

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年9月29日(29.09.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/203089 A1

- (51) 国際特許分類:
C21D 8/12 (2006.01) *C22C 38/60* (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01) *H01F 1/147* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/015222
- (22) 国際出願日: 2022年3月28日(28.03.2022)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2021-053618 2021年3月26日(26.03.2021) JP
- (71) 出願人: 日本製鉄株式会社 (NIPPON STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 片岡 隆史 (KATAOKA Takashi); 〒1008071 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 Tokyo (JP). 田中 智仁 (TANAKA Tomohito); 〒1008071 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 Tokyo (JP). 岩城 将嵩 (IWAKI Masataka); 〒1008071 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 Tokyo (JP). 竹田 和年 (TAKEDA Kazutoshi); 〒1008071 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 Tokyo (JP). 濱村 秀行 (HAMAMURA

Hideyuki); 〒1008071 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 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 松沼 泰史, 外 (MATSUNUMA Yasushi et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, 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, IT, JM, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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,

(54) Title: GRAIN-ORIENTED ELECTRICAL STEEL SHEET AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称: 方向性電磁鋼板及びその製造方法

(57) Abstract: This directional electromagnetic steel sheet comprises a base steel sheet having a prescribed chemical composition, a glass coating formed on the base steel sheet, and a tension-imparting insulation coating formed on the glass coating. A plurality of linear strains extending continuously or intermittently in a direction intersecting the rolling direction are present on the surface of the base steel sheet. The spacing p , in the rolling direction, between mutually adjacent linear strains is 3.0 to 9.0 mm, the width of the linear strains is 10-250 μm , and in an X-ray topography spectrum in the range of 1.50 mm in the rolling direction centered on the center of the linear strains, obtained from an X-ray topography image of the surface, the half width of the peak of the X-ray topography spectrum including the maximum value of the spectral intensity is 0.02 mm to 0.10 mm.

(57) 要約: この方向性電磁鋼板は、所定の化学組成を有する母材鋼板と、前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と、前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜と、を備え、前記母材鋼板の表面には、圧延方向に対して交差する方向に連続的にまたは断続的に延在する、複数の線状の歪が存在し、互いに隣り合う前記複数の線状の歪の、前記圧延方向における間隔 p が 3.0 ~ 9.0 mm であり、前記線状の歪の幅が、10 ~ 250 μm であり、表面の X 線トポグラフィ画像から得られる、前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 1.50 mm の範囲における X 線トポグラフィスペクトルにおいて、スペクトル強度の最大値を含む前記 X 線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅が、0.02 mm 以上、0.10 mm 以下である。

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)）

明 細 書

発明の名称： 方向性電磁鋼板及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、方向性電磁鋼板及びその製造方法に関する。

本願は、2021年03月26日に、日本に出願された特願2021-053618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] 方向性電磁鋼板は、軟磁性材料であり、主に、変圧器の鉄心材料として用いられる。そのため、方向性電磁鋼板には、高磁化特性および低鉄損という磁気特性が要求される。

鉄損とは、鉄心を交流磁場で励磁した場合に、熱エネルギーとして消費される電力損失であり、省エネルギーの観点から、鉄損はできるだけ低いことが求められる。鉄損の高低には、磁化率、板厚、被膜張力、不純物量、電気抵抗率、結晶粒径、磁区サイズなどが影響する。方向性電磁鋼板に関し、様々な技術が開発されている現在においても、エネルギー効率を高めるため、鉄損を低減する研究開発が継続されている。

[0003] 例えば、特許文献1には、方向性電磁鋼板の表面に、集光した連続波レーザー光を、前記方向性電磁鋼板の圧延方向から傾斜した方向に走査しながら照射する工程と、前記連続波レーザー光を走査する部分を所定の間隔ですらしながら繰り返す工程を有し、前記連続波レーザー光の平均パワーを P (W)、前記走査の速度を V_c (mm/s)、前記所定の間隔を PL (mm)と表わし、平均照射エネルギー密度 U_a を $U_a = P / (V_c \times PL)$ (mJ/mm²)と定義したとき、 $1.0\text{ mm} \leq PL \leq 3.0\text{ mm}$ 、及び $0.8\text{ mJ/mm}^2 \leq U_a \leq 2.0\text{ mJ/mm}^2$ 、を満たすことを特徴とする、レーザー光の照射により磁区が制御された方向性電磁鋼板の製造方法が開示されている。

