

磁区制御型低損失Fe基アモルファス合金「MaDC-A™」の開発

Development of Magnetic Domain Controlled Low Iron Loss Fe-Based Amorphous Alloys “MaDC-A™”

板垣 肇*

Hajime Itagaki

黒木 守文*

Morifumi Kuroki

伊藤 直輝*

Naoki Ito

佐々木 淳**

Makoto Sasaki

* 日立金属株式会社
機能部材事業本部

Advanced Components and Materials
Division, Hitachi Metals, Ltd.

** 日立金属株式会社
技術開発本部

Technology, Research and Development
Division, Hitachi Metals, Ltd.

レーザースクライブ処理により磁区構造を制御したFe基アモルファス合金 MaDC-A™ (Magnetic Domain Controlled-Amorphous Alloys: マードックエー) を開発した。MaDC-A 薄帯を用いた鉄心は、一軸の誘導磁気異方性を維持しつつ、磁区を適切に細分化させることで皮相電力を増加させず、日立金属の現行製品であるFe基アモルファス合金薄帯 Metglas® 2605HB1M を用いた鉄心に比べ30%を超える鉄損低減を実現した。MaDC-A は、配電用変圧器の鉄心材料として、その高効率化に大きく寄与し、省エネルギー化や地球温暖化防止など環境負荷低減に貢献できると考えられる。

A new Fe-based amorphous alloy, MaDC-A™ (Magnetic Domain Controlled - Amorphous Alloys) has been developed by controlling the magnetic domain structure using a laser scribing technique. The iron loss is reduced by over 30% in a MaDC-A core compared with that of conventional Fe-based amorphous alloy cores maintaining low exciting power. MaDC-A is suitable for highly energy efficient distribution transformers and will contribute to energy savings.

● Key Words : 磁区制御, 低損失, Fe基アモルファス合金

● Production Code : MaDC-A™

● R&D Stage : Mass production

1. 緒言

地球温暖化対策としてCO₂排出量削減が求められており、配電用変圧器においても省エネルギー化が喫緊の課題となっている。日本では、電力会社向けを除く油入変圧器およびモールド変圧器に対して損失上限を定めた規格が定められ、これらはトッランナー変圧器と呼ばれている。世界各国での変圧器規格として、日本のトッランナー規格(JIS C4304:2013およびJIS C4306:2013)、米国のDOE規格(US Department of Energy 10 CFR Part 431.196)、EU規格(Commission Regulation(EU) No.548/2014)、中国国家規格(GB20052-2013)、インド規格(IS 1180(Part 1):2014)等があり、定期的にエネルギー効率が高効率化する方向に改定され、その規格に適合する低損失な鉄心材料の開発が求められている¹⁾。

Fe基アモルファス合金は、結晶磁気異方性が無いため、鉄損が方向性電磁鋼板より著しく小さいという特長を持ち、配電用変圧器の待機電力(励磁に伴う無負荷損)を小さくできる^{1), 2)}。配電変圧器用鉄心としてのFe基アモルファス合金薄帯は、1980年代に米国においてMetglas®の商標で商品化され、その薄帯を鉄心に用いた配電用変圧器の実用化が始まった。日立金属では、2020年現在、組成改良したMetglas2605SA1(以下、2605SA1と略称)、

さらに飽和磁束密度を高めたMetglas2605HB1M(以下、2605HB1Mと略称)を量産しており^{1), 2), 3)}、主に配電用変圧器の鉄心材料として使用されている。

配電用変圧器に用いられるFe基アモルファス合金の鉄損は、ヒステリシス損失および渦電流損失から成り、渦電流損失が半分以上を占める。Fe基アモルファス合金の板厚は25μm程度と薄いため、古典的渦電流損失は無視できるほど小さく、その大部分は磁区構造に起因する異常渦電流損失である⁴⁾。この理由は、Fe基アモルファス合金では、変圧器用途に適するように磁界中熱処理して一軸の誘導磁気異方性を付与しているため、磁区幅が大きいため、交流で励磁された場合に磁壁の移動距離が大きくなるからである。この異常渦電流損失を低減するためには、磁区を細分化することが有効であり、これまで、Fe基アモルファス合金薄帯にレーザースクライブ処理を施すことで、磁区を細分化し、鉄損を低減したという報告がされているが^{5), 6), 7)}実用化には至っていない。

