

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7614545号
(P7614545)

(45)発行日 令和7年1月16日(2025.1.16)

(24)登録日 令和7年1月7日(2025.1.7)

(51)国際特許分類		F I		
B 2 3 K	26/364 (2014.01)	B 2 3 K	26/364	
B 2 3 K	26/073 (2006.01)	B 2 3 K	26/073	
B 2 3 K	26/082 (2014.01)	B 2 3 K	26/082	
C 2 1 D	8/12 (2006.01)	C 2 1 D	8/12	D
請求項の数 15 (全40頁)				
(21)出願番号	特願2023-575320(P2023-575320)	(73)特許権者	000006655	
(86)(22)出願日	令和5年1月20日(2023.1.20)		日本製鉄株式会社	
(86)国際出願番号	PCT/JP2023/001757		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号	
(87)国際公開番号	WO2023/140363	(74)代理人	100149548	
(87)国際公開日	令和5年7月27日(2023.7.27)		弁理士 松沼 泰史	
審査請求日	令和6年4月11日(2024.4.11)	(74)代理人	100140774	
(31)優先権主張番号	特願2022-7442(P2022-7442)		弁理士 大浪 一徳	
(32)優先日	令和4年1月20日(2022.1.20)	(74)代理人	100134359	
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		弁理士 勝俣 智夫	
早期審査対象出願		(74)代理人	100188592	
			弁理士 山口 洋	
		(74)代理人	100217249	
			弁理士 堀田 耕一郎	
		(74)代理人	100221279	
			弁理士 山口 健吾	
				最終頁に続く

(54)【発明の名称】 方向性電磁鋼板、方向性電磁鋼板製造装置、及び方向性電磁鋼板製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

鋼板表面に沿って、圧延方向と、前記圧延方向に直交する板幅方向とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記圧延方向が、前記方向性電磁鋼板の磁化容易方向と一致しており、
前記鋼板表面に、前記板幅方向と交差する点列方向に沿って延在する点列溝を有し、
前記点列溝が、略楕円形の点状溝が複数、直線的に並んで構成され、
前記点状溝の長軸が、前記点列方向に対して交差しており、
前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm]とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm]としたときに、下記(式4)を満たす、
方向性電磁鋼板。

$$-0.3 \leq (D / d_c) \leq 0.2 \quad \cdots \text{(式4)}$$

ここで、前記間隔 D [μm]は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を0 [μm]とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【請求項2】

鋼板表面に沿って、圧延方向と、前記圧延方向に直交する板幅方向とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記圧延方向が、前記方向性電磁鋼板の磁化容易方向と一致しており、

前記鋼板表面に、前記板幅方向と交差する点列方向に沿って延在する点列溝を有し、
前記点列溝が、複数の穴が直線的に連なって形成された点群溝が複数、直線的に並んで
構成され、

前記点群溝の長軸が、前記点列方向に対して交差しており、

前記点列溝が前記板幅方向で2つ以上に分割されており、分割位置において互いに隣接
する前記点列溝の端部間の前記板幅方向に沿った間隔を $D a$ [mm] としたときに、下記
(式9) を満たす、

方向性電磁鋼板。

$$-10\text{ mm} \leq D a \leq 2\text{ mm} \quad \cdots (\text{式} 9)$$

ここで、前記間隔 $D a$ [mm] は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部
同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場
合を0 [μm] とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【請求項3】

前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θg [°] とし、前記点列方向が前記板幅
方向に対してなす角度を θs [°] としたときに、下記(式1)～(式3)を満たす、
請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

$$0^\circ \leq |\theta g| \leq 10^\circ \quad \cdots (\text{式} 1)$$

$$0^\circ < |\theta s| \leq 30^\circ \quad \cdots (\text{式} 2)$$

$$|\theta g| \leq |\theta s| \quad \cdots (\text{式} 3)$$

【請求項4】

前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θg [°] とし、前記点列方向が前記板幅
方向に対してなす角度を θs [°] としたときに、下記(式1)～(式3)を満たす、
請求項2に記載の方向性電磁鋼板。

$$0^\circ \leq |\theta g| \leq 10^\circ \quad \cdots (\text{式} 1)$$

$$0^\circ < |\theta s| \leq 30^\circ \quad \cdots (\text{式} 2)$$

$$|\theta g| \leq |\theta s| \quad \cdots (\text{式} 3)$$

【請求項5】

前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを $d c$ [μm] とし、前記長軸に直交する方
向を前記点状溝の短軸方向とし、前記点状溝の前記短軸方向に沿った長さを $d L$ [μm]
としたときに、下記(式5)及び(式6)を満たす、
請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

$$10\text{ }\mu\text{m} \leq d L \leq 300\text{ }\mu\text{m} \quad \cdots (\text{式} 5)$$

$$d L \leq d c \quad \cdots (\text{式} 6)$$

【請求項6】

前記点状溝の最大深さを h [μm] としたときに、下記(式7)を満たす、
請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

$$5\text{ }\mu\text{m} \leq h \leq 100\text{ }\mu\text{m} \quad \cdots (\text{式} 7)$$

【請求項7】

前記鋼板表面上に、前記点列溝が複数本、前記圧延方向に等間隔で形成され、
互いに隣接する前記点列溝の前記圧延方向に沿った間隔を $P L$ [mm] としたときに、
下記(式8)を満たす、
請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

$$1\text{ mm} \leq P L \leq 10\text{ mm} \quad \cdots (\text{式} 8)$$

【請求項8】

前記鋼板表面上に、前記点列溝が複数本、前記圧延方向に等間隔で形成され、
互いに隣接する前記点列溝の前記圧延方向に沿った間隔を $P L$ [mm] としたときに、
下記(式8)を満たす、
請求項2に記載の方向性電磁鋼板。

$$1\text{ mm} \leq P L \leq 10\text{ mm} \quad \cdots (\text{式} 8)$$

【請求項9】

10

20

30

40

50

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して請求項 1, 3, 5～7 のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光のなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学系と、

前記第 1 光学系で調整された前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

前記走査ミラーで反射した前記レーザ光を透過または反射し、前記鋼板表面に集光させる第 2 光学系と、

を有し、

前記第 1 光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 2 光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [$^\circ$] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [$^\circ$] としたときに、下記（式 10）および（式 11）を満たす、

方向性電磁鋼板製造装置。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots \text{（式 10）}$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \quad \dots \text{（式 11）}$$

【請求項 10】

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して請求項 1, 3, 5～7 のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学系と、

前記第 1 光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第 2 光学系と、

前記第 2 光学系を透過した前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

を有し、

前記第 1 光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 2 光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [$^\circ$] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [$^\circ$] としたときに、下記（式 12）および（式 13）を満たす、

10

20

30

40

50

方向性電磁鋼板製造装置。

$$Pc = D + dc \times \cos \theta g \quad \dots (式 12)$$

$$Pc / \cos \theta s = (Vs / Fs) \times 10^6 \dots (式 13)$$

【請求項 11】

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して請求項 2, 4, 8 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学系と、

前記第 1 光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換するビーム強度分布変換素子と、

前記ビーム強度分布変換素子で変換された前記連続したスポット光を反射することで進行方向を変化させ、前記連続したスポット光の群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

前記走査ミラーで反射した前記連続したスポット光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第 3 光学系と、

を有し、

前記第 1 光学系は、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 3 光学系で前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を Fs [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を Vs [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を Pc [μm] とし、前記点群溝の前記長軸の方向に沿った長さを dc [μm] とし、互いに隣接する前記点群溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θg [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θs [°] としたときに、下記 (式 14) および (式 15) を満たす、

方向性電磁鋼板製造装置。

$$Pc = D + dc \times \cos \theta g \quad \dots (式 14)$$

$$Pc / \cos \theta s = (Vs / Fs) \times 10^6 \dots (式 15)$$

【請求項 12】

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して請求項 1, 3, 5～7 のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第 1 工程と、

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光の進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第 2 工程と、

前記スポット光を前記鋼板表面に集光させる第 3 工程と、
を有し、

前記第 1 工程では、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 3 工程では、前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する、

方向性電磁鋼板製造方法。

【請求項 13】

前記レーザ光のパルス周波数を Fs [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット

光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [$^\circ$] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [$^\circ$] としたときに、下記（式 16）および（式 17）を満たす、

請求項 12 に記載の方向性電磁鋼板製造方法。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots \text{（式 16）}$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots \text{（式 17）}$$

【請求項 14】

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して請求項 2, 4, 8 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第 4 工程と、

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換する第 5 工程と、

前記連続したスポット光の前記群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第 6 工程と、

前記連続したスポット光を前記鋼板表面に集光させる第 7 工程と、
を有し、

前記第 5 工程では、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 7 工程では、前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する、
方向性電磁鋼板製造方法。

【請求項 15】

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点群溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点群溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [$^\circ$] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [$^\circ$] としたときに、下記（式 16）および（式 17）を満たす、

請求項 14 に記載の方向性電磁鋼板製造方法。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots \text{（式 16）}$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots \text{（式 17）}$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、方向性電磁鋼板と、方向性電磁鋼板製造装置と、方向性電磁鋼板製造方法とに関する。

本願は、2022 年 1 月 20 日に、日本国に出願された特願 2022-007442 号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

方向性電磁鋼板（以下、単に鋼板と呼ぶ場合がある）の表面に溝を形成する磁区制御プロセスが実用化されている。この磁区制御では、鉄損の低減と、高い耐繰返し曲げ特性と、発生し得る磁束密度低下の抑制と、の 3 つの性能因子が特に重要である。

すなわち、鋼板を曲げて巻きトランス鉄芯を製造する場合、鉄損を低減できれば、電力ロスが低減できる。また、耐繰返し曲げ特性を向上できれば、鋼板がその曲げ加工部で破

10

20

30

40

50

断するリスクを低減できる。さらに、発生し得る磁束密度低下を抑制できれば、製造する巻きトランス鉄芯を小型化することができる。

【0003】

例えば、方向性電磁鋼板の表面に溝を形成して鉄損を低減させる方法において、方向性電磁鋼板の磁化容易方向は圧延方向に一致しているため、溝の形成方向を、圧延方向に対して垂直な方向（すなわち板幅方向に平行な方向）にする場合、鉄損低減効果が最も高くなる。しかし、この場合、曲げ加工時の破断リスクが最も大きくなる。更に、溝は、同じ磁化力を印加した場合に発生し得る磁束密度を低下させる問題もある。

ここで、巻きトランス鉄心の重要な性能因子である鉄損の数値は、一般に、 $W17/50$ によって規定される数値が使われる。この数値は、交流周波数が 50 Hz である交流磁場によって鋼板内の磁束密度が 1.7 T （テスラ）になるまで強制的に磁化力を鋼板に印加した際の、鋼板単位重量（ 1 kg ）あたりの電力損失であり、 W/kg の単位で示される。

【0004】

また、一定の磁化力を鋼板に印加した際に発生し得る磁束密度も、方向性電磁鋼板としての重要な性能因子であり、一般に、 $B8$ で規定される数値が使われる。この数値は、 800 A/m の磁化力を鋼板に印加した際に発生する磁束密度であり、 T （テスラ）の単位で示される。

【0005】

上記鉄損の観点では $W17/50$ の数値が低い方が好ましく、その一方で上記磁束密度の観点では $B8$ の数値が高い方が好ましい。そこで、これら数値を共に好ましいものとするべく、機械加工、またはエッチングによる化学的加工、あるいはレーザー光による加工を用いて、鋼板表面に連続溝を形成する方法が種々考案された。

例えばレーザー加工法では、 1 m 程度あるコイルの板幅方向を $4\sim10$ か所の区分に分割し、各部に対応する位置にレーザー加工装置を配置して連続溝を各部毎に形成する方法が知られている。また楕円スポット光を走査して溝を形成する方法も知られている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】国際公開第 $2016/171129$ 号

【文献】国際公開第 $2017/171013$ 号

【文献】国際公開第 $2016/171130$ 号

【文献】国際公開第 $97/024466$ 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

例えば、上記特許文献1、2に開示される技術では、コイルの板幅方向に分割された各部の連続溝の形成方向を、圧延方向に対して傾斜させている。この場合、鋼板の耐曲げ特性は優れるが、鉄損低減効果が少ない。また連続的に溝を形成しているため、磁束密度の低下は避けられない。

【0008】

また、上記特許文献3では、分割された各部での溝形成方向を、圧延方向に対してほぼ垂直としている。この場合、鉄損低減効果は高いが、耐曲げ特性が劣化する。また、磁束密度の低下も避けられない。

ここで、線状溝を板幅方向において $4\sim5$ ヶ所程度の区分に分割する場合は、互いに隣接する線状溝間の部分の表面に、溝が形成されない箇所が形成される。そのため、溝が無い箇所での磁束密度低下は少ない。しかし、そのような箇所は板幅方向で数ヶ所しかないため、板全体で均一に磁束密度低下を抑制することはできない。なお、巻きトランス鉄芯に使用する鋼板は、その板幅方向において $100\text{ mm}\sim300\text{ mm}$ 程度に切断して使用するため、鋼板の幅方向における特性が均一であることが望ましい。

10

20

30

40

50

【0009】

また、上記特許文献4には、方向性電磁鋼板の表面に凹みを、列をなすように形成する方法が開示されている。この場合、互いに隣接する凹み間には溝が形成されない（あるいは溝が浅い）ため、磁束が通過しやすく、板幅方向の各位置でほぼ均一な磁束密度の低下抑制が期待できる。しかし、各凹みの両端同士が互いに接して数珠つなぎとなる点列溝では、その形成方向（延在方向）を圧延方向に垂直とすると、鉄損改善効果が高いものの耐繰り返し曲げ特性が劣化する。

また、点列溝の形成方向を圧延方向に対して傾斜させると耐繰り返し曲げ特性は向上するが鉄損改善効果が低下するという問題がある。すなわち、従来の点列溝では、磁束密度の劣化代は抑えられても、鉄損抑制と耐繰り返し曲げ強度の両立は、連続溝の場合と同様に達成できなかった

よって、連続溝、あるいは従来の点列溝を形成する従来技術では、低い鉄損、高い耐繰り返し曲げ特性、及び高い磁束密度の3つ全てを同時に満足することはできなかった。

【0010】

本発明は、上述の問題に鑑みなされたものであり、方向性電磁鋼板の表面に溝を形成して鉄損を改善する磁区制御技術において、耐繰り返し曲げ加工性低下の抑制と、磁束密度低下の抑制と、鉄損の低減との3つの性能因子を同時に備える方向性電磁鋼板の提供を目的とする。また、この方向性電磁鋼板を製造可能とする、方向性電磁鋼板製造装置及び方向性電磁鋼板製造方法の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記課題を解決して係る目的を達成するために、本発明は以下の態様を採用した。

(1) すなわち、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、

鋼板表面に沿って、圧延方向と、前記圧延方向に直交する板幅方向とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記圧延方向が、前記方向性電磁鋼板の磁化容易方向と一致しており、

