



CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類 :

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

---

of 10 mm to 60 mm, inclusive, and the spot interval, which is the interval between center points of a plurality of laser irradiation marks in each of the plurality of rows of laser irradiation marks falls within the range of 0.10 mm to 0.50 mm, inclusive. The numerical density D of laser irradiation marks ( $= (1/d1) \times (1/d2)$ , where d1 is the line interval and d2 is the spot interval) falls within the range of 0.05 marks/mm<sup>2</sup> to 0.50 marks/mm<sup>2</sup>, inclusive.

(57) 要約 : 本発明の一態様は、自由凝固面及びロール面を有し、自由凝固面及びロール面の少なくとも一方向に複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔であるライン間隔が10mm~60mmであり、複数のレーザー照射痕列の各々における複数のレーザー照射痕の中心点間隔であるスポット間隔が0.10mm~0.50mmであり、レーザー照射痕の数密度D ( $= (1/d1) \times (1/d2)$ 、d1 : ライン間隔、d2 : スポット間隔) が0.05個/mm<sup>2</sup>~0.50個/mm<sup>2</sup>であるFe基アモルファス合金薄帯を提供する。

## 明 細 書

発明の名称：

**F e 基アモルファス合金薄帯及びその製造方法、鉄心、並びに変圧器**

### 技術分野

[0001] 本開示は、F e 基アモルファス合金薄帯及びその製造方法、鉄心、並びに変圧器に関する。

### 背景技術

[0002] F e 基アモルファス（非晶質）合金薄帯は、変圧器の鉄心材料として、その普及が進みつつある。

[0003] 特開昭61-29103号公報には、F e 基非晶質合金の鉄損及び励磁特性を同時に改善する方法として、非晶質合金薄帯の表面を局部的かつ瞬間的に溶解し、次いで急凝固させて再び非晶質化した後、この薄帯を焼鈍する非晶質合金薄帯の磁性改善方法が開示されている。特開昭61-29103号公報には、非晶質合金薄帯の表面を局部的に溶解する手段として、ビーム径0.5mmφ以下に絞ったレーザー光、ビーム径0.5mmφ以下のパルスレーザー光、及び、ビーム径0.3mmφ以下、単一パルス当たりのエネルギー密度が0.02~1.0J/mm<sup>2</sup>のパルスレーザーが開示されている。

国際公開第2011/030907号には、鉄損及び皮相電力が小さく、ラミネーションファクタが高い軟磁性アモルファス合金薄帯として、急凝固法により製造した軟磁性アモルファス合金薄帯であって、その表面にレーザー光により形成された凹部の幅方向の列を長手方向所定間隔で有し、各凹部の周囲にはドーナツ状突状部が形成されており、前記ドーナツ状突状部はレーザー光の照射により溶解した合金の飛散物が実質的にない滑らかな表面を有するとともに、2μm以下の高さ $t_2$ を有し、かつ前記凹部の深さ $t_1$ と前記薄帯の厚さ $T$ との比 $t_1/T$ が0.025~0.18の範囲内にあり、もって低鉄損及び低皮相電力を有する軟磁性アモルファス合金薄帯が開示されてい

る。

国際公開第2012/102379号には、鉄損が低減された急冷Fe基軟磁性合金薄帯として、自由面に波状凹凸が形成されており、波状凹凸は長手方向にほぼ一定間隔で並ぶ幅方向谷部を有し、前記谷部の平均振幅Dが20mm以下である急冷Fe基軟磁性合金薄帯が開示されている。国際公開第2012/102379号の段落0022には、「本発明の急冷Fe基軟磁性合金薄帯は、自由面に波状凹凸が形成されており、前記波状凹凸は長手方向にほぼ一定間隔で並ぶ幅方向谷部を有し、前記谷部の平均振幅Dが20mm以下であるので、渦電流損失が低減しているだけでなく、ヒステリシス損失も抑制されており、もって著しく低鉄損である。・・・」と記載されている。

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0004] 従来、Fe基アモルファス合金薄帯の鉄損及び励磁電力を測定する場合、磁束密度1.3Tの条件で測定することが一般的であった（例えば、特開昭61-29103号公報、国際公開第2011/030907号及び国際公開第2012/102379号の各々における実施例参照）。

しかし、近年では、Fe基アモルファス合金薄帯を用いて作製される変圧器の小型化等の観点から、磁束密度1.3Tの条件における鉄損及び励磁電力ではなく、磁束密度1.45Tの条件における鉄損及び励磁電力を低減させることが求められる場合がある。

この点に関し、本発明者等の検討により、ある種のFe基アモルファス合金薄帯では、磁束密度1.3Tの条件で測定した場合には励磁電力はさほど高くはないが、磁束密度1.45Tの条件で測定した場合には励磁電力が著しく上昇することが判明した（図2参照）。

[0005] また、変圧器の鉄心材料としては、励磁電力が小さいものが求められる。

[0006] 本開示の一態様は、磁束密度1.45Tの条件における鉄損が低減され、かつ、磁束密度1.45Tの条件における励磁電力の上昇が抑制されるFe

基アモルファス合金薄帯及びその製造方法を提供することを課題とする。

本開示の他の一態様は、上記一態様に係る Fe 基アモルファス合金薄帯を用い、優れた性能を備えた鉄心及び変圧器を提供することを課題とする。

### 課題を解決するための手段

[0007] 上記課題を解決するための具体的手段には、以下の態様が含まれる。

<1> 自由凝固面及びロール面を有する Fe 基アモルファス合金薄帯であって、

自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、

前記 Fe 基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数の前記レーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、前記鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、前記ライン間隔が、10 mm～60 mmであり、

前記複数のレーザー照射痕列の各々における前記複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、前記スポット間隔が、0.10 mm～0.50 mmであり、

前記ライン間隔を  $d_1$  (mm) とし、前記スポット間隔を  $d_2$  (mm) とし、前記レーザー照射痕の数密度  $D$  を  $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$  としたとき、前記レーザー照射痕の数密度  $D$  が、0.05 個/mm<sup>2</sup>～0.50 個/mm<sup>2</sup>である Fe 基アモルファス合金薄帯。

[0008] <2> Fe 基アモルファス合金薄帯の幅方向の長さ全体に占める、前記レーザー照射痕列の幅方向の長さの割合が、幅方向の中心から幅方向両端に向かう方向にそれぞれ10%～50%の範囲内である<1>に記載の Fe 基アモルファス合金薄帯。

<3> 前記レーザー照射痕列は、Fe 基アモルファス合金薄帯の幅方向を8等分した8個の領域から両端の2個の領域を除く、前記幅方向の中央の6個の領域内に少なくとも形成されている、<1>又は<2>に記載の Fe 基アモルファス合金薄帯。

<4> 前記自由凝固面における最大断面高さ  $R_t$  が、 $3.0\ \mu\text{m}$ 以下である<1>~<3>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<5> Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が78原子%以上であり、Bの含有量が11原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%~22原子%である<1>~<4>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

[0009] <6> 厚さが $20\ \mu\text{m}$ ~ $35\ \mu\text{m}$ である<1>~<5>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<7> 周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が、 $0.160\text{W}/\text{kg}$ 以下であり、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における励磁電力が、 $0.200\text{VA}/\text{kg}$ 以下である<1>~<6>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<8> Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が80原子%以上であり、Bの含有量が12原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%~22原子%である<7>に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<9> 周波数60Hz及び磁場 $7.9557\text{A}/\text{m}$ の条件における磁束密度 $B_0.1$ が、1.52T以上である<1>~<8>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<10> 比率〔動作磁束密度 $B_m$ /飽和磁束密度 $B_s$ 〕が0.88~0.94であることを満足する動作磁束密度 $B_m$ にて用いられる<1>~<9>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

[0010] <11> Fe基アモルファス合金からなり、自由凝固面及びロール面を有する素材薄帯を準備する工程と、

前記素材薄帯の前記自由凝固面及び前記ロール面の少なくとも一方面に対し、レーザー加工により、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数形成することにより、複数のレーザー照射痕列を有するFe基

アモルファス合金薄帯を得る工程と、

を有し、

前記F e基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数の前記レーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、前記鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、前記ライン間隔が、10mm～60mmであり、

前記複数のレーザー照射痕列の各々における前記複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、前記スポット間隔が、0.10mm～0.50mmであり、

前記ライン間隔をd1(mm)とし、スポット間隔をd2(mm)とし、前記レーザー照射痕の数密度Dを $D = (1/d1) \times (1/d2)$ としたとき、前記レーザー照射痕の数密度Dが、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>であるF e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

[0011] <12> 前記レーザー照射痕を形成するためのレーザーの出力が0.4mJ～2.5mJである<11>に記載のF e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

<13> 前記レーザー照射痕を形成するためのレーザーのパルス幅が50ns以上である<11>又は<12>に記載のF e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

[0012] <14> 上記の<1>～<10>のいずれか1つに記載のF e基アモルファス合金薄帯が積層され、積層されたF e基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされており、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が0.250W/kg以下である、鉄心。

<15> 上記の<1>～<10>のいずれか1つに記載のF e基アモルファス合金薄帯を用いた鉄心と、前記鉄心に巻き回されたコイルと、を備え、

前記鉄心は、積層されたF e基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされており、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件におけ

る鉄損が $0.250\text{W/kg}$ 以下である、変圧器。

[0013] <16> 自由凝固面及びロール面を有するFe基アモルファス合金薄帯であって、

自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、単位面積あたりのレーザー照射痕の数密度が、 $0.05\text{個/mm}^2\sim 0.50\text{個/mm}^2$ である、Fe基アモルファス合金薄帯。

<17> 前記単位面積は、前記Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向における前記レーザー照射痕列が形成された範囲、かつ、鑄造方向1mの範囲（但し、鑄造方向で1m未満しかない場合は鑄造方向の全範囲）からなる領域から算出される、<16>に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<18> Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が78原子%以上であり、Bの含有量が11原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%~22原子%である、<16>又は<17>に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<19> 周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が、 $0.160\text{W/kg}$ 以下であり、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における励磁電力が、 $0.200\text{VA/kg}$ 以下である、<16>~<18>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<20> Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が80原子%以上であり、Bの含有量が12原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%~22原子%である、<19>に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

<21> 周波数60Hz及び磁場7.9557A/mの条件における磁束密度 $B_0$ が、1.52T以上である、<16>~<20>のいずれか1つに記載のFe基アモルファス合金薄帯。

## 発明の効果

[0014] 本開示の一態様によれば、磁束密度 1.45 T の条件における鉄損が低減され、かつ、磁束密度 1.45 T の条件における励磁電力の上昇が抑制される Fe 基アモルファス合金薄帯及びその製造方法が提供される。

本開示の他の一態様によれば、上記一態様に係る Fe 基アモルファス合金薄帯を用いることにより、優れた性能を備える鉄心及び変圧器が提供される。

。

## 図面の簡単な説明

[0015] [図1]図 1 は、4 種の Fe 基アモルファス合金薄帯について、磁束密度と鉄損との関係を示すグラフである。

[図2]図 2 は、4 種の Fe 基アモルファス合金薄帯について、磁束密度と励磁電力との関係を示すグラフである。

[図3]図 3 は、実施例 1 において、レーザー加工された Fe 基アモルファス合金薄帯片の自由凝固面を概略的に示す概略平面図である。

[図4]図 4 は、王冠状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

[図5]図 5 は、ドーナツ状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

[図6]図 6 は、フラット状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

[図7]図 7 は、幅方向に 8 等分した Fe 基アモルファス合金薄帯の、等分される前の位置を示す概略図である。

[図8]図 8 は、レーザー照射痕列を Fe 基アモルファス合金薄帯の幅方向に対して傾斜させて設けることを説明するための概略説明図である。

[図9A]図 9 A は、積層された Fe 基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされた鉄芯の一例を示す平面図である。

[図9B]図 9 B は、図 9 A の側面図である。

[図10]図 10 は、図 9 A に示す鉄芯の一例に一次巻線 (N1) と二次巻線 (N2) とを巻いて変圧するための回路を示す回路図である。

## 発明を実施するための形態

[0016] 本明細書中において、「～」を用いて表される数値範囲は、「～」の前後に記載される数値を下限値及び上限値として含む範囲を意味する。本開示において段階的に記載されている数値範囲において、一つの数値範囲で記載された上限値又は下限値は、他の段階的な記載の数値範囲の上限値又は下限値に置き換えてもよい。また、本開示に記載されている数値範囲において、その数値範囲の上限値又は下限値は、実施例に示されている値に置き換えてもよい。

本明細書において、「工程」との語は、独立した工程だけでなく、他の工程と明確に区別できない場合であっても工程の所期の目的が達成されれば、本用語に含まれる。

本明細書中において、「自由凝固面」と「自由面」とは同義である。

本明細書中において、Fe基アモルファス合金薄帯とは、Fe基アモルファス合金からなる薄帯を指す。

本明細書中において、Fe基アモルファス合金とは、Fe（鉄）を主成分とするアモルファス合金を指す。ここで、主成分とは、含有比率（質量％）が最も高い成分を指す。

[0017] [Fe基アモルファス合金薄帯]

本開示のFe基アモルファス合金薄帯は、自由凝固面及びロール面を有するFe基アモルファス合金薄帯であって、自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、

Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、ライン間隔が10mm～60mmであり、

複数のレーザー照射痕列の各々における複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、スポット間隔が0.10mm～0.50m

mであり、

ライン間隔を  $d_1$  (mm) とし、スポット間隔を  $d_2$  (mm) とし、レーザー照射痕の数密度  $D$  を  $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$  としたとき、レーザー照射痕の数密度  $D$  が、 $0.05$  個/mm<sup>2</sup> ~  $0.50$  個/mm<sup>2</sup> である、Fe 基アモルファス合金薄帯である。

[0018] 本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯（以下、単に「薄帯」ともいう。）では、上記構成を有することにより、磁束密度  $1.45$  T の条件における鉄損が低減され、かつ、磁束密度  $1.45$  T の条件における励磁電力の上昇が抑制される。

[0019] まず、磁束密度  $1.45$  T の条件における鉄損が低減されるという効果について説明する。

本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯は、上述したとおり、自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を有している。

本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯では、このレーザー照射痕列を有することにより、磁区が細分化され、その結果、磁束密度  $1.45$  T の条件における鉄損が低減される。

このように、Fe 基アモルファス合金薄帯にレーザー照射痕列を形成すること自体は、磁束密度  $1.45$  T の条件における鉄損を低減させることに寄与する。

[0020] 次に、磁束密度  $1.45$  T の条件における励磁電力の上昇が抑制されるという効果について説明する。

詳細は後述するが、本発明者等は、Fe 基アモルファス合金薄帯にレーザー照射痕を形成することは、磁束密度  $1.45$  T の条件における励磁電力の上昇の原因となる場合があることを見出した。磁束密度  $1.45$  T の条件における励磁電力の上昇は、磁束密度  $B_0.1$  の低下を招くため、望ましくない。

