

特集 自動車の省エネに対応した新型高効率オルタネータ用電磁鋼板の開発*

A New Electrical Steel for a Newly Developed High Efficiency Alternator Corresponding to Energy Saving of Car

青木 哲也
Tetsuya AOKI

松原 慎一
Shinichi MATSUBARA

河野 正樹
Masaki KAWANO

酒井 敬司
Keiji SAKAI

藤山 寿郎
Toshiro FUJIYAMA

In recent years, environmental concerns have created a demand for vehicles with lower emissions and better fuel efficiency. To meet these demands, automakers have focused on miniaturization and developing more efficient automotive components. One of the products for which there is a desire to reduce size and increase efficiency is the alternator. We have developed a new electrical steel that makes possible a newly developed alternator with improved efficiency and output power. The newly developed steel has superior magnetic properties, including higher flux density and lower core loss in the high frequency range, and improved workability for the helical winding process.

Key words : Alternator, Stator core, Electrical steel, Helical winding process

1. はじめに

近年、地球環境の保護を目的としたCO₂排出量が問題視されている。自動車についてもその排出量削減が大きく望まれており、低排出ガス化および低燃費化が進められている。一方、自動車の安全性向上を目的としたクラッシュプルゾーンの確保や車両の意匠性追及等により、エンジンルーム内搭載部品の小型化要求は年々強くなっている。更に車両の安全性や快適性の向上およびIT化を始めとする高機能化等により車両内電力需要も増加している。これらのことから、自動車用電装製品には高出力、高効率、小型、軽量が求められ、特に車両への電力供給を行っている自動車用発電機（オルタネータ：Fig.1）については高効率化が強く求められている。すなわち、オルタネータはその作動エネルギーをエンジン回転力から直接得ているため、発電効率の向上が燃費の向上およびCO₂排出量

削減に直接寄与する。更に高効率化によりオルタネータの小型軽量化にも寄与する。

オルタネータの効率向上には、多極化による高周波駆動とそれに伴う損失の低減が有効である。オルタネータの損失は高周波化に伴う磁気的な損失（ステータコア鉄損）と電気的な巻き線抵抗（銅損）に2分される。損失低減にはコア素材の低鉄損化が有効であることは良く知られているが、一般に鋼板の低鉄損化のためにSi等の元素を添加すると、その影響による加工性の低下および素材コストの上昇などの問題が発生する。逆に加工性を重視してSiをほとんど含まないと、鉄損は高周波化に伴い大きく増加する。これらの問題に対し我々は、低鉄損と加工性という相反する特性の両立にチャレンジし、低鉄損で適正な加工性を持つオルタネータステータコア用電磁鋼板を開発した。そして、この素材とその他の新技術の適用により、従来型に比し約10%の発電効率向上および約20%の軽量化を達成する画期的な新型高効率オルタネータの開発に成功した。

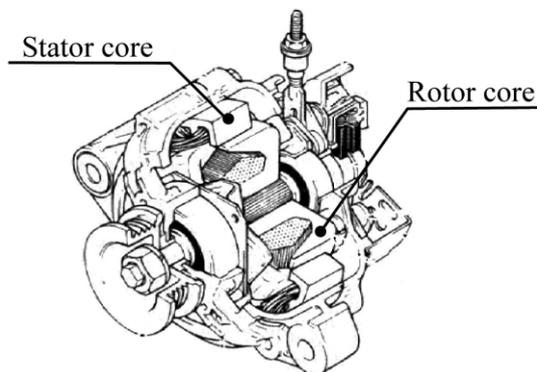


Fig.1 Appearance and structure of an alternator

2. 新型高効率オルタネータと要求材料特性

新型高効率オルタネータは、ステータコアの巻線方式や極数の最適化などを始めとする様々な新技術の採用により高効率、高出力、小型、軽量、低騒音化を達成した。その中で、ステータコア材料としては、従来材料（SPCC）比で1%以上の発電効率向上が可能で従来の製造方法が適用できる材料の開発が必要とさ

* (社)日本金属学会の了解を得て、当学会会報「まてりあ」第41巻第1号(2002)より転載

れた。ポイントは、新たに採用した多極化による高周波駆動や小型化に適応した磁気特性と、従来の高生産性のヘリカル加工 (Fig.2) でステータコア製造を可能とする機械特性を両立させることにある。

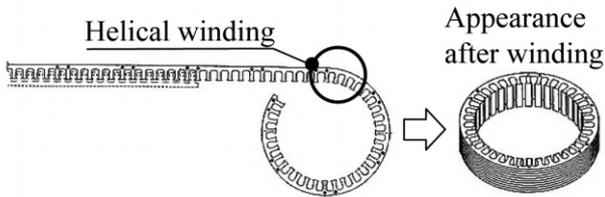


Fig.2 Production method of stator core (Helical winding method)

