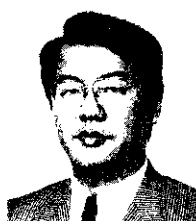


Electrical Steel for Motors of Electric and Hybrid Vehicles



本田 厚人
Atsuhito Honda

技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(課長)・工博



Send 邦浩
Kunihiko Senda

技術研究所 電磁鋼板研究部門
主任研究員(主席掛長)



定廣 健一
Kenichi Sadahiro

技術研究所 電磁鋼板研究部門
主任研究員(主席掛長)

要旨

川崎製鉄では誘導モータ、ブラシレス DC モータなどの性能を評価する装置を用いてモータ鉄心用素材の電磁鋼板を評価し、モータタイプごとに最適な電磁鋼板が存在することを明らかにしてきた。銅損が主体の誘導モータ用には、高磁束密度の RP シリーズや RMA シリーズが適している。鉄損の大きなブラシレス DC モータ用には、加工性に優れ、高周波鉄損が小さく比較的磁束密度も高い RMHE シリーズが適している。また、いずれのモータでも接着型 B コート材を用いることにより、モータを低損失、低騒音化できることを明らかにした。

Synopsis:

Kawasaki Steel has found that there exists suitable electrical steel sheets as core materials depending on motor types such as induction, brushless DC, and reluctance motors, through the evaluation of core materials conducted by using several motor test machines. RP and RMA series of high flux density are suitable to induction motors. RMHE series of excellent punchability, low iron loss and high flux density are suitable to brushless DC motors. B coating of self-adhesive type organic coating was found to be effective to reduce the iron loss and the noise of motors.

1 緒 言

20 世紀後半以降、世界的にエネルギーの有効利用および環境保護が最も重要な課題として取り上げられるようになってきた。なかでも米国カリフォルニア州の取り組みは先進的で、自動車会社に対して、2003 年以降 PZEV (partial zero emission vehicle) を最低 10% 以上販売することを義務付けている。これを機に、PZEV の対象である電気自動車、ハイブリッド車など省エネルギー、低公害車の開発が精力的に進められてきた。

自動車の駆動あるいはアシスト用のモータとしては、Fig. 1 に示すように誘導モータ、ブラシレス DC モータ、およびリラクタン্সモータが知られている。一般に、欧米の電気自動車は誘導モータを使用するものが多い。これは誘導モータが、ブラシを必要とする DC モータより信頼性が高いこと、磁石を必要とするブラシレス DC モータより低コストであることなどによる。日本においては早くから高性能で信頼性の高い磁石の開発が進んだことを背景として、ブラシレス DC モータの開発が進み、主としてこれが電気自動車やハイブリッド車に使用されてきた。サイズの大きな米国車とは異なり、車内スペースに限りのある日本車においては、モータの小型化を図る必要性が高かったこともブラシレス DC 化促進の一因と考えられる。またさらに最近の制御技術の向上により、従来は騒音、振動が大きいためにその使用が制限されていた SRM (スイッチト

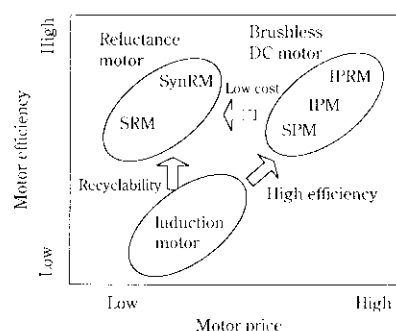


Fig. 1 Comparison of induction, reluctance and brushless DC motors

リラクタン্সモータ) や、SynRM (シンクロナスリラクタン্সモータ) などの適用も検討されている¹⁾。

一方、モータの性能は、鉄心材料である電磁鋼板の特性にも大きく依存する。Fig. 2 に主な電磁鋼板の鉄損と磁束密度の関係を示す²⁾。高 Si 低鉄損の高級品から低 Si 高鉄損の低級品までの従来電磁鋼板製品 RM シリーズに加えて、これらと同じ鉄損で磁束密度が高い電磁鋼板などが種々開発されてきた。