特許文献1では、容易に、かつ高い生産性を確保しながら、方向性電磁鋼板のL方向及びC方向の両方向における鉄損を低減することができる

示されている。

[0004] また、特許文献2には、連続発振レーザビームの走査照射により、鋼板の圧延方向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で線状の環流磁区を形成して鉄損特性を改善した方向性電磁鋼板の製造方法が開示されている。

特許文献2では、レーザが、ビーム伝搬方向に垂直な断面内のレーザ光強度分布が光軸中心近傍に最大強度を持つTEM₀₀モードであり、照射ビームの圧延方向集光径 d [mm]、レーザビームの走査線速度 V [mm/s]、レーザの平均出力 P [W]が、 $0 < d \leq 0.2$ 、 $0.001 \leq P/V \leq 0.012$ の範囲であることで、鉄損の低減された方向性電磁鋼板が得られることが示されている。

[0005] また、特許文献3には、方向性電磁鋼板の表面に、等間隔にレーザビームを照射して、磁気特性を改善する、方向性電磁鋼板の製造方法が開示されている。

特許文献3では、レーザがパルス発振QスイッチCO₂レーザであり、照射ビーム形状が板幅方向に長軸を持つ楕円である。また、レーザパルスの照射パワー密度を鋼板表面の皮膜損傷閾値以下に設定することで、レーザ照射痕の発生を抑制し、且つ楕円ビームの長軸長を板幅方向のパルスビーム照射間隔以上に設定することで、連続するパルスビームを鋼板表面で重畳させ、磁気特性改善に必要な十分な積算照射エネルギーを与え、レーザ照射痕を抑制することで、効率的な磁区制御効果が得られることが示されている。

[0006] 一方、近年、トランスなどの電磁応用機器にも騒音や振動の低減がますます要請されるようになり、トランスの鉄心に使われる方向性電磁鋼板には、低鉄損と共に、低騒音や低振動に適した材料であることが求められるようになってきた。トランスの騒音や振動に対する、素材における原因の一つとして、方向性電磁鋼板の磁歪があると言われている。ここでいう磁歪とは、方向性電磁鋼板を交流で励磁したときに、その磁化の強さの変化に伴って方向性電磁鋼板の外形がわずかに変化することによる、方向性電磁鋼板の圧延方向に見られる振動のことである、この磁歪の大きさは、 10^{-6} オーダーの非常

に小さなものであるが、その磁歪が鉄心に振動を発生させ、それが変圧器のタンクなどの外部構造物に伝搬して騒音となる。

[0007] 上述した特許文献1～3に提案されるような方向性電磁鋼板へのレーザ照射は、鉄損の低減には効果的であるものの、レーザ照射によって付与される歪に伴って形成される還流磁区が磁歪を大きくすることで、騒音特性が劣化するという課題があった。

[0008] このような課題に対し、例えば特許文献4では、低鉄損で、変圧器に組み込んだときの騒音が小さい方向性電磁鋼板が開示されている。

特許文献4では、鋼板表面における圧延方向の幅が周期的に変化した還流磁区領域が形成され、各々の前記還流磁区領域が、鋼板表面における圧延方向の最大幅 W_{max} の最小幅 W_{min} に対する比(W_{max}/W_{min})が1.2以上2.2以下、鋼板表面における圧延方向の平均幅 $Wave$ が $80\mu m$ 以上 $250\mu m$ 以下、板厚方向の最大深さ D が $32\mu m$ 以上、 $(Wave \times D)/s$ が $0.0007mm$ 以上 $0.0016mm$ 以下の条件を満たすことによって、従来よりも良好な鉄損・騒音バランスが実現できることが示されている。

