

Heat-Proof Domain-Refined Grain-Oriented Electrical Steel

佐藤 圭司
Keiji Sato

水島製鉄所 管理部技術サービス室 主査(課長)

石田 昌義
Masayoshi Ishida

技術研究所 電磁鋼板研究部門 主任研究員(課長補)・理博

日名 英司
Eiji Hina

水島製鉄所 電磁鋼板部電磁鋼板技術室 主査(課長)

要旨

高温での垂取焼鈍による特性劣化のない耐熱型磁区細分化方向性電磁鋼板 (RGHPD) を開発した。この製品は最終冷延板に局所的な電解エッチング処理を施し線状の溝を導入することにより 180° 磁区の細分化を図ったものであり、磁区細分化処理しない製品に比べ約 10% の鉄損低減が得られた。本製品を適用した巻鉄心変圧器の鉄損は従来に比べ約 10% 減少した。また、本製品は積鉄心変圧器にも使用可能であり、今後、変圧器の高効率化を通じ省エネルギーに大きく貢献するものと期待される。

Synopsis:

A heat-proof domain-refined grain-oriented electrical steel (RGHPD) has recently been developed, which is characterized by an introduction of linear grooves on the surface of the steel sheet after final cold rolling. The iron loss of the new materials is reduced by about 10% as compared with non-grooved materials. Using this material, the iron loss of wound core transformers is reduced by about 10%. This material can also be used for stacked core transformers and is expected to make a major contribution to energy conservation.

1 緒 言

省エネルギーの見地から変圧器鉄心材料として用いられる方向性電磁鋼板の低鉄損化に対する要求は一段と高まり、鉄鋼メーカーは鋼板の低鉄損化に力を傾注してきた。

方向性電磁鋼板の低鉄損化は、鋼板の (110)[001] 方位集積度の改善による履歴損低減を中心に進められ、高磁束密度方向性電磁鋼板の開発により鉄損は飛躍的に改善された¹⁾。この履歴損の低減により方向性電磁鋼板の鉄損の約 70% は渦電流損で占められることとなり、研究開発の主眼も渦電流損低減へと移った。渦電流損は、Si 含有量を増し電気抵抗を高くする、結晶粒径を小さくする、板厚を薄くするなどの方法により低減されてきた²⁾。

一方、これらの冶金学的方法と異なり、人為的に 180° 磁区幅を減少させ渦電流損を低減させる方法 (磁区制御技術) も新たに開発された。特に、二次再結晶後の鋼板にレーザー光³⁾やプラズマ炎^{3,5)}を照射し、反磁界効果を応用して磁区を細分化する方法が工業化されたことにより画期的な低鉄損材の製造が可能となった。磁区制御材の開発により、変圧器の鉄損は著しく低くなり、とりわけ、損失評価制度⁶⁾の確立されている海外において、磁区制御材は広く用いられるようになった。しかしながら、一方、レーザー光やプラズマ炎を照射した磁区制御材は高温での焼鈍により特性が劣化するとい

う欠点があり、垂取焼鈍を必要とする巻鉄心変圧器に使用することができなかった。そこで、巻鉄心変圧器にも使用可能な耐熱型磁区細分化技術の開発が望まれていた。

このような時代の要請に応え、当社は開発を進め、1992 年に垂取焼鈍に耐える新しい磁区細分化方向性電磁鋼板 (RGHPD) を開発した⁷⁾。この技術は、最終冷延板に局所的な電解エッチング処理を施すことにより線状の溝を形成させ溝形状による反磁界効果を応用し磁区細分化する方法である。

本論文では、新たに開発した耐熱型磁区細分化技術につき、その概要と変圧器への適用例を述べる。

2 線状溝形成による磁区細分化の機構

2.1 方向性電磁鋼板の磁区細分化

方向性電磁鋼板の磁化は主に 180° 磁区の磁壁移動によって行われ、この磁壁移動の際に渦電流が流れ損失を発生する。渦電流損は、Pry と Bean⁸⁾ により近似的に次式により与えられることが導き出された。

$$P = 1.63P_{cc} (2L/d) \text{ (erg/g)}$$

P_{cc} : 古典的渦電流損 $P_{cc} = (\pi dB_m f)^2 / 6\rho$

d : 板厚 (cm)

