

1 緒 言

自動車にはスタータ、オルタネータなどの始動、充電系をはじめとして、駆動制御、空調系や内外装機器に多種多様のモータ、電装品が用いられており、その数は大衆車クラスで約 20 個、高級車では 60 個以上に達している¹⁾。これらの電装品のコア材料としてはこれまで SPCC クラスの冷間圧延鋼板が多く用いられてきた²⁾。

近年では、環境問題への対応として、電気自動車 (EV) やハイブリッド車 (HEV) など主駆動系の電動機化が注目され、一部の車種では実用化段階にある。主駆動系以外でも、従来油圧式であったパワーステアリングの電動化により、数% の燃費改善が図れることから電動パワーステアリング搭載車が増加している。さらに、自動車電源の標準電圧を 1A

し、各種自動車電装品に適する電磁鋼板を提案する。

2 電磁鋼板の打抜加工性

金型摩耗や型かじりなどプレス打抜性には、金型材質やクリアランス設定など装置要因の影響が大きいですが、電磁鋼板の素材特性も影響しており、特に金型摩耗に対しては表面に塗布されたコーティングの影響が大きい。

コーティングは鋼板積層時の渦電流損の発生を抑制するため層間絶縁性を付与する目的で塗布されるが、その他にも溶接性や歪取り焼鈍時の耐熱性など、用途に応じてさまざまな特性が要求される。これらの要求に対し川崎製鉄では、種々の無方向性電磁鋼板用コーティングを開発しており、その一例を図 1 に示す。図 1 にこれらのコーティングを施した電磁鋼板の連続打抜試験結果を示す。金型が摩耗すると鋼板打抜き端面のかえり（バリ）が大きくなるため、かえり高さを打抜性の評価指標として用いた。無機被膜の D コートは優れた溶接性と絶縁性を有するが、かえり高さ 50μ

方が 0.35 mm 材よりも広い。この打抜加工による硬化領域を種々の素材について同様に評価した。図 3 に素材硬度との関係で整理して示した。0.50 mm 材では素材硬度に関わらず端面から 250 ~ 300 μm の領域まで加工歪の残留が認められる。一方 0.35 mm 材は 0.50 mm 材より歪蓄積領域が狭く、かつ硬度が高い素材ほど歪蓄積領域は小さくなる。

幅 30 mm の試験片を磁気測定後、2 分割（切断幅 15 mm）から 9 分割（同 3.3 mm）となるよう剪断して再度測定し、加工歪による磁気特性の変化を評価した。図 4 に剪断による鉄損変化の一例を示す。剪断幅の減少にともない鉄損劣化しており、特に剪断幅 10 mm 以下での劣化が大きい。図 4 は種々の電磁鋼板素材について、幅 30 mm の単板磁気測定試験片を幅 5 mm に分割した場合の鉄損劣化量を素材硬度との関係で整理したものである。幅分割により、0.50 mm 材では素材硬度によらずほぼ同程度の鉄損劣化を生じるのに対し、より板厚の小さい 0.35 mm 材や 0.20 mm 材では劣化量が小さくなり、かつ素材硬度が高いものほど劣化が抑制される傾向にある。これは Fig. 4 に示した端面加工硬化の結果と良い相関が見られることから、板厚が薄い素材の方が剪断時の変形領域が狭いため、かつ高硬度材ほど剪断変形量が減少するためと考えられる。

4 加工歪がモータ特性に及ぼす影響

川崎製鉄では、さまざまなモータタイプに対応したモータ評価装置を開発し、モータ特性に及ぼす鉄心素材の影響を検討している⁶⁻⁸⁾。ここでは、プレス打抜きにより導入された加工歪がモータ特性に及ぼす影響を、ブラシレス DC モータ評価装置を用いた評価、および打抜加工歪の影響を考慮した磁界解析計算により検討した結果⁹⁾を紹介する。

試験モータは 3 相 8 極 12 スロットの表面磁石型ブラシレス DC モータ（定格出力 300 W）を用いた。ステータコアに 50RM230（板厚 0.50 mm, $W_{15/50} = 2.16 \text{ W/kg}$, $B_{50} = 1.67 \text{ T}$ ）を用い、打抜きままの状態、および 750°C で 2 h の歪取り焼鈍後の状態でモータ特性を測定した。ここで 50RM230 は鋼板製造工程で十分高温の仕上げ焼鈍を行っており、歪取り焼鈍では結晶粒成長が起これずに打抜端部の加工歪のみが解放されるとみなせるので、両者を比較することで加工歪の影響を評価できる。一方、磁界解析は加工歪を考慮しない場合と、図 5 に示すようにティース幅 9 mm のうち、加工端部から幅 0.25 mm の領域を加工歪導入領域とした場合を計算し、両者を比較した。端面近傍の導入歪量は連続的に変化しているが、ここでは簡単のためにここで 図 5 杯比較 表 4 # 鋼 図 5 解 説 取 引 歪 積 % は 簡 単 ため

タで歪み取り焼鈍なしで使用される場合には、加工歪による磁気特性劣化抑制の観点から、(1) 薄板厚で、(2) 打抜性を阻害しない範囲 ($Hv 1 \leq 200$) で比較的高硬度である材料が有利であるといえる。

