



特集記事・8

地球環境に貢献する鉄鋼製品

自動車の省エネに貢献する高性能電磁鋼板

High Performance Electrical Steel Sheets Contributing to Energy Saving in Automobile

尾田善彦
Yoshihiko Oda

JFE スチール (株) スチール研究所
主任研究員

1 はじめに

地球温暖化防止の観点から、CO₂排出量の削減が強く求められており、1997年に開催された京都会議において我が国には2008～2012年における温室効果ガス排出量を1990年比で6%削減することが義務づけられた。国内のCO₂排出量の内、運輸部門は約2割を占めており、その9割が自動車から排出されていることから自動車のCO₂排出量削減が急務となっている。このような背景から、自動車各社ではガソリン車の燃費を改善するとともに電気自動車 (EV)、ハイブリッド電気自動車 (HEV)、燃料電池車 (FCEV) 等の開発を進めており、特にHEVの開発はめざましいものがある。このHEVでは駆動モータをはじめとして、発電機、リアクトル、電動エアコンといった高周波駆動される新しい電気機器が重要な役割を果たしている。

一方、HEV以外のガソリン車においても、最近では燃費、操作性、快適性、安全性等の観点から新しい電気機器の搭載が急速に進んでいる。例えば、従来の油圧パワーステアリングを電動化することにより燃費が向上することから、電動パワーステアリングが小型車から大型車へ順次適用されている。さらには、電動ブレーキ、電磁サスペンション、電動ステアリングといった技術が開発されつつあり、将来はこれらエレクトロニクス機器により自動車の制御を行うX-by-Wireの研究も進められている。電磁鋼板はこのような電気機器の鉄心材料として広く使用されており、機器の小型化、高効率化に寄与するキーマテリアルである。本論文では最近の自動車用電磁鋼板の開発動向について述べる。

2 HEV駆動モータ用電磁鋼板

2.1 駆動モータに求められる特性

1997年に国内で世界最初の量産型HEVが発売されて以

来、その生産台数は年々増大しており、最近では原油価格の高騰から北米を中心に需要が一層増加している。開発当初は燃費改善の側面が強かったHEVであるが、最近では燃費だけでなく、モータの優れた応答性および初期トルクを活かした走りの楽しさを追求したHEVも開発されている。HEVの駆動モータおよびコア材料に求められる性能をFig.1に示す。発進、加速時には高トルクが必要となるため、コア材として使用される電磁鋼板には高磁束密度が要求されている。一方、モータの回転数が高くなった場合には、モータ損失に占める鉄損の割合が大きくなる。このため、高周波鉄損の低い材料が求められるとともに、発生した熱を逃がすため熱伝導率の高いことも必要となる。さらに、磁石をロータのスロットに挿入している内部磁石型 (IPM) モータでは、磁石の飛散を防止するため、電磁鋼板には高強度、高疲労強度が求められる。

このように電磁鋼板には様々な特性が要求されているが、これら全ての要求特性を一種類の電磁鋼板で満たすことは困難であるため、モータの要求性能の度合いに応じて各種の電磁鋼板が使い分けられている。本章では、磁束密度と鉄損バ