本稿では、商用生産可能な独自開発したレーザースクライブ処理により磁区を細分化させた、MaDC-A™薄帯の磁区構造と鉄損、皮相電力の関係について述べる。また、MaDC-A 薄帯を用いた配電変圧器用のモデル巻鉄心の試作評価を行った結果についても報告する。

2. Fe 基アモルファス合金薄帯の鉄損と磁区構造

2.1 現行製品における磁区制御とその課題

Fe 基アモルファス合金薄帯は、一般的に単ロール液体急冷法と呼ばれる超急冷技術により製造されている⁸⁾。本製法では、連続的にノズルから一定量の熔融金属を冷却ロール表面に噴出することで、アモルファス合金薄帯が得られる。この時、熔融金属を 10⁶ K/sec 以上に超急冷することで、結晶の核生成・成長を抑制し、結晶化させることなく薄帯化させている。

図 1 に、単ロール液体急冷法により作製された Fe 基アモルファス合金薄帯の外観写真を示す。公称板厚は 25 μm、標準幅は 142 mm、170 mm および 213 mm である。

図 2 に、単ロール液体急冷法により作製された現行量産品である 2605HB1M 薄帯の自由面側（単ロール液体急冷法で薄帯を製造する時、冷却ロールに接しない薄帯面）の表面写真を示す。

この薄帯の自由面には波目状の不均一な凹凸模様が形成されている⁹⁾。この模様は磁区の細分化を狙って、急冷凝固される溶湯の表面張力の固有振動により形成させたものである。

図 3 に、磁気カー効果を利用して撮影した、薄帯の長手方向への磁界中熱処理後の 2605HB1M 薄帯の消磁状態における磁区構造写真を示す。

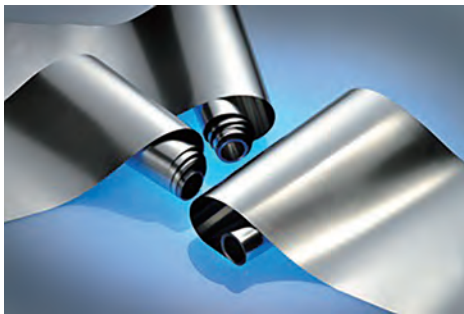


図 1 Fe 基アモルファス合金薄帯（公称板厚：25 μm、標準幅：142 mm、170 mm および 213 mm）

Fig.1 Fe-based amorphous alloy strips (nominal thickness: 25 μm, standard widths: 142 mm, 170 mm, 213 mm)

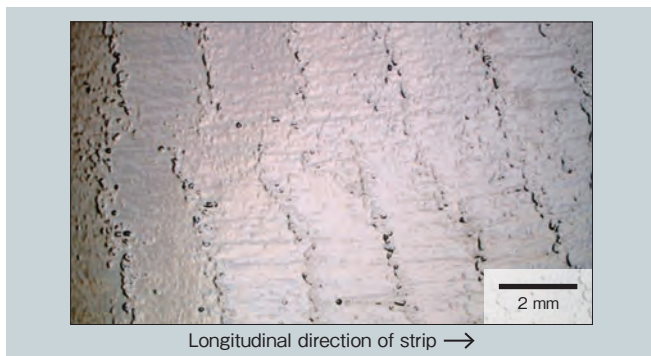


図 2 2605HB1M 薄帯の自由面側の表面写真

Fig.2 Free surface of 2605HB1M strip

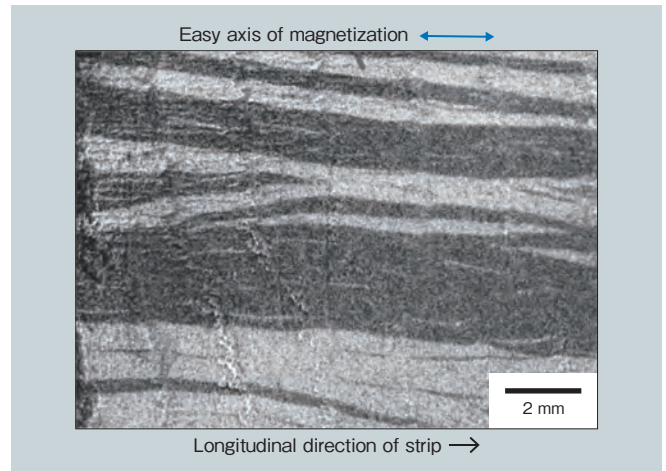


図 3 磁界中熱処理後の消磁状態における 2605HB1M 薄帯の磁気カー効果による磁区構造写真

Fig.3 Magneto-optical Kerr effect image of 2605HB1M strip after magnetic field annealing (demagnetized state)