本報告では、各種のモータの特性に及ぼすモータ鉄心用電磁鋼板の影響を明らかにし、それぞれのモータ鉄心用に最適な電磁鋼板を提案紹介する。また、今後自動車においてもニーズの高まりが期待されるリアクトル用に新たに開発した電磁鋼板を紹介する。

* 平成14年1月23日原稿受付

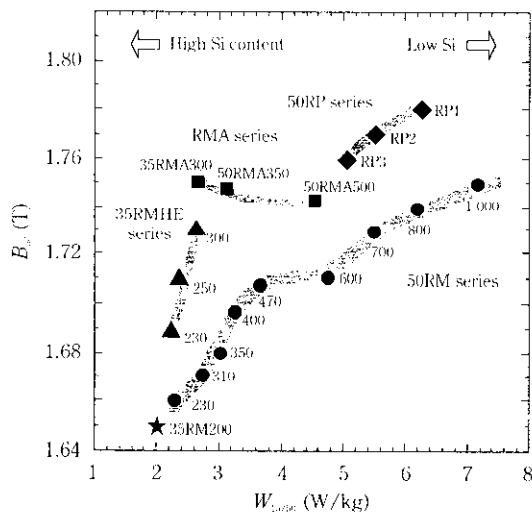


Fig. 2 Iron loss and flux density of non-oriented electrical steel produced by Kawasaki Steel

2 各種モータの特性に及ぼす鉄心材料の影響

川崎製鉄では、600 W 単相誘導モータ、400 W 3 相 6 極誘導モータ、300 W 3 相 8 極ブラシレス DC モータ評価装置を開発し³⁻⁵⁾、これらのモータ特性に及ぼす電磁鋼板素材の影響を明らかにしてきた。現在はスイッチトリラクタンスモータ評価装置を導入し、素材評価を進めている。また、磁界解析ソフト JMAG を応用し、より精度の高いモータ用素材評価を試みている。

上記の評価装置を用いて調査した各種モータの特性に及ぼす電磁鋼板素材の影響を以下に述べる。

2.1 誘導モータ特性に及ぼす鉄心素材の影響

Fig. 2 に示す電磁鋼板のうちのいくつかを用い、単相誘導モータを作製して損失を測定した結果を Fig. 3 に示す³⁾。誘導モータの損失においては、モータ銅損の方がモータ鉄損より 2 倍以上大きい。また、素材鉄損の小さい高 Si 材を用いることによりモータ鉄損が減少するが、逆にモータ銅損は増加する。これは、素材 Si 量が増加することにより、鉄損は減少するものの飽和磁束密度が減少して高磁場の素材磁束密度が低下し、励磁電流が増加したためであると考えられる。

モータの小形化の際にはモータ設計磁束密度を大きくする必要がある。このときのモータ損失に及ぼす素材の影響を調べるため、入力電圧を定格より増加させて高設計磁束密度化したときのモータ損

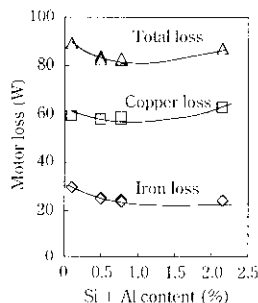


Fig. 3 Effect of Si - Al content of core material on iron loss, copper loss, and total loss of induction motor at rated input voltage of 100 V

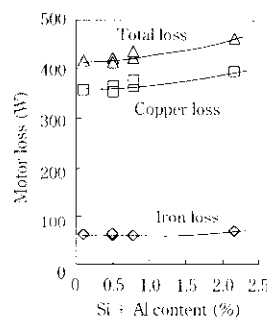


Fig. 4 Effect of Si + Al content of core material on iron loss, copper loss, and total loss of induction motor at high input voltage of 130 V

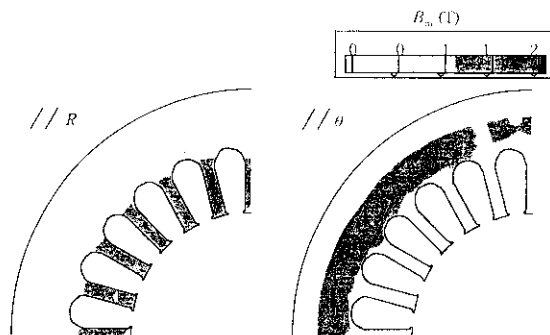


Fig. 5 Flux density distribution in induction motor stator core measured by the stylus probe method

