

# 自動車の電動化・高機能化に貢献する電磁鋼板 電動機・発電機用および高周波リアクトル用の鉄心材料

## Electrical Steels for Advanced Automobiles

### —Core Materials for Motors, Generators, and High-frequency Reactors—

千田 邦浩 SENDA Kunhiro 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)  
浪川 操 NAMIKAWA Misao 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)  
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

急速に進行しつつある自動車の電動化に対応した電磁鋼板の開発と最適利用技術の確立を目的として、モデルモータ測定やモータ局所磁気測定、モデルトランス測定などの手法を用いて鉄心材料の実機特性を調査した。モデルモータでの測定結果から得られた知見に基づき、自動車用途に適した無方向性電磁鋼板として、高磁束密度・低鉄損が特徴の「JNE」や高周波鉄損が低いことを特徴とする「JNEH」を開発した。また、分割タイプの鉄心に適した方向性電磁鋼板として、圧延方向以外の方向の鉄損が従来の方向性電磁鋼板よりも低い「JGE」を開発した。高周波リアクトル用途として、6.5%のSi含有によって低騒音と400 Hz-10 kHz程度の領域で低損失を実現する「JFE スーパーコア JNEX」、あるいはSiの板厚方向の傾斜分布によって5 kHz-100 kHzの高周波領域での鉄損を低くした「JFE スーパーコア JNHF」を開発した。

#### Abstract:

Performance of core steels has been investigated using several developed techniques such as model motor measurement, local measurement in a motor core and model transformer measurement in order to develop electrical steels suited to the electrification in automobiles. From the results obtained in the model motors, non-oriented electrical steel “JNE” with high flux density and low iron loss, and “JNEH” with low iron loss at high frequencies were newly developed for automotive motor application. For segment type motor cores, grain-oriented electrical steel “JGE” with low iron loss in the directions of the rolling direction has been developed. For high frequency reactor usage, “JFE Super Core JNEX” having 6.5%Si content has demonstrated low noise and low core loss at high frequencies such as from 400 Hz to 10 kHz. “JFE Super Core JNHF” has demonstrated low core loss at very high frequencies such as from 5 kHz to 100 kHz.

#### 1. はじめに

従来、自動車の電気エネルギー利用機器として、オルタネータ、点火装置、始動装置、前照灯、計器類、ワイパーモータなど小型モータなどの電装品が一般的であったのに対し、近年は安全性・快適性の追求や燃費向上の観点から自動車各部でのモータの使用頻度が高まっており、電動スロットルバルブや電動パワーステアリング、電動カーエアコンなどが実用化段階にある。加えて、CO<sub>2</sub>排出量削減・燃費向上の観点から、電気自動車(EV)、ハイブリッド電気自動車(HEV)、燃料電池自動車(FCV)といった駆動力として電気エネルギーを利用する自動車も急速に進歩している。また、電磁バルブや各種のバイ・ワイヤ技術が開発過程にある。このように、電気エネルギーが自動車の

消費エネルギーに占める割合はますます増加すると予想される。

自動車での電気エネルギー利用機器の主要部分である電動機、発電機やリアクトルは、電気・機械エネルギー間の変換や電力変換の際に電気エネルギーをいったん磁気エネルギーとするために鉄心(磁芯)を必要とする。このような鉄心用の材料として、電磁鋼板はその使用頻度の高さの点で最も重要な磁性材料と言える。近年の地球環境保護に対する機運の高まりと自動車の高級化のニーズに対応するためには、電磁鋼板の低損失化・高機能化は必須の課題である。このためJFE スチールでは、自動車用途を念頭においた実機特性評価とこの結果に基づいた材料開発を行っている。