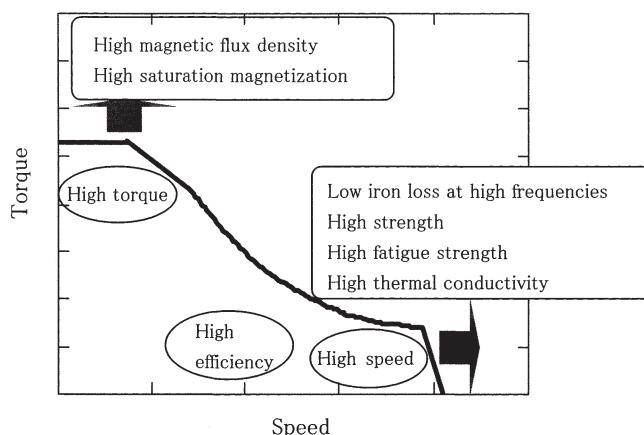


Fig.1 Demand for HEV motor and core material

ランスに優れた高効率モータ用電磁鋼板、高周波鉄損の低い薄電磁鋼板、接着コーティング鋼板および高強度電磁鋼板の特性について紹介する。

2.2 高効率モータ用電磁鋼板

HEV モータコア材にはモータ高効率化のための低鉄損および小型化、高トルク化のための高磁束密度が要求されている。電磁鋼板の鉄損低減のためには固有抵抗増大と磁気異方性低減の観点からSi添加が有効であり、高グレードの電磁鋼板にはSiが3%程度添加されている。一方、Siは非磁性元素であることから、Si添加に伴い飽和磁化が低下し磁束密度が低くなることが避けられない。このため、従来のSi添加の手法では磁束密度－鉄損特性の両者に優れた材料の製造は困難であった。これに対し、Si、Al等の合金添加量を適正化するとともに、磁気特性に好ましい(100)、(110)集合組織を増加させ、さらに鋼中不純物を低減する試みがなされてきた^{1,2)}。Fig.2に高効率モータ用電磁鋼板の製品例を示す。高効率モータ用電磁鋼板は、従来の電磁鋼板に比べ磁束密度－鉄損バランスが優れており、モータの高効率化に大きく寄与できる。

2.3 高周波用薄電磁鋼板

HEV モータは、今後、小型化の観点から最高回転数の増加が予想され、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ものと考えられる。また、エンジンのみで高速走行している場合には、モータは空転状態(連れ回り)となるが、永久磁石を使用したモータでは交番磁界により高周波鉄損が発生することから、燃費悪化の原因となる。このため、電磁鋼板には高周波鉄損低減の要望がますます強くなるものと予想される。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

すように周波数の自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³⁾。

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

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が、(1)式より渦電流損は板厚の自乗に比例することから、板厚低減が効果的である。さらに板厚低減は、Fig.3に示すように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^{4,5)}。

Fig.4に薄電磁鋼板の磁気特性例を示す。板厚0.35 mm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

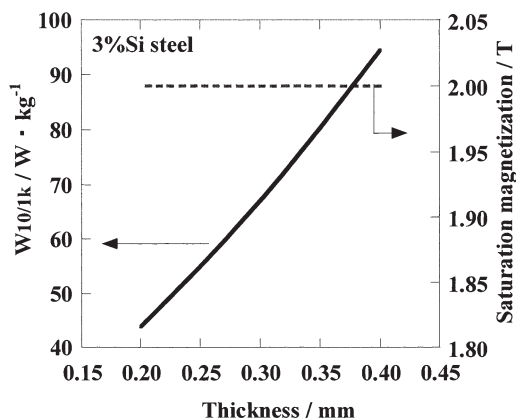


Fig.3 The effect of thickness on iron loss and saturation magnetization

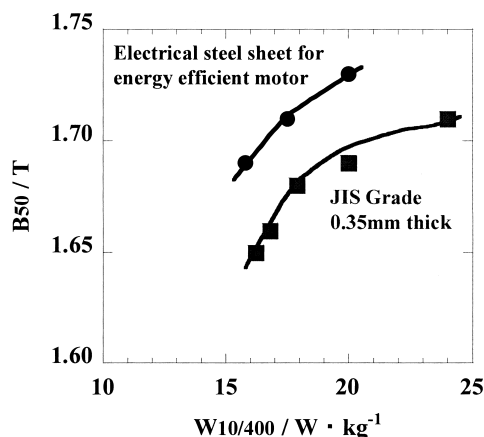


Fig.2 Magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets for energy efficient motor