前記鋼板表面に、前記板幅方向と交差する点列方向に沿って延在する点列溝を有し、

前記点列溝が、略楕円形の点状溝が複数、直線的に並んで構成され、

前記点状溝の長軸が、前記点列方向に対して交差しており、

前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm]とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm]としたときに、下記(式4)を満たす。

$$-0.3 \leq (D/d_c) \leq 0.2 \quad \cdots (\text{式4})$$

ここで、前記間隔 D [μm]は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を0 [μm]とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0012】

(2) また、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板は、

鋼板表面に沿って、圧延方向と、前記圧延方向に直交する板幅方向とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記圧延方向が、前記方向性電磁鋼板の磁化容易方向と一致しており、

前記鋼板表面に、前記板幅方向と交差する点列方向に沿って延在する点列溝を有し、

前記点列溝が、複数の穴が直線的に連なって形成された点群溝が複数、直線的に並んで構成され、

前記点群溝の長軸が、前記点列方向に対して交差しており、

前記点列溝が前記板幅方向で2つ以上に分割されており、分割位置において互いに隣接する前記点列溝の端部間の前記板幅方向に沿った間隔を D_a [mm]としたときに、下記(式9)を満たす。

$$-10\text{mm} \leq D_a \leq 2\text{mm} \quad \cdots (\text{式9})$$

ここで、前記間隔 D_a [mm]は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部

10

20

30

40

50

同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を0〔μm〕とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0013】

(3) 上記(1)に記載の方向性電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g 〔°〕とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s 〔°〕としたときに、下記(式1)～(式3)を満たす。

$$0^\circ \leq |\theta_g| \leq 10^\circ \quad \dots (式1)$$

$$0^\circ < |\theta_s| \leq 30^\circ \quad \dots (式2)$$

$$|\theta_g| \leq |\theta_s| \quad \dots (式3)$$

(4) 上記(2)に記載の方向性電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g 〔°〕とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s 〔°〕としたときに、下記(式1)～(式3)を満たす。

$$0^\circ \leq |\theta_g| \leq 10^\circ \quad \dots (式1)$$

$$0^\circ < |\theta_s| \leq 30^\circ \quad \dots (式2)$$

$$|\theta_g| \leq |\theta_s| \quad \dots (式3)$$

【0014】

(5) 上記(1)に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c 〔μm〕とし、前記長軸に直交する方向を前記点状溝の短軸方向とし、前記点状溝の前記短軸方向に沿った長さを d_L 〔μm〕としたときに、下記(式5)及び(式6)を満たす。なお、長さ d_c 〔μm〕の最大値を30000μmとしてもよい。

$$10\mu m \leq d_L \leq 300\mu m \quad \dots (式5)$$

$$d_L \leq d_c \quad \dots (式6)$$

【0015】

(6) 上記(1)に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記点状溝の最大深さを h 〔μm〕としたときに、下記(式7)を満たす。

$$5\mu m \leq h \leq 100\mu m \quad \dots (式7)$$

【0016】

(7) 上記(1)に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記鋼板表面上に、前記点列溝が複数本、前記圧延方向に等間隔で形成され、

互いに隣接する前記点列溝の前記圧延方向に沿った間隔を PL 〔mm〕としたときに、下記(式8)を満たす。

$$1\text{mm} \leq PL \leq 10\text{mm} \quad \dots (式8)$$

(8) 上記(2)に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい。

前記鋼板表面上に、前記点列溝が複数本、前記圧延方向に等間隔で形成され、

互いに隣接する前記点列溝の前記圧延方向に沿った間隔を PL 〔mm〕としたときに、下記(式8)を満たす。

$$1\text{mm} \leq PL \leq 10\text{mm} \quad \dots (式8)$$

【0018】

(9) また、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記(1)、(3)、(5)～(7)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光のなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第1光学系と、

前記第1光学系で調整された前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

前記走査ミラーで反射した前記レーザ光を透過または反射し、前記鋼板表面に集光させ

10

20

30

40

50

る第2光学系と、
を有し、

前記第1光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第2光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記(式10)および(式11)を満たす。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (式10)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (式11)$$

【0019】

(10) また、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、
前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記(1)、(3)、(5)～(7)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第1光学系と、

前記第1光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第2光学系と、

前記第2光学系を透過した前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

を有し、

前記第1光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第2光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記(式12)および(式13)を満たす。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (式12)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (式13)$$

【0020】

(11) さらに、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、
前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して上記(2)、(4)、(8)の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第1光学系と、

前記第1光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換するビーム強度分布変換素子と、

前記ビーム強度分布変換素子で変換された前記連続したスポット光を反射することで進行方向を変化させ、前記連続したスポット光の群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと、

前記走査ミラーで反射した前記連続したスポット光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第3光学系と、

を有し、

前記第1光学系は、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第3光学系で前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点群溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点群溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記(式14)および(式15)を満たす。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (式14)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (式15)$$

【0021】

(12) また、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板製造方法は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記(1)、(3)、(5)～(7)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第1工程と、

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光の進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第2工程と、

前記スポット光を前記鋼板表面に集光させる第3工程と、

を有し、

前記第1工程では、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第3工程では、前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する。

(13) 上記(12)に記載の方向性電磁鋼板製造方法が、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った前記間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記(式16)および(式17)を満たしてもよい。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (式16)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (式17)$$

【0022】

(14) また、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造方法は、

10

20

30

40

50

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して上記（２），（４），（８）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の長軸の向きを調整する第４工程と、

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換する第５工程と、

前記連続したスポット光の前記群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第６工程と、

前記連続したスポット光を前記鋼板表面に集光させる第７工程と、
を有し、

前記第５工程では、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第７工程では、前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する。

【００２３】

（１５）上記（１４）に記載の方向性電磁鋼板製造方法は、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点群溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点群溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記（式１６）および（式１７）を満たしてもよい。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots \text{（式１６）}$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots \text{（式１７）}$$

【発明の効果】

【００２４】

本発明の上記各態様によれば、耐繰返し曲げ加工性の低下を抑制し、磁束密度の劣化を抑制した上で、鉄損も低減された方向性電磁鋼板を提供できる。また、この方向性電磁鋼板を製造する方向性電磁鋼板製造装置及び方向性電磁鋼板製造方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【００２５】

【図１】本発明の第１実施形態に係る方向性電磁鋼板を示す図であって、（Ａ）は方向性電磁鋼板の平面図であり、（Ｂ）は方向性電磁鋼板の上面に形成した点列溝を示す部分拡大図であって（Ａ）のＸ部の拡大図であり、（Ｃ）は同点列溝を構成する点状溝のうちの一つを、平面視及び同点状溝の長軸を含んでかつ鋼板表面に垂直な断面視した説明図であり、（Ｄ）は点状溝の拡大図であり、（Ｅ）は点状溝が、楕円集光されたスポット光の移動によって形成されることを説明する図である。

【図２】同第１実施形態に係る方向性電磁鋼板製造装置であるレーザ加工装置と、加工中の方向性電磁鋼板とを示す斜視図である。

【図３】同第１実施形態に係る方向性電磁鋼板における磁束の向きを示す図であって、（Ａ）が図１（Ｂ）に対応する部分の部分拡大図であり、（Ｂ）がＣ方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図であり、（Ｃ－１）及び（Ｃ－２）がＬ方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図である。

【図４】従来の溝を有する方向性電磁鋼板における磁束の向きを示す図であって、（Ａ）が同方向性電磁鋼板を平面視した部分拡大図であり、（Ｂ）がＣ方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図であり、（Ｃ－１）及び（Ｃ－２）がＬ方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図である。

【図５】従来の傾斜溝を有する方向性電磁鋼板における磁束の向きを示す図であって、（

A) が同方向性電磁鋼板を平面視した部分拡大図であり、(B) がC方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図であり、(C-1) 及び (C-2) がL方向から見た方向性電磁鋼板の部分拡大断面図である。

【図6】本発明の第2実施形態に係る方向性電磁鋼板製造装置であるレーザ加工装置と、加工中の方向性電磁鋼板とを示す斜視図である。

【図7】方向性電磁鋼板に繰り返し曲げを付与する際に用いる固定治具を示す図であって、(A) が繰り返し曲げを付与する状態を示す側面図であり、(B) が繰り返し曲げを付与した方向性電磁鋼板と点列溝との関係を示す斜視図である。

【図8】実施例を示す図であって、発明例の方向性電磁鋼板と比較例の方向性電磁鋼板それぞれの鉄損値 ($W17/50$) に関し、レーザ光の走査方向と方向性電磁鋼板の板幅方向とがなす走査角 θ_s による依存性を示すグラフである。

10

【図9】実施例を示す図であって、発明例の方向性電磁鋼板と比較例の方向性電磁鋼板それぞれの曲げ回数 N_b に関し、レーザ光の走査方向と方向性電磁鋼板の板幅方向とがなす走査角 θ_s による依存性を示すグラフである。

【図10】実施例を示す図であって、発明例の方向性電磁鋼板の鉄損値 ($W17/50$) に関し、走査角 θ_s を 10° に設定した場合の、レーザ光のスポット光の長軸の向きと方向性電磁鋼板の板幅方向とがなす傾斜角 θ_g による依存性を示すグラフである。

【図11】実施例を示す図であって、発明例の方向性電磁鋼板の鉄損値 ($W17/50$) に関し、走査角 θ_s を 30° に設定した場合の、レーザ光のスポット光の長軸の向きと方向性電磁鋼板の板幅方向とがなす傾斜角 θ_g による依存性を示すグラフである。

20

【図12】実施例を示す図であって、発明例の方向性電磁鋼板の鉄損値 ($W17/50$) に関し、走査角 θ_s を 10° 、傾斜角 θ_g を 0° に設定した場合の、 D/d_c による依存性を示すグラフである。

【図13】本発明の第3実施形態に係る方向性電磁鋼板製造装置であるレーザ加工装置と、加工中の方向性電磁鋼板とを示す側面図である。

【図14】同第3実施形態のレーザ加工装置で形成した点列溝を備えた方向性電磁鋼板を示す図であって、(A) は方向性電磁鋼板の平面図であり、(B) は方向性電磁鋼板の上面に形成した点列溝を示す部分拡大図であり、(C) は同点列溝を構成する点群溝のうちの一つを、平面視及び同点状溝の長軸を含んでかつ鋼板表面に垂直な断面視した説明図である。

30

【図15】走査ミラーとしてポリゴンミラーに替えて用いられるガルバノミラーの一例を示す斜視図である。

【図16】本発明の実施例4について板幅方向に分割して点列溝を形成する場合を示す説明図である。すなわち、(A) が方向性電磁鋼板の平面図であり、(B) が方向性電磁鋼板の上面に形成した点列溝を示す部分拡大図である。

【図17】本発明の実施例4において、方向性電磁鋼板の鉄損値 ($W17/50$) に関し、互いに隣接する点列溝間の距離 D_a による依存性を示すグラフである。

【図18】比較例としての従来技術の各種溝パターンと、本発明の溝パターンとを比較するための説明図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0026】

以下に、図面を参照しながら、本発明の好適な実施形態について説明する。

なお、以下の説明で用いる図面は、特徴をわかりやすくするために、便宜上、特徴となる部分を拡大する等、強調して示している場合がある。

【0027】

まず、本実施形態において加工する対象物である方向性電磁鋼板の概要について説明する。

<方向性電磁鋼板の概要>

典型的な方向性電磁鋼板は、鋼板の結晶粒の磁化容易軸（体心立方晶の $\langle 100 \rangle$ 方向）が、鋼板の圧延方向に略揃っている電磁鋼板である。方向性電磁鋼板は、圧延方向に向

50

いた磁極を有する磁区が、磁壁を挟んで複数配列した構造を有する。このような方向性電磁鋼板は、圧延方向に磁化しやすいため、磁力線の方向がほぼ一定に流れるトランス（変圧器）の鉄芯の材料に適している。

【0028】

トランスは、通常、積みトランスと巻きトランスとに大別される。方向性電磁鋼板は、鋼板を多層に巻いたうえで、鉄芯の形状（例えば、中空部を有する四角柱状）となるように成型することで製造される巻きトランス鉄芯の材料として好適に利用される。

方向性電磁鋼板は、例えば、鋼板本体（地鉄）と、鋼板本体の表裏両面に形成されたガラス被膜と、ガラス被膜上に形成された絶縁被膜とを有する。鋼板本体は、例えばSiを含有する鉄合金で構成されている。

10

【0029】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板は、その鉄損を低減させるために（即ち、磁区制御のために）、レーザ光を方向性電磁鋼板の表面に照射し、方向性電磁鋼板の圧延方向（即ち、製造時の搬送方向、鋼板の長手方向）に対して斜めに交差する方向に走査することで、微小な円または楕円状をなす複数の点状溝からなり、方向性電磁鋼板の圧延方向と交差する方向に延在する点列溝を形成する。これらの点列溝は、方向性電磁鋼板の表面に、圧延方向に沿って所定の間隔で複数形成される。なお、以下の説明では、方向性電磁鋼板を単に鋼板と表記して説明することがある。

【0030】

図1は、表面に点列溝1を形成した本第1実施形態に係る方向性電磁鋼板2を示す。図2は、方向性電磁鋼板2を加工する方向性電磁鋼板製造装置の一例であるレーザ加工装置Aを示す。

20

【0031】

<方向性電磁鋼板の詳細>

方向性電磁鋼板2は、溝形成の対象となる電磁鋼板であり、板幅 W_c を有する帯状に冷間圧延されているが、図1(A)及び図2では、図示を簡略化するために、帯状の方向性電磁鋼板2を長方形に描き、圧延方向Lに直交する方向を板幅方向Cと表示している。方向性電磁鋼板2は、図示略の搬送装置により、圧延方向Lに向かって通板される。

【0032】

方向性電磁鋼板2に形成されている、図1(A)に示す複数本の点列溝1は、図1(B)に拡大して示すような平面視形状を有する。各点列溝1のそれぞれは、所定の長さ（溝部の長軸方向の長さ： d_c ）と溝幅（溝部の短軸方向の長さ： d_L ）と溝深さ（溝部の最大深さ： h ）とを有し、平面視で略楕円形状をなす複数の点状溝1Aが、平面視で直線状に並ぶことで、巨視的に見て一本の点列溝1に見えるように形成されたものである。これら点状溝1Aの長軸方向の中央部が、図1(B)に示すように、点列方向S（後述する走査方向S）に沿って一定の間隔で配置されることで、複数本の点列溝1が構成されている。

30

また、各点列溝1は、この点列溝1を構成する各点状溝1Aのなす長軸の向きGが、方向性電磁鋼板2の板幅方向Cに対してなす角が傾斜角 θ_g となるように形成されており、また、点列方向Sと鋼板の板幅方向Cとがなす角が走査角 θ_s となるように形成されている。即ち、点列溝1を構成する各点状溝1Aの長軸の向きGは、点列方向Sとは異なる方向となっている。

40

【0033】

なお、傾斜角 θ_g の符号は、搬送方向下流を見て、点状溝1Aの長軸の紙面右手側が搬送方向の上流側に傾く場合を正の値とする。また、走査角 θ_s の符号は、搬送方向下流を見て、点列方向Sの紙面右手側が搬送方向の下流側に傾く場合を正の値とする。

