
省エネルギー技術のトップランナーをになう電磁鋼板

Electrical Steels as a Top-runner for Serving Energy Efficiency Technologies

小松原 道郎(Michiro Komatsubara)小畑 良夫(Yoshio Obata)山田 茂樹(Shigeki Yamada)

要旨：

省エネルギー化を推進する社会で、トップランナーとしての効率改善競争が激しい電気機器の効率改善のため、川崎製鉄では種々の新しい電磁鋼板を開発した。方向性電磁鋼板分野では、変圧器の低騒音化を目的とし、高磁束密度材：「New RGH」を開発し、また変圧器の高効率化のために、磁区細分化低鉄損材：「New RGH PD」を開発した。無方向性電磁鋼板では、高効率誘導モータ用の高磁束密度材料：「RMA シリーズ」や、インバータ駆動のモータの効率を高めるため、400 Hz での鉄損が低い「RMHE シリーズ」を開発した。さらに、高い周波数への対応のため板厚の薄い「20RMHF シリーズ」を開発し、20 kHz といった高周波対応のための新製品の開発努力も行っている。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed various types of new electrical steels to contribute to improve the efficiency of electrical appliances, which are struggling under unsparing competition as a top-running group in increasing energy efficiency. As for grain-oriented materials, a material having high flux density, "New RGH" , for decreasing the noise of transformers, and an extremely low-iron loss domain-refined material, "New RGH PD" , for securing higher efficiency of transformers have been developed. As for non-oriented materials, there have been developed materials having high magnetic flux density, "RMA" series, for improving the efficiency of AC induction motors, and materials having improved iron loss at 400 Hz, "RMHE" series, for inverter-drive DC motors. Moreover, materials having thinner gauge of 0.20mm, "20RMHF" series, were developed for higher frequency appliances and a new material suitable for appliances designed for around 20 kHz is under development.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Electrical Steels as a Top-runner for Serving Energy Efficiency Technologies



小松原 道郎
Michiro Komatsubara
技術研究所 電磁鋼板
研究部門長・工博



小畑 良夫
Yoshio Obata
川鉄情報システム(株)
監査役(前 電磁鋼板
セクター室長)



山田 茂樹
Shigeki Yamada
電磁鋼板セクター室長

要旨

省エネルギー化を推進する社会で、トップランナーとしての効率改善競争が激しい電気機器の効率改善のため、川崎製鉄では種々の新しい電磁鋼板を開発した。方向性電磁鋼板分野では、変圧器の低騒音化を目的とし、高磁束密度材:「New RGH」を開発し、また変圧器の高効率化のために、磁区細分化低鉄損材:「New RGH PD」を開発した。無方向性電磁鋼板では、高効率誘導モータ用の高磁束密度材料:「RMA シリーズ」や、インバータ駆動のモータの効率を高めるため、400 Hz での鉄損が低い「RMHE シリーズ」を開発した。さらに、高い周波数への対応のため板厚の薄い「20RMHF シリーズ」を開発し、20 kHz といった高周波対応のための新製品の開発努力も行っている。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed various types of new electrical steels to contribute to improve the efficiency of electrical appliances, which are struggling under unsparing competition as a top-running group in increasing energy efficiency. As for grain-oriented materials, a material having high flux density, "New RGH", for decreasing the noise of transformers, and an extremely low-iron loss domain-refined material, "New RGH PD", for securing higher efficiency of transformers have been developed. As for non-oriented materials, there have been developed materials having high magnetic flux density, "RMA" series, for improving the efficiency of AC induction motors, and materials having improved iron loss at 400 Hz, "RMHE" series, for inverter-drive DC motors. Moreover, materials having thinner gauge of 0.20 mm, "20RMHF" series, were developed for higher frequency appliances and a new material suitable for appliances designed for around 20 kHz is under development.

