

連携記事

電気自動車用電磁鋼板の最近の動向

Recent Progress on Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Electric Vehicles

JFE スチール (株) スチール研究所 電磁鋼板研究部
主任研究員

尾田善彦 Yoshihiko Oda

新日本製鐵 (株) 技術開発本部 鉄鋼研究所
鋼材第一研究部 主幹研究員

久保田猛 Takeshi Kubota

1 緒言

電気自動車は1873年にイギリス人のロバート・ダビットソンによって開発され、その歴史はガソリン車より12年も古い。その後19世紀末から20世紀初頭にかけて電気自動車の生産量は増大し、1900年にはアメリカで生産される自動車の実に4割が電気自動車となるものの、ガソリン車が大量生産されるようになると電気自動車は表舞台から姿を消していった。しかし、1990年代以降、地球環境の観点から電気自動車が見直され、大学、企業等で多くの研究開発が行われた結果、実用的かつ魅力的な電気自動車が多数登場してきた。

電気自動車というガソリン車に比べて加速性能や最高速度で劣るというイメージを抱かれるかもしれないが、例えば、慶應義塾大学で開発されたEliica (エリーカ) は最高速度370km/h、スタートから時速160kmまでの時間が7.2秒であり¹⁾、その性能は市販の高性能スポーツカーを凌いでいる。実際に高性能電気自動車の強烈な加速を経験すると、従来の電気自動車のイメージは過去のものであることが実感できる。このような電気自動車の高性能化は電池、モータと

いった要素部品の急速な進歩によるところが大きい。例えば電池ではニッケル水素電池、リチウムイオン電池といったエネルギー密度、パワー密度に優れた電池が開発され一充電走行距離が大幅に改善されるとともに加速性能の向上にも寄与している。一方、モータではリラクタンストルク利用による高トルク化技術、高密度巻き線技術、高精度制御技術といった諸技術が開発されるとともに、磁石の高性能化により小型、高出力化が可能となった。

電磁鋼板も磁石同様モータの性能を左右するキーマテリアルであり、モータの要望特性に対応した様々な材料が開発されている。本稿では電気自動車用モータおよびコア材料である電磁鋼板に求められる性能について概説するとともに、それら要望特性に対応して開発された電磁鋼板の諸特性および材料を有効に活用するための留意点について述べる。

2 電気自動車の駆動方式

車がモータのみで駆動される、いわゆるPure EVをモータ配置の観点から分類した結果を図2に示す。(a)は従来車のエンジンをモータに置き換えたものであり、トランスミッションがある場合と無い場合があるが、基本的には従来車のドライブトレインをそのまま活用するというものである。(b)はデフを無くし、それぞれの後輪をモータで駆動する方式であり、ドライブトレインが簡素化できるとともに、各輪への動力分配も可能となる。(c)はモータをタイヤの中に組み込んだインホイールモータ方式である。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る。いずれの形式においてもギヤ方式とギヤレス方式が考えられるが、ギヤレス方式はトルク確保の観点からモータが大型化するものの、ギヤの機械損が低減できることから効率は非常に優れたもの



図1 Eliica (写真提供：慶應義塾大学、電気自動車研究室)

となる。なお、ここでは簡単のため、後輪の二輪駆動のみ示したが、前輪駆動や4輪駆動もある。

3 電気自動車用モータコア材料に求められる特性

電気自動車の駆動モータには、DCモータや誘導モータ、スイッチトリアクタンスモータをはじめ多くの種類が用いられるが、特にハイブリッド電気自動車では永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)が多く搭載されている。図3に、電気自動車モータに要求される駆動力特性を模式的に示すとともに、モータ鉄心素材として用いられる電磁鋼板への要求特性も示す²⁾。電気自動車モータには、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頻度走行領域での高効率等が

