

自動車電装部品の省エネルギー・高機能化に 適応した電磁鋼板*

川崎製鉄技報
34 (2002) 2, 96-100

Electrical Steels for High-functional Automotive Electrical Components Corresponding to Energy Saving



河野 正樹
Masaki Kawano

技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(課長)



藤山 寿郎
Toshiro Fujiyama

本島製鉄所
商品技術部電磁鋼板室
主査(課長)



青木 哲也
Tetsuya Aoki

(株)デンソー
材料技術部第2材料技
術室 担当

要旨

自動車用電装部品への電磁鋼板の適用状況とその適用例として、高効率オルタネータに適合した新規電磁鋼板とダイレクトイグニッション用の電磁鋼板について述べた。新規高効率オルタネータ用としては、従来のヘリカル加工性と磁気特性を両立した電磁鋼板を開発した。冷間圧延鋼板並の Si 含有量で加工性を保持しつつ、高磁束密度で高周波低鉄損の磁気特性 ($W_{10/400} = 56 \text{ W/kg}$, $B_{50} = 1.72 \text{ T}$) を持つ電磁鋼板であり、他の新規製品用途にも適用拡大が見込まれている。さらに、スティック型の小型ダイレクトイグニッションに好適な高磁束密度方向性電磁鋼板についても紹介した。

Synopsis:

Electrical steels are applied to some kinds of functional automotive electrical components such as an electrical power steering and a fuel pump. Kawasaki Steel has developed a new electrical steel suitable for the newly developed alternator, which improves the efficiency and the output power. The developed material can attain superiority in both the magnetic properties, namely higher flux density and lower iron losses in a high-frequency range, and the workability for helical winding process. A grain oriented electrical steel with high flux density, suitable for the compactness of direct ignition cores, are also described.

1 緒 言

環境保護を目的とした自動車の CO_2 排出量低減・燃費向上と自動車の快適性や意匠性の向上を可能とする手段として、自動車に使用される各種電装品の高機能化や一部アクチュエータ部品の電装化が進展しつつある。

特に、電気自動車 (EV) やハイブリッド式電気自動車 (HEV) の開発実用化、最近の自動車電源の 42 V 化¹⁾や ISG (integral starter and generator) システムの提案を契機に、新規電装部品システムの開発が日米欧を中心に活発になっている。これら自動車用の電装品は、限られた車内空間に搭載するため、常に小型・軽量で高出力、高効率、低コストを目標に開発される。それを構成するモータやアクチュエータ用のコア材料にも、これらの要求項目を満たす材料開発が求められる。

本報告では、自動車用電装部品への電磁鋼板の適用状況と電磁鋼板の適用例としての高効率オルタネータに適合した新規電磁鋼板お

よびダイレクトイグニッション用の電磁鋼板について述べる。

2 自動車用電装部品への電磁鋼板の適用状況

自動車の快適性や動力性能および燃費を向上させるために、高精度に制御された電動部品が使用され、そのモータやアクチュエータのコア材として電磁鋼板が使用されている。

2.1 モータ類への適用

自動車に多く用いられる小型モータ類は、種々の電装品に使用され、一台あたり 20~60 個程度にのぼる。Fig. 1 にモータ類が使用されている電装品の一例を示す。これら電装品の、モータコア材料としては SPCC に代表される冷間圧延鋼板が主に使用され、モータ形式はブラシ付き DC モータが主である²⁾。

2000cc クラスの自動車の電装品に使用されている一部のモータ類に関し、コア重量と鋼板 Si 量との関係を Fig. 2 示す。重量と Si 量は、現行の電装部品を分解して調査した。コア材が電磁鋼板かどうかの判断指標として Si 量を用いた。

