

JFE スチールにおける無方向性電磁鋼板の最近の進歩

Recent Development of Non-Oriented Electrical Steel in JFE Steel

尾田 善彦 ODA Yoshihiko JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副部長)
大久保智幸 OKUBO Tomoyuki 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)
高田 正昭 TAKATA Masaaki JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 薄板商品技術部電磁室 主任部員 (課長)

要旨

JFE スチールでは、1954年に無方向性冷間圧延電磁鋼板の生産を開始して以来、種々の電磁鋼板を開発してきた。最近ではハイブリッド電気自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の駆動モータ、電動パワーステアリングモータなどの自動車補機モータ、高効率エアコン、掃除機などの家電用モータ、産業用に使用される高効率誘導モータ、水力・火力発電機に使用される大型回転機など、用途も多岐にわたっており、電磁鋼板への要求特性も多様化してきている。本稿では特徴ある製品として、高効率モータ用の JNE[®] シリーズ、高トルクモータ用の JNP[®] シリーズ、高周波モータ用の薄電磁鋼板 JNEH[®] シリーズ、高速ロータ用の高強度電磁鋼板 JNT[®] シリーズなどを紹介する。

Abstract:

Since the first production of cold rolled non-oriented electrical steel strip in 1954, JFE Steel has developed various kinds of electrical steels for use as a core material for motor applications. In recent years, the application of this material ranges from automobile usage such as hybrid electric vehicle (HEV)/electric vehicle (EV) traction motors for vehicles to appliances and other applications such as electric power steering motors, high efficiency air-conditioner compressor motors, vacuum cleaner motors, energy efficient induction motors, and hydraulic/thermal power generators. Responding to customer demands, JFE Steel has further diversified properties of cold rolled non-oriented electrical steel sheets. In this paper, we introduce distinctive products such as the JNE[®] series for energy efficient motors, the JNP[®] series for high torque motors, the JNEH[®] series for high frequency motors as well as the JNT[®] series for high speed rotors.

1. はじめに

国内の総電力消費量の内、モータは約6割を占めており¹⁾、仮にモータ効率を1%改善すると50万キロワットクラスの原発1基分の省エネルギーに相当することから、高効率モータの開発が急務となっている。

このようなモータの鉄心材料として広く使用されている無方向性電磁鋼板は、磁気エネルギーを伝達する機能材料であり、モータ効率を左右するキーマテリアルである。モータ効率は電磁鋼板の鉄損が低いほど向上し、トルクは磁束密度が高いほど向上することから、低鉄損かつ高磁束密度の電磁鋼板が求められるようになっている。また、モータ用に使用される電磁鋼板には磁気特性以外に優れた打ち抜き性、打ち抜き後の寸法精度、コーティングによる絶縁性、耐食性、優れた溶接性、厳格な板厚精度などが求められる。

JFE スチールでは、1954年に無方向性冷間圧延電磁鋼板の製造を開始した。その後、低鉄損材料として1978年に高純度化技術を活用した50RM270を、1983年には50RM250

を開発した。また、高磁束密度材料として、集合組織制御により磁束密度を高めた RP シリーズを1985年に開発した。さらに、ひずみ取り焼鈍後に高磁束密度と低鉄損が両立して得られる RMA[®] シリーズを製品化した。

1990年以降は、家電用モータの高効率化、ハイブリッド電気自動車の普及に伴い、電磁鋼板に求められるニーズも多様化してきた。JFE スチールでは、それらニーズに対応した電磁鋼板の開発をいち早く進め、高効率モータ用に磁束密度-鉄損バランスに優れた JNE[®] シリーズ、高周波モータ用に高周波鉄損の低い薄電磁鋼板 JNEH[®] シリーズ、高トルクモータ用に磁束密度の高い JNP[®] シリーズ、高速モータのロータ用に強度の高い JNT[®] シリーズを開発してきた。

