JFE 技報 No. 8
（2005 年 6 月）p. 7–10

分割コアモータ用として優れた磁気性能を有する電磁鋼板とその評価

Newly Developed Grain-Oriented Electrical Steel Sheet Suitable for the Application to Segmented Core Motor

今村　猛　IMAMURA Takeshi　JFE スチール　スチール研究所　電磁鋼板研究部　主任研究員（副課長）
寺島　敬　TERASHIMA Takashi　JFE スチール　スチール研究所　電磁鋼板研究部　主任研究員（係長）
早川　康之　HAYAKAWA Yasuyuki　JFE スチール　スチール研究所　電磁鋼板研究部　主任研究員（課長）・工博

要旨

フォルステライト被膜を有しない加工性に優れた方向性電磁鋼板「JGE」を開発した。JGE は従来の方向性電磁鋼板と比較して打抜性に優れており，複雑な形状に打抜いて作製するモータ製品に適した材料である。モータの中でも分割コア型モータは，磁気特性の良好な圧延方向に磁束が集中するティース方向を揃えて打抜いたセグメントを組み合わせて作製することが可能であることから，JGE の適用が特に有利であると期待される。分割型モータのセグメントを模した T 型形状のサンプルによる磁気特性評価の結果，JGE は高級無方向性電磁鋼板「JN210」と比較して低鉄損であった。さらに，分割コア型ブラシレス DC モータを作製し，モータ評価を行った結果でも，JGE は高級無方向性電磁鋼板と比較して最大モータ効率が高く，特に高トルク，高回転数領域において高いモータ効率を示した。

Abstract:

Grain-oriented electrical steel sheet “JGE” without forsterite (Mg_2SiO_4) undercoating has been developed. Since JGE has no hard coat like forsterite, the working abilities such as the lifetime of blanking dies is superior to conventional grain-oriented steel sheet. Magnetic property test using a T-shaped sample that imitates a part of a segmented motor core shows the iron loss of JGE is remarkably low compare to high grade of non-oriented steel sheet, JN210. The maximum motor efficiency of the segmented core motor using JGE is higher than that of non-oriented steel sheet of high grade, especially in the range of higher torque and higher rotational speed.

1．緒言

環境問題への関心が地球規模で高まるなか，産業機器分野においても，エネルギーロスを削減すべく駆動を担うモータなどで高効率化が図られている。モータには，さまざまなタイプがあり固有の特徴を有しているが，最近では高効率を達成可能なブラシレス DC モータに注目が集まり，電気自動車やハイブリッド車の駆動モータとしても採用されている。さらには，従来はモータ形状をその形状のまま打抜く一体打抜が主流であったが，モータをいくつかのセグメントに分けて打抜き，最終的に組み合わせる分割型が開発された[1,2]。分割型は各セグメントに巻線を施してからコアに組み合わせるため，巻線占積率の向上や巻線径を太くすることによる銅損の低減が可能となる。さらに，各セグメントはティースとヨークから構成されており，特に磁束の集中するティース方向の磁気特性を改善すればモータ全体の性能改善に寄与すると考えられる。そのため圧延方向の磁気特性に優れた方向性電磁鋼板を用いることにより，分割型モータの高効率化が実現できると期待される。ところが，従来の方向性電磁鋼板には表面に硬質なフォルステライト被膜が存在するため，打抜金型の磨耗が激しいためにモータ用途として使用されることは稀であった。

JFE スチールでは，このような分割モータ用途に適した，加工性を大幅に改善した方向性電磁鋼板「JGE」を開発した[3,4]。この材料は，フォルステライトのような硬質被膜を有しない加工性に優れた材料であり，また圧延方向には汎用方向性電磁鋼板なみの磁気特性を有し，かつ圧延直角方向の鉄損は従来の方向性電磁鋼板と比較して大幅に改善している。本稿では，JGE を用いて分割型のブラシレス DC モータを作製し，そのモータ特性を評価した結果について述べる。