この点に関し、本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯では、薄帯の casting 方

向に設けられた複数のレーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、鋳造方向に直交する方向（以下、幅方向という）の中央部における中心線間隔であるライン間隔が10mm～60mmとなっており、複数のレーザー照射痕の中心点間隔であるスポット間隔が0.10mm～0.50mmとなっており、かつ、ライン間隔を $d_1$ （mm）とし、スポット間隔を $d_2$ （mm）とし、レーザー照射痕の数密度 $D$ を $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$ としたとき、レーザー照射痕の数密度 $D$ が、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>となっている。要するに、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、レーザー照射痕のスポット間隔及びライン間隔をある程度広げ、レーザー照射痕の個数がある程度少なくなっている（即ち、レーザー照射痕の数密度がある程度小さくなっている）。

本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、レーザー照射痕のスポット間隔及びライン間隔をある程度広げ、レーザー照射痕の数密度をある程度小さくすることにより、磁束密度1.45Tの条件における励磁電力の上昇が抑制される。

なお、レーザー照射痕列が薄帯の幅方向の中央部に及んでいない場合、ライン間隔は、そのレーザー照射痕列を薄帯の幅方向において中央部に及ぶ位置に延長して測定することができる。

更に、励磁電力の上昇に伴う磁束密度 $B_0$ .1の低下も抑制される。

[0021] 以上のようにして、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、磁束密度1.45Tの条件における鉄損が低減され、かつ、磁束密度1.45Tの条件における励磁電力の上昇が抑制される。

以下、本開示のFe基アモルファス合金薄帯による上記効果について、従来技術との対比を交えて更に詳細に説明する。

[0022] 従来、鉄損及び励磁電力は、磁束密度1.3Tの条件で測定することが一般的であった。

例えば、前述した特開昭61-29103号公報の実施例には、Fe基アモルファス合金薄帯の自由凝固面にYAGレーザーを、点列の間隔を5mm

として照射することにより、磁束密度 1.3 T の条件における鉄損が低減されることが開示されている。

また、前述した国際公開第 2011/030907 号の実施例 4 には、Fe 基アモルファス合金薄帯の自由凝固面に、レーザー光を照射し、5 mm の長手方向間隔にて凹部列を形成した場合において、凹部の深さ  $t_1$  と薄帯の厚さ  $T$  との比  $t_1/T$  が 0.025 ~ 0.18 であること等の条件を満足する場合には、磁束密度 1.3 T の条件における鉄損及び皮相電力が低減されることが開示されている。国際公開第 2011/030907 号における皮相電力は、本明細書でいう励磁電力に対応する。

また、前述した国際公開第 2012/102379 号の実施例 1 には、Fe 基アモルファス合金薄帯の自由凝固面に、波状凹凸が形成されており、波状凹凸が、長手方向にほぼ一定間隔で並ぶ幅方向谷部を有し、谷部の平均振幅が 20 mm 以下となる場合には、磁束密度 1.3 T の条件における鉄損及び励磁電力が低減されることが開示されている。

[0023] しかし、近年では、Fe 基アモルファス合金薄帯を用いて作製される変圧器の小型化等の観点から、磁束密度 1.3 T の条件における鉄損及び励磁電力ではなく、磁束密度 1.45 T の条件における鉄損及び励磁電力を低減させることが求められる場合がある。

この点に関し、本発明者等の検討により、ある種の Fe 基アモルファス合金薄帯（具体的には、レーザー照射痕の数密度が高い Fe 基アモルファス合金薄帯）では、磁束密度 1.3 T の条件で測定した場合には励磁電力がある程度低減されていても、磁束密度 1.45 T の条件で測定した場合には励磁電力が大幅に上昇することが判明した。

以下、この点を、図 1 及び図 2 を参照しながら詳述する。

[0024] 図 1 は、  
レーザー加工されていない Fe 基アモルファス合金薄帯、  
スポット間隔 0.05 mm にてレーザー加工された Fe 基アモルファス合金薄帯、

スポット間隔0.10mmにてレーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯、及び、

スポット間隔0.20mmにてレーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯

の4種のFe基アモルファス合金薄帯について、磁束密度と鉄損との関係を示すグラフである。

[0025] 図1及び図2において、スポット間隔0.05mmにてレーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯は、ライン間隔を60mmとしたこと以外は後述の比較例2と同様の条件で作製したものである。

図1及び図2において、スポット間隔0.10mmにてレーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯は、ライン間隔を60mmとしたこと以外は後述の実施例1と同様の条件で作製したものである。

図1及び図2において、スポット間隔0.20mmにてレーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯は、後述の実施例3と同様の条件で作製したものである（ライン間隔は20mm）。

図1及び図2において、レーザー加工されていないFe基アモルファス合金薄帯は、後述の比較例1と同様の条件で作製したものである。

[0026] 図1に示されるように、いずれの条件のFe基アモルファス合金薄帯においても、磁束密度が上昇するにつれ、鉄損が緩やかに上昇することがわかる。

更に、Fe基アモルファス合金薄帯に対し、スポット間隔0.05mm、スポット間隔0.10mm、及びスポット間隔0.20mmの各条件のレーザー加工を施すことにより、鉄損が低減されることもわかる。

レーザー加工によって鉄損が低減される効果自体は、特開昭61-29103号公報及び国際公開第2011/030907号等の公知文献に記載されているとおりである。

[0027] 図2は、上述した4種のFe基アモルファス合金薄帯について、磁束密度と励磁電力との関係を示すグラフである。

[0028] 図2に示されるように、磁束密度1.3 Tの条件においては、4種のFe基アモルファス合金薄帯において、励磁電力にはほとんど差が無いことがわかる。即ち、磁束密度1.3 Tの条件においては、レーザー加工の有無は、励磁電力にはほとんど影響しないことがわかる。従って、磁束密度1.3 Tにて鉄損及び励磁電力を測定する前提の下では、Fe基アモルファス合金薄帯に対しレーザー加工を施すことにより、励磁電力をほとんど上昇させることなく、鉄損低減の効果を得ることができる。

しかし、図2において、スポット間隔0.05 mmのFe基アモルファス合金薄帯に注目すると、磁束密度が1.3 Tを超えると、励磁電力が急激に上昇することがわかる。その結果、磁束密度が1.45 Tの条件の下では、スポット間隔0.05 mmのFe基アモルファス合金薄帯は、他の3種のFe基アモルファス合金薄帯と比較して、励磁電力が著しく高くなることがわかる。

[0029] 以上のように、本発明者等は、スポット間隔が0.05 mmである場合等、レーザー照射痕のスポット間隔が狭過ぎる場合には、磁束密度が1.45 Tの条件での励磁電力が著しく高くなることを知見した(図2参照)。更に、本発明者等は、スポット間隔を0.10 mm又は0.20 mmのように広げることにより(即ち、レーザー照射痕の数密度を小さくすることにより)、磁束密度1.45 Tの条件下での励磁電力の上昇を抑制できることも知見した(図2参照)。

更に、本発明者等は、スポット間隔を0.10 mm又は0.20 mmのように広げても、レーザー加工による鉄損低減の効果が得られることも知見した(図1参照)。

これらの知見は、後述の実施例の表1にも示されている。

[0030] また、本発明者等は、複数のレーザー照射痕列のライン間隔を広げることによっても(具体的にはライン間隔を10 mm以上とすることによっても)、スポット間隔を広げた場合と同様に、磁束密度1.45 Tの条件下での励磁電力の上昇を抑制でき、かつ、レーザー加工による鉄損低減の効果を得る

ことができることを知見した。

この知見については、後述の実施例の表 2 に示されている。

[0031] ところで、例えば前述した国際公開第 2012/102379 号に記載されているとおり、従来から、Fe 基アモルファス合金薄帯の自由凝固面に波状凹凸を形成することにより、鉄損を低減することが行われていた。

波状凹凸は、チャターマーク等とも称されているものであり、Fe 基アモルファス合金薄帯を製造（鋳造）する際のパドルの振動に起因して発生する（例えば、国際公開第 2012/102379 号の段落 0008 参照）。波状凹凸を形成して鉄損を低減する技術においては、Fe 基アモルファス合金薄帯の製造条件を調整することにより、意図的に、自由凝固面に波状凹凸を形成する。

[0032] 波状凹凸を形成して鉄損を低減する技術に対し、例えば特開昭 61-29103 号公報及び国際公開第 2011/030907 号に記載の従来のレーザー加工の技術は、自由凝固面に波状凹凸を形成することに代えて、自由凝固面にレーザー加工を施すことにより、波状凹凸と同様の効果（鉄損等の低減の効果）を得ようとする技術である。このため、従来のレーザー加工の技術では、波状凹凸に類似した形状を形成するために、ライン間隔を狭くして（例えば、特開昭 61-29103 号公報及び国際公開第 2011/030907 号の実施例に記載のとおり、ライン間隔を 5 mm として）、即ち、レーザー照射痕の数密度を比較的高くして、レーザー照射痕を形成していた。

従来は、励磁電力を、磁束密度 1.3 T の条件で測定していたために、レーザー照射痕の数密度を高くすることのデメリット（即ち、励磁電力の上昇）は、認識されていなかった。

しかし前述したとおり、本発明者等は、レーザー照射痕の数密度を高くした場合には、磁束密度 1.45 T の条件で測定される励磁電力が上昇することを見出し、かつ、レーザー照射痕の数密度を小さくすることにより、磁束密度 1.45 T の条件で測定される励磁電力の上昇を抑制できることを見出した。

本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、この知見によってなされたものである。

従って、本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、薄帯の表面にレーザー照射痕が形成されている点では特開昭61-29103号公報及び国際公開第2011/030907号に記載の技術と共通するが、本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、レーザー照射痕の数密度を小さくすることにより、磁束密度1.45 Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制しようとする技術である点で、特開昭61-29103号公報及び国際公開第2011/030907号に記載の技術とは全く異なる。

[0033] 以下、本開示のF e基アモルファス合金薄帯及びその好ましい態様について、より詳細に説明する。

[0034] 本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、自由凝固面及びロール面を有するF e基アモルファス合金薄帯である。

自由凝固面及びロール面を有するF e基アモルファス合金薄帯は、単ロール法によって製造（鋳造）される薄帯である。鋳造時、冷却ロールに接して急冷凝固された面がロール面であり、ロール面に対して反対側の面（即ち、鋳造時、雰囲気暴露されていた面）が、自由凝固面である。

単ロール法については、国際公開第2012/102379号等の公知文献を適宜参照できる。

[0035] 本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、鋳造後、カットされていない状態の薄帯（例えば、鋳造後にロール状に巻き取られたロール体）であってもよいし、鋳造後、所望とする大きさに切り出された薄帯片であってもよい。

[0036] <レーザー照射痕、レーザー照射痕列>

本開示のF e基アモルファス合金薄帯は、自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有する。

[0037] レーザー照射痕列を構成する複数のレーザー照射痕の各々は、レーザー加工（即ち、レーザー照射）によってエネルギーが付与された痕跡でありさえ

すればよく、レーザー照射痕の形状（平面視形状及び断面形状）については特に制限はない。

複数のレーザー照射痕の各々が、レーザー照射によってエネルギーが付与された痕跡でありさえすれば、レーザー照射による鉄損低減の効果が得られる。

[0038] レーザー照射痕の平面視形状としては、王冠状、ドーナツ状、フラット状等、どのような平面視形状であってもよい。

王冠状、ドーナツ状、フラット状については、後述の実施例において説明する。

Fe基アモルファス合金薄帯におけるレーザー照射痕の耐候性（錆び防止）、Fe基アモルファス合金薄帯の占積率向上の観点からみると、レーザー照射痕の平面視形状としては、ドーナツ状又はフラット状が好ましく、フラット状がより好ましい。フラット状であると、薄帯を積層させて磁心を構成した場合、薄帯間の空間を抑制し、磁心の薄帯密度を向上させることができる。

[0039] 本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、ライン間隔が10mm～60mmである。

なお、幅方向とは、Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に直交する方向である。

また、レーザー照射痕列が薄帯の自由凝固面及びロール面の両面に形成されている場合、ライン間隔は、薄帯を透過的に見た場合の両面のレーザー照射痕列を対象に、測定される。例えば、レーザー照射痕列が、薄帯の鑄造方向で、両面に交互に、形成されている場合、「互いに隣り合うレーザー照射痕列」は、一方の面に形成されたレーザー照射痕列と、他方の面に形成され、かつ鑄造方向に隣接するレーザー照射痕列とが対象となる。

ライン間隔が10mm以上であることにより、ライン間隔が10mm未満である場合と比較して、磁束密度1.45Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制できる。

ライン間隔が60mm以下であることにより、ライン間隔が60mm超である場合と比較して、磁束密度1.45Tの条件で測定される鉄損を低減させる効果に優れる。

ライン間隔は、好ましくは10mm～50mmであり、より好ましくは10mm～40mmであり、さらに好ましくは10mm～30mmである。

[0040] 複数のレーザー照射痕列の方向は、略平行であることが好ましいが、略平行であることに限定されない。少なくとも薄帯の幅方向の中央部におけるライン間隔が10mm～60mmであれば、複数のレーザー照射痕列の方向は、平行であってもよいし平行でなくてもよい。

[0041] Fe基アモルファス合金薄帯の「幅方向の中央部」とは、幅方向の中心から幅方向両端に向かってある程度の幅をもった部分とすることができる。例えば、幅方向の中心から幅方向両端に向かって、前記「ある程度の幅」が幅全体の1/4となる領域の範囲を中央部とすることができる。中でも、前記「ある程度の幅」が幅全体の1/2となる領域の範囲を中央部とすることがより好ましい。

つまり、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向の中央部において、ライン間隔が10mm～60mmの範囲となっていれば、必ずしも複数のレーザー照射痕列が平行に設けられていなくてもよい。

[0042] 本開示の一実施形態として、Fe基アモルファス合金薄帯は、複数のレーザー照射痕列の各々の方向が、Fe基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に直交する幅方向に対して、互いに平行でない配置関係を有していてもよい。

つまり、複数のレーザー照射痕列の各々の方向とFe基アモルファス合金薄帯の幅方向とのなす角度を10°以上として鑄造方向に対して鋭角又は鈍角の傾斜角をもって交差していてもよい。

[0043] 本開示の他の一実施形態として、Fe基アモルファス合金薄帯は、複数の

レーザー照射痕列の各々の方向が、F e 基アモルファス合金薄帯の鋳造方向及び厚さ方向に直交する方向に対して、略平行であることが好ましい。

複数のレーザー照射痕列の各々の方向がF e 基アモルファス合金薄帯の鋳造方向及び厚さ方向に直交する方向に対して略平行であるとは、複数のレーザー照射痕列の各々の方向と、F e 基アモルファス合金薄帯の鋳造方向及び厚さ方向に直交する方向と、のなす角度が $10^{\circ}$ 以下であることを意味する。