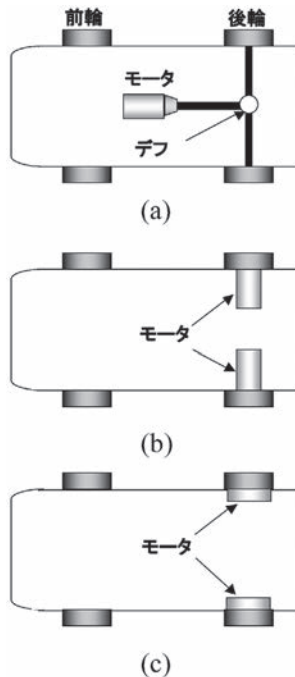


図2 電気自動車の分類（モータ配置の観点より）

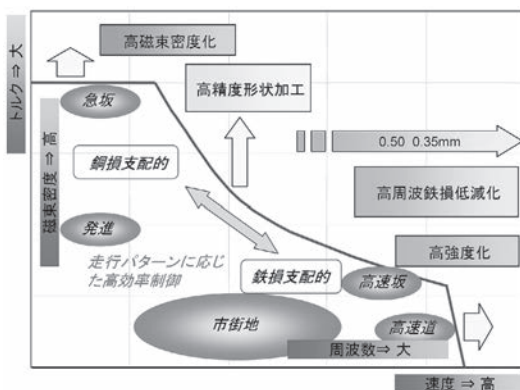


図3 電気自動車駆動モータ特性と電磁鋼板への要求性能

要求される。さらに、モータは狭いスペースに収納され小容量の電池で駆動されるため、他用途のモータ以上に小型軽量化、高効率化が求められる。

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、このためには、電磁鋼板に高い加工精度も要求される。

モータの小型化のためには回転数の増加が有利であるが、駆動電流の周波数が高くなるため、電磁鋼板には高周波励磁下での低鉄損が要求される。さらに、高速回転に伴いロータ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には低鉄損のみならず高強度が要求される。特に、ロータに穴を開けて磁石を挿入するIPM (Interior Permanent Magnet) モータでは、構造上、磁石を保持する部位の強度確保が非常に重要な課題である。

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。また、ハイブリッド電気自動車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観点から、低鉄損であることがより重要となる。

4 電気自動車用電磁鋼板

4.1 高トルクモータ用高磁束密度電磁鋼板

上記3章で述べた電気自動車の駆動モータへの要求性能、さらには、鉄心素材として用いられる電磁鋼板への要求特性に合わせるべく、高性能な無方向性電磁鋼板が開発されている。無方向性電磁鋼板の高性能化には、結晶方位制御や結晶粒径制御、さらには、高純度鋼化や鋼板内部歪み低減等により磁化特性改善（図4）、ヒステリシス損低減（図5）を図る

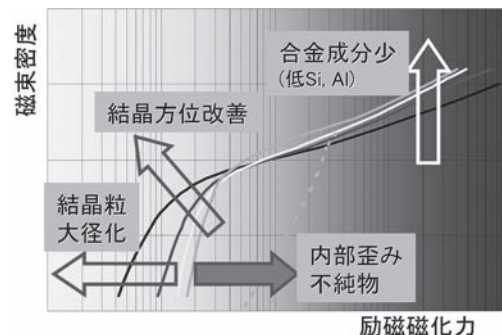


図4 無方向性電磁鋼板の磁化特性と主要な材質因子

必要がある。図6に、冷延一再結晶工程における結晶方位制御の一例を示す³⁾。冷延変形帯からの再結晶により、磁氣的性質に劣る{111}<112>再結晶を抑制し、磁氣的性質に優れる{110}<001>再結晶を促進することができる。また、SiやAl等の合金含有量調整により電気抵抗を制御し、かつ、結晶粒径最適化、板厚薄手化等により渦電流損低減(図5)を図ることも必要である。

このような技術により高トルクモータ用高磁束密度電磁鋼板が開発されている^{2,4-7)}。その磁気特性例を図7に示す^{2,4,5)}。従来材(JISグレード0.50mm、0.35mm)に比較し、同一鉄損W10/400でも磁束密度B50が高く、同様に、同一磁束密