本稿では、自動車用の鉄心材料として用いられる電磁鋼板に望まれる諸特性を明らかにするための実機特性評価

技術について紹介し、続いて自動車用途に適した各種電磁鋼板製品について述べる。

## 2. 各種評価技術

### 2.1 モデルモータ評価

モータ実機での電磁鋼板への要求特性を明らかにするためにモデルモータを用いて素材磁気特性と実機特性の対応関係の調査を行った<sup>1,2)</sup>。ここでは、国内で電気自動車の駆動モータや電動パワーステアリング用モータとして多く利用されているブラシレス DC (BLDC) モータと米国・欧州で電気自動車の駆動モータとして検討例の多い誘導モータについて調査した。試験に用いた BLDC モータは駆動電圧 48 V、定格 300 W、8 極 12 スロットの表面磁石型 (希土類磁石) とし、誘導モータは駆動電圧 120 V、定格 400 W、3 相 6 極 36 スロットとした。この調査では、種々のグレードの電磁鋼板から作製した固定子を準備し、打抜き・かしめ後にひずみ取り焼鈍を施し、測定に供した。測定は上記の駆動電圧で無負荷回転させた状態からトルクを徐々に増加させながら行い、最大効率点を求めた。この BLDC モータでは無負荷回転数 2 100 rpm に対し、最大効率回転数は約 1 500 rpm であった。一方、誘導モータでは無負荷回転数 2 400 rpm に対し、最大効率回転数は 2 300 rpm であった。試験した BLDC モータおよび誘導モータの最大効率回転数での基本周波数はそれぞれ 100 Hz、120 Hz となる。

Fig. 1 に BLDC モータ、誘導モータの最大効率に及ぼす素材鉄損の影響を示す。BLDC モータでは電磁鋼板の鉄損特性として一般的に用いられてきた  $W_{15/50}$  よりも 400 Hz での鉄損値  $W_{10/400}$  が最大効率と良い相関を示した<sup>1)</sup>。この結果から、BLDC モータでは基本周波数よりも高い周波数での鉄損がモータ効率向上のために重要であることが判明した。この原因としては磁束密度波形の高次成分の影響が予想される<sup>1)</sup>。

誘導モータでは最大効率に対して素材鉄損  $W_{15/50}$  と磁束密度  $B_{50}$  の両者が影響する。電磁鋼板の低鉄損化によりモータ効率は向上するものの、 $B_{50}$  の向上が鉄損改善と同等の効果を有しており、低鉄損のみを追求した鉄心素材は

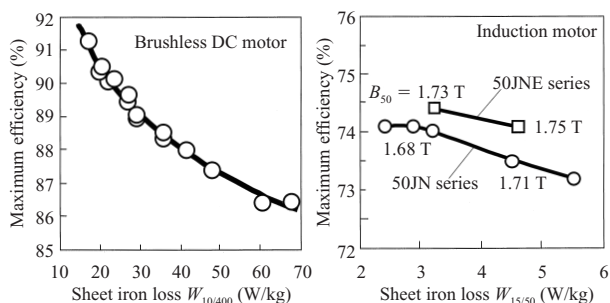


Fig. 1 Dependence of maximum efficiency on sheet iron loss

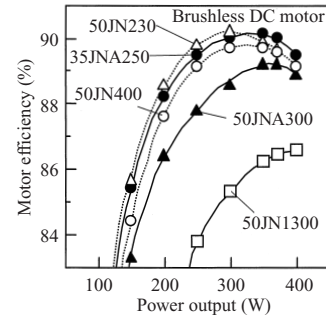


Fig. 2 Dependence of motor efficiency on power output

Table 1 Magnetic properties of stator core materials used

	$W_{15/50}$ (W/kg)	$B_{50}$ (T)
35JNA250	2.36	1.72
50JNA300	2.63	1.72
50JN230	2.16	1.67
50JN400	2.86	1.71
50JN1300	5.16	1.77

Test made on 25 cm Epstein sample(L + C)  
after stress relief annealing at 750°C for 2 h in  $N_2$