すなわち、磁気特性は数百Hz駆動時の鉄損低減と小型化による出力電流値確保のための高磁束密度化が必須となり、高周波鉄損が $W_{10/400}$ (磁束密度 $B=1.0T$, 周波数 $F=400Hz$ 時の鉄損) で $70W/kg$ 以下、磁束密度 B_{50} (5000A/mでの磁束密度) で $1.70T$ 以上が必要とされた (Fig.3)。一方、機械特性は、ヘリカル加工時の成型性やプレス打ち抜き性を従来材並に確保するための特性が要求された。特にヘリカル加工時は素材の降伏点 Y_p により製品寸法に大きな影響を受けることから、 Y_p の目標値が $180 \sim 245MPa$ の範囲に限定された。

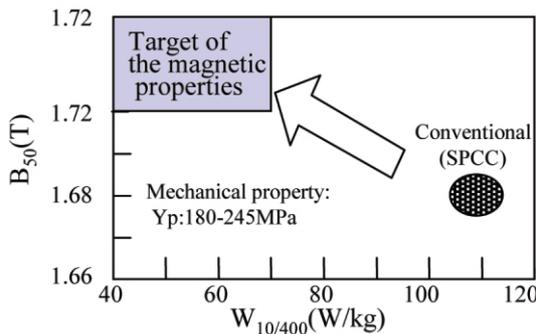


Fig.3 Target of the magnetic and mechanical properties of the material for the development of high efficiency alternator

3. 材料開発ポイント

高周波低鉄損材を得る方法は、Si添加による高電気抵抗化が一般的であるが、この場合磁束密度が低減し、更に加工性の低下や素材コストの増大を招くため、磁気特性と機械特性の両立は困難であった。そこで本開発材料においては、加工性の優れた冷延鋼板 (Si量:0.1%) をベースにし、機械特性と高周波磁気特性

を両立するための新たな手段の開発を目指した。

Si添加以外の鉄損低減法は、歪の除去や後述する低炭素化及び結晶粒径の制御が挙げられる。しかし、冷延鋼板を始めとする低炭素鋼板では固溶C等により Y_p が変動するため、所望の機械特性を得る手段として調質圧延 (以下SK) による歪の印加が避けられない。このため磁気特性は歪の印加により劣化することから、機械特性と磁気特性を両立することは困難とされたが、逆にSK歪量の制御により損失の低減が可能とも考えられる。以下に鉄損と磁束密度の制御ポイントについて述べる。

3.1 高周波鉄損低減

我々は冷延鋼板のSKによる歪と鉄損の関係に着目し、その鉄損抑制の可能性について検討を行うため、実際の Y_p 制御を想定した数%のSK歪での鉄損の評価を行った。その結果 (Fig.4), Y_p はSK伸び率にほぼ比例して変化し、鉄損はSK伸び率0.8%では著しい増加が確認された。ところが、これを超えると鉄損劣化は緩やかで、更にオルタネータの使用している高周波鉄損 (400Hz, 1KHz) では商用周波 (50Hz) に比し鉄損劣化が少なくなっていることが分かった。よって、 $W_{10/400}$ で30%の低鉄損化を行えばSKによる鉄損劣化を補うことが可能であり、SKが0.8~5.0%の範囲は所望の機械特性を得ることができると予想された。以下に具体的な高周波鉄損の低減方法について述べる。

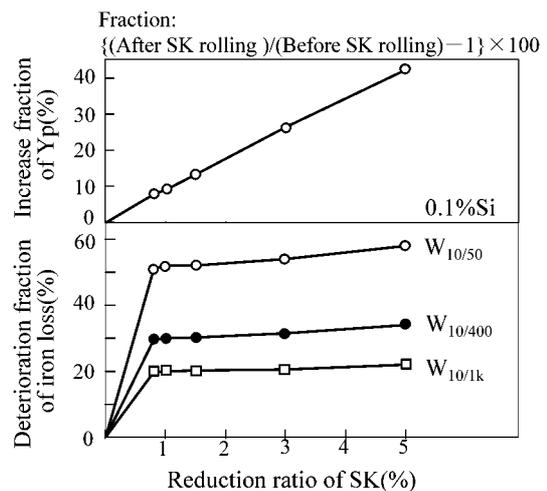


Fig.4 Influence of SK rolling reduction on Y_p and iron loss

素材の全鉄損は履歴損と渦電流損に分離され、下記のように定式化される¹⁾。

$$W = Wh \text{ (履歴損)} + We \text{ (渦電流損)}$$

$$Af/D + BDt^2f^2 / \text{ (A, B:組織因子パラメータ)}$$

(D:結晶粒径, :電気抵抗率, t:板厚, f: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²⁾。すなわち前述のSKによる高周波鉄損の劣化が商用周波数(50Hz)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、本開発においては、SK前の鉄損を極力低減するために、渦電流損に対し素材製造コストを踏まえて板厚を低減(従来0.5mm→0.35mm)し、履歴損低減に対しては組織制御を検討した。Fig.5にそれら因子の効果を示す。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、更に板厚減と併せて、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。