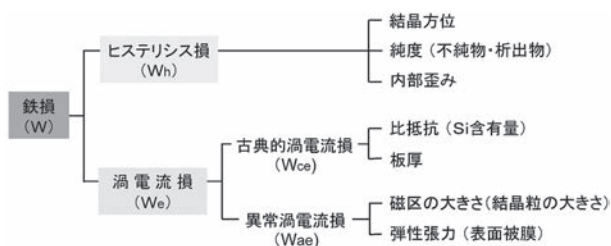


図5 鉄損の分類と材質因子

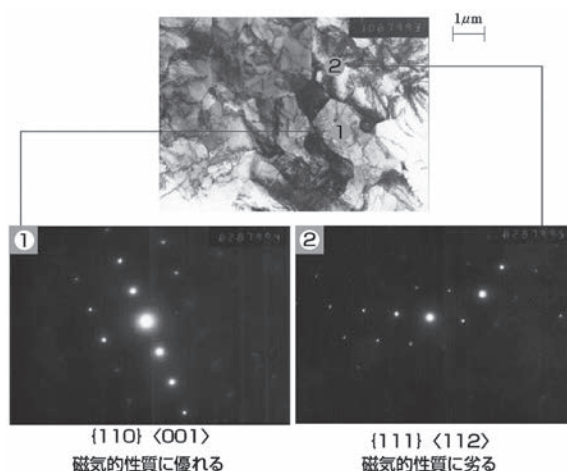


図6 焼鈍時における冷延変形帯からの再結晶

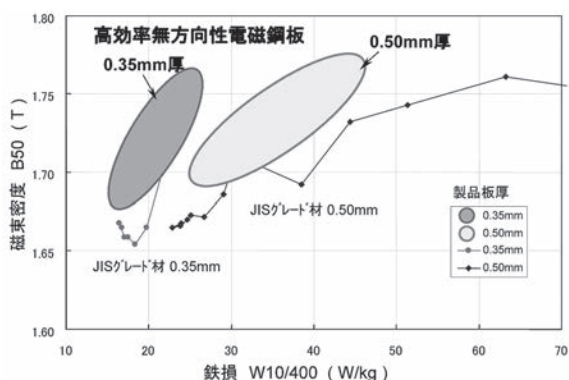


図7 高効率無方向性電磁鋼板の磁気特性

度B50でも鉄損W10/400が低く、モータの高トルク化、小型化に大きく寄与することが期待できる。

4.2 高周波モータ用電磁鋼板

4.2.1 薄電磁鋼板

電気自動車モータを小型・高出力化するためには高速回転させることが有効である。このためギヤを用いないダイレクトドライブモータのような高トルク型モータに対し、一方ではギヤを活用した小型、高速モータの開発も進んでいくものと予想される。モータを高速回転させた場合、コア材料として使用されている電磁鋼板の励磁周波数も高くなる。このため、高速モータ用の電磁鋼板には高周波鉄損低減が強く求められている。電磁鋼板の鉄損はヒステリシス損と渦電流損から構成されるが、このうち渦電流損は(1)式に示すように周波数の2乗に比例することから高周波励磁により急激に増大することとなる⁸⁾。

$$W_e = (\pi B_m f t)^2 / 6 \rho \quad \dots\dots\dots (1)$$

B_m : 最大磁束密度、 f : 周波数、 t : 板厚、 ρ : 固有抵抗

渦電流損を低減するためには、板厚低減と固有抵抗増大の二つの手法が考えられる。このうち、板厚低減は、飽和磁化の低下を招かないことから高周波鉄損の低減手法として好ましいものと言え、薄電磁鋼板の開発が行われている⁹⁻¹¹⁾。

図8に薄電磁鋼板の磁気特性例を示す。板厚0.35mmの最高級材に比べ、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。

薄電磁鋼板使用による高周波鉄損の低減効果は効率の向上だけでなく、モータの発熱量が小さくなることから永久磁石への熱負荷が小さくなりDy等の高価な希土類元素を含まない磁石の使用も可能になるものと考えられる。

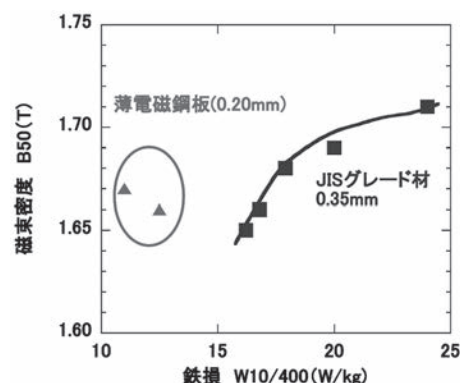


図8 薄電磁鋼板の磁気特性

4.2.2 高けい素鋼板

鋼板の固有抵抗を高めるためにはSi添加が効果的であるが、特にSiを6.5%添加した場合には、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は1950年代より知られていた¹²⁾。しかし、Si添加量が増加すると材料の伸びが急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難となるため、従来の最高級けい素鋼板ではSi添加量は3.5%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%けい素鋼板が量産されるようになった¹³⁾。

表1に6.5%けい素鋼板の磁気特性を示す。6.5%けい素鋼板の鉄損は同じ板厚の方向性電磁鋼板よりも低く、特に磁歪が非常に小さいのが特徴である。また、アモルファスと比較すると熱的安定性および磁歪の点で優れている。

6.5%けい素鋼板は高周波鉄損が低く、騒音が小さいことから高周波リアクトル等に広く使用されているが、高速モータ用のコア材としても優れた特性が期待できる。図9に6.5%けい素鋼板、薄電磁鋼板および35A230を用いて作製したモデルモータ(IPMモータ、4極、分布巻き、最大出力2kW)の特性を示す¹⁴⁾。6.5%けい素鋼板を用いることにより薄電磁鋼板よりも更に高い効率が得られており、その効果は高回転域になるほど大きくなる。