必ずしも誘導モータには適さないことを示している。これら BLDC モータと誘導モータの違いは、BLDC モータでは損失の多くを鉄損が占めるのに対し、誘導モータでは銅損の比率が大きく、 $B_{50}$  向上により励磁電流値が抑制され銅損が低下することに起因している<sup>2)</sup>。

Fig. 2 に BLDC モータの効率に及ぼす出力の影響を示す。Table 1 に固定子として用いた材料のひずみ取り焼鈍後の磁気特性を示す。低鉄損の材料ほど最大効率が高いものの、高出力域では磁束密度  $B_{50}$  の高い材料の方が高いモータ効率を示している。同様の傾向は誘導モータでも確認された。

以上の結果から、BLDC モータの効率には鉄損の寄与が大きく、基本周波数よりも高い (上記結果では 4 倍程度) 周波数域での鉄損低減が有効であることが明らかになった。一方、誘導モータでは基本周波数程度での鉄損低減とともに磁束密度  $B_{50}$  の向上が高効率化へ大きく寄与していることが判明した。また、高出力域での効率向上のためには高磁束密度材が有利となることも明らかとなった。電気自動車やハイブリッド電気自動車用の駆動モータはさまざまな走行状態での高効率を要求されるため、使用される出力領域を考慮した鉄心材料の選択が重要と言える。

### 2.2 モータ局所磁気測定

モータの鉄心内部での局所的な磁気特性の分布を明らかにし、最適なコア形状と材料選択の指針を得ることを目的として固定子鉄心内部の局所磁気特性の測定技術を開発し、BLDC モータと誘導モータに対して測定を行った。Fig. 3 に探針法とホール素子を用いた局所磁気測定法の模式図を示す。この方法により測定されるのは固定子の最上

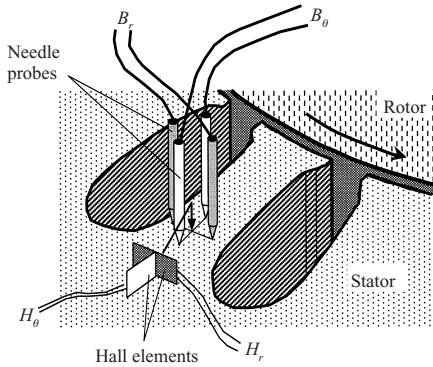


Fig. 3 Schematic view of local magnetic measurement in a stator core

部にある鋼板の磁気量である。

BLDC モータは前節で述べたモータと同じ形式とし、鉄心材料は当社製品の「35JNE300」とした。誘導モータには、駆動電圧 100 V、周波数 60 Hz、単相 2 極 24 スロットのモータを使用し、鉄心材料は当社製品の「50JN400」とした。いずれもティース部にプローブを挿入するために巻線を嵩上げた状態で測定を行った。

Fig. 4 に BLDC モータの径方向および周方向の局所磁束密度および磁界の分布を示す<sup>3)</sup>。局所の磁束密度、磁界の径、周方向成分について、時間的な変化での最大値をそれぞれ、 $B_{rm}$ ,  $B_{\theta m}$ ,  $H_{rm}$ ,  $H_{\theta m}$  とした。径方向の磁束密度はティース部とティースの付け根付近で高く、周方向の磁束密度はヨークとティースの先端部で大きいことが分かる。このような分布は電磁界解析による計算から導かれる結果とおおむね一致した。ただし、ヨーク内部で認められた不均一な磁束密度分布は電磁界解析では予測できない結果であった。