白色部と黒色部は磁区を表しており、その境界が磁壁である。2605HB1M 薄帯の磁区幅は、狭いものから約 4 mm と広いものまで存在し、磁壁に湾曲した部分が見られる。

このように、現行製品である 2605HB1M 薄帯では、製造時に薄帯表面に凹凸を意図的に形成することにより、磁区を細分化させて渦電流損失の低減を図っている。しかし、凹凸の不均一さにより漏れ磁束が乱れ、磁区構造が不均一となるため磁気特性の制御が難しいという課題があった。

2.2 磁区構造と鉄損

本項では、磁区構造を考慮した鉄損に関する理論を引用し、磁区細分化による鉄損低減について説明する。

磁性体の鉄損 (P) は、一般にヒステリシス損失 (P_h) と渦電流損失 (P_e) に分離して表すことができ、さらに渦電流損失は、古典的渦電流損失 (P_{ce}) と異常渦電流損失 (P_{ae}) に分離することができるため、以下のように表せる。

$$P = P_h + P_e \\ = P_h + (P_{ce} + P_{ae}) \text{ [W/kg]} \quad (1)$$

特に、板状の試料形状の場合には、渦電流損失の項は下記のように表せることが知られている^{10), 11)}。

$$P_{ce} = \frac{10^{-3} \pi^2}{6} \frac{(d \cdot B_m)^2}{\rho \cdot \gamma} \cdot f^2 \quad (2)$$

$$P_{ae} \propto \frac{2L}{d} \quad (3)$$

ここで、 f は周波数、 d は薄帯の厚さ、 B_m は磁束密度、 ρ は抵抗率、 γ は密度、 $2L$ は磁区幅である。磁界中熱処

理を行った 2605HB1M の単板の磁束密度 1.4 T, 周波数 50 Hz における, 鉄損 (P) は約 0.090 W/kg である。この時のヒステリシス損失 (P_h) は, 直流ヒステリシスループで囲まれる内部面積に周波数 (f) を乗じて求めることができ, その値は約 0.035 W/kg となる。式 (2) より計算した古典的渦電流損失 (P_{ce}) は約 0.0006 W/kg となり, 鉄損 (P) からヒステリシス損失 (P_h) と古典的渦電流損失 (P_{ce}) を引くことで, 異常渦電流損失 (P_{ae}) は約 0.055 W/kg であることが分かる。すなわち, 商用周波数 (50 ~ 60 Hz) において古典的渦電流損失 (P_{ce}) は, 他の 2 項に比べ極めて小さいことから, Fe 基アモルファス合金薄帯の場合には, 式 (1) は下記のように簡略化できる。

$$P = P_h + P_{ae} \quad (1)'$$

式 (1)' の鉄損を構成する 2 項のうち, 異常渦電流損失 (P_{ae}) は鉄損の半分以上を占め, 磁区幅 ($2L$) に比例する。鉄損低減には磁区の細分化が有効であることが分かる。

2.3 磁区細分化手法

方向性電磁鋼板における磁区細分化技術はすでに実用化されている。磁区細分化の手法として, レーザースクライブまたはプラズマ処理により材料に応力を付与する方法や材料表面に機械的な溝を付ける方法がある^{12), 13)}。これらの手法は, その後の加工プロセスによって使い分けられている。

Fe 基アモルファス合金薄帯においても, 溝加工やレーザースクライブによる磁区細分化が 30 年前より研究されてきた^{4), 5), 6)}。溝加工については, 薄帯の薄さゆえ機械的に安定した溝を付けることが難しく, また, 表面の溝により漏れ磁束が発生し, 磁気飽和しづらくなる。一方でレーザースクライブは, レーザーエネルギーの調整により, 表面形状への影響を抑えつつ, 応力を付与することが可能であり, 漏れ磁束を抑えつつ, 均一な磁区の細分化が可能である¹⁴⁾。