Fig. 2 に示すように、モータコアに適用する鋼板が電磁鋼板か普

* 平成14年5月2日原稿受付

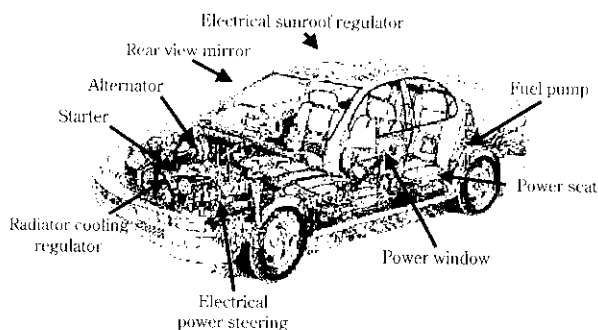


Fig. 1 Several kinds of motors applied to cars

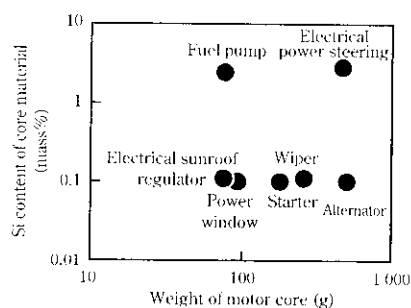


Fig. 2 Relationship between the weight of a motor core and Si content of core materials in several automotive components

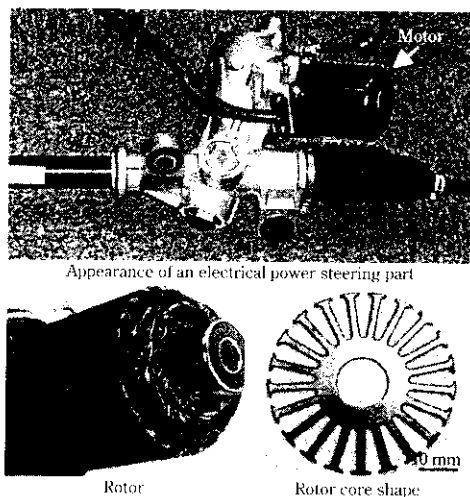


Photo 1 Appearance of an electrical power steering part and the motor core shape

通鋼はモータ重量に関係ない。パワーウィンドウやワイパーモータには、SPCC クラスの冷間圧延鋼板が使用され、フュエルポンプや油圧から電動化されたパワーステアリング用モータには、1% 以上の Si を含有した電磁鋼板が使用されている。Photo 1 に電磁鋼板使用部品の一例として、パワーステアリングの外観とロータ形状を示す。

常時使用されないパワーウィンドやワイパー類は、モータ効率よりトルクを重視するため、モータ効率改善に必要な低鉄損の高価な電磁鋼板でなく、安価で適度なトルクが得られる冷間圧延鋼板がコア材として使用される。これに対して、常時使用するフュエルポンプにはモータ効率を重視するために低鉄損の電磁鋼板が、パワース

テアリングには操舵時のロストルクを重視するため³⁾に鉄損損失を低減した電磁鋼板が、モータ重量に関係なく、使用されているものと考えられる。

今後、EV・HEV 開発や自動車電源の 42 V 化の進展にともない、ISG、電動エアコン、電動パワステ⁵⁾などの効率を重視するモータ、ジェネレータ類への電磁鋼板の適用がさらに拡大するものと考えられる。

2.2 各種アクチュエータなどへの適用

エンジン回り部品のダイレクトイグニッション用コアに方向性電磁鋼板が使用⁶⁾されており、この詳細については後述する。さらに自動車の動力性能向上や制御性・燃費向上を目的に、電磁バルブ、電磁ブレーキシステムなどが提案⁷⁾されており、これらの新規部品にも使用目的に応じた機能を付与した電磁鋼板が使用されていくものと考えられる^{8,9)}。

3 新型高効率オルタネータに適した電磁鋼板

車両へ電力を供給する自動車用発電機（オルタネータ：Fig. 3）は、エンジンを駆動源とした回転力を発電に利用しているため、発電効率の向上は直接燃費向上および CO₂ 削減に寄与する。電装メーカーでの新型高効率オルタネータの開発に際し、そのステータコア材料として、高周波低鉄損と加工性を両立した電磁鋼板を開発した¹⁰⁾。