図 10-11 に川崎製鉄の無方向性電磁鋼板製品群の一例を示す。RMHE シリーズは Si, Al, Mn などの主要元素の添加量最適化、介在物制御、集合組織制御などの技術により、素材硬度レベルを 200 ポイント以下に抑制しつつ、JIS グレード品である RM シリーズの同一硬度レベル材に対し低鉄損と高磁束密度を両立した製品群である。中でも最高級グレードである 35RMHE230 は良好な打抜加工性を有しつつ、加工による磁気特性劣化が抑制できると考えられる。また、高磁束密度素材を使用したモータは低磁束密度材のモータと比較すると、同一体格では高トルクとなり、同一トルク設計とすると小型化が可能となる。自動車電装品ではトルクが重視される場合が多いことに加え、設置スペースなど設計上の空間制約が大きく小型化の要求も強いことから、高磁束密度材が有利となる用途と考えられる。

5 自動車電装品用鉄心素材の提案

5.1 駆動用モータ

EV, HEV などの主駆動および補助駆動用モータに関して、種々のモータタイプが検討されているが、これまでのところ日本においてはブラシレス DC モータが主流となっている¹⁰⁻¹²⁾。これは、(1) 低速域でも効率が良いので、発進、停止を繰り返す日本の都市部での走行環境で有利である、(2) 日本は優れた磁石製造技術を有しているため高性能な磁石の使用が可能であり、小型軽量、高効率化が図れることが主な理由と考えられる。

ブラシレス DC モータは、ロータに希土類磁石などの強力な磁石を添加することで

5.2 電動パワーステアリング用モータ

エンジン運転中に常時油圧ポンプが駆動している従来の油圧パワーステアリングに対して、電動パワーステアリング (EPS) はハンドル操舵時のみにモータを駆動しトルクアシストする方式であり、約 3~5% の燃費向上が可能となる¹⁴⁾ため、近年急速に普及している。開発初期は軽自動車への搭載であったが、順次リッターカーや普通車クラスなど適用車種が大型化しており、モータの必要出力も大きくなっている。ところが、大出力化のためモータサイズが大きくなると、ロストルク、トルクリップルなども増大するため、操舵感が悪くなる傾向がある。このうちロストルクはロータ/ステータ間に発生する磁気的作用の影響が大きいことから、高出力 EPS モータ用の電磁鋼板には特にヒステリシス損の小さい材料が求められている。

Fig. 12 に素材の硬度レベルと励磁磁束密度 1.5 T におけるヒステリシス損 W_h の関係を示す。素材のハイグレード化にともない、ヒステリシス損は低下する傾向にある。これは、Si, Al などの添加量の多いハイグレード材は、高温でもフェライト単相組織であるため高温焼鈍による結晶粒成長が可能となること、鋼の高純度化レベルがより厳しく管理されていることなどにより磁壁の移動を妨げる結晶粒界や鋼中介在物が減少しているためである。加えて RMHE シリーズでは、磁壁移動しやすい方位に集合組織が制御されており、より低いヒステリシス損を示している。ところで、Fig. 6 で示した加工歪による鉄損劣化はほぼヒステリシス損の増加によるものであるため、打抜後に歪取り焼鈍を施すことが推奨される。しかし生産上の制約などにより打抜加工ままで使用される場合には、クリアランスなど金型調整を十分に行ったうえで、加工歪の影響を比較的軽減できる板厚 0.35 mm で素材硬度が高い素材 (35RMHE230 など) を用いることが望ましいと考えられる。

5.3 分割モータ

ステータ銅線の集中巻き方式は従来の分布巻き方式と比較して、巻線作業の効率化とともに、巻線長が短いためコイルエンド部の小型化と銅損の低減が可能となるといった利点があるため、近年採用例が増加している。一部の集中巻きモータではさらにステータを分割コアとし、巻線占積率の向上や効率化を達成した囀岡

使用される電装品コアには有利である。

- (3) 駆動用モータ，EPS モータなどの用途には，良好な打抜性，高磁束密度および低鉄損を兼ね備えた無方向性電磁鋼板

RMHE および RMHF シリーズが，分割コア用途には，加工性と異方性を改善した新方向性電磁鋼板 RGE が適していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 竹村芳孝，田原和雄，川口 仁：電気学会回転機研究会資料，RM-00-166, (2000)
- 2) 河野正樹，藤山寿郎，青木哲也：川崎製鉄技報，(2002)2, 96
- 3) 寺谷達夫：電学論 D，121(2001)4, 433
- 4) 小森ゆか，足立重好，寺嶋 正：川崎製鉄技報，2 (1997)3, 187
- 5) R. M. Bozorth: "Ferromagnetism", D. Van Nostrand Comp. Inc., (1951), 40
- 6) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, 12(1990), 141
- 7) 本田厚人，佐藤圭司，石田昌義，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-97-148
- 8) 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，<http://www.wpi.tytl.ac.jp/TPG0403/tpg0403/w3/w3index.html>