液体急冷法により製造された Fe 基アモルファス合金薄帯は, 内部応力を緩和し, 一軸の誘導磁気異方性を付与するために, 300 ~ 400°C の温度で磁界中熱処理を必要とする。また, Fe 基アモルファス合金薄帯は主に配電用変圧器の巻鉄心に使用されるため, その巻き応力によりレーザースクライブで付与した応力が相殺されることが考えられる。そのため, Fe 基アモルファス合金薄帯へのレーザースクライブは, 表面形状の変化を抑えつつ, 熱処理後の巻鉄心にレーザースクライブによる応力が残存していることが重要である。

3. Fe 基アモルファス合金薄帯の磁区制御

3.1 レーザースクライブによる磁区細分化

2.1 項において説明したように, 2605HB1M 薄帯では, 表面に凹凸を意図的に形成して, 磁区を細分化させて渦電流損失の低減を図っているが, 磁区幅が均一に揃っていない課題があることを述べた。したがって, MaDC-A の開発では, 表面粗度を改善した Fe 基アモルファス合金薄帯を準備し, その薄帯表面にレーザースクライブ処理を施した。

図 4 に, Fe 基アモルファス合金薄帯の自由面側のレーザースクライブ処理前後の X 線回折パターンを示す。どちらの試料でも, アモルファス構造に特有のハローパターンが得られ, レーザースクライブによって結晶化は起きていないことが確認できた。

図 5 に, レーザースクライブ処理有無による Fe 基アモルファス合金薄帯の自由面側の表面写真を示す。図 2 に示した 2605HB1M 薄帯の表面写真と比較すると, 本 Fe 基アモルファス合金薄帯では凹凸が相当程度改善されていることが確認できる。線状に見える部分がレーザースクライブ部分で, その間隔は 20 mm および 2 mm である。

図 6 に, これらの試料の磁界中熱処理後の消磁状態における磁気カー効果による磁区構造写真を示す。レーザースクライブ処理を行っていない試料の磁区幅は約 6 mm であり, その磁区は反平行に揃っている。レーザースクライブ処理を行った試料は, 磁界中熱処理後も磁区の細分化が維持され, レーザースクライブ間隔 20 mm では, 処理していない場合に比べ磁区幅は約 1/3, スクライブ間隔 2 mm では磁区幅は約 1/10 に細分化し, 反平行に配列していることが確認できた。

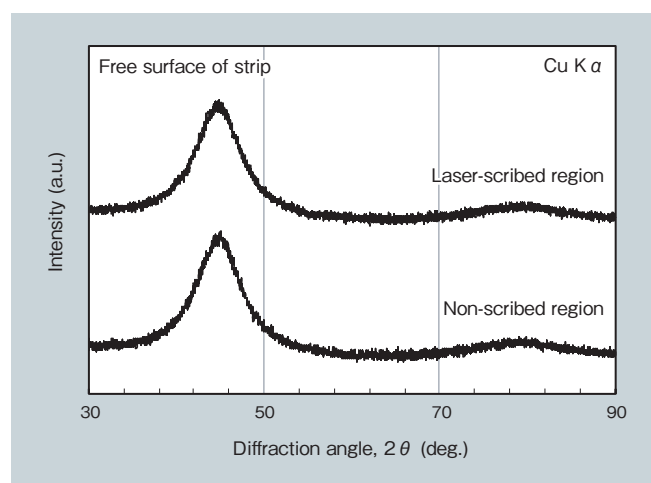


図 4 Fe 基アモルファス合金薄帯 (自由面側) のレーザースクライブ部分と未処理部分の X 線回折パターン

Fig.4 X-ray diffraction patterns for laser-scribed and non-scribed regions of free surface of Fe-based amorphous alloy strip