本論文ではこれら電磁鋼板の特長を述べるとともに、適用例についても紹介する。

2. HEV/EV モータ用電磁鋼板

2.1 HEV/EV に求められる特性

1997年に国内で世界最初の量産型 HEV (ハイブリッド電気自動車) が発売されて以来、その生産台数は年々増大し

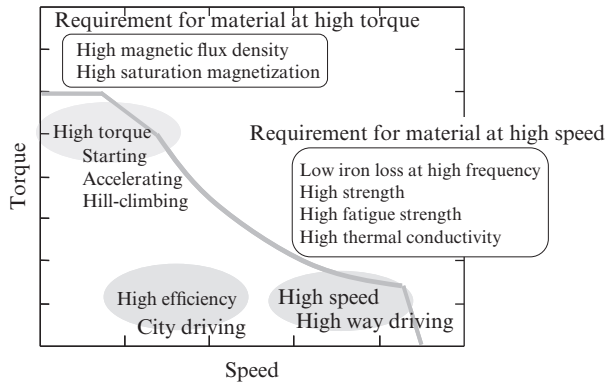


図1 ハイブリッド電気自動車 (HEV) 駆動モータと電磁鋼板に求められる特性

Fig. 1 Demands for hybrid electric vehicle (HEV) motors and core materials

ており、最近では原油価格の高騰や地球環境保護の意識の高まりから需要が一層増加している。開発当初は燃費改善の側面が強かった HEV であるが、最近では燃費だけでなく、モータの優れた応答性および初期トルクを活かし走りの楽しさを追求した HEV も開発されている。HEV の駆動モータおよびコア材料に求められる性能を図 1 に示す²⁾。発進、加速時には高トルクが必要となるため、コア材として使用される電磁鋼板には高磁束密度が要求されている。一方、モータの回転数が高くなった場合には、モータ損失に占める鉄損の割合が大きくなる。このため、高周波鉄損の低い材料が求められるとともに、発生した熱を逃がすため熱伝導率の高いことも必要となる。さらに、磁石をロータのスロットに挿入している内部磁石型 (IPM) モータでは、磁石の飛散を防止するため、電磁鋼板には高強度、高疲労強度が求められる。

このように電磁鋼板にはさまざまな特性が要求されているが、これらすべての要求特性を一種類の電磁鋼板で満たすことは困難であるため、モータの要求性能の度合いに応じて各種の電磁鋼板が使い分けられている。本章では、磁束密度と鉄損バランスに優れた高効率モータ用電磁鋼板、高周波鉄損の低い薄電磁鋼板、高トルクモータ用の高磁束密度電磁鋼板および高強度電磁鋼板の特性について紹介する。

2.2 高効率モータ用電磁鋼板「JNE®」

HEV/EV (ハイブリッド電気自動車 / 電気自動車) の駆動モータコア材にはモータ高効率化のための低鉄損および小型化、高トルク化のための高磁束密度が要求されている。電磁鋼板の鉄損低減のためには、固有抵抗増大と磁気異方性低減の観点から Si 添加が有効であり、高グレードの電磁鋼板には Si が 3% 程度添加されている。一方、Si は非磁性元素であることから、飽和磁化の低下により磁束密度が低くなる。このため、従来の Si 添加の手法では磁束密度 - 鉄損特性の両者に優れた材料の製造は困難であった。これに対し、Si、Al などの合金添加量を適正化するとともに、磁気

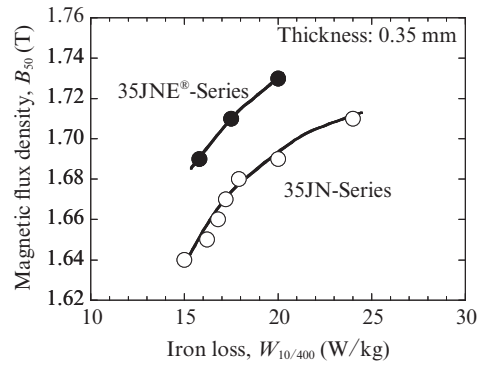


図2 高効率モータ用電磁鋼板の磁気特性

Fig. 2 Magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets for energy efficient motor

