

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-25061  
(P2021-25061A)

(43) 公開日 令和3年2月22日(2021.2.22)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
C21D 8/12 (2006.01)	C21D 8/12 D	4E168
H01F 1/147 (2006.01)	H01F 1/147 175	4K033
B23K 26/361 (2014.01)	B23K 26/361	5E041
C22C 38/00 (2006.01)	C22C 38/00 303U	
C22C 38/60 (2006.01)	C22C 38/60	

審査請求 有 請求項の数 4 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2019-140969 (P2019-140969)  
(22) 出願日 令和1年7月31日(2019.7.31)

(71) 出願人 000001258  
J F E スチール株式会社  
東京都千代田区内幸町二丁目2番3号  
(74) 代理人 100184859  
弁理士 磯村 哲朗  
(74) 代理人 100123386  
弁理士 熊坂 晃  
(74) 代理人 100196667  
弁理士 坂井 哲也  
(74) 代理人 100130834  
弁理士 森 和弘  
(72) 発明者 市原 義悠  
東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J  
F E スチール株式会社内

最終頁に続く

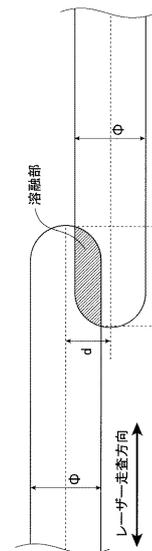
(54) 【発明の名称】 線状溝形成方法および方向性電磁鋼板の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 方向性電磁鋼板等の鋼板の表面に線状溝を形成する線状溝形成方法であって、鉄損低減効果と磁束密度に優れる線状溝形成方法を提供すること。

【解決手段】 鋼板表面にレジストを形成するレジスト形成工程と、前記鋼板の圧延方向と交差する方向に走査しながらレーザーを照射することによって前記レーザーが照射された部分のレジストを除去するレーザー走査を、前記鋼板の圧延方向に周期的に行うレーザー照射工程と、前記レジストが除去された部分の鋼板をエッチングして線状溝を形成するエッチング工程とを有し、前記レーザー照射工程では、前記鋼板の板幅方向に並べて設置した2台以上のレーザー照射装置からそれぞれ照射する2本以上のレーザーにより板幅方向に連続的にレジストを除去し、かつ、前記レーザーのスポット径を  $\phi$  としたとき、板幅方向に隣接する2台のレーザー照射装置からそれぞれ照射する2本のレーザーのレーザー中心を、レーザーの走査方向と直交する方向に  $0.05$  以上  $0.95$  以下の範囲でずらして照射する、線状溝形成方法。

【選択図】 図2



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

鋼板表面にレジストを形成するレジスト形成工程と、  
前記鋼板の圧延方向と交差する方向に走査しながらレーザーを照射することによって前記レーザーが照射された部分のレジストを除去するレーザー走査を、前記鋼板の圧延方向に周期的に行うレーザー照射工程と、  
前記レジストが除去された部分の鋼板をエッチングして線状溝を形成するエッチング工程とを有し、  
前記レーザー照射工程では、  
前記鋼板の板幅方向に並べて設置した 2 台以上のレーザー照射装置からそれぞれ照射する 2 本以上のレーザーにより板幅方向に連続的にレジストを除去し、かつ、前記レーザーのスポット径をとしたとき、板幅方向に隣接する 2 台のレーザー照射装置からそれぞれ照射する 2 本のレーザーのレーザー中心を、レーザーの走査方向と直交する方向に 0.05 以上 0.95 以下の範囲でずらして照射する、線状溝形成方法。

10

## 【請求項 2】

前記 2 本のレーザーにより照射された部分の重なり部のレーザー走査方向の長さを 50 mm 以下とする、請求項 1 に記載の線状溝形成方法。

## 【請求項 3】

前記レーザーのスポット径が  $1\ \mu\text{m}$  以上  $100\ \mu\text{m}$  以下であり、かつ、前記レーザーの照射エネルギーが  $1\ \text{J}/\text{m}$  以上  $30\ \text{J}/\text{m}$  以下である、請求項 1 または 2 に記載の線状溝形成方法。

20

## 【請求項 4】

請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の線状溝形成方法により、方向性電磁鋼板の表面に線状溝を形成する、方向性電磁鋼板の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、線状溝形成方法および方向性電磁鋼板の製造方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

方向性電磁鋼板は、変圧器鉄心用材料として用いられており、変圧器のエネルギー損失には方向性電磁鋼板の鉄損が大きく影響している。近年では、省エネ・環境規制の観点から、変圧器におけるエネルギー損失の低減が強く求められている。変圧器の鉄損は、素材となる方向性電磁鋼板の鉄損によって影響されるため、鉄損の低い方向性電磁鋼板を開発することが非常に重要である。

30

## 【0003】

方向性電磁鋼板の鉄損は、ヒステリシス損と渦電流損とに分離される。ヒステリシス損を改善する手法としては、GOS方位と呼ばれる(110)[001]方位を圧延方向に高度に配向させる手法や、鋼板中に含まれる不純物を低減する手法などが開発されている。一方、渦電流損を改善する手法としては、Si 添加により電気抵抗を増加させる手法、圧延方向への被膜張力の付与などの手法が開発されているが、更なる低鉄損化を追求する際には、これらの手法では製造上の限界がある。

40

## 【0004】

そこで、仕上げ焼鈍、絶縁被膜焼き付け後の鋼板に、溝の形成や局所的な歪みの導入など、物理的な手法で磁束の不均一性を導入することで、圧延方向に沿って形成される 180°磁区(主磁区)の幅を細分化して、鉄損、特に渦電流損を低減させる手法である、磁区細分化技術が開発されている。

## 【0005】

この磁区細分化技術において、製品板に歪み取り焼鈍を施してもその効果が失われない手法を、特に、耐熱型磁区細分化法と呼んでいる。この手法は、一般に、製造工程上、歪

50

み取り焼鈍が必須である巻鉄心用材料に適用される。例えば特許文献 1 には、幅 300  $\mu$ m 以下かつ深さ 100  $\mu$ m 以下の線状溝を鋼板表面に導入することで、もともと  $W_{17/50}$  で 0.80 W/kg 以上あった鉄損を、前記線状溝の形成後に 0.70 W/kg 以下まで改善する技術が提案されている。

【0006】

方向性電磁鋼板に溝を形成する手法としては、例えば、電解エッチングによって鋼板表面に溝を形成する電解エッチング法（特許文献 2）、高出力のレーザーによって鋼板を局部的に溶解・蒸発させるレーザー法（特許文献 3）、歯車上のロールを鋼板に押し付けることで圧痕を与える歯車プレス法（特許文献 4）が提案されている。

