

JFE スチールの HEV, EV 用無方向性電磁鋼板の最近の進歩

Recent Development of Non-Oriented Electrical Steel for HEV and EV in JFE Steel

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 (副部長)
尾田 善彦 ODA Yoshihiko JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)
設楽英太郎 SHIDARA Eitaro JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 薄板商品技術部 電磁室長 (部長)

要旨

近年、地球温暖化防止の観点から CO₂ 排出量削減への関心がますます高まっている。特に自動車分野においては各国で厳しい CO₂ 排出規制が設定され、その対策としてパワートレインの電動化が加速している。JFE スチールは 1954 年に冷間圧延による無方向性電磁鋼板の製造を開始して以来、様々な高機能電磁鋼板を開発し、近年ではハイブリッド自動車 (HEV)、電気自動車 (EV) の駆動モータ用電磁鋼板の開発と製造も行っている。本稿では自動車の駆動モータ用電磁鋼板として、高効率モータ用電磁鋼板 JNE[®]、高トルクモータ用電磁鋼板 JNP[®]、高周波用薄電磁鋼板 JNEH[®]、ロータ用高強度電磁鋼板 JNT[®]を紹介する。

Abstract:

In recent years, requirement in reducing CO₂ emissions has been increasing to prevent global warming. In the automotive sector, strict CO₂ emission regulations have been set in many countries and the electrification of powertrains is accelerating. JFE Steel has developed a variety of high-performance electrical steel sheets since 1954, when the company started manufacturing cold-rolled electrical steel sheets. In recent years, JFE Steel has also developed and manufactured electrical steel sheets for hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs). This paper introduces JFE Steel's electrical steel sheets for HEVs and EVs such as JNETM for high-efficiency motors, JNPTM for high-torque motors, thin-gauge electrical steel JNEHTM for high-speed motors, and high-strength electrical steel JNTTM for rotors.

1. はじめに

電磁鋼板 (けい素鋼板) は軟磁性材料として用いられる Fe-Si 合金の総称である。鉄に Si を添加すると軟磁気特性が向上することは 1900 年頃に発見され、それ以降、電磁鋼板には様々な技術的な改良が施されてきた。現在、電磁鋼板は軟磁性材料としてもっとも代表的な存在となり、モータや変圧器の鉄心材料として広く使用されている。電磁鋼板は方向性と無方向性の 2 種類に大別され、本稿の主題である無方向性電磁鋼板は、比較的ランダムな結晶方位を有し面内における磁気特性の異方性が小さいことが特徴である。このため、無方向性電磁鋼板は主にモータなど回転機の鉄心材料として使用されている。

モータは電気エネルギーを運動エネルギーに変換する装置であり、その変換効率 (モータ効率) が高いことが要求される。日本国内の電力消費量の約 6 割はモータによって消費されており¹⁾、モータ効率の向上は電気機器のみならず世界全体の省エネルギー化に大きく貢献することになる。モ-

タ効率はモータの構造や設計だけでなく、鉄心材料である電磁鋼板の特性にも大きく左右されるため、電磁鋼板の特性向上が求められてきた。

一方で近年、地球温暖化防止の観点から CO₂ 排出量削減および省エネルギー化への関心がますます高まっている。特に、自動車分野においては各国で厳しい CO₂ 排出規制が設定され、その対策としてパワートレインの電動化が加速している²⁾。内燃機関のみで車を駆動する従来のガソリン車に対し、電気モータやハイブリッドシステムを利用する電気自動車 (EV)、ハイブリッド自動車 (HEV) は大幅な CO₂ 排出量削減が期待できる。しかし、特に EV では 1 充電あたりの走行距離を延ばすために高価なバッテリーが大量に必要になることが課題となっており、駆動系の心臓部であるモータにはこれまで以上に優れた電磁鋼板の開発・供給が求められている。

JFE スチールは 1954 年に冷間圧延による無方向性電磁鋼板の製造を開始し、HEV が登場し市場で拡大し始めた 1990 年代から 2000 年代には高効率モータ用電磁鋼板 JNE[®]、高周波用薄電磁鋼板 JNEH[®]を開発した。また、EV シフトが本格化した 2010 年代には高トルクモータ用電磁鋼板 JNP[®]、