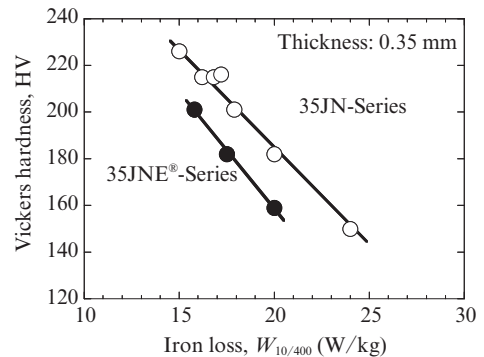


図3 高効率モータ用電磁鋼板の硬度 - 鉄損バランス

Fig. 3 Vickers hardness of non-oriented electrical steel sheets for energy efficient motor

特性に好ましい (100), (110) 集合組織を増加させ、さらに鋼中不純物を低減する試みがなされてきた^{3,4)}。

図 2 に JNE® シリーズの磁束密度 - 鉄損バランスを従来材である JN シリーズと比較して示す²⁾。JNE シリーズは、従来材に比べ磁束密度 - 鉄損バランスが優れており、モータの高効率化に大きく寄与できる。図 3 に JNE シリーズの硬度を示す。JNE シリーズは同一鉄損の JN シリーズと比べると硬度が低く、打ち抜き時の金型損耗を抑制できるメリットがある。

このように、JNE シリーズはモータの高効率化に寄与できるだけでなく、生産性の観点でのメリットもあることから既に市販の HEV などに広く使用されている。

2.3 高トルクモータ用電磁鋼板「JNP®」

HEV/EV の駆動モータでは発進時、登坂時、加速時に大きなトルクが要求される。このため、鉄心材として使用される電磁鋼板にはより一層の磁束密度向上が望まれている。このような背景から、従来材よりも磁束密度の高い JNP® シリーズを開発した⁵⁾。開発材の磁束密度 - 鉄損バランスを図 4 に示す。JNP シリーズは JNE® シリーズと比べて、同一鉄

損での磁束密度が約 0.02 T 程度向上している。

この JNP シリーズは、集合組織制御による高磁束密度化を目的として、Si, Al, Mn などの合金添加量を適正化するとともに、粒界偏析元素の活用や中間工程の最適化技術などを適用している。

開発材は磁束密度が高いことから、特に高トルクが要求される HEV/EV のモータコア材として有望であると考えられ、既に市販の HEV モータに採用されている。

本材料は磁束密度が高いことから、高トルクが要求されるモータに適していると考えられるが、そのような高トルクが要求される EV モータとしてダイレクトドライブのインホイールモータがある⁶⁾。本方式では車内空間が広く利用できるとともに、電池の収納スペースを座席下に確保するというような設計の自由度も広がるというメリットがあり、特に小型車には有望な駆動方式と考えられる。

ダイレクトドライブのモータではギヤを介さずに直接タイヤを回転させるため、モータには高トルクが求められる。また、ギヤを用いて高速で回転させるモータに比べ、回転数が低いためモータ損失に占める鉄損の比率が低いという特長がある。これらのことから、ダイレクトドライブモータ用の電磁鋼板に対しては、低鉄損よりも高磁束密度が強く求められることとなる。

ダイレクトドライブモータにおける開発材の優位性を確認するため、出力 1.6 kW の IPM タイプのインホイールモータを作製し、モータ特性を評価した。図 5 にモータ回転数 1250 r/min (車速 60 km/h 相当) でのモータ効率とトルクを示す⁵⁾。これより、35JNP5 は比較材として用いた 35JN250 に比ベトルク、効率ともに向上しており、ダイレクトドライブモータなどの高トルクモータのコア材として適しているといえる。