2. 材料の加工性と磁気特性

Table 1 に商用周波数 50 Hz で励磁した場合の JGE，汎用方向性電磁鋼板「JG155」，高級無方向性電磁鋼板「JN210」の鉄損および磁束密度を示す。表中の $W_{10/50}$ は 50 Hz の周波数で測定試料を 1.0 T に励磁したときの鉄損を表しており，B_8 は磁化力 800 A/m で測定試料を励磁したときの磁束密度を表している。また，磁気測定方向は圧延方向を RD(rolling direction)，圧延直角方向を TD(transverse direction)で示した。測定した供試材の板厚はすべて 0.35 mm である。JGE の圧延方向(RD)における鉄損および磁束密度は JG155 と比較してほぼ同程度であるが，JN210 と比較すると極めて優れている。また圧延直角方向(TD)においては，JGE の鉄損が JG155 と比較して極めて優れており，さらに低磁束密度(1.0 T)で励磁した場合の鉄損($W_{10/50}$)は JN210 に近い値である。高周波での磁気特性は JGE の優位性が際立つ結果となり，**Table 2** に示すように 400 Hz，5 000 Hz での鉄損は JGE が最小である。JGE が高周波における磁気特性が優れているのは，フォルステライト被膜が存在しないことに起因して表面の平滑性が良好であること，二次再結晶粒の中に粒径数百 μm の微細な粒が存在して，局所的な磁区細分化が生じていることが原因であると考えられる[3)]。

JGE は従来の方向性電磁鋼板に備わる硬質のフォルステライト被膜を有していないことから，打抜加工性に優れている。打抜加工性を評価するため，試料を円形に打抜き，一定の試料かえり高さ(50 μm)になるまでの打抜回数を調査したところ，JGE は硬質のフォルステライト被膜を有する汎用方向性電磁鋼板と比較して約 10 倍の打抜回数を示し，打抜性が良好であることが示された[3)]。

Table 1　Magnetic properties of samples at 50 Hz frequency

Specimen	Direction	Iron loss		Magnetic flux density	
		$W_{10/50}$ (W/kg)	$W_{15/50}$ (W/kg)	B_8 (T)	B_{50} (T)
JGE	RD	0.51	1.24	1.79	1.95
	TD	1.14	2.89	1.35	1.55
JG155	RD	0.41	1.02	1.83	1.97
	TD	1.57	3.58	1.38	1.47
JN210	RD	0.85	1.86	1.52	1.69
	TD	1.04	2.06	1.46	1.64

Table 2　Magnetic properties of samples at high frequencies

Specimen	Direction	Iron loss	
		$W_{10/400}$ (W/kg)	$W_{1/5\,000}$ (W/kg)
JGE	RD	11.4	11.2
JG155	RD	12.9	14.4
JN210	RD	14.5	11.9

このような方向性電磁鋼板の打抜性における不利な点は，従来の方向性電磁鋼板の主用途である大型の変圧器を作製する際には大きな問題とはならなかったが，モータコアのように複雑な形状に打抜いて作製する場合には極めて重要な必要特性であることから，それらの特性が良好な JGE はモータに適した材料であると言える。

3. T 型サンプルを用いた磁気特性評価

分割型ブラシレス DC モータのステータコアは，T 型をしたセグメントを円形に並べた構造であり，T 型の横方向がステータコアのヨーク部，縦方向がティース部を形成する。製品の開発段階においては，開発素材のモータ特性を迅速かつ簡便な方法で行うことが必要となることから，分割モータコアの磁気特性を見積もるべく，T 型の形状をしたサンプルで磁気特性評価を行った。本稿では便宜上，分割コアにおける部位と対応させるため，T 型サンプルの横方向をヨーク，縦方向をティースと称す。

T 型サンプルの磁気特性評価は，**Fig. 1** に示す実験装置を用いて行った。サンプルの 3 つの端部それぞれに励磁コイルを取り付け，独立して励磁できる設計である。励磁パターンは，実際の分割モータの励磁状態を測定して，得られたパターンを本実験で適用した。サンプル形状は，ティース，ヨークともに幅 30 mm，長さ 100 mm である。供試材は JGE と JN210 を採用した。JGE は磁気特性の優れた圧延方向をサンプルのティース方向に揃えている。

