

## JFE スチールの EV 駆動モータ用電磁鋼板

## Electrical Steels for EV Traction Motor in JFE Steel

## 1. はじめに

電磁鋼板は EV 駆動モータの鉄心材料として使用されており、モータ性能を左右するキーマテリアルである。

JFE スチールでは EV 駆動モータ用の電磁鋼板として、JNE<sup>®</sup>シリーズ、JNEH<sup>®</sup>シリーズ、JNP<sup>®</sup>シリーズ、JNT<sup>®</sup>シリーズ等を品揃えしてきた。さらに、EV 駆動モータ高速化に対応した高い素鋼板も拡充している。本稿では、これら EV 駆動モータ用の電磁鋼板について紹介する。

## 2. EV 駆動モータ用材料に求められる特性

EV 駆動モータの鉄心材料として使用される電磁鋼板には様々な特性が要求される。発進、加速時には高トルクが必要となるため、電磁鋼板には高磁場域における高磁束密度が要求される。一方、高回転域ではモータ損失に占める鉄損の割合が大きくなるため、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に熱伝導率の高いことも必要となる。さらに、内部磁石埋め込み型 (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様々な特性が要求されるが、これら全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電磁鋼板が使い分けられている。

## 3. EV 駆動モータ用電磁鋼板

3.1 高効率モータ用電磁鋼板「JNE<sup>®</sup>」

電磁鋼板の鉄損低減には Si 添加による固有抵抗増大が有効である。このため、高グレードの電磁鋼板には 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、添加量の増加に伴い飽和磁化が低下する。このため、従来の Si 添加の手法では、高磁束密度—低鉄損材の製造は困難であった。この問題を解決するため、Si、Al 等の合金添加量および結晶粒径を適正化するとともに、磁気特性に好ましい集合組織を増加させ、さらに鋼中不純物を低減することが試みられてきた<sup>1,2)</sup>。図 1 にそれら技術の組み合わせによって開発された JNE シリーズの特性を示す<sup>3)</sup>。JNE シリーズは、従来の JN シリーズに比べ磁束密度—鉄損バランスが優れており、モータの高効率化、高トルク

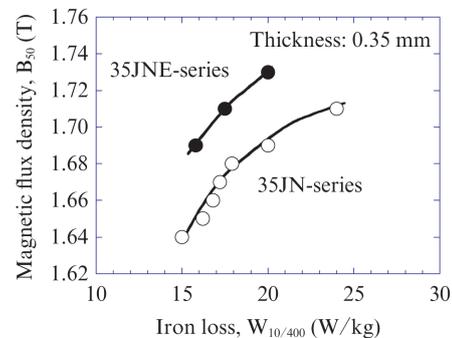


図 1 高効率モータ用電磁鋼板の磁気特性

Fig. 1 Magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets for energy efficient motor

化に大きく寄与できる。

3.2 高周波モータ用薄電磁鋼板「JNEH<sup>®</sup>」

EV 駆動モータの小型化に伴う高速化を背景として、今後電磁鋼板に対する高周波鉄損低減の要望が強くなると予想される。高周波域では渦電流損が支配的で、渦電流損は板厚の 2 乗に比例することから、鉄損低減には板厚低減が効果的であるため、薄電磁鋼板の開発が進められている<sup>4)</sup>。

図 2 に板厚 0.20, 0.25, 0.30 mm の薄電磁鋼板の磁気特性例を示す<sup>3)</sup>。板厚 0.35 mm の最高級材に比べ、板厚 0.20 mm の薄電磁鋼板では 25~30% 程度鉄損が低下しており、この傾向は高周波になるほど顕著になる。

3.3 高トルクモータ用電磁鋼板「JNP<sup>®</sup>」

EV 駆動モータには発進時、登坂時、加速時に大きなトルク

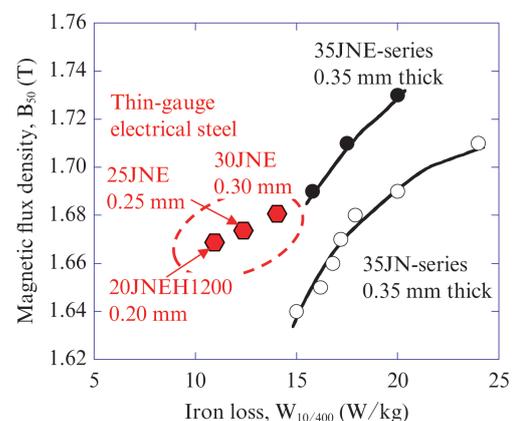


図 2 薄電磁鋼板の磁気特性

Fig. 2 Magnetic properties of thin-gauge electrical steel sheets

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る。このような背景から、従来材より磁束密度の高い JNP シリーズを開発した<sup>5)</sup>。開発材の磁束密度—鉄損バランスを図 3 に示す。JNP シリーズは JNE シリーズと比べ、同一鉄損での磁束密度が約 0.01~0.02 T 程度向上している。JNP シリーズは、集合組織制御による高磁束密度化を狙いとして、Si, Al, Mn 等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等を適用している。