2023 年 3 月 28 日受付

ロータ用高強度電磁鋼板 JNT[®]を開発した。JFE スチールはこれらの材料を継続的に市場に供給し、モータの高効率化および自動車の電動化に対する貢献を続けている。本稿では JFE スチールの HEV, EV 用無方向性電磁鋼板について述べる。

2. HEV, EV 駆動モータに求められる特性

前述のとおり自動車用の駆動モータには高効率化が強く求められ、また軽量化・省スペース化の観点から小型化や高トルク化への要求も強い。このため、自動車用駆動モータには主に埋込磁石型 (Interior Permanent Magnet, IPM) モータが採用されている。IPM モータは磁石トルクとリラクタンストルクを利用できるため、小型化、高トルク化および高効率化に有利である。図 1 はトルクと回転数に対する駆動モータの運転可能領域を示した模式図であり、各領域でモータと電磁鋼板に求められる特性を併せて記載したものである³⁾。

まず、高トルク・低速領域は車の発進、加速および登坂時に対応する領域である。本領域では高いトルクが必要になるため、巻線に大電流が投入され鉄心は磁束密度が高い領域まで磁化される。可能な限り小型でトルクの高いモータを得るために、電磁鋼板には磁束密度が高いことが要求される。

次に、低トルク・中速領域および高速領域は市街地および高速道路の走行に対応する領域である。自動車走行における消費エネルギーの大部分はこれらの領域で発生するため、自動車の燃費・電費を改善するには本領域のモータ効率を向上させることが有効である。本領域ではモータの回転数が高いためにモータ損失に占める鉄損の割合が大きく、電磁鋼板には高周波励磁下での鉄損が低いことが要求される。また、IPM モータでは永久磁石をロータの内部に埋め込んでいるため、高速回転では磁石を保持する部位 (ブリッジ部) に高い応力集中が発生する。高速回転でのロー

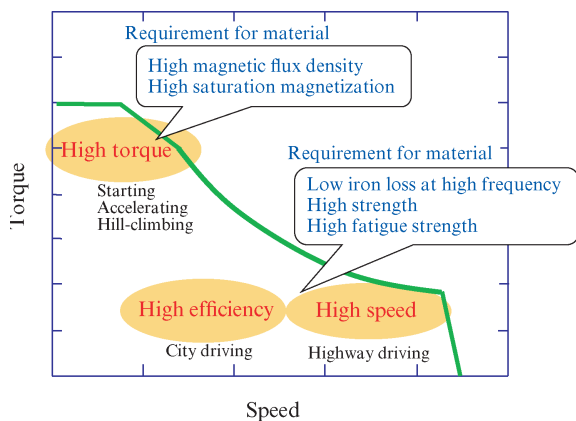


図 1 HEV, EV 駆動モータと電磁鋼板に求められる特性

Fig. 1 Demands for HEV and EV traction motors and electrical steel sheets

タの破壊と磁石の飛散を防止するため、電磁鋼板には高強度および高疲労強度が要求される。

以上のとおり、HEV, EV 用電磁鋼板には低鉄損、高磁束密度、高強度が要求されるが、これらは相反する性質であり両立することは難しい課題である。したがって、1種類の電磁鋼板ですべての要求特性を満足させることは難しく、モータの構造や設計に合わせて様々な電磁鋼板が使分けられている。

次章では、鉄損と磁束密度のバランスに優れた高効率モータ用電磁鋼板 JNE、磁束密度が高い高トルクモータ用電磁鋼板 JNP、高周波鉄損が低い高周波用薄電磁鋼板 JNEH、およびロータ用高強度電磁鋼板 JNT について紹介する。

3. JFE スチールの無方向性電磁鋼板

3.1 高効率モータ用電磁鋼板「JNE[®]」

HEV, EV の駆動モータ用電磁鋼板には低鉄損と高磁束密度が要求される。電磁鋼板の鉄損低減には、比抵抗増加による渦電流損低減の観点から Si 添加量の増加が有効である。このため、ハイグレード電磁鋼板には Si が 3 mass% 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、Si 含有量の増加にともない磁束密度および飽和磁化が低下する。このため、Si 添加量を増加させる手法では低鉄損と高磁束密度を両立する材料の製造は困難である。