但し、複数のレーザー照射痕列が略平行であることに限定されない。

[0044] また、本開示のF e 基アモルファス合金薄帯において、一実施形態として、複数のレーザー照射痕列の各々の方向は、F e 基アモルファス合金薄帯の幅方向に対して、略平行であることが好ましい。

複数のレーザー照射痕列の各々の方向がF e 基アモルファス合金薄帯の幅方向に対して略平行であるとは、複数のレーザー照射痕列の各々の方向とF e 基アモルファス合金薄帯の幅方向とのなす角度が $10^{\circ}$ 以下であることを意味する。

但し、複数のレーザー照射痕列が略平行であることに限定されない。

[0045] 本開示のF e 基アモルファス合金薄帯は、レーザー照射痕が薄帯の幅方向に一定の間隔で設けられたレーザー照射痕列を、薄帯の幅方向に1つ有する態様でもよいし、薄帯の幅方向に2つ以上有する態様でもよい。

[0046] 具体的には、本開示のF e 基アモルファス合金薄帯は、F e 基アモルファス合金薄帯の鋳造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を、鋳造方向に直交する幅方向において、(1)前記「幅方向の中央部」に1列有する態様(以下、単一系列群という。)でもよいし、(2)前記「幅方向の中央部」に複数列有する態様(以下、複数列群という。)でもよい。

以下、F e 基アモルファス合金薄帯の鋳造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を「照射痕列の群」ともいう。

後者の複数列群では、照射痕列の群が薄帯の幅方向に複数存在し、複数の群間において、レーザー照射痕列の各々の位置が幅方向の同一線上にある必

要はなく、レーザー照射痕列の各々が鑄造方向にずれた位置関係となってもよい。例えば、薄帯の幅方向に照射痕列の群が2つ存在する場合、2つの群は薄帯の幅方向中央部の照射痕列非形成領域により隔てられ、一方の群中に並ぶ複数のレーザー照射痕列と他方の群中に並ぶ複数のレーザー照射痕列とが、鑄造方向に一定の距離ずらして互いに交互に存在する位置関係となってもよい。

[0047] 本開示におけるライン間隔は、以下のようにして求められる値である。

上記(1)のように、鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を、前記「幅方向の中央部」に一列有する単一系列群として有する場合、ライン間隔は、単一系列群中において鑄造方向に互いに隣り合う2つのレーザー照射痕列間の間隔を任意に5箇所選択して測定し、測定値の平均値とすることができる。この場合、単一系列群を構成する複数のレーザー照射痕列は、一定の間隔において存在することが好ましいが、任意の間隔で存在してもよい。

また、上記(2)のように、鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を、前記「幅方向の中央部」に複数列からなる複数列群として有する場合、ライン間隔は、複数列群中の各「照射痕列の群」ごとに上記方法と同様にして求めた値(平均値)を更に平均した値とすることができる。この場合、各「照射痕列の群」を構成する複数のレーザー照射痕列は、一定の間隔において存在することが好ましいが、任意の間隔で存在してもよい。

[0048] 本開示のFe基アモルファス合金薄帯において、複数のレーザー照射痕列の各々における複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合、スポット間隔が0.10mm~0.50mmである。したがって、スポット間隔を0.1mm未満として連続的に形成されたスポットは含まれない。

スポット間隔が0.10mm以上であることにより、スポット間隔が0.10mm未満である場合と比較して、磁束密度1.45Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制できる(前述の図2参照)。

スポット間隔が0.50mm以下であることにより、スポット間隔が0.

50 mm超である場合と比較して、磁束密度1.45 Tの条件で測定される鉄損を低減させる効果に優れる。

スポット間隔は、好ましくは0.15 mm～0.40 mmであり、より好ましくは0.20 mm～0.40 mmである。

[0049] 前述のとおり、本開示のFe基アモルファス合金薄帯は、レーザー照射痕列を構成するレーザー照射痕の数密度を従来より小さくすることにより、磁束密度1.45 Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制しようとするものである。

[0050] また、本開示のFe基アモルファス合金薄帯において、ライン間隔をd1 (mm)とし、スポット間隔をd2 (mm)としたとき、レーザー照射痕の数密度Dを下記式で算出される値とする。

$$D = (1 / d 1) \times (1 / d 2)$$

数密度Dは、ライン間隔及びスポット間隔から算出される値であり、形成されているレーザー照射痕の密度を表している。即ち、あるライン間隔とスポット間隔を有する単位面積 (mm<sup>2</sup>) 中において、d1 × d2 × D = 1を満たす数密度 (D) が0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>である。この場合、単位面積は、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向におけるレーザー照射痕列が形成された範囲、かつ、鑄造方向1 mの範囲 (但し、鑄造方向で1 m未満しかない場合は鑄造方向の全範囲) からなる領域から算出される。

レーザー照射痕の数密度Dを適正な値 (従来より小さい値) とすることにより、磁束密度1.45 Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制することができる。

[0051] レーザー照射痕列を構成するレーザー照射痕の数密度Dとしては、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>とする。

レーザー照射痕列を構成するレーザー照射痕の数密度Dが0.05個/mm<sup>2</sup>以上である場合には、磁束密度1.45 Tの条件で測定される鉄損を低減する効果により優れる。

レーザー照射痕列を構成するレーザー照射痕の数密度Dが0.50個/m

$m^2$ 以下である場合には、磁束密度 1.45 T の条件で測定される励磁電力の上昇を抑制する効果がより効果的に奏される。

レーザー照射痕列を構成するレーザー照射痕の数密度  $D$  としては、より好ましくは  $0.10$  個/ $mm^2 \sim 0.50$  個/ $mm^2$  である。

[0052] 本開示におけるレーザー照射痕列が複数存在する場合、数密度  $D$  は、場合に応じて以下のようにして求めることができる。

上記 (1) のように、鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を、前記「幅方向の中央部」に一列有する単一系列群として有する場合、数密度  $D$  は、単一系列群を構成する複数のレーザー照射痕列から「互いに隣り合うレーザー照射痕列」を任意に 5 箇所選択し、それぞれのライン間隔及びスポット間隔を測定してそれぞれ測定値の平均値を求め、ライン間隔の平均値及びスポット間隔の平均値から上記式より数密度  $D$  を求める。求めた数密度  $D$  が  $0.05$  個/ $mm^2 \sim 0.50$  個/ $mm^2$  の範囲にあることで、本発明の効果が奏される。

また、上記 (2) のように、鑄造方向に設けられた複数のレーザー照射痕列を、前記「幅方向の中央部」に複数列からなる複数列群として有する場合、数密度  $D$  は、複数列群中の各「照射痕列の群」ごとに上記と同様の方法にて求める。そして、求めた数密度  $D$  のうち、複数列群中の少なくとも 1 つの「照射痕列の群」における数密度  $D$  が  $0.05$  個/ $mm^2 \sim 0.50$  個/ $mm^2$  の範囲にあることで効果が奏され、本発明の効果がより奏される点で、求めた数密度  $D$  の平均値が  $0.05$  個/ $mm^2 \sim 0.50$  個/ $mm^2$  の範囲にあることが好ましく、複数列群中の全ての「照射痕列の群」における数密度  $D$  が  $0.05$  個/ $mm^2 \sim 0.50$  個/ $mm^2$  の範囲にあることがより好ましい。

[0053] ここで、「鑄造方向」とは、Fe 基アモルファス合金薄帯を鑄造する際の冷却ロールの周方向に対応する方向であり、言い換えれば、鑄造後、カットされる前の Fe 基アモルファス合金薄帯の長手方向に対応する方向である。

なお、切り出された薄帯片においても、薄帯片の自由凝固面及び／又はロール面を観察することにより、「鑄造方向」がどの方向であるかを確認でき

る。例えば、薄帯片の自由凝固面及び／又はロール面には、鑄造方向に沿った薄いスジが観測される。また、鑄造方向に直交する方向が幅方向である。

[0054] また、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向の長さ全体に占める、レーザー照射痕列の幅方向の長さの割合が、幅方向の中心から幅方向両端に向かう方向にそれぞれ10%~50%であることが好ましい。なお、ここでの「%」は、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向の長さ全体を100%としている。

なお、レーザー照射痕列の方向が幅方向に対して傾きを持つ場合は、傾きを持ったレーザー照射痕列自体の長さではなく、レーザー照射痕列が形成されている部分において薄帯の幅方向における長さに換算した値をレーザー照射痕列の長さとする。

[0055] 上記長さの割合が50%であるとは、レーザー照射痕列が、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向の中央を起点とし、幅方向に一端及び他端にまで到達していることを意味する。この「中央を起点とし、幅方向に一端及び他端まで達している」とは、一端及び他端それぞれにおいて、レーザー照射痕列の端のレーザー照射痕とFe基アモルファス合金薄帯の端部との間隔が、レーザー照射痕列のスポット間隔以下であることを意味する。

例えば、レーザー照射痕列の方向とFe基アモルファス合金薄帯の幅方向とが平行である場合、Fe基アモルファス合金薄帯のレーザー照射痕列の方向の長さ全体は、Fe基アモルファス合金薄帯の全幅に対応する。

また、上記長さの割合が10%とは、幅方向の中心から幅方向両端に向かってそれぞれ10%ずつの長さを有していること、即ち、幅全体中の中心領域として幅長の20%の長さのレーザー照射痕列を有していることをいう。換言すると、レーザー照射痕列が、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向の両端に、幅方向の全体の長さに対して40%ずつの余白を残して形成されていることを意味する。

Fe基アモルファス合金薄帯のレーザー照射痕列の、幅方向の長さ全体に占めるレーザー照射痕列の幅方向の長さの割合が、幅方向の中心から幅方向

両端に向かう方向にそれぞれ25%以上であることがより好ましい。

[0056] 更には、レーザー照射痕列は、Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向を8等分した8個の領域から両端の2個の領域を除く、前記幅方向中央の6個の領域内に少なくとも形成されていることが好ましい。

[0057] <自由凝固面の粗さ（最大断面高さ $R_t$ ）>

ところで、例えば前述の国際公開第2012/102379号に記載のとおり、従来、自由凝固面に波状凹凸を設けることにより、鉄損を低減させることが行われていた。

しかし、本発明者等の検討によると、波状凹凸は、磁束密度1.45Tの条件で測定される励磁電力の上昇を招く場合があることがわかった。

従って、磁束密度1.45Tの条件で測定される励磁電力の上昇を抑制する観点からみて、波状凹凸は、極力低減されていることが好ましい。

具体的には、自由凝固面における複数のレーザー照射痕列以外の部分における最大断面高さ $R_t$ は、 $3.0\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

最大断面高さ $R_t$ が $3.0\mu\text{m}$ 以下であることは、自由凝固面に波状凹凸が無い、又は、波状凹凸が低減されていることを意味する。

[0058] 本明細書中において、自由凝固面における複数のレーザー照射痕列以外の部分における最大断面高さ $R_t$ は、自由凝固面における複数のレーザー照射痕列以外の部分について、JIS B 0601:2001に準拠し、評価長さを4.0mmとし、カットオフ値を0.8mmとし、カットオフ種別を2RC（位相補償）として測定（評価）する。ここで、評価長さの方向は、Fe基アモルファス合金薄帯の鋳造方向とする。また、評価長さを4.0mmとする上記測定は、詳細には、カットオフ値0.8mmにて連続して5回測定することにより行う。

[0059] 自由凝固面における複数のレーザー照射痕列以外の部分における最大断面高さ $R_t$ は、より好ましくは $2.5\mu\text{m}$ 以下である。

また、最大断面高さ $R_t$ の下限には特に制限はないが、Fe基アモルファス合金薄帯の製造適性の観点から、最大断面高さ $R_t$ の下限は、好ましくは

0.8  $\mu\text{m}$ であり、より好ましくは1.0  $\mu\text{m}$ である。

[0060] <化学組成>

本開示のFe基アモルファス合金薄帯の化学組成には特に制限はなく、Fe基アモルファス合金の化学組成（即ち、Fe（鉄）を主成分とする化学組成）であればよい。

但し、本開示のFe基アモルファス合金薄帯による効果をより効果的に得る観点から、本開示のFe基アモルファス合金薄帯の化学組成は、以下の化学組成Aであることが好ましい。

好ましい化学組成である化学組成Aは、Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が78原子%以上であり、Bの含有量が11原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である化学組成である。

以下、化学組成Aについて、より詳細に説明する。

[0061] 化学組成Aにおいて、Feの含有量は78原子%以上である。

Fe（鉄）は、アモルファス構造であっても最も磁気モーメントが大きい遷移金属の一つであり、Fe-Si-B系のアモルファス合金では磁性の担い手となる。

Feの含有量は78原子%以上である場合には、Fe基アモルファス合金薄帯の飽和磁束密度（Bs）を高くすることができる（例えば、1.6 T程度のBsを実現できる）。更に、後述する好ましい磁束密度B0.1（1.52 T以上）を達成し易くなる。

Feの含有量は、好ましくは80原子%以上であり、さらに好ましくは80.5原子%以上であり、更に好ましくは81.0原子%以上である。また、好ましくは82.5原子%以下であり、更に好ましくは82.0原子%以下である。

[0062] 化学組成Aにおいて、Bの含有量は、11原子%以上である。

B（ホウ素）は、アモルファス形成に寄与する元素である。Bの含有量が11原子%以上である場合には、アモルファス形成能がより向上する。

また、Bの含有量が11原子%以上である場合には、鑄造方向に磁区が配向しやすく、磁区幅が広くなることにより磁束密度 ( $B_{0.1}$ ) が向上しやすい。

Bの含有量は、好ましくは12原子%以上であり、さらに好ましくは13原子%以上である。

Bの含有量の上限は、後述するB及びSiの合計含有量にもよるが、好ましくは16原子%である。

[0063] 化学組成Aにおいて、B及びSiの合計含有量は、17原子%～22原子%である。

Si (ケイ素) は、溶湯状態で表面に偏析し、溶湯の酸化を防ぐ効果を有する元素である。さらに、Siは、アモルファス形成の助剤として作用し、ガラス転移温度を上昇させる効果があり、より熱的に安定なアモルファス相を形成させる元素でもある。

B及びSiの合計含有量が17原子%以上である場合には、上述したSiの効果が効果的に発揮される。

また、B及びSiの合計含有量が22原子%以下である場合には、磁性の担い手であるFeの量を多く確保できるので、飽和磁束密度  $B_s$  の向上及び磁束密度  $B_{0.1}$  の向上の点で有利である。

[0064] Siの含有量は、好ましくは2.0原子%以上であり、より好ましくは2.4原子%以上であり、更に好ましくは3.5原子%以上である。

Siの含有量の上限は、B及びSiの合計含有量にもよるが、好ましくは6.0原子%である。

[0065] 上記化学組成Aの中でも、後述する鉄損及び励磁電力をより向上させる観点からは、Fe基アモルファス合金薄帯のより好ましい化学組成は、Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が80原子%以上であり、Bの含有量が12原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である。