B_m : 最大磁束密度 (G)

* 平成9年7月2日原稿受付

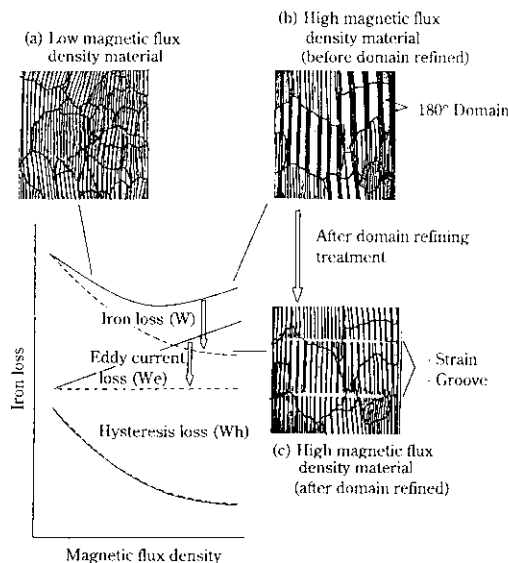


Fig. 1 Iron loss and domain structures of grain-oriented electrical steel sheets

f : 周波数 (Hz)

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

L : 180° 磁区幅 (cm)

この式から渦電流損を低減するには 180° 磁区幅を狭くすることが有効であることが分かる。

一般に、方向性電磁鋼板の鉄損は、Fig. 1 に示す通り、磁束密度 (B_s) が高いほど低くなる傾向を示すが、ある程度以上磁束密度が高くなると鉄損はむしろ劣化する。これは (110)[001] 方位集積度の改善により履歴損は減少するものの結晶粒径が粗大化する傾向にあり、 180° 磁区幅が大きくなるため渦電流損の増大を招くことによるものである。したがって、Fig. 1 中に示したとおり、 180° 磁区幅を細分化し渦電流損を減少させることにより、著しい低鉄損材を得ることが可能となる。この場合、磁区細分化後の鉄損は履歴損に依存する割合が高くなるため、素材の磁束密度が高いほど低鉄損が得られる。

ところで、高温での焼鈍に耐えうる人為的な 180° 磁区細分化技術としては、局所的に溝を導入し、その近傍に生成する磁極による反磁界効果を応用する方法が有効である。溝の代わりに、その部分に微細粒や異物を形成させても磁極は生成するが、非磁性物質でない場合には磁極生成量は小さくなるため、溝の形成が最も適していると考えられる。

溝導入法において、反磁界効果を十分に発揮するためには、溝の形態が重要となる。そこで、次に、溝の形態と磁区細分化効果の関係について磁区モデルを用いた計算を行うことにより検討した¹⁰⁾。

2.2 溝形状と磁区細分化効果

圧延方向に磁化容易軸を有する鋼板の表面に Fig. 2 に示すような断面が矩形をなす線状の溝を圧延直角方向に形成した場合を考える。磁区構造としては、圧延方向に平行で板面に垂直な 180° 磁壁モデルを仮定する。

溝断面には図中 + および - の記号で示した通り、磁極が生成する。この磁極は静磁エネルギーの増大をもたらすため、それを減少させるために 180° 磁区幅が減少する。 180° 磁区幅の減少により静磁エネルギーは減少するが、一方、磁壁エネルギーは増加するため、現実には静磁エネルギーと磁壁エネルギーの和が最小となるように

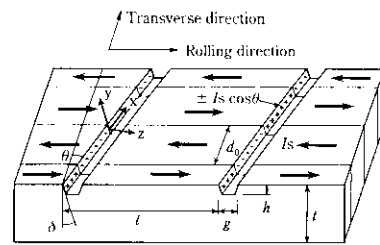


Fig. 2 Model of 180° domain walls occurring in a grooved grain-oriented silicon steel sheet used for the present analysis

