

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

戸田 広朗^{*1)} 尾田 善彦^{*1)} 河野 雅昭^{*2)}
石田 昌義^{*1)} 松岡 才二^{*3)}

1. はじめに

近年、地球温暖化や大気汚染などの環境問題、エネルギー問題などへの関心が世界的に高まっている。その中でも地球温暖化防止のためには、エネルギーの効率利用およびCO₂の排出削減が必須である。モータは国内総電力需要の約半分を消費し、特に産業用分野では70%以上の電力が消費されている。また、自動車業界ではハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)、燃料電池車の開発・実用化が進展している。産業用を含むこれらの駆動モータに対する高性能化・高効率化への要求は、ますます厳しくなっており、鉄心材料として用いられる無方向性電磁鋼板にも更なる高性能化が求められている。

JFE スチールでは、これまでに JIS 規格準拠の JN シリーズ、高磁束密度・低鉄損材の JNE シリーズ、歪取焼鈍後に高磁束密度・低鉄損が得られる JNA シリーズ、高周波低鉄損材(0.20 mm 厚)の JNHF シリーズなどを開発してきたが^①、前述した市場環境に対応して、JNE シリーズより更に同一鉄損での磁束密度を高めた高効率モータ用無方向性電磁鋼板・JNP シリーズの開発に成功した。

2. 高効率モータ用材料への要求特性

家電製品、特にそのトップランナー製品や HEV モータにはブラシレス DC モータ、産業用モータとしては誘導モータが主に使用されているが、各種モータの高性能化・高効率化のためには、モータの特徴にあった鉄心材料の選択が必要である。

* JFE スチール株式会社
スチール研究所 電磁鋼板研究部：1)主任研究員 3)部長
西日本製鉄所 薄板商品技術部：2)主任部員
Development of Electrical Steel Sheet JNP Core for High-efficiency Motor; Hiroaki Toda, Yoshihiko Oda, Masaaki Kohno, Masayoshi Ishida, Saiji Matsuoka (JFE Steel Corporation)
2010年10月28日受理

ブラシレス DC モータの損失はモータ鉄心の損失が支配的なため、その効率には素材鉄損の影響が大きく、最大効率は 1.0 T, 400 Hz における鉄損 $W_{10/400}$ と良い相関を示すことが報告されている^{②③}。また、モータ効率に及ぼす素材磁束密度の影響は小さいが、トルク特性に対しては、素材 B_{50} (磁界 5000 A/m での磁束密度)の影響がみられ、 B_{50} が高い素材ほどトルク定数は増加する^②。したがって、電磁鋼板の高磁束密度・低鉄損化がモータの高性能化に寄与する。

次に、HEV・EV 用駆動モータと鉄心材料に求められる性能を図 1 に示す^④。発進・加速時には高トルクが必要となるため、鉄心材料として用いられる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、モータの回転数が高い場合には、モータ損失に占める鉄損の割合が大きくなるので、高周波鉄損の低い材料が求められる。したがって、どの駆動条件を重視するかで最適な電磁鋼板は異なるが、その高磁束密度・低鉄損化は全般的なモータ性能の向上に寄与する。

誘導モータではロータに 2 次銅損が発生するため、同体格・同出力のブラシレス DC モータと比べて、モータ損失に占める銅損比率が大きい。また、素材鉄損の低い高 Si 材を用いることでモータ鉄損は減少するが、逆にモータ銅損は増加する。これは素材 Si 量が増加することにより鉄損は減少するが、飽和磁束密度が減少して高磁場の素材磁束密度が低

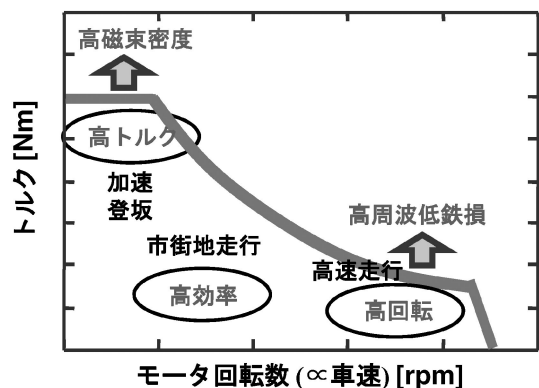


図 1 HEV・EV 用モータと鉄心材料に要求される特性。

下し、励磁電流が増加するためである⁽²⁾。したがって、モータ設計磁束密度や駆動条件次第で、高Si・低鉄損材よりも比較的低いSi量で磁束密度の高い材料の方がモータ効率は高くなると考えられる。

要約すると、モータ鉄損は素材鉄損と、銅損は素材磁束密度と強い相関を示すため、同一鉄損での高磁束密度材はモータ効率の向上に寄与する。また、比較的低いSi量で磁束密度の高い材料を開発することも必要と考えられる。