さらに、CVDプロセスを用い図10に示すように板厚方向のSi濃度を鋼板表層部で高めることにより高周波鉄損を低減した傾斜磁性材料も開発されている。図11に傾斜磁性材料の磁気特性を6.5%けい素鋼板と比較して示す¹⁵⁾。10kHz以上の周波数領域では6.5%けい素鋼板を凌ぐ低鉄損特性を示すことがわかる。これは図12に示すようにSi分布最適化により渦電流損が低下したためである¹⁶⁾。

表1 6.5%けい素鋼板の磁気特性

材料	板厚 (mm)	飽和磁化 (T)	鉄損(W/kg)		最大透磁率	磁歪 $\lambda_{10/400}(\times 10^{-6})$
			$W_{10/400}$	$W_{1/10k}$		
6.5%けい素鋼板	0.10	1.80	5.7	8.3	23000	0.1
方向性電磁鋼板	0.10	2.00	7.2	18.0	24000	-0.8
Si:3wt%	0.23	2.00	7.8	30.0	92000	
無方向性電磁鋼板	0.20	2.00	10.4	24.0	15000	7.8
Si:3wt%	0.35	2.00	14.4	33.0	18000	
Fe基アモルファス	0.025	1.50	1.5	3.0	300000	27

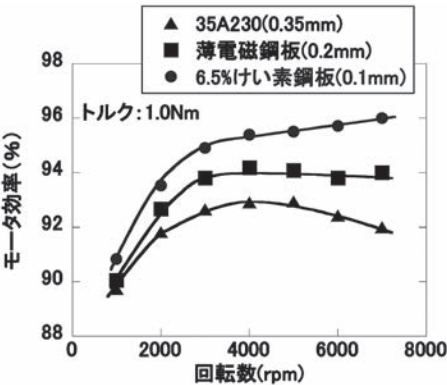


図9 高速モータの効率に及ぼす素材の影響(35A230、薄電磁鋼板、6.5%けい素鋼板)

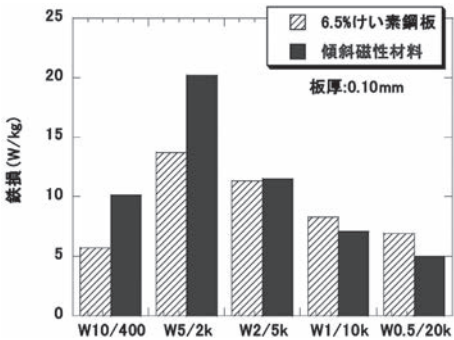


図11 6.5%けい素鋼板と傾斜磁性材料の高周波鉄損の比較

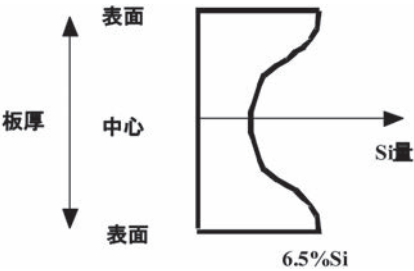


図10 傾斜磁性材料の板厚方向のSiプロファイル

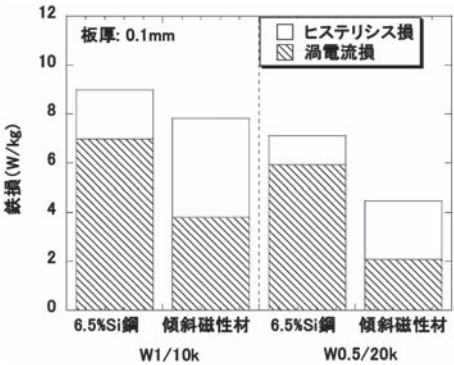


図12 6.5%けい素鋼板と傾斜磁性材料のヒステリシス損と渦電流損

4.3 高強度電磁鋼板

高速回転モータのロータ素材として無方向性電磁鋼板が用いられる場合には、高周波鉄損が低いことと同時に、高速回転時の遠心力に耐える高強度特性が要請される。図13に、高速回転ロータに適した高張力電磁鋼板の磁気特性と機械特性を示す^{2,4,5)}。高速回転に伴いロータには大きな遠心力がかかるため、ロータに使用される電磁鋼板には低鉄損のみならず高強度が要求される。従来材 (JISグレード材 0.50mm、0.35mm) に比較し、鉄損 W10/400 の増加を最小限に抑えながら、従来材の2倍以上の高降伏強度を実現している。