【0034】

点状溝1Aは、平面視で略楕円形状を有しており、その長さ方向一端部側から他端部側にかけての中央位置で最大となる溝幅（点状溝1Aの短軸方向の長さ） d_L を有する。点状溝1Aの一端部1aと他端部1bは、いずれも平面視で凹曲面状の内面1cを有する。

50

点状溝 1 A の一端部 1 a と他端部 1 b を除く部分は互いに対向する内側面 1 d が形成されている。また、点状溝 1 A の底面側には図 1 (C) に示すように最大深さが h となる底面 1 e が形成されている。点状溝 1 A の一端部 1 a と他端部 1 b の底面は、端部近くになると徐々に底が浅くなる凹曲面型の傾斜面 1 f が形成されている。ここで、内側面 1 d は平面でもよく、その場合、点状溝 1 A は平面視で短い線形状の溝とみなすことができる。一方、図示の例では、内側面 1 d が円弧状をなしており、そのため、点状溝 1 A は平面視で短い略楕円形状の溝とみなすことができる。

点状溝 1 A は、例えば、図 1 (B) に示すように、互いに隣接する一対の点状溝 1 A の、板幅方向 C に沿った間隔 D が一定となるように形成されている。また、互いに隣接する点状溝 1 A の長さ方向中央部の板幅方向 C に沿った間隔 P c が一定となるように形成されている。即ち、複数の点状溝 1 A が点列方向 S に沿って一定のピッチで徐々に位置をずらすように個々に平行に配置されることで、点列溝 1 が構成されている。また、図 1 (A) に示すように、点列溝 1 は、方向性電磁鋼板 2 の圧延方向 L において所定のピッチ P L で繰り返し複数本が形成されている。

【0035】

点列溝 1 が形成されている点列方向 S とは、後述するレーザ加工装置 A によってレーザ光が走査される方向である。従って、点列方向 S は、レーザ光の走査方向 S と表記することもできる。

点列溝 1 は、後述するようにレーザ光によって形成される。このため、図 1 (B) に示したように、複数の同一形状の点状溝 1 A が規則的に配列された構成を有するが、レーザ光の照射状態によって全ての点状溝 1 A が完全に同一な形状に形成される必要はなく、点状溝 1 A の端部形状や底部形状が不揃いであり、図 1 (B)、1 (C) に示す形状と多少異なってもよい。

【0036】

図 1 (B) に示す点状溝 1 A を間欠的に配列した点列溝 1 は、図 1 (A) に示すように方向性電磁鋼板 2 を平面視した場合、鋼板表面における点状溝 1 A の長軸の向き G と、点状溝 1 A が鋼板の板幅方向 C と成す傾斜角を $\theta_g [^\circ]$ と表記し、走査方向 S と鋼板幅方向 C とが成す走査角を $\theta_s [^\circ]$ と表記すると、下記 (式 1) ~ (式 3) の関係を有することが好ましい。

【0037】

$$0^\circ \leq |\theta_g| \leq 10^\circ \quad \dots (\text{式 1})$$

$$0^\circ < |\theta_s| \leq 30^\circ \quad \dots (\text{式 2})$$

$$|\theta_g| \leq |\theta_s| \quad \dots (\text{式 3})$$

【0038】

図 1 (B) に示すように、点列溝 1 において、点状溝 1 A の長軸方向の長さを $d_c [\mu m]$ と表記し、隣接する点状溝 1 A の鋼板の板幅方向 C に沿った間隔を $D [\mu m]$ と表記すると、下記 (式 4) の関係を有することが好ましい。なお、間隔 $D [\mu m]$ は、圧延方向 L に沿って見た場合に、互いに隣接する点状溝 1 A 同士が接する場合に 0 $[\mu m]$ 、離れる場合を正の値、互いに重なり合う場合を負の値となるように符号を設定する。

【0039】

$$-0.3 \leq (D / d_c) \leq 0.2 \quad \dots (\text{式 4})$$

【0040】

点列溝 1 において、点状溝 1 A の長軸方向の長さを $d_c [\mu m]$ と表記し、点状溝 1 A の短軸方向の長さを $d_L [\mu m]$ と表記すると、下記 (式 5) 及び (式 6) の関係を有することが好ましい。さらには、 $d_c [\mu m] \leq 30000 [\mu m]$ であることが好ましい。

【0041】

$$10 \mu m \leq d_L \leq 300 \mu m \quad \dots (\text{式 5})$$

$$d_L \leq d_c \quad \dots (\text{式 6})$$

【0042】

点列溝 1 において、点状溝 1 A の最大深さを $h [\mu m]$ とすると、下記 (式 7) の関係

を有することが好ましい。

【0043】

$$5\mu\text{m} \leq h \leq 100\mu\text{m} \quad \cdots (\text{式}7)$$

【0044】

方向性電磁鋼板2の長手方向に並ぶ複数の点列溝1において、隣接する点状溝1Aの鋼板長手方向に沿った間隔をPL[μm]とすると、下記(式8)の関係を有することが好ましい。

【0045】

$$1\text{mm} \leq \text{PL} \leq 10\text{mm} \quad \cdots (\text{式}8)$$

【0046】

また、図16に示すように、方向性電磁鋼板2の幅寸法が広い場合は、幅方向において複数個所に分割した点列溝44Aを採用してもよい。一般的に、電磁鋼板の連続製造ラインでコイル状に製造する際の板幅Wcは1000mm～1500mmであることから、一本の点列溝44Aの長さを100mm～500mmとして、2～10本に分割された点列溝44Aを形成してもよい。その場合、互いに隣接する点列溝44Aの板幅方向Cに沿った間隔をDa[mm]としたときに、下記(式9)の関係を有することが好ましい。なお、間隔Daが負の値である場合は、互いに隣接する点列溝44A同士が板幅方向で重なることを意味する。すなわち、間隔Da[mm]は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を0[μm]とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0047】

$$-10\text{mm} \leq \text{Da} \leq 5\text{mm} \quad \cdots (\text{式}9)$$

【0048】

図1の説明に戻る。

図1に示す方向性電磁鋼板2は、点列溝1が鋼板長手方向に間隔PLをあけて間欠的にかつ板幅方向Cと所定の走査角θsを有する走査方向Sに沿って形成されているので、機械的な耐繰返し曲げ特性に優れる。従って、方向性電磁鋼板2をトランス用の巻鉄芯に用いるために巻回したり、折り曲げたりしたとしても、破断するおそれが少なく、クラックなどの欠陥部を生じることのない方向性電磁鋼板2を提供できる。

【0049】

点列溝1を構成する点状溝1Aは、長さ数10μm～1mm程度の微小な円、または略楕円状の溝である。楕円長さを更に長くしてもよいが、その場合、板幅に占める点状溝1Aの数が減少する。例えば典型的な小型のトランス鉄芯では板幅が100mm程度となるが、点状溝1Aの幅を30mmとすると、板幅中に点状溝1Aが3～4個となり、数が極端に少なくなる。その場合、鋼板全体での磁束密度の均一性が低下するため、鉄損が増加する可能性がある。従って、点状溝1Aの長軸長さは、最大でも30mm程度が好ましい。個々の点状溝1Aは、板幅方向Cに沿ってほぼ平行(0°～10°の傾斜を含む)に形成されている。このため、方向性電磁鋼板2における磁区細分効果を最大限に発揮させることができ、鉄損低減効果を最大化した方向性電磁鋼板2を提供できる。また、個々の点状溝1Aが板幅方向Cに対して傾斜角θgを有しても、傾斜角θgは10°以下と小さいため、磁区細分効果が損なわれることがない。

また、互いに隣接する個々の点状溝1Aの間に隙間が生じているため、磁束がその隙間を磁束ベクトルの方向を変えて通過できるため、磁束密度の低下代が少ない。また断面方向においても、互いに隣接する点状溝間では溝深さが浅いため、鋼板表面の磁束密度劣化代が少ない。さらに、互いに隣接する点状溝1A間の隙間は10μm～1mmと微小であり、しかもこの隙間は板幅方向Cに沿って多数個が均一に形成されているので、板幅方向Cにおいて均一な鉄損及び磁束密度が得られる。

【0050】

<レーザ加工装置>

10

20

30

40

50

図 2 は、方向性電磁鋼板 2 に点状溝 1 A を形成するために用いる本第 1 実施形態のレーザ加工装置 A を示す斜視図である。

レーザ加工装置 A は、方向性電磁鋼板 2 の表面にパルスレーザ光を照射することで、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C と交差する方向に延在する離散的な略楕円の形点状溝 1 A からなる点列溝 1 を形成する装置である。

レーザ加工装置 A は、レーザ照射部 3 と第 1 光学系 5 と走査ミラー 6 と第 2 光学系 7 とを備えている。

レーザ照射部 3 は、レーザ出射部 8 と伝送ファイバ 9 とを備え、伝送ファイバ 9 は図示略のレーザ光源に接続されている。この構成により、レーザ光源にて生成されたレーザ光をレーザ出射部 8 に送り、レーザ出射部 8 からレーザ光を出射することができる。

【0051】

レーザ光源としては、点列状の溝を形成する観点等から、パルス発振形態のファイバレーザ又はディスクレーザを用いることが好ましい。しかし、点列状の溝部が得られればよく、公知の様々なパルスレーザ光源、例えば、YAG レーザや CO₂ レーザを用いてもよい。また、レーザ光源はパルス発振レーザでなくてもよく、時間的に開閉する光シャッターで連続波レーザをパルス状にして使用してもよい。

【0052】

レーザ光は、高いエネルギーを有しており、方向性電磁鋼板 2 の表面に照射することで、方向性電磁鋼板 2 の表面部分を溶融飛散させることで溝部を形成することができる。

レーザ光は、レーザ出射部 8 から第 1 光学系 5 を経てレーザ光 10 として出射された時点で、光軸に直行する断面形状が楕円形状又は線状となっている。第 1 光学系 5 は、一例として円柱レンズ、放物面レンズ、または放物面ミラーの組み合わせからなり、レーザ光の断面形状を楕円形状に変化させる機能を有する、いわゆる楕円ビームコリメータである。この楕円ビームコリメータは、レーザ光軸を中心に回転させることで、第 1 光学系 5 を経て出射されるレーザ光のスポット光のなす楕円形の長軸の向きを調整する機能を有する。

【0053】

図 2 に示す構成では、一例として、レーザ出射部 8 の出射側に、凹面と凸面の円柱レンズの組み合わせからなる円柱レンズコリメータ（楕円コリメータ）11 が配置されて第 1 光学系 5 が構成されている。そして、レーザ出射部 8 と円柱レンズコリメータ 11 が搬送中の方向性電磁鋼板 2 の上方に、方向性電磁鋼板 2 の幅方向に沿って水平に配置されている。第 1 光学系 5 に含まれる円柱レンズコリメータ 11 は、ビーム断面形状を楕円形に変換するとともに、レーザ光 10 の光軸を中心軸として回転させる機能を備えている。円柱レンズコリメータ 11 の回転によって、方向性電磁鋼板 2 上に照射される楕円形のスポット光を、レーザ光軸を中心に回転させて、楕円の長軸方向の向きが調整される。

円柱レンズコリメータ 11 のレーザ光透過後には、走査ミラー 6 として利用されるポリゴンミラー 12 が設けられている。走査ミラー 6 は、ガルバノミラーであってもよい。

走査ミラー 6 は、第 1 光学系 5 で調整されたレーザ光を反射することでレーザ光の進行方向を変化させ、レーザ光のスポット光が照射される方向性電磁鋼板 2 上の位置を、方向性電磁鋼板 2 の幅方向と交差する方向である走査方向 S に沿って移動させることができる。即ち、走査角 θ_s は、ポリゴンミラー 12 の走査方向で調整することができる。

【0054】

方向性電磁鋼板 2 の表面に照射されるスポット光の形状が楕円形状である場合、スポット光の中心を通り互いに直交する短軸及び長軸の方向を規定することができる。

また、当該スポット光の形状は、正円形状であってもよい。

【0055】

レーザ光 10 の照射に合わせて、時々刻々、ポリゴンミラー 12 を回転させるか、ガルバノミラーの場合はその傾斜角度を変化させることで、レーザ光を照射する方向を変化させることができる。ポリゴンミラー 12 で反射されたレーザ光 10 A は、後述する第 2 光学系 7 へと向かう。

第 2 光学系 7 は、走査ミラー 6 で反射したレーザ光 10 A を透過させることで集光した

10

20

30

40

50

パルスレーザ光 10B としてから、方向性電磁鋼板 2 の表面に集光させる機能を有する。

ポリゴンミラー 12 は、図 2 に示すように、回転軸 13 の方向から側面視した場合に正多角形状を有した、扁平な正多角柱である。ポリゴンミラー 12 は、水平方向に延びた回転軸 13 を有しており、この回転軸 13 回りに回転する。

【0056】

ポリゴンミラー 12 の外周面は、ポリゴンミラー 12 の正多角形状の各面をなす複数の長方形の反射面 15 と、これら反射面 15 同士がなす角部 16 と、により形成されている。各反射面 15 は、レーザ光を反射する平面状のミラーである。反射面 15 の数を N とすると、ポリゴンミラー 12 は正 N 角柱である。なお、図 2 に示す構成では、ポリゴンミラー 12 は正十二角柱であり、 N （反射面 15 の数）は 12 である。

ポリゴンミラー 12 を回転軸 13 回りに回転させることで、反射面 15 の反射角を連続的に変更することができ、その結果、レーザ光 10A は S 方向に走査される。

【0057】

第 2 光学系 7 は、 $f\theta$ レンズ（スキャンレンズ）19 を備えている。

第 2 光学系 7 は、ポリゴンミラー 12 から $f\theta$ レンズ 19 に入射されたレーザ光 10A を方向性電磁鋼板 2 の表面にパルスレーザ光 10B として集光して照射する。集光されたパルスレーザ光 10B は、方向性電磁鋼板 2 の表面を溶融及び蒸発飛散させて、方向性電磁鋼板 2 の表面に点状溝 1A を形成する。

第 2 光学系 7 は、方向性電磁鋼板 2 の表面にパルスレーザ光 10B を集光するために設けられている。パルスレーザ光 10B を方向性電磁鋼板 2 の表面に集光するために、円柱レンズコリメータ 11 と $f\theta$ レンズ 19 との間の焦点距離や相互間隔を適宜調整することが好ましい。方向性電磁鋼板 2 の表面に対するパルスレーザ光 10B の走査方向 S は、上述した点列方向 S と等しく、走査方向 S は、板幅方向 C に対して走査角 θ_s だけ傾斜する。

なお、第 2 光学系 7 に、 $f\theta$ レンズ 19 の代わりにフラットフィールドレンズを用いるようにしても、同様の機能を発揮させることが可能である。また、反射型の集光装置である放物面ミラーを用いて同様の機能を発揮させることも、可能である。

【0058】

本実施形態では、方向性電磁鋼板 2 の表面にパルスレーザ光 10B を正円形状又は楕円形状のスポット光が形成されるように集光する。そして、集光したパルスレーザ光 10B により、図 1（B）に示すように板幅方向 C に対して $0^\circ \sim 10^\circ$ 程度の傾斜角 θ_g を有する点状溝 1A を、板幅方向 C に対して 30° 以下程度に傾斜した走査角 θ_s を有する点列方向 S に沿って、一定の間隔で複数形成する。

