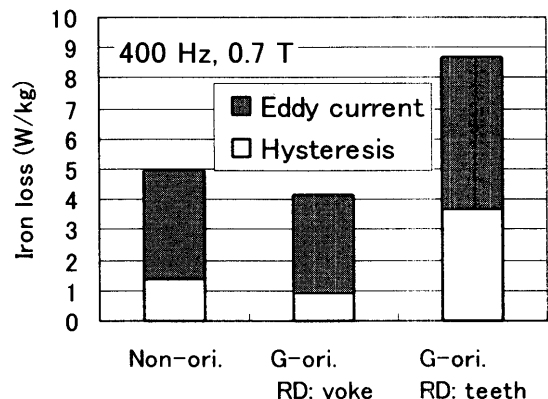


Fig. 10 Loss separation of the segment core (400 Hz, 0.7 T).

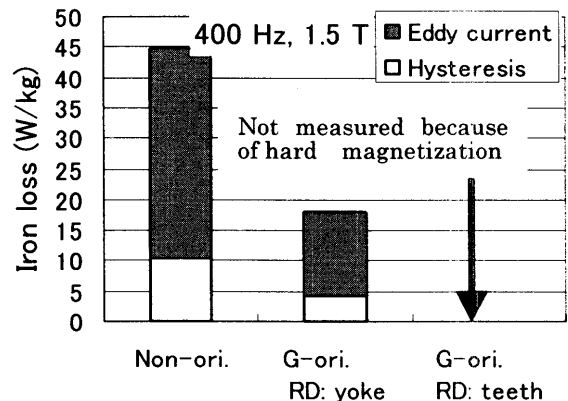


Fig. 11 Loss separation of the segment core (400 Hz, 1.5 T).

部 A とヨーク部 B-F に分け、それぞれの部位における磁束密度を測定し、Table 1 に示す結果が得られた。この結果は方向性けい素鋼板の分割コアにおいて、圧延方向を分割コア内で変えても、0.7 T において最大磁束密度の分布は大差ないことを示している。この磁束密度に基づき、JIS C 2550 のエプスタイン枠で測定した磁束密度と、鉄損曲線から得られた鉄損を計算した結果と実測値を Table 2 に示す (50 Hz, 0.7 T)。(RD : yoke) と (RD : teeth) の鉄損の差が確認できた。しかしながら全体的に計算値は実測値より高い傾向であった。これはコア内の磁束分布を大まかに 6 分割したためで、さらにコア内の詳細な磁束密度分布が得られれば、実測値に近づくものと思われる。特に、(RD : yoke) のティース部分では、ティースの幅方向に磁束が流れやすくなり、計算と実測の乖離の一因になったと考える。

### 3.4 磁区観察

上記で得られた鉄損の計算値と実測値の乖離を考察するため、磁区観察を行った。ここでは試料に電子ビームを照射し、散乱される背面散乱電子を検出して観察した<sup>4)-7)</sup>。Fig. 12 は T 型セグメントのヨーク端部の磁区模様を示している。さらに Fig. 13 において端部を拡大してみると、磁極による反磁界と剪断歪により磁区の細分化が見られる。

この磁区細分化は渦電流損の低減に寄与するので、計算値より実測値の鉄損が低い結果を裏付けている。

Table 1 Induction in each part of the core.

	A	B	C	D	E	F
RD : yoke	0.49	0.57	0.59	0.64	0.77	0.86(T)
RD : teeth	0.51	0.56	0.58	0.70	0.80	0.88(T)

Average induction in yoke = 0.7 T

Table 2 Comparison of model calculation and measurements.

	W7/50 (W/kg)	
	calculation	measurement
RD : yoke	0.36	0.16
RD : teeth	0.61	0.51

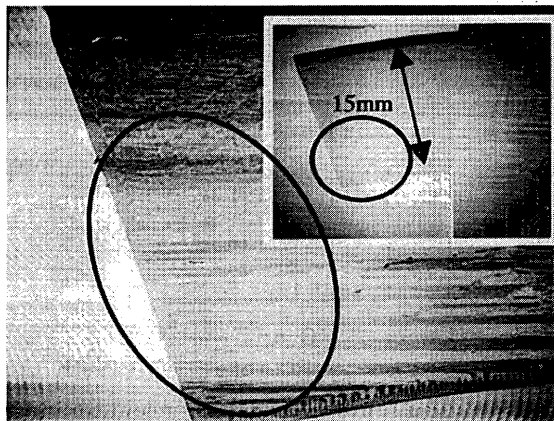


Fig. 12 Domain patterns near a segment edge.



Fig. 13 Domain refinement near a segment edge.

### 4. まとめ

無方向性けい素鋼板と方向性けい素鋼板で分割コアを製作し、鉄損を評価した。今回の実験により以下の知見が得られた。

- (1) 方向性けい素鋼板の分割コアにおいて、圧延方向を分割コア内で変えても、0.7 T において最大磁束密度の分布に大きな変化は見られなかった。
- (2) 鉄損は、方向性けい素鋼板 (RD : yoke) < 無方向性けい素鋼板 < 方向性けい素鋼板 (RD : teeth) の順で低く、磁束密度が低い場合、無方向性けい素鋼板は方向性けい素鋼板の鉄損に近づく。
- (3) 計算値より実測値の鉄損が低い原因の一つとして、セグメント端部における磁区細分化が挙げられる。

分割コアでは、材料の異方性がコア特性に大きく影響する。材料特性に着目して、今後の研究を展開する予定である。

### 文 献

- 1) T.Wakisaka, T.Kubota, and C.Kaido: *The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan*, RM-99-126, 49 (1999)(in Japanese)
- 2) H.Ogawa and K.Fukuda: *Honda R&D Technical Review*, Vol.14, No.2, 25(2002)(in Japanese)
- 3) C.Kaido: *J.Appl.Phys.* 69,(8), 5106(1991) .
- 4) D.J.Fathers, J.P.Jakubovics, D.C.Joy, D.E.Newbery, and H.Yokowitz: *Phys. Stat. Sol.*, (A),22, 609(1975).
- 5) T.Yamamoto and K.Tsuno: *Solid State Phys. of Jpn.*, 10, 23(1975).
- 6) T.Ikuta and R.Shimizu: *Phys. Stat. Sol.*, (A),23, 605(1974).
- 7) R.Shimizu, H.Maze, T.Ikuta, and M.Yabumoto, Y.Matsuo, and T.Nozawa: *J. Appl. Phys.*, 58, 1606(1985).

2003年10月22日受理, 2004年2月10日採録