失を調査した結果を Fig. 4 に示す³⁾。高 Si 材は高設計磁束密度化によりさらに飽和に近づくため、銅損劣化が激しくなり、むしろ飽和磁束密度の高い低 Si 材の方が全モータ損が小さくなる。

誘導モータステータ鉄心の磁束密度分布を探針法^{6,7)}によって実際に測定した例を Fig. 5 に示す⁸⁾。ステータのティース、ヨーク部はともにその磁束密度は 1.5 T 以上と大きい。モータ鉄心の小型化は、ますますこの部分の磁束密度を飽和に近づけると考えられる。

以上述べたことより判断して、モータ鉄損に比べてモータ銅損が大きい誘導モータ用には、比較的低い Si 量で、磁束密度の高い素材が適しているといえる。

2.2 ブラシレス DC モータ特性に及ぼす鉄心素材の影響

ブラシレス DC モータの最大効率に及ぼす素材鉄損の影響を Fig. 6 に示す⁹⁾。このモータの最大効率は、素材の歪み取り焼鈍の有無

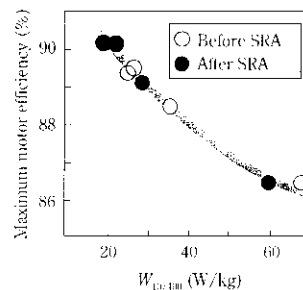


Fig. 6 Relationship between maximum motor efficiency and material iron loss at high frequency before and after stress relief annealing (SRA)

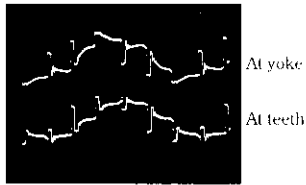


Fig. 7 Differential wave form of flux density in stator core

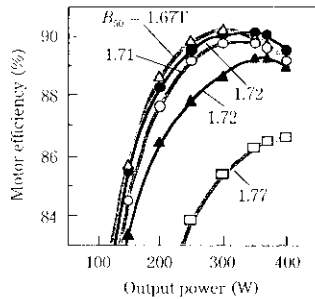


Fig. 8 Relationship between motor efficiency and output power

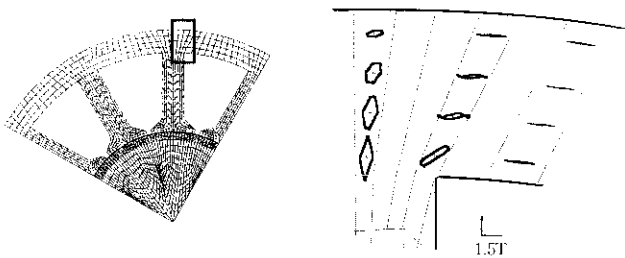


Fig. 9 Rotational flux distribution of brushless DC motor core calculated by JMAG

によらず一般的に素材の 400 Hz の鉄損に依存することが明らかとなった。ブラシレス DC モータは、ロータに希土類系などの強力な磁石を用いるため、励磁のための一次電流が小さくてすむし、またロータに導体が存在しないため二次電流が発生しない。したがってブラシレス DC モータは、誘導モータとは反対にモータ銅損が小さく、モータ鉄損のほうがより大きくなる。このことがブラシレス DC モータの最大効率が素材の鉄損とよい相関を示す主たる原因と考えられる。また、本モータの最大効率となる周波数が約 100 Hz であるにもかかわらず、400 Hz の素材鉄損とよい相関を持つのは、Fig. 7 に示すように、本モータステータ鉄心のティース、ヨーク部の磁束密度波形が高次の高調波成分を有することが原因である。この高調波成分は、PWM 励磁波形およびロータ磁石による励磁が影響していると考えられる。

上述の内容から判断して、ブラシレス DC モータ用には高周波域の鉄損が小さい材料が適している。定格を超えて過負荷がかかるような領域では、Fig. 8 に示すように高磁束密度材料ほど効率が上昇するため、できれば磁束密度も高いことが望ましい。