方向性電磁鋼板 2 は、図 2 の矢印 L 方向に一定速度で搬送されるので、パルスレーザ光 10B の走査速度とパルス時間幅、パルスとパルスの時間間隔を適宜調整することで、圧延方向 L 方向に一定間隔 PL （図 1（A）参照）で点列溝 1 を間欠的に連続して形成することができる。

【0059】

30° 以下程度の走査角 θ_s で方向性電磁鋼板 2 の表面に溝部を形成する理由は、以下の理由による。先に説明したように、方向性電磁鋼板 2 を用いて巻きトランス鉄芯を製造する場合に、点列溝 1 を形成することで方向性電磁鋼板 2 の磁気特性を良好なものとしながら、同時に、方向性電磁鋼板 2 の破断やクラックの発生を防止するためである。なお、走査角 θ_s は、 10° 以下の小さな角度でも良いが、走査角 θ_s が 0° に近くなると巻きトランス鉄芯の製造時に破断発生の原因となることが考えられるので、 0° に近い角度は避けることが望ましい。

【0060】

方向性電磁鋼板 2 に照射される直前のパルスレーザ光 10B のスポット光がなす楕円形の短軸方向の径は、例えば、数 $10\mu\text{m}$ 程度にすることができる。また、楕円形の長軸は、短軸長さ相当から、例えば 30mm 以上の値にすることもできる。このような楕円形状スポット光の長軸と短軸の長さを調整して集光することで、方向性電磁鋼板 2 の表面に点状溝 1A を形成することができる。ここで形成される点状溝 1A の形状は、集光スポット形

10

20

30

40

50

状、スポットの傾斜、パルス時間幅、走査速度によって板幅方向に対して θ_g だけ交差した略楕円形状となる。またパルスの繰り返し周波数と走査速度によって点状溝 1 A の間隔が調整される。

【0061】

図 2 に、方向性電磁鋼板 2 の表面に上述のパルスレーザ光 10 B を照射した場合に鋼板表面に描かれる楕円状のスポット光 S P の一例を示す。このスポット光 S P の長軸方向は、第 1 光学系 5 に具備された円柱レンズコリメータ 11 の回転により、板幅方向 C に対して傾斜調整される。また、走査方向 S は、走査ミラー 6 の回転軸 13 と直交する方向であるため、回転軸 13 と第 1 光学系 5 とレーザ射出部 8 とを調整することで、板幅方向 C に対して走査角 θ_s を任意の角度に設定することができる。これにより、長軸 d c、短軸 d l を持ち、長軸が板幅方向 C から角度 θ_g に傾斜した略楕円形の点状溝 1 A を、板幅 C 方向から角度 θ_s に傾斜した方向に並ぶ点列溝 1 が形成され、ここで、角度 θ_g と角度 θ_s は、独立かつ任意に調整することが可能である。

ここで、略楕円形状をなす点状溝 1 A の形成過程を説明する。図 1 (D) は、本実施形態における一つの略楕円形の点状溝 1 A の拡大図である。また図 1 (E) は、当該点状溝 1 A が、楕円集光されたスポット光の S 方向への移動によって形成されることを説明する図である。パルスレーザのパルス時間幅が T_p である場合、スポット光が速度 V_s で S 方向に走査されると、パルス時間内にスポット光は E1 から E2 に移動する。その際の移動距離 a は、 $a = V_s \times T_p$ で求められる。

楕円スポット光は、円柱レンズコリメータ 11 を回転調整して、その楕円長軸方向が、板幅方向 C から角度 θ_g だけ傾斜させた G2 方向になっている。形成される点状溝 1 A の形状は、楕円スポット E1 から楕円スポット E2 へ移動した軌跡の最外周の形状と一致し、略楕円形状となる。この際、点状溝 1 A の長軸 d c の長さは、図 1 (E) において楕円スポット E1 の下側の長軸頂点 P3 と、移動後の楕円スポット E2 の上側頂点 P2 との間の距離となる。また、点状溝 1 A の短軸 d l は P2 と P3 を結ぶ直線と直交する方向の最大幅であり、点 Q1 と点 Q2 との間の距離となる。

【0062】

また、互いに隣り合う点状溝 1 A の板幅方向 C における間隔 P_c [mm]、圧延方向 L の間隔 P_L [mm]、互いに隣り合う点状溝 1 A 同士の間隔 D [μm] は、パルスレーザ光の繰り返し周波数 F_p [Hz]、パルスレーザ光 10 B の走査速度 V_s [m/s]、走査ミラー 6 の面数 N [-]、f θ レンズ 19 の焦点距離 f [m]、方向性電磁鋼板 2 の通板速度 V_L [m/s] によって、下記 (式 10) ~ (式 12) のように定義される。これらのパラメータを調整することで、 P_L 、 P_c 、 D を適切に選択することが可能であり、自由に、図 1 (B) に示す複数の点状溝 1 A を形成できる。

【0063】

$$P_c = V_s / F_p \times \cos \theta_s \times 10^3 \quad \dots (\text{式 } 10)$$

$$P_L = (4\pi / N) \times f \times V_L / V_s \times 10^3 \quad \dots (\text{式 } 11)$$

$$D = P_c \times 10^3 - d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (\text{式 } 12)$$

【0064】

以上説明のレーザ加工装置 A の骨子を以下に纏める。

図 2 に示したレーザ加工装置 A は、図 1 (A) ~ (C) に示す形状を持つ複数の点状溝 1 A からなる点列溝 1 を形成する加工装置である。

レーザ加工装置 A において、第 1 光学系 5 は、方向性電磁鋼板 2 の表面におけるパルスレーザ光 10 B のスポット光のなす楕円形の長軸の向き G を、走査方向 S と異なる方向（好ましくは、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C に沿う方向）に調整する。

第 2 光学系 7 は、方向性電磁鋼板 2 の表面に集光されるパルスレーザ光 10 B のスポット光毎に、方向性電磁鋼板 2 の表面に点状溝 1 A を形成することで、方向性電磁鋼板 2 の表面に点列溝 1 を形成する。

【0065】

従って、レーザ加工装置 A は、方向性電磁鋼板 2 の表面に集光したパルスレーザ光 10

Bのスポット光のなす楕円形の長軸の向きGと、鋼板の板幅方向Cとが成す傾斜角を θ_g [°]とし、走査方向Sと前記鋼板の板幅方向Cとが成す走査角を θ_s [°]とすると、下記(式13)～(式15)が成り立つように加工する装置であると表記できる。

【0066】

$$0^\circ \leq |\theta_g| \leq 10^\circ \quad \dots (\text{式13})$$

$$0^\circ < |\theta_s| \leq 30^\circ \quad \dots (\text{式14})$$

$$|\theta_g| \leq |\theta_s| \quad \dots (\text{式15})$$

【0067】

レーザ加工装置Aは、方向性電磁鋼板2の表面に集光されたパルスレーザ光10Bのスポット光がなす楕円形の長軸方向の長さを d_c [μm]とし、方向性電磁鋼板2の表面に集光されるレーザ光のスポット光毎に形成される点状溝1Aのうち、互いに隣接する点状溝1Aの方向性電磁鋼板2の板幅方向に沿った間隔をD [μm]とすると、下記(式16)が成り立つように加工する装置であると表記できる。

【0068】

$$-0.3 \leq (D/d_c) \leq 0.2 \quad \dots (\text{式16})$$

【0069】

レーザ加工装置Aは、方向性電磁鋼板2の表面に集光されたパルスレーザ光10Bのスポット光のなす楕円形の長軸方向の長さを d_c [μm]とし、方向性電磁鋼板2の表面に集光されたパルスレーザ光10Bのスポット光のなす楕円形の短軸方向の長さを d_L [μm]とすると、下記(式17)及び(式18)が成り立つように加工する装置であると表記できる。

【0070】

$$10 \mu\text{m} \leq d_L \leq 300 \mu\text{m} \quad \dots (\text{式17})$$

$$d_L \leq d_c \quad \dots (\text{式18})$$

【0071】

レーザ加工装置Aは、鋼板の表面に集光されたパルスレーザ光10Bのスポット光毎に形成される点状溝1Aの最大深さをh [μm]とすると、下記(式19)が成り立つように加工する装置であると表記できる。

【0072】

$$5 \mu\text{m} \leq h \leq 100 \mu\text{m} \quad \dots (\text{式19})$$

【0073】

レーザ加工装置Aは、方向性電磁鋼板2の表面に集光されたパルスレーザ光10Bのスポット光のなす楕円形の長手方向に沿った間隔をPL [mm]とすると、下記(式20)が成り立つように加工するレーザ加工装置であると表記できる。

【0074】

$$1 \text{ mm} \leq PL \leq 10 \text{ mm} \quad \dots (\text{式20})$$

【0075】

レーザ加工装置Aを用いて、板幅方向Cを2つ以上の区分に分割して、点状溝1Aから構成される2本以上の点列溝1を形成する場合、互いに隣接する点列溝1間の間隔をDa [mm]とすると、間隔Da [mm]は、下記(式21)が成り立つように加工するレーザ加工装置であると表記できる。なお、間隔Da [mm]が負の値である場合は、互いに隣接する点列溝1が板幅方向で重なることを意味する。すなわち、間隔Da [mm]は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を0 [μm]とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0076】

$$-10 \text{ mm} \leq Da \leq 5 \text{ mm} \quad \dots (\text{式21})$$

【0077】

<第1実施形態によるレーザ加工方法>

次に、上述のレーザ加工装置Aにより方向性電磁鋼板2に点列溝1を加工する方向性電

10

20

30

40

50

磁鋼板製造方法は、以下のステップを有する。

すなわち、この方向性電磁鋼板製造方法は、レーザ照射部 3 を用いて、レーザ光を照射するレーザ照射ステップを有する。

また、この方向性電磁鋼板製造方法は、第 1 光学系 5 を用いて、レーザ光のスポット光を楕円形に調整し、レーザ光のスポット光のなす楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学処理ステップを有する。

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、走査ミラー 6 を用い、第 1 光学系 5 で調整されたレーザ光 10 を反射することで該レーザ光 10 の進行方向を変化させ、レーザ光 10 のスポット光が照射される鋼板表面上の位置を、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C と交差する方向である走査方向 S に沿って移動させる走査処理ステップを有する。

10

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、第 2 光学系 7 を用いて、走査ミラー 6 で反射したレーザ光 10 A を透過し、鋼板表面に集光させる第 2 光学処理ステップを有する。

【0078】

そして、前記第 1 光学処理ステップでは、方向性電磁鋼板 2 の表面におけるパルスレーザ光 10 B のスポット光のなす楕円形の長軸の向き G 2 を、走査方向 S と異なる方向に調整する。

また、前記第 2 光学処理ステップでは、鋼板表面に集光されるパルスレーザ光 10 B のスポット光毎に、鋼板表面に溝部を形成することで、鋼板表面に点列溝 1 を形成する。

【0079】

<鉄損、耐繰り返し曲げ加工性、磁束密度低下抑制効果の発現原理について>

20

以上説明の図 1 に示す方向性電磁鋼板 2 について、以下に磁区制御効果発現の原理について説明する。

【0080】

図 3 (A) は、本実施形態における、点状溝 1 A を形成した方向性電磁鋼板 2 の模式拡大図である。図 3 (B) は、溝部形成領域を C 方向から見た模式断面図である。また図 3 (C-1) 及び図 3 (C-2) は、溝部形成領域を L 方向から見た模式断面図である。図 3 (C-1) は溝が形成されていない位置での断面であり、図 3 (C-2) は溝が形成されている箇所に沿った断面図である。図 3 では、方向性電磁鋼板 2 に生成する磁束の向きを矢印で示している。また L 方向断面に記載された丸印の大きさは磁束密度の大きさを表している。

30

【0081】

図 4 (A)、図 4 (B)、図 4 (C-1)、図 4 (C-2) は、方向性電磁鋼板 20 の表面に、圧延方向 L にほぼ垂直方向に、すなわち板幅方向 C にほぼ平行に連続的に溝 2 1 を形成した従来構成を示す表面の模式拡大図と、C、L 方向の模式断面図である。

図 5 は、板幅方向 C 方向から、0°を超えて傾斜して連続的に溝 2 2 を形成した従来構成を、図 3 及び図 4 と同様の視線で見た断面図である。

【0082】

まず、従来技術の一例である連続溝の場合について、図 4 を用いて、磁気特性及び機械強度について説明する。方向性電磁鋼板の磁化容易方向である圧延方向 L に磁界が印加されると、図 4 中の矢印で示すように磁束密度 B (T) が同方向に発生する。この際、図 4 (B) の鋼板断面に示すように、表層に空隙である溝 2 1 が存在すると、空気と地鉄の透磁率の違いにより、溝 2 1 の側壁において磁束の一部が空隙中に漏れ出すとともに、漏れ出た磁束の一部が鋼板内部に潜り込むという磁束の流れ方向の変化が発生する。これにより、磁束の変化によって局所的に静磁エネルギーが高まり、そのエネルギーの偏在を緩和するために周囲の磁壁の数が増加する。その結果、空間的なエネルギー平衡状態が保たれると考えられる。磁壁は磁区と磁区の境界であるため、同じ体積中で磁壁の数が増えることは、磁区の幅が狭くなることに相当する。

40

【0083】

鉄損の一成分である異常渦電流損は、磁区幅に正の相関があるため、磁区幅が狭くなることで鉄損は低減する。換言するならば、磁束の流れ方向に対して障壁となる溝 2 1 を形

50

成することで鉄損が低減されるといえる。この障壁効果は磁束方向に対して直交する方向に溝を形成した場合が最も高くなり、鉄損低減効果は高い。

【0084】

ところで、鉄損評価の指標である $W17/50$ とは、鋼板に平均 1.7 T の磁束密度が発生するように強制的に磁化した際の鉄損値である。溝によって磁束が発生し難くなるものの、溝が形成される箇所は鋼板全体に占める面積割合がわずかであるため、溝の有無によって 1.7 T の磁束を発生させる磁化力にほとんど違いはなく、溝のない箇所での磁束密度も 1.7 T になる。これは模式的に図4(C-1)に示すように、鋼板断面で均一な磁束密度である。しかし、溝下部では磁束が通過できる断面積が狭くなるため、磁束流れの連続性を維持する結果、図4(C-2)に示すように、溝下部の磁束密度は局所的に大きくなる。鉄損は磁束密度の2乗に比例するため、溝下部の鉄損は増大する。

10

従って、磁区幅現象による鉄損減少と磁束密度の局所的増加による鉄損増加の差し引きにおいて、前者の方が、効果が大きいいため、結果的に溝形成によって鉄損は減少する。

【0085】

方向性電磁鋼板の磁気特性のもう一つの指標である、一定磁界を印加した際に発生し得る磁束密度、例えば $B8\text{ [T]}$ は、 800 A/m の磁化力の下で発生する磁束密度である。同じ磁化力でより大きな磁束密度を発生させることができれば、トランス鉄芯を小型化できるメリットがある。しかし、溝を形成すると空隙が磁束発生 of 阻害要因となるため、同じ磁化力で発生し得る磁束密度は減少する。