周方向の磁界成分はティース先端で高く、特に、回転し

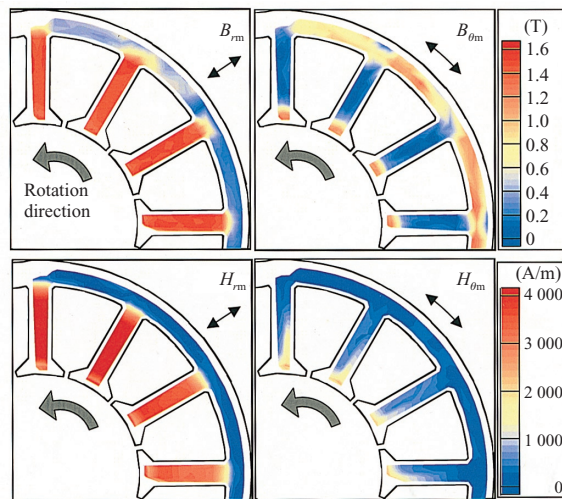


Fig. 4 Distribution of local magnetic property in stator core of brushless DC motor

てくるロータと先に出会う側で高い値を示した。この点も磁界解析での結果と異なる分布として特筆される。

以上の測定結果から、電磁界解析による計算から予測されるよりも大きな回転鉄損や磁束の不均一性による鉄損増加が生じている可能性が示唆される。

Fig. 5, 6 には誘導モータでの局所磁束密度、局所磁界、局所鉄損の分布を示す。磁束密度の径方向成分はティース部で最も高く、高磁束密度部分はヨーク部内側のティース付け根付近にも分布する。また、磁界の径方向成分は特にティース先端部で高い。局所鉄損は径方向の磁束密度と磁界の分布を反映し、ティース部とヨークの内側部分で高く、特にティース先端部で大きな鉄損が発生する<sup>4,5)</sup>。

以上の結果から、BLDC モータと誘導モータにおいても磁束密度、鉄損が最も高いのはティース部であり、ティースの付け根付近でも磁束密度・鉄損がやや高いことが明らかになった。この結果から、ティース部の磁気特性を重視した材料選択とモータ設計により、モータ効率・性能の向上が可能と予想される。

今後、本法による局所磁気測定結果と電磁界解析による計算を比較し、両者の差異の原因を明らかとすることで、モータ特性の予測精度の向上が可能と期待される。

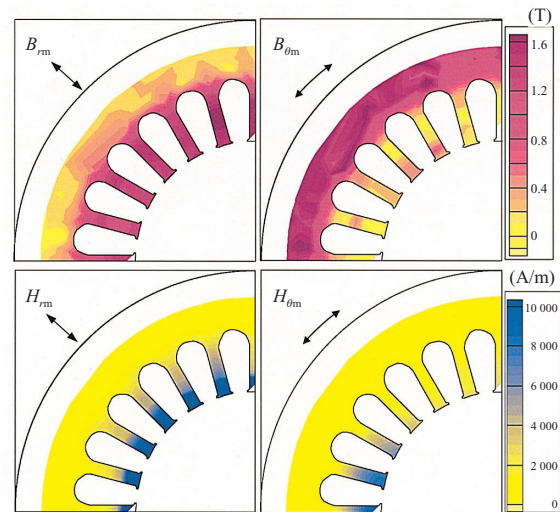


Fig. 5 Distribution of local magnetic property in stator core of induction motor

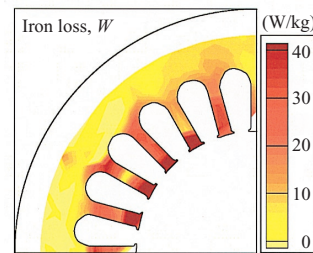


Fig. 6 Distribution of local iron loss in stator core of induction motor

### 3. 電動機・発電機用鉄心に適した電磁鋼板

#### 3.1 高効率電磁鋼板

広い出力域での高効率を要求される自動車用モータでは、前章でのモデルモータによる実験結果から、モータ形式に適合した周波数域の鉄損低減と磁束密度  $B_{50}$  の向上が重要であると言える。このような観点から、当社では、従来の JIS グレード製品群と同等の鉄損を保ちながら高い磁束密度  $B_{50}$  を実現した製品群として「JNE シリーズ」、「JNP シリーズ」、「JNA シリーズ」を開発している。また、高周波域での低鉄損を重視した薄物材として「JNEH シリーズ」がある。Fig. 7 に製品の鉄損 ( $W_{15/50}$  および  $W_{10/400}$ ) と  $B_{50}$  の関係を示す。以下各製品の概略を説明する。