【0007】

これらの手法の内、歯車プレス法はロールの摩耗が激しいため、頻繁なメンテナンスが必須となるため、生産性に問題を抱えている。さらに鋼板に圧痕を与えるに際し、圧痕部近傍に微小な凸部が形成されるために、占積率が低下しやすいという欠点もあった。一方、レーザー法においては、発生する金属蒸気がビーム経路に付着し、ビーム品質を低下させるため、こちらも頻繁なメンテナンスが必須となり、また、形成した溝の溝端には溶融凝固部が形成され、占積率が低下する。

【0008】

こうした手法に対し、電解エッチング法では、与える溝形状に合致するレジストパターンを鋼板表面に形成させた後、非レジスト部を電解エッチングによって除去し溝を形成させる手法であるために、機械的な摩耗や、占積率の低下といった問題は改善できる。

【0009】

ところで、このような線状溝の形成による鉄損改善効果は、その溝の形状（溝形状）に大きく影響されることが知られている。かかる溝形状には、溝の幅や深さに加え、溝断面の曲率といった細かな形状も含まれることが分かっている。したがって、電解エッチング法においても、レジストパターンの形状のバラつきによって、線状溝の溝形状がバラつき、結果として製品の特性がバラついてしまう。例えば特許文献 2 にあるようなグラビアオフセット印刷によって、レジストパターンを形成する場合、レジストインクの粘度やグラビアセルの形状のバラつきによって、レジストインクの広がり方が変化し、結果として白斑点や、溝途切れといった不良が発生し、磁気特性が劣化することが知られている。

【0010】

こうしたレジストパターンのバラつきを抑制する手法として、特許文献 5 にあるように、鋼板表面の全面にレジストインクを塗布してレジストを形成した後、鋼板表面にレーザーを照射してレーザー照射部のレジストを除去してパターンニングを行う方法（レジスト剥離法）が提案されている。レジスト剥離法は、グラビアオフセット印刷に比べ、磁気特性改善に有利な溝形状の形成が可能であることが分かっている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献 1】特公平 6 - 22179 号公報

【特許文献 2】特開 2012 - 77380 号公報

【特許文献 3】特開 2003 - 129135 号公報

【特許文献 4】特開昭 62 - 86121 号公報

【特許文献 5】特開 2017 - 25377 号公報

【特許文献 6】国際公開第 2016 / 171129 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

一般に、溝による磁区細分化効果は、鋼板の溝の表面積が大きいほど高い効果が得られることが知られている。しかしながら、溝を板厚方向に深くまで形成すると、溝体積の増加によって、透磁率の低下などの鋼板の磁気特性劣化に加え、製造ライン通板中の破断な

10

20

30

40

50

どの製造上の不利益も増加する。したがって、従来の溝による磁区細分化材では溝形成パターンの適正化による鉄損改善効果向上を図っている。例えば、特許文献6にあるように、複数の線状溝群を鋼板表面に形成し、線状溝の形成方向に隣接する線状溝同士を、その両端を離す、または圧延方向と直交する投影面上で重なるように配置する方法が提案されている。

#### 【0013】

しかしながら、上記方法では、隣接する線状溝同士を、圧延方向と直交する投影面上で重なるように配置した場合は大きな磁区細分化効果を得ることができる一方で、溝の総体積も増加するため、透磁率が低下する。また、隣接する線状溝同士の両端を離す場合、透磁率の劣化に伴う磁気特性の劣化は抑制できるが、磁区細分化効果が不十分となるという問題を抱えている。

10

#### 【0014】

したがって、更なる高特性な耐熱型磁区細分化材の開発のためには、高い磁区細分化効果と、高い磁束密度を両立する溝形成パターンが必要である。

#### 【0015】

本発明は、上記事情を鑑みてなされたものであり、鋼板、特に方向性電磁鋼板の表面に線状溝を形成する線状溝形成方法であって、鉄損低減効果と磁束密度に優れる線状溝形成方法を提供することを目的とする。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0016】

発明者らは、上記問題を解決すべく鋭意検討を重ねた。まず、方向性電磁鋼板（以下、単に「鋼板」ともいう）に形成する溝の形状について検討を行った。先述の通り、鋼板に溝を形成した時、透磁率が劣化する。この透磁率の劣化の大きさは、溝の体積に相関するものであるため、形成する溝の体積は極力小さい方が好ましい。したがって、鋼板に形成する溝の形状は、複数の線状溝群を鋼板表面に形成し、隣接する線状溝同士を圧延方向と直交する投影面上で重なるように配置したものよりも、板幅方向に連続的に形成させたもの、すなわち板幅方向に途切れなく形成させたものが好ましいと考えられる。一方、このように形成させた溝による鉄損低減効果は、上記のような小規模の線状溝群を形成し、隣接する線状溝同士を圧延方向と直交する投影面上で重なるように配置したものに比べて小さい。これは、磁区細分化効果は、磁化の不連続部分、すなわち溝の表面積が大きいほど高い効果が得られるためである。

20

30

#### 【0017】

そこで、本発明者らは、板幅方向に連続的に形成させた溝において、更に鉄損を改善する方法について鋭意検討を行った。

#### 【0018】

鋼板に線状溝を形成する際、一つの溝形成機構のみで線状溝を形成すると、処理能力が不足するため、製造ライン速度が制限されてしまう。このことから、一般に、複数の溝形成機構を用いて線状溝を形成させている。

#### 【0019】

したがって、図1(a)のように、鋼板の圧延方向と交差する方向に連続的に線状溝を形成させる場合、図1(b)に示すような複数の線状溝同士の継ぎ目が存在する。この継ぎ目における、線状溝の圧延方向領域長さ（溝幅）の中心を通り溝形成方向に平行な線（線状溝の中心線P）同士の相対位置を変動させたところ、前記中心線P同士の位置が一致する場合（前記中心線P同士が一直線上にある場合）に比べて、変動させた（ずらした）場合はより高い鉄損改善効果が得られることを発見した。