2.4 高周波用薄電磁鋼板「JNEH®」

HEV モータは、今後、小型化の観点から最高回転数の増加が予想され⁷⁾、コア材料として使用されている電磁鋼板の励磁周波数も高くなるものと考えられる。また、エンジンのみで高速走行している場合には、モータは空転状態(連れ回り)となるが、永久磁石を使用したモータでは交番磁界により高周波鉄損が発生することから、燃費悪化の原因となる。このため、電磁鋼板には高周波鉄損低減の要望がますます強くなるものと予想される。電磁鋼板の鉄損はヒステリシス損と渦電流損から構成されるが、このうち渦電流損は(1)式に示すように周波数の 2 乗に比例することから高周波励磁により急激に増大することとなる⁸⁾。

$$W = (\pi B_m f t)^2 / 6\rho \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_m : 励磁磁束密度、 f : 周波数、 t : 板厚、 ρ : 固有抵抗である。

渦電流損を低減するためには、板厚低減と固有抵抗増大の二つの手法が考えられるが、(1)式より渦電流損は板厚の 2 乗に比例することから、板厚低減が効果的である。さらに板厚低減は、図 6 に示すように飽和磁化の低下を招かないことから高周波鉄損の低減手法として好ましいものといえ、薄電磁鋼板の開発が行なわれている⁹⁾。

図 7 に薄電磁鋼板の磁気特性例を示す。板厚 0.35 mm の最高級材に比べ、薄電磁鋼板では 20~30% 程度鉄損が低下

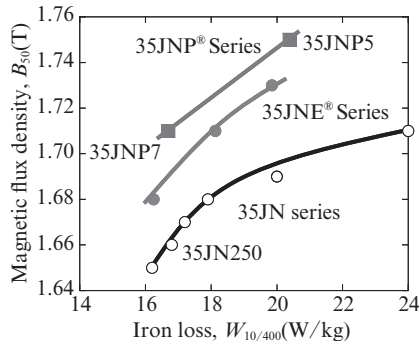


図 4 JNP® シリーズの磁気特性

Fig. 4 Magnetic properties of JNP® series

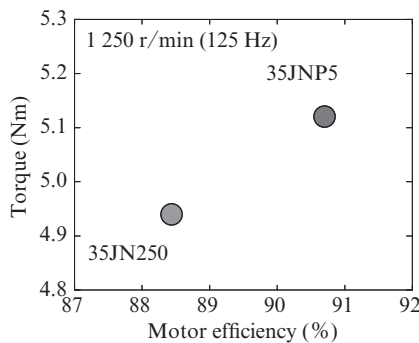


図 5 ダイレクトドライブモータの特性

Fig. 5 Motor properties of 35JNP5 used for the direct drive motor

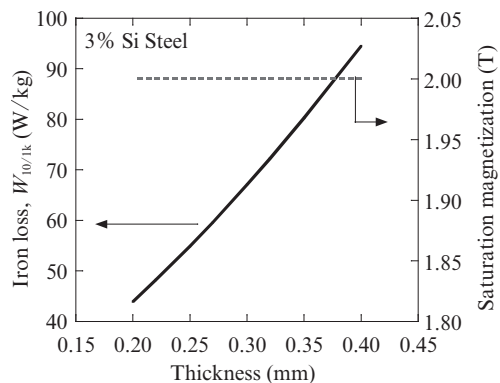


図 6 磁気特性に及ぼす板厚の影響

Fig. 6 Effect of thickness on iron loss and saturation magnetization

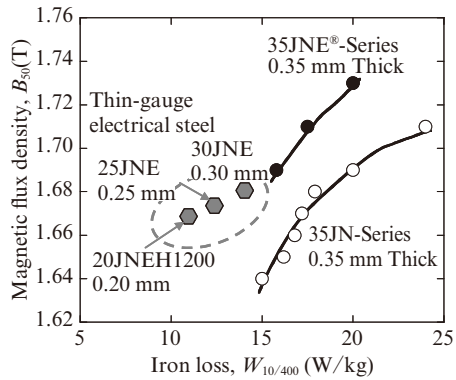


図7 薄電磁鋼板の磁気特性

Fig. 7 Magnetic properties of thin-gauge electrical steel sheets

しており、この傾向は高周波になるほど顕著になる。薄電磁鋼板使用による高周波鉄損の低減効果は効率の向上だけでなく、モータの発熱量が小さくなることから永久磁石への熱負荷が小さくなりディスプロシウム (Dy) などの高価な希土類元素を含まない磁石の使用も可能になるものと考えられる。

