

Non-Oriented Electrical Steel Having Excellent Punchability
for High-Efficiency Motor酒井 敬司
Keiji Sakai水島製鉄所 管理部電
磁鋼板管理室 主査
(主席掛長)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水島製鉄所 管理部電
磁鋼板管理室 主査
(課長)

要旨

加工性に優れかつ低鉄損、高磁束密度な無方向性電磁鋼板 (RMHE, RMHF シリーズ) を開発した。省エネルギーには不可欠な、モータ高効率化の市場ニーズに対応する商品である。この商品の特徴は、最高グレードの低鉄損を確保しつつ、プレス加工性も考慮した適正硬度の材料であり、硬度が高く加工できなかったモータコアメーカーでも低鉄損材料が使用可能となる。また磁束密度も高めており、最終製品であるモータの効率をいっそう向上でき、さらに銅線、鉄心、モータカバーなど各種部品の材料使用量を低減できる効果もある。この商品はブラシレス DC や誘導タイプのモータのみならず発電機にいたるまでの鉄心材料に適している。優れた特性を有する本開発材料は、今後の高効率モータの普及にともない、省エネルギーに大きく貢献するものと期待される。

Synopsis:

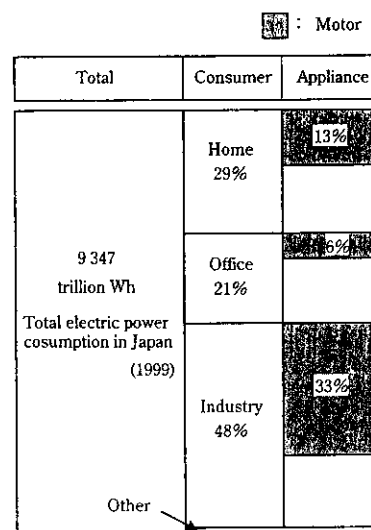
Non-oriented electrical steels (RMHE and RMHF) for high-efficiency motor have recently been developed for the purpose to meet customers requirements from the viewpoint of energy saving and efficiency enhancement of motors. The steels are characterized by an improvement in their texture. The advantages of these new materials are not only their low iron loss but also appropriate hardness and high magnetic flux densities. Their hardness is controlled to over 20 points at Hv1 below that of conventional material having similar iron loss, which leads them to excellent punchability in customer use, especially in the use of high-efficiency motors. These developed materials boost the spread of high-efficiency motor and contribute to saving energy consumption.

1 緒 言

電気は比較的簡単かつ安全に搬送可能なこと、動力や熱あるいは光に変換できること、さらに他のエネルギーで代用の効かない電気機器や情報機器を効率よく作動しうするため、全エネルギー資源の40%以上を占める。国内の電力総需要は9347億kWh (1999年)¹⁾で、日本は世界第4位 (1995-1996年)²⁾の電力消費国である。Fig. 1に国内電力消費量構成を示す¹⁾。分野別では産業向けが48%と一番大きく、以下家庭電力用の29%、事務所・商店用の21%と続く。電気機器の中ではモータにより消費される電力が大きく、総電力量の52% (4860億kWh) と半分以上になる。仮にすべてのモータ効率が1%向上とした場合、年間約60億kWhの電力削減効果が創出できる。この値は金額換算で年間1000億円以上、原子力発電所であればおおむね1基分、火力発電所で5~6基分に相当する。日本の発電量は夏のピーク電力に合わせて供給計画が立てられており、発電所の削減 (今後の建設計画見直し) まで踏込んだ視点で見れば、モータ効率1%向上の経済効果はさらに大きいものと考