鋼の強化手段には、固溶体強化、細粒強化、析出強化、複合組織強化、加工強化をはじめ、種々あるが、これらのうち、固溶体強化が最も磁気特性への悪影響が少ない。例えば、図14および図15に示すように、鉄損、磁束密度に対し、通常の3% Si系をベースとした場合、P、Mn、Ni等の含有による固溶体強化は悪影響が少なく、かつ、降伏強度も増加

する^{17,18)}。また、降伏強度、引張強度の増加に伴い疲労強度も増加し、起動停止を限りなく繰り返す電気自動車の駆動モータには特に有効である。一般に鋼材の疲労強度は引張強度の5割程度あれば良好とされるが、無方向性電磁鋼板の場合、その疲労強度は引張強度の7割程度に達し、高張力電磁鋼板の場合も同様に高い疲労強度を有する。

5 電磁鋼板使用上の留意点

電磁鋼板は一般に、打ち抜きによりモータ形状とされ、その後、かしめや溶接により鋼板同士が固定され、さらにボルト締め、焼きばめ等によりハウジングに固定される。これら加工、固定により材料に歪みが導入されるため、モータコアの鉄損はエプスタイン試験等により評価した素材特性から予想されるものよりも一般に高くなる。また、回転鉄損や高調波の存在も素材鉄損とモータ鉄損が異なる原因となる。すな