3. JNPシリーズの特性および開発ポイント

開発材の磁気特性例を表1に示す。板厚はJN, JNEシリーズと同様、0.35, 0.50 mm厚の2種類がある。また、モータ用途に応じた最適材料を提示するために、比較的low SiのJNP5および高Si低鉄損材のJNP7と称する成分が異なる2素材を開発した。

図2に1.5 T, 50 Hzでの鉄損 $W_{15/50}$ と磁束密度 (B_{50}) の関係を従来材料 (JN, JNEシリーズ) と比較して示す。JNEコアと比べて、JNPコアの方がほぼ同一鉄損での磁束密度が約0.02 T程度向上していることがわかる。

このJNPシリーズは、Si, Al, Mn等の合金添加量を適正化するとともに、S, N等の不純物量を低減、かつ、その影響を緩和する技術を適用して開発した。更に、粒界偏析元素の活用や中間工程の最適化によって磁気特性に有害な(111)集合組織を低減し、(100), (110)集合組織を増加させる技術も適用している。

図3に35JNP7 ($B_{50} \sim 1.70$ T) 及びそれとほぼ同じ鉄損値の35JNE230 ($B_{50} \sim 1.68$ T)の再結晶集合組織を比較して示

表1 JNPコアの磁気特性例.

名称	板厚 (mm)	$W_{15/50}$ (W/kg)	$W_{10/400}$ (W/kg)	B_{50} (T)
35JNP5	0.35	2.50	20.0	1.75
35JNP7	0.35	2.10	17.0	1.70
50JNP5	0.50	3.00	32.0	1.75
50JNP7	0.50	2.60	26.0	1.71

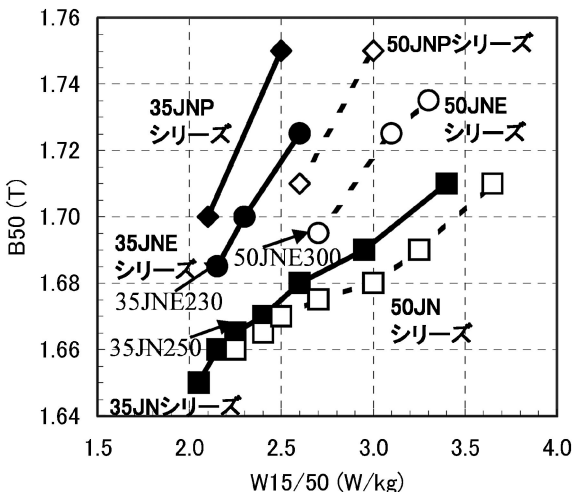


図2 JN, JNE コアと JNP コアの磁気特性比較.

すが、35JNP7の方が磁気特性に悪影響を及ぼす{111}<112>方位が減少していることがわかる。

4. EV および HEV 用モータへの適用

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EV, HEVのモータコア材として有望であると考えられる。EVモータとして様々な形式、配置が検討されているが、その一つにダイレクトドライブのインホイールモータがある。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ている。

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対しては、鉄損要求はそれほど厳しくないが、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(内部磁石埋め込み型)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4にモータ回転数1250 rpm(車速60 km/h相当)でのモータ効率とトルクを示す。これより、35JNP5は従来のJIS相当材(35A250; 35JN250に該当, $W_{15/50} \sim 2.25$ W/kg, $B_{50} \sim 1.67$ T)適用時に比べトルク、効率共に向上していること

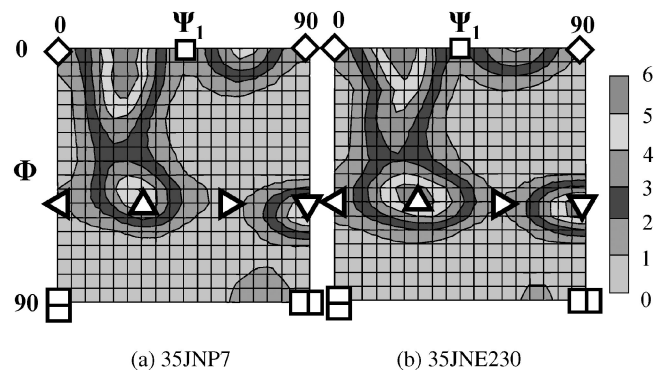


図3 再結晶集合組織の比較.