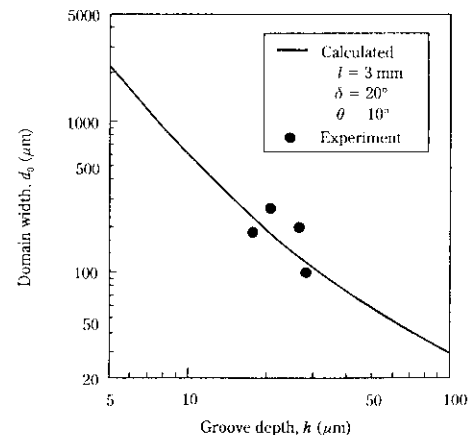


Fig. 3 Dependence of the stable domain width on groove depth

磁区構造が決まる。

実際の解析に当たっては、まず、Kittel の方法に従い、溝形成によって生成した磁極をもとに磁気ポテンシャルを求め、これより静磁エネルギーを計算する。前述のとおり、磁区幅が減少すれば静磁エネルギーは低減されるが、これにより磁壁数が増えるため磁壁エネルギーが増大することになる。磁区幅は静磁エネルギーと磁壁エネルギーの和が最小になるように決まるのであるから、その場合の条件を求め、磁区幅を解析的に決定する。溝が傾斜している場合には磁束が側壁を迂回して磁極発生を避けることにより静磁エネルギーを低下させる、いわゆる μ^* 効果が顕著になると考えられる。そこで、本計算においては、 μ^* 効果を考慮に入れて計算を行なった。ここでは、計算の詳細は省略し、結果のみ以下に示す。

溝幅 g 、溝深さ h 、溝ピッチ l 、溝側壁の板面垂直方向からの傾き角 δ 、圧延直角方向からの溝導入角 θ 、鋼板の厚み t 、自発磁化を I_s 、単位面積当たりの磁壁エネルギーを γ 、立方晶における結晶異方性定数を K_1 、真空の透磁率を μ_0 とすると、安定な磁区幅 d_0 は下式で与えられる。

$$d_0 = \begin{cases} \frac{2\pi\mu_0(1 + I_s^2 \sin^2 \delta / 4\mu_0 K_1) \gamma t l}{I_s^2 h \cos \theta} & (h \ll d_0) \\ \sqrt{\frac{2\pi\mu_0(1 + I_s^2 \sin^2 \delta / 4\mu_0 K_1) \gamma t l}{0.853 I_s^2 h \cos \delta}} & (h \gg d_0) \end{cases}$$

$l = 3 \text{ mm}$ 、 $\theta = 10^\circ$ 、 $\delta = 20^\circ$ の場合の結果を Fig. 3 に示す。図より、磁区幅は溝深さ h が深いほど狭くなる傾向を示す。図中に磁区幅の実測値を示すが、計算値と実測値はよく一致している。

上記のモデルにより計算した磁区幅から Pry と Bean の式⁹⁾およ

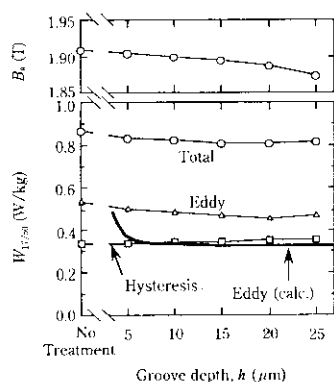


Fig. 4 Dependence of magnetic flux density B_8 and iron loss $W_{17/50}$ on the groove depth (The solid line, calculated; the symbols, measured in 0.23 mm thick Epstein specimens)

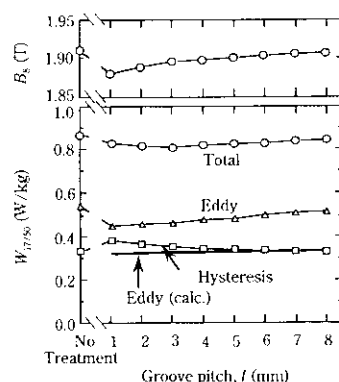


Fig. 5 Dependence of magnetic flux density B_8 and iron loss $W_{17/50}$ on the groove pitch (The solid line, calculated; the symbols, measured in 0.23 mm thick Epstein specimens)

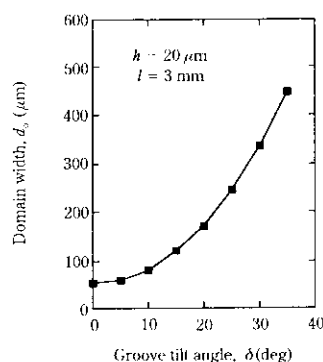


Fig. 6 Stable domain width calculated with μ^* effect against groove wall tilt angle δ .