3.1 新型高効率オルタネータと目標材料特性

オルタネータの効率向上には、ロータを多極化して高周波で駆動させて出力を高めることが効果的である¹¹⁾。この際、ステータ用鋼板としては、高周波駆動時の損失を抑制するために高周波低鉄損材が、より高い出力電流値を確保するために高磁束密度材が必要とされる。一方、従来材の SPCC からなるオルタネータ用ステータコアは、Fig. 4 に示すような高生産性のヘリカル加工により製造されることが特色で、その加工時の製品寸法変化を制御するために材料の機械特性の特に降伏点 (Yp) が管理されている。

新型オルタネータの効率改善と高生産性を両立するために、Fig. 5 に示ように、従来材の Yp レベルのまま (180~245 MPa) でヘリカル加工性を維持しつつ、磁気特性として $W_{10/400}$ で 70 W/kg 以下、 B_{50} で 1.70 T 以上を有する新たな鋼板が要求された。

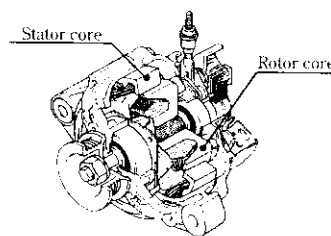


Fig. 3 Appearance and structure of an alternator

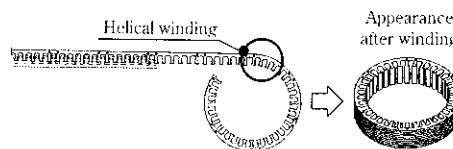


Fig. 4 Production method of stator core (helical winding method)

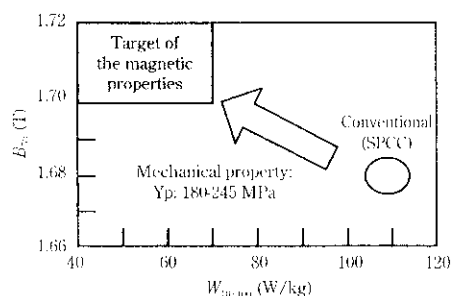


Fig. 5 Target of the magnetic and mechanical properties of the material for the development of high efficiency alternator

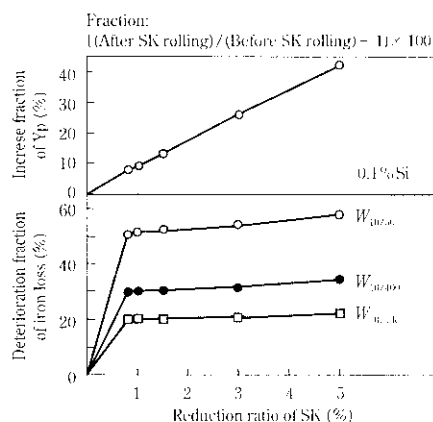


Fig. 6 Influence of SK rolling reduction on Yp and iron loss

3.2 材料開発ポイント

一般に、高周波の低鉄損化には高い電気抵抗率を持つ Si 添加が有効であるが、逆に磁束密度は低下し、Yp は増大してヘリカル加工性が劣化する。また、Yp は固溶 C などに起因する時効硬化により変動しやすい。したがって、ヘリカル加工性を維持するには時効抑制のための調質圧延（以下 SK）は避けられない。開発には、Yp 安定化のための SK を施しても Yp が目標範囲となり、かつ従来材にない高周波磁気特性を両立することが必要となる。開発鋼板は、Yp が従来材並の低 Si (Si 0.1%) の鋼板をベースにして、高周波磁気特性と加工性を両立する下記の手法を適用して開発した。

3.2.1 SK による歪みを考慮した高周波低鉄損

Fig. 6 に、Yp 制御を想定した数% までの SK 歪での鉄損評価結果を示す。Yp は SK 圧下率にほぼ比例して変化する。一方、鉄損は SK 圧下率 0.8% では著しく増加するものの、これを超えると鉄損劣化は緩やかで、さらにオルタネータの駆動周波数である 400 Hz～1 kHz の高周波域では 50 Hz の商用周波に比べて鉄損劣化が小さい。したがって、SK 前の鉄損 $W_{(0/100)}$ を目標の 30% 程改善しておけば、SK による鉄損劣化後も目標磁性の確保が可能となり、同時に機械特性 Yp は SK を 0.8～5.0% に制御することで達成できると考えられた。