1 電磁鋼板への要求特性の多様化

電磁鋼板は、発電機、電動機、変圧器など電力の供給・変換システムの鉄心に使用される重要な機能材料である。従来から、これらの機器の省エネルギーや小型化の目的で低鉄損や高磁束密度化の要求、および大量生産のための低価格化や加工性の向上が要求されていた。

大気へ放出される CO₂ 量の削減に寄与するべく、高効率モータの JIS 化や高効率変圧器の JEMA 規格設定など電気機器の省エネルギー化を推進する動きが加速され、近年、電磁鋼板にも各種電気機器の省エネルギー化に付随した種々の性能の改善要求がなされている。本報では、これらについての具体的事例を方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板について概説する¹⁾。

まず、方向性電磁鋼板の分野では、さらなる鉄損の低減志向と同時に、変圧器の低騒音化のための高磁束密度化の要求が強まっている。

方向性電磁鋼板は、電力輸送の際に変電における電力変換をになう変圧器の鉄心材料として主に使用されている。この変圧器のエネルギー効率率は、約 98% と極めて高いが、日本全体で失う電力総量としては莫大であるため²⁾、たとえば、0.5% の効率改善によって 46.5 億 kWh もの省エネルギー効果が生まれる。また、一般事業所では、「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(1999 年 4 月 1 日施行)を背景にして、優遇税制措置による高効率変圧器などの採用が進められつつある。これらの要求に応えるためには、従来にない低鉄損の方向性電磁鋼板の開発が必要である。

快適な都市環境が叫ばれている折りから、騒音環境の改善のために、都市部の変電所においては、変圧器で発生する騒音の低減設備の設置に多大な費用をかけている。しかし鉄心材料の高磁束密度化によってこの費用の削減が可能であるため、近年、方向性電磁鋼板の高磁束密度化の要求も極めて強い。

無方向性電磁鋼板の分野では、新たな性能改善の要求がなされている。すなわち、モータの銅損低減やリラクタンストルク増加を目的とした電磁鋼板の高磁束密度化の要求、およびインバータ制御や周波数可変制御など電気機器の高周波作動による省エネルギー化に適した高周波鉄損の低減の要求などである。

* 平成12年6月6日原稿受付

たとえば、誘導モータにおいては、巻線コイルを流れる電流に起因する銅損が損失の大部分を占めるが、これは電磁鋼板の磁束密度を向上させることにより改善できる³⁾。また、リラクタンストルクを利用して効率向上を狙うリラクタンスモータにおいても、電磁鋼板の高磁束密度化が効率向上に有利である。

これに対し、インバータ制御利用による各種モータの効率化や可変化が進行している。この場合、動作周波数が従来より高周波となるため、商用周波数より高い周波数における鉄損の低減が必要となる³⁾。また、インバータ回路に付帯する機器のための高周波材料も必要であるし、こうした機器の発する高調波が電源に逆流することを防ぐことも必要となってくる。こうした新規要求には、それぞれの周波数で低鉄損となる電磁鋼板が必要とされる。

2 新規ニーズに適合した新製品の開発

この節では、前述した種々の新規ニーズに対応する主要な新製品とその特徴を簡単に紹介する。

2.1 方向性電磁鋼板の新製品

川崎製鉄の方向性電磁鋼板の鉄損特性は、Fig. 1 に示すように年を追って確実に改善されている⁴⁾。

特に、近年、飛躍的に鉄損を低減した「23NewRGH PD」が開発された。これは、(1) 鋼板の板厚の低減 (0.27 → 0.23 mm) による渦電流損の低減、(2) 結晶方位の高度集積化によりヒステリシス損の低減、および (3) 鋼板表面に多数の溝を形成し磁区細分化による渦電流損の低減を図ったものである⁵⁾。

磁区幅は静磁エネルギーと磁壁エネルギーのバランスで決定されるので、溝の反磁界により静磁エネルギーを増加させ磁区細分化効果を得るのが溝形成法の原理である。鋼板表面に Fig. 2 に示されるような溝を形成するが、この溝の深さを増大させることで Fig. 3 に示すように材料の磁区幅が飛躍的に減少する。ヒステリシス損の増加をもたらさない程度まで溝は深くでき、この技術により鉄損の飛躍的な低減効果が得られた⁶⁾。

