

ハイブリッド / 電気自動車の駆動モータ用電磁鋼板

Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electric Vehicles

藪本 政男^{*(1)} 開道 力^{*(1)} 脇坂 岳 顕^{*(2)} 久保田 猛^{*(3)}
 Masao YABUMOTO Chikara KAIDO Takeaki WAKISAKA Takeshi KUBOTA
 鈴木 規之^{*(4)}
 Noriyuki SUZUKI

抄 録

電磁鋼板はハイブリッド電気自動車(HEV)や電気自動車(EV)の駆動モータの鉄心に用いられ、HEV/EVの性能に影響を及ぼす。駆動モータの小型軽量化、高効率を実現するために、電磁鋼板には多くの要求がある。これらの要求を実現するためには、最適性能の電磁鋼板の開発とともに、最適な電磁鋼板の利用技術が必要である。

Abstract

Electrical steel sheet is used for the core of traction motors of hybrid electric vehicles (HEV) and electric vehicles (EV), and affects performance of HEV/EV. In order to make motors to be small, light, powerful and efficient, there are many demands to electrical steel sheet. To realize these demands, development of electrical steel sheets with suitable qualities and suitable application techniques of electrical steel sheet are required as well.

1. 緒 言

21世紀の自動車には地球環境へのやさしさが求められている。地球温暖化の原因となる排出ガスを抑制し燃費を良くするために、ガソリンエンジンと電気モータを併用するハイブリッド技術が開発され、1997年に世界最初の量産型ハイブリッド電気自動車(HEV)が実用化され、更に車種拡大が進められてきた。電気モータはエンジンに比べると応答性がよく精密なトルク制御が可能であることから、HEVは地球環境への対応とともに優れた駆動性能が求められるスポーツ車種への展開が図られている。2003年中には米国においてもHEV生産が始まることから、日本が開発したHEVが世界的な潮流になってきた。また、有害物質を全く排出しない次世代の燃料電池自動車(FCEV)も世界に先駆けて2002年12月に国内で実用化された。

これらのHEVやFCEVなどの電気自動車(EV)の駆動モータ(以

後、EV駆動モータと記す)は従来車のエンジンに替わる駆動機構の心臓部であり、電磁鋼板はその鉄心素材としてEVの駆動性能や燃費の改善に大きく貢献する重要な機能材料である。ここでは、EV駆動モータの高性能化を支える電磁鋼板の最新材料および利用技術について述べる。

2. EV駆動モータ用電磁鋼板への要求

EV駆動モータには、表1¹⁾のような種類のモータがありそれぞれの特徴を有しているが、現在生産されているHEVにはすべて永久磁石同期モータ(PM)が搭載されている。ここでは、PMモータを例に電磁鋼板への要求を述べるが、他種モータにおいても鉄心用の電磁鋼板への要求は強い。

図1はEV駆動モータに要求される駆動特性を模式的に示すとともに、鉄心に使用される電磁鋼板への要求特性を示している。

表1 EV駆動用モータの種類と特性¹⁾

Motor type		DC	Induction	Synchronous (PM)	Switched reluctance
Motor properties	Max. efficiency (%)	85-89	94-95	95-97	< 90
	Efficiency (load 10%) (%)	80-87	79-85	90-92	78-86
	Max. revolution (rpm)	4,000-6,000	9,000-15,000	4,000-10,000	< 15,000
	Cost/ torque (\$/kW)	10	8-12	10-15	6-10
	Costs of controller	1	3.5	2.5	4.5
	Rigidity	Good	Best	Good	Good
	Reliance	Good	Best	Good	Good

^{*(1)} 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2317

^{*(3)} 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員

^{*(2)} 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員(現 人事・労政部)

^{*(4)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主幹研究員 工博

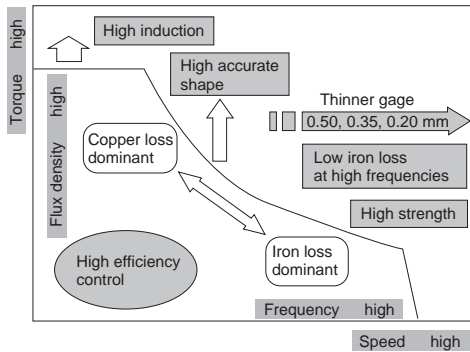


図1 EV要求性能とEV駆動モータ用電磁鋼板への要求

EV駆動モータには起動時の高トルクと最高速度に対応する高回転数、実効的な燃費に関わる高周波走行領域での高効率などが要求される。更に、モータは狭いスペースに収め小容量の電池で駆動するために、他用途のモータ以上に小型軽量化および高効率が求められる。