び山口らの提唱した面内渦電流損の式¹³⁾を考慮して計算した渦電流損を種々の線状溝を形成した方向性電磁鋼板を用いて実測した渦電流損その他の磁気特性と比較する。Fig. 4 に溝の深さ、Fig. 5 に溝の間隔を変化させた場合の磁気特性の変化を示す。渦電流損の計算値と実測値には、やや差が見られるが、これは計算では単結晶を仮定しているのに対し、実際の材料は多結晶であるため磁区幅は各結晶粒により異なり、また、隣接粒の影響を受けて変化するなどの理由によるものと考えられる。しかしながら、溝形状の変化に対応する渦電流損の振る舞いは上述のモデル計算によって定性的に説明可

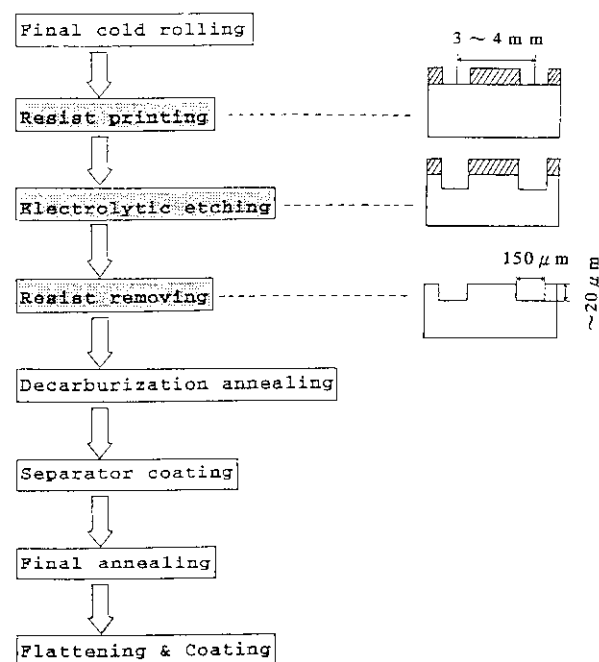


Fig. 7 Newly developed process for grooving

能であることが分かる。

溝深さが増す程、また、ピッチが減少するほど渦電流損は減少するが、一方、ヒステリシス損は増加する傾向にあるため、深さとピッチには最適値が存在する。Fig. 4、5 より、溝深さ、ピッチの最適値は、それぞれ、約 20 μm 、約 3 mm であることが分かる。Fig. 6 には溝側壁の傾斜角 δ と磁区幅 d_0 の関係を示すが、図より、磁区幅をできるだけ小さくするためには溝側壁の傾斜角をできるだけ小さくすること、すなわち、溝形状をできるだけ矩形に近くすることが必要であることが分かる。

4 新しい耐熱型磁区細分化技術

4.1 プロセスと特徴

前章で述べたように、耐熱型磁区細分化技術として線状溝の導入が有効であり、十分な磁区細分化効果を得るためには溝導入形態を適正に選ぶことが必要である。

このような観点から、当社では溝導入技術工業化のための検討を進め、新しい技術を開発した。Fig. 7 に新技術の製造プロセスを示す。図中ハッチング部分が新たに開発した技術を示している。最終冷間圧延後の鋼板にエッチングレジストインキを局所的に非塗布部を残しつつ圧延方向に直交する向きにストライプ状に塗布する。これを電解エッチングし非塗布部（地鉄露出部）に溝を形成する。溝は、幅約 200 μm 、深さ約 20 μm 、圧延方向の間隔 3~4 mm とする。しかる後、アルカリ浴中に浸漬することによりエッチングレジストを剝離し、通常の脱炭焼鈍、仕上焼鈍を経た後、平坦化焼鈍及び絶縁コーティングを形成する。