Fig. 1 に示されるように、鉄損と異なり磁束密度の向上は多くの年数を必要とすることがわかる。近年、 B_0 で 1.93 T といった高磁束密度電磁鋼板「NewRGH」が開発され、低騒音変圧器用の鉄心材料として好評を博している。Fig. 4 は、鉄心材料の磁束密度 B_0 と変圧器が発生する騒音との関係を小型の 3 相モデル変圧器を用いて測定した結果である。この図より、材料の磁束密度の向上が変圧

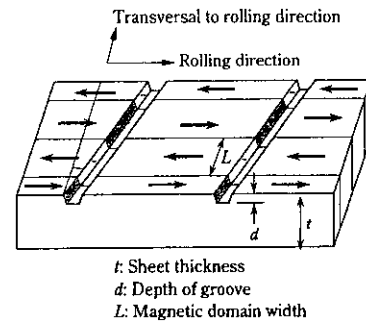


Fig. 2 Profile of grooves formed on steel surface

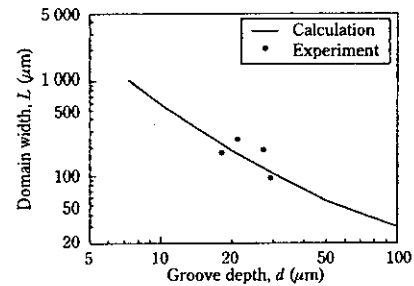


Fig. 3 Dependence of domain width on groove depth experimental data and calculated one

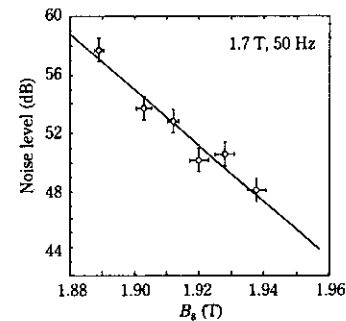


Fig. 4 Relationship between B_0 value and noise of a model transformer

器の騒音の改善に大きく寄与することがわかる⁷⁾。

Table 1 および 2 に、従来材料である「30RGH105」と新製品の「NewRGH PD」をモデル変圧器の鉄心材料に使用して実機特性の比較を行った結果を示す。積み鉄心型および巻き鉄心型ともに変圧器の鉄損の改善効果は大きく、また Table 1 に示されるように変圧器の励磁電流および騒音の低減効果も著しいことがわかる^{6,7)}。

2.2 無方向性電磁鋼板の新製品

無方向性電磁鋼板の分野で、現在、注目されているのはモータ効率向上の動向である。特に空調用のモータは常時使用していることもあって、効率向上の動きが活発である。この分野における新製品として川崎製鉄は「RMA シリーズ」および「RMHE シリーズ」を開発した⁸⁾。

「RMA シリーズ」は、高い磁束密度と低鉄損を両立させた材料である。これは、モータコアを打抜き、積層した後、歪取焼鈍を行う過程で、磁気特性上好ましい方位の結晶粒を優先粒成長させることにより実現した。歪取焼鈍前においては、結晶粒径が小さく Si 含

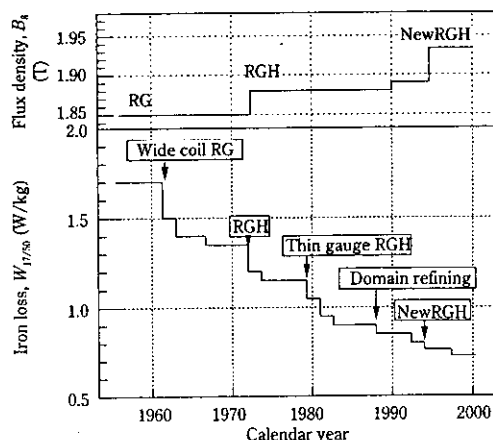


Fig. 1 Historical trend of iron loss and induction improvements in electrical steels produced by Kawasaki Steel