##### (1) JNE シリーズ

介在物と集合組織の制御により低鉄損・高磁束密度を達成した材料である。最高級品の 35JNE230 は  $W_{15/50} \leq 2.3 \text{ W/kg}$ ,  $B_{50} \geq 1.67 \text{ T}$  を達成しながら、打抜き性の劣化原因である硬度を  $HV \leq 200$  としている。

##### (2) JNP シリーズ

JFE スチールのラインナップ中最も  $B_{50}$  の高い製品群であり、中でも 50JNP1 は  $B_{50} \geq 1.77 \text{ T}$  としながら、 $W_{15/50} \leq 8.0 \text{ W/kg}$  を達成している。

##### (3) JNA シリーズ

磁束密度  $B_{50}$  を確保しながら、お客様でのひずみ取り焼鈍後の鉄損低減を追求した材料であり、介在物制

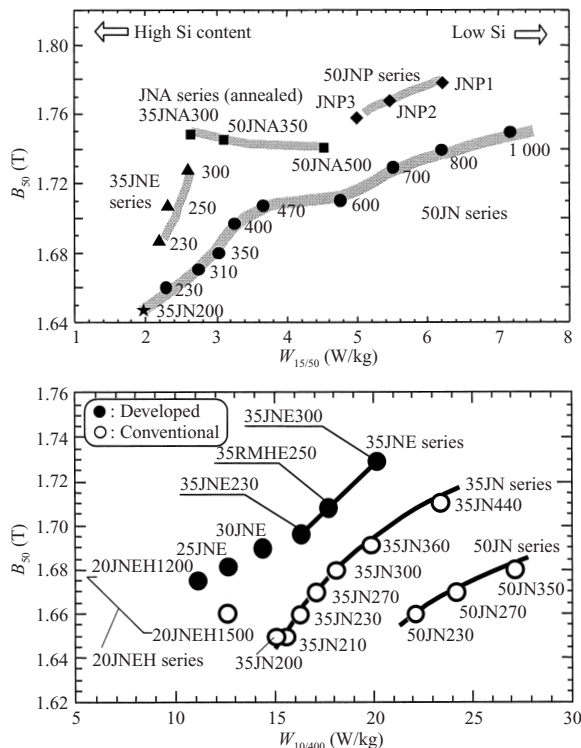


Fig. 7 Maps of electrical steel products of JFE steel

御による結晶粒成長性の改善を主要技術としている。

50JNA600 ( $W_{15/50} \leq 6.0 \text{ W/kg}$ ) から 35JNA300 ( $W_{15/50} \leq 3.0 \text{ W/kg}$ ) まで種々の製品を取り揃えている。

##### (4) JNEH シリーズ

高周波域での鉄損に優れた材料であり、最高級品の 20JNEH1 200 は  $W_{10/400} \leq 12.0 \text{ W/kg}$  である。高速回転域の効率が重視される自動車用のモータ材料として適している。

#### 3.2 分割コア用方向性電磁鋼板「JGE」

前章のモータ局所磁気測定結果から、BLDC モータ、誘導モータいずれもティース部で磁束密度・鉄損が高いことが明らかとなった。そこで、方向性電磁鋼板 (GO) のような一方に透磁率の高い材料を分割コアとして固定子に適用する方法が、高トルク・高効率のために有効と考えられる。しかしながら、多くの分割コア構造<sup>6,7)</sup> においては圧延方向以外の磁束成分が発生することが避けられないため、ティース付け根付近で鉄損が増加して所望の特性が得られない懸念がある。また、通常 GO 材は表面にセラミック質の被膜を有しているため、打抜き加工で鉄心を製造する場合に金型の摩耗が顕著であり、高い生産性が得られないという問題がある。そこで、圧延直角方向の鉄損特性が良好であるとともに打抜き性を改善した方向性電磁鋼板 JGE を開発した<sup>8)</sup>。Fig. 8 に切出し角度に対する鉄損特性を JGE と通常の安価 GO 材 (CGO) について示す。JGE の圧延方向の鉄損は CGO 材より若干劣るものの、切出し角度がずれた場合の鉄損値は CGO 材に比べて大きく低下している。このような特性から、JGE は圧延方向をティース方向として用いることにより分割タイプの鉄心