素材の全鉄損は履歴損と渦電流損に分離され、下式のように定式化される¹²⁾。

$$W = W_h (\text{履歴損}) + W_e (\text{渦電流損}) \\ \propto A/D + BD^2 f^2 / \rho \quad (A, B: \text{組織因子パラメータ}) \\ (D: \text{結晶粒径}, \rho: \text{電気抵抗率}, t: \text{板厚}, f: \text{周波数})$$

高周波域での鉄損低減には、板厚減による渦電流損低減が効果的で

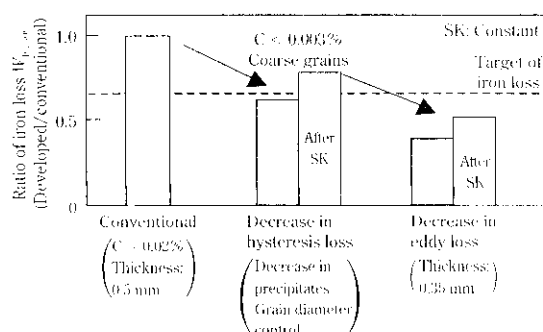


Fig. 7 Improvement of hysteresis loss and eddy current loss by the several methods

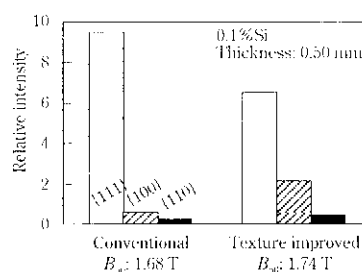


Fig. 8 Improvement of B_m by texture control

ある。加えて履歴損の低減には粒径粗大化や析出物低減が有効で、逆に鋼板中の歪みは履歴損を増加させる¹³⁾。すなわち前述の SK による高周波鉄損の劣化が 50 Hz の商用周波数のそれに比べ小さいのは、高周波での全鉄損に占める履歴損の割合が小さいためである。

そこで、SK 前の鉄損を極力低減するために、渦電流損に対しては板厚を低減（従来 0.5 mm → 0.35 mm）し、履歴損低減に対しては組織制御を検討した。Fig. 7 に板厚低減と組織制御による鉄損の改善効果を示す。組織制御としては、鋼中の析出物起因となる C を極力低減（極低 C 化）して結晶粒径を粗大化することで履歴損を低減し、さらに板厚を低減することで SK 後においても従来材に対し 50% 程度の低鉄損化を可能とした。

3.2.2 高磁束密度化

一方、磁束密度は SK による歪みのために B_m で約 0.02 T 程度低下することが確認され、磁気特性目標を達成するには、SK 前での高磁束密度化が必要となった。

そこで、磁束密度向上のために集合組織を制御した。効果的な制御方法として冷間圧延前組織や圧下率制御^{14,15)}および成分の適正化¹⁶⁾などが知られている。低鉄損化手段として用いた炭化物低減による粒成長性改善を利用し、冷間圧延前組織を可能な限り粗大化することで集合組織を改善した。その結果、Fig. 8 に示すように磁気特性に不利な {111} 面方位が抑制され、磁性に有利な {100}、{110} 面方位の発達した鋼板が得られ、 B_m は大きく向上した。

3.2.3 機械特性安定化

鋼中に固溶 C や N を含有する場合、SK により可動転位が導入されると常温時効は抑制されるが、SK が低下した場合や使用環境によっては、C、N が転位に再固着して Yp が異常に上昇する場合がある。この対策として、C は極力低減させ N は Al を適量添加して AlN として析出固定することで Yp の変化量を最小限に抑制した。