えられる。

COP3以前の電力消費量試算では、今後10年もさらなる消費の

Fig. 1 Profile of electric power consumption in Japan^{1,3)}

* 平成13年3月5日原稿受付

伸びが見込まれていた。しかし、発電により発生する環境破壊物質 (CO_2 , SO_x , NO_x など) の排出を削減するために、世界各国では厳しい省エネルギーの目標が課せられている。日本でも 1999 年 4 月の改正省エネ法施行にともない、家電製品のトップランナー方式の導入や高効率汎用モータの JIS 化、また自動車分野の電気自動車化やハイブリット車化の動向など、具体的にモータの高効率化による省エネルギーが進行しつつある。このような市場ニーズを背景に、これらのニーズに対応した新電磁鋼板である RMHE の新シリーズおよび RMHF の上位グレードを開発した。

2 モータ鉄心用材料としての電磁鋼板の加工性

モータの鉄心は無方向性電磁鋼板をプレス打抜き機によって所定の形状に打抜いた後、歪取焼鈍 (行わない場合もある) を施し、巻線を巻いた後、各部品を装着して組み立てられる。この作業の能率向上のためには、材料特性として打ち抜き加工性の良いことが要求される。その他、無方向性電磁鋼板に通常要求される特性としては低鉄損と高磁束密度である。モータのエネルギー損失 (鉄損、銅損、機械損) を低減して高効率化や機器のコンパクト化を行うためには、鉄心材料 (電磁鋼板) の鉄損を低下するとともに磁束密度を高くすることが有効である。一方、永久磁石を使用したブラシレス DC モータ化やインバータ制御化による高効率化も拡大されつつあり、これらの構造や制御方法に適する電磁鋼板の要求もある。具体的には商用周波域のみでなく高周波域の低鉄損性を有する材料であり、一層の高効率化が必要な自動車駆動用モータや超高速回転用モータあるいは高効率コンプレッサ用鉄心として極めて低い鉄損の材料が要望されている。このためには、ひとつは Si 含有量を増加させるなど鉄板の電気抵抗を増加させる手段があり、他の手段としては、標準板厚の 0.35 mm を下回る薄物の電磁鋼板を製造することである。

しかし、これらの手段はいずれもプレス加工性を低下させるものである。したがって、商品開発においては低鉄損化や高磁束密度化と同時に「加工性に優れた」材料であることが必須の条件となる。

3 高効率モータのための必要材料特性

3.1 モータ効率向上のために必要な材料特性

電磁鋼板の磁気特性とモータ効率に関する従来からの知見としては、AC モータに関するものが主であった⁹⁾。しかし近年、PWM 制御のインバータ駆動によるモータが普及するにしたがい、異なる知見も得られている。以下に各モータ種類別の無方向性電磁鋼板へ要求される特性を示す⁹⁾。

(1) AC 誘導モータ (Fig. 2)

- (a) このモータは、ロータに 2 次銅損が生じるため、モータの全損失に占める銅損の割合が高い。したがって、モータ励磁電流の低減を可能とする高磁束密度材料の使用が、モータ効率の向上に寄与する (Fig. 2)。

- (b) また、材料の低鉄損化もモータ鉄損の低減に直接影響して、モータ効率の向上に寄与する。

(2) ブラシレス DC モータ (Fig. 3, 4)

- (a) このモータの損失はモータ鉄心の損失が支配的なため、モータ効率は AC 誘導モータに比べ鉄心材料の鉄損に対する依存性が強くなる。特に商用周波数を超える高周波域での鉄損 (たとえば $W_{10/400}$) との相関が強く、鉄心材料の低

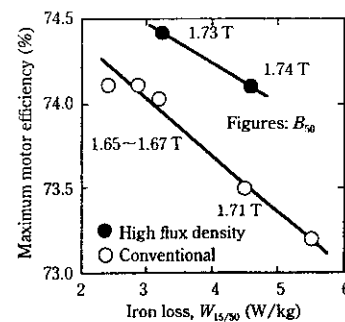


Fig. 2 Relation between maximum efficiency of induction motor and iron loss of core material