鉄損に悪影響を与えずに高磁束密度化を達成する手法として、集合組織制御が挙げられる。これは、電磁鋼板を構成する各結晶粒の結晶方位 (集合組織) をコントロールして、磁気特性を向上させる手法である。Fe の結晶方位は、磁化困難軸と呼ばれる $\langle 111 \rangle$ 軸が磁化されにくい。一方、磁化容易軸と呼ばれる $\langle 100 \rangle$ 軸は非常に磁化されやすい性質を持つ。したがって、鋼板の面内に $\langle 100 \rangle$ 軸を有する結晶粒の割合を増加させることで、電磁鋼板の磁束密度を向上させることができる。JNE シリーズは微量成分のコントロールや製造条件の最適化により、従来材よりも集合組織が改善されていることに加えて、不純物元素の低減や Si, Al などの合金設計の最適化が図られている⁴⁾⁶⁾。

図 2 に板厚 0.35 mm における JNE シリーズの磁束密度と鉄損を従来材 JN シリーズと比較して示す。JNE シリーズは従来材に比べて鉄損と磁束密度のバランスが優れており、同一鉄損の従来材と比較して磁束密度が高い。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従来材と比較すると低硬度となる合金設計になっているため、モータ製造における打抜き工程のプレス金型の損耗を抑制できるというメリットがある。すなわち、JNE シリーズを用いることで低鉄損化によるモータ効率向上、高磁束密度化によるモータ小型化、低硬度化によるプレス金型の長寿命化をはかれるため、JNE シリーズは市販の HEV 用駆動モータ等で