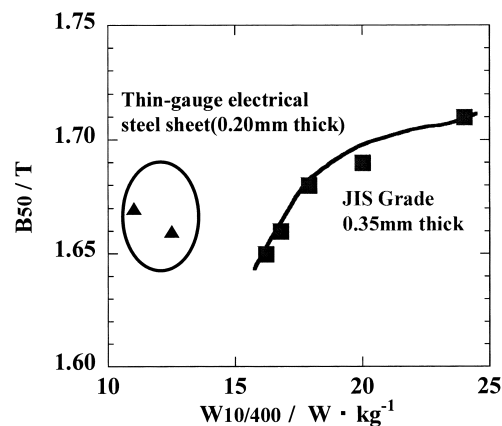


Fig.4 Magnetic properties of thin-gauge electrical steel sheets

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。

2.4 接着コーティング電磁鋼板

上述した薄電磁鋼板は、高周波特性は良好であるが、板が薄いことに起因してかしめ性が低下するとともに剛性低下によりティース先端がばらけ易いといった課題がある。これら課題の解決には接着コートが有効であり、加圧加熱による接着が可能な有機接着樹脂製のコーティングを施した電磁鋼板が開発されている^{6,7)}。接着コーティング電磁鋼板を使用してモータコアを作製した場合、モータ効率が向上するだけでなく、鋼板全体を接着固定することによりコアの剛性が高くなるため、Fig.5に示すような騒音低減効果も得られている。

2.5 ロータ用高強度電磁鋼板

IPMモータのロータ素材には、磁石飛散防止の観点から高速回転時の遠心力に耐える強度および繰り返しの負荷に対応した疲労強度が必要となる。また、特に集中巻きのモータではロータ表面に高調波に起因した鉄損が発生するため、高周波鉄損が低いことも必要となる。このような高周波低鉄損と高強度の両者を満たす無方向性電磁鋼板として、薄手高張力無方向性電磁鋼板が開発された^{8,9)}。本材料では高周波鉄損を低減する目的から、板厚を0.20 mmと薄手化すると

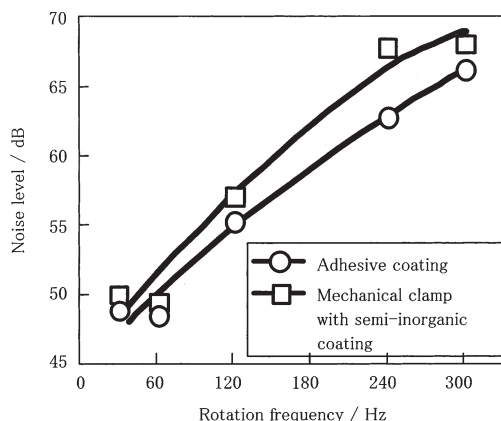


Fig.5 Comparison of adhesive coating and semi-inorganic coating in noise emitted from model motor

ともに、固溶体強化を主体とした高強度化が図られている。Table 1に、薄手高張力無方向性電磁鋼板の磁気特性と機械特性を示す。高周波鉄損を従来材と同等ないしはそれ以下に抑え、降伏強度は2倍に高められている。

3 リアクトル用高けい素鋼板

HEVでは電力変換のためのインバータ・コンバータを有しており、高周波リアクトルが必須の部材となっている。高周波リアクトルはスイッチング動作を伴う回路中において電気エネルギーの蓄積、放出を行うことにより回路電流の整流化を行う部材である。高周波リアクトル用の鉄心素材には、損失低減のための高周波低鉄損、小型化のための高磁束密度および騒音低減のための低磁歪が求められている。このような要望を満たす材料として6.5%けい素鋼板がある。鋼中にSiを6.5%添加することにより、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¹⁰⁾。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%けい素鋼板が量産製造されるようになった¹¹⁾。

Table 2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おり、フェライトと比較すると磁束密度、磁歪の観点で優れた材料である。

Fig.6に6.5%けい素鋼板を高周波リアクトルに適用した結果を示す¹²⁾。6.5%けい素鋼板、方向性電磁鋼板の板厚は0.1 mmであり、アモルファスは0.025 mmである。励磁の基本周波数は50Hz、キャリア周波数16kHzであり、騒音はコアから10 cmの位置で測定している。リアクトルの騒音は素材の磁歪特性を反映しており、6.5%けい素鋼板で低い値が得られている。

Table 1 Magnetic and mechanical properties of the developed product of high strength non-oriented thin-gauge electrical steel sheet

Grade		Iron loss(W/kg)		Magnetic flux density B ₅₀ (T)	Yield strength (MPa)
		W _{10/400}	W _{1/10k}		
0.20mm high strength steel		38.3	26.3	1.63	841
Conventional	35A250	17.0	40.4	1.66	402
	50A310	25.1	53.7	1.67	412

