

技術論文

ハイブリッド／電気自動車駆動モータ用電磁鋼板の最近の動向

Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electrical Vehicles

脇 坂 岳 顕*
Takeaki WAKISAKA

新 井 聡
Satoshi ARAI

黒 崎 洋 介
Yousuke KUROSAKI

抄 録

世界最初の量産型ハイブリッド電気自動車(HEV)が発売されてから15年がたち、市場の拡大、車種の増加に伴い、駆動モータ用電磁鋼板への要求特性も多様化してきた。電磁鋼板への要求特性を再整理し、電磁鋼板の開発及びその利用技術研究の最近の動向について報告した。

Abstract

15 years have passed since the first commercial hybrid electric vehicle (HEV) was sold. Meanwhile, the market has been expanding and the type of HEV/EV has been increasing, and then demands to electrical steel sheet for traction motor cores of HEV/EV has become diversified. In this paper, the demands to electrical steel sheet for traction motor cores of HEV/EV are reconfirmed, and then newly developed electrical steel sheet and the application techniques of electrical steel sheet are informed.

1. 緒 言

世界最初の量産型ハイブリッド電気自動車(HEV)が発売されてから15年がたった。その間、市場は拡大し、車種も増加してきた。また、電気自動車(EV)やプラグインHEVも本格的に製造されてきた。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なことから、その適用範囲の拡大が期待され、駆動モータ用電磁鋼板には、モータの駆動性能やシステム全体の燃費の改善に大きく貢献することが期待されている。ここでは、HEV/EV 駆動モータの高性能化を支える電磁鋼板の最新材料、及び利用技術について述べる。

2. ハイブリッド／電気自動車駆動モータ性能と電磁鋼板への要求特性

HEV/EV 駆動モータは、一般的なモータと異なり、起動時、登坂時の高トルク特性、最高速運転での高速回転特性が要求され、高頻度走行領域では高効率などが要求される。また、特にHEVではモータは限られたスペースに収められることが重要であり、さらにHEV/EVともにモータの低コスト化のためにも、小型軽量化が要求される(図1)。

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るが、モータ小型化のためには電磁鋼板には高磁束密度であることが要求される。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、電磁鋼板の加工精度も重要である。

モータの出力はトルクと回転数の積で表わされるため、トルクと比例関係のあるモータ体格を小型化し高出力を維

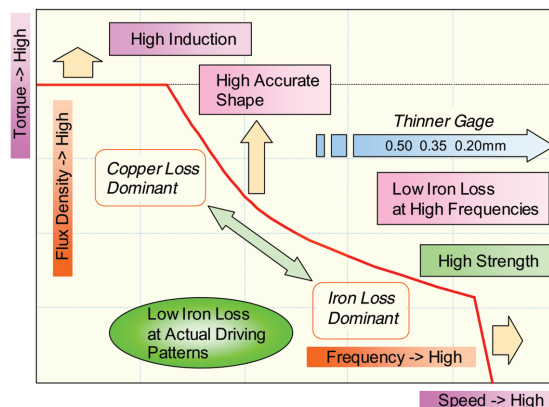


図1 HEV/EV要求性能と電磁鋼板への要求性能
Required properties for main motors of HEV/EV

持するには、回転数の増加が必要である。回転数が増加すると電磁鋼板の励磁周波数が高くなるため、電磁鋼板には高周波励磁下の低鉄損が要求される。また、高速回転するとロータ外周部に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には高強度が要求される。

上記要求に対し、新しい無方向性電磁鋼板シリーズを開発したり。図2に、モータ高トルク化のために、同じ鉄損でも磁束密度B50（5000 A/mの磁化力での磁束密度）を向上した高効率無方向性電磁鋼板シリーズの磁気特性例を示す。図3には、高周波励磁下での低鉄損を実現した、高周波用薄手電磁鋼板シリーズを示す。0.50mm厚、0.35mm厚の従来材に比べ、板厚薄手化により磁化力H10/400の劣化を抑えながら鉄損W10/400の低減を実現した。図4に