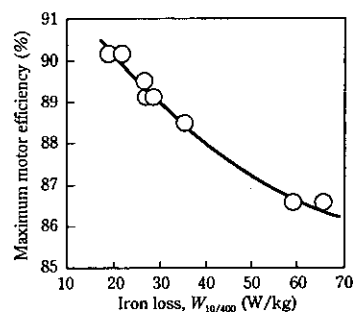


Fig. 3 Relation between maximum efficiency of brushless DC motor and iron loss at 400 Hz of core material

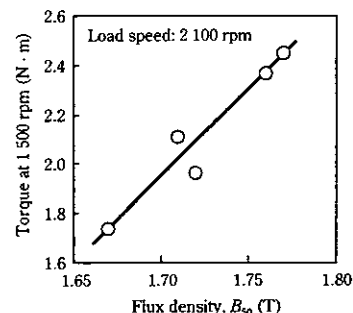


Fig. 4 Influence of flux density B_{50} of core material on torque of brushless DC motor at 1500 rpm

鉄損化がモータ効率の向上に有効である (Fig. 3)。

- (b) 銅損低減に寄与する高磁束密度化の効率への影響は、AC 誘導モータに比べ小さい。しかし、高出力域においては、高磁束密度材料の方が効率が向上する傾向がある。

- (c) 鉄心材料の高磁束密度化により、高トルク化が達成可能である (Fig. 4)。

以上のように、モータ効率を向上させるためには、従来からの低鉄損の追求と、必要に応じた高磁束密度化を同時に達成する鉄心材料が要求される。特に、PWM 制御に代表されるインバータ駆動のモータへの適用により、モータ鉄心材料の代表特性として $W_{10/400}$ という従来の商用周波数を超える高周波特性が重要視されるようになった。

3.2 その他の要求特性

(1) 良好な打ち抜き加工性

打ち抜き加工時の金型摩耗は、一般に鋼板の硬さが増加する

と促進される。したがって、高効率モータ用としては、磁気特性のみならずコア打ち抜き時の金型摩耗を抑制するため、硬さを適正値に制御した商品とすることが必要である。

(2) 歪取焼鈍後の磁性向上

無方向性電磁鋼板は、モータコアメーカーで金型により所定の形状に打抜かれた後、鉄心に積層され、必要に応じて750-800°Cで歪取焼鈍が実施される場合が多い。歪取焼鈍は、鋼板プレス時に発生する歪みを除去し鉄損を向上させる目的で実施される。歪取焼鈍はお客様先の種々の焼鈍条件で処理されるため、その条件に影響を受けにくく、安定的に鉄損が向上する材料であることが要求される。

4 開発の要点

先に述べた高効率モータに要求される各種特性を満たす無方向性電磁鋼板の開発を行い、モータ鉄心打ち抜き時の金型の摩耗を抑制しつつ、かつ高磁束密度で低鉄損のRMHEシリーズを開発した。以下に開発のポイントを述べる。

4.1 加工性の向上

電磁鋼板の硬度に及ぼすSi, Al, Mn添加量の影響をFig. 5に示す。開発材料は、Siを含むAlやMnなどの主要な成分の最適化を行うことにより、低硬度でかつ低鉄損をめざした。

4.2 磁気特性

磁気特性の向上には、鋼板の集合組織を改善することが重要である。集合組織制御方法として、冷延圧下率や成分の適正化などが効果的であることはよく知られている⁶⁾。開発材料ではSb^{7,8)}を必要に応じて添加して集合組織を改善した。Fig. 6に2%SiでSb添加鋼およびSb無添加鋼の集合組織の比較をインバース強度で示す。Sb添加により、磁気特性に有利な(110)、(100)組織が上昇し、鉄損や磁束密度を悪化させる(111)組織が減少することがわかる。

4.3 高周波用途のための鋼板厚みの低減

ブラシレスDCモータや高速回転のモータの高効率化には、高周波域での低鉄損化が必要である。鉄損は渦電流損と履歴損からなるが、高周波域での鉄損は渦電流損の占める割合が相対的に大きい。したがって板厚低減による渦電流損の低減が極めて有効な手段となる。開発材料の板厚の目標を0.35mm以下の0.30, 0.25, 0.20mmとした。