一方、一般のモータ鉄心においては、局所的に発生する回転磁束がモータ鉄心の鉄損に大きく影響することが知られている。Fig. 9 に、磁界解析ソフト JMAG を用いて解析したブラシレス DC モータ鉄心の回転磁束分布の一例を示す。ティース付け根部に大きな回転磁束が発生している様子が分かる。今後モータ損失に及ぼす素材の影響をより正確に把握してモータ設計に役立てるためには、このような局所的磁束変化を考慮した、計算機シミュレーション技術の改善が必須である。これにより、本モータと異なる PWM 励磁波形

や磁石の着磁条件のモータで、鉄心の磁束波形が本ステータの磁束波形と異なる場合にも容易に最適素材を提案できるようになると考えられる。川崎製鉄では現在、磁界解析をもとに鉄損分布計算を可能にすべく計算および検証実験を進めている。

2.3 スイッチトリラクタンスモータ特性に及ぼす鉄心素材の影響

スイッチトリラクタンスモータは、誘導モータやブラシレス DC モータと異なり、そのロータが導体も磁行も必要とせず鉄心だけで構成される。このため、低コスト、堅牢でしかもリサイクル性に優れるため、自動車用の駆動モータとしてもその将来性が注目を集めている¹¹⁾。モータ性能に及ぼす素材の影響に関してもすでにいくつかの報告¹²⁾¹³⁾がある。たとえば、中村ら¹²⁾は、低級素材 50A1000 と高級低鉄損材 35A290 材を用いてスイッチトリラクタンスモータを製作し比較調査し、低鉄損材を用いてかつ進み励磁制御を行うことにより、高鉄損材を用いるときより 10% 以上も効率の高い、80% 以上の効率を達成している。材料による効率の差は、材料の鉄損の差が主な原因であるとしている。

このように、スイッチトリラクタンスモータ用としても、低鉄損材が有効である可能性が高い。リラクタンストルクを大きくするためには素材の磁束密度を高めることがポイントでもあるため、今後より詳細に素材の影響を明らかにして行く必要がある。川崎製鉄でも評価装置をすでに導入し、材料評価を行いつつある。

3 各種モータ鉄心用の最適素材の提案

川崎製鉄においては極めて高度な、介在物、結晶粒、集合組織制御や高純度化などの技術を駆使することによりさまざまな無方向性電磁鋼板を開発してきた¹⁴⁾¹⁵⁾ (Fig. 2)。前章において検討した、各種モータ性能に及ぼす鉄心素材の影響に基づいて、誘導モータ、ブラシレス DC モータ、およびスイッチトリラクタンスモータに対する最適素材を以下に提案する。

3.1 誘導モータ用素材

(1) RMA シリーズ¹⁶⁾¹⁷⁾

誘導モータは前章に記したように、モータ鉄損よりモータ銅損の割合が高い。したがって、モータ鉄心素材は、低鉄損であることよりむしろ磁束密度が高いことが要求される。RMA シリーズは、この要求にこたえるため、介在物形態制御により、歪み取り焼鈍時における結晶粒成長性を高めることに成功したものである。この技術により、Si 添加量を抑えることで磁束密度を高く保持したまま、粒成長によるヒステリシス損低減の効果により比較的低い鉄損を実現したものである。

(2) RP シリーズ¹⁸⁾

高磁束密度の RP シリーズは、誘導モータやその他小型の EI 鉄心などの鉄心用材料として開発された。特に小型化を目的とした高設計磁束密度の誘導モータでは、前述のようにモータ損の大部分をモータ銅損が占めるようになる。この銅損を低減するためには、素材の Si 添加量を RMA シリーズより一層低減し、高磁場における磁束密度を高めた電磁鋼板を使用することが重要である。RP シリーズはこうした用途に最適であると考えられる。

(3) 接着 B コート¹⁹⁾²⁰⁾

接着 B コートは有機系ホットメルト接着タイプであり、通常の打ち抜き積層後のかしめや溶接を行うことなく、加圧しな

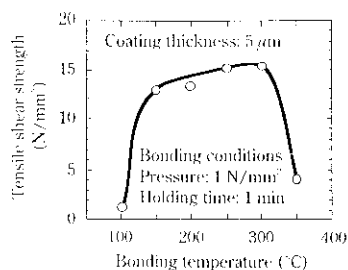


Fig. 10 Effect of bonding temperature on tensile shear strength at a room temperature