最終冷延板に溝形成処理を行う方法の利点として、

- (1) その後の脱炭焼鈍、仕上焼鈍により溝部にも絶縁被膜が形成されるため、絶縁性に全く影響がない (Photo 1)。

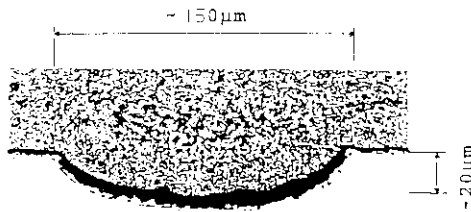


Photo 1 Cross-sectional view of the grooved region of a steel surface after final annealing

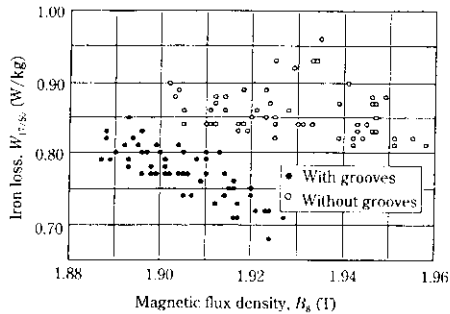


Fig. 8 Iron loss of steel sheets with and without grooves (0.23 mm in thickness)

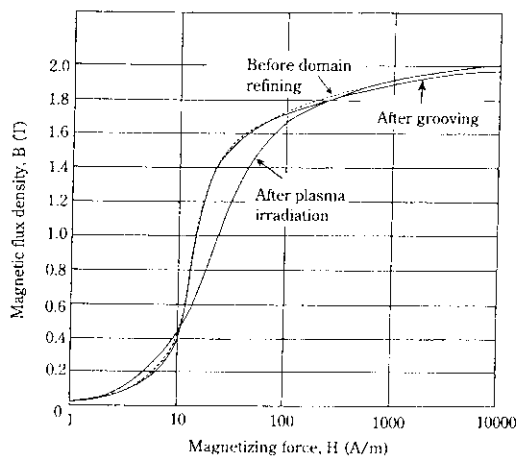


Fig. 9 DC magnetization curves before and after grooving and plasma irradiation

(2) 製品に残留歪がないため、そのまま積鉄心変圧器にも使用可能である。
という点が上げられる。

4.2 エッチング処理材の磁気特性

Fig. 8 に新たに開発した方法によって製造した新材料の800℃, 3 h 歪取焼鈍後の磁気特性を溝を形成しない場合と比較して示す。図より、溝形成により10～15%の鉄損低減が得られていることがわかる。鉄損低減効果はプラズマ炎照射の場合と同様、素材の磁束密度が高いほど大きい。

プラズマ炎照射による方法と異なる点は、溝導入法の場合 B_h 値が0.02～0.03T減少する点にある。しかしながら、この場合の B_h 減少は材料の集合組織変化によるものではなく、溝の存在そのものによる飽和磁束密度の低下に起因するものである。したがって、Fig. 9 に示すとおり、溝導入材の透磁率は1.7T以下では非処理材

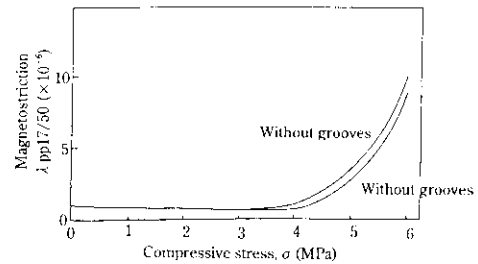
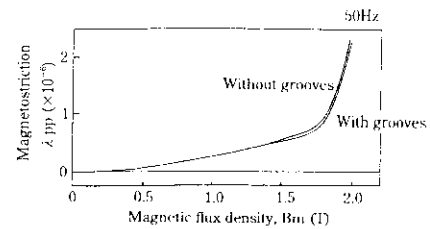


Fig. 10 Magnetostriction curves of materials with and without grooves

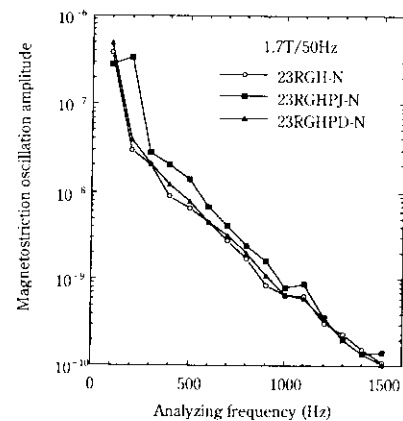


Fig. 11 Spectral analysis of magnetostriction oscillation

とほとんど差がない。Fig. 9 中にはプラズマ炎照射の場合の励磁特性もあわせて示すがプラズマ炎やレーザー光照射のような場合には低磁場での励磁特性が劣化する。以上のことから、溝導入材の B_h 低下は実用上の問題はなく、励磁特性や騒音特性上からはプラズマ炎やレーザー光照射材よりもむしろ有利であると考えられる。