2.5 ロータ用高強度電磁鋼板「JNT®」

IPM モータのロータでは図8に示すようにスロット部に永久磁石を埋め込んでおり、高速回転時には磁石の遠心力によりブリッジ部に大きな応力が加わることとなる。ロータ強度の観点からはブリッジ部の幅を広くすればよいが、この場合、永久磁石の漏れ磁束が多くなり、モータ効率が低下することからブリッジ幅はロータ強度が成立する範囲で可能な限り狭く設計される。このため素材として用いられる電磁鋼板には、高速回転時の遠心力に耐えうる強度および繰り返し負荷に対応した疲労強度が必要となる⁷⁾。また、特に集中巻きのモータではロータ表面に高調波に起因した鉄損が発生するため、高周波鉄損が低いことも必要となる。このようなロータ用高強度電磁鋼板として図9、表1に示すように、35JNE-S、35JNT590Tを開発した。これら材料は固溶強化と細粒化などの高強度化技術を適用したものであり、従

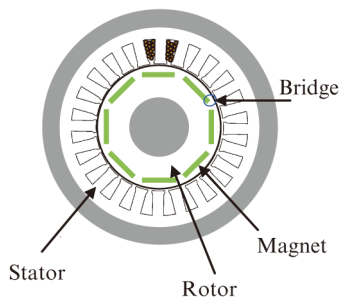


図8 内部磁石型 (IPM) モータの模式図

Fig. 8 Schematic diagram of interior permanent magnet (IPM) motor

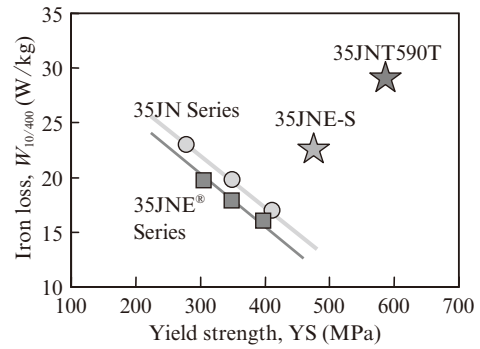


図9 高強度電磁鋼板の強度 - 鉄損バランス

Fig. 9 Magnetic and mechanical properties of high-strength electrical steel sheets

表1 高強度電磁鋼板の諸特性

Table 1 Magnetic and mechanical properties of high-strength electrical steel sheets

Grade	Iron loss, $W_{10/400}$ (W/kg)	Magnetic flux density, B_{50} (T)	Yield strength, YS (MPa)	Tensile strength, TS (MPa)	Vickers hardness, HV
35JN250	17	1.67	397	517	213
35JNE-S	23	1.69	480	570	205
35JNT590T	29	1.64	590	640	220

来材に比べ35JNE-Sで約2割、35JNT590Tで約5割の強度アップを達成している。

これら材料をロータ用材料に適用した場合には、最高回転数アップによる小型化やブリッジ部の狭幅化による漏れ磁束抑制による高効率化にも寄与できる。

3. EPS モータ用電磁鋼板

自動車用モータの新しい分野として、上述したHEV/EVの駆動モータ以外に電動パワーステアリング (EPS) がある。EPSは油圧パワーステアリングに比べ燃費が3~5%程度向上するといわれている^{10,11)}。これは、従来の油圧パワーステアリングではコーナリングなどのステアリング操作時以外にも油圧ポンプを駆動しているため、高速道路での直進時などでは無駄にエネルギーを消費しているのに対し、EPSではステアリング操作時のみモータを駆動し、直進時にはエネルギーロスが発生しないためである。このEPS装着により燃費が大きく向上することから、EPSの世界市場は2020年には2012年の1.9倍の6550万台になるものと予測されている¹²⁾。