3.3 開発材料の特性と実機特性

上述の開発手段を適用することにより、Si を多量に添加すること

Table 1 Magnetic and mechanical properties of the developed material

Material	Thickness (mm)	$W_{50/50}$ (W/kg)	B_{50} (T)	Y_p (MPa)
Conventional	0.50	110	1.68	200-220
Newly developed	0.35	56	1.72	200-220

Table 2 Comparison of alternator efficiency between a conventional alternator and newly developed one

Type of alternator	Core material	Efficiency of alternator
Conventional	Conventional	(Standard)
New type	Newly developed	+10%

なく高周波磁気特性とヘリカル加工性を両立した新型オルタネータ用コア材料を開発した。開発材の機械特性と磁気特性を **Table 1** に示す。

Table 2 に今回の開発材料および従来材料を用いた場合のオルタネータの効率比較を示す。本開発材料を新型オルタネータに用いることによりステータ鉄損が抑制され、10%の効率の向上が可能となった。本開発材料はオルタネータのみならず、他の燃料系、冷却系、空調系などで用いられる電動機や、ハイブリッド車用スタータジェネレータなどの新規製品用途にも適用拡大が見込まれている。

4 ダイレクトイグニッション用コアに適した電磁鋼板

エンジンの点火装置系は、電子制御を取り入れ大きく進歩してきている分野である。ディストリビュータにより配電し点火する方式から、1990年代にはディストリビュータレスで各エンジン気筒で独立点火するダイレクトイグニッションシステムに移行してきた¹⁹⁾。近年、さらなる小型化によりエンジン上部のプラグホールに装着可能とした画期的なスティック型のダイレクトイグニッションコイルが開発されている¹⁹⁾。これは、**Fig. 9**の断面図に示すように、中心部にコア材が装填されてスティック形状となったものである。

4.1 ダイレクトイグニッションに必要な電磁特性と最適素材

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一種の変圧器で、点火プラグの放電に必要な二次電圧は一次電流の遮断時に発生する¹⁹⁾。この高い二次電圧を得るためには、一次電流による鉄心磁気エネルギーが高く一次電流遮断時の応答性に優れること、

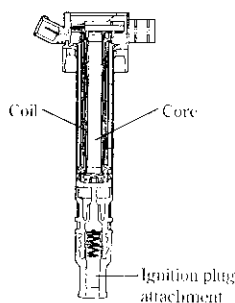
Fig. 9 Cutaway drawing of stick type ignition coil¹⁹⁾

Table 3 Comparison of typical magnetic properties between 27RGH100N and 27RGH100

Material	Grade	Thickness (mm)	Iron loss (W/kg)		Flux density (T)	
			$W_{50/50}$	$W_{15/50}$	B_{50}	B_{90}
New RGH	27RGH100N	0.27	0.71	0.97	1.90	1.93
RGH	27RGH100	0.27	0.71	0.98	1.81	1.89

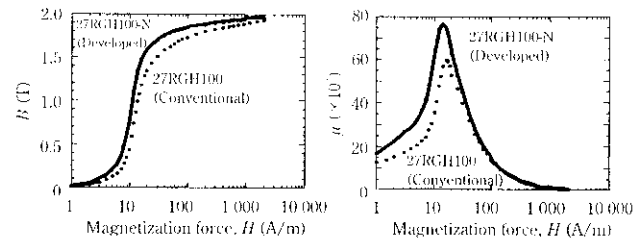


Fig. 10 DC magnetization and permeability curves of 27RGH100-N and 27RGH100

すなわち高い磁束密度と透磁率特性に優れた方向性電磁鋼板が要求される。さらに、高磁束密度化はコアの小型化も可能とするため、スティック型のイグニッションの小型化に直接寄与する。