Fig. 10 には、溝導入材の磁歪特性を非処理材と比較して示すが、励磁特性、圧縮応力特性共に両者の間にほとんど差はなく、溝導入による磁歪特性の変化は小さいと言える。Fig. 11 には、溝導入材、非処理材およびプラズマ炎照射材の磁歪周波数分析結果を示す。図より、騒音の主原因であると言われる磁歪高調波成分はプラズマ炎照射材に比べ、溝導入材の方が小さくなっており、騒音特性上溝導入材の方が優れていることが分かる。

4.3 溝導入材の磁区構造

溝導入材の磁区構造をプラズマ炎照射材および非処理材と比較して Photo 2 に示す。写真より、溝導入材およびプラズマ炎照射材共に非処理材に比べ磁区幅は狭くなっている。しかしながら、両者の磁区構造は詳細に見ると違いがある。Photo 3 は溝導入材およびプラズマ炎照射材の処理面、断面および非処理面の直流磁化過程途中における磁区構造を観察したものである。消磁状態 A では溝導

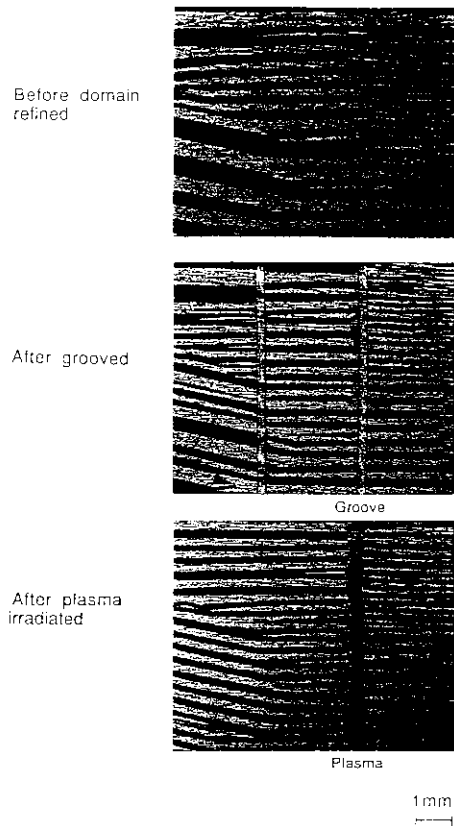


Photo 2 Domain patterns before and after grooving or plasma irradiation

入材は断面に 180° 磁区が観察され、溝導入部での磁区構造の乱れは見られないが、プラズマ照射材では照射部にストレスパターン (90° 磁区) が観察され、その影響は裏面にまで及んでいる。これを直流で磁化すると溝導入材は 1.7T 程度 C までは処理面側は溝の存在によって磁化が遅れる傾向にあるが、その分、非処理面側の磁

化が速く進行するため、全体で見れば磁化の遅れはなく、1.7T あたりまでは励磁特性は非処理材と変わらないものと考えられる。1.7T 程度で非処理面側の磁束密度は飽和に達し、それ以上では磁化がほとんど進行しないため、結果的に飽和磁束密度は非処理時に比べて低くなる。一方、プラズマ照射材では照射部において裏面にまで達する 90° 磁区の存在により低磁場側 B では表面、裏面共に磁化が遅れる傾向にあり、1.7T 以下の励磁特性の劣化と対応している。しかしながら、更に強い外部磁界を印加することにより 90° 磁区は消失し、非処理材と同等の飽和磁化となる。