一方で、EPSを使用した場合には油圧パワーステアリングに比べ操舵フィーリングが劣るといった問題点が指摘されている¹³⁾。これはモータ空回り時のトルク発生(ロストトルク)によるものであり、軸受け損、ブラシ損などの機械的な摩擦

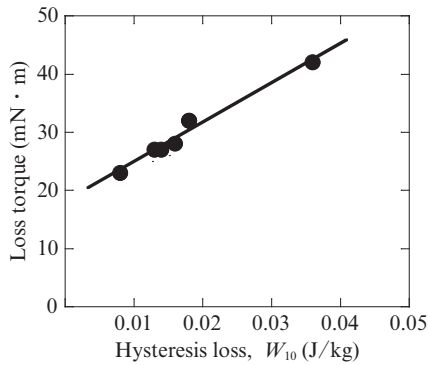


図 10 ロストルクに及ぼす素材ヒステリシス損の影響

Fig. 10 Relationship between hysteresis loss of core materials and loss torque of electric power steering (EPS) motors

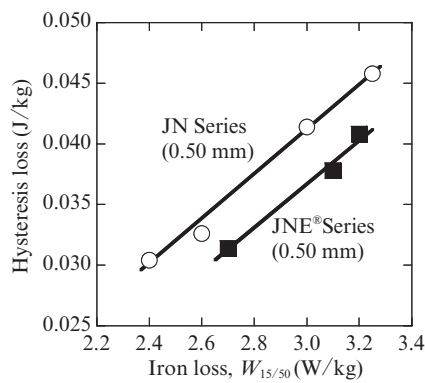


図 11 JNE[®]シリーズのヒステリシス損

Fig. 11 Hysteresis loss of non-oriented electrical steel sheet for energy efficient motors

と鉄心材料のヒステリシス損に起因している。図 10 は EPS モータで使用される DC (直流) ブラシモータにおいて電磁鋼板をさまざまに変化させ、電磁鋼板のヒステリシス損とモータのロストルクの関係を示したものであり、ヒステリシス損低減によりロストルクは低下する²⁾。

高効率モータ用電磁鋼板はヒステリシス損が低いことから EPS モータのロストルク低減に効果的と考えられる。図 11 に JN シリーズと JNE[®] シリーズのヒステリシス損を比較した結果を示す²⁾。JNE シリーズは JN シリーズに比べヒステリシス損が低く、EPS モータのコア材として適している。JNE シリーズで EPS モータを作製した場合の効果を確認するため、DC ブラシモータを作製し、ロストルクを評価した結果を図 12 に示す¹⁴⁾。ここで、ロストルクは 50JN1000 の値を 1 とした場合の比で示してある。JNE シリーズではヒステリシス損が大きく低減できていることから、ロストルクを低減できることが確認できた。同様の効果は JNP[®] シリーズでも認められており、JNE シリーズと JNP シリーズは EPS モータに広く採用されている。

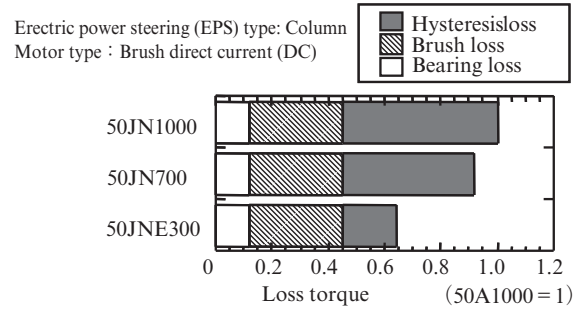


図 12 高効率モータ材の EPS モータ評価結果 (ロストルクは 50JN1000 のロストルクを 1 とした場合の比で表示)

