

Newly Developed Grain-Oriented Electrical Steel with Good Punchability Suitable for EI Cores



早川 康之

Yasuyuki Hayakawa

技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(課長)・工博



今村 猛

Takeshi Imamura

技術研究所
電磁鋼板研究部門



平嶋 浩一

Koichi Hirashima

水島製鉄所
商品技術部電磁鋼板室
主査(主席掛長)

要旨

小型電源トランス等の鉄心として打抜加工により製造される EI コア用途に適した方向性電磁鋼板 RGE を開発した。RGE は硬質のフォスフェライト (Mg_2SiO_4) 被膜を有さないため、打抜金型の寿命が硬質被膜を有する従来の方向性電磁鋼板の 10 倍に伸びる。また圧延直角方向の磁化特性に優れる特長を持つ。圧延方向だけでなく 20% 程度は圧延直角方向へも磁束が流れる EI コアへ適用すると、従来の方向性電磁鋼板を使用した場合と同等または優れた電磁特性を発揮する。さらに RGE は高周波鉄損にも優れており、高調波ノイズ除去に使用するリアクトル用途には特に適している。

Synopsis:

A grain-oriented electrical steel RGE without forsterite (Mg_2SiO_4) undercoating is recently developed aiming at the application to EI lamination transformer cores. The life of stamping dies in using RGE sheet is ten times longer than in using conventional grain-oriented steel sheet with forsterite undercoating. The iron loss of EI core stamped from RGE sheet is superior or equivalent to that using conventional one. This comes from the excellent magnetic property of RGE in the transverse direction that consists of the one-fifth length of the magnetic circuit in the EI lamination core. In addition, high efficiency in the noise reduction is expected when RGE is applied to choke coil because RGE has smaller high frequency iron loss.

1 はじめに

EI コアは小型変圧器の鉄心として一般的に使用されている。EI コアは E 片と I 片を組み合わせ積層して閉磁路となし、巻線を施すことにより製造される。E 片と I 片とは Fig. 1 に示されるような方式で、連続的に打抜加工により効率良く製造されている。この打抜方式は材料歩留の高い経済的な方法であり、さらに巻鉄心の作製に比べて、鉄心の組立作業と巻線作業を効率的に行えることもあり、電磁鋼板に限らず、フェライトやパーマロイなどの軟磁性材料を使用した変圧器の鉄心形状としても広く用いられている。

EI コアに適用する鉄心材料としては、家庭用の小型電気機器の電源アダプタを主用途として、Si 含有量の低い低級グレードの無方向性電磁鋼板が主に用いられている。EI コアの磁気回路において、E 片の縦方向にあたる 1/5 の長さ部分は圧延直角方向に一致し、残りの約 4/5 の長さが圧延方向となる。このように EI コアでは圧延方向への磁束の流れが主であるため、圧延方向の磁気特性が良好な方向性電磁鋼板を適用することにより、無方向性電磁鋼板に比較して優れた EI コアの電磁特性を得ることができる。発熱を抑えるために低鉄損を要求される比較的高い電圧で大電流のアダプタや高電

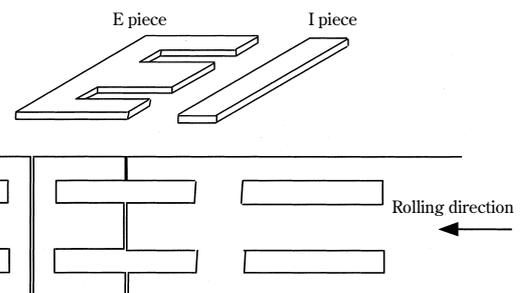


Fig. 1 Stamping method of E and I pieces from steel sheet

圧を発生させる蛍光灯の安定器用途の一部では方向性電磁鋼板が使用されている。

ところで方向性電磁鋼板の表面にはフォスフェライト (Mg_2SiO_4) を主体とする下地被膜が形成されている。フォスフェライト被膜は、従来の方向性電磁鋼板製造プロセスの仕上焼鈍工程において、コイル状に巻かれた鋼板同士の密着を防止するために塗布された MgO とその直前の工程である脱炭焼鈍工程で形成された SiO_2 との固相化学反応により形成される。また方向性電磁鋼板の最終工程ではリン酸塩とコロイダルシリカからなる張力被膜を形成させ、鋼板への絶縁性を付与するとともに鋼板に張力を付与して鉄損を低減している。フォスフェライト被膜は、この張力被膜の鋼板への密着性を強