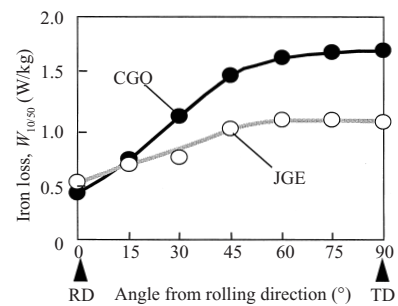


Fig. 8 Dependence of iron loss on angle from rolling direction

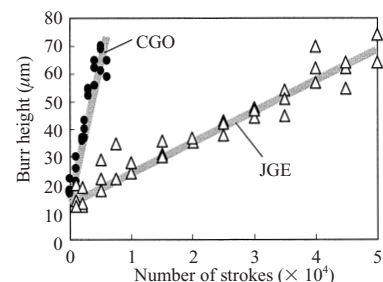


Fig. 9 Change in burr height with number of punching

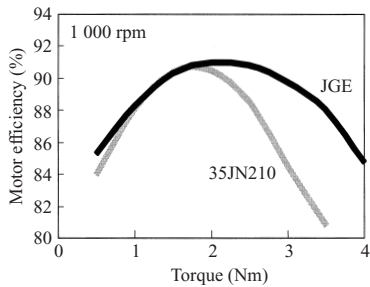


Fig. 10 Dependence of motor efficiency on torque

に適した材料と言える。Fig. 9 に CGO 材との打抜き性の比較を示す。CGO 材に比べて JGE はかえり高さの増加が抑えられており、このレベルは同一 Si 量の無方向性電磁鋼板と同等である。

Fig. 10 に無方向性電磁鋼板および JGE によりモデルモータ (BLDC モータ) を作製し、効率を比較した結果を示す。特に高出力域で JGE の効率が高く、JGE を分割コアとして適用することの有用性が確認された。

#### 4. リアクトルおよびイグニッションコイルに適した電磁鋼板

##### 4.1 JFE スーパーコア「JNEX」, 「JNHF」

ハイブリッド電気自動車や燃料電池自動車では電力変換のためのコンバータ / インバータを有しており、ここで用いられる鉄心材料には、小型軽量化を実現するための高周波域での低損失や静粛性実現のための低騒音といった特性が要求される。このような観点から、6.5% Si 合金をベースとした JFE スーパーコアは最適な材料であり、昇圧コンバータ用リアクトルやコンバータ / インバータのフィルター回路、電流センサなどに利用することで製品性能を大幅に向上させることが可能である。

##### (1) JNEX

Si を重量比で 6.5% 含有する無方向性電磁鋼板である。鉄・シリコン合金は Si 含有量 6.5% において透磁率が最大となるとともに磁歪がほぼゼロとなる。この極めて低い磁歪によって鉄心の磁歪振動が抑制され、低騒音化を実現する。Fig. 11 に単相の積みタイプのモデル変圧器を用いて測定した騒音の測定結果を示す<sup>9)</sup>。変圧器材料として一般的に使用されている方向性電磁鋼板に比べて発生する騒音が著しく低いことが分かる。また、磁歪がゼロであることにより、応力による磁気特性劣化を生じにくく、リアクトル鉄心が絶縁保護のため樹脂モールドされる場合などに生じる応力による特性変化が防止できる。また、高比抵抗であることにより 400 Hz-10 kHz 程度の高周波域で低鉄損が達成される。このために PWM (pulse width modulation) 制御などにより高調波が重畳されたリアクトルの低損失化が可能である<sup>10)</sup>。