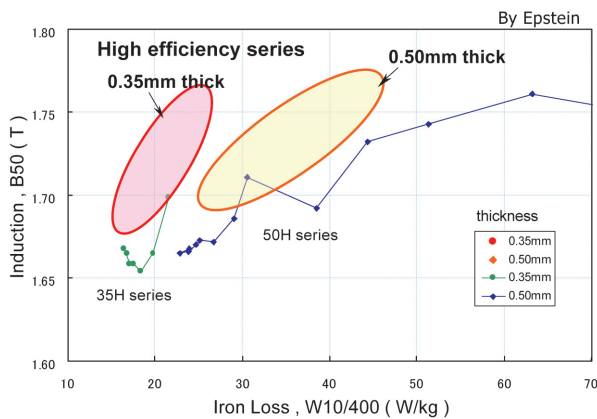


図2 高効率電磁鋼板シリーズの磁気特性
Magnetic properties of high efficiency series

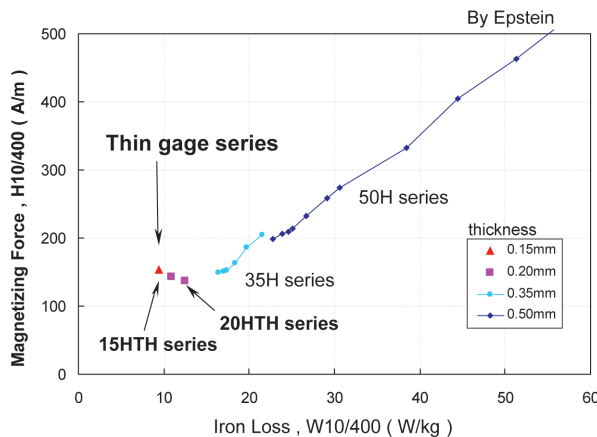


図3 高周波用薄手電磁鋼板シリーズの磁気特性
Magnetic properties of thin gage series

は、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。これらは、市販のHEV/EV駆動モータに採用されている。

3. 電磁鋼板磁化過程と主要材質因子

市販のHEV/EV駆動モータは、永久磁石をロータに埋め込んだIPMモータが主流だが、省レアアースの観点から誘導機(IM)、スイッチドリラクタンスモータ(SRM)の開発が進められており、一部車種では実際に採用されている。モータの種類や設計によって、モータコア用電磁鋼板への要求特性が異なる。例えば動作磁束密度に関しては、磁石モータでは部分的には飽和領域になっていても大部分は1T近傍で使われるが、IMではロータの二次導体に誘導電流を発生させるために高い1.5T程度で使われ、さらにSRMでは飽和に近い領域が使われている(表1)。

電磁鋼板の磁化過程は、最初に外部磁場の方向に近い180°磁壁が動き始める磁壁移動過程と、磁壁移動が完了した後さらに外部磁場方向に磁化が回転して行く磁化回転過程とに分けることができ、それぞれの過程で影響を与える素材因子が異なる。各磁化過程とそれに影響を与える素材因子を表2に示す。これらは鉄損中の主にヒステリシス損に影響を与えるが、鉄損にはさらに主に高周波数で顕著となる渦電流損があり、動作磁束密度、周波数によりこれらを最適に制御する必要がある(図5)。

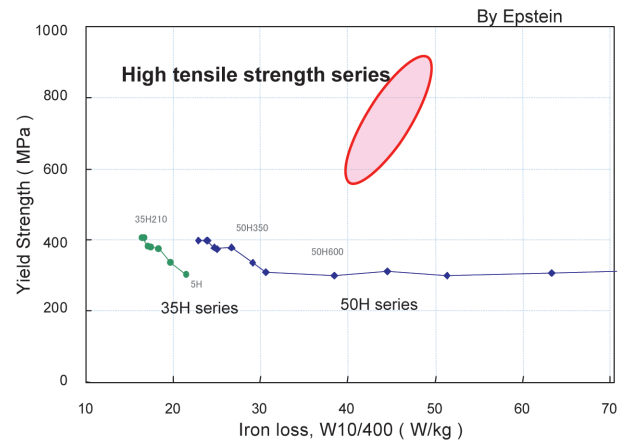


図4 高張力電磁鋼板シリーズの磁気、機械特性
Magnetic and mechanical properties of high tensile strength series

表1 主な駆動モータ用電磁鋼板と動作磁束密度
Properties of several type motors for HEV/EV

			Torque	Field	Armature	Flux density
IM			Lorenz force	Stator windings	Eddy current	High (~ 1.5T)
DC BLM	SPM	Ferrite	Lorenz force	PM	Stator windings	Low (~ 0.8T)
		NdFeB	Lorenz force + Reluctance torque			↓
	IPM		Reluctance torque			High (~ 1.2T)
SRM			Reluctance torque	Stator windings	—	High