Table 2 Magnetic properties of 6.5%Si steel sheet

Materials	Thickness (mm)	Magnetic flux density B s(T)	Iron loss (W/kg)			Maximum relative permeability	Magnetostriction $\lambda_{10/400} (\times 10^{-6})$
			$W_{10/50}$	$W_{10/400}$	$W_{1/10k}$		
6.5%Si steel	0.10	1.29	0.51	5.7	8.3	23000	0.1
Grain oriented electrical steel sheet	0.10	1.85	0.72	7.2	18.0	24000	-0.8
Si: 3wt%	0.23	1.92	0.29	7.8	30.0	92000	
Non-oriented electrical steel sheet	0.20	1.51	0.74	10.4	24.0	15000	7.8
Si: 3wt%	0.35	1.50	0.70	14.4	33.0	18000	
Fe-based amorphous	0.03	1.38	0.11	1.5	3.0	300000	27
Ferrite	Bulk	0.37			2.0	3500	21

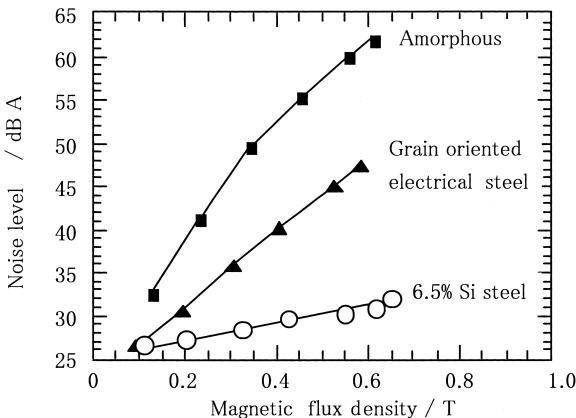


Fig.6 Audible noise of test reactors

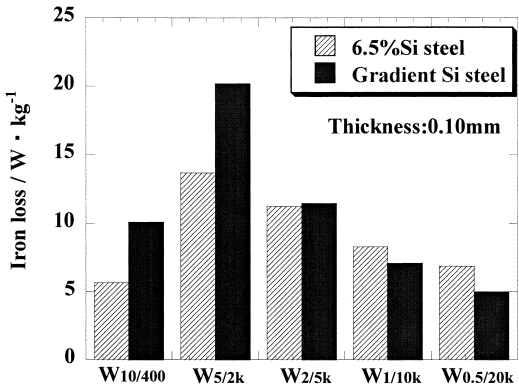


Fig.7 High frequency iron loss of gradient Si steel

さらに、CVDプロセスを用い板厚方向のSiの濃度勾配を最適化す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。Fig.7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¹³⁾。10 kHz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Si分布最適化により渦電流損が低下したためである。

4 電動パワーステアリングモータ用電磁鋼板

自動車用モータの新しい分野として、上述したHEVモータ以外に電動パワーステアリング (EPS) が注目されており、油圧パワステに比べ燃費が2～3%程度向上することから急速に普及が進んでいる¹⁴⁾。一方でEPSでは操舵感が油圧方式に比べ劣るという問題点が指摘されており、操舵フィーリングの改善が課題となっている。これは、EPSではモータの存在に起因したいわゆるロストルクの存在があるためである。ロストルクの原因として、モータの軸受け損、ブラシ損に起因したトルク発生があるが、それ以外にコア材料に起因したトルクも発生する。Fig.8はDCブラシモータにおいて素材特性の異なる電磁鋼板を用い、電磁鋼板のヒステリシス損とモータのロストルクの関係を調査した結果であり、これ