Fig. 12 Loss torque of JNE[®] series used for the EPS motor (Loss torque is normalized by the value of 50JN1000)

4. 家電・産業機械モータ用電磁鋼板

エアコンは国内の家庭における電力消費量の 25% を占め¹⁾、一般家庭での CO₂ 排出量が最も多い製品であることから、省エネルギーが強く求められている。エアコンの省エネ性能は 2006 年より APF (Annual performance factor: 年間エネルギー消費効率) で表示されるようになった。APF はある一定条件下で一年間を通じてエアコンを使用した場合の効率を表す指標であり¹⁵⁾、APF 効率には急速冷房、急速暖房などの高回転でコンプレッサーモータが使用される場合の寄与よりも、定常状態でゆっくりとコンプレッサーモータが回転している場合の寄与のほうが大きくなる。このため、鉄心材料として使用される電磁鋼板には、商用周波付近での磁気特性に優れた材料が求められる。

エアコンと同じように商用周波が重視されるモータとして、産業用に使用されている誘導モータがある。誘導モータは、国内のモータ生産台数の 9 割を占めており、普及台数は約 1 億台となっている¹⁶⁾。このため誘導モータの効率を向上させることはエネルギー消費を抑制する上で極めて大きな意味を持つものといえる。高効率誘導モータの普及を促すため 2011 年に三相誘導電動機をトップランナー基準の対象とすることが決定され¹⁷⁾、2015 年 4 月より IE3 (プレミアム効率) のトップランナー規制が開始となった。

モータの損失は大別して銅損、鉄損、機械損に分けることができるが、誘導モータでは永久磁石式のモータと異なり銅損比率が比較的高いため¹⁸⁾、モータ効率を高めるためには低銅損かつ低鉄損が重要となる。このため鉄心として使用される電磁鋼板には低鉄損であること以外に銅損低減の観点から高磁束密度も強く求められている¹⁹⁾。

図 13 に板厚 0.35 mm の各種材料の 50 Hz での磁気特性を示す。高効率モータ用の JNE[®] シリーズ、高トルクモータ用の JNP[®] シリーズが磁束密度-鉄損バランスに優れており、エアコン・コンプレッサーや高効率誘導モータ用のモータコア材として適しているといえる。

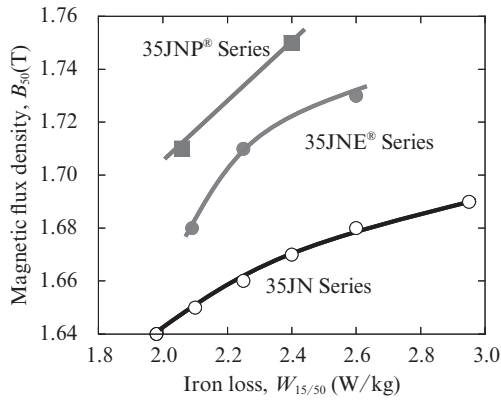


図 13 JNE® シリーズと JNP® シリーズの商用周波磁気特性

Fig. 13 Magnetic properties of JNE® series and JNP® series in commercial frequency

5. 大型発電機用電磁鋼板

近年の電力需要の増加に伴い、多くの発電プラントが建設されている。特に 2011 年の東日本大震災以降は水力・火力発電の需要が高まっており、大型発電機の大容量化、高効率化が指向されている²⁰⁾。

大型発電機の鉄心材料には商用周波の極低鉄損が求められる。電磁鋼板の鉄損の支配因子としては不純物、結晶粒径、集合組織であることが知られており、これら因子を制御することにより極低鉄損化を達成している。ポイントとなる技術は、(1) 鋼の高純度化による析出物、介在物の低減、(2) 結晶粒径と成分の最適化、(3) 冷間圧延前結晶粒径制御による集合組織制御である。