表2 各磁化過程に影響する素材因子
Material factors to affect magnetization process

Magnetization process	Material factors
Domain wall moving	Grain boundaries (grain size)
	Precipitations
	Defect, strain
Magnetization rotation	Grain orientation (texture)
Magnetic saturation	Magnetic anisotropy constant
	Saturation magnetization

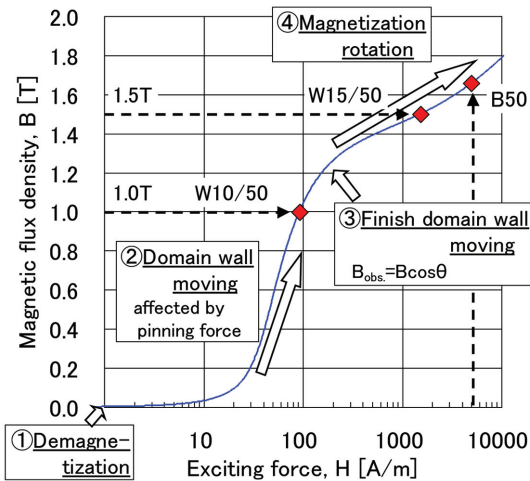


図5 電磁鋼板磁化曲線と磁化過程

Magnetization process of non-oriented electrical steel sheets

4. 無方向性電磁鋼板磁区構造と磁壁移動障害因子

方向性電磁鋼板は結晶粒径が数mm～数十mmであり、結晶方位が{110}<001>に強く集積した圧延方向に180°磁区が並んだ単純な磁区構造を示すが、無方向性電磁鋼板は結晶粒径が十数～数百μm程度であり、各結晶粒も比較的ランダムな方向を向いているため、複雑な磁区構造となる。結晶粒によっては、板厚を貫通する方向に磁化容易軸がある場合もあり、また板厚方向に磁区構造の異なる結晶粒が数～数十個あるため相互に影響しあって、さらに複雑な磁区構造となる。

図6に、無方向性電磁鋼板50H290を直径22mmの円板に打ち抜いた時の、表面から観察した磁区構造を示す³⁾。a)はかえり側から、b)はだれ側から観察した磁区構造写真であり、圧延方向、及び磁区観察方向は写真の左右方向である。図中に破線と矢印で示した加工影響領域は、そこから離れた加工歪みの影響を受けていない領域と比べて磁区構造が変化しており、その影響幅は板厚の約3倍であることが分かる。

5. モータ製造時の歪み・応力影響

電磁鋼板の磁気特性は、国際標準規格の測定法（IEC 60404-2）に基づき、無応力状態、均一の特方向交番磁界、磁束正弦波条件で測定されるが、実際のモータコアの

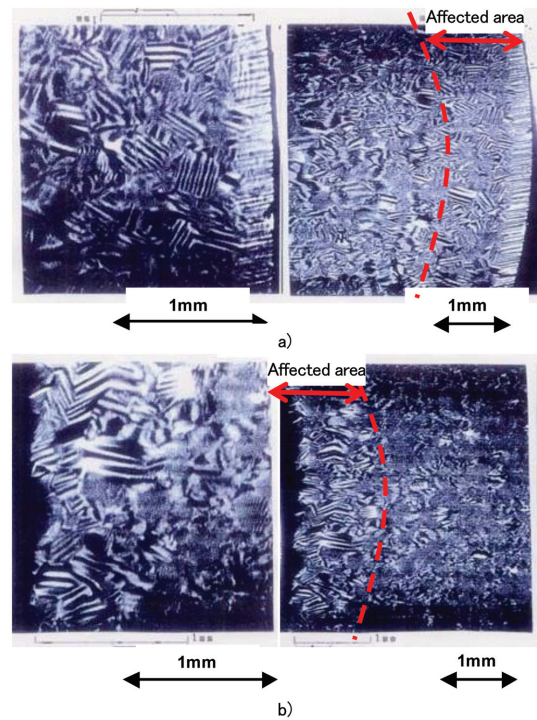


図6 無方向性電磁鋼板打ち抜き加工部の磁区観察写真
Magnetic domain patterns of punched NO

使用状態は、打ち抜き歪やコア固定による応力付与条件下、コア構造に起因する磁束不均一、ロータ回転に伴う回転磁界、制御高調波や空間高調波の存在による歪波励磁等、異なっており、これらの要素が鉄損増加要因となる³⁾。