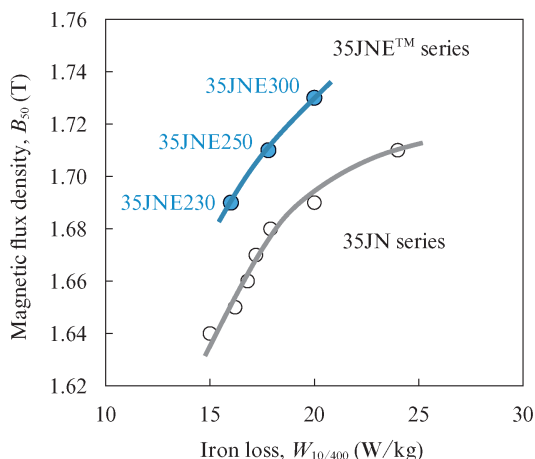


図2 JNE[®]シリーズの磁気特性

Fig. 2 Magnetic properties of JNETM series

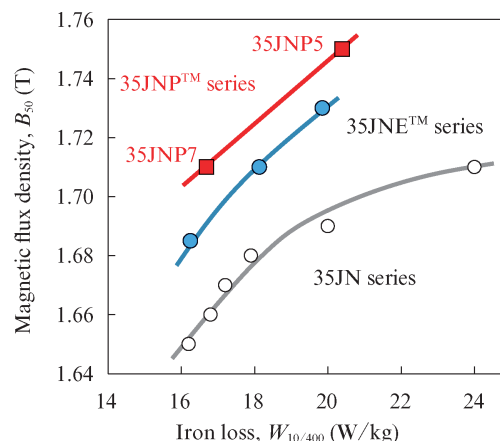


図4 JNP[®]シリーズの磁気特性

Fig. 4 Magnetic properties of JNPTM series

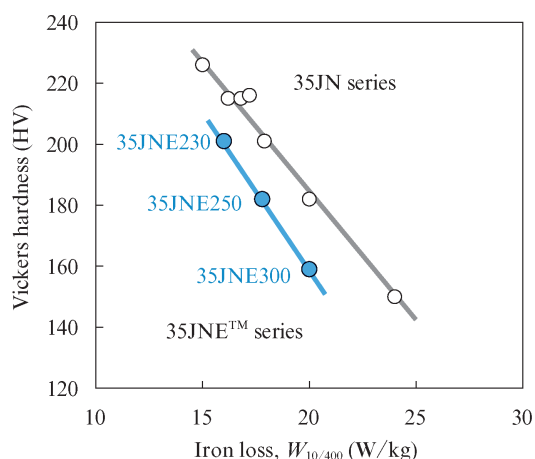


図3 JNE[®]シリーズの硬度—鉄損バランス

Fig. 3 Vickers hardness of JNETM series

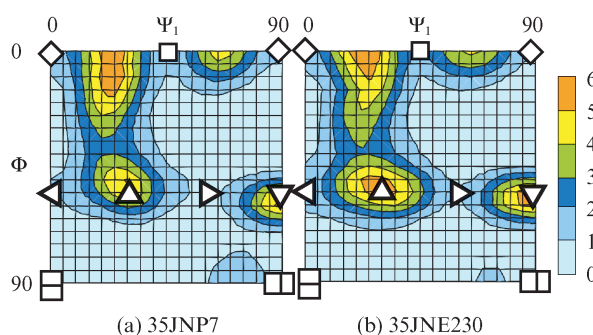


図5 JNP[®]とJNE[®]の集合組織比較

Fig. 5 Comparison of texture between JNPTM and JNETM

広く使用されている。

3.2 高トルクモータ用電磁鋼板「JNP[®]」

HEV, EV 駆動モータは、発進時、登坂時、加速時に大きなトルクが要求される。大トルクを得るためにはモータの寸法を大きくすることが有効であるが³⁾、スペース制約や軽量化の観点から、モータは可能な限り小型化することが望ましい。したがって、鉄心材料である電磁鋼板にはさらなる磁束密度向上が要求される。JNP シリーズはこのような要求を受けて開発されたものであり、Si, Al, Mn 等の合金設計適正化、不純物の低減・影響緩和技術、さらに粒界偏析元素の活用や中間工程の最適化によって集合組織を改善する技術が適用されている。

板厚 0.35 mm の JNP シリーズの磁気特性を図 4 に示す。JNP シリーズは同一鉄損の JNE シリーズに比べて、磁束密度がさらに向上している。鉄損が近い材料である 35JNP7 と 35JNE230 の集合組織の比較を図 5 に示す ($\phi_2=45^\circ$ 断面

ODF)⁷⁾。35JNP7 のほうが磁気特性に悪影響を及ぼす {111} <112> の強度が低く、優れた集合組織を有しているといえる。JNP シリーズは磁束密度が高いことから特に高トルクが要求されるモータに適しており、すでに市販の HEV モータに採用されている。

高トルクが要求される EV 用のモータとして、ダイレクトドライブのインホイールモータが挙げられる。本方式はモータをホイールに内蔵するため、車内空間を広く利用できる、車体設計の自由度が向上するという利点があり、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はギヤを介さずに直接タイヤを回転させる必要があるため、モータには高いトルクが求められる。また、ギヤを用いてモータを高速で回転させる方式に比べ、モータ回転数が低くなるためにモータ損失に占める鉄損の比率が低いという特徴がある。このことから、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になる。

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 6 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

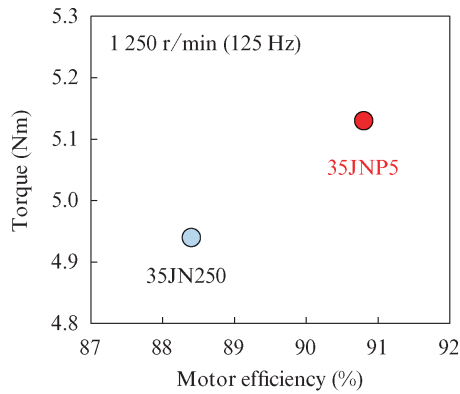


図6 ダイレクトドライブモータの特性

Fig. 6 Motor properties of 35JNP5 used for the direct drive motor

を示す⁷⁾。35JNP5は比較材として用いた35JN250に比べ、モータ効率、トルクともに向上しており、ダイレクトドライブモータの鉄心材料に適しているといえる。

高磁束密度材が要求されるその他のモータとして誘導モータが挙げられる。誘導モータは国内のモータ生産台数の9割を占める汎用性の高いモータであるが⁸⁾、希土類磁石を用いないレアアースフリーモータの一種であることから、調達リスク低減やコスト低減の観点からEV主機モータでも採用される例が増えている。

モータ損失は銅損、鉄損、機械損に大別できる。誘導モータでは磁石を使用せずロータの2次導体に発生する誘導電流による磁界を使用するため、永久磁石モータに比べて銅損の比率が高い⁹⁾。このため、誘導モータは、鉄心材料の磁束密度向上により銅損低減効果とモータ効率向上効果がより強く得られると考えられる。JNPシリーズの磁束密度はJNシリーズ、JNEシリーズに比べて大幅に向上しているため、誘導モータに適用することで効率向上効果が期待できる。小型モデルモータ(3相6極誘導機)を用いた検討では、動作磁束密度が1.6Tよりも高い領域においてJNPシリーズ適用による効率改善が報告されている¹⁰⁾。これは動作磁束密度が高いほど銅損比率が高くなるためと考えられ、JNPシリーズ適用により誘導モータの高効率化が図れることを示している。