40

#### 【0020】

本知見について詳細な原理は明らかとなっていないが、発明者らは以下のメカニズムによってもたらされたものと推定している。

#### 【0021】

溝を形成した方向性電磁鋼板は、溝を形成した後に焼鈍分離剤を塗布して最終焼鈍を行

50

っている。この最終焼鈍は、鋼板の二次再結晶と、フォルステライト被膜の形成を目的としており、この時、溝底部にもフォルステライト被膜が形成される。そして、このフォルステライト被膜が緻密に形成されると、被膜張力の増加によって、鉄損が改善することが知られている。図1(b)に示すような、中心線Pが平行ではあるが同一直線上にはない箇所(中心線が並行して存在する領域:中心線の不連続部)が一つの線状溝につき少なくとも1つは存在するような形状の溝を形成させた後、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を鋼帯表面に塗布し、コイル状に巻き取って二次再結晶及びフォルステライト被膜の形成を目的とした最終焼鈍を施す際に、前記線状溝の中心線の不連続部において、雰囲気ガスの滞留が発生し、緻密なフォルステライト被膜が形成されて、鉄損が改善したものと推定している。

10

#### 【0022】

一方、線状溝の中心線P同士の相対位置を一致させた状態(前記中心線Pが同一直線上にある状態)において、最終焼鈍中の雰囲気ガスの流量を低下させた場合には、同様の効果は確認できなかった。これは、溝が一直線状であるために、雰囲気ガスの流通性が高く、フォルステライト被膜の形成反応が促進されなかったためと考えられる。

#### 【0023】

次いで、本発明者らはこのような中心線の不連続部を有する形状の溝を形成する最も適した方法について検討を行った。溝の形成方法としては、生産性や占積率の観点から、電解エッチング法を採用した。また、溝形状の良好性の観点から、レジストパターンの作成方法として、グラビア印刷法、インクジェット印刷法、レジスト剥離法を比較検討したところ、最も高い鉄損改善効果が得られたレジスト剥離法を採用した。上記レジスト剥離法と電解エッチング法の組み合わせにおいて、上記形状の線状溝を与えるレジストパターン形成方法について鋭意検討を重ねた結果、以下の知見を得た。

20

#### 【0024】

(1) 鋼板の板幅方向に並べて設置した2台以上のレーザー照射装置からそれぞれ照射したスポット径の2本以上のレーザーを用いて、鋼板表面に形成したレジストを板幅方向に分担して連続的に除去する際、隣接する2台のレーザー照射装置からそれぞれ照射する2本のレーザーのレーザー中心を、圧延方向に0.05以上0.95以下ずらしてレーザーを照射してレジスト除去を行った後、電解エッチングを行うことで、最終焼鈍時に雰囲気ガスを滞留させる中心線の不連続部を有する線状溝を形成することができる。

30

#### 【0025】

(2) レジスト剥離法では、隣接する2本のレーザーにより照射された部分が重なった領域(以後、「レーザー照射部の重なり部」ともいう)には、図2に示すように熔融部が形成され、電解エッチング後に熔融部の溝深さが非熔融部よりも減少するため、グラビア印刷法やインクジェット印刷法に比べて、中心線の不連続部における最終焼鈍の雰囲気ガスの流通性が低下する。したがって、レジスト剥離法では他手法に比べ、高い鉄損改善効果が得られる。

#### 【0026】

(3) 上記(1)と(2)の効果により、グラビア印刷法等によって形成した溝パターンに比べ、高い鉄損改善効果を得られる。

40

#### 【0027】

(4) 隣接する2本のレーザーによるレーザー照射部の重なり部のレーザー走査方向の長さが長いほど、エッチングされる体積が増加するため、前記重なり部のレーザー走査方向の長さは50mm以下とすることが望ましい。

#### 【0028】

(5) レーザーの照射エネルギーは、高いほどレジスト除去や熔融部形成に有利であるため、高出力であるほど好ましい。しかしながら、照射エネルギーを過度に高めると、スパッタが発生し、周囲のレジストを損傷させてしまうおそれがあるため、照射エネルギーを30J/m以下とすることが好ましい。一方、1J/m未満の照射エネルギーで照射した場合、レーザー照射部のレジストを完全に除去できないおそれがある。以上を踏まえ、

50

レーザーの照射エネルギーは、 $1 \text{ J/m}$ 以上 $30 \text{ J/m}$ 以下とすることが好ましい。

【0029】

レーザーのスポット径は小さいほどエネルギー密度が増加するためにレジスト除去や溶融部の形成に有利となるが、スポット径を過剰に小さくするとスパッタによる周囲のレジストの損傷が発生するおそれがある。そのためレーザーのスポット径は $1 \mu\text{m}$ 以上とすることが好ましい。一方、レーザーのスポット径が大きくなると、エネルギー密度も低下する。レーザーのスポット径が $100 \mu\text{m}$ を超えると、レーザー照射部のレジストを完全に除去できないおそれがある。したがって、レーザーのスポット径は $1 \mu\text{m}$ 以上 $100 \mu\text{m}$ 以下とすることが好ましい。

【0030】

以上の知見に基づき、レジストパターンの形成条件について詳細な検討を行い、本発明を完成させるに至った。

【0031】

すなわち、本発明の要旨構成は次の通りである。

[1] 鋼板表面にレジストを形成するレジスト形成工程と、前記鋼板の圧延方向と交差する方向に走査しながらレーザーを照射することによって前記レーザーが照射された部分のレジストを除去するレーザー走査を、前記鋼板の圧延方向に周期的に行うレーザー照射工程と、前記レジストが除去された部分の鋼板をエッチングして線状溝を形成するエッチング工程とを有し、

前記レーザー照射工程では、前記鋼板の板幅方向に並べて設置した2台以上のレーザー照射装置からそれぞれ照射する2本以上のレーザーにより板幅方向に連続的にレジストを除去し、かつ、前記レーザーのスポット径をとしたとき、板幅方向に隣接する2台のレーザー照射装置からそれぞれ照射する2本のレーザーのレーザー中心を、レーザーの走査方向と直交する方向に $0.05$ 以上 $0.95$ 以下の範囲でずらして照射する、線状溝形成方法。

[2] 前記2本のレーザーにより照射された部分の重なり部のレーザー走査方向の長さを $50 \text{ mm}$ 以下とする、[1]に記載の線状溝形成方法。

[3] 前記レーザーのスポット径が $1 \mu\text{m}$ 以上 $100 \mu\text{m}$ 以下であり、かつ、前記レーザーの照射エネルギーが $1 \text{ J/m}$ 以上 $30 \text{ J/m}$ 以下である、[1]または[2]に記載の線状溝形成方法。

[4] 前記[1]～[3]のいずれかに記載の線状溝形成方法により、方向性電磁鋼板の表面に線状溝を形成する、方向性電磁鋼板の製造方法。

【発明の効果】

【0032】

本発明によれば、方向性電磁鋼板等の鋼板の表面に線状溝を形成する線状溝形成方法であって、鉄損低減効果と磁束密度に優れる線状溝形成方法を提供することができる。

【0033】

本発明の方向性電磁鋼板の製造方法によれば、方向性電磁鋼板の磁束密度の劣化を抑制しつつ、優れた鉄損低減効果を得ることができる。本発明の製造方法により製造された方向性電磁鋼板は、変圧器の鉄心用材料等として好適であり、特に巻鉄心用材料として好適である。