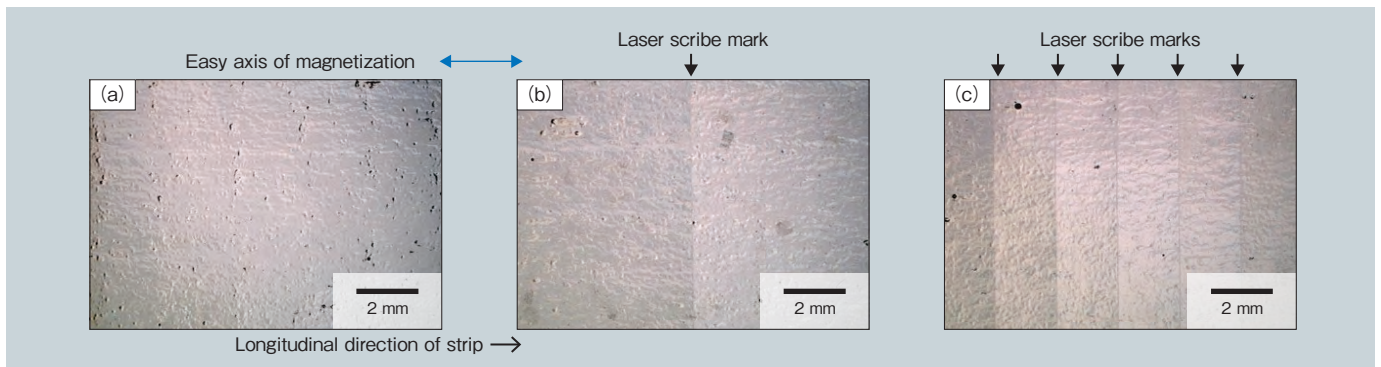


図5 Fe 基アモルファス合金薄帯の自由面側の表面写真 (a) 未処理 (b) スクライブ 20 mm 間隔 (c) スクライブ 2 mm 間隔
Fig.5 Free surface of Fe-based amorphous alloy strips (a) non-scribed, (b) scribe spacing of 20 mm, and (c) scribe spacing of 2 mm

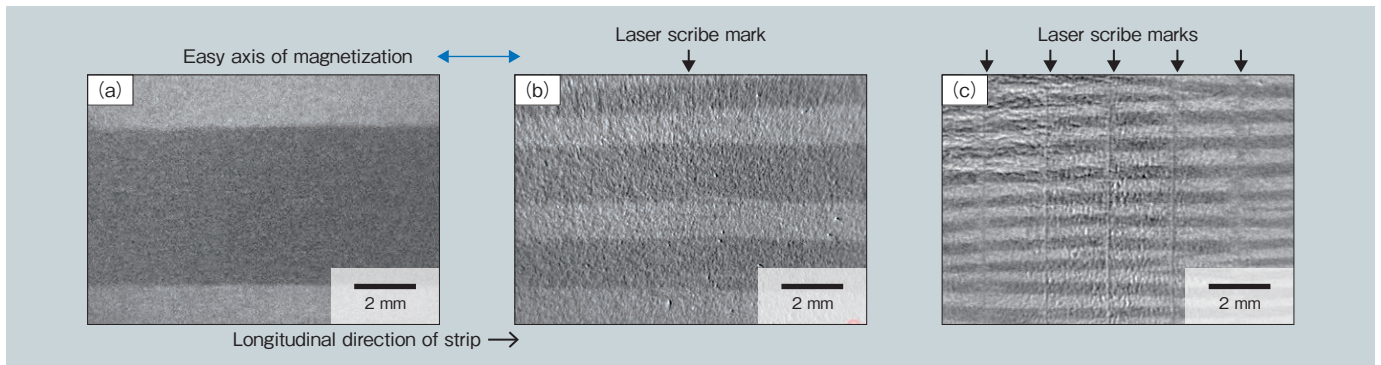


図6 レーザースクライブ処理有無の消磁状態における Fe 基アモルファス合金薄帯の磁気カー効果による磁区構造写真 (a) 未処理 (b) スクライブ 20 mm 間隔 (c) スクライブ 2 mm 間隔
Fig.6 Magneto-optical Kerr effect images of Fe-based amorphous alloy strips (demagnetized state) (a) non-scribed, (b) scribe spacing of 20 mm, and (c) scribe spacing of 2 mm

3.2 単板での鉄損, 皮相電力評価

図7に、周波数 50 Hz における鉄損の磁束密度依存性を示す。磁束密度 1.0 ~ 1.5 T において、レーザースクライブ処理を行った試料の鉄損は、未処理材に対して大幅に低減し、磁束密度 1.4 T、周波数 50 Hz における未処理材の鉄損 0.110 W/kg に対し、スクライブ間隔 20 mm の鉄損は 0.072 W/kg と約 35% 低減、スクライブ間隔 2 mm の鉄損は 0.046 W/kg と約 60% の低減を示した。3 試料ともにヒステリシス損失は直流ヒステリシスループの測定から約 0.035 W/kg と得られたため、磁束密度 1.4 T、周波数 50 Hz における異常渦電流損失 (鉄損 - ヒステリシス損) を計算すると、未処理材 (磁区幅 6 mm) では 0.075 W/kg、スクライブ間隔 20 mm (磁区幅 2 mm) では 0.037 W/kg、スクライブ間隔 2 mm (磁区幅 0.6 mm) では 0.011 W/kg となり、異常渦電流損失は、磁区幅を細分化することにより低下することが確認できた。