この中で特に歪、応力は、図7に示すようにモータコア製造工程で不可避免的に導入されるものであり、鉄損増加に影響が大きい。図8に、放電加工と打ち抜きで外径120mm、24スロットのステータコアを作製し、回転鉄損シミュレータで鉄損を評価した例を示す³⁾。回転鉄損シミュレータは、鉄心1枚から数枚積層状態での鉄損を直接評価するために新日本製鐵が開発した装置である。素材によって鉄損増加代は異なるが、打ち抜き歪により鉄損が増加していることが分かる。

無方向性電磁鋼板の塑性歪による磁気特性劣化を評価するために、3%Siの無方向性電磁鋼板を冷間圧延した時の直流磁化曲線を図9に示す⁴⁾。冷間圧延する前の状態の磁

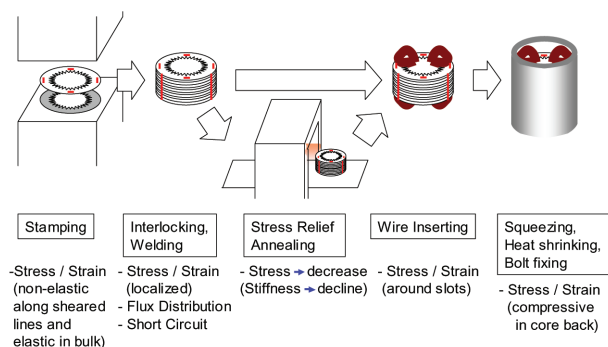


図7 モータ製造工程での鉄損増加要因
Iron loss deterioration in motor manufacturing process

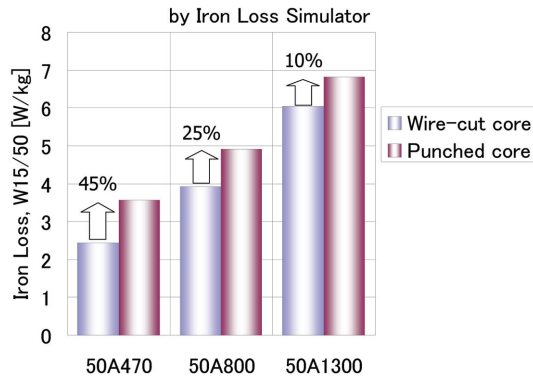


図8 モータコア打ち抜き加工による鉄損増加測定例
Effect on iron loss of motor core manufacturing stress

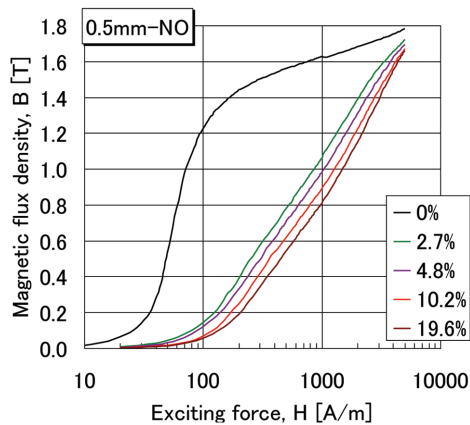


図9 無方向性電磁鋼板塑性加工時の磁化特性変化
Changes in magnetizing curve by plastic strain

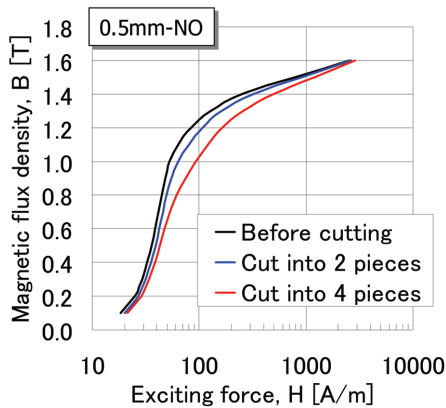


図10 無方向性電磁鋼板剪断時の磁化特性変化
Changes in magnetizing curve by shearing strain

化曲線に対し、2.7%の塑性変形を加えると磁化曲線の傾きが急激に小さくなり、透磁率 μ ($=B/H$) が小さくなっていることが分かる。塑性変形量を2.7%から19.6%まで増加させて行くと透磁率は徐々に低下する。

図10に3%Siの無方向性電磁鋼板を圧延方向に平行に剪断して2分割、4分割した時の直流磁化曲線変化を示す。冷間圧延ほどではないが、透磁率が低下し、一定の磁束密度を得るために必要な磁化力が増加していることが分かる。剪断端面近傍の加工硬化と同等の硬度を示した19.6