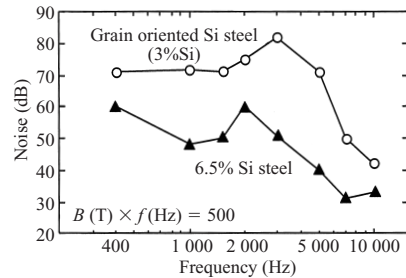
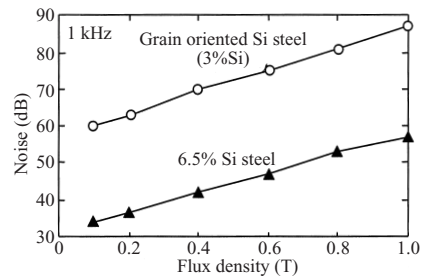


Fig. 11 Noise of model transformer

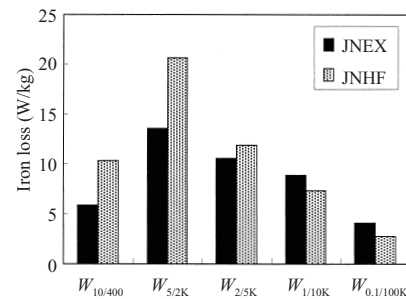


Fig. 12 Iron losses of JNEX and JNHF

さらに、モータ鉄心用途としても、多極化、高速回転化、高調波重畳などへの対応には高周波域での損失が低い JNEX が適しており、マイクロガスタービン用鉄心として JNEX が使用されている。また、次世代のモータとして期待される SRM の鉄心として適用することでモータ効率の向上が可能であることが確認されている<sup>11)</sup>。

##### (2) JNHF

JNHF は板厚の表層のみ 6.5% Si とし、板厚内部方向に Si 量が減少する傾斜型高 Si 鋼板であり<sup>12)</sup>、Fig. 12 に示すように 10 kHz 以上の高周波域で JNEX よりも低い鉄損を示す。また、Si 量の傾斜分布により、JNEX に比べて打抜き加工性に優れている。

#### 4.2 ダイレクトイグニッションコイル用方向性電磁鋼板

イグニッションコイルはエンジン燃焼室の点火に必要な高電圧を発生させる一種の変圧器で、点火プラグの放電に必要な二次電圧は一次電流の遮断時に発生する。この高い二次電圧を得るためには、一次電流による鉄心の磁気エネルギーが高く、かつ一次電流遮断時の応答性に優れること、すなわち高い磁束密度と透磁率特性に優れた方向性電

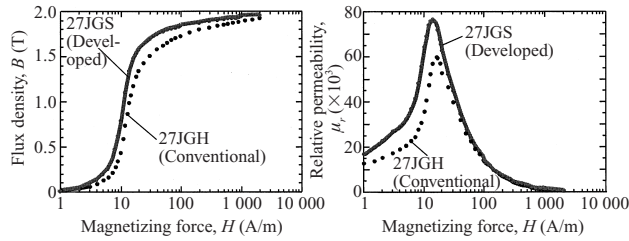


Fig. 13 Magnetization and permeability curves of 27JGS and 27JGH

磁鋼板が要求される。さらに高磁束密度化は鉄心の小型化も可能とするため、スティック型のイグニッションの小型化に直接寄与する。

JFE スチールでは、従来の方向性電磁鋼板よりさらに高磁束密度の方向性電磁鋼板「JGS」を開発し、トランス用鉄心として好評を得ている<sup>13)</sup>。代表例として 27P100 クラスにおける JGS の磁化および透磁率曲線を、従来の JGH と比較して Fig. 13 に示す。JGS は JGH に比べ  $B_8$  で 0.04 T 高い磁束密度が得られ、低磁場での透磁率にも優れる。JGS をダイレクトイグニッションの鉄心材料に適用することにより、小型化に十分寄与することが可能と考えられる。