[0066] 化学組成Aは、不純物を含有する。

この場合、化学組成Aに含有される不純物は、1種のみであっても2種以上であってもよい。

不純物としては、Fe、Si、及びB以外のあらゆる元素が挙げられるが、具体的には、例えば、C、Ni、Co、Mn、O、S、P、Al、Ge、Ga、Be、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Cr、Mo、希土類元素などが挙げられる。

これらの元素は、Fe、Si、及びBの総質量に対し、総量で1.5質量%の範囲で含有することができる。これらの元素の総含有量の上限は、好ましくは1.0質量%以下であり、更に好ましくは0.8質量%以下であり、更に好ましくは0.75質量%以下である。なお、この範囲で、これらの元素は添加されていてもかまわない。

[0067] <厚さ>

本開示のFe基アモルファス合金薄帯の厚さには特に制限はないが、厚さは、好ましくは20 $\mu$ m～35 $\mu$ mである。

厚さが20 $\mu$ m以上であることは、Fe基アモルファス合金薄帯のうねり抑制、ひいては占積率向上の点で有利である。

厚さが35 $\mu$ m以下であることは、Fe基アモルファス合金薄帯の脆化抑制、磁氣的飽和性の点で有利である。

Fe基アモルファス合金薄帯の厚さは、より好ましくは20 $\mu$ m～30 $\mu$ mである。

[0068] <鉄損>

前述したとおり、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、レーザー加工（レーザー照射痕の形成）による磁区の細分化により、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が低減される。

周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損は、好ましくは0.160W/kg以下であり、より好ましくは0.150W/kg以下であり、更に好ましくは0.140W/kg以下であり、更に好ましくは0

、 $130\text{W}/\text{kg}$ 以下である。

周波数 $60\text{Hz}$ 及び磁束密度 $1.45\text{T}$ の条件における鉄損の下限には特に制限はないが、Fe基アモルファス合金薄帯の製造適性の観点から、鉄損の下限は、好ましくは $0.050\text{W}/\text{kg}$ である。

[0069] Fe基アモルファス合金薄帯における鉄損の測定は、JIS 7152 (1996年版)に従い測定される。

[0070] <励磁電力>

前述したとおり、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、磁束密度 $1.45\text{T}$ の条件における励磁電力の上昇が抑制される。

周波数 $60\text{Hz}$ 及び磁束密度 $1.45\text{T}$ の条件における励磁電力は、好ましくは $0.200\text{VA}/\text{kg}$ 以下であり、より好ましくは $0.170\text{VA}/\text{kg}$ 以下であり、更に好ましくは $0.165\text{VA}/\text{kg}$ 以下である。

周波数 $60\text{Hz}$ 及び磁束密度 $1.45\text{T}$ の条件における励磁電力の下限には特に制限はないが、Fe基アモルファス合金薄帯の製造適性の観点から、励磁電力の下限は、好ましくは $0.100\text{VA}/\text{kg}$ である。

[0071] <磁束密度 $B_{0.1}$ >

前述したとおり、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、磁束密度 $1.45\text{T}$ の条件における励磁電力の上昇が抑制されるので、励磁電力の上昇に伴う磁束密度 $B_{0.1}$ の低下が抑制され、その結果、磁束密度 $B_{0.1}$ を高く維持できる。

本開示のFe基アモルファス合金薄帯において、周波数 $60\text{Hz}$ 及び磁場 $7.9557\text{A}/\text{m}$ の条件における磁束密度 $B_{0.1}$ は、好ましくは $1.52\text{T}$ 以上である。

周波数 $60\text{Hz}$ 及び磁場 $7.9557\text{A}/\text{m}$ の条件における磁束密度 $B_{0.1}$ の上限は特に制限はないが、上限は、好ましくは $1.62\text{T}$ である。

[0072] <比率〔動作磁束密度 $B_m$ /飽和磁束密度 $B_s$ 〕>

前述したとおり、本開示のFe基アモルファス合金薄帯では、従来の条件である磁束密度 $1.3\text{T}$ よりも高い磁束密度である、磁束密度 $1.45\text{T}$ の

条件における鉄損及び励磁電力を低く抑えることができる。

このため、比率〔動作磁束密度  $B_m$  / 飽和磁束密度  $B_s$ 〕（以下、「 $B_m$  /  $B_s$  比」ともいう）が従来よりも高い条件の動作磁束密度  $B_m$  にて用いた場合においても、鉄損及び励磁電力を抑制できる。

[0073] この点に関し、従来の一例に係る Fe 基アモルファス合金薄帯は、飽和磁束密度  $B_s$  が 1.56 T であり、かつ、動作磁束密度  $B_m$  が 1.35 T の条件（即ち、 $B_m / B_s$  比 = 0.87）で用いられていた（例えば、IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS Vol44, No11, Nov.2008, pp.4104-4106（特に、p.4106）参照）。

これに対し、本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯において、例えば、後述の実施例の化学組成（ $Fe_{82}Si_4B_{14}$ ）を有する Fe 基アモルファス合金薄帯の  $B_s$  は、1.63 T である。 $B_s$  は、化学組成によってほぼ一義的に定まる。この場合の本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯は、1.43 T 以上（好ましくは 1.45 T ~ 1.50 T）の  $B_m$  にて用いることが可能である。 $B_m$  が 1.43 T である場合の  $B_m / B_s$  比は、0.88 であり、 $B_m$  が 1.50 T である場合の  $B_m / B_s$  比は、0.92 である。

[0074] 以上の理由により、本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯は、 $B_m / B_s$  比が 0.88 ~ 0.94（好ましくは 0.89 ~ 0.92）であることを満足する動作磁束密度  $B_m$  にて用いられる用途に特に好適である。

本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯は、 $B_m / B_s$  比が 0.88 ~ 0.94（好ましくは 0.89 ~ 0.92）であることを満足する動作磁束密度  $B_m$  にて用いた場合においても、鉄損及び励磁電力の増大を抑制できる。

[0075] ~ Fe 基アモルファス合金薄帯の製造方法（製法 X） ~

上述した本開示の Fe 基アモルファス合金薄帯は、好ましくは以下の製法 X によって製造することができる。

製法 X は、

Fe 基アモルファス合金からなり、自由凝固面及びロール面を有する素材薄帯を準備する工程（以下、「素材準備工程」ともいう）と、

素材薄帯の自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に対し、レーザー加工により、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数形成することにより、複数のレーザー照射痕列を有するFe基アモルファス合金薄帯を得る工程（以下、「レーザー加工工程」ともいう）と、  
を有し、

前記Fe基アモルファス合金薄帯の鋳造方向に設けられた複数の前記レーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、前記鋳造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、前記ライン間隔が、10mm～60mmであり、

複数のレーザー照射痕列の各々における複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、スポット間隔が0.10mm～0.50mmであり、

ライン間隔を $d_1$  (mm)とし、スポット間隔を $d_2$  (mm)とし、レーザー照射痕の数密度 $D$ を $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$ としたとき、レーザー照射痕の数密度 $D$ が、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>である。

製法Xは、必要に応じ、素材準備工程及びレーザー加工工程以外のその他の工程を有していてもよい。

#### [0076] ー素材準備工程ー

製法Xにおける素材準備工程は、自由凝固面及びロール面を有する素材薄帯を準備する工程である。

ここでいう素材薄帯は、鋳造後、カットされていない状態の薄帯（例えば、鋳造後にロール状に巻き取られたロール体）であってもよいし、鋳造後、所望とする大きさに切り出された薄帯片であってもよい。

素材薄帯は、いわば、レーザー照射痕が形成される前の段階の、本開示のFe基アモルファス合金薄帯である。

素材薄帯における自由凝固面及びロール面は、それぞれ、本開示のFe基アモルファス合金薄帯における自由凝固面及びロール面と同義である。

素材薄帯の好ましい態様（例えば好ましい化学組成、好ましいRt）は、

レーザー照射痕の有無を除けば、本開示のFe基アモルファス合金薄帯の好ましい態様と同様である。

[0077] 素材準備工程は、予め鋳造された（即ち、既に完成した）素材薄帯を、レーザー加工工程に供するために単に準備するだけの工程であってもよいし、素材薄帯を新たに鋳造する工程であってもよい。

また、素材準備工程は、素材薄帯の鋳造、及び、素材薄帯からの薄帯片の切り出しの少なくとも一方を行う工程であってもよい。

[0078] –レーザー加工工程–

製法Xにおけるレーザー加工工程では、素材薄帯の自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に対し、レーザー加工により（即ち、レーザーを照射することにより）、複数のレーザー照射痕（詳細には、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列）を形成する。

レーザー照射工程によって形成されるレーザー照射痕及びレーザー照射痕列の好ましい態様（好ましい、ライン間隔、スポット間隔、レーザー照射痕の数密度等）は、前述した本開示のFe基アモルファス合金薄帯におけるレーザー照射痕及びレーザー照射痕列の好ましい態様と同様である。

[0079] 前述のとおり、複数のレーザー照射痕の各々は、レーザー照射によってエネルギーが付与された痕跡でありさえすれば、レーザー照射による鉄損低減の効果が得られる。

従って、レーザー加工工程におけるレーザーの条件には特に制限はないが、好ましい条件は以下のとおりである。

[0080] レーザ光の照射エネルギーをFe基アモルファス合金薄帯の厚みに対して制御することにより、凹部の直径や凹部の深さを制御することができる。

[0081] レーザー加工工程において、各レーザー照射痕を形成するためのレーザーの出力（以下、「レーザー出力」ともいう）として、好ましくは0.4 mJ～2.5 mJであり、より好ましくは0.6 mJ～2.5 mJであり、更に好ましくは0.8 mJ～2.5 mJであり、更に好ましくは1.0 mJ～2.0 mJであり、更に好ましくは1.3 mJ～1.8 mJである。

レーザービームの直径（以下、「スポット径」ともいう）は、 $50\ \mu\text{m}$ ～ $200\ \mu\text{m}$ が好ましい。

レーザー出力をスポット面積によって除した値を、レーザーのエネルギー密度と定義した場合、エネルギー密度としては、好ましくは $0.01\ \text{J}/\text{mm}^2$ ～ $1.50\ \text{J}/\text{mm}^2$ であり、より好ましくは $0.02\ \text{J}/\text{mm}^2$ ～ $1.30\ \text{J}/\text{mm}^2$ であり、更に好ましくは $0.03\ \text{J}/\text{mm}^2$ ～ $1.02\ \text{J}/\text{mm}^2$ である。

[0082] レーザーのパルス幅は、 $50\ \text{ns}$ 以上が好ましく、より好ましくは $100\ \text{ns}$ 以上である。パルス幅を上記範囲にすることにより、レーザー照射痕を形成した薄帯片の鉄損等の磁気特性を効率的に改善できる。

パルス幅とは、レーザー照射されている時間のことをいい、パルス幅が小さいことは照射時間が短いことを指す。即ち、照射レーザー光の全エネルギーは、単位時間当たりのエネルギーとパルス幅の積で表される。

[0083] レーザ処理では、凹部の形成にあたり、パルスレーザー光を薄帯幅方向に走査して照射する。

レーザー光源としては、YAGレーザー、 $\text{CO}_2$ ガスレーザー、ファイバーレーザーなどを利用することができる。中でも、高出力で高周波のパルスレーザー光を長時間に亘り安定的に照射することができる点で、ファイバーレーザーが好ましい。ファイバーレーザーでは、ファイバーに導入されたレーザー光が、ファイバー両端の回折格子によりFBG (Fiber Bragg grating) の原理で発振する。レーザー光は、細長いファイバー中で励起されるので、結晶内部に生じる温度勾配によりビーム品質が低下する熱レンズ効果の問題がない。更に、ファイバーコアは、数ミクロンと細いので、レーザー光は高出力でもシングルモードで伝播するだけでなく、ビーム径が絞られ、高エネルギー密度のレーザー光が得られる。そのうえ、焦点深度が長いので、 $200\ \text{mm}$ 以上と幅広の薄帯にも精度良く凹部列を形成できる。ファイバーレーザーのパルス幅は、通常マイクロ秒～ピコ秒程度である。

[0084] レーザ光の波長は、レーザー光源により、約 $250\ \text{nm}$ ～ $1100\ \text{nm}$ であ

るが、 $900\sim 1100\text{ nm}$ の波長が、合金薄帯において十分吸収されるため好適である。

レーザー光のビーム径としては、 $10\ \mu\text{m}$ 以上が好ましく、 $30\ \mu\text{m}$ 以上がより好ましく、 $50\ \mu\text{m}$ 以上がより好ましい。また、ビーム径は、 $500\ \mu\text{m}$ 以下が好ましく、 $400\ \mu\text{m}$ 以下がより好ましく、 $300\ \mu\text{m}$ 以下がより好ましい。

[0085] また、レーザー加工工程は、単ロール法による鋳造後であって巻取り前の素材薄帯に対してレーザー加工を施す工程であってもよいし、巻取り後の素材薄帯（ロール体）から巻き出された素材薄帯に対しレーザー加工を施す工程であってもよいし、巻取り後の素材薄帯（ロール体）から巻き出された素材薄帯から切り出された薄帯片に対しレーザー加工を施す工程であってもよい。

レーザー加工工程が、単ロール法による鋳造後であって巻取り前の素材薄帯に対してレーザー加工を施す工程である場合、製法Xは、例えば、冷却ロールと巻取りロールとの間に、レーザー加工装置が配置されたシステムを用いて実施する。

[0086] [鉄心]

本開示の鉄心は、既述の本開示のFe基アモルファス合金薄帯を複数重ねて積層したものであり、具体的には、Fe基アモルファス合金薄帯が積層され、積層されたFe基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされており、周波数 $60\text{ Hz}$ 及び磁束密度 $1.45\text{ T}$ の条件における鉄損は $0.250\text{ W/kg}$ 以下である。好ましくは $0.230\text{ W/kg}$ 以下であり、より好ましくは $0.200\text{ W/kg}$ 以下であり、更に好ましくは $0.180\text{ W/kg}$ 以下である。

周波数 $60\text{ Hz}$ 及び磁束密度 $1.45\text{ T}$ の条件における鉄損の下限には特に制限はないが、Fe基アモルファス合金薄帯の製造適性の観点から、鉄損の下限は、好ましくは $0.050\text{ W/kg}$ であり、より好ましくは $0.080\text{ W/kg}$ である。

本開示のF e基アモルファス合金薄帯の詳細については、既述の通りであり、その詳細な説明は省略する。

オーバーラップ巻きの方法は、公知の方法を適用することができる。

[0087] 本開示の鉄心の形状としては、円形、矩形等のいずれでもよい。

また、鉄心に巻き回されたコイルの種類等には、制限はなく、公知のものから適宜選択すればよい。

[0088] [変圧器]