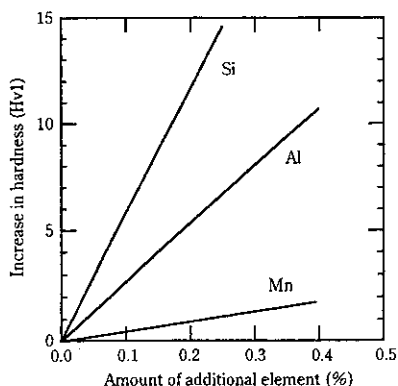


Fig. 5 Effect of Si, Al and Mn contents on hardness

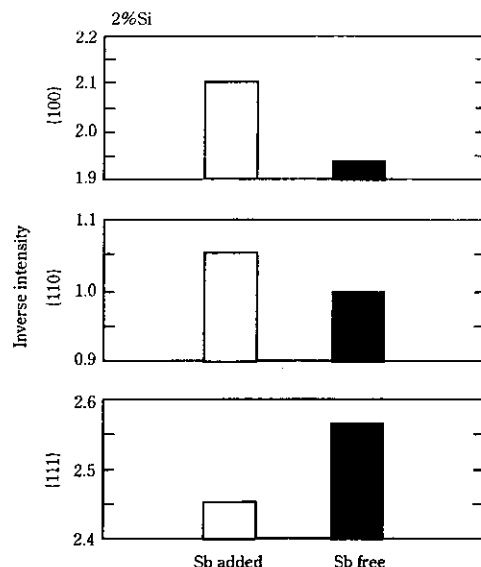


Fig. 6 Effect of Sb addition on inverse pole intensity of material

4.4 歪取焼鈍特性

歪取焼鈍時の雰囲気は、表層の酸化や窒化を抑えるために、不活性雰囲気が望ましい。雰囲気はさまざまなガスが使用されているが、通常、DXガスやN₂であり、温度としては750-800°Cの条件が採用されている。その際、SiやAlを多く含有する高級電磁鋼板は、酸化や窒化が進行しやすく、歪取焼鈍後の鉄損が必ずしも向上せず、場合によっては劣化するという問題が発生することもある。集合組織改善のために添加したSbは、酸化や窒化を抑制する元素として知られており、開発材料はこの点からも有利な成分系となっている。Table 1に3%Si鋼のSb有無におけるN₂中での歪取焼鈍前後の鉄損変化を示し、またそのときの表層のSEM写真をPhoto 1に示す。Sb添加鋼は常に安定して鉄損が向上している。したがって、歪取焼鈍を利用する高効率モータ用素材としては好適な材料といえる。

Table 1 Effect of Sb addition on enhancement of iron loss after stress relief annealing (SRA)

	Iron loss $W_{15/50}$ (W/kg)		
	As sheared A	After SRA B	Improvement of iron loss A-B
Sb free	2.71	2.45	0.26
Sb added	2.65	2.32	0.33

Iron loss: measured by the Epstein method
SRA condition: 2 h duration at 750°C in N₂