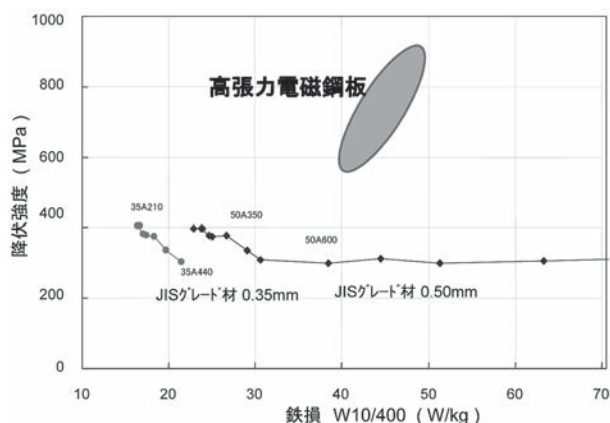


図13 高張力電磁鋼板の磁気特性と機械特性

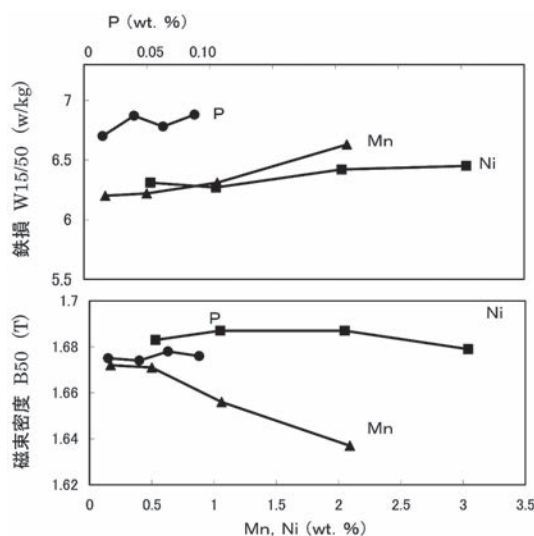


図14 3% Si系無方向性電磁鋼板の磁気特性におよぼす固溶体強化元素の影響

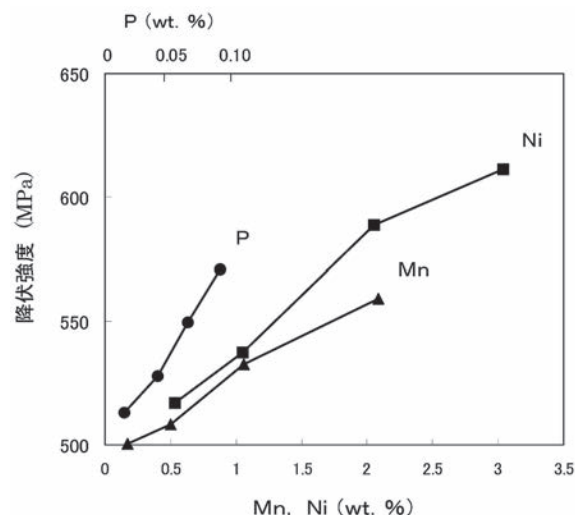


図15 3% Si系無方向性電磁鋼板の降伏強度におよぼす固溶体強化元素の影響

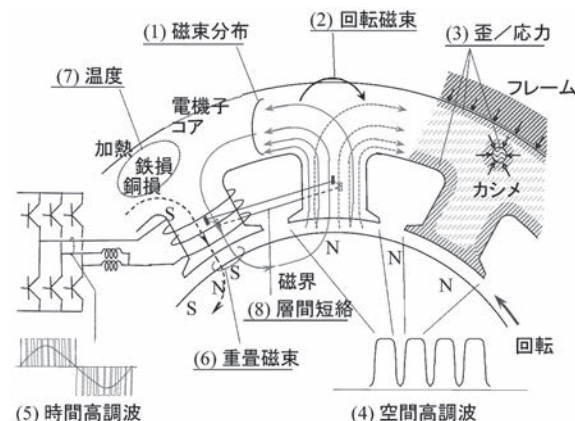


図16 モータ鉄心における鉄損ビルディングファクタ

わち、鉄損ビルディングファクタを考慮する必要がある¹⁹⁾。モータ設計およびモータ製造工程において、いかにこの鉄損ビルディングファクタを低減できるかがモータ性能向上に繋がる。以下、モータ設計を行う上で留意すべき主な鉄損ビルディングファクタについて述べる。

5.1 打ち抜き歪みの影響

電磁鋼板は打ち抜きによりモータコアに加工されるため、打ち抜きによる特性変化を把握することは重要である。図17に磁化曲線に及ぼす打ち抜き幅の影響を示す¹⁰⁾。打ち抜きままでは打ち抜き幅が狭くなると中磁場域で磁束密度が低下していることがわかる。図18は鉄損に及ぼす打ち抜き幅の影響を示したものである¹⁰⁾。打ち抜き幅が狭くなるに伴い、鉄損が増加することがわかる。この磁束密度の低下、鉄損の増大は、打ち抜きによる塑性変形および塑性変形に起因した弾性歪みが電磁鋼板に導入されるためである。このような打ち抜きによる特性劣化を回復させるためには歪み取り焼鈍 (SRA: Stress Relief Annealing) が効果的である。SRAを行うと図17、18に示すように低～中磁場域の磁束密度が高くなり、鉄損が低下する。ここで、鉄損の低下代が50A400に比べ50A1300で大きくなっている理由は50A1300では歪みが解放

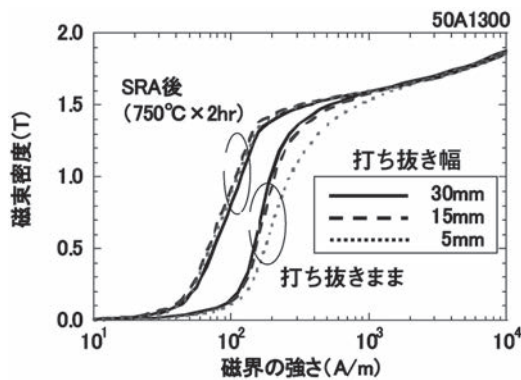


図17 磁化曲線に及ぼす打ち抜き幅の影響 (50A1300)

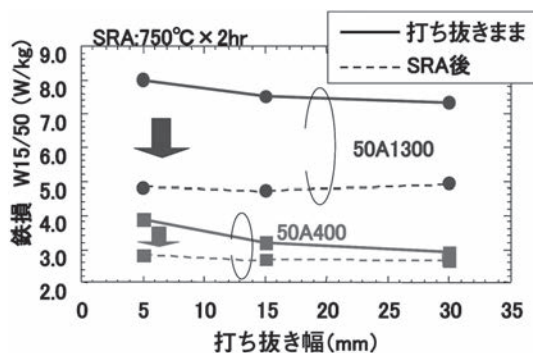


図18 鉄損に及ぼす打ち抜き幅の影響

されるとともに結晶粒径も大きくなるためである。

5.2 焼きばめの影響

無方向性電磁鋼板の鉄損におよぼす弾性応力の影響を図19に示す。圧縮応力により、いずれの磁束密度においても鉄損は著しく増加し、低磁束密度ほど圧縮応力による鉄損増加率は大きい。これは、磁化曲線の立ち上がり部分、すなわち、磁壁移動過程が歪み／応力の影響を受けやすいことによる。鉄心をモータケースへ固定するために圧入や焼きばめがおこなわれるが、この時の鉄心への残留応力がモータ鉄損を大きく増加させていることが推察できる。なお、逆に、磁化方向への引張応力の印加は磁壁移動を容易にし、磁化曲線の立ち上がり部分を改善するため、鉄損は低減する傾向にある。変圧器鉄心素材等に用いられる方向性電磁鋼板では皮膜張力を鋼板に付与することより、この効果を活用している。