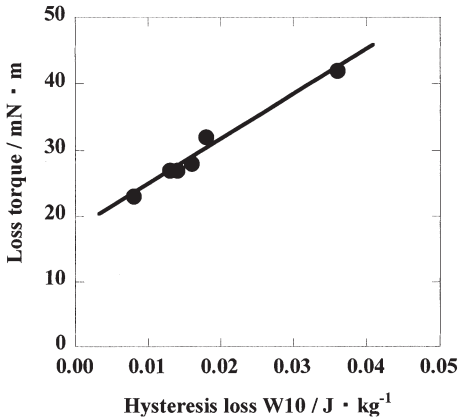


Fig.8 Relationship between hysteresis loss and loss torque

よりヒステリシス損低減によりロストルクが低下することがわかる。

前述した高効率モータ用電磁鋼板はヒステリシス損が低いことからEPSモータのロストルク低減に効果的と考えられる。Fig.9にDCブラシモータのロストルクに及ぼす素材の影響を調査した結果を示すが、高効率モータ用電磁鋼板を使用することにより、ロストルク低減が可能となることが確認されている¹⁵⁾。

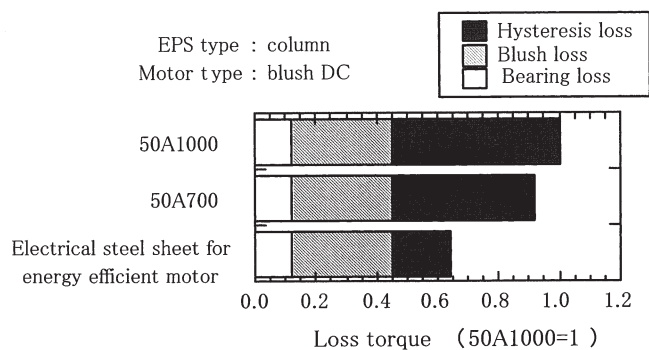


Fig.9 Effect of hysteresis loss on loss torque of the EPS motor

5 イグニッションコイル用電磁鋼板

イグニッションコイルは点火に必要な高電圧を発生させるための部材であり、一次電流を遮断するときに二次側に高電圧を発生させる。そのため、一次電流による鉄心の磁気エネルギーが大きく一次電流遮断時の応答性に優れていることが要求される。このため高い磁束密度と透磁率を有する方向性電磁鋼板が使用されている¹⁶⁾。

6 おわりに

本論文では自動車用の電気機器に使用されている電磁鋼板の一例を紹介した。本論文で紹介した電磁鋼板の性能を十分に発揮させるためには、それぞれの材料の特徴を把握するとともに加工、組み立て等による特性劣化を考慮し、これら特性劣化を極力小さくする設計を行うことも重要である¹⁷⁾。今後、電磁鋼板に対する要望はますます高度化かつ多様化していくものと予想されるが、それら要望に対応した新しい材料も開発されつつあり、今後も電磁鋼板は自動車用電気機器の小型化、高性能化に寄与するものと確信している。

参考文献

- 1) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎: 川崎製鉄技報, 33, (2001) 2, 92.
- 2) 尾田善彦, 田中靖, 山上伸夫, 山田克美, 千野淳: 電学論A, 123, (2003) 1, 83.
- 3) E.W. Golding: Electrical Measurements and Measuring Instruments, 5th ed., London Pitman, (1963)
- 4) 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.
- 5) 尾田善彦: JMAG Conference2002, 17.
- 6) 小森ゆか, 江口邦彦, 本田厚人, 小松原道郎, 大山勇: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG -99-69 (1999)
- 7) 竹田和年, 伊藤良, 開道力, 広瀬喜久司: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-132 (2000)
- 8) 溝上雅人, 屋鋪裕義, 石田昌義, 尾田善彦: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG -04-220 (2004)
- 9) 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)
- 10) R.M. Bozorth: Ferromagnetism, D. Nostrand Co. Inc., N.J., (1951), 77.
- 11) 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.
- 12) 藤田耕一郎, 高田芳一: 熱処理, 39 (1999) 4, 200.
- 13) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘: JFE 技報, (2005) 8, 11.
- 14) 清水康夫: 油空圧技術, (2002) 12, 32.
- 15) 尾田善彦, 田中靖, 千野淳, 山上伸夫, 岡見雄二: まてりあ, 41 (2002) 2, 114.
- 16) 河野正樹, 藤山寿郎, 青木哲也: 川崎製鉄技報, 34 (2002) 2, 50.
- 17) 河野雅昭, 千田邦浩, 早川康之: 川崎製鉄技報, 35 (2003) 1, 1.

(2006年9月4日受付)