Table 1 Magnetic properties of model stacked-core transformers

Material	Grade	Magnetic properties of materials		Magnetic properties of model transformer cores			
		B_8 (T)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$I_{0.17/50}$ (A)	Noise _{17/50} (dB)	BF ²⁾
NewRGH	23RGH090N	1.93	0.86	1.01	0.74	52	1.17
	23RGHPD085N	1.89	0.77	0.90	0.75	52	1.17
	27RGHPD090N	1.89	0.84	0.99	0.85	53	1.18
RGH ¹⁾	30RGH105	1.89	1.03	1.21	0.85	56	1.17

¹⁾Conventional material with high permeability²⁾BF: Iron loss ratio of transformer to material

Table 2 Magnetic properties of model wound-core transformers

Material	Grade	Magnetic properties of materials		Magnetic properties of model transformer cores	
		B_8 (T)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$W_{17/50}$ (W/kg)	BF ²⁾
NewRGH	23RGH090N	1.93	0.86	0.87	1.01
	23RGHPD085N	1.89	0.77	0.78	1.01
	27RGHPD090N	1.89	0.84	0.85	1.01
RGH ¹⁾	30RGH105	1.89	1.03	1.04	1.01

¹⁾Conventional material with high permeability²⁾BF: Iron loss ratio of transformer to material

有量も低い加工性に優れているが、鋼中の不純物の高純度化などにより、歪取焼鈍後は結晶粒径が極めて大きくなる。Fig. 5 は従来の製品である「RM シリーズ」と新製品である「RMA シリーズ」とを交流誘導タイプのモデルモータの鉄心として使用し、モータ効率を比較したものである。「RMA シリーズ」は低 Si 材料であるにもかかわらず高いモータ効率を示した。誘導モータの場合、損失に占める銅損の割合が大きいので、磁束密度を高めることで銅損が大きく低減できたためである。磁束密度が極めて高く、かつ鉄損も比較的低い「RMA シリーズ」の特徴が有利に生かされている。

「RMHE シリーズ」は極めて低い鉄損と高い磁束密度を有する無方向性電磁鋼板である。近年、モータ効率の改善のため、インバータ駆動方式のブラシレス DC モータが普及してきた。このタイプのモータは、高周波数の磁界が印加されること、および永久磁石によって固定子が磁化されていることより、モータ損失としては鉄損が大部分を占める。したがって、鉄心材料の鉄損が低いことが必要であるが、特に商用周波数よりも高い周波数域での低鉄損が必要となる。Fig. 6 は、永久磁石表面設置型のブラシレス DC モータをモデ

ルモータとして用い、モータの最大効率と材料の 400 Hz における鉄損 ($W_{10/400}$) との関係性を測定した結果である。歪取焼鈍の有無にかかわらずモータ効率は鉄損 $W_{10/400}$ によって一意的に決定されており、このタイプのモータの効率に対しては 400 Hz 程度の高周波鉄損が支配的であることが示唆される。また、Fig. 7 はモータの回転数に対する効率変化を測定した結果である。同一の $W_{10/400}$ を有する材料であっても、磁束密度の高い「RMHE シリーズ」の方が高効率となる出力領域が広く、優れていることがわかる。低磁束密度材料の場合は、最高効率の出力を超えるとトルクが急激に低下するので、これを補償するための励磁電流の増加が必要となり、必然的に銅損の増大を招くため効率が低下する。「RMHE シリーズ」はこのような効率の低下を招くトルクの低下が抑制されるので、広い出力領域にわたって高効率を提供できる。「RMHE シリーズ」を用いて効率を高めたモータの用途としては、空調機など通常の電気機器の他、EV や HEV など電気自動車などにも適合する。