## 5. おわりに

JFE スチールにおける電磁鋼板の実機特性評価技術を紹介し、この結果に基づいて自動車用途に適した電磁鋼板製品群について述べた。

モデルモータを用いた測定により、BLDC モータでは基本周波数より高い周波数域での電磁鋼板の鉄損低減がモータ効率向上に有利に作用すること、誘導モータでは電磁鋼板の磁束密度  $B_{50}$  がモータ効率に対して鉄損と同等の効果を有していることが明らかになった。また、いずれのモータも高出力域では磁束密度  $B_{50}$  が高い電磁鋼板の方が高効率化に有利であった。さらに、モータの局所磁気測定により、ティース部とティース・ヨークの接合部付近で磁束密度と鉄損が大きいことが明らかになった。

以上の結果より、自動車用途に適した電磁鋼板ラインナップとして、高磁束密度電磁鋼板、高周波用電磁鋼板、分割コア用方向性電磁鋼板「JGE」が上げられる。また、

リアクトル用途に適した電磁鋼板として、高 Si 電磁鋼板 JFE スーパーコア、ダイレクトイグニッションコイル用途に適した電磁鋼板として高磁束密度方向性電磁鋼板「JGS」を紹介した。

自動車における快適性の追求と地球環境問題への対応は、ますます重要度を増していくと予想され、その主たる解決手段として電気エネルギーの利用頻度は高まってくると考えられる。この流れの中で電磁鋼板の果たすべき役割は大きく、今後、実機応用時の特性を考慮したさらなる特性・性能の向上が期待される。

### 参考文献

- 1) 石田昌義, 稲永章子, 本田厚人, 大山勇. 電気学会回転機研究会資料. RM-98-147, 1998, p. 1.
- 2) 石田昌義, 志賀信勇, 河野正樹, 本田厚人, 小松原道郎, 大山勇. 日本 AEM 学会誌. vol. 7, no. 3, 1999, p. 24.
- 3) 千田邦浩, 石田昌義, 本田厚人, 大山勇. 電気学会回転機研究会資料. RM-03-42, 2003, p. 47.
- 4) 石田昌義, 本田厚人, 小松原道郎, 佐藤圭司, 大山勇. 電気学会回転機研究会資料. RM-99-22, 1999, p. 35.
- 5) 石田昌義, 志賀信勇, 千田邦浩. 電気学会マグネティクス研究会資料. MAG-02-90, 2002, p. 25.
- 6) 小川博久, 福田健児. Honda R&D Technical Review. vol. 14, no. 2, 2002, p. 25.
- 7) 川口仁. 電気学会回転機研究会資料. RM-02-147, 2002, p. 13.
- 8) 早川康之, 今村猛, 平嶋浩一. 川崎製鉄技報. vol. 35 no. 1 2003 p. 11.
- 9) 浪川操, 高田芳一. 電気学会半導体電力変換・産業電力電機応用合同研究会. SPC-98-117, IEA-98-62, 1998, p. 61.
- 10) Namikawa, M.; Ninomiya, H.; Tanaka, Y.; Nakada, Y. IEEE Transactions on Magnetics. vol. 34, no. 4, 1998, p. 1183.
- 11) 田中直輝, 長谷川匡彦, 千葉明, 深尾匡. 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集. 5-116, 2002, p. 157.
- 12) 浪川操, 高田芳一. 平成 11 年電気学会全国大会講演論文集. S. 12-7, 1999, S. 12-23.
- 13) 黒沢光正, 名村夏樹, 山田茂樹. 川崎製鉄技報. vol. 29, no. 3, 1997, p. 174-176.



千田 邦浩



浪川 操



早川 康之