* 平成14年7月15日原稿受付

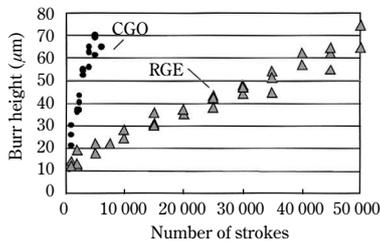


Fig. 2 Dependence of burr height on number of strokes for RGE and CGO

固にするバインダーとしての働きをも担っている。しかしフォルステライト被膜は極めて硬質であるため、打抜加工に使用する金型の寿命は無方向性電磁鋼板に比べて著しく短いという問題がある。

このため方向性電磁鋼板を EI コアに打抜加工を行う需要家においては、フォルステライト被膜を有しない方向性電磁鋼板が熱望されてきた。当社は、そのような需要家の要求に応えるため、フォルステライト被膜を有しない方向性電磁鋼板 RGE をこのほど開発した。

2 加工性の評価

表面に硬質被膜を有しない RGE の打抜加工性を、フォルステライト被膜を有する汎用方向性電磁鋼板 (CGO) と比較して調査した。RGE の表面には通常の無方向性電磁鋼板と同等の、鋼板に張力を付与しないリン酸塩系の無機系コーティングが施されている。

調査はスチール (SKD11) で作製した打抜金型により φ15mm 試料の連続打抜を行い、打抜回数とかえり高さを測定する方法にて実施した。初期のかえり高さは 10 μm に調整した。測定結果を Fig. 2 に示す。かえり高さが 50 μm に達する打抜回数で比較すると、RGE の打抜回数はフォルステライト被膜を有する方向性電磁鋼板の打抜回数の約 10 倍である。このように打抜加工性が改善されて、打抜金型の研磨頻度を減少させることができるために、需要家側にとってのメリットがある。

さらに方向性電磁鋼板を使用する巻鉄心の作製時などで、曲げ加工を施した場合、絶縁被膜が剥離しないことが必要である。そこで被膜密着性を比較するため、φ10mm の丸棒に試験片を押し付けながら 180° 曲げを行ない、折曲げ部分の被膜の剥離状況を調査した。折曲げ後の表面状態を Photo 1 に示す。フォルステライト被膜を有する CGO の場合、白く見える部分で絶縁被膜の剥離が生じた。RGE の絶縁被膜の密着性は φ10mm の曲げ試験にも耐える良好な状態であり、従来の方向性電磁鋼板で施せなかった強加工を必要とする用途にも使用することができる。

3 EI コアの磁気特性

Table 1 に、ともに板厚 0.35 mm、重量比で 3% の Si を含有している RGE と CGO の、1073 K で 2 h の歪み取り焼鈍後の、商用周

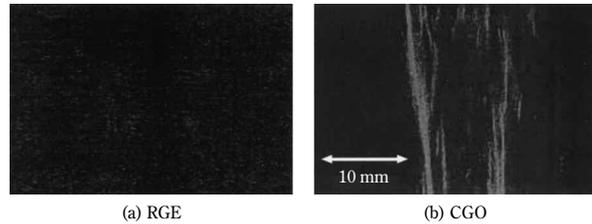


Photo 1 Appearance of the surface after the bending by φ10 mm cylinder

波数 50 Hz における鉄損および磁束密度を示す。RGE の圧延方向 (RD) の磁束密度および鉄損は CGO に比較してやや劣っているが、圧延直角方向 (TD) の鉄損は格段に優れている。なお圧延直角方向の 1.7 T での鉄損値は励磁波形が大きく歪んでいたために精度の高い測定ができなかった。