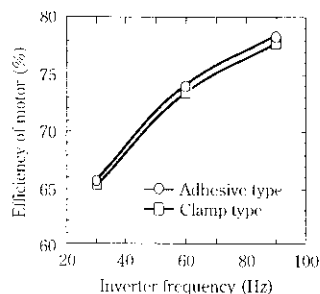


Fig. 11 Effect of core assembly method on efficiency of model motor using 50RM700*B as core material

から加熱することにより、強固に接着することが可能である。**Fig. 10** に 5 μm 厚の B コートの室温における接着強度に及ぼす加圧接着温度の影響を示す。150~300°C の加圧接着により良好な接着強度が得られている。**Fig. 11** に、通常の絶縁コートを用いてピンかしめにより積層した鉄心と、接着 B コートを用いて固着積層した鉄心のモータ効率を比較して示す。接着コートのほうが高い効率を得られている。また接着コートにより 2~5 dB 程度の騒音の抑制効果も確認されている。これは、ピンかしめによる固着が、鉄心素材に対して部分的な歪みを与えるのに対して、表面全面で固着する接着コートは、歪を分散することにより鉄損劣化や磁歪振動を軽減したものと考えられる。

この接着 B コートは誘導モータ材に限らず、ブラシレス DC モータや、スイッチトリラクタンスモータなど他のモータ鉄心にも適用可能である。

3.2 ブラシレス DC モータ用素材の提案

(1) 最高級グレード材 35RM200²⁹⁾

高純度化を極限まで進め、冷間圧延が可能な限界まで Si, Al を添加し、介在物形態制御、集合組織制御を行うことにより世界最高級の低鉄損材 35RM200 を開発した。他のブラシレス DC モータ鉄心用の材料とともに、磁気特性および硬度特性を **Fig. 12** に示す。本材料は、板厚 0.35 mm 厚材の中ではもっとも低鉄損である。ただし、Si, Al などの添加元素を増量して電気抵抗を高め、それにより渦電流損低減を図ったため、硬度は $Hv \geq 220$ と硬くなっている。

(2) 加工性に優れた RMHE シリーズ²⁹⁾

打ち抜き加工される材料は、作業性あるいは金型磨耗の抑制などの点から、 $Hv \leq 200$ 以下が望ましいとされている。Si, Al, Mn などの元素は、それぞれ電気抵抗、硬度への寄与の度合いが異なる。RMHE シリーズは、これらの元素の添加配分を最適化することにより、硬度の増大を最低限に抑えた上で、高い電気抵抗つまりは低鉄損を実現したものである (**Fig. 12**) また、

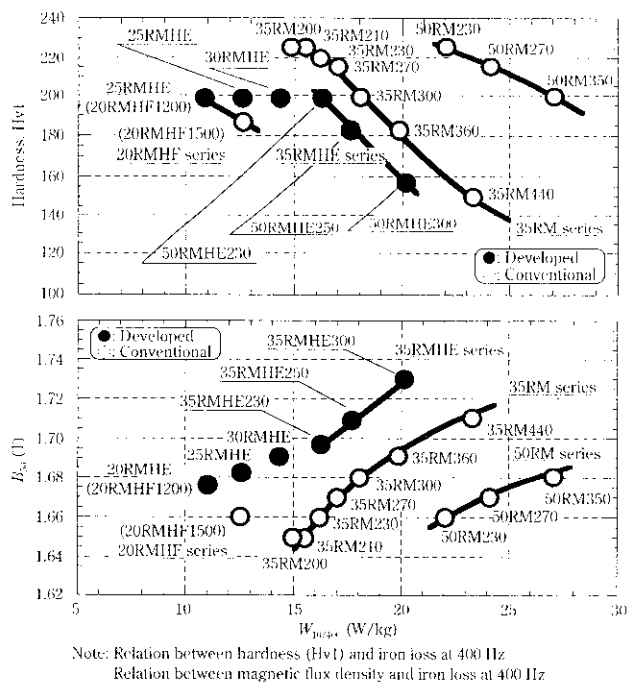


Fig. 12 Magnetic and mechanical properties of RMHE and RMHF series

集合組織の改善のためには、粒界偏析元素を添加し、かつ中間工程を最適化することにより、磁気特性に有害な (111) 集合組織を低減し、(100), (110) 集合組織を増加させた。