【図面の簡単な説明】

【0034】

【図1】図1(a)は圧延方向と交差する方向に連続的に形成された線状溝の形状を説明する図であり、図1(b)は中心線の不連続部を有する線状溝の形状を説明する図である。

【図2】図2は、鋼板表面のレーザー照射部の重なり部において形成される溶融部を説明する図である。

【図3】図3は、光路のズレ率と鉄損との関係を示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図 4】図 4 は、光路の重なり長と鉄損との関係を示すグラフである。

【図 5】図 5 は、照射エネルギーと減重量率との関係を示すグラフである。

【図 6】図 6 は、レーザースポット径と減重量率との関係を示すグラフである。

【図 7】図 7 は、実施例で形成したレジストパターンの一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0035】

まず、本発明を完成させるに至った実験結果について説明する。

【0036】

初めに、電解エッチングによる溝形成のためのレジストパターン形成方法の検討を行った。レジスト剥離法、グラビア印刷法、インクジェット印刷法のそれぞれの手法で形成させたレジストパターンに電解エッチングを施すことで、図 1 (b) に示す中心線の不連続部を有する溝を、方向性電磁鋼板の冷延鋼帯の全面に形成させた。この時、中心線の不連続部における中心線 P のズレ量 (中心線の不連続部における中心線 P 同士の溝幅方向の距離、図 1 (b) 中の  $s$ )、中心線の不連続部の溝形成方向長さ、溝深さ (溝の板厚方向の形成深さ) は同一となるようにした。

【0037】

このようにして線状溝を形成し、アルカリ液中で表面に残存するレジストを除去し、脱炭焼鈍を施した後、MgO を主成分とする焼鈍分離剤を塗布し、次いでコイル状に巻き取って、最終焼鈍を施した。最終焼鈍を施した後の鋼帯に対して、平坦化焼鈍を行い、鋼帯表面に張力被膜を形成して最終製品の鋼帯とした。得られた鋼帯から板幅方向に 100 mm、圧延方向に 280 mm のサイズの鋼板を切り出し、磁気特性の評価を行った。鋼板の磁気特性の評価は、鉄損  $W_{17/50}$  と磁束密度  $B_8$  を用いた。 $W_{17/50}$  とは、鋼板の圧延方向に 1.7 T、50 Hz の交番磁化を与えたときの鉄損値を意味し、また、 $B_8$  とは、磁化力 800 A/m で圧延方向に磁化した時の磁束密度を意味する。

【0038】

各レジストパターン形成方法の鉄損  $W_{17/50}$  と  $B_8$  を表 1 に示す。レジスト剥離法において、最も高い鉄損改善効果が確認できた。これは、レジスト剥離法では、レーザーによって鋼板のレジストを除去した際に図 2 に見られるような溶融部が形成されたため、電解エッチング後の該当部の溝深さが他の部分よりも浅く形成される。この結果、中心線の不連続部において、最終焼鈍の雰囲気ガス流路の断面積が減少するため、他の手法よりもガスの流通性が低下する。これによって、より緻密なフォスファイト被膜が形成され、高い鉄損改善効果を発現したものと考えられる。一方、グラビア印刷法では、他手法に比べ、鉄損改善効果が小さく、 $B_8$ 、すなわち透磁率も低下しているが、これは、前述の溝途切れや白斑点に起因するものである。

【0039】

【表 1】

No.	レジストパターン 形成方法	鉄損 $W_{17/50}$ [W/kg]	$B_8$ [T]
1	レジスト剥離法	0.690	1.930
2	インクジェット印刷法	0.700	1.930
3	グラビア印刷法	0.710	1.920

【0040】

次に、方向性電磁鋼板の冷延鋼帯の全面に、レジストインクを塗布してレジストを形成し、これに前記冷延鋼帯の板幅方向に隣接して設置したレーザー照射装置から照射した 2 本のレーザーを用いてレジストパターンの形成を行った。この際、レーザーのスポット径に対して、隣接する 2 本のレーザーのレーザー中心をレーザー走査方向と直交する方向にずらして照射した。このときの 2 本のレーザー中心間のレーザー走査方向と直交する方向

の距離（以後、「光路のズレ量  $d$ 」ともいう（図 2 参照））を様々に変えてレジストの除去を行った後、溝深さは一定となるように電解条件を調整して電解エッチングを施して溝の形成を行った。この時レーザーのスポット径は  $100\ \mu\text{m}$  とし、照射エネルギーは  $20\ \text{J/m}$  とした。また、隣接する 2 本のレーザーのレーザー照射部の重なり部のレーザー走査方向の長さ（以後、「光路の重なり長  $c$ 」ともいう（図 2 参照））は  $10\ \text{mm}$  で一定とした。なお、本発明において、レーザーのスポット径とは、レーザーの強度プロファイルにおける半値幅で定義する。また、レーザーのスポット径は、レーザー走査方向と直交する方向のスポット径とする。

#### 【0041】

このようにして線状溝を形成し、アルカリ液中で表面に残存するレジストを除去した、方向性電磁鋼板の冷延鋼帯に脱炭焼鈍を施した後、上記と同様のプロセスを以て、最終製品の鋼帯とし、得られた鋼帯から板幅方向に  $100\ \text{mm}$ 、圧延方向に  $280\ \text{mm}$  の S S T サイズの鋼板を切り出し、 $W_{17750}$ 、 $B_8$  の評価を行った。結果を図 3 に示す。なお、図 3 中、スポット径に対する光路のズレ率とは、光路のズレ量  $d$  をスポット径で除した割合を指す。図 3 から、光路のズレ率が  $0.05$  以上の時、大きな鉄損改善効果が確認できる。これは、鋼帯をコイル状に巻き取った後、最終焼鈍を施す際に、板幅方向に連続的に形成された線状溝中に流れる最終焼鈍の雰囲気ガスが、中心線の不連続部に滞留した結果、フォルステライト被膜の形成反応が促進され、緻密な組織となったためと考えている。また、光路のズレ率が  $1.0$  以上、すなわち溝が連続的な直線状でなくなった時、鉄損改善効果が大きく劣化した。これは、溝が連続的な直線状ではなくなったために、雰囲気ガスの流通が遮断され、上記効果が得られなかったためと考えられる。