本開示の変圧器は、既述の本開示のF e基アモルファス合金薄帯を用いた鉄心と、鉄心に巻き回されたコイルと、を備えており、鉄心は、積層されたF e基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされており、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が0.250W/kg以下の範囲とされている。

[0089] 本開示のF e基アモルファス合金薄帯及び鉄心の詳細については、既述の通りであり、その詳細な説明は省略する。

[0090] 本開示の変圧器において、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損は、0.250W/kg以下であり、好ましくは0.230W/kg以下であり、より好ましくは0.200W/kg以下であり、更に好ましくは0.180W/kg以下である。

周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損の下限には特に制限はないが、F e基アモルファス合金薄帯の製造適性の観点から、鉄損の下限は、好ましくは0.050W/kgであり、より好ましくは0.080W/kgである。

[0091] オーバーラップ巻きされたF e基アモルファス合金薄帯を備えた本開示の変圧器における鉄損の測定は、実施例にて後述する。

[0092] 本開示の変圧器における鉄心の形状は、円形、矩形等のいずれでもよい。また、鉄心に巻き回されたコイルの種類等には、制限はなく、公知のものから適宜選択すればよい。

## 実施例

[0093] 以下、本開示のFe基アモルファス合金薄帯及び変圧器の実施形態として実施例を示す。但し、本開示は、以下の実施例に制限されるものではない。

[0094] [実施例1]

<素材薄帯（レーザー加工される前のFe基アモルファス合金薄帯）の製造>

単ロール法により、 $Fe_{82}Si_4B_{14}$ の化学組成を有し、厚さが $25\mu m$ であり、幅が $210mm$ である素材薄帯（即ち、レーザー加工される前のFe基アモルファス合金薄帯）を製造した。

ここで、「 $Fe_{82}Si_4B_{14}$ の化学組成」とは、Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が82原子%であり、Bの含有量が14原子%であり、Bの含有量が4原子%である化学組成を意味する。

以下、素材薄帯の製造の詳細を説明する。

[0095] 素材薄帯の製造は、 $Fe_{82}Si_4B_{14}$ の化学組成を有する溶湯を $1300^{\circ}C$ の温度に保持し、次いでこの溶湯をスリットノズルから、軸回転する冷却ロールの表面に噴出した。噴出された溶湯を冷却ロールの表面で急冷凝固させ、素材薄帯を得た。

このとき、冷却ロールの表面における、溶湯のパドルが形成されるスリットノズルの直下の周辺の雰囲気は、非酸化性ガス雰囲気とした。

スリットノズルにおける、スリット長さは $210mm$ とし、スリット幅は $0.6mm$ とした。

冷却ロールの材質はCu系合金とし、冷却ロールの周速は $27m/s$ とした。

溶湯を噴出する圧力及びノズルギャップ（即ち、スリットノズル先端と冷却ロール表面とのギャップ）は、製造される素材薄帯の自由凝固面における最大断面高さ $R_t$ （詳細には、素材薄帯の鑄造方向に沿って測定された最大断面高さ $R_t$ ）が、 $3.0\mu m$ 以下となるように調整した。

[0096] <レーザー加工>

素材薄帯からサンプル片を切り出し、切り出したサンプル片に対してレーザー加工を施すことにより、レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯片を得た。

以下、詳細を説明する。

[0097] 図3は、レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯片（薄帯10）の自由凝固面を概略的に示す概略平面図である。

図3に示す薄帯10の長さL1（即ち、素材薄帯から切り出すサンプル片の長さ）は120mmとし、薄帯10の幅W1（即ち、素材薄帯から切り出すサンプル片の幅）は25mmとした。サンプル片は、サンプル片の長さ方向と素材薄帯の長さ方向とが一致し、かつ、サンプル片の幅方向と素材薄帯の幅方向とが一致する向きに切り出した。

切り出したサンプル片の自由凝固面にパルスレーザーを照射することにより、複数のレーザー照射痕14から構成されるレーザー照射痕列12を複数形成し、薄帯10を得た。

詳細には、サンプル片（レーザー加工前の薄帯10。以下同じ。）の自由凝固面に、複数のレーザー照射痕14を、サンプル片の幅方向に対して平行な方向に一列に形成することにより、レーザー照射痕列12を形成した。レーザー照射痕列12は、サンプル片の幅方向の全域にわたって形成した。即ち、レーザー照射痕列のサンプル片の幅方向についての長さが、サンプル片の全幅に対して100%となるようにした。

以上のレーザー照射痕列12を複数列形成した。複数のレーザー照射痕列12の方向は、平行となるようにした。

[0098] レーザー照射痕列12における、スポット間隔SP1（即ち、複数のレーザー照射痕14の中心点間隔）、及び、ライン間隔LP1（即ち、複数のレーザー照射痕列12の中心線間隔）は、表1に示す通りとした。

また、薄帯10におけるレーザー照射痕の数密度（個/mm<sup>2</sup>）は、表1に示す通りとした。レーザー照射痕の数密度D（個/mm<sup>2</sup>）は、下記式より算出した。

$$D = (1/d_1) \times (1/d_2)$$

式中、 $d_1$  はライン間隔（単位：mm）を表し、 $d_2$  はスポット間隔（単位：mm）を表す。

[0099] パルスレーザーの照射条件は、以下の通りとした。

ーパルスレーザーの照射条件ー

レーザー発振器としては、IPGフォトニクス社のパルスファイバーレーザー（YLP-HP-2-A30-50-100）を使用した。このレーザー発振器のレーザー媒質はYbドープのガラスファイバーであり、発振波長は1064nmである。

上記レーザー発振器のファイバー端のコリメータからの出射ビーム径は、6.2mmとした。

一方、サンプル片の自由凝固面におけるレーザーのスポット径は、60.8 $\mu$ mとなるように調整した。ビーム径の調整は、光学部品であるビームエキスパンダ（BE）と、 $f\theta$ ：f254mmの集光レンズ（焦点距離254mm）と、を用いて行った。

ビームモードM<sub>2</sub> は3.3（マルチモード）とした。

レーザーの出力は2.0mJとし、レーザーのパルス幅は、250nsとした。

BEによるビームの拡大倍率は3倍とし、Focusは0mmとした。

ここで、Focusとは、集光レンズの焦点距離（254mm）と、集光レンズから薄帯の自由凝固面までの実際の距離と、の差（絶対値）を意味する。

また、入射径Dとスポット径D<sub>0</sub>との間に、 $D_0 = 4\lambda f / \pi D$ （ここで、 $\lambda$ はレーザーの波長を表し、 $f$ は焦点距離を表す）の関係が成り立つことから、ビームの拡大倍率BEが大きくなるにつれ（即ち、入射径Dが大きくなるにつれ）、スポット径D<sub>0</sub>が小さくなる傾向となる。

[0100] 上記の照射条件において、レーザー出力（2.0mJ）を、サンプル片の自由凝固面におけるレーザーのビーム径（60.8 $\mu$ m）によって除した値

を、エネルギー密度と定義した場合、エネルギー密度を  $J/mm^2$  単位で表すと、 $0.689 J/mm^2$  となる。

このエネルギー密度 ( $0.689 J/mm^2$ ) は、表4中に示す。

[0101] <測定及び評価>

レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯(図3中の薄帯10)について、以下の測定及び評価を行った。結果を表1に示す。

[0102] (非レーザー加工領域の最大断面高さ  $R_t$ )

レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯の自由凝固面中、レーザー照射痕列12以外の部分(即ち、非レーザー加工領域)について、JIS B 0601:2001に準拠し、評価長さを4.0mmとし、カットオフ値を0.8mmとし、カットオフ種別を2RC(位相補償)として、最大断面高さ  $R_t$  を測定した。ここで、評価長さの方向は、素材薄帯の鋳造方向となるように設定した。評価長さを4.0mmとする上記測定は、詳細には、カットオフ値0.8mmにて連続して5回測定することにより行った。

評価長さを4.0mmとする上記測定を、非レーザー加工領域中の3箇所について行い、得られた3つの測定値の平均値を、本実施例における最大断面高さ  $R_t$  ( $\mu m$ ) とした。

[0103] (鉄損CLの測定)

レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯について、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件、並びに、周波数60Hz及び磁束密度1.50Tの条件の2条件にて、鉄損CLを、交流磁気測定器により正弦波励磁で測定した。

[0104] (励磁電力VAの測定)

レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯について、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件、並びに、周波数60Hz及び磁束密度1.50Tの条件の2条件にて、励磁電力VAを、交流磁気測定器により正弦波励磁で測定した。

[0105] (磁束密度  $B_{0.1}$  の測定)

レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯について、周波数60Hz及び磁場7.9557A/mの条件で、磁束密度B0.1を測定した。

[0106] [比較例1]

レーザー加工を行わなかったこと以外は実施例1と同様の操作を行った。結果を表1～表3に示す。

[0107] [実施例2～14、比較例2～4]

スポット間隔及びライン間隔の組み合わせを、表1及び表2に示すように変更したこと以外は実施例1と同様の操作を行った。

なお、これらの例において、最大断面高さRtも異なる値となっているが、この最大断面高さRtについては意図的にコントロールしたものではない（後述の実施例15以降も同様である）。最大断面高さRtが3.0μm以下の範囲において、最大断面高さRtを意図的にコントロールすることは技術的に困難である。

結果を表1及び表2に示す。

[0108] [比較例5]

最大断面高さRtが3.0μm超となるように、溶湯を噴出する圧力及びノズルギャップを調整したこと以外は比較例1と同様の評価を行った。結果を表2に示す。

この比較例4のFe基アモルファス合金薄帯では、自由凝固面に波状の凹凸が形成されていた。

[0109]

[表1]

<スロット間隔の影響>

	薄帯の自由凝固面				磁気特性				
	非レーザー加工領域 Rt ( $\mu\text{m}$ )	レーザー強度 (mJ)	レーザー加工領域 (レーザー照射痕列)	レーザー照射痕列の線密度 (線/mm <sup>2</sup> )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
			スロット間隔 SP1 (mm)						
比較例1	1.0	-	-	0	0.168	0.163	1.51	0.176	0.244
比較例2	1.0	2.0	0.05	1.00	0.088	0.518	1.48	0.098	0.789
実施例1	1.6	2.0	0.10	0.50	0.104	0.200	1.52	0.113	0.293
実施例2	1.2	2.0	0.15	0.33	0.095	0.165	1.54	0.107	0.267
実施例3	1.1	2.0	0.20	0.25	0.108	0.140	1.55	0.122	0.211
実施例4	1.3	2.0	0.25	0.20	0.108	0.134	1.55	0.118	0.192
実施例5	1.5	2.0	0.30	0.17	0.124	0.146	1.55	0.131	0.209
実施例6	2.4	2.0	0.40	0.13	0.119	0.143	1.54	0.135	0.230
実施例7	1.6	2.0	0.45	0.11	0.138	0.160	1.54	0.150	0.316
実施例8	1.3	2.0	0.50	0.10	0.147	0.160	1.54	0.161	0.199

[表2]

	薄層の自由裁量面				磁気特性					
	非レーザー加工領域 Rt (μm)	レーザー強度 (mJ)	レーザー照射領域 {レーザー照射痕列}		レーザー照射痕列の線密度 (個/mm <sup>2</sup> )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	渦磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	渦磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
			スボット距離 SP1 (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)						
比較例1	1.0	-	-	-	0	0.168	0.183	1.51	0.176	0.244
実施例9	1.3	2.0	0.20	60	0.08	0.146	0.170	1.52	0.168	0.238
実施例10	1.7	2.0	0.20	50	0.10	0.136	0.148	1.55	0.151	0.231
実施例11	1.4	2.0	0.20	40	0.13	0.130	0.153	1.55	0.142	0.253
実施例12	2.0	2.0	0.20	30	0.17	0.123	0.136	1.54	0.130	0.154
実施例3	1.1	2.0	0.20	20	0.25	0.108	0.140	1.55	0.122	0.211
実施例13	1.4	2.0	0.20	15	0.33	0.099	0.149	1.55	0.106	0.196
実施例14	1.2	2.0	0.20	10	0.50	0.085	0.145	1.56	0.094	0.187
比較例3	1.7	2.0	0.20	7.5	0.67	0.079	0.210	1.50	0.091	0.282
比較例4	1.4	2.0	0.20	5	1.00	0.075	0.255	1.48	0.085	0.329
比較例5	3.2	-	-	-	0	0.101	0.214	1.51	0.117	0.316

[0111] 表1及び表2に示すように、ライン間隔（即ち、複数のレーザー照射痕列

の中心線間隔)が10mm~60mmであり、スポット間隔(即ち、複数のレーザー照射痕の中心点間隔)が0.10mm~0.50mmであり、かつ、レーザー照射痕の数密度Dが0.05個/mm<sup>2</sup>~0.50個/mm<sup>2</sup>である実施例1~14のFe基アモルファス合金薄帯は、磁束密度1.45Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAが低減されていた。

これに対し、レーザー照射痕が形成されていない比較例1のFe基アモルファス合金薄帯では、鉄損CLが高かった。

また、スポット間隔が0.10mm未満である比較例2のFe基アモルファス合金薄帯では、鉄損CLは低減されているものの、励磁電力VAが高かった。

また、ライン間隔が10mm未満である比較例3及び4のFe基アモルファス合金薄帯では、鉄損CLは低減されているものの、励磁電力VAが高かった。

また、レーザー照射痕を有さず、自由凝固面の非レーザー加工領域における最大断面高さRtが3.0μm超である比較例5のFe基アモルファス合金薄帯では、鉄損CLは低減されているものの、励磁電力VAが高かった。

[0112] ところで、 $Fe_{82}Si_4B_{14}$ の化学組成を有する実施例1~14のFe基アモルファス合金薄帯における飽和磁束密度Bsは、1.63Tである。

実施例1~14において、磁束密度1.45Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAは、比率〔動作磁束密度Bm/飽和磁束密度Bs〕が0.89(=1.45/1.63)であることを満足する動作磁束密度BmにてFe基アモルファス合金薄帯を使用することを想定した例であり、磁束密度1.50Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAは、比率〔動作磁束密度Bm/飽和磁束密度Bs〕が0.92(=1.50/1.63)であることを満足する動作磁束密度BmにてFe基アモルファス合金薄帯を使用することを想定した例である。

表1及び表2の結果から、実施例1~14のFe基アモルファス合金薄帯は、比率〔動作磁束密度Bm/飽和磁束密度Bs〕が0.88~0.94で

あることを満足する動作磁束密度  $B_m$  にて用いた場合においても、鉄損及び励磁電力を抑制できることが期待される。

[0113] <レーザー照射痕の形状>

実施例 1 ~ 14 の Fe 基アモルファス合金薄帯のレーザー照射痕の平面視形状を、光学顕微鏡によって観察した。

結果、いずれの実施例においても、レーザー照射痕の平面視形状は王冠状であった。

ここで、王冠状とは、レーザー照射痕の縁の部分に、溶融合金が飛散した痕跡が残っている形状を意味する。

[0114] 図 4 は、王冠状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

図 4 では、王冠状のレーザー照射痕を 2 個確認できる。各レーザー照射痕の縁の部分に、溶融合金が飛散した痕跡が残っていることがわかる。

[0115] [実施例 15 ~ 19]