図20に示すように、鉄心のモータケースへの圧入や焼きばめによるモータ鉄損増加は、歪み／応力によるヒステリシス損の増加のみではなく、渦電流損の増加も寄与していることがわかる。これは、歪み／応力の影響により、鉄心内の磁束分布不均一が助長されることによる²⁰⁾。

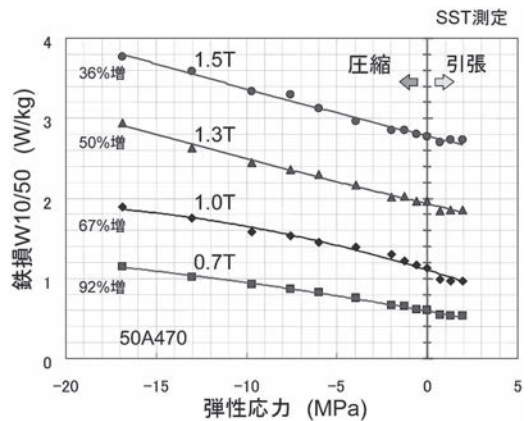


図19 無方向性電磁鋼板の鉄損におよぼす弾性応力の影響

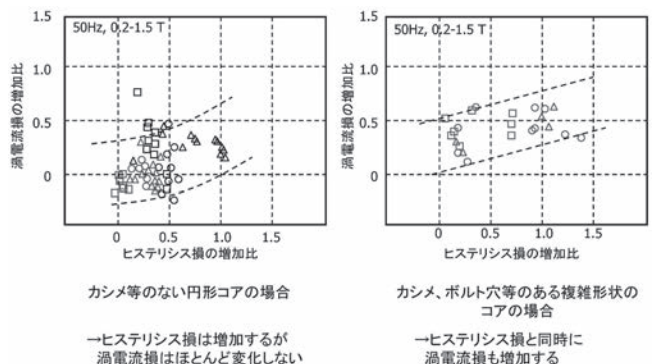


図20 モータ鉄心の焼きばめによる鉄損増加

5.3 回転鉄損の影響

モータースの付け根では磁界が回転するため、回転鉄損が生じる。エプスタイン磁気測定では交番鉄損のみを評価しているため、実モータの鉄損を考える場合には材料ごとの回転鉄損を評価しておくことも重要となる。図21に35A230の回転鉄損を示す¹⁰⁾。これより、磁束密度1.7T以下の領域では回転鉄損はエプスタインで評価した交番鉄損に比べ高くなっており、特に完全円磁界 (C/L=1.0) の場合、交番鉄損に比べ鉄損は2倍程度まで増大することがわかる。このため、モータ設計を行う場合には回転磁界成分が少なくなるような工夫も重要となる。

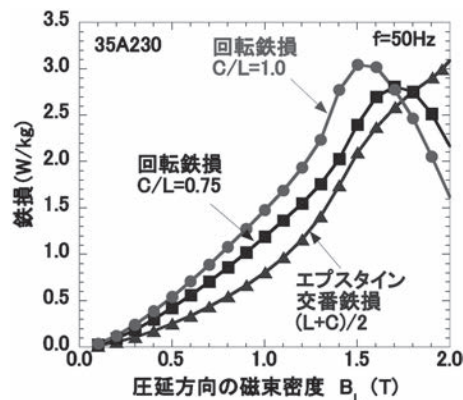


図21 35A230の回転鉄損 (C/L: 圧延直角方向の磁束密度/圧延方向の磁束密度)

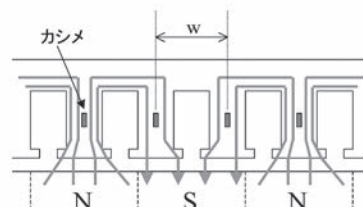
5.4 層間短絡の影響

モータコアでの鉄心結束には、かしめや溶接が用いられる。この場合、積層された電磁鋼板は積層間で電氣的に短絡されやすくなる。短絡が二箇所以上あると、短絡端と電磁鋼板で電氣的に閉回路が形成され、この閉回路と鎖交する磁束が存在すると短絡電流が流れ、渦電流損が生じる。層間短絡による渦電流損 W_s は、図22に示すように短絡部抵抗 r_s で決まり、短絡部抵抗の減少とともに渦電流損が増加することに繋がる²¹⁾。

実際に、かしめや溶接における短絡部抵抗の測定例を表2に示す²²⁾。溶接の場合は、再溶解部から短絡抵抗を計算した予測値は実測値と良く一致する。一方、かしめの場合の短絡は接触によるもので、かしめ方法で短絡面積が異なる。短絡面積より短絡部抵抗の予想値を求めると、実測値の方が大きくなり、接触抵抗の影響が大きいと推察される。このように、短絡部抵抗は結束方法により異なり、溶接の方がかしめより小さく、層間短絡による渦電流損が大きくなる。