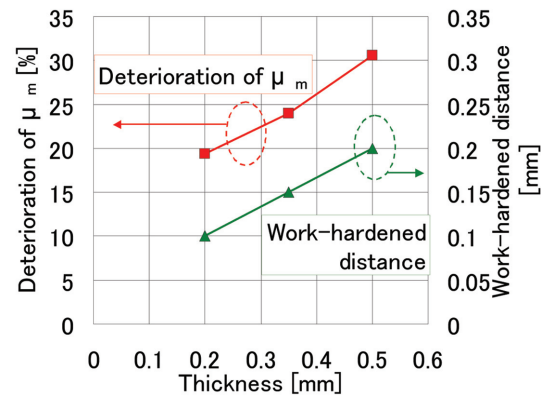


図11 無方向性電磁鋼板剪断歪み影響域推定結果
Assumption of affected area by shearing

%冷間圧延した材料の透磁率を用いて、剪断した時の透磁率低下領域を推定した結果を、同じく3%Siを含む0.2mm、0.35mmの無方向性電磁鋼板での結果と合わせて図11に示す。加工硬化領域は板厚の約1/2の領域であり、板厚に比例して減少している。全体の透磁率低下から計算された加工影響領域も板厚に比例して低下するが、その大きさは加工硬化領域より広く、板厚の数倍となっている。これは、磁区観察で得られた結果とほぼ同等である。

6. 歪み、応力、磁気異方性を考慮した電磁界解析

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。モータ性能を精度良く評価するためには、前述してきたような鉄損増加要因を考慮する必要がある。

一例として、磁気異方性、歪み、応力、時間高調波の影響を考慮した時のモータ鉄損解析結果を図12に示す⁹⁾。全て考慮しなかった場合の鉄損解析値と、全て考慮した時の鉄損解析値との差を100%とし、それぞれの項目のみを考慮した時の鉄損増加を比較すると、歪み、応力の影響が最も大きいことが分かる。また、無方向性電磁鋼板は、方向性電磁鋼板に比べると磁気異方性は小さいが、製造方法に影響を受けてある程度の磁気異方性が発現する⁶⁾。分割コアではコア構造によって磁気異方性の影響が強くなることも分かっており⁷⁾、数値解析においては歪、応力下での磁

Analysis condition	Anisotropy	×	○	×	×	○
	Stress	×	×	○	×	○
	Harmonics	×	×	×	○	○
Iron loss contour maps						
Contribution			10%	50%	40%	100%

図12 モータコア鉄損電磁場解析例
Analysis for iron loss in motor core with EV various conditions

気特性，角度別の磁気特性データを測定することで，より精度の高い結果が得られることが分かる。

7. 結 言

HEV/EV の市場拡大，車種増加に伴い，駆動モータ小型軽量化，高効率化が進展し，モータ鉄心用電磁鋼板は与えられた多岐の要求に対し新しい電磁鋼板が開発されてきた。電磁鋼板磁気特性は使用される条件によって，影響する素材因子が異なるため，駆動状態に合わせた電磁鋼板の選定が必要である。また，モータ性能は使用状態に影響されて特性が変化するため，コア構造，加工・固定方法，制御方法等を考慮した数値解析でモータ性能を評価することも重要である。

参考文献

- 1) 藪本政男, 開道 力, 脇坂岳顕, 久保田猛, 鈴木規之: 新日鉄技報. (378), 51-54 (2003)
- 2) 開道 力, 茂木 尚, 河内 毅, 藪本政男, 鈴木規之: 電気学会回転機研究会資料. RM-02-96, 1996, p. 11
- 3) 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
- 4) 脇坂岳顕, 新井 聡, 黒崎洋介: CAMP-ISIJ. 25 (1), 498 (2012)
- 5) 藤崎敬介, 平山 隆, 根本 泰: 新日鉄技報. (379), 70-74 (2003)
- 6) Shiozaki, M., Kurosaki, Y.: Textures and Microstructures. 11, 159 (1989)
- 7) 小川博久, 福田健児: Honda R&D Technical Review. 14, 25 (2002.10)



脇坂岳顕 Takeaki WAKISAKA
鉄鋼研究所 電磁材料研究部 主任研究員
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



新井 聡 Satoshi ARAI
鉄鋼研究所 電磁材料研究部 主幹研究員



黒崎洋介 Yousuke KUROSAKI
鉄鋼研究所 電磁材料研究部長 主幹研究員
工博