これらの方向性電磁鋼板を用いて幅 55 mm、積高さ 4.2 mm の EI コア (規格 EI55) を Fig. 3 (a), (b) に示される二つの積層方法にて作製し、電源周波数 50 Hz、励磁磁束密度を 0.5 T から 1.7 T の範囲で鉄損および励磁電流を測定した。Fig. 3 (a) に示す積層方法は、E 片と I 片を交互に積層する交互積みと呼ばれる方法であり、圧延方向の磁気特性に優れ、圧延直角方向の磁気特性に著しく劣っている方向性電磁鋼板を有利に使用する積層方式である。Fig. 3 (b) に示すバット積みと呼ばれる積層方法は、機械により無方向性電磁鋼板を効率良く積層するのに有利な方式である。しかし、方向性電磁鋼板に適用した場合、磁気特性の劣る圧延直角方向に磁束が流れる E 片の縦方向が連続して積層されるため、交互積みと比べて鉄損特性は不利となる。さらに E 片と I 片の突き合わせ部に空隙を生じるため交互積みと比べて大きな励磁電流を必要とする。

Fig. 4 に交互積みを行った場合の、励磁磁束密度と EI コア鉄損の関係を示す。Fig. 4 の結果によると低励磁磁束密度が 1.0 T 以下では CGO の鉄損が小さく、1.5 T 以上では RGE の鉄損が小さい。Fig. 5 にバット積みを行った場合の励磁磁束密度と EI コア鉄損の関係を示す。Fig. 5 によるとバット積みでは励磁磁束密度の全測定範囲で RGE の鉄損が小さく優れており、さらに励磁磁束密度が高いほど両者の差は拡大している。このように RGE を用いることにより交互積みでは CGO を用いた場合と比較して同等または優れた鉄損を示し、かつ効率的に積層作業を行えるバット積みを行った場合にも交互積みと同等の良好な鉄損を得られる。Fig. 6 に示すように交互積みを行った場合の、励磁磁束密度と EI コア励磁電流の関

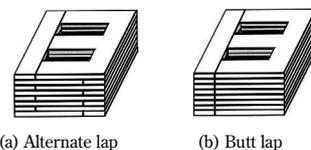


Fig. 3 Lapping method of EI lamination core; (a) Alternate lap, (b) Butt lap

Table 1 Iron loss and magnetic induction of RGE and CGO after stress relief annealing at 1073 K for 2 h

Specimen	Direction	Iron loss					Magnetic induction	
		$W_{5/50}$ (W/kg)	$W_{10/50}$ (W/kg)	$W_{13/50}$ (W/kg)	$W_{15/50}$ (W/kg)	$W_{17/50}$ (W/kg)	B_8 (T)	B_{50} (T)
RGE	RD	0.14	0.51	0.89	1.24	1.56	1.79	1.95
	TD	0.39	1.06	1.85	2.80		1.34	1.54
CGO	RD	0.10	0.41	0.73	0.98	1.29	1.87	1.98
	TD	0.63	1.70	2.41	3.44		1.35	1.55

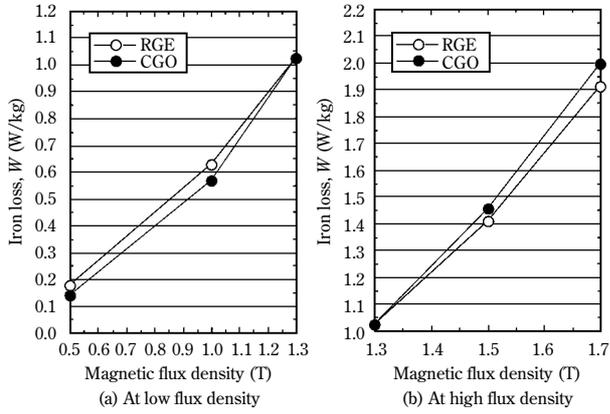


Fig. 4 Iron loss of the EI core made up from RGE and CGO sheets using the alternate lap