#### 【0042】

一方、磁束密度 ( $B_8$ ) は、光路のズレ率が  $0.95$  を超えると劣化する傾向が確認された。これは、光路のズレ量  $d$  の増加によって、エッチングされる体積が増加したことで、鋼板の透磁率が低下したためと考えている。

#### 【0043】

以上の結果から、光路のズレ率の適正範囲は  $0.05$  以上  $0.95$  以下とした。より好ましくは、 $0.10$  以上  $0.90$  以下である。

#### 【0044】

続いて、レーザースポット径、光路のズレ量  $d$ 、溝深さを一定として、光路の重なり長  $c$  を様々に変化させた最終製品の鋼帯を上記と同様のプロセスにて作製し、得られた鋼帯から上記と同様のサイズの鋼板を切り出し、磁気特性の調査を行った。結果を図 4 に示す。光路の重なり長  $c$  が  $50\ \text{mm}$  以下の時に、大きな鉄損改善効果が確認できている。これは、先述と同様に、中心線の不連続部における、雰囲気ガスの滞留によって緻密なフォルステライト被膜が形成されたためと考えている。一方、光路の重なり長  $c$  を  $50\ \text{mm}$  よりも長くした場合には、鉄損改善量の劣化が見られた。これは、光路の重なり長  $c$  が広がったことで、雰囲気ガスの流通性が向上し、緻密なフォルステライト被膜が形成されにくくなったためと考えている。更に、光路の重なり長  $c$  が  $50\ \text{mm}$  よりも長い場合には、 $B_8$  の劣化も確認された。これは、光路の重なり長が長くなったことで、溝の体積が増加したことによるものと思われる。以上のことから、光路の重なり長  $c$  は  $50\ \text{mm}$  以下が好ましい。なお、連続的な線状溝とすることから、光路の重なり長  $c$  は  $0\ \text{mm}$  以上である。光路の重なり長  $c$  は、 $0.1\ \text{mm}$  以上が好ましい。また、光路の重なり長  $c$  は、 $40\ \text{mm}$  以下がより好ましい。

#### 【0045】

次いで、適正なレーザーの照射条件の検討を行った。重量測定済みの方向性電磁鋼板の冷延鋼板表面にレジストインクを全面塗布してレジストを形成し、1 台のレーザー照射装置による 1 本のレーザーを用いて線状にレジストパターンを形成し、電解エッチングを施した。この時、電解エッチングにより形成される溝深さは一定となるように電解条件を制御した。電解エッチング後の鋼板に残存するレジストを除去した後、重量測定を行い、電解エッチングによって減少した鋼板の重量（減重量）を算出した。この減重量を、溝幅、

溝深さ、線状溝の本数から算出した重量で除した値、すなわち減重量率を指標として、適正なレーザー照射条件を調査した。なお、この減重量率は、1.0に近いほど溝途切れや白斑点といった溝形成不良が少ないことを意味する。レーザー照射は、(1)スポット径100 $\mu$ mのレーザーで照射エネルギーを0.5~35J/mと変化させた場合と、(2)照射エネルギーを20J/mで固定して、スポット径を0.5~120 $\mu$ mと変化させた場合で行った。ここで照射エネルギーは、単位走査長さ当たりのエネルギー(レーザー出力(W)/走査速度(m/sec))で評価した。

【0046】

(1)の結果を図5に示す。照射エネルギーが1J/m未満の場合、減重量率が1.0を大きく下回ることが示された(図5(a)参照)。これは、レジストの除去が十分に行えず、電解領域が減少したためと考えられる。一方、照射エネルギーが30J/mを超えると、減重量率が1.0を超過する傾向が示された(図5(b)参照)。これは、照射エネルギーの増加によって鋼板からスパッタが飛散し、周囲のレジストが損傷したことにより、線状溝以外の領域においても電解が進行し、白斑点が形成されたためと考えられる。このような電解領域の不足や白斑点の形成は鉄損の劣化を招き、白斑点は更に透磁率の劣化も招くため、好ましくない。以上の結果から、照射エネルギーは1J/m以上30J/m以下が好ましい。

10

【0047】

続いて(2)の結果を図6に示す。レーザーのスポット径が1 $\mu$ m未満の場合、減重量率が1.0を超過する傾向が示された(図6(a)参照)。これは、エネルギー密度の増加によって鋼板から飛散したスパッタが、周囲のレジストを損傷したために、線状溝以外の領域においても電解が進行し、白斑点が形成されたためと考えられる。一方、レーザーのスポット径が100 $\mu$ mを超えると、減重量率が1.0を大きく下回ることが示された(図6(b)参照)。これは、エネルギー密度の低下によってレジストの除去が十分に行えず、電解領域が減少したためと考えられる。このような電解領域の不足や白斑点の形成は鉄損の劣化を招き、白斑点は更に透磁率の劣化も招くため、好ましくない。以上の結果から、レーザースポット径は1 $\mu$ m以上100 $\mu$ m以下が好ましい。

20

【0048】

以下に、本発明の好適な実施形態について詳細に説明する。ただし、本発明は本実施形態に開示の構成のみに限定されることなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の変更が可能である。

30

【0049】

[方向性電磁鋼板]

本発明を適用する方向性電磁鋼板用の鋼素材(スラブ)の基本成分、インヒビター成分および任意添加成分、製造工程について具体的に述べる。

【0050】

(基本成分)

C: 0.08質量%以下

Cは、熱延板組織の改善のために添加するが、Cの含有量が0.08質量%を超えると製造工程中に磁気時効の起こらない50質量ppm以下まで脱炭することが困難となるため、C含有量は0.08質量%以下とすることが望ましい。また、Cを含まない鋼素材でも二次再結晶することから、C含有量の下限については特に設けない。

40

【0051】

Si: 2.0~8.0質量%

Siは、鋼の電気抵抗を増大させ、鉄損を改善するのに有効な元素であるが、含有量が2.0質量%未満ではその改善効果が十分に発揮されず、一方8.0質量%を超えると加工性、通板性が著しく劣化することに加え、磁束密度も低下する。そのため、Si含有量は2.0~8.0質量%の範囲とすることが望ましい。

【0052】

Mn: 0.005~1.0質量%

50

Mnは、熱間か構成を向上させるうえで必要な元素であるが、含有量が0.005質量%未満ではその効果を十分に得ることが出来ず、一方1.0質量%を超えると磁束密度が劣化する。そのため、Mnの含有量は0.005～1.0質量%の範囲とすることが好ましい。

#### 【0053】

(インヒビター成分)