3.3 高周波用薄電磁鋼板「JNEH[®]」

モータの出力はトルクと回転数の積で決まるため、モータ小型化によるトルク低下は回転数の増加で補える。EV, HEVの駆動モータは小型軽量化のニーズが強く、最高回転数の増加による小型化と高出力密度化が進展している¹¹⁾。これに伴い、鉄心材料である電磁鋼板の励磁周波数の高周波化も進んでいる。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、このうちヒステリシス損は周波数に比例し、渦電流損 W_e は次式に示すように周波数の2乗に比例する。

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

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。したがってモータの回転数増加に伴って渦電流損の比率が急激に増大することとなり、駆動モータの高効率化のためには電磁鋼板で発生する渦電流損の抑制が大きな課題となる。

渦電流損を低減するには、板厚低減と固有抵抗増大の2つの手法が考えられる。式(1)より渦電流損は板厚の2乗に比例することから、板厚低減によって効果的に渦電流損を低減できる。また、Si添加による固有抵抗増大は飽和磁化の低下を招くという課題があるが、板厚低減は飽和磁化に影響を与えず渦電流損を低減できるというメリットがある。このような背景から、高周波用途に向けた薄電磁鋼板の開発が進められてきた¹²⁾。

板厚0.3mm、0.25mm、0.2mmの薄電磁鋼板30JNE1500、25JNE1350、20JNEH1200の磁気特性例を図7および表1に示す。板厚0.35mmの最高級クラス材に比べ、薄電磁鋼板では20~40%程度の高周波鉄損の低減が認められる。これらの薄電磁鋼板は回転数の高い駆動モータの効率向上に有効であり、すでに多くの採用例がある。

薄電磁鋼板適用によるモータ効率改善効果を確認するた

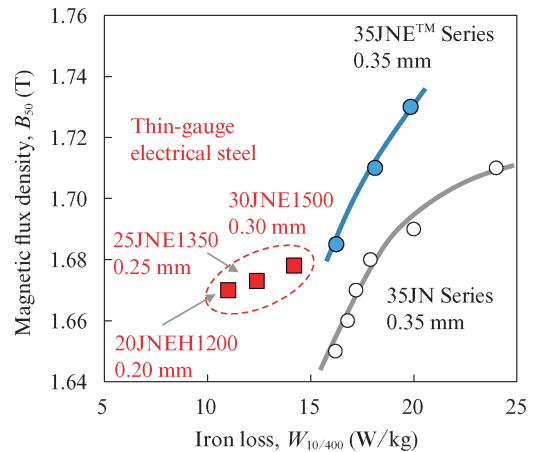


図7 薄電磁鋼板の磁気特性

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

表1 薄電磁鋼板と35JN230の磁気特性比較

Table 1 Comparison of magnetic properties between thin-gauge electrical steel sheets and 35JN230

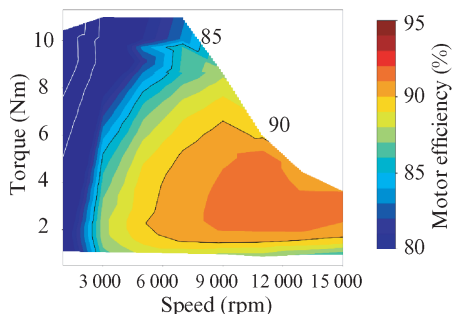
Grade	Thickness (mm)	$W_{15/50}$ (W/kg)	$W_{10/400}$ (W/kg)	B_{50} (T)
35JN230	0.35	2.10	17.2	1.66
30JNE1500	0.30	2.10	14.2	1.68
25JNE1350	0.25	2.05	12.4	1.67
20JNEH1200	0.20	2.13	11.0	1.67

め、表 2 に示す評価用 IPM モータを作製し、モータ効率を評価した。本検討では加工歪の影響を排除するため、ワイヤーカットと含浸接着で鉄心を作製した。また、ロータ材を 25JNE1350 で固定し、ステータの材料のみを 25JNE1350 と 35JNE300 に変更して評価した。得られたモータ効率マップを図 8 に示す。薄電磁鋼板の適用により、特に高速回転領域のモータ効率が向上した。これは鉄心材料の高周波鉄損低減に起因するものであり、薄電磁鋼板の適用は HEV, EV 駆動モータの高効率化に極めて有効であるといえる。