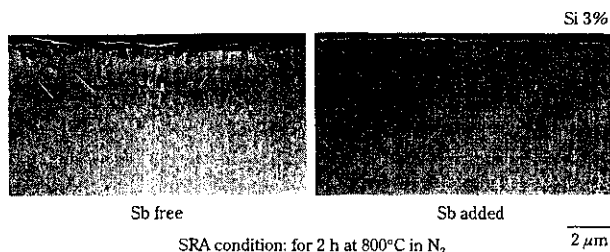
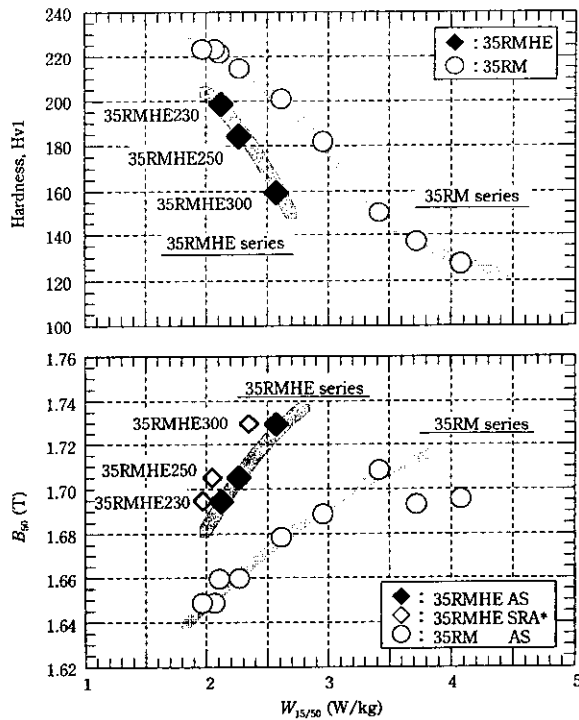
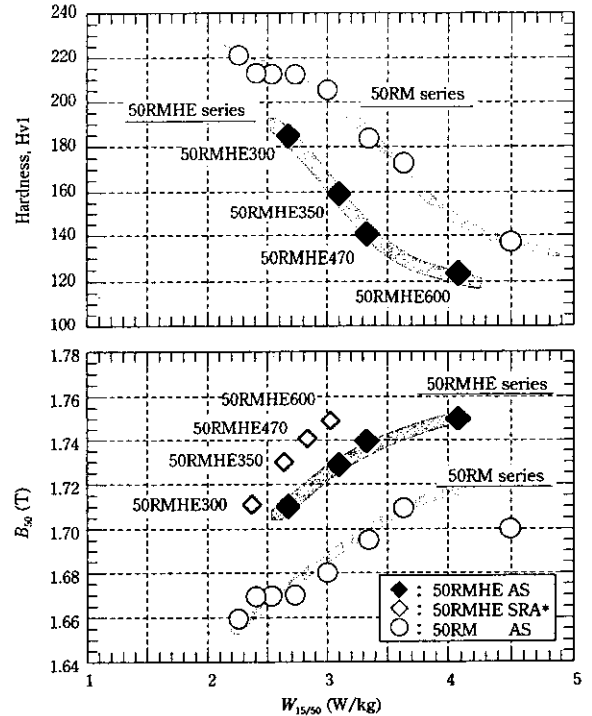


Photo 1 Cross sectional SEM observation of nitride precipitation in the vicinity of surface after SRA



Note: Relation between hardness (Hv1) and iron loss at 50 Hz
Relation between magnetic flux density and iron loss at 50 Hz

Fig. 7 Magnetic and mechanical properties of RMHE series in 0.35 mm in thickness



Note: Relation between hardness (Hv1) and iron loss at 50 Hz
Relation between magnetic flux density and iron loss at 50 Hz

Fig. 8 Magnetic and mechanical properties of RMHE series in 0.50 mm in thickness

5 開発材料の特性

Fig. 7 に 0.35 mm 厚, Fig. 8 に 0.50 mm 厚の開発材料 (RMHE) の硬度と鉄損および磁束密度と鉄損の関係を従来材料 (RM) と比較して示す。RMHE は同一鉄損の RM と比較して硬度を低下させ、低鉄損でかつプレス加工性を確保している。同様に集合組織改善にともない磁束密度も向上しており、 B_{50} で 300 ガウスの以上の向上となる。低鉄損化による高効率化と同時に高磁束密度化によるトルクの向上が期待でき、モータ設計の自由度も広がる。また、モータのコンパクト化にともない銅線、鉄心材料、モータカバーなどの各種部品の削減が可能で、環境保護への貢献が期待できる。Table 2 に 35RMHE230 (開発材料) と 35RM210 (従来材料) について剪断後と歪取焼鈍後 (750°C × 2h, N_2 雰囲気下) の鉄損を示す。35RMHE230 は歪取焼鈍後の鉄損 ($W_{15/50}$) で 2.0 W/kg 以下であり、これまで 0.35 mm で限界とされていた 2.0 W/kg の値をきる特性を達成している。