モータの高トルク化のためには、モータ巻線に流す駆動電流を大きくするとともに巻線と鎖交する磁束を大きくすることが重要であり、電磁鋼板には与えられた磁界強度に対する高磁束密度、すなわち高透磁率が要求される。また、磁束を大きくするためには、ロータとステータの間の空隙を狭くして磁気抵抗を低くすることが有効であり、電磁鋼板には高い加工性も要求される。

モータの小型化のためには回転数の増加が有利であり、駆動電流の周波数が高くなるため、鉄心電磁鋼板には高周波励磁下での低い鉄損が要求される。ロータを高速回転する場合には大きな遠心力が作用するため、ロータに使用される電磁鋼板の強度が不足すると破壊に至る危険がある。特に、ロータに穴を開けて磁石を挿入するIPMモータでは、構造上、磁石を保持する部分の強度確保が非常に重要な課題となる。

実効的な燃費低減のためには使用頻度の高い駆動領域(中レベルの磁束密度と周波数)における低鉄損や磁化特性向上が重要である。HEV用の駆動モータにおいて、エンジン駆動に切り替えて駆動電流が流れない状態でモータが空転する場合には、空転時の損失抑制の点から低鉄損であることがより重要視される。

3. EV駆動モータに適した電磁鋼板

モータの鉄心素材には電磁鋼板の他に6.5%SiやCo-Fe合金、Ni-Fe合金などがあるが、EV駆動モータに要求される特性を電磁鋼板より安価にバランスよく要求を満たす鉄心素材は技術的に難しい³⁾。実用的には無方向性電磁鋼板(NO)⁴⁾が使用される。方向性電磁鋼板(GO)⁵⁾も使用可能であるが、材料特性に応じた工夫が必要である。

図2に、NOの磁化特性を制御する主要な材質因子を示す。高純

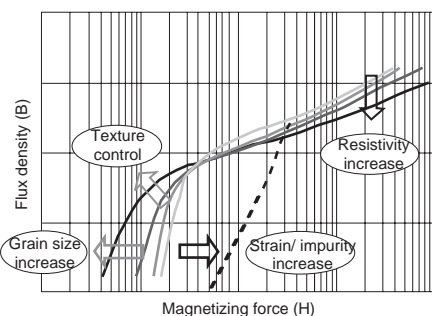


図2 電磁鋼板の磁化特性と主要な材質因子

度化、合金成分の調整、結晶方位制御や結晶粒径の制御などにより、EV駆動モータにおける磁化特性の要求に対応できる⁵⁾。Siなどの合金成分を増加すると電気抵抗が増加し、鋼板内での渦電流が抑制されるため鉄損は低減するが⁶⁾、同時に飽和磁束密度を低下させるため、鉄損と飽和磁束密度のバランスをとる必要がある。鋼板に至や応力を残留させると内部の磁区が複雑化して磁化特性を劣化させるとともに鉄損を増加させる^{6,7)}。板厚も鉄損に大きく影響し、板厚を薄くするほど渦電流が抑制され鉄損が下がるが、薄くしすぎると鉄損はかえって増加する⁸⁾。

EV駆動モータ用電磁鋼板の要求にこたえた新しい電磁鋼板シリーズが開発された。図3に、磁束密度B50(5000A/mの磁化力で0.50mm厚の磁束密度)を向上させた高効率電磁鋼板シリーズの磁気特性例を、従来材(50Hシリーズ、35Hシリーズ)との比較で示す。同じ鉄損W10/400(1.0T, 400Hzの励磁下での鉄損)に対してB50が向上し、トルクの上上が期待できる。図4に、高周波励磁下での低鉄損を実現