図8に、周波数 50 Hz における皮相電力の磁束密度依存性を示す。皮相電力は、レーザースクライブ間隔 20 mm では、磁束密度 1.45 T までは未処理材と同等、またはそれ以下の皮相電力である。一方で、レーザースクライブ間隔 2 mm で皮相電力が増大している。これは、図6 (c)

に示すように、レーザースクライブ数を増やすと、レーザースクライブ付近での磁束の漏れにより、磁区の乱れが生じるため、ヒステリシスループの角型性が悪くなったことが原因と考えられる。

以上の結果より、配電用変圧器用途を想定した場合、鉄損、皮相電力、および量産性を考慮すると、レーザースクライブ間隔としては 20 mm が適切であり、本加工を施した Fe 基アモルファス合金薄帯を MaDC-A と名付けた。

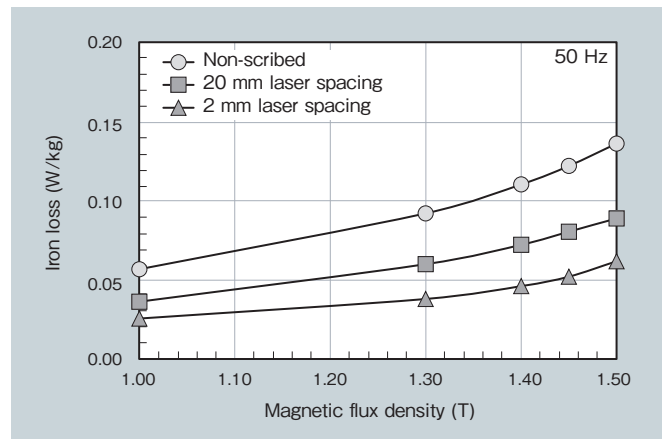


図7 レーザースクライブ処理による Fe 基アモルファス合金薄帯の鉄損の磁束密度依存性
Fig.7 Magnetic flux density dependence of iron loss for Fe-based amorphous alloy strips with/without laser scribing

表1に、現有製品である2605HB1M薄帯および開発製品のMaDC-A薄帯の周波数50 Hz、磁束密度1.3 Tおよび1.4 Tの鉄損および皮相電力の単板の典型的な値を示す。薄帯は磁界中熱処理（薄帯長手方向に3,000 A/mの磁界印加）を施した後、アモルファス金属単板磁気特性試験方法（JIS H 7152-1996）に従って測定した。MaDC-A薄帯は、2605HB1M薄帯対比で皮相電力を増加させずに約20%以上鉄損が低下することが確認できた。

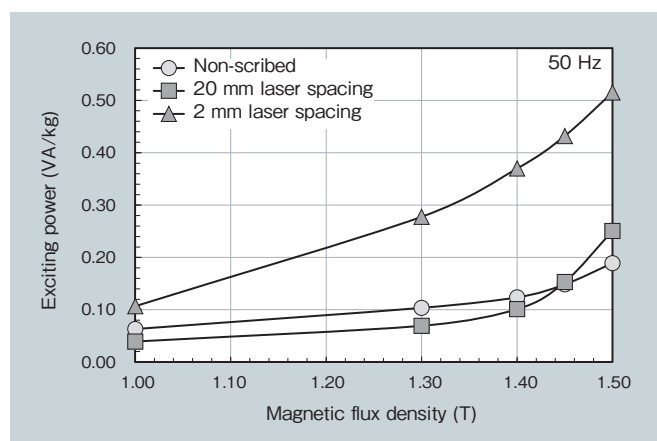


図8 レーザスクライプ処理によるFe基アモルファス合金薄帯の皮相電力の磁束密度依存性

Fig. 8 Magnetic flux density dependence of exciting power for Fe-based amorphous alloy strips with/without laser scribing

表1 MaDC-ATMおよび2605HB1M薄帯の鉄損および皮相電力
Table 1 Iron loss and exciting power for MaDC-ATM and 2605HB1M strips

Exciting condition	Iron loss (W/kg)		Exciting power (VA/kg)	
	2605HB1M	MaDC-A TM	2605HB1M	MaDC-A TM
1.3 T, 50 Hz	0.075	0.060	0.081	0.069
1.4 T, 50 Hz	0.090	0.072	0.104	0.101