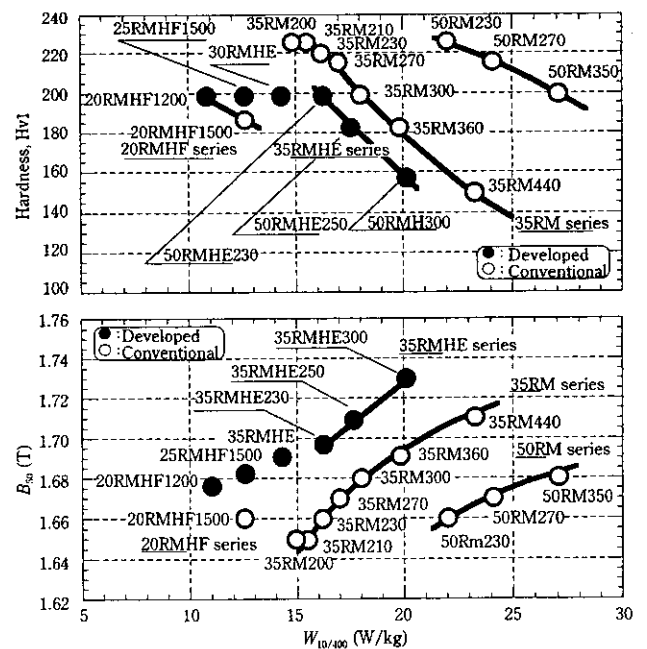
Fig. 9 に開発材料である RMHF と RMHE の高周波鉄損 ($W_{10/400}$) と硬度および磁束密度の関係を示す。RMHF は RMHE と同様に低硬度で設計しており、特に高周波領域で利用されるモータにおいても加工性を重視した電磁鋼板である。同一硬度の材料と比較すると、従来材料では 35RM300 の鉄損 $W_{10/400}$ が 17.9 W/kg (35A300 相当) であるのに対して、開発材料である 35RMHE230 では 16.3 W/kg、25RMHF1500 では 12.4 W/kg、20RMHF1200 では 11.0 W/kg の極めて低い鉄損の材料が使用可能となった。当社モデルモータを用いた実験より得られた効率式⁹⁾ からすると、ブラシレス DC モータにおいてそれぞれ 35RMHE230 が 0.4%、25RMHF1500 が 1.5%、20RMHF1200 が 2.0% の効率向上に寄与するものと推定される。

Table 2 Typical magnetic properties of 35RMHE230 and 35RM210

	Density (g/cm ³)	$W_{15/50}$ (W/kg)	
		As sheared	After SRA*
35RMHE230 (Developed)	7.65	2.15	1.98
35RM210	7.60	2.05	2.00

Iron loss : measured by the Epstein method

*SRA condition: 2 h duration at 750°C in N_2



Note: Relation between hardness (Hv1) and iron loss at 400 Hz
Relation between magnetic flux density and iron loss at 400 Hz

Fig. 9 Magnetic and mechanical properties of RMHE and RMHF series

Table 3 Magnetic properties and motor efficiency of brushless DC motor

Material	Grade	Magnetic properties			Hardness Hv1	Maximum motor efficiency (%)
		$W_{15/50}$ (W/kg)	$W_{10/400}$ (W/kg)	B_{50} (T)		
RMHE	35RMHE250	2.15	16.3	1.71	185	91.7
RM	50RM230	2.20	21.0	1.66	220	90.2

Table 4 Relation between punching cost and material hardness (Hv1)

Hardness, Hv1	Cycle for repair (punches)	Repetition (cycle)	Capacity of product	Cost of core (yen/one)
185	1 000 000	20	100 000	300
220	500 000	20	50 000	600

Thickness : 0.35 mm

Height of core : 70 mm (200 sheets lam.)