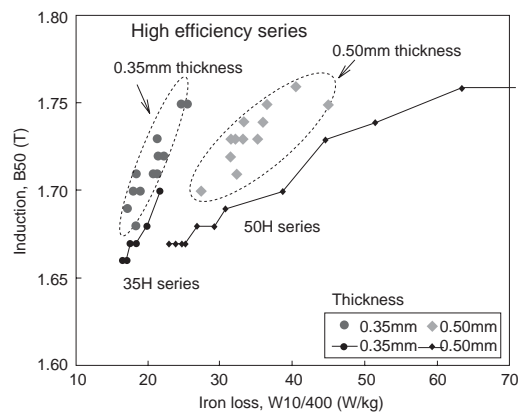


図3 高効率電磁鋼板シリーズの磁気特性

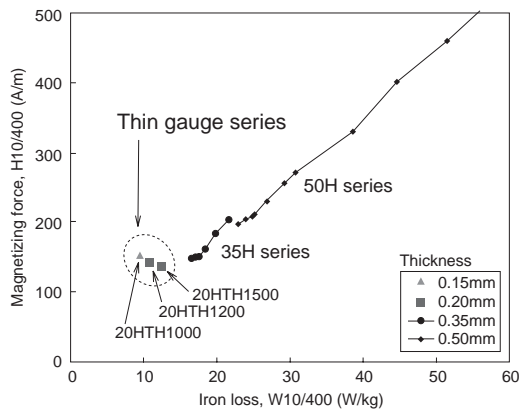


図4 高周波用薄手電磁鋼板HTHシリーズの磁気特性

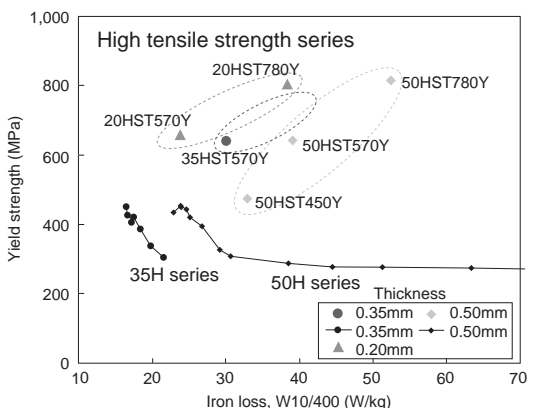


図5 高張力電磁鋼板HSTシリーズの磁気特性

した高周波用薄手電磁鋼板シリーズを示す。0.50mm厚および0.35mm厚の従来材に比べ薄手化により磁化力H10/400の劣化を抑えながらW10/400の低減が実現されている。図5に、高速回転ロータ用途に適した高張力電磁鋼板シリーズを示す。W10/400の増加を最小限に抑えながら、従来の2倍以上の耐力を実現している。

4. EV駆動モータの性能を支える利用技術

電磁鋼板の素材特性は国際標準規格の測定法(IEC60404-2)に基づき、無応力状態、均一の特定方向交番磁界、磁束波形が正弦波などの条件下で測定されるが、実際の鉄心の使用状態は図6に示すように以下の点で異なる。

- (1) 鉄心構造と磁化特性の非線形性により磁束が不均一となり磁束密度分布を持つ。
- (2) ロータの回転に伴い鉄心の一部において磁束が回転する。
- (3) 鉄心打抜き加工や鉄心固定による歪、応力が残留する。
- (4) 鉄心歯部間の巻線スロットの存在により空間高調波が存在する。
- (5) 電源のインバータ回路により時間高調波が存在する
- (6) 磁石の作る界磁磁束と巻線電流の作る電機子磁場が重畳する。
- (7) 鉄損や銅損による鉄心の温度上昇があり、冷却方法に依存して温度分布が発生する。
- (8) 鉄心端面の接触やかかしめによる積層鉄心の絶縁短絡箇所に誘導電流が流れる。

これらの要素は鉄損増加要因となる⁹⁾。素材鉄損に比べ鉄損増加率が著しい場合には、素材を低鉄損電磁鋼板に変えても鉄心の鉄損が変わらないことがある。

これらの鉄損増加要因の中で(3)歪、応力は主にモータ製造工程において電磁鋼板に導入され、鉄損増加の影響が大きい。図7は、同工程における歪、応力の導入状況を模式的に示している。鉄心をプレス加工で打抜くことにより鉄心の輪郭に沿って塑性歪が導入される。打抜いた鉄心を積層し固定するためにかかしめや溶接などが行われるが、これらも鉄心に局部的な歪、応力を残す。鉄心を歪取り