実施例 3 において、レーザー強度を表 3 に示すように変更したこと以外は、実施例 3 と同様の操作を行った。結果を表 3 に示す。

表 3 には、実施例 15 ~ 19 の結果に加え、対比用として、実施例 3 及び比較例 1 の結果も示す。

[0116]

[表3]

	レーザー強度の影響				レーザー照射面の自由表面				磁気特性			
	非レーザー加工領域 Rt ( $\mu\text{m}$ )	レーザー強度 (mJ)	レーザー照射面		レーザー照射面の 数密度 (個/ $\text{mm}^2$ )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz		
			スポット径 SP1 (mm)	レーザー加工領域 (レーザー照射領域) ライノ径 LP1 (mm)								
比較例1	1.0	-	-	-	0	0.168	0.183	1.51	0.176	0.244		
実施例15	2.1	0.4	0.20	20	0.35	0.154	0.173	1.53	0.162	0.244		
実施例16	1.3	0.6	0.20	20	0.25	0.138	0.159	1.55	0.149	0.235		
実施例17	1.5	0.8	0.20	20	0.25	0.125	0.151	1.54	0.139	0.230		
実施例18	1.2	1.0	0.20	20	0.25	0.120	0.132	1.55	0.136	0.219		
実施例19	1.5	1.5	0.20	20	0.25	0.112	0.131	1.56	0.119	0.199		
実施例3	1.1	2.0	0.20	20	0.25	0.108	0.140	1.55	0.122	0.211		

[0117] 表3に示すように、レーザー強度を0.4 mJ ~ 1.5 mJに弱めた場合

(実施例15～19)にも、レーザー照射により、鉄損を低減させる効果が得られることが確認された。なお、レーザー強度が1.0mJ～2.0mJの実施例18, 19、及び実施例3は、60Hz、1.45Tでの鉄損CLが0.120W/kg以下であり、励磁電力VAが0.140以下であった。また、レーザー強度が1.3mJ～1.8mJ(1.5mJ)の実施例19は、60Hz、1.45Tでの鉄損CLが0.112W/kgであり、励磁電力VAが0.131であった。

[0118] [実施例101～105]

<レーザー加工条件に関する実験1>

レーザー加工条件(詳細には、BEによるビームの拡大倍率及びFocus)を表4に示すように変更したこと以外は実施例3と同様の操作を行った。

更に、各実施例のFe基アモルファス合金薄帯のレーザー照射痕の平面視形状を、光学顕微鏡によって観察した。結果を表4に示す。

表4には、実施例101～105の結果に加え、対比用として、実施例3及び比較例1の結果も示す。

[0119]

[表4]

非レーザー加工領域	薄帯の自由曲面							磁気特性				
	レーザー加工条件				レーザー加工領域 (レーザー照射源列)			励磁電力 VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	鉄損 CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度 B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損 CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力 VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
	BE	Focus (mm)	レーザー強度 (mJ)	スポット径 ( $\mu\text{m}$ )	エネルギー密度 (J/mm <sup>2</sup> )	スポット間隔 SP1 (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)					
比較例1	1.0	-	-	-	-	-	0	-	0.168	1.51	0.176	0.244
実施例3	1.1	3倍	2.0	60.8	0.689	0.20	0.25	王冠状	0.108	1.55	0.122	0.211
実施例101	1.8	3倍	1.5	60.8	0.689	0.20	0.25	ドーナツ状	0.101	1.54	0.107	0.196
実施例102	1.4	3倍	2.5	60.8	0.689	0.20	0.25	フラット状	0.102	1.55	0.112	0.223
実施例103	1.7	1倍	2.0	182.4	0.077	0.20	0.25	フラット状	0.111	1.54	0.122	0.227
実施例104	1.2	1倍	1.5	182.4	0.077	0.20	0.25	ドーナツ状	0.101	1.56	0.115	0.175
実施例105	1.6	1倍	2.5	182.4	0.077	0.20	0.25	ドーナツ状	0.102	1.55	0.115	0.249

[0120] 表4に示すように、実施例3に対し、レーザー加工条件を変更した実施例

101～105では、レーザー照射痕の形状が変化したことがわかる。

また、実施例3に対し、レーザー加工条件を変更した実施例101～105では、鉄損CL及び励磁電力VAはほとんど変化しないことがわかる。

[0121] ここで、ドーナツ状とは、レーザー照射痕の縁の部分に、ドーナツ状の縁どりを確認できる形状を意味する。

図5は、ドーナツ状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

図5では、ドーナツ状のレーザー照射痕を3個確認できる。各レーザー照射痕の縁の部分に、ドーナツ状の縁どりを確認できる。

[0122] また、フラット状とは、明確な縁どりが無い略円形のシミ形状を意味する。具体的には、フラット状とは、凹部の最大深さ $t_1$ と薄帯の厚さ $T$ との比 $t_1/T$ が0.025未満のものを指す。

図6は、フラット状のレーザー照射痕の一例を示す光学顕微鏡写真である。

図6のフラット状のレーザー照射痕は、凹部の最大深さ $t_1$ が $0.44\mu\text{m}$ である。なお、薄帯の厚さ $T$ は $25\mu\text{m}$ であり、比 $t_1/T$ は $0.176$ である。なお、前記のように、レーザー照射痕がフラット状である場合、薄帯を積層させて磁心を構成した場合、薄帯間の空間を抑制し、磁心の薄帯密度を向上させることができる。

[0123] 以上の結果から、レーザー照射痕の形状は、鉄損CL及び励磁電力VAに対し、ほとんど影響を与えないことが確認された。

即ち、レーザー照射痕の形状の如何を問わず、ライン間隔及びスポット間隔が前述した条件を満たす限り、鉄損CL及び励磁電力VAを低減させる効果が得られることが確認された。

[0124] (実施例20)

実施例3において、サンプル片のロール面にパルスレーザーを照射したこと以外は、実施例3と同様の操作を行った。薄帯10におけるレーザー照射痕の数密度(個/ $\text{mm}^2$ )は、表5に示す通りとした。結果を表5に示す。

なお、レーザー加工されたF e基アモルファス合金薄帯の自由凝固面中、レーザー照射痕列12以外の部分（即ち、非レーザー加工領域）においてJ I S B 0601:2001に準拠して上記と同様に測定した最大断面高さR tは、1.4 μmであった。

[0125]

[表5]

	薄帯の自由 縦断面		薄帯のロール面				磁気特性			
	レーザー 強度 (mJ)	レーザー加工領域 (レーザー照射痕列) スポット間隔 SP1 (mm)	レーザー 照射痕 の 数密度 (個/mm <sup>2</sup> )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz		
実施例20	1.4	2.0	0.25	0.102	0.155	1.54	0.116	0.231		

[0126] 表5に示されるように、ライン間隔（即ち、複数のレーザー照射痕列の中心線間隔）を10mm～60mmとし、スポット間隔（即ち、複数のレーザー照射痕の中心点間隔）を0.10mm～0.50mmとし、かつ、レーザー照射痕の数密度Dを0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>とした実施例20は、薄帯のロール面にレーザー照射痕を設けた場合であっても、磁束密度1.45Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAが低減されていた。

[0127]（実施例21～24、比較例6～9）

実施例3で用いた幅が210mmである素材薄帯のFe基アモルファス合金薄帯を、図7に示すように幅方向が8等分される幅長にてスリット加工し、Wa～Wdの4つの狭幅な合金薄帯のサンプル片を得た。得られたWa～Wdの合金薄帯について、レーザー加工する前の合金薄帯のサンプル片（比較例6～9）と、レーザー加工されたFe基アモルファス合金薄帯片（実施例21～24）と、における鉄損CL及び励磁電力VAを測定した。

[0128]

[表6]

	薄帯の自由凝固面					磁気特性					
	非レーザー加工領域 Rt ( $\mu\text{m}$ )	レーザー加工位置 *1	レーザー強度 (mJ)	レーザー加工領域 (レーザー照射痕列)		レーザー照射痕 の数密度 (個/ $\text{mm}^2$ )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
				スポット間隔 SP1 (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)						
比較例6	1.5	Wa	-	-	-	0	0.137	0.707	1.27	0.162	1.212
実施例21	1.7	Wa	2.0	0.20	20	0.25	0.128	0.753	1.25	0.145	1.310
比較例7	1.7	Wb	-	-	-	0	0.140	0.162	1.49	0.162	0.304
実施例22	1.4	Wb	2.0	0.20	20	0.25	0.100	0.154	1.51	0.110	0.236
比較例8	1.2	Wc	-	-	-	0	0.165	0.180	1.51	0.169	0.249
実施例23	1.5	Wc	2.0	0.20	20	0.25	0.103	0.129	1.54	0.114	0.194
比較例9	1.3	Wd	-	-	-	0	0.171	0.185	1.51	0.175	0.257
実施例24	1.7	Wd	2.0	0.20	20	0.25	0.100	0.147	1.52	0.109	0.254

\*1：レーザー加工位置Wa~Wdは、図7に示すように、薄帯の幅方向を8等分した際の、幅方向一端から4つの薄帯（即ち、レーザー照射痕の位置）を示す。

[0129] 表6に示されるように、W aの薄帯にレーザー加工が施された実施例2 1では、レーザー加工を施さない比較例6に対して加工による鉄損C L及び励磁電力V Aの低減効果は僅かであった。

しかしながら、W b～W dの薄帯にレーザー加工が施された実施例2 2～2 4では、レーザー加工を施さない比較例7～9に対し、磁束密度1. 4 5 Tの条件における鉄損C L及び励磁電力V Aが顕著に低減されていた。

つまり、レーザー加工は、薄帯の幅方向全体に行う必要はなく、F e基アモルファス合金薄帯の幅方向の長さ全体に占める、レーザー照射痕列の幅方向の長さの割合が、幅方向の中心から幅方向両端に向かう方向にそれぞれ1 0%～5 0%の範囲内であればレーザー加工による鉄損及び励磁電力の低減効果があることが示された。

[0130] (実施例2 5～2 6)

実施例3において、レーザー加工で形成するレーザー照射痕列の方向を、図8に示すように薄帯(サンプル片)の幅方向に対して1 5°(又は1 6 5°)傾斜させたこと以外は、実施例3と同様の操作を行った。結果を表7に示す。

[0131]

[表7]

		薄帯の自由表面				磁気特性			
非レーザー加工領域	レーザー照射痕列の幅方向に対する傾斜角度	レーザー照射痕列		レーザー照射痕列の密度 (個/mm <sup>2</sup> )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力 VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度 B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力 VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
		スリット間隔 SPI (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)						
実施例25	15° 隣り合う列は互いに平行	0.20	20	0.25	0.125	0.182	1.52	0.143	0.253
実施例26	15°/165° 隣り合う列は交互に異なる	0.20	20	0.25	0.119	0.197	1.49	0.132	0.349

[0132] 表7に示されるように、レーザー照射痕列の方向を幅方向に対して15°傾斜させても、磁束密度1.45Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAは低減された。

[0133] (実施例 27～29)

実施例 1 と同様にして、合金組成の Fe 基アモルファス合金薄帯 ( $\text{Fe}_{82}\text{Si}_4\text{B}_{14}$ ) の化学組成を有し、厚さが  $25\ \mu\text{m}$ 、幅が  $210\ \text{mm}$ ) を得た。その後、薄帯の中央部から  $25\ \text{mm}$  幅のサンプル片を加工し、このサンプル片の自由凝固面に、パルスレーザーによるレーザー加工を施し、レーザー照射痕列を形成した。このときのパルスレーザーの照射条件を、下記表 8 に示す通りとした。

また、レーザー照射痕列において、スポット間隔  $\text{SP1}$  は  $0.20\ \text{mm}$  であり、ライン間隔  $\text{LP1}$  は  $20\ \text{mm}$  であり、レーザー照射痕列の数密度は  $0.25\ \text{mm}^2$  である。レーザー照射痕列は、薄帯片の幅方向の全域に亘って形成し、それぞれのレーザー照射痕が平行になるように形成した。

[0134]

[表8]

	薄帯の自由凝固面						磁気特性				
	非レーザー加工領域 Rt ( $\mu\text{m}$ )	パルス幅 (nsec)	レーザー強度 (mJ)	レーザー照射領域 (レーザー照射痕列) スポット間隔 SP1 (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)	レーザー照射痕の敷密度 (個/ $\text{mm}^2$ )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	磁束密度 B0.1 (T) at 7.9557A/m 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz
実施例27	1.3	100	1.0	0.20	20	0.25	0.140	0.165	1.53	0.146	0.276
実施例28	1.3	250	1.0	0.20	20	0.25	0.120	0.132	1.55	0.136	0.219
実施例29	1.4	500	1.0	0.20	20	0.25	0.109	0.145	1.54	0.121	0.252

[0135] 表8に示されるように、パルス幅を変化させた場合にも、磁束密度1.45 Tの条件における鉄損CL及び励磁電力VAに対する低減効果が認められた。

[0136] (実施例30、比較例10)

実施例1と同様にして、Fe基アモルファス合金薄帯(化学組成:  $Fe_{82}Si_4B_{14}$ 、厚さ:  $25\mu m$ 、幅:  $142mm$ )を得、Fe基アモルファス合金薄帯片を作成した。得られた薄帯片を複数積層して積層体とし、積層体をU字形に曲げ、更にその両端同士をオーバーラップ巻きにすることで、図9A及び図9Bに示す構造の鉄心とした。鉄心の形状は、図9A及び図9Bに示すように、窓枠高さAが $330mm$ であり、窓枠幅Bが $110mm$ であり、リボン積層厚さCが $55mm$ であり、高さDが $142mm$ (後述の樹脂コーティングの厚さを含めると $146mm$ )である。また、鉄心の占積率は86%であり、重さは $53kg$ である。

[0137] なお、この鉄心は、図9A及び図9Bの下側の部分でオーバーラップ巻きがなされている。また、複数の薄帯片を積層して積層体とした際、薄帯片同士が離間しないように、積層体の中腹部における積層面に樹脂コーティングを施した。

[0138] 得られた鉄心に対し、鉄損CLと励磁電力VAを測定した。

図10に示すように、鉄心にコイルとして一次巻線(N1)と二次巻線(N2)とを巻き、周波数を $60Hz$ とし、磁束密度を1.45 T及び1.5 Tとした。また、一次巻線の巻き数は10ターンとし、二次巻線の巻き数は2ターンとした。このようにして、変圧可能な回路を作製した。

電力計で読み取る電圧E(V)、最大磁束密度 $B_m$ (T)の換算及び規定の磁束密度 $B_m$ (T)における皮相電力(VA/kg)、並びに、鉄損(W/kg)の算出は、下記の式1、式2、式3により行った。測定結果を表9に示す。