[0009] また、特許文献5には、圧延方向に対して周期的間隔で、圧延方向を横切る方向に、局所的な歪みが導入された方向性電磁鋼板であって、上記歪みの近傍に線状の還流磁区部が形成され、かつ、消磁状態において、該還流磁区部から圧延方向に伸びた圧延方向長さが $1.2mm$ 以上の磁区を有し、さらに、該磁区が、該還流磁区部に沿った領域において、 $1mm$ 当り平均で1.8本以上形成され、前記還流磁区部の線間隔を $s(mm)$ とした場合、前記還流磁区部の幅： $w(mm)$ と、前記還流磁区部の板厚方向の深さ： $h(\mu m)$ との間で、 $4mm \leq s \leq 1.5mm$ 、及び $hw/s \leq 0.9\mu m$ の関係を満たす、方向性電磁鋼板が開示されている。

特許文献5では、 hw/s で表される歪み導入量指標が鉄損及び騒音に影響することが示唆されている。

[0010] しかしながら、本発明者らの検討の結果、特許文献4及び5の技術では、騒音特性の改善が、近年求められるより優れた鉄損・騒音バランスに対して

は十分でないことが分かった。

[0011] また、その他にも、還流磁区の制御を行う技術として、例えば特許文献6、7には、被膜を損傷することなく還流磁区を形成し、変圧器鉄損とBFとが極めて低い方向性電磁鋼板を提供する、方向性電磁鋼板の製造方法が開示されている。

また、特許文献8には、電子ビームの特徴を生かした鉄損低減に有利な還流磁区形状を形成することによって、幅広い板厚範囲において低鉄損化した方向性電磁鋼板が得られることが示されている。

また、特許文献9には、鋼板面内の圧延方向に対し、 60° から 120° の方向に、LaB₆から放出された電子ビームによって形成された線状歪みを有する鉄心用方向性電磁鋼板が開示されている。

また、特許文献10には、ビーム照射域に占めるビーム照射痕の面積比率を制御した、絶縁性並びに耐食性に優れる方向性電磁鋼板及びその製造方法が開示されている。

しかしながら、特許文献6～10は、いずれも鉄損の低減のために還流磁区を制御しているか、または還流磁区制御に付随して発生する被膜特性を改善するための技術であり、低騒音を実現するための還流磁区制御については検討されていなかった。そのため、特許文献6～10の技術では、騒音特性の改善が、近年求められるより優れた鉄損・騒音バランスに対しては十分でないことが分かった。

先行技術文献

特許文献

[0012] 特許文献1：日本国特許第4669565号公報

特許文献2：日本国特許第4510757号公報

特許文献3：日本国特許第3361709号公報

特許文献4：日本国特許第6060988号公報

特許文献5：日本国特許第6176282号公報

特許文献6：日本国特許第6169695号公報

特許文献7：日本国特許第6 2 4 5 2 9 6 号公報

特許文献8：国際公開第2 0 1 4 / 0 6 8 9 6 2 号

特許文献9：日本国特許第5 9 5 4 4 2 1 号公報

特許文献10：国際公開第2 0 1 3 / 0 9 9 2 7 2 号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0013] 上述の通り、従来、鉄損特性と騒音特性とを同時に十分に向上させた方向性電磁鋼板及びその製造方法は開示されていなかった。

本発明は、鉄損特性、特に磁区制御前後における鉄損改善率と、騒音特性とに優れる、方向性電磁鋼板及びその製造方法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

[0014] 方向性電磁鋼板は、レーザビームまたは電子ビーム等のエネルギー線の照射により、照射部が急速加熱及び急速冷却される。その結果、照射部近傍の鋼板内部には残留歪（熱歪）が発生する。この残留歪が圧延方向において圧縮歪、あるいは板厚方向において引張歪であった場合、この残留歪が生じる領域において還流磁区が生成する。この還流磁区の形成によって洩れ磁束が鋼板表面に発生し、静磁エネルギーが高くなる。静磁エネルギーが高い状態は、エネルギー的に不安定である。そこで鋼板の磁区構造は、洩れ磁束が小さくなるような構造に変化する。洩れ磁束が小さくなる構造とはすなわち、圧延方向に平行／反平行な 180° 磁区の界面、すなわち 180° 磁壁が多い状態であり、いわゆる「磁区細分化」である。この磁区細分化により、異常渦電流損は低減するので、エネルギー線の照射は、低鉄損化にとって有利である。しかしながら、一般に、還流磁区が形成されると、磁歪の程度が大きくなるので、変圧器等に組み込んだときの騒音が大きくなる。