20

また、機械特性として、巻きトランス鉄芯の製造工程では板幅方向に平行な方向に変曲線を持つ折り曲げ加工が行われるが、板幅方向Cに平行(圧延方向Lに垂直)な溝は、方向性電磁鋼板の耐繰り返し曲げ加工強度を低下させ、鋼板破断のリスクが高まるため不利である。

【0086】

次に、従来技術の別の例として、溝22の形成方向が板幅方向C方向に対して、 0° を超える場合を図5に示す。この場合、曲げ加工に対する機械強度は高まる。しかし、磁束に対する障壁効果は、図4に示すような、圧延方向Lと直交する溝21の場合に比べて弱まるため、磁区細分化の効果は低下し、鉄損の低減効果は減少する。

更に、前述したように、溝は磁束の流れに対して抵抗となるため、一定磁化力で発生する磁束密度、例えば $B8$ は低下することになる。板幅方向に傾斜して溝を形成することで若干、 $B8$ の低下は抑制される傾向があるが、連続して溝が形成される場合は大きな $B8$ 低下は避けられない。

30

【0087】

そこで、本発明者らは、図3に示すように、ミクロな視点では溝の壁を圧延方向Lにほぼ垂直に形成することで高い鉄損改善効果が得られ、またマクロな視点での溝形成方向が板幅方向からある程度の角度を持っていれば、機械的な曲げ加工にも耐えることができると考えた。

更に、この様な点状溝1Aの配列によって、図3(A)、3(C-2)に示すように、表面、および断面からの視点では、溝間には溝が形成されない領域が発生するため、ここを磁束が流れることが可能となり、一定磁化力で発生し得る磁束密度の低下を抑制することが可能と考えた。

40

【0088】

すなわち、図1に示す点列溝1を有する方向性電磁鋼板2であれば、ミクロ的には個々の点状溝1Aが板幅方向Cにほぼ平行であるため磁区細分化効果を最大化することができる。加えて、マクロ的には点状溝1Aの形成方向が板幅方向Cとある程度大きな傾斜角度を持つため、曲げ加工において点状溝1Aに応力が集中するおそれが少なく、破断のリスクを抑えることができる。また磁束が通過する領域が残っていることで一定磁化力の下で発生し得る磁束密度の低下が少ない方向性電磁鋼板2を提供することができる。

【0089】

<レーザ加工装置(第2実施形態)>

50

図 6 は、方向性電磁鋼板 2 に点状溝 1 A を形成するために用いる第 2 実施形態のレーザ加工装置 B の概要を示す斜視図である。

レーザ加工装置 B は、方向性電磁鋼板 2 の表面にレーザ光を照射することで、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C と交差する方向に延在する離散的な点列溝 1 を形成する装置である。

レーザ加工装置 B は、レーザ照射部 3 と、第 1 光学系 5 と、第 2 光学系 25 と、走査ミラー 6 とを備えている。

レーザ照射部 3 は、上記第 1 実施形態の構造と同様に、レーザ出射部 8 と伝送ファイバ 9 とを備える。伝送ファイバ 9 は、図示略のレーザ光源に接続されている。

【0090】

第 2 光学系 25 は、球面又は非球面レンズ等からなり、第 1 光学系 5 で調整されたレーザ光 10 を透過して、後述する走査ミラー 6 に送り、最終的に方向性電磁鋼板 2 の表面で集光する機能を有する。走査ミラー 6 は、上記第 1 実施形態の構造と同様にポリゴンミラー 12 からなる。

10

図 6 では詳細を示していないが、第 2 光学系 25 を支持して第 2 光学系 25 をレーザ光 10 の光軸に沿って矢印 26 に示す前後方向に高速で移動させる移動機構 27 が設けられている。この移動機構 27 によって、第 2 光学系 25 を、走査ミラー 6 の動作と同期させ、レーザ光 10 の光路に沿って前後に移動させることで、第 2 光学系 25 を起点として、走査ミラー 6 の反射の後に方向性電磁鋼板 2 に到達すまでのレーザ光 10 の伝搬距離を第 2 光学系 25 の焦点距離 f に一致させることができる。その結果、走査幅全体に亘り、均一な集光が得られる。

20

ポリゴンミラー 12 は、上記第 1 実施形態のレーザ加工装置 A の場合と同様に、第 2 光学系 25 を通過したレーザ光 10 C を、方向性電磁鋼板 2 の表面上に対し、所定の走査方向 S に沿って走査する。

【0091】

移動機構 27 は、ポリゴンミラー 12 の動作に同期して第 2 光学系 25 を移動させ、第 2 光学系 25 で方向性電磁鋼板 2 の表面に集光されるレーザ光 10 C のスポット光毎に、方向性電磁鋼板 2 の表面に点状溝 1 A を形成することで、点列溝 1 を形成する、

図 6 に示すレーザ加工装置 B によって、点列溝 1 を有する方向性電磁鋼板 2 を製造することができる。

【0092】

<レーザ加工方法（第 2 実施形態）>

上述のレーザ加工装置 B により方向性電磁鋼板 2 に点列溝 1 を加工する方向性電磁鋼板製造方法は、以下のステップを有する。

すなわち、この方向性電磁鋼板製造方法は、レーザ照射部 3 を用いて、レーザ光 10 を照射するレーザ照射ステップを有する。

また、この方向性電磁鋼板製造方法は、第 1 光学系 5 を用いて、レーザ光のスポット光を楕円形に調整し、レーザ光のスポット光のなす楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学処理ステップを有する。

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、移動機構 27 を用いてレーザ光の光軸方向に対する位置を変化させた第 2 光学系 25 を用いて、第 1 光学系 5 で調整されたレーザ光 10 を透過し、鋼板表面に集光させる第 2 光学処理ステップを有する。

40

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、走査ミラー 6 を用い、第 2 光学系 25 を透過したレーザ光 10 C を反射することで該レーザ光 10 C の進行方向を変化させ、レーザ光 10 C のスポット光が照射される鋼板表面上の位置を、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C と交差する方向である走査方向 S に沿って移動させる走査処理ステップを有する。

【0093】

そして、前記第 1 光学処理ステップでは、鋼板表面におけるレーザ光 10 C のスポット光のなす楕円形の長軸の向き G2 を、走査方向 S と異なる方向であり、かつ、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向 C に沿うように調整し、移動機構 27 により走査ミラー 6 の動作に同期して第 2 光学系 25 を移動させる。また、第 2 光学処理ステップでは、鋼板表面に集光さ

50

れるレーザ光10Cのスポット光毎に、鋼板表面に点状溝1Aを形成することで、鋼板表面に点列溝1を形成する。

【実施例】

【0094】

＜実施例1＞

方向性電磁鋼板は、成分調整された鋼片を熱延、冷延、一次再結晶・脱炭焼鈍、二次再結晶、平坦化焼鈍、表面コーティングの順番で行う製造工程を経て、最終製品となる。

深さ数十 μm の点状溝は、冷延によって消失してしまう可能性が高いため、冷延工程後であれば、どの工程の時点で溝を形成しても、ほぼ同様の効果が得られる。

【0095】

本発明の実施例1では、レーザ光による溝加工法を用いて、冷延工程後の鋼板に溝形成を行い、その後、一次再結晶工程以降のすべての工程を経て、方向性電磁鋼板の製品板を製造した。そして、この方向性電磁鋼板について、鉄損特性、耐曲げ特性、および磁束密度を、従来技術に係る方向性電磁鋼板と比較して評価した。

方向性電磁鋼板は、板幅100mm、長さ500mm、板厚0.23mmの冷延板を用いて加工を行い、異なる試験条件ごとに30枚の試験を行い、特性はこれらの平均値で評価した。

レーザ光は、パルスレーザ光を用いた。用いたパルスレーザのレーザパルス周波数は225kHzであり、パルスエネルギーは7.0mJであり、パルス時間幅Tpは0.5 μs であり、スポット光形状は楕円であり、短軸径は50 μm であり、長軸径は80 μm に設定した。ビーム走査速度は20m/sに設定した。

以上のような高速走査では、パルス時間幅の中でレーザ光が移動するため、形成される楕円形状の点状溝の形状は、長軸方向の長さdcが、 $dc = 90\mu\text{m}$ 、短軸方向の長さdlが、 $dl = 52\mu\text{m}$ となる。この際の最大溝深さhは35 μm であった。すなわち、発明例の方法では、レーザ光の一つのパルスで一つの点状溝を形成した。

【0096】

得られた方向性電磁鋼板において、パルス周波数Fp、パルス時間幅Tp、走査速度Vsの関係から、点状溝間の距離Pcは約90 μm となり、その結果、楕円溝の長軸長さと一致した。したがって、図1に示す点列溝間の重畳幅Dは、 $D = 0\mu\text{m}$ であった。

集光したレーザ光は、板幅方向Cと交差する一方向に走査し、方向性電磁鋼板2を一定速度でL方向（圧延方向）に移動させ、その移動速度（通板速度）等を調整することで、溝部の方向性電磁鋼板2の圧延方向L（長手方向）に沿った間隔PLを、 $PL = 3\text{mm}$ とした。

以上の条件で、個々の微小な楕円形状をした点状溝の長軸方向Gと板幅方向Cとの成す角である傾斜角 θ_g を、 $\theta_g = 0^\circ$ となるように、スポットの傾斜角 θ_{g2} を適宜調整して、走査角 θ_s を変更して鉄損W17/50の評価と、繰り返し曲げ試験による機械特性とを評価した。

【0097】

比較例の方向性電磁鋼板として、連続溝を形成した方向性電磁鋼板を用いた。そして、発明例と同じ $dl = 52\mu\text{m}$ 、 $PL = 3\text{mm}$ の条件にて、走査角 θ_s を同様に变化させた場合の特性を評価した。

比較例の方向性電磁鋼板の平均溝深さは、走査角 $\theta_s = 0^\circ$ において最も鉄損値が低くなった約30 μm とした。

なお、発明例の場合、点状溝において、方向性電磁鋼板2の横断面における微小楕円溝の深さは点状溝の長さ方向端では浅い部分が発生する。よって、平均値として連続溝と同等の溝深さを得るため、溝中心部の最大深さhは、連続溝の場合に比べ、若干深くすることが望ましい。

【0098】

鉄損は、周波数50Hzで磁化力1.7A/mにおける単位重量当たりの鉄損値（W17/50）[W/kg]を評価した。

10

20

30

40

50

繰返し曲げ試験は図 7 (A) に示すように、方向性電磁鋼板 2 を治具 28 で固定して L 方向に繰返し曲げを行い、固定点で方向性電磁鋼板 2 が破断するまでの曲げ回数 N_b で耐曲げ強度を評価した。曲げ回数 N_b が大きい方が耐曲げ強度が高く、鉄芯を製造する際の板破断リスクが少ないことに相当する。図 7 (B) は折り曲げた方向性電磁鋼板 2 と点列溝 1 との配置関係を示す。

【0099】

鉄損値 ($W17/50$) の評価結果を図 8 に、曲げ回数 N_b の評価結果を図 9 示す。

図 8 より、従来形状の連続溝では、走査角 θ_s を増大させることで鉄損低減効果は減少するため、鉄損値 ($W17/50$) は、走査角 θ_s の増加に伴い増加する。

一方、発明例に係る方向性電磁鋼板では、個々の溝部の方向が板幅方向 C にほぼ平行 (L 方向にほぼ直交) であるため、鉄損値 ($W17/50$) は従来の連続溝の場合よりも小さく、走査角 $\theta_s = 30^\circ$ 程度までは鉄損値 ($W17/50$) の増加がほとんどなかった。

走査角 $\theta_s > 30^\circ$ では、斜めに配列された微小楕円溝間の隙間が過剰に増加するため、鉄損改善の源である磁束の障壁効果が減少して、鉄損が増加したと考えられる。よって発明例において、走査角 θ_s が比較的大きくても比較例よりも良好な鉄損が得られ、特に走査角 θ_s が 30° 以下であることがより好ましいことが分かった。

【0100】

図 9 は、繰返し曲げ試験で求められる曲げ回数 N_b に関し、走査角 θ_s による依存性を調べた比較結果である。

発明例における曲げ回数 N_b は、従来技術の方向性電磁鋼板の場合とほぼ同様に走査角 θ_s の増加に伴って増加しており、走査角 θ_s が 0° より大きい場合において N_b が大きく増加することが分かった。

従って、図 8、9 に示す結果より、発明例の方向性電磁鋼板は、低い鉄損と十分な耐繰返し曲げ加工性を両立できることが分かった。

【0101】

<実施例 2>

図 10 と図 11 は、走査角 θ_s を 10° 又は 30° に設定した場合に、点状溝の傾斜角 θ_g を走査角 θ_s と同方向で角度変更した際の鉄損値 ($W17/50$) を示す。その他の条件は実施例 1 と同じである。

傾斜角 θ_g が 0° より増加することで磁束の障壁効果は減少するため、鉄損値 ($W17/50$) は微増に留まるが、 10° を越えると鉄損値 ($W17/50$) の増加が顕著となるため、傾斜角 θ_g は 10° 以下に調整することが好ましいことが分かった。

【0102】

<実施例 3>

点状溝の板幅方向 C に沿う重畳度合いを表す間隔 D (隣接する点状溝の板幅方向 C に沿った間隔) と、鉄損値 ($W17/50$) との関係を評価した。間隔 D は、図 1 (B) に図示されており、間隔 D がプラスであれば、互いに隣接する点状溝の端部どうしが板幅方向 C に沿って離れており、間隔 D がマイナスであれば、互いに隣接する点状溝の端部どうしが重なっていることを示す。

図 12 は、重畳度合いを表す D と、点状溝の長軸径 d_c との比で代表し、鉄損値 ($W17/50$) への影響を調べた結果である。 $\theta_s = 10^\circ$ 、 $\theta_g = 0^\circ$ であり、レーザ光の走査速度、パルス時間幅 T_p を一定として、パルスの周波数 F_p を変更することで中心間距離 P_c を制御して間隔 D を調整した。その他の条件は実施例 1 に同じである。

【0103】

図 12 に示す結果より、重畳度合いを表す間隔 D の値が増加すると、互いに隣り合う点状溝間の隙間による磁束の障壁効果が減少し、鉄損値 ($W17/50$) が増加することが分かった。

一方、重畳度合いを表す間隔 D の値がマイナスとなり、重畳幅が増加する場合、鉄損値 ($W17/50$) の増加は比較的抑えられる。 $W17/50$ は、 50 Hz の交流磁界によって最大磁束密度が強制的 1.7 T になるように磁化した場合の鉄損である。そこで、表面

10

20

30

40

50

に溝が大量に形成されると、図3（C-2）、図4（C-2）、図5（C-2）で示したように、溝下部ではL方向断面積が減り、磁束密度が局所的に増加する。鉄損は磁束密度の2乗に比例するため、すなわち局所的に鉄損値が増加するためである。よって、間隔Dの値をマイナス側の過剰な値とすることは好ましくない。したがって、 D/d_c の範囲を -0.3 以上、 0.2 以下の範囲とすることが好ましいことが分かった。