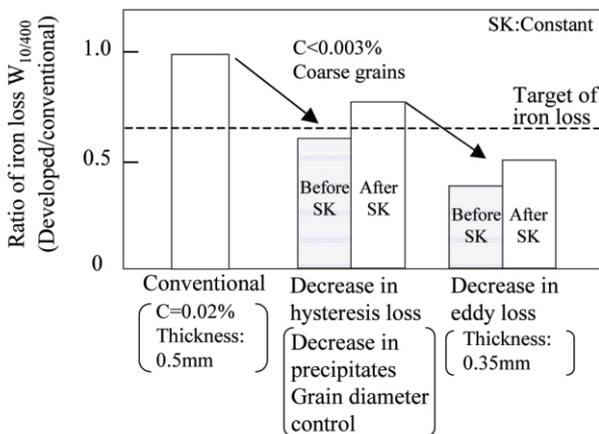


Fig.5 Improvement of hysteresis loss and eddy current loss by the several methods

3.2 高磁束密度化

一方、磁束密度はSKにより約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前段階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、Si等の合金元素を極力低減して磁性に有利な集合組織に制御した。更に効果的な制御方法として冷延前組織や圧下率制御³⁾⁴⁾および成分の適正化⁵⁾などが知られていることから、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に着目し、冷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、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、B50は大きく改善した(Fig.6)。

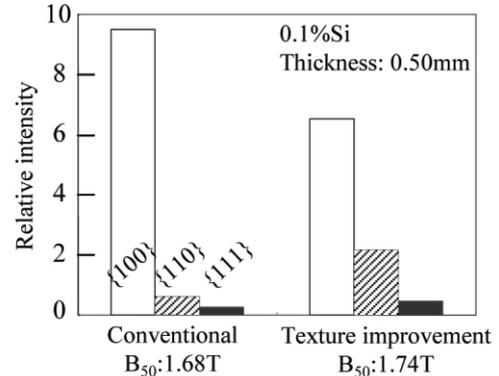


Fig.6 Improvement of B₅₀ by texture control

3.3 機械特性安定化

鋼中に固溶CやNを含有する場合は、SKにより可動転位が導入されると常温歪み時効は抑制されるが、SKが低圧下の場合や使用環境によってはC、Nが転位に固着してY_p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Y_pの変化量を最小限に抑制した。

4. 開発材料の特性

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なく高周波磁気特性と機械強度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 1 Magnetic and mechanical properties of the developed material

Material	Thickness (mm)	W _{10/400} (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

5. 実機への適用結果

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。本開発材料を用いることによりステータ鉄損が抑制され、従来製品と同等以下の体格を持ちながら、効率および出力の向上が可能となった。

本開発材料を採用した新型オルタネータは、日本国内において2000年1月より製造を開始し納入先より大変好評を得ると共に、今後更に他車種への適用展開も予定されている。なお、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。

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%

6. 環境への貢献度

当製品の環境改善への貢献度は非常に大きい。車両諸条件にもよるが、新型オルタネータにより自動車の実用燃費が4%向上するという評価結果も得られており、この場合1ヶ月に1000km走行し従来燃費が10km/Lと仮定すると、CO₂排出量は年間31kg/年、燃料48L/年が計算上削減可能となる。この効果を日本国内の自動車すべてに本オルタネータが搭載されたと仮定した場合で見積もると、地球温暖化防止京都会議(COP3)京都議定書でのCO₂削減目標(CO₂排出量1990年比約6%削減)のうち約3%(1999年国内CO₂排出量にて概算)が削減可能と算定される。

7. おわりに

冷延鋼板並のSi量(0.1%)で加工性と電磁特性を両立した新型オルタネータコア用素材を開発した。この開発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、実用化を達成できた。

今後、高磁束密度および低鉄損化と加工性の両立が要求される自動車関連の他製品への適用の可能性も広がった。

8. 特許

本開発は川崎製鉄(株)と(株)デンソーとで共同開発した。特許は平成8年に両社共同で出願済みである(特開平9-256119)。

<参考文献>

- 1) 小原隆史：第155回西山記念講座，p.151。
- 2) K. Matsumura and B. Fukuda: IEEE Trans. Mag. 20 (1984), p.1533。
- 3) 阿部光延，小甲康二，林征夫，速水哲博:日本金属学会誌，44(1980), p.84。
- 4) M. Matsuo, S. Hayashi and S. Nagashima: Adv. Xray Anal. 14 (1971), p.214。
- 5) H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura and Y. Shono: "Energy Efficient Electrical Steels"(1980), 193 [TMS-AIME]



< 著 者 >



青木 哲也
(あおき てつや)
材料技術部
磁性材料(電磁鋼板, 永久磁石材料)
関連の研究に従事



松原 慎一
(まつばら しんいち)
電機技術2部
オルタネータ開発研究に従事



河野 正樹
(かわの まさき)
川崎製鉄(株) 技術研究所
電磁鋼板研究部門
電磁鋼板の研究開発に従事



酒井 敬司
(さかい けいじ)
川崎製鉄(株) 水島製鉄所
電磁鋼板部 電磁鋼板課
電磁鋼板の研究開発に従事



藤山 寿郎
(ふじやま としろう)
川崎製鉄(株) 水島製鉄所
商品技術部 電磁鋼板室
電磁鋼板の研究開発に従事