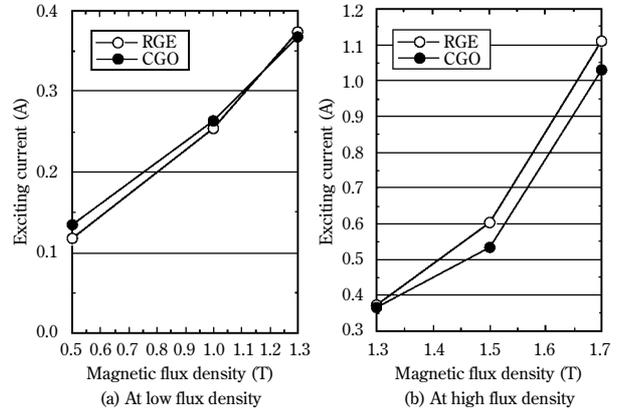


Fig. 7 Exciting current of the EI core made up from RGE and CGO sheet using the butt lap

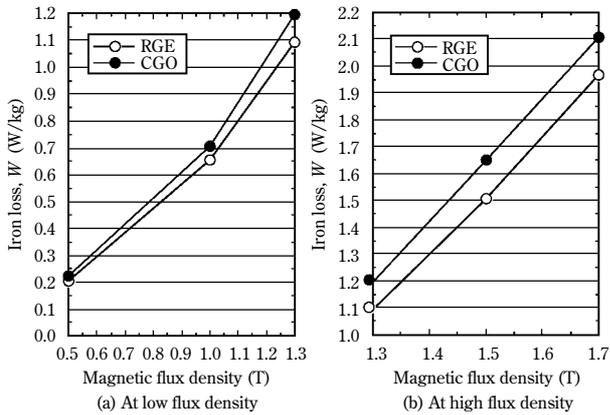


Fig. 5 Iron loss of the EI core made up from RGE and CGO sheet using the butt lap

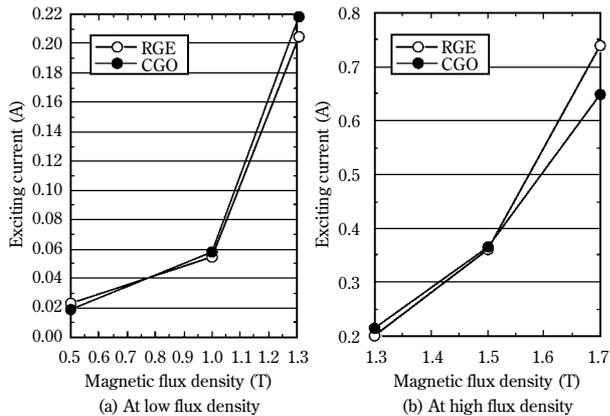


Fig. 6 Exciting current of the EI core made up from RGE and CGO sheet using the alternate lap

係には、材料間の大きな差異は認められない。

Fig. 7 にバット積みを行った場合の、励磁磁束密度と EI コア励磁電流の関係を示す。交互積みに比べて励磁電流の値は増加しているが、材料間の違いとしては低磁場側では RGE が、高磁場側では CGO がわずかに励磁電流が小さく有利である。

4 素材鉄損と EI コア鉄損の関連

EI コアの磁気回路においては、全体の約 4/5 の長さは材料の圧延方向に、残りの約 1/5 の長さは圧延直角方向を通過する。そのた

め幾何学的な配分を考慮すると (1) 式で鉄損を推定することができる。

$$W_{est} = (4W_L + W_C) / 5 \dots\dots\dots (1)$$

ここで W_{est} は鉄損の推定値、 W_L は素材の圧延方向の鉄損、 W_C は素材の圧延直角方向の鉄損である。

RGE と CGO について、励磁磁束密度 1.0~1.5T の範囲での、 W_{est} と交互積みおよびバット積みでの EI コア鉄損の実測値 W_{mea} との関係を示す。Fig. 8 に示されるように、大勢としては RGE と CGO とも、幾何学的な配分を考慮した推定値 W_{est} と、EI コアの鉄損実測値 W_{mea} とは等しいことが分かる。この結果から、RGE は圧延方向の鉄損がやや劣っていても、圧延直角方向の鉄損が極めて優れているため、EI コアとしては CGO と同等以上の鉄損が得られているものと結論される。