モータも含め、電気機器の高周波化の進展は著しい。たとえば、パソコンなどに内蔵されるモータは高周波で駆動され、かつ高精度の制御と低い消費電力が要求されている。このような用途のために、高周波低鉄損用の無方向性電磁鋼板「RMHF シリーズ」を新製品として開発した。

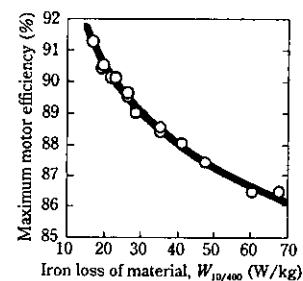


Fig. 6 Relationship between the maximum motor efficiency and iron loss of material at 400 Hz

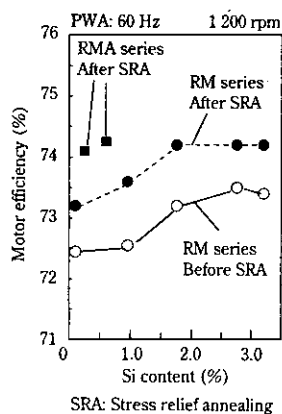


Fig. 5 Effect of Si content, core materials (RM and RMA) and SRA on AC induction motor efficiency

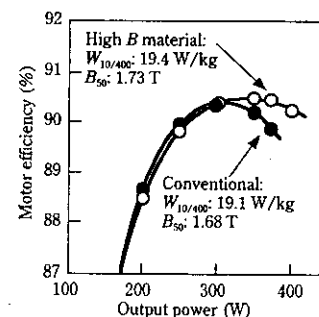


Fig. 7 Effect of flux density of core material on motor efficiency stability

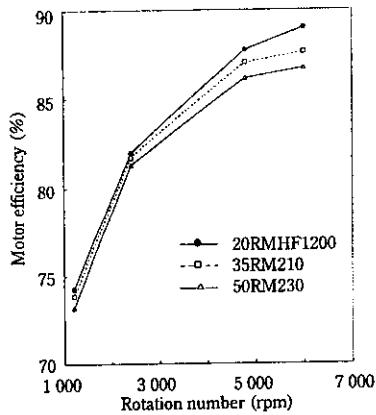


Fig. 8 Effect of core materials on efficiency of inverter power drive motor in high speed rotation

この分野の用途には、50 または 60 Hz の商用周波数でなく 400 Hz などの高周波における鉄損が低いことを必要とする⁹⁾。高周波域での鉄損を低減する方法としては、Si 含有量を増加させる方法があるが、これは製造時や製品加工における加工性を著しく劣化させるため採用できない。したがって、製品の板厚を低減する方法が最も有用な方法となるが、標準最小厚の 0.35 mm を低減するには、板厚偏差や圧延能率の改善など解決すべき多くの課題があった。これらの課題を解決し、現在、0.20 mm 板厚の低損失の無方向性電磁鋼板新製品が「20RMHF シリーズ」として販売されている。Fig. 8 はインバータ駆動の高速モデルモータにおいて鉄心材料とインバータ周波数を変えて効率測定を行った例であるが、高周波化と 20RMHF1200 の採用により効率が大幅に向上することがわかる。

3 今後の開発動向

今後、社会のニーズはさらに急速に省エネルギー化、低騒音化の方向に移行しており、電磁鋼板に対する低鉄損化、特に高周波域における低鉄損化と高磁束密度化の要請がますます強まっている。

このような社会的要請に応えるべく、現在、集合組織を飛躍的に制御した方向性電磁鋼板および無方向性電磁鋼板を開発中である。また、高周波損失においても、鉄損を飛躍的に向上させた板厚の小さい、電気抵抗の高い電磁鋼板の開発も行っている。その一例として「高周波用途新規電磁鋼板」を最後に紹介する。