【0104】

<実施例4>

図16は、発明例である実施例4の説明図であり、電磁鋼板の実製造ラインでコイル状に連続で製造する場合を想定して、実コイル幅に相当する板幅 $W_c = 1000\text{ mm}$ の鋼板に対して、点列溝を幅方向で複数に分割して溝を形成した場合である。本実施例は、互いに隣接する点列溝44Aの重畳幅Daの影響を示す実施例である。

【0105】

板幅 $W_c = 1000\text{ mm}$ に対して、分割数は6とし、各点列溝44Aは個別のレーザ加工装置で形成された。各点列溝44AのC方向長さは、各レーザ加工装置の走査幅に相当し、最大約 200 mm である。ここで $\theta_s = 10^\circ$ 、 $\theta_g = 0^\circ$ であり、その他の条件は実施例1に同じである。冷延後の電磁鋼板で幅 1000 mm 、長さ 2000 mm の鋼板を12枚用いて、重畳幅Daを変更した12種類の条件で図16に示すような溝加工を行い、鉄損 $W_{17}/50$ を評価した。鉄損評価では、 $1000\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$ の各鋼板から任意に $100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ のサンプル30枚を切り出して鉄損を計測して、その平均値で評価した。その結果を、図17に示す。

【0106】

重畳幅Daが 0 mm 近傍で鉄損は最も低い値を示し、 0 mm よりも大きい場合、すなわち互いに隣接する点列溝44A同士が離れる方向で鉄損は増加する。これは、点列溝44A間にある溝が形成されていない領域の影響が大きくなって鉄損低減効果が減少するためと考えられる。また 0 mm より小さくなる場合、すなわち互いに隣接する点列溝44AのC方向の重畳幅Daが大きくなると、実施例3で示した D/d_c の減少による影響と同様に、溝下部での局所的な磁束密度の増加によって鉄損が増加するものと考えられる。よって、重畳幅Daには適切な範囲があり、具体的には $-10\text{ mm} \leq Da \leq 5\text{ mm}$ であることが好ましいと分かった。

【0107】

<実施例5>

図18及び表1は鉄損、曲げ特性、磁束密度に関して、溝加工前の方向性電磁鋼板の特性を基準にして、従来技術と発明例とを比較した説明図と比較結果である。冷延後の方向性電磁鋼板を用意して、上記実施例1に記載した方法と同様の方法でこれらの溝パターンによる特性を比較評価した。

【0108】

10

20

30

40

50

【表 1】

比較条件	溝形状	溝幅		溝長さ		最大溝深さ		平均溝深さ		溝配置方向		点状溝方向		点状溝端間隔		点状溝間隔		溝間隔		鉸損		破断までの曲げ回数		磁束密度	
		dL	μm	dc	μm	h	μm	ha	μm	θs	°	θg	°	D	μm	Pc	μm	PL	mm	Wt7/50	W/kg	Nb	回	B8	T
比較例	基準	溝無し																		0.840		17		1.910	
比較例	A	連続				31		30		0						3				0.763		3		1.860	
比較例	B	連続				31		30		10						3				0.767		10		1.875	
比較例	C	点状		90		35		28		10		10		0		90		3		0.768		12		1.880	
本願発明	E	点状		90		35		28		10		0		0		90		3		0.763		12		1.900	

【0109】

ここで、磁束密度は、0.8 A/mの磁界を印加した際に発生する磁束密度B8 [T]である。B8の値が大きい程、一定の磁化力で発生し得る磁束密度が高く、よって小型のトランスでも優れた性能を得ることが可能となる。図18は、比較した鋼板の溝の模式図である。比較例Aは、鋼板全幅にほぼ均一な深さの連続溝を圧延方向に垂直な方向に形成した例を示す。比較例Bは、同様の溝を板幅方向Cから10°傾けた例を示す。比較例Cは、点状溝から成る点列溝を板幅方向から10°傾けて形成した例であり、点列溝を構成する各点状溝の方向も点列溝と同じ方向に10°傾けており、従って、互いに隣接する点状溝の両端同士は頂点が接するように形成されている。一方、発明例Eは、実施例1に示

した点列溝に同じである。

【0110】

表1に示す結果より、比較例Aは、溝加工前の特性基準に対して、鉄損の低減効果は高いものの、耐曲げ強度は低く、また磁束密度の低下代が大きい。比較例Bでは、曲げ強度は比較的高く、磁束密度の劣化代も少なくなるが鉄損改善代は劣化する。比較例Cでは、曲げ強度と磁束密度特性は比較例Bよりも向上するものの、鉄損特性は依然劣位のままである。これに対して、発明例Eでは、曲げ強度を維持したまま、低い鉄損と高い磁束密度特性が得られている。

【0111】

磁束の流れを空隙によって阻害することが鉄損低減効果の源であるが、発明例では微細な点状溝を圧延方向にほぼ垂直で形成することで磁束の阻害を大きくして磁区制御効果を得ることができている。点状溝によって溝が形成されない部分が発生するため磁区制御効果は、連続溝の場合に対して若干劣る可能性があるものの、その一方で、磁束が通過しやすい微小な領域を、幅方向で均一に形成することで、図3に示したように、表面、およびL方向断面での磁束の局所的な集中が抑制される。そのため、磁束密度の2乗に比例する鉄損増加成分が少なく、従来例で最も鉄損の低かった比較例Aと同等の鉄損が得られている。加えて、図3で示したように磁束が通過しやすい微小な箇所も鋼板全体に均一に存在していることから、磁束密度の大きな低下を抑制することができている。

【0112】

以上に説明した実施例では、楕円溝の長軸径 $d_c = 90 \mu m$ 、短軸径 $d_L = 52 \mu m$ としたが、楕円溝の寸法形状はこれらの値のみに限られるものではない。しかし、短軸径 d_L が $10 \mu m$ 以下の極狭い溝幅であると、溝部内での磁気結合により磁束発生 of 阻害効果が減少し、鉄損低減効果が大きく低下するおそれがある。

また、溝幅 d_L が $300 \mu m$ を超えると母材の除去体積の増加が顕著になり、磁束の発生自体を阻害してしまうため、高い磁束密度が要求される方向性電磁鋼板の場合には好ましくない。よって、短軸径 d_L の範囲は $10 \mu m \sim 300 \mu m$ がより好ましい。

なお、長軸径 d_c は溝幅 d_L より長くすればよいが、例えば長軸径 d_c が $30000 \mu m$ 、すなわち $30 mm$ を超えると、板幅を $100 mm$ 程度に切断してトランス鉄芯を製造する場合には、その幅内に含まれる点状溝の数が $3 \sim 4$ か所と少なくなる。点状溝と溝の間は磁束の流れが他とは異なり、磁束が集中しやすく、このような箇所が数か所しかない場合は、板としての磁気特性が不均一になる可能性がある、そのため、長軸径 d_c は、最大で $30 mm$ 程度が好ましい。

【0113】

本実施例では、溝深さ h を $35 \mu m$ としたが、この溝深さのみに限られるものではない。しかし、溝深さ h が $5 \mu m$ を下回ると、磁区制御効果が期待できず、また $100 \mu m$ を超えて深い溝を形成すると、上述と同様に磁束発生を大きく阻害してしまうため、高い磁束密度が要求される方向性電磁鋼板の場合には好ましくない。よって、溝深さ h の範囲は、 $5 \mu m \sim 100 \mu m$ とすることが好ましい。

【0114】

本実施例では、溝形成のL方向（圧延方向）間隔 P_L は $3 mm$ としたが、これのみに限られるものではない。しかし、ピッチ P_L が $10 mm$ を超えると、L方向に隣り合う溝部それぞれの磁区制御の相乗効果が期待できず、また $1 mm$ 未満となると、磁束発生を大きく阻害してしまうため、高い磁束密度が要求される方向性電磁鋼板の場合には好ましくない。よって、L方向ピッチ P_L の範囲は $1 mm \sim 10 mm$ とすることが好ましい。

【0115】

また、本実施例及び上記各実施形態では、鋼板の片面にのみ点列溝を形成する例を述べたが、鋼板の両面に溝を形成しても構わない。その場合は、同様の鉄損低減効果を得るには片面当たりの溝深さを浅くしても、同様の鉄損低減効果が期待できる。

【0116】

<レーザ加工装置（第3実施形態）>

10

20

30

40

50

図13は、方向性電磁鋼板2に点群溝33Aを形成するために用いる第3実施形態のレーザ加工装置Eの概要を示す斜視図である。

レーザ加工装置Eは、方向性電磁鋼板2の表面にレーザ光を照射することで、図14に示すように、方向性電磁鋼板2の板幅方向Cと交差する方向に延在する点列溝33を形成する装置である。

【0117】

本実施形態のレーザ加工装置Eにより方向性電磁鋼板に形成する点群溝33Aは、図1に示した点状溝1Aと形状が異なる。

図14に、点群溝33Aを間欠的に複数形成した点列溝33を示す。本実施形態の点群溝33Aは、複数の楕円穴33aを平面視で数珠繋ぎ(daisy chain)に点群状に接続した、連続した溝部(楕円穴33a)からなる形状を有する。各楕円穴33aは、内面33bと底面33cを有する1つの穴であるが、互いに隣接する楕円穴33aの長軸側の内面どうしを一部重ね合わせて複数の楕円穴33aが走査方向Sに沿って数珠繋ぎに点群状に連結され、1つの点群溝33Aが形成されている。

【0118】

本実施形態の点群溝33Aが複数の楕円穴33aの集合体であること以外は、先に説明した点状溝1Aからなる点列溝1の構成と形成過程は同じである。

即ち、点群溝33Aが走査方向Sに沿って間欠的に所定のピッチで整列形成されていること、板幅方向Cに対して、点群溝33Aの長軸の傾斜角 θ_g が規定されること、同じく走査角 θ_s が規定されること、点群溝33Aの長軸方向の長さ d_c が規定されること、点群溝33Aの短軸長さ d_c が規定されることも、図1に示した点状溝1Aと同等である。また、点群溝33Aの集合体である点列溝33が方向性電磁鋼板2の長手方向に所定の間隔PLをあけて整列して形成されていることも、先の点列溝1と同等である。また、点群状に集光されたスポット光がパルス時間Tpの間に速度Vsで移動して形成された溝形状であることも同等である。

【0119】

図13に示すレーザ加工装置Eは、レーザ照射部3と第1光学系5とビーム強度分布変換素子として回折格子素子(Diffractive Optics)34と走査ミラー6(ポリゴンミラー12)と第3光学系35とを備えている。

レーザ照射部3は、上記第1実施形態の構造と同様に、レーザ出射部8と伝送ファイバ9を備え、伝送ファイバ9が図示略のレーザ光源に接続されている。

レーザ照射部3の出射側に配置されている第1光学系5は、先のレーザ加工装置Aと同様に円柱レンズコリメータ11からなる。

第3光学系35は、上記第1実施形態の構造と第2光学系7と同様に、f θ レンズ(スキャンレンズ)19を備えている。

【0120】

円柱レンズコリメータ11の出射側とポリゴンミラー12の間に、ビーム強度分布変換素子として回折格子素子34が設けられている。ビーム分割素子34をレーザ光が透過すると、ビーム強度分布変換素子34は回折によりレーザ光の空間強度分布を2つ以上の連なる複数の強度分布に分割する。これにより、群状に連続する(図14(B)に示すように点群溝33Aが飛び飛びに連続する)、連続したスポット光(図14(C)に示すように楕円穴33aが連続して点群溝33Aが形成することができるスポット光)に変換する機能を有する。強度分布の一例を図13(C)に示す。図13(C)では、点群溝33Aの平面視形状と、レーザ光の空間強度分布を6つの連なる強度分布に調整した場合のレーザ光の空間強度分布を示している。

ビーム強度分布変換素子34は、レーザ光の回折、透過によって強度分布を変換又は分割する素子であり、f θ レンズと組み合わせて集光点(方向性電磁鋼板2の表面)での強度分布を群状にすることができる。

【0121】

このようにレーザ光の空間強度を6つの強度分布に調整してから、このレーザ光10D

10

20

30

40

50

をポリゴンミラー 12 に送り、ポリゴンミラー 12 で反射させるとともに走査する。この走査したレーザ光 10 E を、上記第 1 実施形態の第 2 光学系 7 と同じ構成を持つ第 3 光学系 35 を介して鋼板表面にレーザ光 10 F として集光させることにより、方向性電磁鋼板 2 の鋼板表面に、群状に連続する連続した点群溝 33 A を形成できる。

ここで、方向性電磁鋼板 2 の鋼板表面に集光照射されるレーザ光 10 F は、図 13 (C) に示すように 6 つの連なる強度分布を有する空間強度分布を示すため、先の実施形態で形成した点状溝 1 A の代わりに、6 つの楕円穴 33 a が数珠繋ぎ状に連結した点群溝 33 A を形成できる。

【0122】

図 13 (A) に示すレーザ加工装置 E では、例えば、単一強度のパルスレーザ光をビーム強度分布変換素子 34 と f θ レンズ 19 の組み合わせにより、集光点（鋼板表面）において 2 つ以上のピークを持つ強度分布に変換できるので、個別の点群溝 33 A を複数の楕円穴 33 a の集合体として構成することができる。

図 13 (A) に示すレーザ加工装置 E において、ビーム強度分布変換素子 34 に入射するべきレーザ光は、例えば、中心強度が高く、端で低い単一ピークを有するガウシアン分布のレーザ光を用いることができる。また、図 13 (B) に示すようにフラットトップモードの分布を有するレーザ光を用いても良い。

【0123】

図 14 に示す数珠繋ぎ状の点群溝 33 A からなる点列溝 33 を有する方向性電磁鋼板 2 であっても、先に説明した第 1 実施形態の方向性電磁鋼板 2 と同様の作用効果を得ることができる。

【0124】

<レーザ加工方法（第 3 実施形態）>

上述のレーザ加工装置 E により方向性電磁鋼板 2 に点列溝 1 を加工する方向性電磁鋼板製造方法は、以下のステップを有する。

すなわち、この方向性電磁鋼板製造方法は、レーザ照射部 3 を用いて、レーザ光 10 を照射するレーザ照射ステップを有する。

また、この方向性電磁鋼板製造方法は、第 1 光学系 5 を用いて、レーザ光 10 のスポット光を楕円形に調整し、レーザ光 10 のスポット光のなす楕円形の長軸の向きを調整する第 1 光学処理ステップを有する。

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、レーザ光 10 を透過し、レーザ光 10 の空間強度分布を二つ以上の連なる複数の強度分布にビーム強度分布変換素子 34 を用いて調整するレーザ分割ステップを有する。

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、走査ミラー 6 を用い、ビーム分割素子 34 で調整されたレーザ光 10 を反射することでレーザ光 10 の進行方向を変化させ、レーザ光 10 のスポット光が照射される鋼板上の位置を、方向性電磁鋼板 2 の板幅方向と交差する方向である走査方向 S に沿って移動させる走査処理ステップを有する。