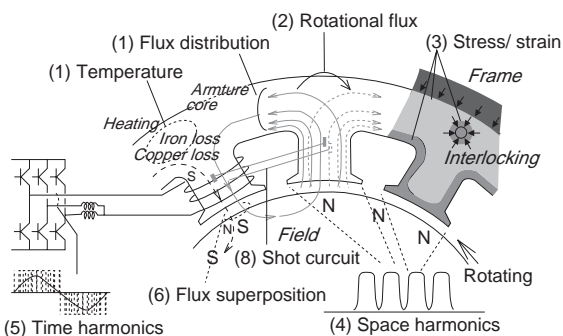


図6 実際のモータ鉄心における鉄損増大要因

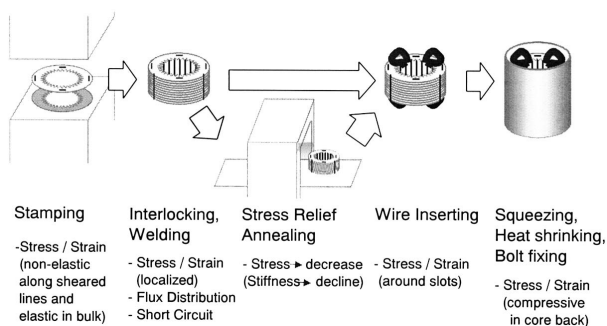


図7 鉄心製造工程での鉄損増大要因

焼鈍することによりこれらの歪、応力をほぼ取り除くことが可能である。鉄心への巻線挿入によっても応力がかかる可能性がある。鉄心をモータケースに固定するために圧入や焼嵌めが行われる場合には鉄心全体に大きな圧縮応力を残留させる。

図8は、打抜き端面の断面写真および数値計算により得られた歪の導入状況を示している。切断端面に沿って板厚と同程度の深さまで強い圧縮歪が入り、残りの鉄心にはこれとつりあう引張応力がかかる¹⁰⁾。図9は、打抜き加工による残留歪の鉄損への影響を、後述する回転鉄損シミュレータで解析した結果である。プレス加工で打抜いた鉄心の鉄損は、同じ形状に加工歪の影響を無視できるワイヤカット法で作製した鉄心と比べて鉄損が増加したが、歪取り焼鈍を行うと鉄損はワイヤカット法と同等以下に低減した。焼鈍により歪が開放されるとともに低グレード材(50H800, 50H1300)では結晶粒成長が起こり、鉄損はワイヤカット法よりも低くなった。打抜き加工による鉄損増加比率は、高グレード材(50H470)を用いた場合の方が低グレード材よりも大きい。