このように、溝導入材の場合、飽和磁化は低下する傾向にあるが、実用上重要である 1.7T あたりまでの磁化特性にほとんど変化は見られない。

5 溝導入材の変圧器特性

5.1 巻鉄心変圧器特性

Photo 4 に示す通り、容量 20 kVA の巻鉄心を作製して溝導入材の巻鉄心変圧器特性を評価した。測定結果を Table 1 に示す。なお、表中には溝導入材と共に比較のため非処理材による結果もあわせて示す。表より鉄心のビルディングファクター (B.F.: トランス鉄損/素材鉄損) は両者共 1.0 程度で同等であり、素材特性がトランス特性に反映されていることが分かる。また、騒音は、鉄心からの距離 300 mm、鉄心高さの 1/2 の位置において測定し、周囲 4 ケ所での測定値の平均値を用いた。測定時の暗騒音は 24dB であった。

5.2 積鉄心変圧器特性

Table 2 に溝導入材 (RGHPD) を積鉄心モデル変圧器に適用した結果をプラズマ照射材 (RGHPJ) と比較して示す。鉄心形状は Fig. 12 に示す通りステップラップ型積鉄心変圧器である。変圧器鉄心の B.F. は RGHPD と RGHPJ でほぼ同等である。一方、励磁 VA および騒音は RGHPD の方がやや低くなっており、前章に示した素材特性から予想される結果と対応している。

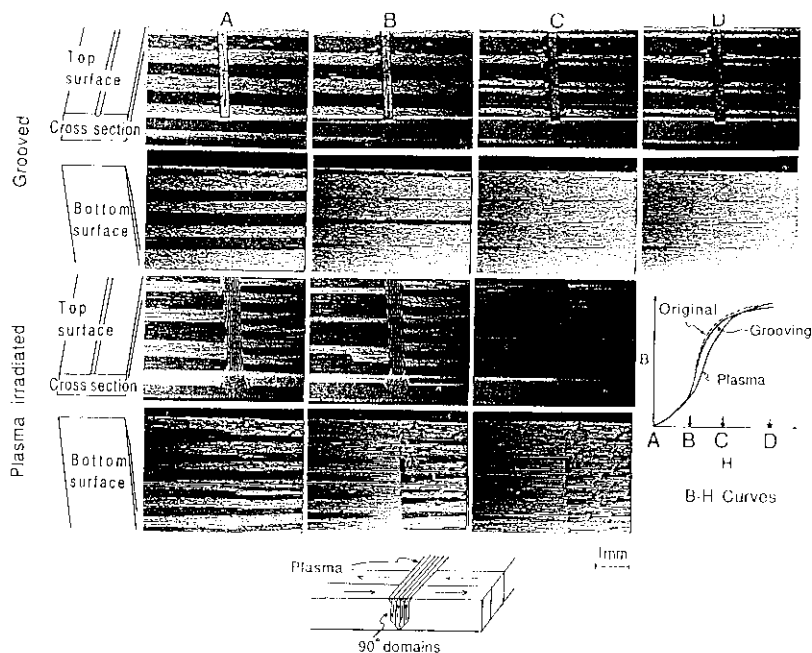


Photo 3 Change in the domain structure during DC magnetization

Table 1 Magnetic properties of wound-core transformers (0.23 mm in thickness)

Materials	Magnetic properties of sheets			Magnetic properties of transformer cores			Building factor (B.F.)	
	B_8 (T)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$W_{15/60}$ (W/lb)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$W_{15/60}$ (W/lb)	Noise _{17/50} (dB)	$W_{17/50}$	$W_{15/60}$
With grooves	1.90	0.782	0.343	0.793	0.339	43	1.01	0.99
Without grooves	1.93	0.892	0.389	0.911	0.384	42	1.02	0.99

$$B.F. = \frac{\text{Iron loss of transformer cores}}{\text{Iron loss of materials}}$$

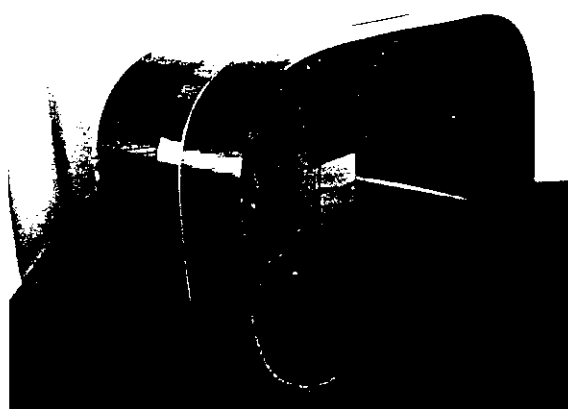


Photo 4 Photograph of a step-lap wound-core made with newly developed materials (Capacity: 20KVA, Weight: ~ 50 kg)