さらに、この方向性電磁鋼板製造方法は、第 3 光学系 35 を用いて、走査ミラー 6 で反射したレーザ光を透過し、鋼板の表面に集光させる第 3 光学処理ステップを有する。

【0125】

前記第 1 光学処理ステップは、鋼板表面におけるレーザ光 10 F のスポット光のなす楕円形の長軸の向き G を、前記走査方向 S と異なる方向であり、かつ、鋼板の板幅方向 C に沿う方向に調整する。また、前記第 3 光学処理ステップは、鋼板の表面に集光されるレーザ光 10 F のスポット光毎に、鋼板表面に溝部を形成することで、鋼板表面に点列溝 33 を形成する。

【0126】

なお、先の実施形態において、走査ミラー 6 として用いた回転式のポリゴンミラー 12 は、図 15 に示す構成のガルバノミラー 30 に変更しても良い。図 15 に示すガルバノミラー 30 は、駆動モータ 31 によって図 15 の矢印方向に回転駆動される。ガルバノミラー 30 の回転角度に応じてレーザ光の反射方向を変更し、レーザ光を走査することができ

10

20

30

40

50

る。

【0127】

以上、本発明の各実施形態、実施例、及び各種変形例の説明を、レーザ光による溝加工法を例に説明したが、本発明の方向性電磁鋼板の特徴は微細な点状溝又は点群溝からなる点列溝が適切に配置されることにある。従って、本発明で開示される通りに適切な溝が形成されるのであれば、その加工方法はレーザ加工のみに限られない、例えば、適切な点列溝のパターンに相当する凹凸形状を持つ歯形ロールや、歯形プレスを用いて機械的に溝を形成してもよい。あるいは適切なパターンでレジスト膜を鋼板表面に施して、腐食液に浸して適切な溝パターンを化学的に形成するエッチング法で形成してもよい。あるいは、非接触加工方式として、電子ビームを使う微細加工法を用いてもよい。

10

【0128】

以上に説明した本発明の骨子を以下に纏める。

(1) すなわち、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、

鋼板表面に沿って、圧延方向と、前記圧延方向に直交する板幅方向とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記圧延方向が、前記方向性電磁鋼板の磁化容易方向と一致しており、

前記鋼板表面に、前記板幅方向と交差する点列方向に沿って延在する点列溝を有し、

前記点列溝が、略楕円形の点状溝、または、複数の穴が直線的に連なって形成された点群溝が、複数、直線的に並んで構成され、

前記点状溝または前記点群溝の長軸が、前記点列方向に対して交差している。

20

【0129】

(2) 上記(1)に記載の方向性電磁鋼板は、

前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を $\theta_g [^\circ]$ とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を $\theta_s [^\circ]$ としたときに、下記(式1)～(式3)を満たしてもよい。

$$0^\circ \leq |\theta_g| \leq 10^\circ \quad \dots (\text{式1})$$

$$0^\circ < |\theta_s| \leq 30^\circ \quad \dots (\text{式2})$$

$$|\theta_g| \leq |\theta_s| \quad \dots (\text{式3})$$

【0130】

(3) 上記(1)または(2)に記載の方向性電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい：

30

前記点列溝が、前記複数の点状溝で構成され；

前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを $d_c [\mu m]$ とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を $D [\mu m]$ としたときに、下記(式4)を満たす。

$$-0.3 \leq (D/d_c) \leq 0.2 \quad \dots (\text{式4})$$

ここで、前記間隔 $D [\mu m]$ は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を $0 [\mu m]$ とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0131】

(4) 上記(1)～(3)のいずれか一項に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい：

40

前記点列溝が、前記複数の点状溝で構成され；

前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを $d_c [\mu m]$ とし、前記長軸に直交する方向を前記点状溝の短軸方向とし、前記点状溝の前記短軸方向に沿った長さを $d_L [\mu m]$ としたときに、下記(式5)及び(式6)を満たす。なお、長さ $d_c [\mu m]$ の最大値を $30000 \mu m$ としてもよい。

$$10 \mu m \leq d_L \leq 300 \mu m \quad \dots (\text{式5})$$

$$d_L \leq d_c \quad \dots (\text{式6})$$

【0132】

(5) 上記(1)～(4)のいずれか一項に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用しても

50

よい：

前記点列溝が、前記複数の点状溝で構成され；

前記点状溝の最大深さを h [μm] としたときに、下記（式 7）を満たす。

$$5\ \mu\text{m} \leq h \leq 100\ \mu\text{m} \quad \cdots \text{（式 7）}$$

【0133】

（6）上記（1）～（5）のいずれか一項に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい：

前記鋼板表面上に、前記点列溝が複数本、前記圧延方向に等間隔で形成され；

互いに隣接する前記点列溝の前記圧延方向に沿った間隔を PL [mm] としたときに、下記（式 8）を満たす。

$$1\ \text{mm} \leq PL \leq 10\ \text{mm} \quad \cdots \text{（式 8）}$$

【0134】

（7）上記（1）～（6）のいずれか一項に記載の電磁鋼板は、以下の構成を採用してもよい：

前記点列溝が前記板幅方向で 2 つ以上に分割されており、分割位置において互いに隣接する前記点列溝の端部間の前記板幅方向に沿った間隔を Da [mm] としたときに、下記（式 9）を満たす。

$$-10\ \text{mm} \leq Da \leq 2\ \text{mm} \quad \cdots \text{（式 9）}$$

ここで、前記間隔 Da [mm] は、前記圧延方向に沿って見た視線において、前記端部同士間が互いに重なっていない場合を正の値とし、前記端部同士間が一点で接している場合を 0 [μm] とし、前記端部同士間が互いに重なっている場合を負の値とする。

【0135】

（8）また、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記（1）～（7）のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と；

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光のなす前記楕円形の前記長軸の向きを調整する第 1 光学系と；

前記第 1 光学系で調整された前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと；

前記走査ミラーで反射した前記レーザ光を透過または反射し、前記鋼板表面に集光させる第 2 光学系と；

を有し、

前記第 1 光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第 2 光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を Fs [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を Vs [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を Pc [μm] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを dc [μm] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [$^\circ$] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [$^\circ$] としたときに、下記（式 10）および（式 11）を満たす。

$$Pc = D + dc \times \cos \theta_g \quad \cdots \text{（式 10）}$$

$$Pc / \cos \theta_s = (Vs / Fs) \times 10^6 \quad \cdots \text{（式 11）}$$

【0136】

（9）また、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記（１）～（７）のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と；

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを調整する第１光学系と；

前記第１光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第２光学系と；

前記第２光学系を透過した前記レーザ光を反射することで進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと；

10

を有し、

前記第１光学系は、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第２光学系で前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点状溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記（式１２）および（式１３）を満たす。

20

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots \text{（式１２）}$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \quad \dots \text{（式１３）}$$

【０１３７】

（１０）さらに、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造装置は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して上記（１）または（２）に記載の方向性電磁鋼板を製造する装置であって、

前記レーザ光を照射するレーザ照射部と；

30

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを調整する第１光学系と；

前記第１光学系で調整された前記レーザ光を透過し、前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換するビーム強度分布変換素子と；

前記ビーム強度分布変換素子で変換された前記連続したスポット光を反射することで進行方向を変化させ、前記連続したスポット光の群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる走査ミラーと；

前記走査ミラーで反射した前記連続したスポット光を透過し、前記鋼板表面に集光させる第３光学系と；

40

を有し、

前記第１光学系は、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第３光学系で前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成し、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μ m] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μ m] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μ m] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記

50

板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記（式 1 4）および（式 1 5）を満たす。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (\text{式 } 14)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (\text{式 } 15)$$

【0138】

（11）また、本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板製造方法は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点状溝で構成された前記点列溝を形成して上記（1）～（7）のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを調整する第1工程と；

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光の進行方向を変化させ、前記スポット光が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第2工程と；

前記スポット光を前記鋼板表面に集光させる第3工程と；
を有し、

前記第1工程では、前記鋼板表面における前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第3工程では、前記鋼板表面に集光される前記スポット光毎に、前記鋼板表面に前記点状溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する。

【0139】

（12）また、本発明の他の態様に係る方向性電磁鋼板製造方法は、

前記鋼板表面にレーザ光を照射することによって前記点群溝で構成された前記点列溝を形成して請求項1または2に記載の方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記レーザ光のスポット光を楕円形とし、前記スポット光がなす前記楕円形の前記長軸の向きを調整する第4工程と；

前記長軸の向きが調整された前記レーザ光を複数の強度分布に分割することで、群状に連続する、連続したスポット光に変換する第5工程と；

前記連続したスポット光の前記群毎の中心位置が照射される前記鋼板表面上の位置を、前記板幅方向と交差する走査方向に沿って移動させる第6工程と；

前記連続したスポット光を前記鋼板表面に集光させる第7工程と；
を有し、

前記第5工程では、前記鋼板表面における前記連続したスポット光の連続する方向の向きを、前記走査方向と交差する方向に調整し、

前記第7工程では、前記鋼板表面に集光される前記連続したスポット光毎に、前記鋼板表面に前記点群溝を形成することで、前記鋼板表面に前記点列溝を形成する。

【0140】

（13）上記（11）または（12）に記載の方向性電磁鋼板製造方法は、

前記レーザ光のパルス周波数を F_s [Hz] とし、前記鋼板表面における前記スポット光の移動速度を V_s [m/s] とし、互いに隣り合う前記点群溝の前記板幅方向に沿った中心間距離を P_c [μm] とし、前記点状溝の前記長軸の方向に沿った長さを d_c [μm] とし、互いに隣接する前記点状溝の端部同士の前記板幅方向に沿った間隔を D [μm] とし、前記長軸が前記板幅方向に対してなす角度を θ_g [°] とし、前記点列方向が前記板幅方向に対してなす角度を θ_s [°] としたときに、下記（式 1 6）および（式 1 7）を満たしてもよい。

$$P_c = D + d_c \times \cos \theta_g \quad \dots (\text{式 } 16)$$

$$P_c / \cos \theta_s = (V_s / F_s) \times 10^6 \dots (\text{式 } 17)$$

【産業上の利用可能性】

【0141】

本発明の各態様によれば、耐繰り返し曲げ加工性の低下を抑制し、磁束密度の劣化を抑

10

20

30

40

50

制した上で、鉄損も低減された方向性電磁鋼板を提供できる。また、この方向性電磁鋼板を製造する方向性電磁鋼板製造装置及び方向性電磁鋼板製造方法を提供できる。よって、産業上の利用可能性は大である。

【符号の説明】

【0142】

A、B、E…レーザ加工装置、C…板幅方向、G…長軸の向き、L…圧延方向（長手方向）、S…走査方向（点列方向）、PL…間隔、 θ_g …傾斜角、 θ_s …走査角、1…点列溝、1A…点状溝、2…方向性電磁鋼板、3…レーザ照射部、5…第1光学系、6…走査ミラー、7…第2光学系、10、10A、10B、10D、10F…パルスレーザ光（レーザ光）、11…円柱レンズコリメータ、12…ポリゴンミラー、19… $f\theta$ レンズ、30…ガルバノミラー、33…点列溝、33A…溝部、33a…楕円穴、34…ビーム分割素子（回折素子）、35…第3光学系。

10

20

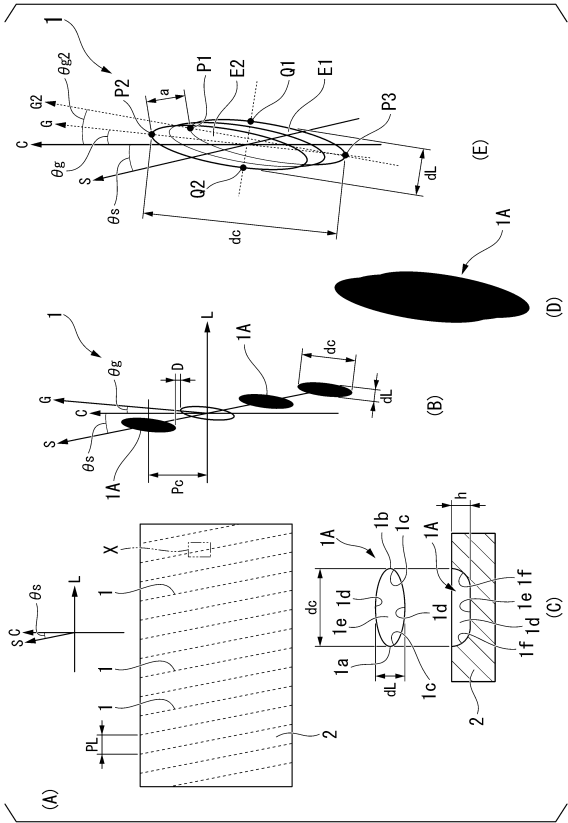
30

40

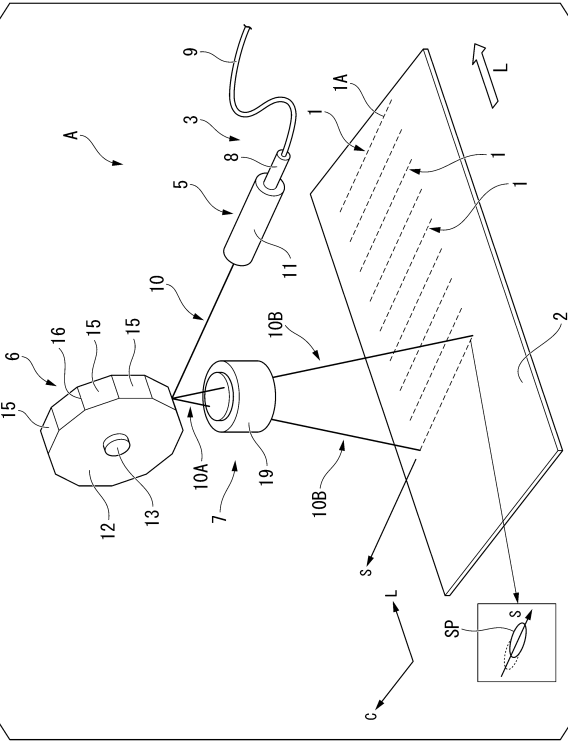
50

【図面】

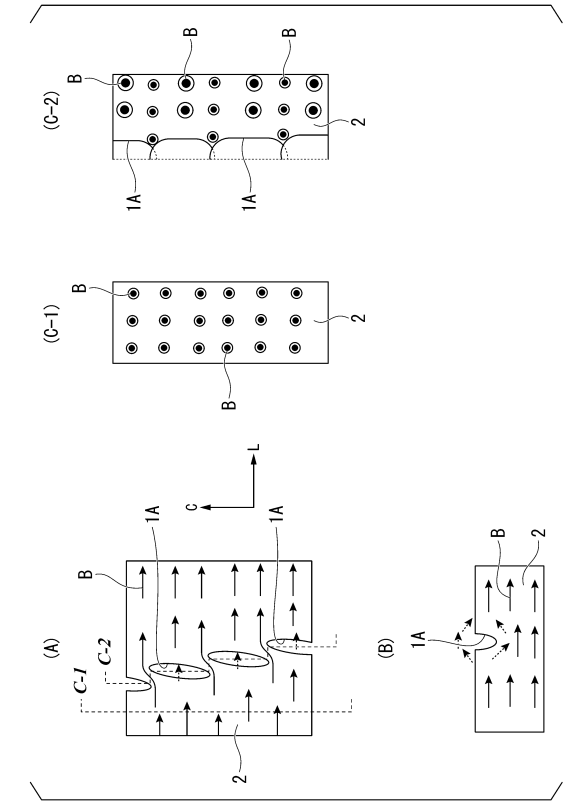
【図 1】



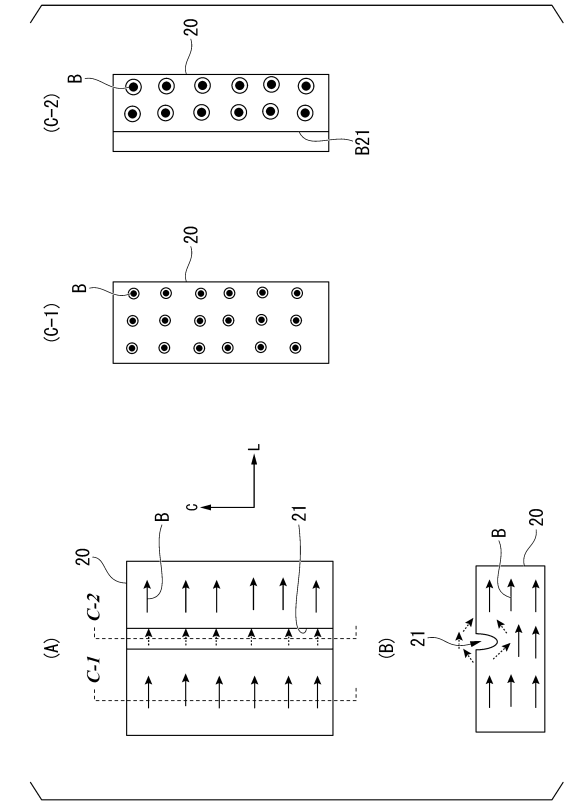
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