本発明において、方向性電磁鋼板のスラブの成分組成は、二次再結晶が生じる成分組成であればよい。二次再結晶が生じさせるためにインヒビターを利用する場合、例えばAl-N系インヒビターを利用する場合であればAlおよびNを、またMnS・MnSe系インヒビターを利用する場合であれば、MnとS及び/またはSを適量含有させればよい。

10

もちろん両インヒビターを併用してもよい。この場合における、Al、N、S及びSeの好適含有量はそれぞれ、  
 Al：0.010～0.065質量%  
 N：0.0050～0.0120質量%  
 S：0.005～0.030質量%  
 Se：0.005～0.030質量%  
 である。

#### 【0054】

さらに、本発明は、Al、N、S、Seの含有量を制限した、インヒビターを使用しない方向性電磁鋼板にも適用することができる。この場合には、Al、N、S、Seの含有量はそれぞれ、

20

Al：0.010質量%以下  
 N：0.0050質量%以下  
 S：0.0050質量%以下  
 Se：0.0050質量%以下  
 に抑制することが好ましい。

#### 【0055】

上記の基本成分やインヒビター成分以外に、磁気特性改善に有効であることが知られている、下記任意添加成分を適量含有させることができる。

Ni：0.03～1.50質量%  
 Sn：0.01～1.50質量%  
 Sb：0.005～1.50質量%  
 Cu：0.03～3.0質量%  
 P：0.03～0.50質量%  
 Mo：0.005～0.10質量%  
 Cr：0.03～1.50質量%のなかから選ばれる1種以上

30

#### 【0056】

Niは、熱延板組織を改善して磁気特性を向上させるために有効な元素である。しかしながら、含有量が0.03質量%未満では磁気特性への貢献は小さく、一方1.50質量%を超えると二次再結晶が不安定となり磁気特性が劣化する。そのためNiの含有量は0.03～1.50質量%の範囲とすることが望ましい。

40

#### 【0057】

また、Sn、Sb、Cu、P、Mo、Crも、磁気特性を向上させる元素であるが、いずれも、含有量が、上記の下限未満ではその効果は十分ではなく、また上限を超えると二次再結晶粒の成長が抑制されるために磁気特性が劣化する。そのためそれぞれ上記の含有量の範囲とすることが好ましい。

#### 【0058】

また上記成分以外はFe及び不可避免的不純物からなる。なお、製品板においては、基本成分および任意添加成分は鋼素材(スラブ)において含有させた量がそのまま製品板にも含有される。一方、インヒビター成分は後述の最終焼鈍にて純化され、製品板では不可避

50

的不純物程度の含有量に低減される。

【0059】

上記の成分系からなる方向性電磁鋼板の鋼素材（スラブ）に、熱間圧延を施した後、熱延板焼鈍を行う。次いで1回または2回以上の冷間圧延を施して、最終板厚の鋼帯に仕上げる。その後、前記鋼帯に、脱炭焼鈍を施し、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を塗布した後、コイル状に巻き取って、2次再結晶及びフォルステライト被膜の形成を目的とした最終焼鈍を施す。最終焼鈍後の鋼帯に対し、平坦化焼鈍を施した後、リン酸マグネシウム系の張力被膜を形成させて製品板の鋼帯とする。

【0060】

本発明においては、冷間圧延後、焼鈍分離剤塗布前の任意の工程において、方向性電磁鋼板（鋼帯）の表面に線状溝を形成させる。

10

【0061】

[溝寸法]

下記に、本発明によって形成する溝の好適な溝寸法を示す。ここで溝寸法とは、溝幅、溝深さに加え、方向性電磁鋼板（鋼帯）の圧延方向に周期的に形成する溝同士の間隔及び、線状溝の延伸方向と板幅方向の成す角を意味する。

【0062】

溝幅：1～100μm

線状溝の溝幅は、レジストパターンのレジスト除去部（レーザー照射部）の圧延方向での幅に対応する。また、このレジスト除去部の幅はレジスト除去に用いたレーザーのスポット径に対応する。したがって、溝幅は1μm～100μm程度となる。

20

【0063】

溝深さ：板厚に対して4～25%

溝形成による鉄損改善効果は、溝端部の表面積、すなわち溝の形成深さが大きい（深い）ほど高い効果が得られる。したがって、板厚に対して4%以上の深さの溝を形成させることが好適である。一方、溝深さを増していくと、当然溝の体積も増加し、透磁率が劣化する傾向となる。さらに、通板時に溝部を起点に破断のリスクがある。以上を踏まえ、溝深さの上限を板厚に対して25%とするのが好適である。

【0064】

線状溝の形成間隔：1.5～10mm

先述の通り、鉄損改善効果は溝端部の表面積が大きいほど向上するため、線状溝の形成間隔は狭いほど良好な結果を得られる。しかしながら、線状溝の形成間隔が狭まるにつれ、鋼板に対する溝の体積分率も増加し透磁率の劣化に加えて、操業時の破断のリスクも高まる。したがって、線状溝の形成間隔を1.5mm～10mmとするのが好適である。なお、線状溝の形成間隔は、圧延方向における線状溝同士の間隔である。

30

【0065】

線状溝の延伸方向と板幅方向の成す角：±30°以内

溝の延伸方向が板幅方向から傾くほど、溝の体積が増加するため、透磁率が劣化する傾向となる。したがって、線状溝の延伸方向と板幅方向の成す角は±30°以内とすることが好ましい。

40

【0066】

[レーザースポット径]

レーザースポット径は、幅30μmのスリットを用いてスリット法で取得した強度プロファイルの半値全幅を指す。

【実施例】

【0067】

次に実施例に基づいて本発明を具体的に説明する。以下の実施例は、本発明の好適な一例を示すものであり、本実施例によって何ら限定を受けるものではない。本発明の趣旨に適合しうる範囲で変更を加えて実施することも可能であり、そのような様態でも本発明の技術範囲に含まれる。

50

## 【 0 0 6 8 】

表 2 に示した成分系を含有し残部が F e 及び不可避免の不純物の成分組成を有する方向性電磁鋼板の鋼素材（スラブ）に熱間圧延を施し、熱延板焼鈍を行った。この後、中間焼鈍を挟む 2 回の冷間圧延を施して板厚 0 . 2 3 m m の冷延鋼帯とした。この冷延鋼帯の表面全体にレジストインクを塗布してレジストを形成した後、板幅方向に並べて設置した 2 台のレーザー照射装置による 2 本のレーザーを用いてレジスト除去を行った。この時、レジストパターンは図 7 に示すように、溝の圧延方向の形成間隔を 4 m m、溝の延伸方向と板幅方向の成す角を 1 0 ° となるように設定してレーザーを照射した。この際、レーザー照射部の重なり部が、圧延方向に並ぶようにレーザーの偏向量を調整し、さらに、光路のズレ率、および光路の重なり長 c、照射エネルギー、スポット径を種々に変化させてレジストパターンを鋼帯に形成した。また、電解エッチング条件は、溝深さが 2 0 μ m（ただし溶融部が形成された領域を除く）となる条件に設定した。溝形成後の鋼帯は、アルカリ液中で表面のレジストインクを除去した後、脱炭焼鈍を行い、M g O を主成分とする焼鈍分離剤を塗布し、コイル状に巻き取ったのち、最終焼鈍を施した。最終焼鈍後の鋼帯に対し、平坦化焼鈍を施した後、リン酸マグネシウム系の張力被膜を形成させ、最終製品鋼帯とした。