Fig. 8 を詳細に見ると、RGE を交互積みした場合、1.3T 以下の低励磁磁束密度の領域では推定値と実測値がほぼ一致しているが、高励磁磁束密度側では実測値のほうが低い値となっている。CGO を交互積みした場合、低励磁磁束密度側で実測値のほうが低い値となっている。交互積みの場合、I 片と E 片の縦方向部分が上下に重なることになるが、I 片での磁束の流れは圧延方向、E 片縦方向部分での磁束の流れは圧延直角方向となる。CGO では圧延方向と圧延直角方向の磁束密度差が大きいので、励磁磁束密度が低い場合に、断面での磁束の流れは透磁率の高い I 片へと集中するものと考えられる。その場合、圧延方向の鉄損の寄与が増加するため、圧延方向の鉄損が良好な CGO が RGE よりも良好な EI コア鉄損を示すものと考えられる。

一方、高励磁磁束密度側では、E 片の縦方向部分にも磁束が流れ

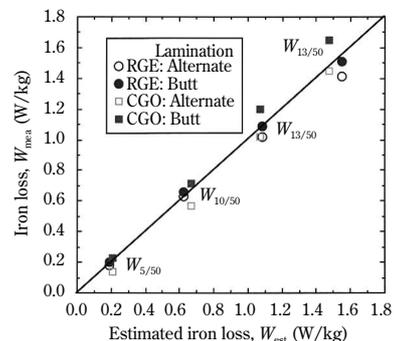


Fig. 8 Relation between estimated iron loss W_{est} and measured iron loss W_{mea} in RGE and CGO

るようになるので、圧延直角方向の鉄損の寄与が増加してくるため、圧延直角方向の鉄損が極めて良好な RGE が CGO よりも良好な EI コア鉄損を示すものと考えられる。

バット積みの場合、磁束は必ず E 片縦方向部分を流れるので、圧延直角方向の鉄損が極めて優れた RGE が CGO より優れた EI コア鉄損を示すものと考えられる。

5 張力コーティングが圧延直角方向磁気特性に及ぼす影響

RGE と CGO との違いの最も本質的な点は表面状態の違いにある。CGO ではフォルステライト被膜、その上に燐酸塩系の張力を有する絶縁被膜が施されている。これらの被膜の厚みは合計で約 2.5 μ m であり、5 MPa 程度の張力が鋼板に付与されている¹⁾。RGE では無方向性電磁鋼板と同等の絶縁被膜が施されている。絶縁被膜の種類としては打抜性を重視する場合には、半有機系の絶縁被膜を、すべり性および溶接性を重視する場合には無機系の絶縁被膜を施す。しかし、いずれも鋼板への張力付与効果はない。

表面状態の影響を明らかにする目的で、343 K で 20% 塩酸により表面被膜を除去し、磁気特性の変化を調査した。Fig. 9 に示すように、RGE では圧延方向、圧延直角方向の磁束密度と鉄損にはほとんど変化がない。これに対し CGO では圧延方向の鉄損変化は小さいが、圧延直角方向の鉄損が表面被膜除去により大きく改善していることが分かる。圧延直角方向の直流磁化特性の変化を Fig. 10 に示す。Fig. 10 によると、RGE の直流磁化特性は 400 A/m 以上の磁化力では CGO と同等であるが、400 A/m 以下の磁化力では優れた磁化特性を有していることが分かる。このように低磁場での磁化特性が改善されていることが、RGE における圧延直角方向の大幅な鉄損改善に寄与しているものといえる。磁束密度があまり高くな

い CGO では圧延方向の鉄損の改善が小さいことはよく知られている²⁾。よって方向性電磁鋼板表面における張力被膜は、打抜加工性、および圧延直角方向の磁気特性の双方を大きく劣化させるので、EI コア用途では有害であると結論される。