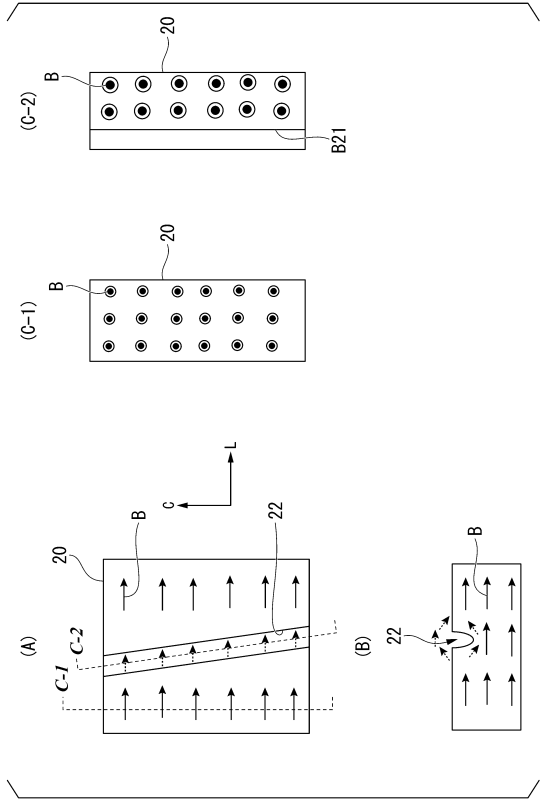
20

30

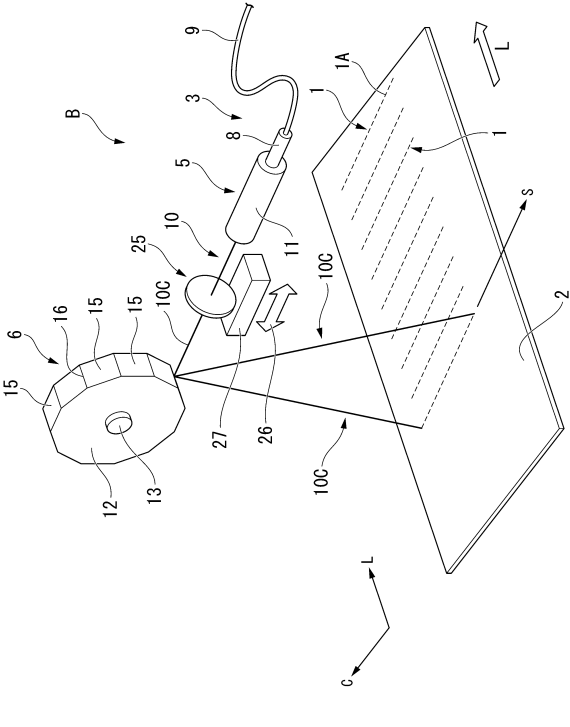
40

50

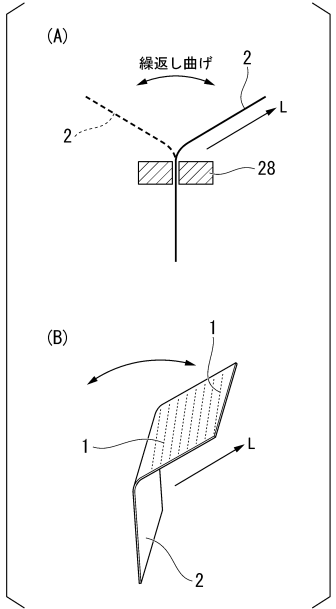
【図 5】



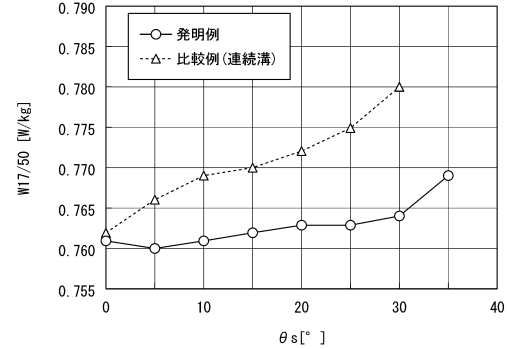
【図 6】



【図 7】



【図 8】



10

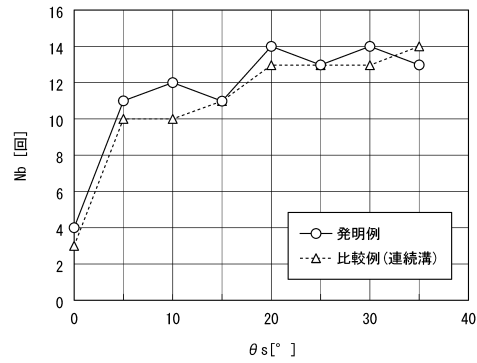
20

30

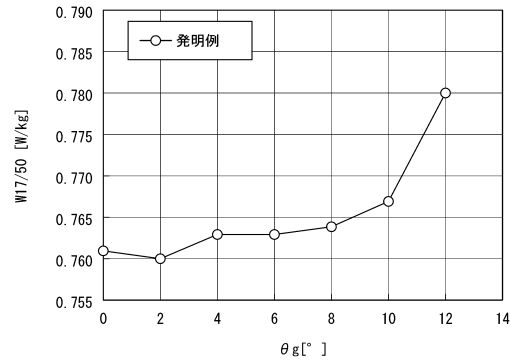
40

50

【図 9】

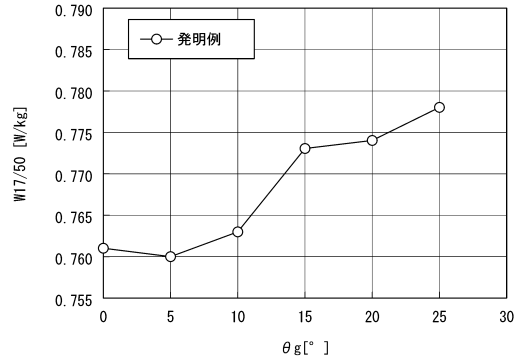


【図 10】

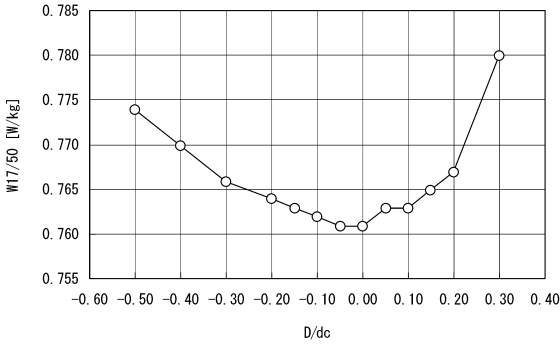


10

【図 11】



【図 12】



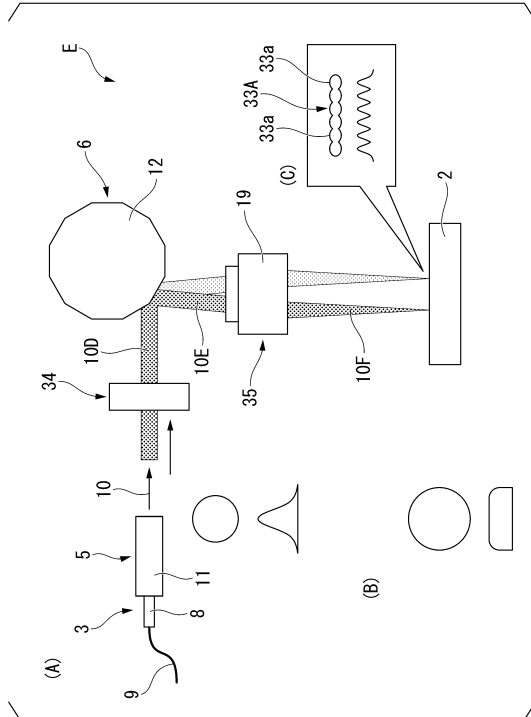
20

30

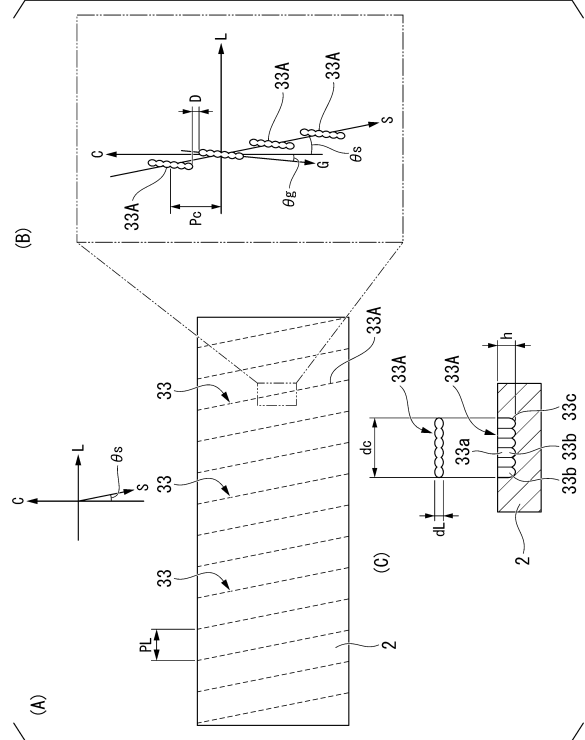
40

50

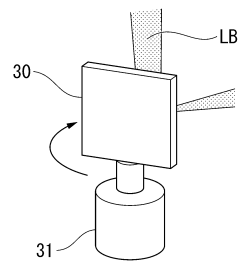
【図 13】



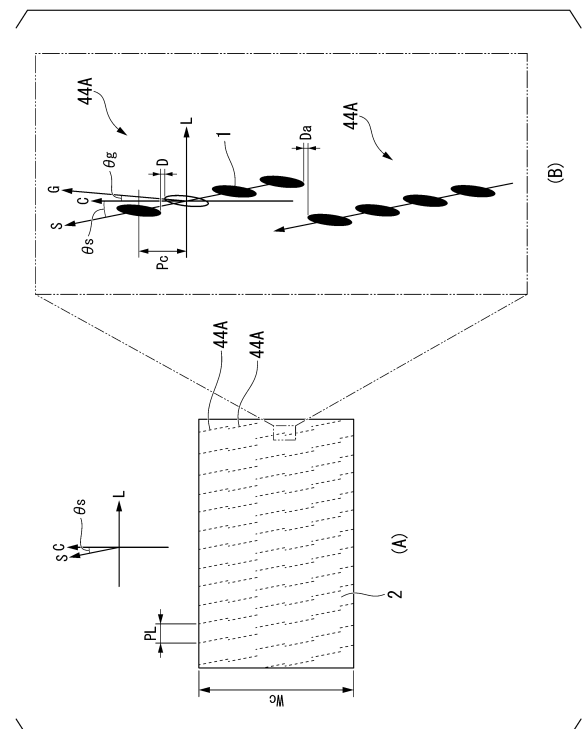
【図 14】



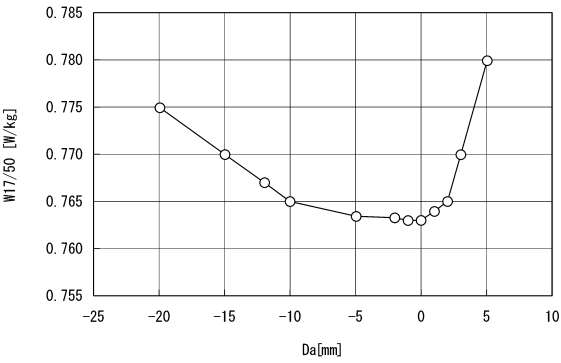
【図 15】



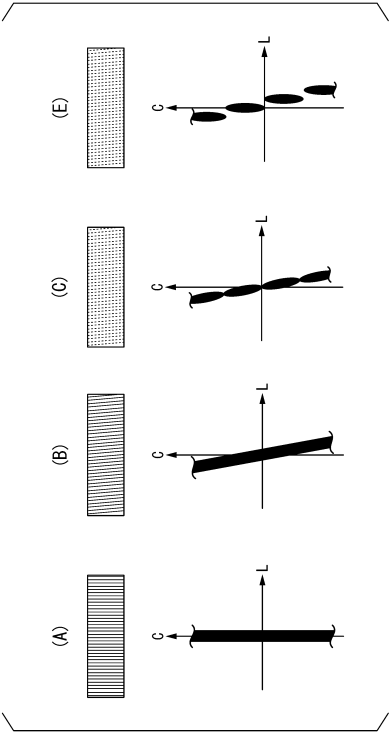
【図 16】



【図 17】



【図 18】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(74)代理人 100207686
弁理士 飯田 恭宏

(74)代理人 100224812
弁理士 井口 翔太

(72)発明者 坂井 辰彦
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内

(72)発明者 濱村 秀行
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内

審査官 豊島 唯

(56)参考文献 特開2017-125250 (JP, A)
国際公開第2012/164702 (WO, A1)
特開2019-137883 (JP, A)
特開2006-233299 (JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
B23K 26/00 - 26/70
C21D 8/12