短絡部抵抗 r_s 、短絡部数 N のとき、

$$W_s = q^2 \frac{N}{r_s} H v^2 B e^2 = q^2 \frac{N}{r_s} \frac{H D^2}{4 N p^2} \omega^2 B e^2$$



v : 回転子周速
 ω : 励磁周波数
 D : 空隙部直径
 H : 鉄心積層厚
 Be : 空隙部実効磁束密度
 Np : 極対数
 r_s : 短絡部抵抗
 N : 短絡部の数
 q : 短絡部鎖交磁束比率

図22 かしめによる積層コアの層間短絡と渦電流損

表2 かしめと溶接による積層コアの層間短絡部抵抗値

結束法	大きさ mm	深さ mm	r_s Ω/m	概算値	板厚 mm	抵抗率 $\mu\Omega/cm$
Vカシメ	0.8×2	1.5t	125 (約7)	2.6 (約0.15)	0.15	64
丸カシメ	1φ	0.5t	15 (約5)	0.32 (約0.11)	0.15	64
レーザ 溶接	2t	0.7t	2.5 (3.0)	0.35 (0.42)	0.35	52
TIG 溶接	幅3	1?	0.046 (0.050)	0.046 (0.050)	0.50	15

()内は、接触抵抗 $0 \Omega/m^2$ とした時の形状からの予測値
 概算値は、板厚 0.5 mm、抵抗率 $15 \mu\Omega/cm$ に統一した時の値

6 結言

電気自動車駆動モータの高性能化、すなわち、小型軽量化、高効率化に向け、その鉄心素材である電磁鋼板には多岐に亘る特性が要求される。これに応えるべく高効率無方向性電磁鋼板、薄電磁鋼板、高けい素鋼板、高張力電磁鋼板等の新しい電磁鋼板が開発された。一方、電気自動車駆動モータの鉄心設計や鉄心製造工程、さらには、走行モードに応じた最適電磁鋼板の選定が重要である。併せて、モータ設計およびモータ製造工程において、いかに鉄損ビルディングファクタを低減できるかが、新しく開発された電磁鋼板の特性を最大限に発揮させ、モータ性能を大きく向上させることに繋がる。

参考文献

- 1) 清水浩: KEIO SFC JOURNAL, 7 (2007) 2, 20-28.
- 2) 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 (2003), 51.
- 3) T.Kubota, K.Kuroki, Y.Matsuo and N.Takahashi: Materials Science Forum, 204-206 (1996), 539.
- 4) 久保田猛: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-03-189 (2003), 1.
- 5) T.Kubota: Proceedings of Soft Magnetic Materials

- 16, 1 (2005), 79.
- 6) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎: 川崎製鉄技報, 33 (2001) 2, 92.
- 7) 尾田善彦, 田中靖, 山上伸夫, 山田克美, 千野淳: 電気学会論文誌 A, 123 (2003) 1, 83.
- 8) E.W.Golding: Electrical Measurements and Measuring Instruments, 5th ed., London Pitman, (1963)
- 9) 田中一郎, 仁富洋克, 屋鋪裕義, 児島浩, 中山大成: まてりあ, 45 (2006) 3, 225.
- 10) 尾田善彦: JMAG Conference2002, 17.
- 11) 久保田猛, 藪本政男, 山本政広, 佐藤浩明, 東根和隆: まてりあ, 42 (2003) 242.
- 12) R.M.Bozorth: "Ferromagnetism", D.Nostrand Co.Inc., N.J., (1951), 77.
- 13) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦: まてりあ, 33 (1994) 4, 423.
- 14) 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, 2-S5-5 (2009)
- 15) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘: JFE 技報, (2005) 8, 11.
- 16) Yoshihiko Oda, Masaaki Kohno and Atsuhito Honda: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320 (20) (2008), 2430-2435.
- 17) I.Tachino, T.Kubota, A.Sakaida, T.Uemura and S.Nishida: Anales de Fisica, serie B, 86 (1990) 250.
- 18) 久保田猛, 坂井田晃, 立野一郎: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-174 (1995) 9.
- 19) 開道力: モータ技術実用ハンドブック, 日刊工業社刊, (2001) 442.
- 20) 開道力, 石原好之: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-120 (2000) 43.
- 21) 開道力, 茂木尚, 半澤和文: 電気学会論文誌 A, 123 (2003) 9, 857.
- 22) 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, RM-02-96 (2002) 11.

(2009 年 4 月 6 日受付)