6 結 言

方向性電磁鋼板の最終冷延板に電解エッチングにより局所的に線状溝を形成する耐熱型磁区細分化技術を開発した。

新たに開発した材料の特徴として以下の点があげられる。

- (1) 溝形成処理しない鋼板に比べ、鉄損が約 10% 減少し、その効果は至取焼鈍により変化しない。
- (2) 溝形成処理により B_8 は 0.02~0.03T 低下するが、1.7T までの励磁特性はほとんど変わらない。
- (3) 従来のプラズマ炎照射材に比べ優れた磁歪特性を有する。
- (4) 本材料を巻鉄心変圧器に適用した結果、約 10% の鉄損低減が得られた。
- (5) また、本材料を積鉄心変圧器に適用した結果、ビルディングファクターはプラズマ照射材と同等であり、騒音は本材

Table 2 Magnetic properties of stacked-core model transformers

Sheets grade	Magnetic properties of sheets		Magnetic properties of model transformer cores			
	B_8 (T)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$W_{17/50}$ (W/kg)	$VA_{17/50}$ (VA/kg)	Noise _{17/50} (dB)	B.F.
23RGHPD	1.90	0.78	0.90	2.3	52	1.15
23RGHPJ	1.93	0.78	0.90	2.9	55	1.15

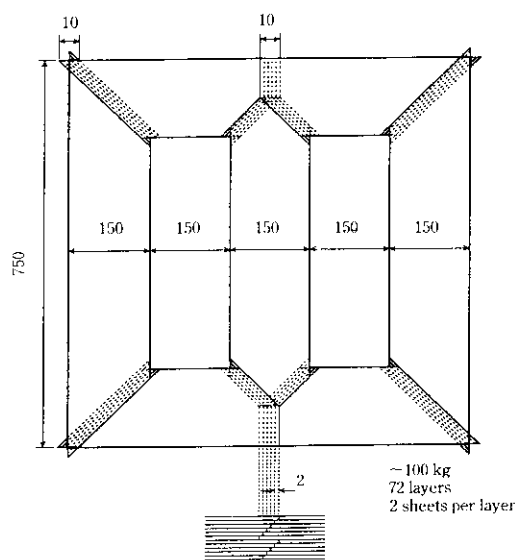


Fig. 12 Stacked core structure for model transformer (step-lap joint)

料の方が低い値を示した。

以上より、本開発材は積鉄心、巻鉄心の区別なく使用可能であり、今後、変圧器の高効率化を通じ省エネルギーに大きく貢献するものと期待される。

参 考 文 献

- 1) S. Taguchi and A. Sakakura: *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 1539
- 2) 的場伊三夫, 今中裕一, 松村 治, 後藤公道, 市田敏郎, 菅 孝宏, 小林 繁, 福田文二郎, 平田 一郎: 川崎製鉄技報, **7**(1975)2, 175
- 3) 貞頼捷雄, 飯田嘉明, 福田文二郎, 岩本勝生, 佐藤圭司, 清水洋: 川崎製鉄技報, **21**(1989)3, 239
- 4) 新日本製鉄(株): 特公昭 57-2252
- 5) 川崎製鉄(株): 特開昭 62-96617
- 6) B. Fukuda, K. Sato, T. Sugiyama, A. Honda, and Y. Ito: Proc. of ASM Conf. of Hard and Soft Magnetic Materials, 8710-008, (USA), (1987)
- 7) 川崎製鉄(株): 特公平 3-69968
- 8) K. Sato, A. Honda, K. Nakano, M. Ishida, B. Fukuda, and T. Kan: *J. Appl. Phys.*, **73**(1993), 6609
- 9) R. H. Pry and C. P. Bean: *J. Appl. Phys.*, **29**(1958), 532
- 10) 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
- 11) 山田俊尚: 電気学会磁性材料研究会資料, MAG-82-65(1982)