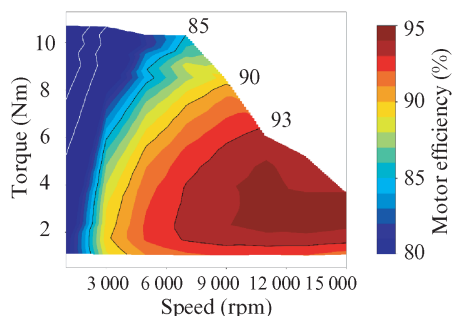
一般的に HEV, EV 用駆動モータはインバータを用いた PWM 制御によって駆動されるが、その電圧波形に含まれる高調波が鉄損を増加させることが知られている。薄電磁鋼板は非正弦波励磁下でも低鉄損となる特長があり、インバータ励磁による鉄損増加の抑制にも有効である¹³⁾。これに

表 2 評価モータの諸元
Table 2 Specifications of the test motors

Items	Specification
Rated power output	9 kW
Input voltage	400 V _{DC}
Current limit	45 Arms
Current phase angle	0.0—65.0 deg
Number of poles / slots	8/48
Outer diameter of stator	171.2 mm
Stacking length	14 mm
Winding connection	Three phase connection, distributed



(a) 35JNE300



(b) 25JNE1350

図 8 モータ効率マップの比較

Fig. 8 Comparison of motor efficiency maps

加え、薄電磁鋼板はモータ製造時のプレス加工による歪が入りにくいため鉄損増加が小さいという利点もある¹⁴⁾。この観点からも、薄電磁鋼板はモータの高効率化に適した材料である。

3.4 ロータ用高強度電磁鋼板「JNT[®]」

IPM モータの模式図を図 9 に示す。IPM モータはロータ内部のスロット部に磁石を埋め込む構造になっており、高速回転時には磁石を保持する部位（ブリッジ部）に大きな応力が加わることになる。ブリッジ部の破壊を抑制するには、ブリッジ部の幅を広くして応力を低減することが有効であるが、ブリッジ部を流れる漏れ磁束が大きくなってしまいうためトルク低下や効率低下を招くという課題がある。このため鉄心材料である電磁鋼板には、高速回転時の応力集中で塑性変形しないための降伏強度および繰り返し応力で疲労破壊しないための疲労強度が必要になる¹⁵⁾。また、ロータ表面には高調波に起因した鉄損が発生するため、モータ効率向上と磁石の減磁抑制の観点から高周波鉄損が低いことも要求される。

このような背景から、図 10 および表 3 に示すロータ用高強度電磁鋼板 35JNT590TK が開発された¹⁶⁾。これは Si 等に

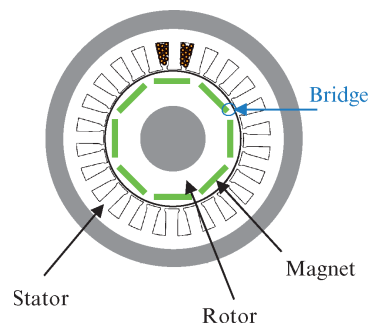


図 9 埋込磁石型 (IPM) モータの模式図

Fig. 9 Schematic diagram of interior permanent magnet (IPM) motor

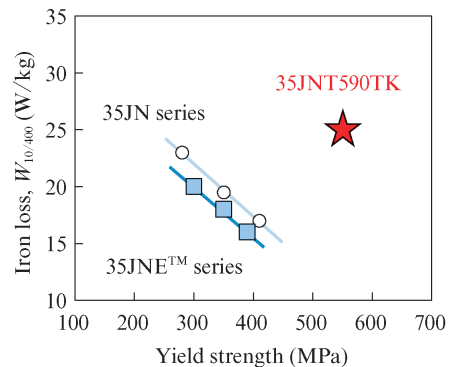


図 10 高強度電磁鋼板の磁気特性

Fig. 10 Magnetic and mechanical properties of high-strength electrical steel sheets

表3 高強度電磁鋼板と 35JN230 の特性比較

Table 3 Comparison of magnetic and mechanical properties between high-strength electrical steel sheet and 35JN230