Fig. 9, 10 によると、RGE の圧延直角方向の鉄損、および低磁場における磁束密度は、CGO の被膜を除去した場合と比較してもまだまだわずかに優れている。この差については、Photo 2 に示す RGE のマクロ組織に顕著に観察される二次再結晶粒内に存在する微細結晶粒の寄与が考えられる。このような微細結晶粒は CGO には、ほとんど存在しない。

表面状態の影響についてさらに理解を深めるために、RGE の消磁状態での磁区構造を SEM で調査した。Photo 3 に示されるように 180° 磁区内に極めて多くのさまざまな形態の 90° 磁区が存在している。圧延直角方向の磁化を考えた場合に、180° 磁壁の移動による磁化が進行しない。方向性電磁鋼板に張力を付与した場合、磁気弾性効果により 180° 磁区構造がエネルギー的に安定化する。このような効果

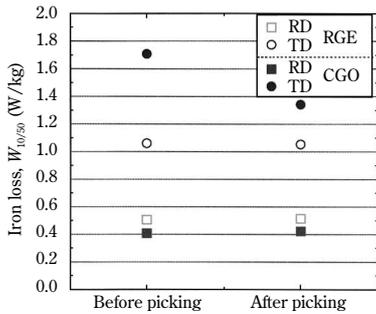


Fig. 9 The change of iron loss after the removal of coating by pickling

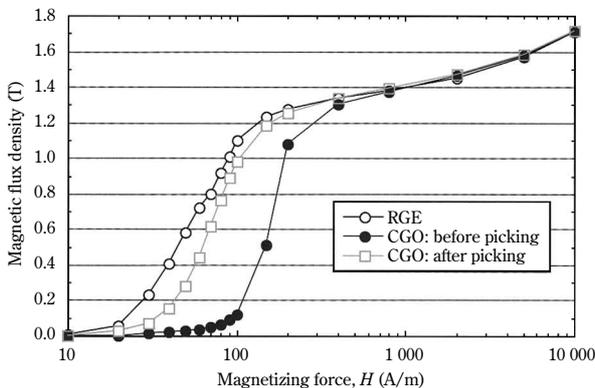


Fig. 10 DC magnetization curve in the transverse direction of RGE, CGO before pickling and CGO after pickling