4. 配電変圧器用巻鉄心の特性評価

MaDC-A薄帯および現行量産の2605HB1M薄帯を使用して単相10 kVA配電変圧器用のモデル巻鉄心を試作し、その磁気特性を評価した。巻鉄心は図9に示すように、薄帯を複数枚積層した積層体をU字型に曲げ、その両端部をオーバーラップ巻きする構成である。成形した巻鉄心は磁界中熱処理（磁路方向に800 A/mの磁界印加）し、鉄心脚部をエポキシ樹脂で固めた。

図10に、MaDC-A薄帯で作製した巻鉄心と2605HB1M薄帯で作製した巻鉄心を、二巻線法により磁束正弦波条件で測定した場合の周波数50 Hzにおける鉄損の磁束密度依存性を示す。また、図11に、これら巻鉄心の周波数50 Hzにおける皮相電力の磁束密度依存性を示す。磁束

密度1.0～1.5 Tの範囲において、MaDC-A薄帯を用いた巻鉄心は、2605HB1M薄帯の巻鉄心に比べ鉄損が30%以上低減されている。また、磁束密度1.0～1.5 Tの範囲において、MaDC-Aを用いた巻鉄心は、2605HB1Mの巻鉄心より低い皮相電力となる。適切な間隔でレーザスクライプ処理したMaDC-Aでは、一軸の誘導磁気異方

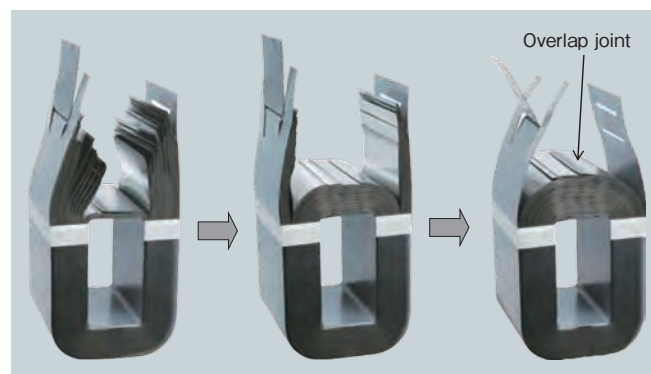


図9 Fe基アモルファス合金薄帯を使用した巻鉄心の成形方法
Fig. 9 Forming process for distributed-lap joint wound core

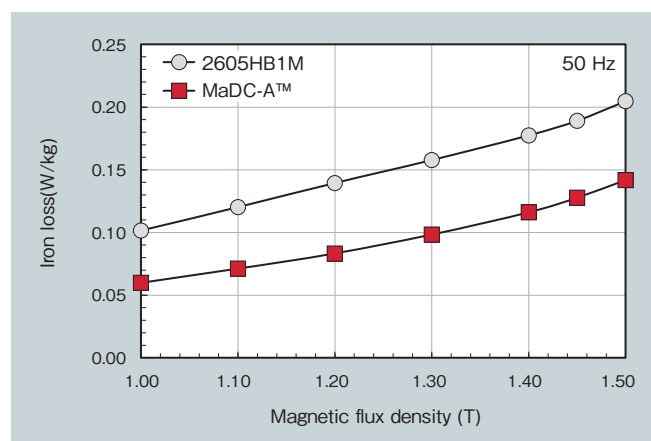


図10 MaDC-ATMおよび2605HB1M巻鉄心における鉄損の磁束密度依存性

Fig. 10 Magnetic flux density dependence of iron loss for MaDC-ATM and 2605HB1M cores

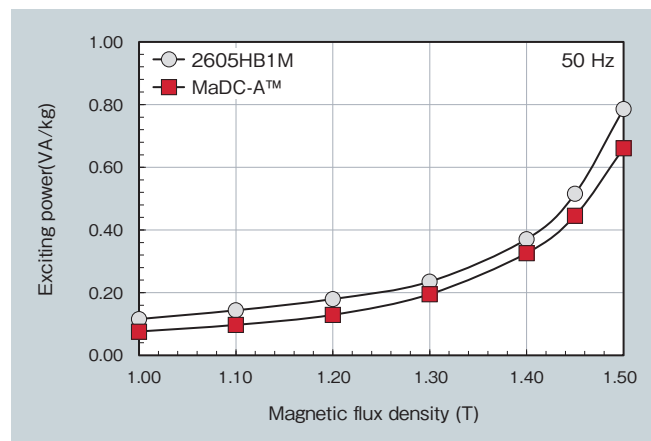


図11 MaDC-ATMおよび2605HB1M巻鉄心における皮相電力の磁束密度依存性

Fig. 11 Magnetic flux density dependence of exciting power for MaDC-ATM and 2605HB1M cores