図10は電磁鋼板の鉄損に及ぼす弾性応力の影響を示している。圧縮応力により鉄損は著しく増加し、低磁束密度ほど増加率が大きい

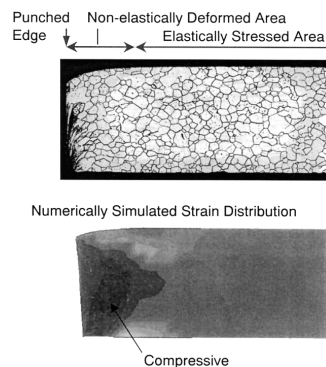


図8 打抜き端面の断面写真と数値計算された歪分布

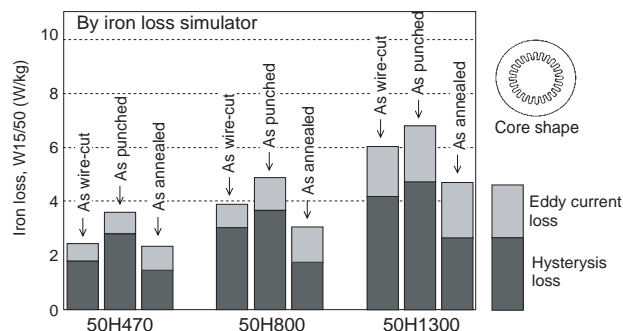


図9 打ち抜き加工による残留歪の鉄損への影響

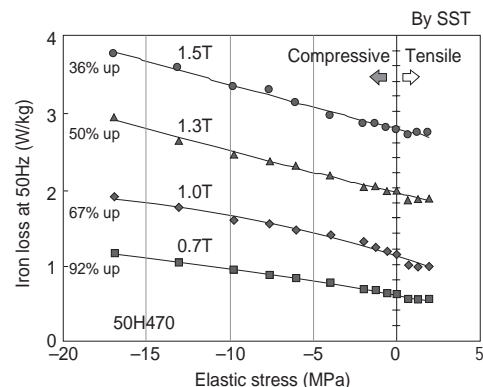


図10 電磁鋼板の鉄損に及ぼす弾性応力の影響

い。鉄心の圧入や焼嵌めによる圧縮残留応力が実際の鉄心での鉄損を大きく増加させていると推察される。また、かしめの位置によっては上述した(8)層間短絡による鉄損増加も大きいことが判明している¹¹⁾。

最近のモータ設計においては、数値解析などを用いて鉄心形状や励磁条件の最適化が行われる。鉄心性能を精度良く行うためには、図6に示したような実際の鉄心状態を考慮する必要がある。また、電磁鋼板の磁気特性は非線形であり、応力下での磁気特性の変化を考慮するためには、磁気特性の数値データベースを電磁鋼板供給元から入手する必要がある。更に、数値計算の精度を向上させるためには、計算結果と直接対比可能な鉄心の鉄損評価が必要である。図11に実際の鉄心の鉄損を直接評価するために新日本製鐵が開発した“回転鉄損シミュレータ”を示す¹²⁾。鉄心1枚から数枚の積層状態で鉄

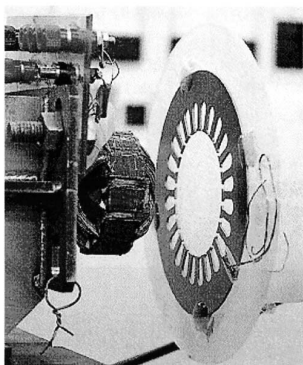


図11 回転鉄損シミュレータ

損を測ることが可能であり、モータ性能の向上に欠くことのできない評価手段となっている。

5. 結 言

EV駆動モータの小型軽量、高効率化に向けてモータ鉄心材料の電磁鋼板には多岐の要求がなされ、それにこたえて新しい電磁鋼板が開発された。EV駆動モータの鉄心設計および加工方法とEVの走行モードに合わせて最適な電磁鋼板を選定するとともに、電磁鋼板の特性をモータの実機において劣化させないための電磁鋼板利用技術の適用が重要である。

参考文献

- 1) 松瀬:平成5年度電気学会全国大会シンポジウム S.10-1, 1993
- 2) 堀洋一:平成7年度電気学会全国大会シンポジウム S.16-2-1, 1995
- 3) 開道力:電磁鋼板の最新情報/電気自動車の開発と材料.シーエムシー, 1999 p.120-129
- 4) 新日本製鐵カタログ:無方向性電磁鋼帯 .Cat. No. DE106
- 5) 新日本製鐵カタログ:方向性電磁鋼帯 .Cat. No. DE105
- 6) 新日本製鐵:わかる電磁鋼板 .Cat. No. DE101
- 7) 開道力 久保田猛 脇坂岳頭,他:No.7 MAGDAコンファレンス講演論文集(OS-4) AEM学会, 1998 p.199-202
- 8) 開道力 脇坂岳頭:電気学会論文誌A, 117(7), 685-690 (1997)
- 9) 開道力:モータ技術実用ハンドブック .日刊工業新聞社 2001 p.442-447
- 10) 開道力 茂木尚 河内毅 藪本政男 鈴木規之 石原好之:電気学会研究会資料 RM-02-96 2002
- 11) 開道力 茂木尚:マグネティックス研究会資料 ,MAG-02-137 2002
- 12) 開道力:電気学会研究会資料 RM-92-79 ,1992