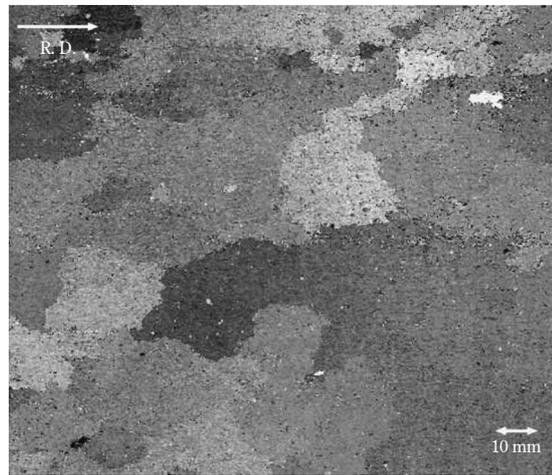


Photo 2 Macro structure of RGE sheet

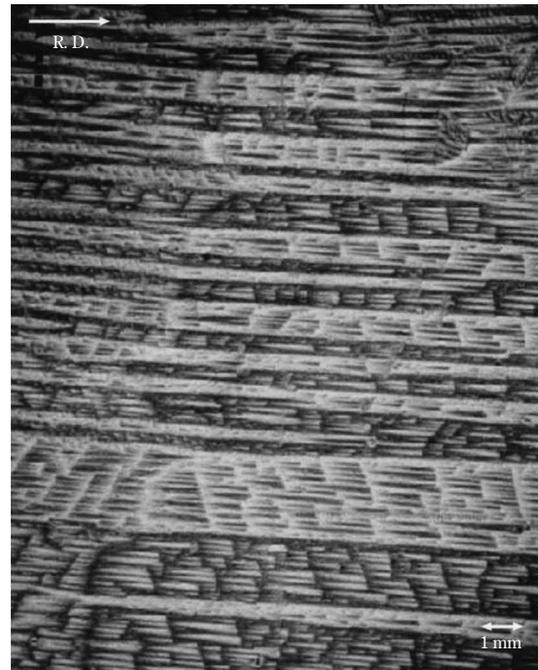


Photo 3 Magnetic domain structure of RGE sheet observed by SEM

は圧延方向の磁化を容易にするが、圧延直角方向の磁化を困難にする。RGE の場合、張力被膜が存在しないため、圧延直角方向に磁化成分を有する 90° 磁区が豊富に存在し、圧延直角方向の磁化が容易に行われているものと考えられる。また二次再結晶粒内に存在する微細結晶粒の存在も、周囲と異なる結晶方位を有するため、90° 磁区の生成に有利と考えられ、圧延直角方向の磁気特性改善に寄与しているものと推定される。

6 高周波鉄損

電磁鋼板を使用する EI コアの用途として、パソコンなどの電源における高調波ノイズを除去する素子であるチョークコイルの鉄心用途が増加しつつある。ノイズ規制の厳しい用途を中心に、ノイズの除去性を向上し、かつコアからの発熱を抑制するために方向性電磁鋼板が使用されている。このチョークコイル用途の場合、数百 Hz 程度の高周波における鉄損が良好なことが、ノイズの除去性能向上や発熱量の減少に有利である。

Table 2 に、RGE と CGO について素材の圧延方向、圧延直角方向の高周波鉄損の比較、さらに、3 章に述べた EI コアについて 1073 K、2h の歪み取り焼鈍後の高周波鉄損を比較した結果を示す。Table 2 に示されるように、RGE は圧延方向においても CGO よりも良好な鉄損であり、圧延直角方向の鉄損の寄与もある EI コアにおいてはさらに優位性を増していることが分かる。このように RGE は高周波鉄損が良好であるため、チョークコイルに適用した場合に特に良好なノイズ除去性と発熱量の抑制とが期待される。

高周波特性が良好な理由については、RGE にはフォスフェイト被膜が存在しないので表面の平滑性に優れている影響と考えられる。

Table 2 High frequency iron loss of RGE and CGO after stress relief annealing at 1073 K for 2 h

		$W_{10/400}$ (W/kg)	$W_{10/1000}$ (W/kg)
RGE	RD	12.0	52.5
	TD	18.9	77.7
	EI core	12.9	55.5
CGO	RD	11.7	53.8
	TD	27.1	98.3
	EI core	14.0	59.6

7 まとめ

新規に開発した表面に硬質なフォスフェイト被膜を有しない RGE は、EI コアに適用した場合、以下に示すような利点がある。

- (1) 打抜加工性が良好であり、従来の方向性電磁鋼板を打ち抜く場合に比べて 10 倍の金型寿命が期待される。
- (2) 圧延直角方向の鉄損および低磁場での励磁特性に優れるため、圧延直角方向にも磁束が流れる EI コアに適用して従来の方向性電磁鋼板と同等か優れた磁気特性が得られる。
- (3) 圧延直角方向に良好な磁気特性が得られる理由は、張力被膜が存在しないこと、および二次再結晶粒内に微細結晶粒が存在することによって、圧延直角方向に磁化成分を持たない 180° 磁区構造が不安定になり、圧延直角方向に磁化成分を持つ 90° 磁区が増加するためである。
- (4) 従来の方向性電磁鋼板と比較して高周波鉄損に優れるので、チョークコイルに適用した場合に特に良好なノイズ除去性と発熱量の抑制とが期待される。

参考文献

- 1) B. Fukuda, T. Irie, and H. Shimanaka: *IEEE Trans. Mag.*, **13**(1977), 1499
- 2) T. Yamamoto and T. Nozawa: *J. Appl. Phys.*, **41**(1971), 1539