性の分散が抑制されているため、磁区の乱れが少ないことが影響しているものと考えられる。

最後に、これら巻鉄心の周波数 50 Hz、磁束密度 1.4 T における鉄損の Building Factor（薄帯を巻鉄心にした場合の鉄損悪化率のことで、 $B.F. (\%) = \text{巻鉄心の鉄損} / \text{薄帯の鉄損}$ 、で示される。）を見積もった。2605HB1M は 190%、MaDC-A は 160% となり、MaDC-A は鉄心への成形による鉄損悪化率も低い結果となった。巻鉄心成形時の巻き応力により、レーザースクライブ効果が低減することが懸念されたが、その現象は見られず良好な鉄心特性を示した。この B.F. が低下する要因とさらなる低下については、継続して研究していく。

5. 結言

本稿では、実用化が困難とされてきた Fe 基アモルファス合金薄帯の磁区制御技術に挑戦し、量産可能な薄帯表面へのレーザースクライブ処理技術を確立、その技術を適用した Fe 基アモルファス合金 MaDC-A 薄帯の磁区構造と鉄損、皮相電力の関係について紹介した。また、MaDC-A 薄帯を用いた配電用変圧器向けのモデル巻鉄心の試作評価を行い、従来の製品 2605HB1M 巻鉄心に比べ 30% を超える鉄損低減効果を達成したことを示した。

これまで、Fe 基アモルファス合金は配電用変圧器用途を主体に普及してきた。超急冷法で作製される Fe 基アモルファス合金薄帯は、その製造の難しさから磁気特性の制御が難しいとされてきたが、著者らが開発した磁区制御技術の適用により、用途に合わせた磁気特性への作り込みも可能となるため、新たな用途への展開も進めていきたい。

なお、本 MaDC-A は、「磁区制御型 Fe 基アモルファス合金 MaDC-A™ の開発」として 2020 年 3 月にプレスリリースしている。

本稿は、株式会社シーエムシー出版の許諾の下、以下の雑誌に掲載された寄稿からの転載である。

板垣：月刊機能材料，Vol.40（2020），No.9.

引用文献

- 1) 中島晋，特殊鋼，Vol.66（2017），No.2，p.39.
- 2) Y. Ogawa et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 304（2006）p.675.
- 3) 日立金属，製品カタログ：アモルファス合金薄帯 Metglas®，（2014）
- 4) F. E. Luborsky, Amorphous Metallic Alloys, Butterworths,（1983），p.366.
- 5) T. Sato, Mater. Eng. Perform., Vol.2,（1993）p.235.
- 6) T. Sato et al., Proc. 5th Int. Conf. Rapidly Quenched Metals, Vol.2,（1985），p.1643.
- 7) K.Tan, IEEE Trans. Magn., Vol.22（1986），p.188.
- 8) 増本他，アモルファス金属の基礎，オーム社，（1982），p.14.
- 9) C. Kaido et al., IEEE Trans. Magn., Vol.21（1985），p.2029.
- 10) R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE（1993），p.778.
- 11) R. H. Pry et al., J. Appl. Phys., Vol.29（1958），p.532.
- 12) 谷他，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-04-229，（2004），p.13.
- 13) T.Sato et al., IEEE Trans. Magn., Vol.14,（1978），p.350.
- 14) K. Narita et al., Proc. 4th Int. Conf. Rapidly Quenched Metals, Vol.2,（1981），p.1001.



板垣 肇

Hajime Itagaki
日立金属株式会社
機能部材事業本部
メトグラス安来工場



黒木 守文

Morifumi Kuroki
日立金属株式会社
機能部材事業本部
メトグラス安来工場



伊藤 直輝

Naoki Ito
日立金属株式会社
機能部材事業本部
メトグラス安来工場
Ph. D



佐々木 淳

Makoto Sasaki
日立金属株式会社
技術開発本部
グローバル技術革新センター