[0139] また、比較として、レーザー照射痕列を形成しなかった薄帯片を用いたこと以外、上記と同様にして製造した鉄心に対して同様の測定、評価を行った

。

[0140] 式1 : 電圧  $E$  (V) =  $4.443 L F \cdot C \cdot W \cdot N_1 \cdot f \cdot B_m \times 10^{-6}$

式2 : 皮相電力 (VA/kg) =  $E \cdot I / M$

式3 : 鉄損 (W/kg) =  $W a t t / M$

なお、式1～式3中の記号の詳細は、以下の通りである。

$E$  : 電力計測定実効電圧 (V)

$L F$  : 占積率 (= 0.86)

$C$  : コア積厚 (mm)

$W$  : 使用リボン公称幅 (mm)

$N_1$  : 励磁コイル巻回数

$f$  : 測定周波数 (Hz)

$B_m$  : 最大磁束密度又は規定の磁束密度

$I$  : 電力計測定実効電流 (A)

$M$  : コア重量 (kg)

$W a t t$  : 電力計測定電力 (W)

[0141]

[表9]

	薄帯のオーバーラップ巻きした自由減面						磁気特性			
	非レーザー加工領域 Rt ( $\mu\text{m}$ )	レーザー強度 (mJ)	レーザー加工領域 (レーザー照射痕列)		レーザー照射痕 の密度 ( $\mu\text{m}^2$ )	鉄損CL (W/kg) at 1.45T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.45T 60Hz	鉄損CL (W/kg) at 1.50T 60Hz	励磁電力VA (VA/kg) at 1.50T 60Hz	
			スポット間隔 SP1 (mm)	ライン間隔 LP1 (mm)						
比較例10	1.4	-	-	-	0	0.261	0.548	0.280	0.729	
実施例30	1.3	2.0	0.20	20	0.25	0.162	0.457	0.181	0.643	

[0142] 表9に示されるように、1.45T、60Hzで測定した鉄損CLは、レーザー照射痕列を形成しなかった薄帯片を用いた鉄心では0.261W/kgであるのに対し、本実施形態のレーザー照射痕列を形成した薄帯片を用いた鉄心では0.162W/kgと、3割以上低減した数値となった。

鉄心において、鉄損CLを $0.2\text{ W/kg}$ 以下に低減することは、従来から全く到達し得なかったものである。そのため、本実施形態の鉄心にコイルを設けることにより、電力損失が極めて低い変圧器を得ることができる。

[0143] 2018年3月30日に出願された日本出願特願2018-069453の開示はその全体が参照により本明細書に取り込まれる。

本明細書に記載された全ての文献、特許出願、及び技術規格は、個々の文献、特許出願、及び技術規格が参照により取り込まれることが具体的かつ個々に記された場合と同程度に、本明細書中に参照により取り込まれる。

## 請求の範囲

- [請求項1] 自由凝固面及びロール面を有するF e基アモルファス合金薄帯であって、
- 自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、
- 前記F e基アモルファス合金薄帯の鋳造方向に設けられた複数の前記レーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、前記鋳造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、前記ライン間隔が、10mm～60mmであり、
- 前記複数のレーザー照射痕列の各々における前記複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、前記スポット間隔が、0.10mm～0.50mmであり、
- 前記ライン間隔を $d_1$  (mm)とし、前記スポット間隔を $d_2$  (mm)とし、前記レーザー照射痕の数密度 $D$ を $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$ としたとき、前記レーザー照射痕の数密度 $D$ が、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>である、
- F e基アモルファス合金薄帯。
- [請求項2] F e基アモルファス合金薄帯の幅方向の長さ全体に占める、前記レーザー照射痕列の幅方向の長さの割合が、幅方向の中心から幅方向両端に向かう方向にそれぞれ10%～50%の範囲内である請求項1に記載のF e基アモルファス合金薄帯。
- [請求項3] 前記レーザー照射痕列は、F e基アモルファス合金薄帯の幅方向を8等分した8個の領域から両端の2個の領域を除く、前記幅方向の中央の6個の領域内に少なくとも形成されている、請求項1又は請求項2に記載のF e基アモルファス合金薄帯。
- [請求項4] 前記自由凝固面における最大断面高さ $R_t$ が、3.0μm以下である請求項1～請求項3のいずれか1項に記載のF e基アモルファス合金薄帯。

- [請求項5] Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が78原子%以上であり、Bの含有量が11原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である請求項1～請求項4のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項6] 厚さが20 $\mu$ m～35 $\mu$ mである請求項1～請求項5のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項7] 周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が、0.160W/kg以下であり、  
周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における励磁電力が、0.200VA/kg以下である、請求項1～請求項6のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項8] Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が80原子%以上であり、Bの含有量が12原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である請求項7に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項9] 周波数60Hz及び磁場7.9557A/mの条件における磁束密度B<sub>0.1</sub>が、1.52T以上である請求項1～請求項8のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項10] 比率〔動作磁束密度B<sub>m</sub>／飽和磁束密度B<sub>s</sub>〕が0.88～0.94であることを満足する動作磁束密度B<sub>m</sub>にて用いられる請求項1～請求項9のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。
- [請求項11] Fe基アモルファス合金からなり、自由凝固面及びロール面を有する素材薄帯を準備する工程と、  
前記素材薄帯の前記自由凝固面及び前記ロール面の少なくとも一方向に対し、レーザー加工により、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数形成することにより、複数のレーザー照射

痕列を有するF e基アモルファス合金薄帯を得る工程と、  
を有し、

前記F e基アモルファス合金薄帯の鑄造方向に設けられた複数の前記レーザー照射痕列のうち、互いに隣り合うレーザー照射痕列間の、前記鑄造方向に直交する幅方向の中央部における中心線間隔をライン間隔とした場合に、前記ライン間隔が、10mm～60mmであり、

前記複数のレーザー照射痕列の各々における前記複数のレーザー照射痕の中心点間隔をスポット間隔とした場合に、前記スポット間隔が、0.10mm～0.50mmであり、

前記ライン間隔を $d_1$  (mm)とし、スポット間隔を $d_2$  (mm)とし、前記レーザー照射痕の数密度 $D$ を $D = (1/d_1) \times (1/d_2)$ としたとき、前記レーザー照射痕の数密度 $D$ が、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>である、F e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

[請求項12] 前記レーザー照射痕を形成するためのレーザーの出力が、0.4mJ～2.5mJである請求項11に記載のF e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

[請求項13] 前記レーザー照射痕を形成するためのレーザーのパルス幅が、50ns以上である請求項11又は請求項12に記載のF e基アモルファス合金薄帯の製造方法。

[請求項14] 請求項1～請求項10のいずれか1項に記載のF e基アモルファス合金薄帯が積層され、積層されたF e基アモルファス合金薄帯を曲げてオーバーラップ巻きされており、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が0.250W/kg以下である、鉄心。

[請求項15] 請求項1～請求項10のいずれか1項に記載のF e基アモルファス合金薄帯を用いた鉄心と、前記鉄心に巻き回されたコイルと、を備え、

前記鉄心は、積層されたF e基アモルファス合金薄帯を曲げてオー

バーラップ巻きされており、周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が0.250W/kg以下である、変圧器。

[請求項16] 自由凝固面及びロール面を有するFe基アモルファス合金薄帯であって、

自由凝固面及びロール面の少なくとも一方面に、複数のレーザー照射痕から構成されるレーザー照射痕列を複数有し、

単位面積あたりのレーザー照射痕の数密度が、0.05個/mm<sup>2</sup>～0.50個/mm<sup>2</sup>である、Fe基アモルファス合金薄帯。

[請求項17] 前記単位面積は、前記Fe基アモルファス合金薄帯の幅方向における前記レーザー照射痕列が形成された範囲、かつ、鋳造方向1mの範囲（但し、鋳造方向で1m未満しかない場合は鋳造方向の全範囲）からなる領域から算出される、請求項16に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

[請求項18] Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が78原子%以上であり、Bの含有量が11原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である、請求項16又は請求項17に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

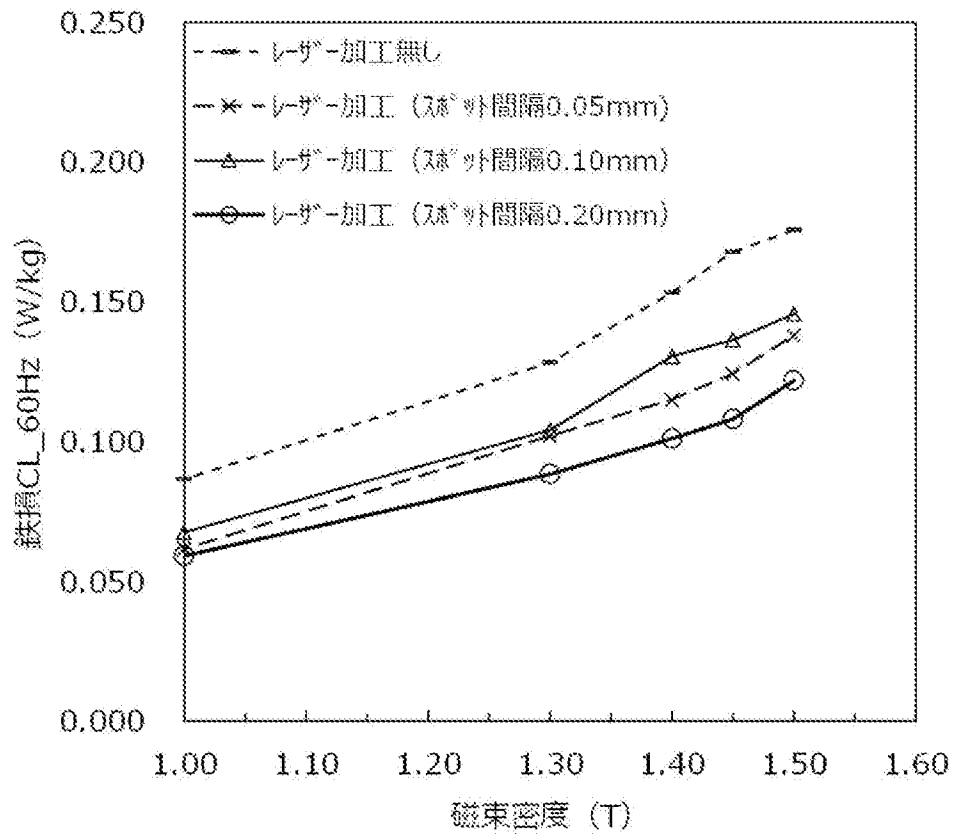
[請求項19] 周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における鉄損が、0.160W/kg以下であり、

周波数60Hz及び磁束密度1.45Tの条件における励磁電力が、0.200VA/kg以下である、請求項16～請求項18のいずれか一項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

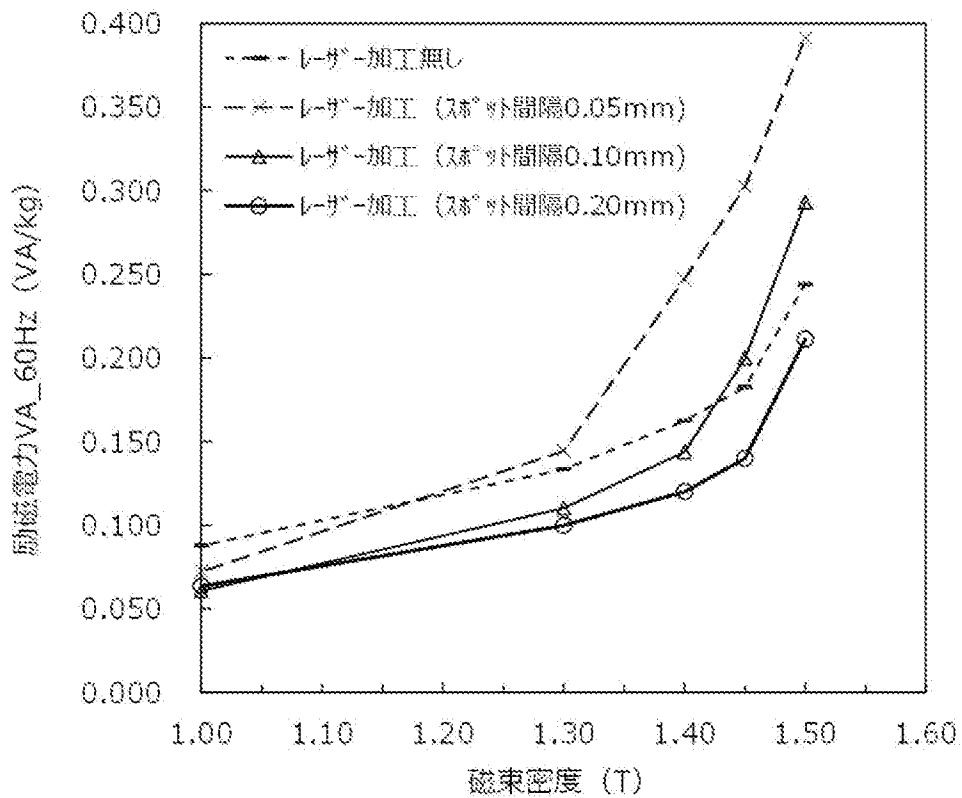
[請求項20] Fe、Si、B、及び不純物からなり、Fe、Si、及びBの合計含有量を100原子%とした場合に、Feの含有量が80原子%以上であり、Bの含有量が12原子%以上であり、B及びSiの合計含有量が17原子%～22原子%である、請求項19に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

[請求項21] 周波数60Hz及び磁場7.9557A/mの条件における磁束密度 $B_0$ が、1.52T以上である、請求項16～請求項20のいずれか1項に記載のFe基アモルファス合金薄帯。