川崎製鉄では、従来の方向性電磁鋼板よりさらに高磁束密度の方向性電磁鋼板 New RGH を開発し、トランス用鉄心として好評を得ている¹⁹⁾。代表例として 27P100 クラスにおける New RGH の磁気特性と μ - H 、 B - H 特性を、従来の RGH と比較して **Table 3** と **Fig. 10** に示す。New RGH は RGH に比べ B_{90} で 0.04 T 高い磁束密度が得られ、低磁場での透磁率にも優れる。New RGH 鋼板をダイレクトイグニッションのコア材に適用することにより、スティック形状のダイレクトイグニッションの小型化に十分貢献できるものと考えられる。

5 結 言

自動車に使用される各種電装品への電磁鋼板の適用状況と、電装品の高機能化に適した電磁鋼板について、その具体的適用例とともに述べた。

- (1) 現在の自動車電装品に使用される小型モータは主にブラシ付き DC モータであるが、高効率など的高機能な特性が要求されるモータ類（パワーステアリング、燃料ポンプなど）には、1%Si を超える電磁鋼板が適用されている。
- (2) 冷間圧延鋼板並の Si 量 (0.1%) でヘリカル加工性と磁気特性を両立した新型オルタネータコア用鋼板を開発した。この鋼板を適用することにより、従来のヘリカル加工を適用した高効率オルタネータの開発、実用化を達成した。当鋼板は、他の燃料系、冷却系、空調系などで用いられる電動機や、ハイブリッド車用スタータジェネレータなどの新規製品用途にも適用拡大が見込まれている。
- (3) スティック型の小型ダイレクトイグニッションコアに適する高磁束密度方向性電磁鋼板について紹介した。高 B 高 μ の方向性電磁鋼板を用いることにより、イグニッションの小型化に貢献できるものと考えられる。

今後は EV や HEV の開発や自動車電源の 42 V 化の進展にともない、電磁鋼板の適用部品範囲もさらに広がるものと期待される。川崎製鉄では、これら種々の部品の使用目的に適合した電磁鋼板を開発することにより、自動車のインテリジェント化に貢献していく。

参 考 文 献

- 1) 寺谷達夫：T. *IEEE Japan*, 121-D (2001)4, 433
- 2) 竹村芳孝，田原和雄，川口 仁：回転機研究会，RM-00-166(2000)，53
- 3) 喜福隆之，木全政弘，大熊昌郁，阪部茂一，相田俊一，大穀晃裕：三菱電機技報，**70**(1996)，923
- 4) 尾田善彦，田中 靖，千野 淳，山七伸夫，岡見雄二：まてりあ，**41**(2002)2，114
- 5) S. Murthy, T. Sebastian, and B. Liu: Transitioning to 42-Volt Electrical Systems, (2000)1556, 97
- 6) 加藤義雄：特殊鋼，**46**(1997) 12, 11
- 7) 日経メカニカル，(2000) 548, 23
- 8) 末松啓吾，須田義大，中野公彦，榎葉太一：自動車技術界学術講演会前編集，(2000)4, 1
- 9) K. Sadahiro, M. Ishida, A. Honda, and M. Komatsubara: The New Automotive 42 V Power Net, (2001), 234
- 10) 吉本哲也，松原慎一，河野正樹，酒井敬司，藤山寿郎：まてりあ，**41**(2002)1, 42
- 11) 三谷涌三監修：「エンジン電装品」，(1996)159，〔山海堂〕
- 12) 小原隆史：第 155 回西山記念講座，151
- 13) K. Matsumura and B. Fukuda: *IEEE Trans. Mag.*, **20**(1984), 1533
- 14) 阿部光延，小甲康二，林 征夫，速水哲博：日本金属学会誌，**44**(1980)，84
- 15) M. Matsuo, S. Hayashi, and S. Nagashima: *Adv. Xray Anal.*, **14**(1971), 214
- 16) H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura, and Y. Shono: "Energy Efficient Electrical Steels", (1980), 193, [TMS-AIME]
- 17) 瀬名智和：「クルマの新技術用語」，(1998)89，〔(株)グランプリ出版〕
- 18) 田中雄治：「自動車電気装置」，(1979)133，〔明現社〕
- 19) 黒沢光正，名村夏樹，山田茂樹：川崎製鉄技報，**29**(1997)3, 46