このような技術開発によって RMHE は、同一鉄損の RM シリーズより高磁束密度でかつ低硬度を達成することができた。また、JIS グレードにはない 0.30, 0.25, 0.20 mm の薄厚材の開発により、さらなる低鉄損化を達成することができた。

(3) 分割モータ鉄心用の電磁鋼板

巻線作業の高効率化や、コイルエンド部の低減によるモータ銅損の低減のために、分布巻に変わって集中巻きモータの開発が進んでいる。これにともなう、一部のハイブリッド車モータでは、分割タイプの鉄心が実用化されている。これは、電磁鋼板の利用効率を向上させるだけでなく、電磁鋼板の設計思想にも影響を与えるものとして注目される。つまり、鉄心の分割の仕方によっては、ある特定方向の磁気特性のみ改善すれば、他の方向はさほど良好な特性を必要とせずにモータ性能を向上させることができる。したがって方向性電磁鋼板などの使用の可能性も出てきた。

3.3 スwitchトリラクタンスモータ用鉄心素材の提案

現在詳細な実験中であるため最適素材の提案は今後の課題である。しかし前述のように、このモータの効率改善には低鉄損材の使用が有効であり、またこのモータ特徴の一つである高トルクを目標とする場合には高磁束密度材が有効であると考えられる。したがって高磁束密度でかつ比較的鉄損である RMHE シリーズが有望となるのではと考えられる。

4 モータ制御のためのインバータ用リアクトル素材 HiFreqs

ブラシレス DC モータをはじめとして日本における最近のモータの多くがインバータにより回転制御されている。このインバータ駆

Table 1 Magnetic properties of core materials for high frequency use

Material	Thickness (mm)	Resistivity ($\mu\Omega\text{m}$)	Saturation induction (T)	Iron loss (W/kg)		
				$W_{20\text{kHz}}$	$W_{1\text{kHz}}$	$W_{0.5\text{kHz}}$
HiFreqs	0.1	85	1.81	20	9.7	6.2
20RMHF1200	0.2	54	1.52	32	23	19

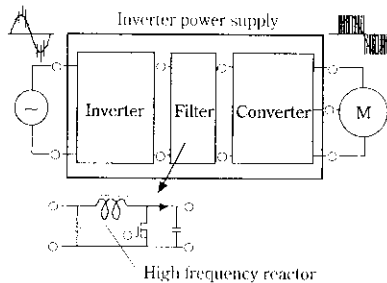


Fig. 13 Schematic diagram of reactor used in inverter circuit

動モータの効率をさらに向上させるため、一部のエアコンディショナーでは PAM 制御 (Fig. 13) が行われており、この動きは自動車にも展開していくと考えられる。

PAM 方式の制御においては、10~20 KHz 域で使用される高周波リアクトルが必要であり、アモルファスや高 Si 材などが用いられている。これらの素材は高周波特性に優れたものの、加工しづらいという問題があるため、川崎製鉄では高周波特性および加工性をともに満足する材料 HiFreqs を開発した²³⁻²⁵⁾。Table 1 に HiFreqs および比較材の諸特性を示す。HiFreqs 材は、鋼の純度を高め、Si とともに Cr を有効利用することにより低硬度かつ低鉄損を達成したものである。耐食性にも優れたという特徴を持つ。

市販の PAM 制御エアコンを購入し、種々の材料を用いてリアクトル性能を評価した結果を Fig. 14 に示す。HiFreqs は良好な損失性能を示す。アモルファスリアクトルの損失が比較的大きいのは、