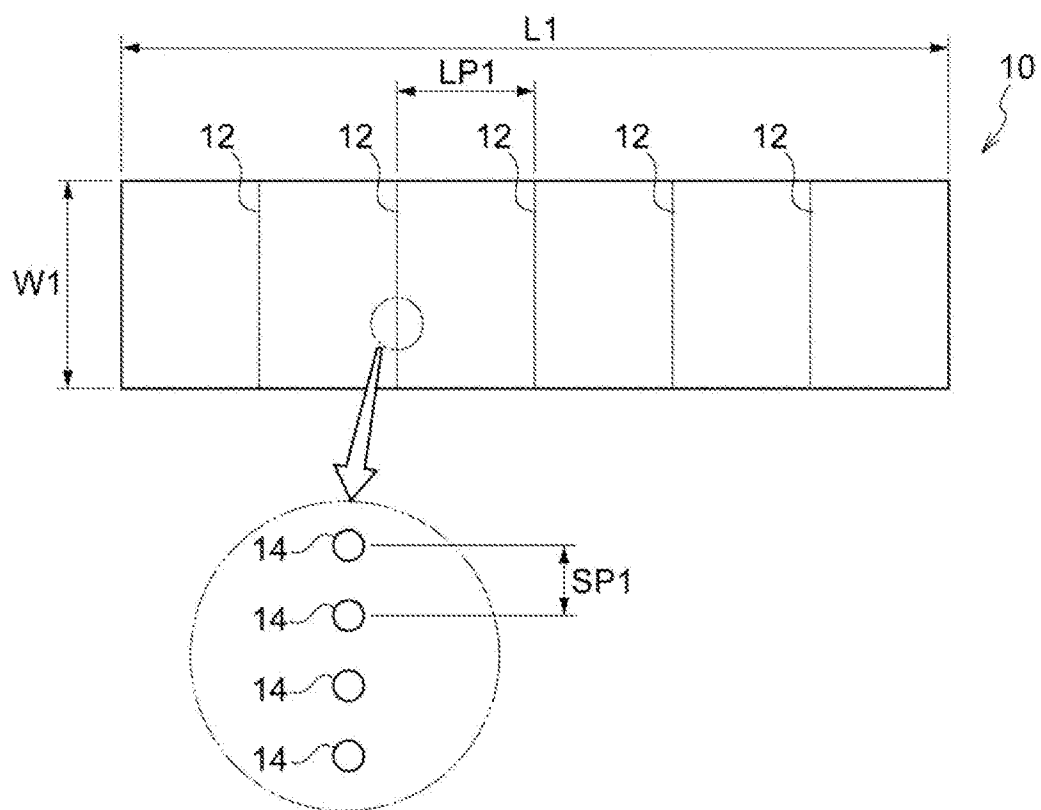
[図1]



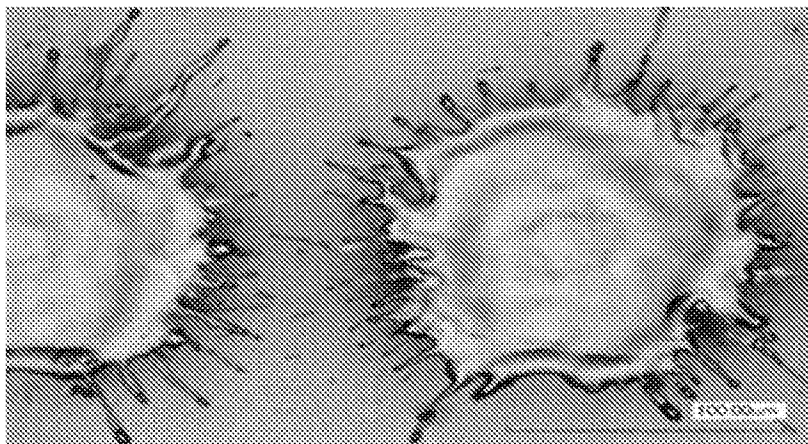
[図2]



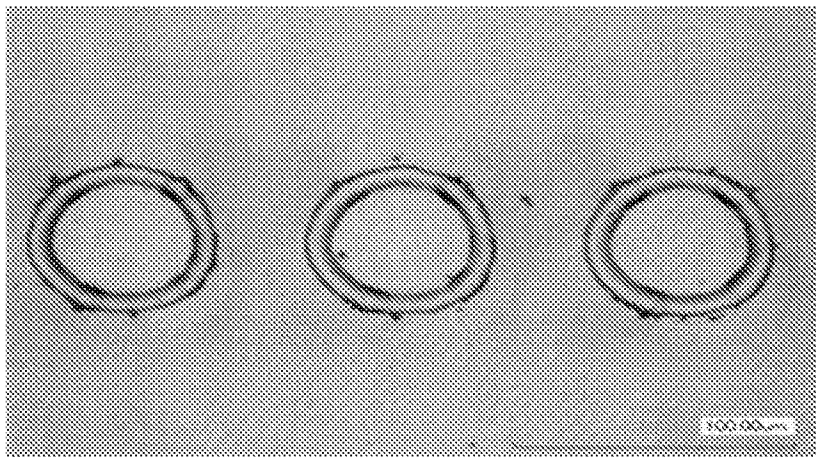
[図3]



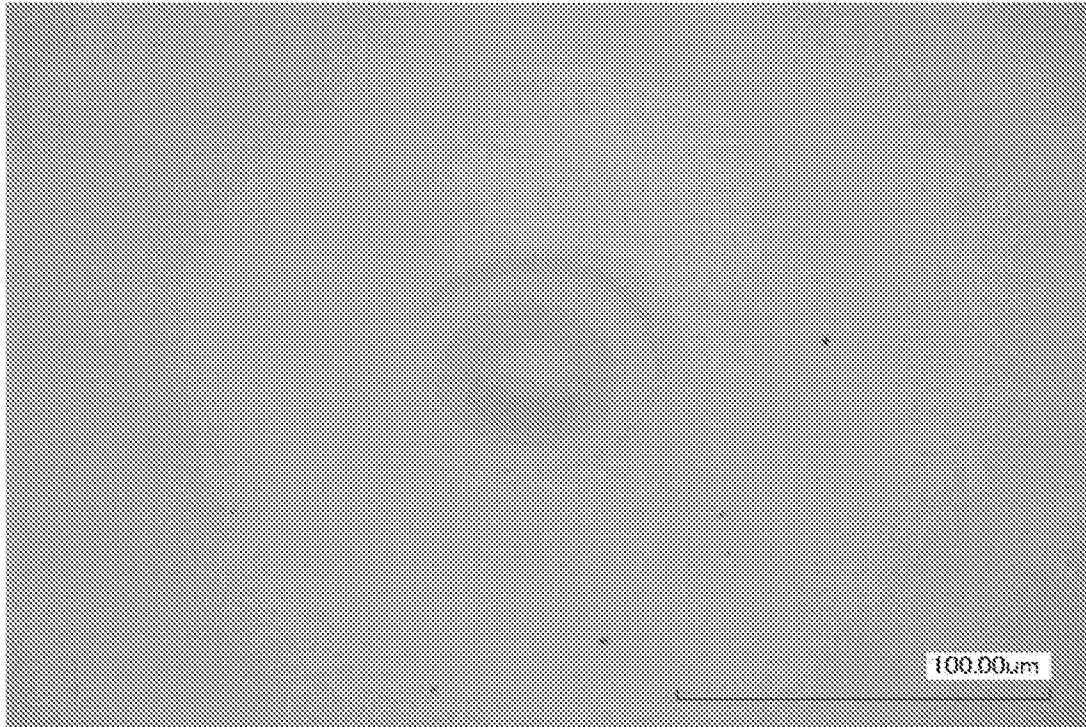
[図4]



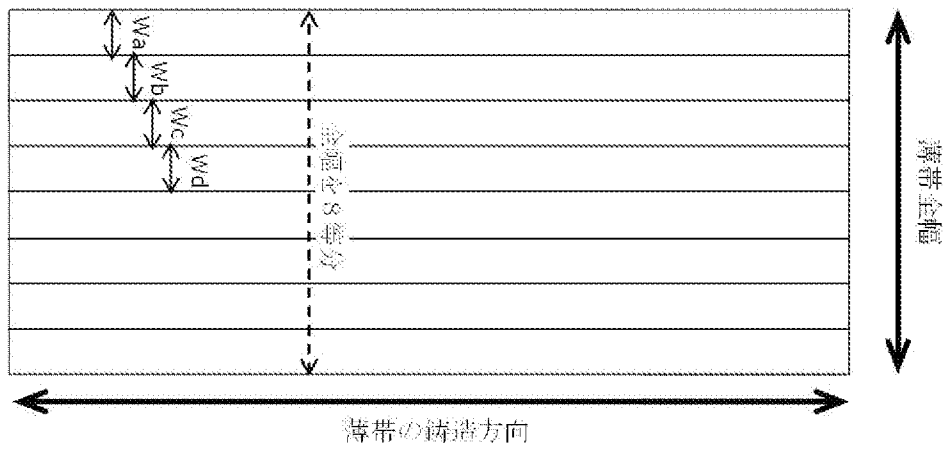
[図5]



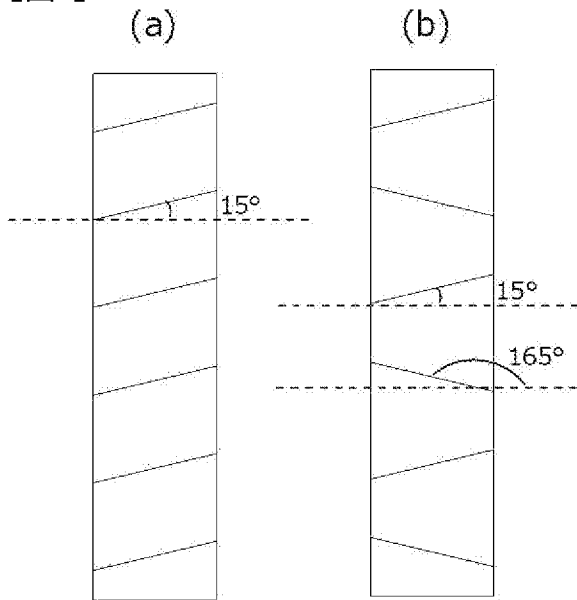
[図6]



[図7]



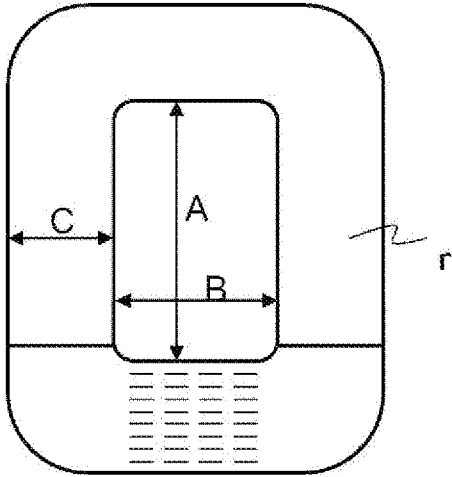
[図8]



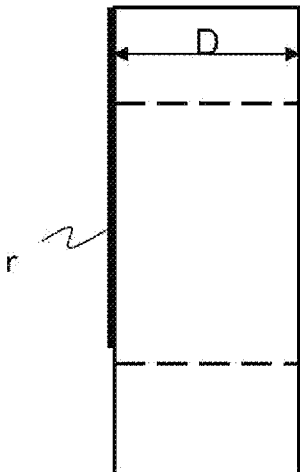
隣り合う列は互いに平行：  
15°/対幅方向

隣り合う列は交互に15°又は165°/対幅方向

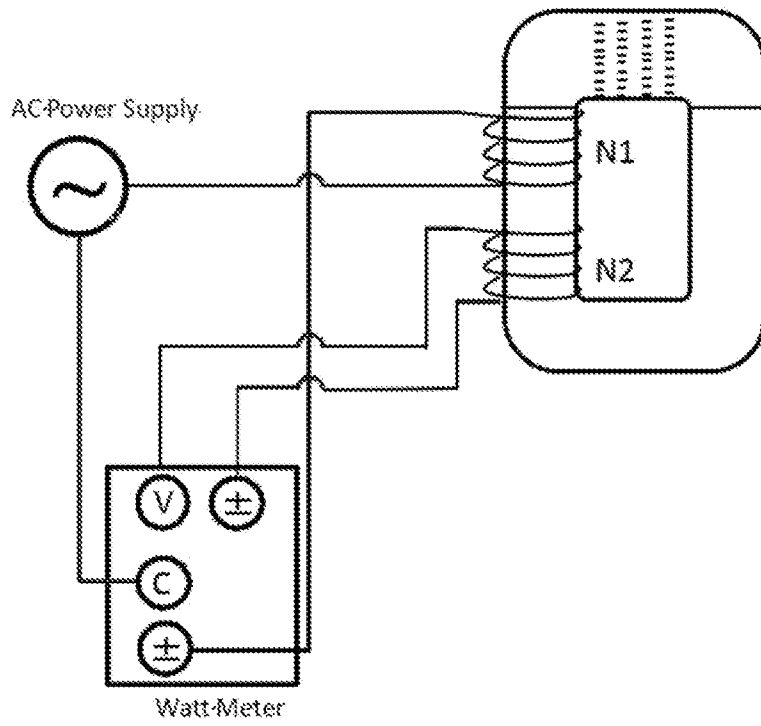
[図9A]



[図9B]



[図10]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2019/014154

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

Int. Cl. H01F1/153(2006.01) i, C22C45/02(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. H01F1/153, C22C45/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996  
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019  
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2019  
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 4-367202 A (NIPPON STEEL CORP.) 18 December 1992, paragraphs [0018], [0020] (Family: none)	16-21 1-15
X A	WO 2011/030907 A1 (HITACHI METALS, LTD.) 17 March 2011, paragraph [0058], fig. 3 & US 2012/0154084 A1, paragraph [0078], fig. 3 & EP 2463868 A1 & CN 102473500 A	16-21 1-15
A	WO 2014/142204 A1 (HITACHI METALS, LTD.) 18 September 2014, entire text, all drawings & US 2016/0035474 A1, entire text, all drawings & CN 105074841 A & KR 10-2015-0131065 A	1-21

Further documents are listed in the continuation of Box C.  See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:  
 "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed  
 "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 28.05.2019	Date of mailing of the international search report 11.06.2019
-------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer  Telephone No.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**International application No.  
PCT/JP2019/014154

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2012-31498 A (JFE STEEL CORP.) 16 February 2012, paragraph [0043] & US 2013/0098507 A1, paragraph [0086] & WO 2012/001952 A1 & MX 2012014882 A	1-21
A	JP 57-97606 A (KAWASAKI STEEL CORP.) 17 June 1982, entire text, all drawings (Family: none)	1-21

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01F1/153(2006.01)i, C22C45/02(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01F1/153, C22C45/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 4-367202 A (新日本製鐵株式会社) 1992.12.18, 段落 0018, 0020 (ファミリーなし)	16-21 1-15
X A	WO 2011/030907 A1 (日立金属株式会社) 2011.03.17, 段落 0058, 図 3 & US 2012/0154084 A1, 段落 0078, 図 3 & EP 2463868 A1 & CN 102473500 A	16-21 1-15

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

28.05.2019

国際調査報告の発送日

11.06.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)  
郵便番号 100-8915  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

齊田 寛史

電話番号 03-3581-1101 内線 3551

5D

5589

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2014/142204 A1 (日立金属株式会社) 2014.09.18, 全文, 全図 & US 2016/0035474 A1, 全文, 全図 & CN 105074841 A & KR 10-2015-0131065 A	1-21
A	JP 2012-31498 A (J F E スチール株式会社) 2012.02.16, 段落 0043 & US 2013/0098507 A1, 段落 0086 & WO 2012/001952 A1 & MX 2012014882 A	1-21
A	JP 57-97606 A (川崎製鉄株式会社) 1982.06.17, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-21