10

## 【 0 0 6 9 】

## 【表 2】

成分組成(質量%)							
C	Si	Mn	Al	N	Se	S	O
0.08	3.0	0.1	0.0260	0.007	0.0110	0.003	0.0025

## 【 0 0 7 0 】

こうして作製した鋼帯から、線状溝 1 つにつき 1 か所の中心線の不連続部を含むように、すなわち試料の切り出し範囲内に、線状溝の中心線の不連続部が含まれるように、R D : 2 8 0 m m × T D : 1 0 0 m m の寸法の試料を切り出し、S S T（単板磁気試験）方式で  $W_{17/50}$ 、 $B_8$  を測定した。ここで、R D は鋼板の圧延方向を、T D は板幅方向を意味する。

## 【 0 0 7 1 】

また、比較として、レジストパターンの形成を、グラビア印刷方式及びインクジェット印刷方式で行ったこと以外は、上記と同様のプロセスにて試料を作製し、 $W_{17/50}$ 、 $B_8$  を測定した。なお、グラビア印刷方式及びインクジェット印刷方式により形成した溝の溝幅は 5 0 μ m である。

30

## 【 0 0 7 2 】

結果を表 3 にまとめて示す。光路のズレ率が本発明の範囲にある時、他手法で同様のレジストパターンを作製した時に比べて高い鉄損改善効果が確認できる。加えて、光路の重なり長 c が 5 0 m m 以下の時、より高い鉄損改善効果が確認できる。更にレーザー照射条件が好適範囲にある時、更に高い鉄損改善効果を発現することが確認できる。

## 【 0 0 7 3 】

40

【表 3】

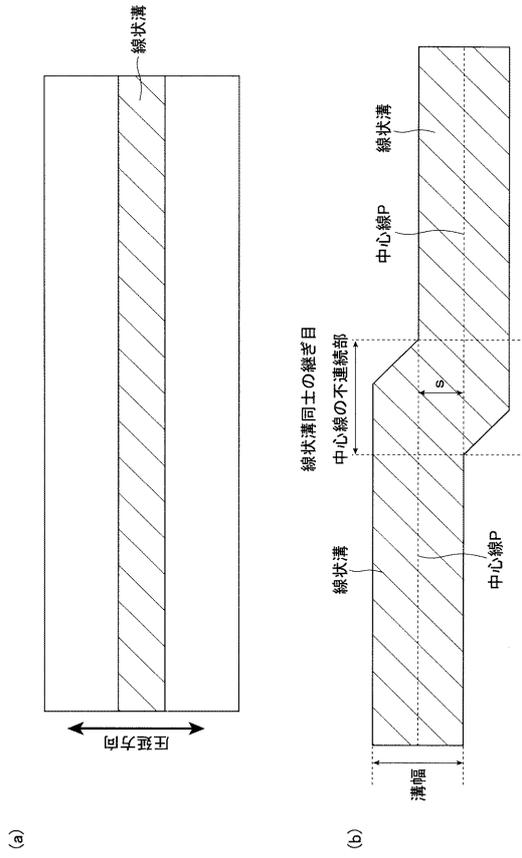
No.	光路のズレ率	光路の重なり長 $c$ [mm]	スポット径 [ $\mu$ m]	照射エネルギー [J/m]	レジストパターン 形成方法	鉄損 $W_{17/50}$ [W/kg]	$B_8$ [T]	備考
1	0	0	50	20	レジスト剥離法	0.710	1.930	比較例
2	0.05	0	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
3	0.1	0	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
4	0.5	0	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
5	0.9	0	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
6	0.95	0	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
7	1.0	0	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.920	比較例
8	0	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.700	1.930	比較例
9	0.05	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
10	0.1	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
11	0.5	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
12	0.9	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
13	0.95	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
14	1.0	0.1	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.920	比較例
15	0	10	50	20	レジスト剥離法	0.700	1.930	比較例
16	0.05	10	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
17	0.1	10	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
18	0.5	10	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
19	0.9	10	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
20	0.95	10	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
21	1.0	10	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.920	比較例
22	0	40	50	20	レジスト剥離法	0.700	1.930	比較例
23	0.05	40	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
24	0.1	40	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
25	0.5	40	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
26	0.9	40	50	20	レジスト剥離法	0.680	1.930	発明例
27	0.95	40	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
28	1.0	40	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.920	比較例
29	0	50	50	20	レジスト剥離法	0.710	1.930	比較例
30	0.05	50	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
31	0.1	50	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
32	0.5	50	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
33	0.9	50	50	20	レジスト剥離法	0.685	1.930	発明例
34	0.95	50	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
35	1.0	50	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.920	比較例
36	0	60	50	20	レジスト剥離法	0.710	1.925	比較例
37	0.05	60	50	20	レジスト剥離法	0.695	1.925	発明例
38	0.1	60	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.925	発明例
39	0.5	60	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.925	発明例
40	0.9	60	50	20	レジスト剥離法	0.690	1.925	発明例
41	0.95	60	50	20	レジスト剥離法	0.695	1.925	発明例
42	1.0	60	50	20	レジスト剥離法	0.695	1.910	比較例
43	0.1	10	0.5	20	レジスト剥離法	0.690	1.925	発明例
44	0.5	10	110	20	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
45	0.1	10	50	0.5	レジスト剥離法	0.690	1.930	発明例
46	0.5	10	50	35	レジスト剥離法	0.690	1.925	発明例
47	0.1 <sup>*1</sup>	10 <sup>*2</sup>	—	—	グラビア印刷法	0.710	1.920	比較例
48	0.5 <sup>*1</sup>	10 <sup>*2</sup>	—	—	グラビア印刷法	0.710	1.920	比較例
49	0.1 <sup>*1</sup>	10 <sup>*2</sup>	—	—	インクジェット印刷法	0.700	1.930	比較例
50	0.5 <sup>*1</sup>	10 <sup>*2</sup>	—	—	インクジェット印刷法	0.700	1.930	比較例