Grade	$W_{10/400}$ (W/kg)	B_{50} (T)	YS (MPa)	TS (MPa)	HV
35JN230	17.2	1.66	401	527	215
35JNT590TK	24.0	1.66	550	620	223

よる固溶強化に加えて結晶粒微細化強化を適用したものであり、従来材に比べて約4割の降伏強度アップを達成している。本高強度電磁鋼板をロータ用材料に適用することにより、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トルク向上、モータ効率向上に寄与できる。なお、本材料は結晶粒微細化により鉄損が従来材より高くなっているため、ロータにのみ適用することが推奨される。永久磁石モータで発生する鉄損全体に比べるとロータで発生する鉄損は小さいため、ロータ材の鉄損が高くなっても影響は軽微である。

4. おわりに

本稿では、HEV, EV 駆動モータの鉄心材料として使用される高機能無方向性電磁鋼板の技術思想、特長および材料特性について紹介した。JFE スチールはこれらの開発材を継続的に市場に供給し、モータの高効率化および自動車の電動化に対する貢献を続けてきた。今後、電動化の波は自動車のみならず航空機や船舶など他のモビリティにも広がり、モータおよび電磁鋼板に対するニーズは多様化していくものと考えられる。JFE グループの企業理念は「常に世界最高の技術をもって社会に貢献する」ことであり、JFE スチールは今後も高機能電磁鋼板の製造と安定供給のための技術開

発を継続し、世界の電動化と省エネルギー化へ貢献していく所存である。

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) 西野浩介. 世界の自動車燃費規制の進展と電動化の展望. 三井物産戦略研究所, 2018, 51p.
- 3) Oda, Y.; Kohno, M.; Honda, A. Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices Journal of magnetism and magnetic materials. 2008, vol. 320, no. 20, p. 2430-2435.
- 4) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎. 加工性に優れた高効率モータ用無方向性電磁鋼板. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 2, p. 92-96.
- 5) 尾田善彦, 田中靖, 山上伸夫, 山田克美, 千野淳. 極低S技術による高効率モータ用電磁鋼板の開発. 電気学会論文誌A. 2003, vol. 123, no. 1, p. 83-88.
- 6) 尾田善彦, 大久保智幸, 高田正昭. JFE スチールにおける無方向性電磁鋼板の最近の進歩. JFE 技報. 2015, no. 36, p. 6-11.
- 7) 戸田広朗, 尾田善彦, 河野雅昭, 石田昌義, 松岡才二. 新規・高効率モータ用無方向性電磁鋼板 JNP シリーズの開発. まてりあ. 2011, vol. 50, p. 33-35.
- 8) 経済産業省. 三相誘導電動機の現状について. 2011, p. 1.
- 9) 吉田昌史, 森下大輔. 高効率モータ技術. 技報安川電機. 2014, vol. 77, no. 4, p. 187-191.
- 10) Toda, H.; Oda, Y.; Kohno, M.; Ishida, M.; Zaizen, Y. A New High Flux Density Non-Oriented Electrical Steel Sheet and its Motor Performance. IEEE Trans. on Mag. 2012, vol. 48, no. 11, p. 3060-3063.
- 11) 水谷良治. ハイブリッド自動車用モータの技術変遷. 電気学会誌. 2018, vol. 138, no. 5, p. 288-291.
- 12) Hiura, A.; Oda, Y.; Tomita, K.; Tanaka, Y. Magnetic properties of high-permeability thin gauge non-oriented electrical steel sheets. J. Phys. IV France. 1998, vol. 8, pr2, p. 499-502.
- 13) 上坂正憲, 千田邦弘, 大村健, 岡部誠司. 無方向性電磁鋼板の板厚がインバータ励磁下での鉄損に及ぼす影響. 電気学会論文誌A. 2018, vol. 138, no. 7, p. 367-372.
- 14) Omura, T.; Zaizen, Y.; Fukumura, M.; Senda, K.; Toda, H. Effect of Hardness and Thickness of Nonoriented Electrical Steel Sheets on Iron Loss Deterioration by Shearing Process. IEEE. Trans. on Mag. 2015, vol. 51, no. 11, 2005604.
- 15) Kamiya, M. Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System. The 2005 International Power Electronics Conference. 2005, p. 1474-1481.
- 16) JFE スチールの EV 駆動モータ用電磁鋼板. JFE 技報. 2021, no. 47, p. 82-84.