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。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<sup>6)</sup>。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は、鉄損要求はそれほど厳しくない一方で、高磁束密度が強く求められる。

図 4 に定格出力 1.6 kW の IPM タイプのダイレクトドライブモータのモータ回転数 1 250 r/min (車速 60 km/h 相当) でのモータ効率とトルクを示す。開発した 35JNP5 は比較材として用いた 35JN250 に比べトルク、効率共に向上しており、ダイレクトドライブモータ等の高トルクモータの鉄心材料として適している。

### 3.4 ロータ用高強度電磁鋼板「JNT<sup>®</sup>」

IPM モータのロータでは、高速回転時に磁石の遠心力によりブリッジ部に大きな応力が加わる。ロータ強度の観点からはブリッジ部の幅を拡げればよいが、拡げると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を満足する範囲で可能な限り狭く設計さ

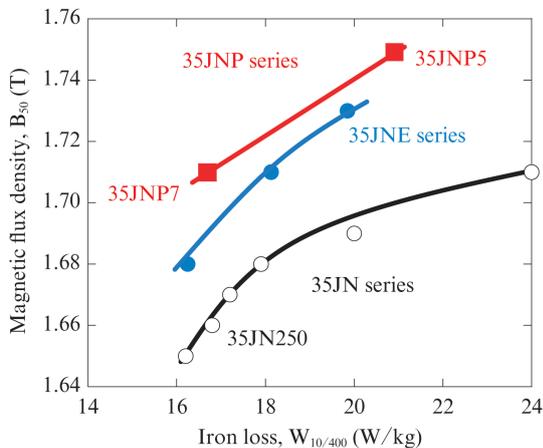


図 3 JNP<sup>®</sup>シリーズの磁気特性  
Fig. 3 Magnetic properties of JNP<sup>TM</sup> series

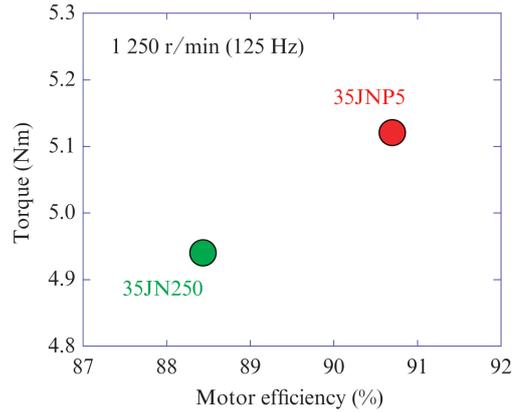


図 4 ダイレクトドライブモータの特性  
Fig. 4 Motor properties of direct drive motor

れる。このため素材の電磁鋼板には、高速回転時の遠心力に耐える降伏強度および繰り返しの負荷に対応した疲労強度が必要となる<sup>7)</sup>。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 35JNT590TK を開発した。図 5 に高強度電磁鋼板の特性を示す。本材料は固溶強化および細粒化等の高強度化技術を適用したものであり、従来材に比べ約 3 割の強度アップを達成している。

本材料をロータ用材料に適用することで、最高回転数アップによる小型化および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。

### 3.5 6.5%けい素鋼板「JNEX<sup>®</sup>」

6.5%けい素鋼は 1950 年代より知られていた材料であり<sup>8)</sup>、鋼中に Si を 6.5 mass% 添加することにより、磁歪がほぼゼロとなり、透磁率および鉄損が最も優れた値を示すことが明らかになっていた。しかし、Si 量が増加すると材料の伸び

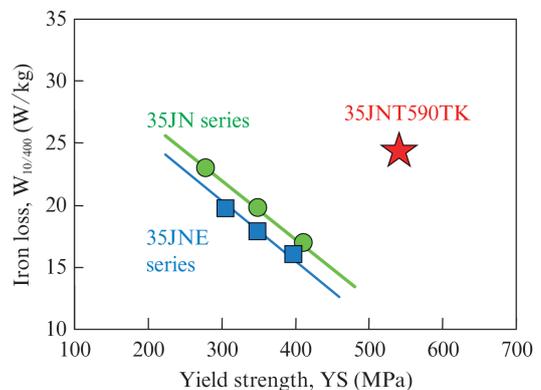


図 5 高強度電磁鋼板の強度—鉄損バランス  
Fig. 5 Magnetic and mechanical properties of high-strength electrical steel sheet

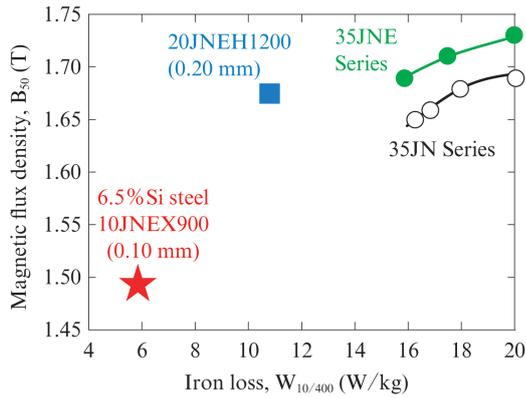


図6 6.5%けい素鋼板の磁気特性

Fig. 6 Magnetic properties of 6.5%Si steel sheet

が急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難になるため、従来の最高級電磁鋼板ではSi添加量は3 mass%程度に制限されていた。これに対し、近年、圧延法に代わりCVD法（化学気相蒸着法）による高いけい素鋼板の製造技術が開発され、6.5%けい素鋼板が量産できるようになった<sup>9)</sup>。