下線は、本発明の範囲外であることを示す。

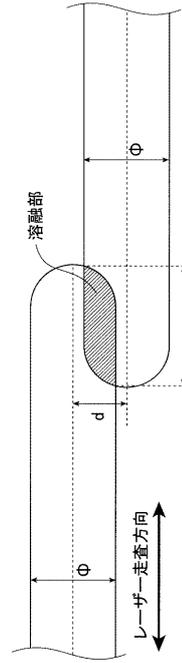
\*1 形成した溝の中心線の不連続部における中心線のズレ量/溝幅。光路のズレ率に相当。

\*2 形成した溝の中心線の不連続部の長さ。光路の重なり長 $c$ に相当。

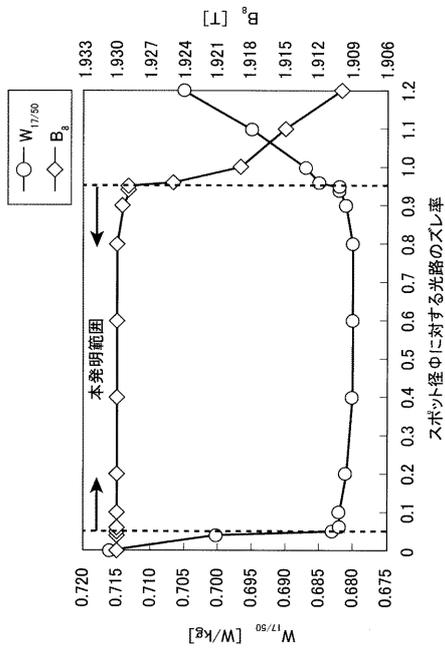
【 図 1 】



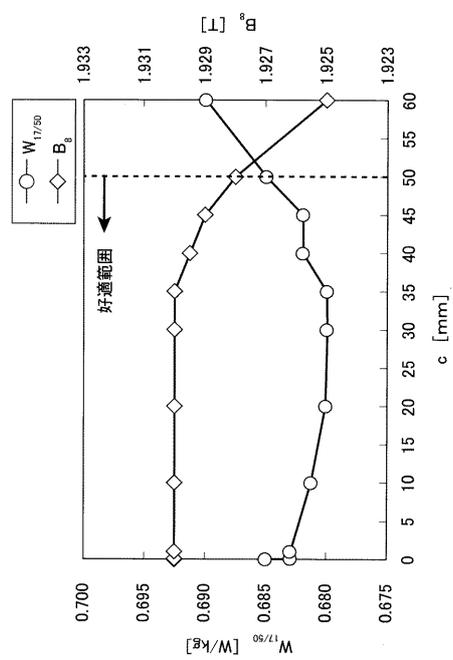
【 図 2 】



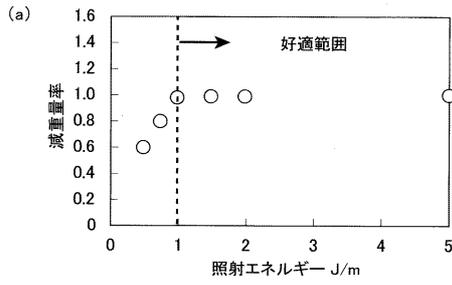
【 図 3 】



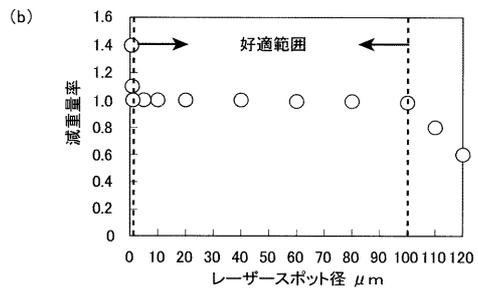
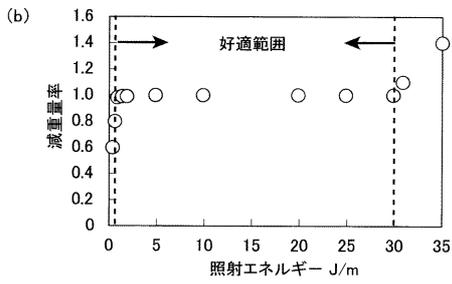
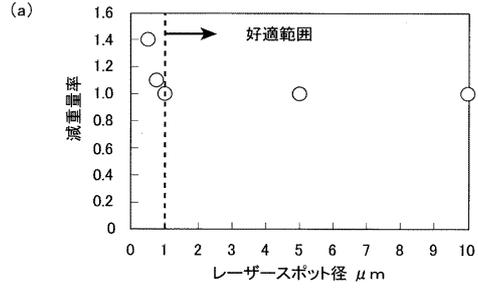
【 図 4 】



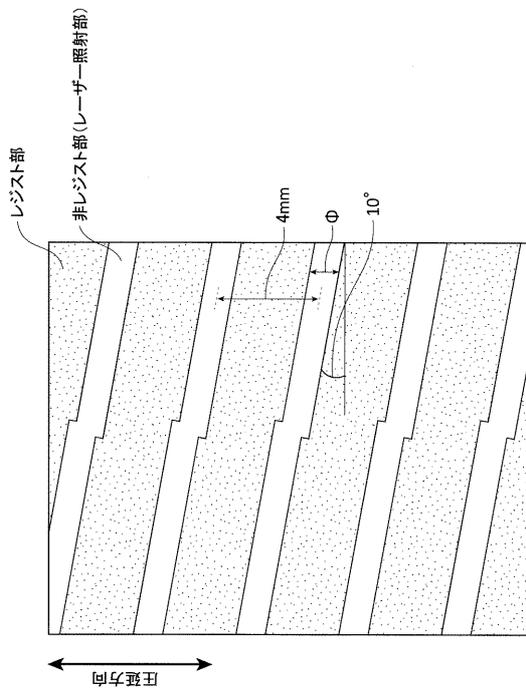
【図5】



【図6】



【図7】



---

フロントページの続き

(72)発明者 大村 健

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内

(72)発明者 井上 博貴

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内

(72)発明者 高 城 重宏

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内

F ターム(参考) 4E168 AD03 DA13 DA32

4K033 AA02 BA01 BA02 CA00 CA01 CA02 CA03 CA04 CA07 CA08

CA09 FA12 HA01 HA03 JA04 LA01 MA00 PA08 PA09 RA04

SA02 SA03 TA02 TA04 TA06

5E041 AA02 BD10 CA02 HB05 HB19 NN06