これら技術により開発した 50JN230 と 35JN200 の磁気特性を図 14 に示す。これら材料は大型発電機の高効率化に大きく寄与できる。

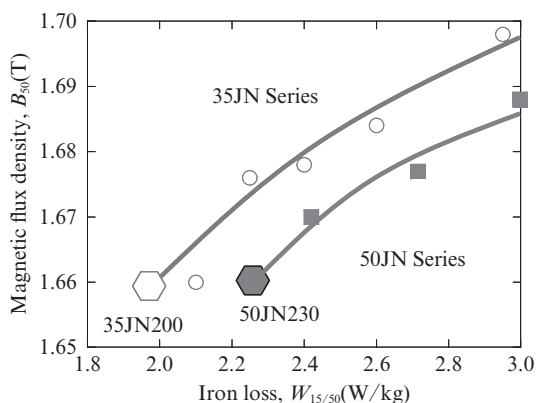


図 14 発電機用材料の磁気特性

Fig. 14 Magnetic properties of generator core materials

6. おわりに

本稿では、自動車、家電、産業機械などのモータの鉄心材料として使用される高性能無方向性電磁鋼板の材料開発コンセプト、特徴について紹介した。今後、自動車や航空機の電動化の進展にともない、モータの用途は多様化するとともに高効率化が強く求められるようになるものと考えられる。JFE スチールでは多様化するお客様ニーズに対応する新規電磁鋼板を開発するとともに素材特性を最大限発揮できるモータ利用技術などの提案も行なう所存である。

参考文献

- 1) 新機能素子開発研究協会. 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査. 2009, p. 13.
- 2) Oda, Y.; Kohno, M.; Honda, A. Journal of magnetism and magnetic materials. 2008, vol. 30, no. 20, p. 2430-2435.
- 3) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 2, p. 92.
- 4) 尾田善彦, 田中靖, 山上伸夫, 山田克美, 千野淳. 電気学会論文誌 A. 2003, vol. 123, no. 1, p. 83-88.
- 5) 戸田広朗, 尾田善彦, 河野雅昭, 石田昌義, 松岡才二. まてりあ. 2011, vol. 50, p. 33-35.
- 6) 清水浩. 電気自動車のすべて. 日刊工業新聞社, 1992.
- 7) Kamiya, M. The 2005 International Power Electronics Conference. 2005, p. 1474-1481.
- 8) Golding, E. W. Electrical Measurement and Measuring Instruments. 5th ed. London Pitman, 1963.
- 9) Hiura, A.; Oda, Y.; Tomida, K.; Tanaka, Y. J. Phys. 4. 1998, vol. 8, Pr2, p. 499-502.
- 10) 鶴原吉郎. 日経メカニカル. 1997, no. 514, p. 47.
- 11) 松田昭信. Koyo Engineering Journal. 1998, no. 153, p. 28.
- 12) 矢野経済研究所. 電動パワーステアリング世界市場に関する調査結果. 2013.
- 13) 喜福隆之, 木全政弘, 大熊昌郁, 阪部茂一, 和田俊一, 大穀晃裕. 三菱電機技報. 1996, vol. 70, no. 9, p. 923-928.
- 14) 尾田善彦, 田中靖, 山上伸夫, 千野淳, 山田克美. NKK 技報. 2002, vol. 178, p. 16-20.
- 15) 資源エネルギー庁. 省エネ性能カタログ 2014.
- 16) 経済産業省. 三相誘導電動機の現状について. 2011, p. 1.
- 17) 日本電機工業会. トップランナーモータ. 2013, p. 4.
- 18) 吉田昌史, 森下大輔. 安川電機技報. 2013, vol. 77, no. 4, p. 187-191.
- 19) 八木沢猛, 石原憲志, 芝山重三郎. 電気学会論文誌 D. 1987, vol. 107, no. 9, p. 1153-1158.
- 20) 中野直広. 三菱電機技報. 2014, vol. 88, no. 9, p. 526-531.



尾田 善彦



大久保智幸



高田 正昭