Fig. 2 に T 型サンプルでの鉄損測定結果を示す。JGE は高級無方向性電磁鋼板の JN210 と比較して約 8 割と鉄損が

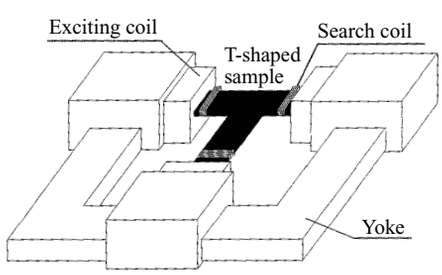

Fig. 1　Experimental apparatus

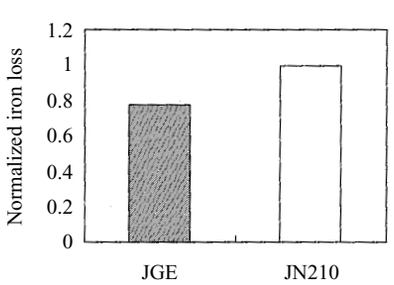

Fig. 2　Normalized iron losses of T-shaped samples made of JGE and JN210

大幅に低く，分割モータコアを模した磁気測定結果においては，JGE が優れていることが分かる。

さらに，探針法[5]を用い，T 型サンプルの局所磁気特性および局所励磁状態を調査した。測定箇所は **Fig. 3** に示す 6 ヶ所(No. 1 ～ 6)であり，その箇所での鉄損測定結果を **Table 3** に示す。どの箇所においても JGE は JN210 よりも鉄損が低かった。**Fig. 4** に本測定で得られた No. 2(ティース部)と No. 4(接合部)における各方向の最大磁束密度を表した局所磁束密度軌跡を示す。No. 2 では局所磁束密度軌跡が JGE と JN210 とでほぼ同じ大きさであり，ティース方向に伸長した形状である。No. 2 での局所鉄損に差が生じたのは，ティース方向は鋼板の RD 方向であり，Table 1 で示したように JGE は JN210 よりも RD 方向の鉄損が大幅に低いことが原因であると考えられる。No. 4 では JGE の局所磁束密度軌跡が JN210 に比べて小さく，かつ JGE はひし形をなしているのに対し，JN210 は長方形をなしている。このことは，JGE はティース方向とヨーク方向に主として磁束が流れるが，JN210 はティース - ヨーク間の方向(45° 方向)にも多くの磁束が流れることを意味している。したがって，JN210 の場合は磁束量に比例して鉄損が増大し，JGE の局所鉄損よりも大幅に高くなったと考えられる。JGE が 45° 方向に磁束が流れ難いのは鋼板が Goss 方位粒によって占められており，45° 方向は磁化困難軸である＜111＞軸が集積している方向に近いためであると考えられる。

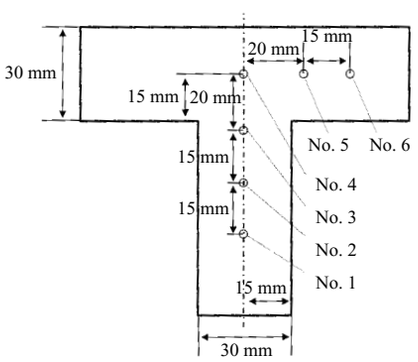

Fig. 3　Illustration of the measured points on a T-shaped sample

Table 3　Magnetic properties of samples at high frequencies

Specimen	Local iron loss (W/kg)					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
JGE	3.5	3.59	2.17	1.24	1.69	1.63
JN210	5.39	5.35	4.27	2.78	2.63	1.94

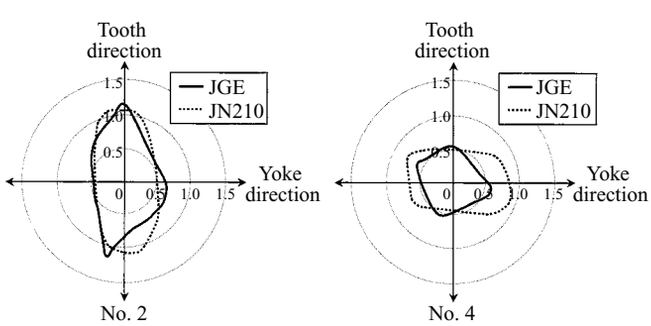

Fig. 4　Illustrations of the local flux distributions on JGE and JN210

4.　分割コアモータ特性評価

近年，環境問題への対応として電気自動車やハイブリッド車の開発に拍車がかかっているが，日本においてはこれらの駆動系を担うモータはブラシレス DC モータが主流となっている[6~8]。そこで，本測定においてもブラシレス DC モータタイプの分割コアを用いて評価を行った。**Photo 1** に本実験で使用したモデルモータ測定装置，ブラシレス DC モータの仕様を **Table 4** に示す。定格出力は 300 W，ロータは希土類磁石表面型(8 極)である。テストモータの駆動電圧を PWM パルス幅によって調整し，一定の無負荷回転数に設定した後，負荷モータによりトルクを印加して回転数スイープによりモータ特性を測定した。モータ特性としては，モータ効率とトルク - 回転数特性を測定した。また，供試材は JGE と JN210 とした。

Fig. 5 に最大モータ効率の測定結果を示す。この結果から，JGE は JN210 よりも最大モータ効率が高いことが分かる。**Fig. 6** にトルクおよび回転数を変化させて得られたモータ効率マップを示す。JGE は JN210 と比較して効率の高い領域が広範囲に広がっており，特に高回転数側でその差が顕著である。**Fig. 7** に回転数が 1 500 rpm でのトルク-モータ効率曲線を示す。これより，JGE は 2.3 Nm 以上の高トルク側で JN210 よりも高効率であることが分かる。