Cost of new die: 30 million yen per 1 unit

6 モデルモータによるRMHEのモータ特性の評価

PWM 制御インバータ駆動のブラシレス DC のモデルモータを用い、従来の最高級電磁鋼板 50RM230 (板厚 0.5 mm) と開発材料の 35RMHE250 (板厚 0.35 mm) をステータ鉄心材料として、モータ効率測定実験を行った。その結果を材料特性とともに Table 3 に示す。 $W_{10/400}$ 特性に優れる 35RMHE250 は、従来の最高級の 50RM230 に比べ、低硬度でかつ高効率を達成する材料である。

上に述べた結果から、RMHE およびその薄厚材は、ブラシレス DC モータ用素材として、加工性とモータ効率向上に最も適した素材であることがわかる。

7 RMHEによるプレス加工性の改善

モータの鉄心は 0.2~0.7 mm の厚さの電磁鋼板を所定の形状に打抜き、積層して鉄心とする。一個あたりの積層枚数はマイクロモータを除くと数十枚から数百枚のものが多く、生産工数におけるプレス加工の割合が高い。Table 4 に材料硬度と打抜きコストの関係を例として示す。0.35 mm 厚の鋼板を 70 mm の高さに (200 枚積) 積

層する鉄心について、金型費用、補修サイクルを考慮してコストを試算して比較した。硬度 Hv1 が 185 ポイントの電磁鋼板に対して 220 ポイントのものでは、1 個あたりの打抜きコストが 2 倍になる。Hv1 が 200 ポイント以下の RMHE を使用することで、このコストの増加が改善できる。

8 結 言

- (1) 開発した RMHE, RMHF 新シリーズは、無方向性電磁鋼板で最高級の低鉄損特性をもち、かつプレス加工性を改善した材料であり、これまで硬度が高くて加工できなかったモータコアメーカーでも低鉄損材が使用可能となった。
- (2) RMHE シリーズは歪取焼鈍による鉄損の回復性を安定化させることにより、35RMHE230 では、歪取焼鈍後の鉄損 $W_{15/50}$ が 2.0 W/kg 以下となり、これまで 0.35 mm で限界とされていた 2.0 W/kg 以下の特性を達成した。
- (3) 従来材料 RM において同一鉄損の商品と比較すると磁束密度 (B_{50}) が 0.03 T 以上高いので、最終製品であるモータの効率向上に寄与するとともに、小型化の設計によって部品材料の使用量の削減が可能である。
- (4) 新たに開発した上記 RMHE, RMHF シリーズは、加工性に優れる高効率モータ用無方向性電磁鋼板であることを特徴として、次の点で高効率モータの普及に寄与し、環境保護へ貢献する。
 - (a) 低硬度化
モータの生産性向上→高効率モータの普及
 - (b) 低鉄損化
発熱によるエネルギー損失低減
 - (c) 高磁束密度化
トルク向上によるコンパクト化→部品材料の使用量削減

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁編:「電力需給の概要」, (2000), 167, [中和印刷(株)]
- 2) 海外電力調査会編:「海外諸国の電気事業第 1 編」, (1998), 1, [晃栄社]
- 3) 小畑良夫:鉄鋼界, 49(1999)11, 14
- 4) 本田厚人, 佐藤圭司, 大山 勇:川崎製鉄技報, 29(1997)3, 163
- 5) 石田昌義, 志賀信勇, 河野正樹, 本田厚人, 小松原道郎, 大山 勇:日本 AEM 学会誌, 7(1999), 248
- 6) 小原隆史:西山記念講座, (1995)155, 151
- 7) H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura, and Y. Shono: "Energy Efficient Electrical Steels", (1980), 193 [TMS-AIME]
- 8) M. Takashima, T. Obara, and Kan: J. Mater. Eng. Perform., 2(1993), 249
- 9) 小松原道郎:川崎製鉄技報, 32(2000)3, 69