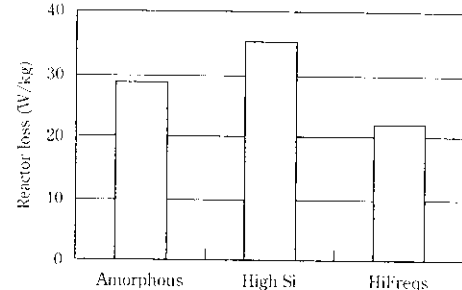


Fig. 14 Iron loss of reactors made by 3 kinds of core materials

リアクトル加工によるひずみの影響と考えられる。

5 結 言

川崎製鉄は、自動車用のモータ鉄心材として以下に示すような優れた無方向性電磁鋼板を開発してきた。

誘導モータ用に適した高磁束密度材 RP シリーズと、重み取り焼鈍後において低鉄損、高磁束密度の RMA シリーズを開発した。ブラシレス DC モータ用には、最高級低鉄損材 35RM200 あるいは加工性に優れた高磁束密度低鉄損材 RMHE シリーズが最適である。またいずれのモータにおいても、積層固着加工による重み劣化を軽減するため、接着 B コートが有効である。インバータ駆動のモータ効率を高めるために用いる高周波リアクトル材として、高周波磁気特性および加工性に優れた HiFreqs を開発した。

参 考 文 献

- 1) 秋山勇治, D. Jones: *Nikkei Mechanical*, **499**(1997), 50
- 2) 本田厚人, 石田昌義, 島田一男: 川崎製鉄技報, **32**(2000)1, 43
- 3) Honda, B. Fukuda, I. Ohya, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**(1990), 141
- 4) 本田厚人, 佐藤主司, 石田昌義, 大山一男: 電気学会回転機研究会資料, RM-97-148
- 5) 石田昌義, 稲永章子, 本田厚人, 大山一男: 電気学会回転機研究会資料, RM-98-147
- 6) 山口俊尚, 今村正明, 手田邦浩, 石田昌義, 佐藤主司, 本田厚人, 山本孝明: 電気学会論文誌 A, **115**, 50, (1995)
- 7) 手田邦浩, 石田昌義, 佐藤主司, 小松原道郎, 山口俊尚: 電気学会論文誌 A, **117**, 942, (1997)
- 8) 石田昌義, 本田厚人, 小松原道郎, 佐藤主司, 大山一男: 電気学会回転機研究会資料, RM-99-22
- 9) 中村和夫, 家名田敏昭, 渡辺忠昭, 一ノ倉理: 電気学会マグネティックス研究会, MAG-00-101
- 10) 会澤敏満, 西濱和雄, 沢孝一郎: 電気学会回転機研究会, RM-98-152
- 11) K. Matsumura and B. Fukuda: *IEEE Trans. Mag.*, **MAG-20**, (1984)5, 1533
- 12) 松村一治, 福田文二郎, 木下勝雄, 今井卓雄, 小畑良夫, 宮崎重紀: 川崎製鉄技報, **15**(1983)3, 208
- 13) 入江敏夫, 松村一治, 莊野保之, 中村広登, 嶋中一浩: 鉄と鋼, **64**(1978)11, S765
- 14) 入江敏夫, 松村一治, 中村広登, 莊野保之, 伊藤一庸, 嶋中一浩: 鉄と鋼, **65**(1979)11, 1056
- 15) 小松原道郎, 中村広登, 松村一治: *CAMP/ISIJ*, **2**(1989)6, 1935
- 16) 高島一穂, 篠原雅典, 本田厚人, 岡村一進, 森戸延行: まてりあ, **36**(1997), 385
- 17) 高島一穂, 小野智隆, 西村恵次: 川崎製鉄技報, **29**(1997)3, 185
- 18) 尾崎芳宏, 小林義紀: 川崎製鉄技報, **29**(1997)3, 183
- 19) 小森ゆか, 足立重好, 寺嶋正一: 川崎製鉄技報, **29**(1997)3, 187
- 20) 小森ゆか, 江口邦彦, 本田厚人, 小松原道郎, 大山一男: 電気学会マグネティックス研究会, MAG-99-69
- 21) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎: 川崎製鉄技報, **33**(2001)2, 92
- 22) 石井一誠: *J. IEE Jpn.*, **120**(2000)360
- 23) 近藤一修, 河野正樹, 本田厚人, 高城重彰, 小松原道郎: 電気学会基礎材料共通部門大会, (2000)146
- 24) 定廣健一, 近藤一修, 石田昌義, 小松原道郎: 電気学会全国大会, **2**(2001)747
- 25) K. Sadahiro, M. Ishida, A. Honda, and M. Komatsubara: The New Automotive 42V Power Net, (2001)234