図6に6.5%けい素鋼板（JNEX<sup>®</sup>）の磁気特性を示す。6.5%けい素鋼板の鉄損は、従来の無方向性電磁鋼板よりも著しく低い。このため、6.5%けい素鋼は高速モータ用の鉄心材料として優れた特性が期待できる<sup>10)</sup>。

### 3.6 Si傾斜磁性材料「JNHF<sup>®</sup>、JNRF<sup>™</sup>」

高速モータ用に、前述したCVDプロセスを用い、板厚方向にSi濃度勾配をつけたSi傾斜磁性材料（JNHF<sup>®</sup>シリーズ）も開発している<sup>11,12)</sup>。JNHFシリーズは10 kHz以上の高周波域でJNEXを凌ぐ鉄損特性を有するのみならず、板厚中心部のSi量がJNEXに比べて低いため、磁束密度が高く、打ち抜き等の加工性に優れるというメリットも有している。

JNEXシリーズ、JNHFシリーズは優れた高周波鉄損を有しており、EV駆動モータの高効率化に寄与できるが、一般の無方向性電磁鋼板に比べると磁束密度が低く、モータのトルクが低下するという課題があった。そこで、板厚方向へのSi傾斜付与による渦電流損低減技術を活用しつつ、磁束密度を高めたJNRF<sup>™</sup>シリーズを開発した。図7にJNRFシリーズの磁気特性を示す。JNRFシリーズはJNHFシリーズに比べEV駆動モータの駆動周波数に相当する400 Hzの鉄損が低く、大幅に高い磁束密度を示しており、EV駆動モータの高効率化と併せて高トルク化にも寄与できる。

## 4. おわりに

本稿では、EV駆動モータの鉄心材料として用いられる電

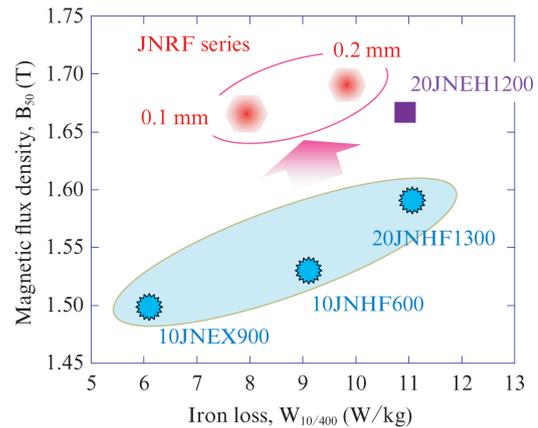
図7 Si傾斜磁性材料（JNHF<sup>®</sup>、JNRF<sup>™</sup>）の磁気特性

Fig. 7 Magnetic properties of Si gradient steel sheets

磁鋼板の特性について紹介した。EV市場は今後より一層の拡大が予想されており、駆動モータにはさらなる高効率化、高出力化が要求されると考えられる。鉄心材料として使用される電磁鋼板へのご要望はますます高度化かつ多様化していくものと予想されるが、当社は、ご要望に応じた新しい材料の開発を通じ、引き続きEV駆動モータの高性能化に寄与していく所存である。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Hiura, A.; Oda, Y.; Tomida, K.; Tanaka, Y. Magnetic properties of high-permeability thin gauge non-oriented electrical steel sheets. J. Phys 4. 1998, vol. 8, pr2, p. 499-502.
- 5) 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. あたりあ. 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, 237p.
- 7) Kamiya, M. Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System. The 2005 International Power Electronics Conference. 2005, p. 1474-1481.
- 8) Bozorth, R. M. Ferromagnetism. D. Nostrand Co. Inc., N. J., 1951, p. 77.
- 9) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦. 6.5%けい素鋼板（スーパーEコア）の開発. あたりあ. 1994, vol. 33, p. 423-425.
- 10) 尾田善彦, 志賀信勇, 河野雅昭, 本田厚人. 自動車用電磁鋼板の最近の動向. 平成21年電気学会全国大会. 2009, S5-5, p. 15-18.
- 11) 藤田耕一郎, 高田芳一. 高いけい素電磁鋼板の最近の動向. 熱処理. 1999, vol. 39, no. 4, p. 200-206.
- 12) 笠井勝司, 浪川操, 平谷多津彦. JFEスチールにおける高Si電磁鋼板の最近の進歩. JFE技報. 2015, no. 36, p. 12-16.

### 〈問い合わせ先〉

JFEスチール 電磁鋼板セクター部

TEL: 03-3597-3480 FAX: 03-3597-4779