パワーエレクトロニクスの発達により 20 kHz といった極めて高い周波数領域での高出力作動を行う電気機器が増加している。この領域では従来、フェライトが使用されていたが高出力の電気機器を駆動させるためには動作磁束密度の高い電磁鋼板の出現が期待されていた。これに应运、技術研究所の技術資源を注力し、これまでにない新規な成分系の電磁鋼板を開発した。この材料は、次の 4 点の際立った特徴を有する。(1) Table 3 に示すようにフェライトに比較し動作磁束密度が高く、20 kHz 近辺での鉄損特性に優れている、(2) Fig. 9 に示すように同一の伸びに対し新材料は引張強度が大きく機械的性質に優れている、(3) Fig. 10 に示すように硬度が従来の高級電磁鋼板 (3%Si) なみであり加工性に優れている、(4) Fig. 11 に示すように従来の電磁鋼板よりも耐食性に優れている。社会環境は、高周波電気機器の使用が拡大する方向に変化して

Table 3 Magnetic properties of a newly developed material for high frequency application

Flux density B_{50} (T)	Iron loss (W/kg)		
	$W_{2/5k}$	$W_{1/10k}$	$W_{0.5/20k}$
1.54	19.0	9.5	4.3

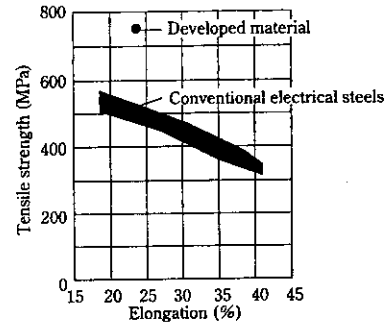


Fig. 9 Comparison of TS-EI balance between conventional electrical steels and a newly developed material

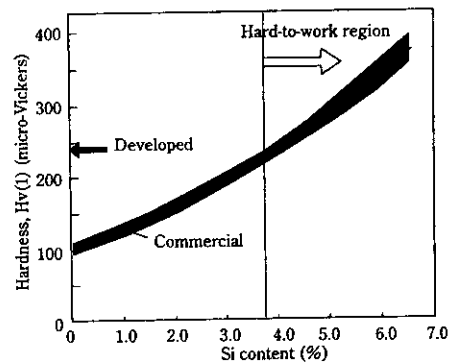


Fig. 10 Comparison of hardness between commercial electrical steels and a newly developed one

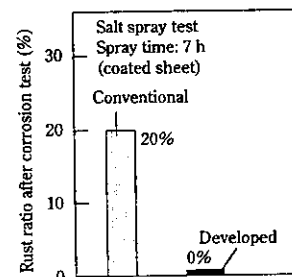


Fig. 11 Example of corrosion resistance; comparison between a conventional electrical steel and a newly developed one

いくので、このような材料の特性を活かした用途は、今後ますます拡大していくものと期待される。

電気は極めて有用であり生活の利便性を高めるものであるが、地球環境の保全や省資源の観点からは、さらに効率よく使用されることが望まれている。このための強力な支援技術のひとつとして、電磁鋼板における技術革新、および新製品開発の努力を今後も続けていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 小畑良夫：鉄鋼界，49(1999)11, 14
- 2) 通産資料調査会編集：「資源エネルギー年鑑」，(1997・98年版) 533
- 3) 本田厚人，佐藤圭司，大山 勇：川崎製鉄技報，29(1997)3, 169
- 4) 森戸延行，小松原道郎，清水 洋：川崎製鉄技報，29(1997)3, 129
- 5) 石田昌義，中野 恒，本田厚人，佐藤圭司：日本応用磁気学会誌，18(1994), 809
- 6) 小松原道郎，日名英司，中野 恒：川崎製鉄技報，29(1997)3, 177
- 7) 黒沢光正，名村夏樹，山田茂樹：川崎製鉄技報，29(1997)3, 174
- 8) 高島 稔，小野智睦，西村恵次：川崎製鉄技報，29(1997)3, 185
- 9) 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)3, 248