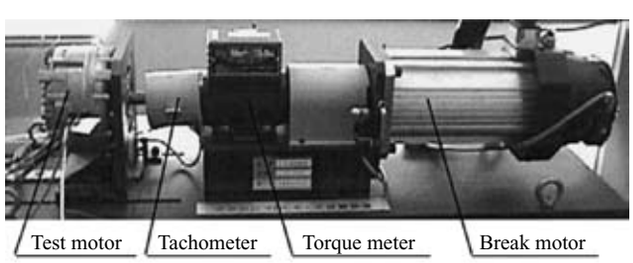

Photo 1　Model motor testing machine

Table 4　Specifications of tested brushless DC motor

Motor type	Surface permanent magnet type brushless DC motor
Rated power	300 W
Input voltage	48 V (DC)
Stator dimensions	ϕ140 (OD) × ϕ84 (ID) × 66 (H) mm
Number of slots	12
Rotor dimensions	ϕ83 (OD) × 66 (H) mm
Number of poles	8

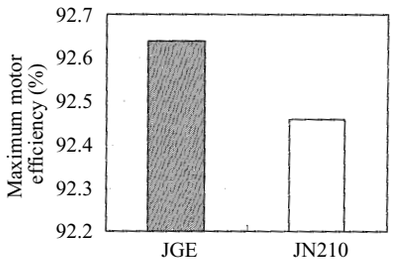

Fig. 5　Maximum motor efficiency of the model motor made of JGE and JN210

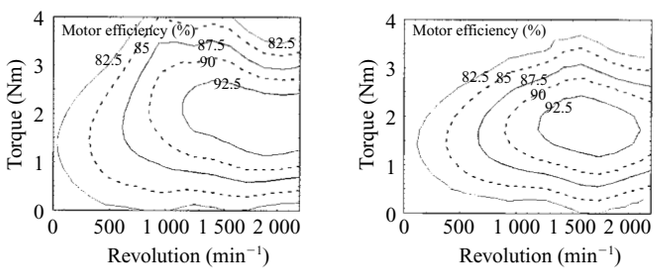

Fig. 6　Motor efficiency maps obtained from the model motor measurement

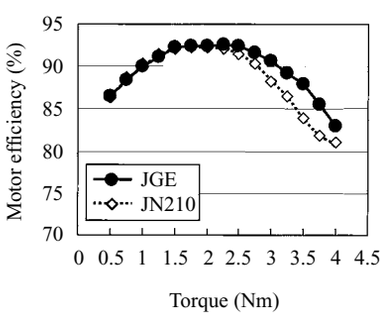

Fig. 7　Torque dependence of the motor efficiency at 1 500 rpm revolution

以上の結果から，JGE はブラシレス DC モータに多く使用されている高級無方向性電磁鋼板と比較しても高トルク・高回転数領域で優れたモータ効率が得られ，分割型モータ用途として適した材料であると言える。

5. 結言

新規に開発した方向性電磁鋼板(JGE)の T 型サンプル磁性評価およびモータ特性評価を行い，以下の知見を得た。

(1) T 型サンプルによる磁気特性評価を行い，JGE は JN210 と比較して鉄損が低い。これは，JGE は Goss 方位粒でありティース方向とヨーク方向にのみ効率的に磁束が流れるが，JN210 はそれ以外の方向にも磁束が流れることに起因する。

(2) 分割型でブラシレス DC モータを作製し，そのモータ特性を評価したところ，JGE は JN210 と比較して最大モータ効率が高くかつ広いトルク - 回転数領域で高効率を達成している。

参考文献

1) 福田幸一，藤村章，斉藤政昭，角田和彦，瀧口士郎．Honda R&D Technical Review．vol. 11，no. 2，1999，p. 1.
2) 三宅展明．三菱電機技報．vol. 76，no. 6，2002，p. 426.
3) 早川康之，今村猛，平嶋浩一．川崎製鉄技報．vol. 35，no. 1，2003，p. 11.
4) 河野雅昭，千田邦浩，早川康之．川崎製鉄技報．vol. 35，no. 1，2003，p. 1.
5) 千田邦浩，石田昌義，小松原道郎．川崎製鉄技報．vol. 29，no. 3，1997，p. 159.
6) 近藤康宏．“未来自動車のゆくえ”．日本金属学会セミナーテキスト．1998，p. 37.
7) 阿部眞一．特殊鋼．vol. 51，no. 5，2002，p. 7.
8) 松木正人，若城輝男，神山敏宏，佐藤利行，賀来嘉昭，神田正浩．Honda R&D Technical Review．vol. 14，no. 1，2002，p. 39.

今村　猛

寺島　敬

早川　康之