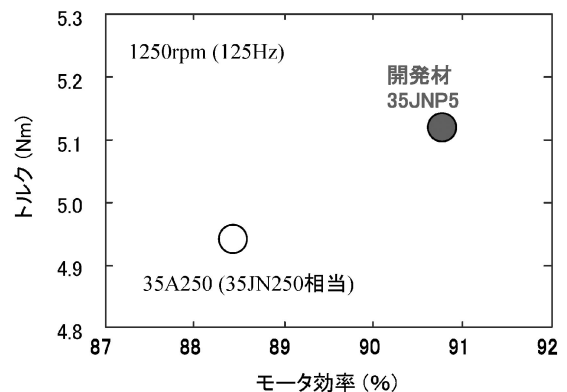


図4 開発材と比較材適用時のモータ特性比較 (IPM).

がわかる。

また、開発材のうち 35JNP7 は HEV モータのコア材料としても優れた特性を有しており、既に市販の HEV に採用されている。

5. 誘導モータへの適用

前述のように、誘導モータ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、ブラシレス DC モータに比べて銅損比率が高く、素材 B_{50} 改善による高効率化の効果がより強く現れると考えられる⁽²⁾。したがって、図2に示すように、開発材は JNE に比べても大幅に B_{50} が改善されているため、開発材を鉄心材料として用いた場合誘導モータの効率向上が期待できる。

上記の B_{50} 改善が誘導モータ効率に及ぼす効果を出力 400 W の小型モデルモータ (3 相 6 極誘導機) を用いて評価した。通常、産業用機械等の誘導モータ用鉄心材としては 0.50 mm 厚材が多く使用されるため、開発材 50JNP5, 50JNP7 と従来材 50JNE300 ($W_{15/50} \sim 2.70$ W/kg, $B_{50} \sim 1.69$ T) の3種を打抜きのままステータ鉄心に使用して比較試験した。入力電圧波形は正弦波とし、電圧波高値と周波数を可変として鉄心の磁束密度(無負荷時)を制御し、モータ効率を測定した。

開発材 50JNP5, 50JNP7 使用モータの従来材 50JNE300 に対する効率差の動作磁束密度依存性を図5に示す。動作磁束密度が 1.4 T 以下の場合には 50JNP5, 50JNP7 による効率改善効果は小さいが、1.6 T 以上では高磁束密度ほど効率の改善が大きく、特に 50JNP5 では 1%以上の効率改善が得られている。他の回転数・トルク条件においても、一定値以上の磁束密度において効率が改善される傾向となる。

このように素材 B_{50} に伴う効率差が高磁束密度ほど顕著となる原因としては、高磁束密度ほどエネルギー損失に占める銅損比率が高く、 B_{50} 向上による銅損減少の効果がより強く現れることが主たるものと考えられる。

以上の実験結果から、開発材 JNP5, JNP7 による誘導モータ効率向上の効果は、より高磁束密度の設計において大きく現れると予測され、特に体格の大きい大型高電圧モータ

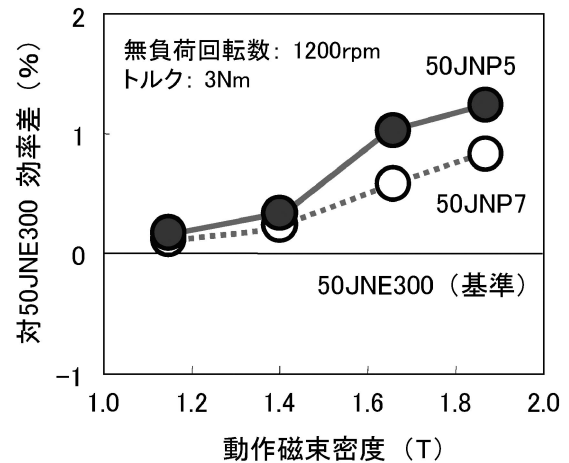


図5 JNP, JNE 使用誘導モータの効率比較。

や、さらに小型化・高トルク化が要求されるモータに有利に適用できると考えられる。

6. ま と め

開発した 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 EV, HEV のモータコア材に好適であり、既に量産車種にも適用されている。また、コンプレッサー等のブラシレス DC モータ、更には誘導モータ用としても有望であり、それらの高効率化によって、地球環境問題の解決に大きく貢献すると期待される。

なお、新製品に関わる特許は、約10件以上が公開・出願されている。

文 献

- (1) 定廣健一, 後藤聡志, 上ノ蘭 聡: JFE 技報, No. 8, (2005年5月), 1-6.
- (2) 石田昌義, 志賀信勇, 定廣健一: 川崎製鉄技報, **34**, (2002), 90-95.
- (3) H. Toda, K. Senda and M. Ishida: IEEE Trans. Magn., **41**, (2005), 3937-3939.
- (4) 尾田善彦, 志賀信勇, 河野雅昭, 本田厚人: 平成21年電気学会全国大会, (2009), 2-S5-5.