本発明者らは、レーザビームまたは電子ビーム等の照射条件と、鉄損特性及び騒音特性との関係について検討を行った。その結果、レーザビームまたは電子ビーム等の投入エネルギーを小さくすることで、騒音特性が改善される

が、この場合、磁区制御が十分でなく、鉄損特性の改善は十分ではないことが分かった。

そこで、本発明者らは、騒音特性を劣化させずに鉄損特性を改善する方法について、さらに検討を行った。その結果、製造過程において、レーザービームまたは電子ビーム等の照射条件、及び脱炭焼鈍条件を制御することで、レーザービームまたは電子ビーム等の投入エネルギーが小さい場合でも、十分な磁区細分化が達成でき、レーザービームまたは電子ビーム等の照射後に低鉄損と低騒音とを両立できることを見出した。

[0015] 本発明は上記の知見に鑑みてなされた。本発明の要旨は以下の通りである。

[1] 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、母材鋼板と、前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と、前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜と、を備え、前記母材鋼板は、質量%で、C : 0.010%以下、Si : 3.00~4.00%、Mn : 0.01~0.50%、N : 0.010%以下、S : 0.010%以下、Al : 0.020%以下、P : 0.030%以下、S : 0.010%以下、Sn : 0~0.50%、Cu : 0~0.50%、Cr : 0~0.50%、Se : 0~0.020%、Sb : 0~0.500%、Mo : 0~0.10%、残部 : Fe 及び不純物、からなる化学組成を有し、前記母材鋼板の表面には、圧延方向に対して交差する方向に連続的にまたは断続的に延在する、複数の線状の歪が存在し、互いに隣り合う前記複数の線状の歪の、前記圧延方向における間隔 p が 3.0~9.0 mm であり、前記線状の歪の幅が、10~250 μ m であり、表面のX線トポグラフィ画像から得られる、前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 1.50 mm の範囲におけるX線トポグラフィスペクトルにおいて、スペクトル強度の最大値を含む前記X線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅が、0.02 mm 以上、0.10 mm 以下である。

[2] [1] に記載の方向性電磁鋼板は、前記表面の前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 3.0 mm の範囲にX線ビームを照射し、(310) 面

のX線反射強度の、最小値を I_{min} 、バックグラウンド強度を I_0 とし、裏面の
前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に3.0mmの範囲にX線ビーム
を照射し、得られた回折面(310)面のX線反射強度の、最小値を J_{min} 、
バックグラウンド強度を J_0 としたとき、前記 I_{min} 、前記 I_0 、前記 J_{min} 、
前記 J_0 が下記式(2)を満足してもよい。

$$0.02 \leq |J_0 - J_{min}| / |I_0 - I_{min}| \leq 1.00 \quad (2)$$

[3] [1] または [2] に記載の方向性電磁鋼板は、前記母材鋼板の前記
化学組成が、Sn:0.01~0.50%、Cu:0.05~0.50%、
のいずれかまたは両方を含んでもよい。

[4] 本発明の別の態様に係る方向性電磁鋼板の製造方法は、[1] または
[2] に記載の方向性電磁鋼板の製造方法であって、質量%で、C:0.010~0.200%、Si:3.00~4.00%、Mn:0.01~0.50%、N:0.020%以下、Sol. Al:0.010~0.040%、P:0.030%以下、S:0.005~0.040%、Sn:0~0.50%、Cu:0~0.50%、Bi:0~0.020%、Cr:0~0.50%、Se:0~0.020%、Sb:0~0.500%、Mo:0~0.10%、残部:Fe及び不純物、からなる化学組成を有する鋼片を加熱した後、熱間圧延し、熱延鋼板を得る、熱間圧延工程と、前記熱延鋼板に熱延板焼鈍を施す、熱延板焼鈍工程と、前記熱延板焼鈍工程後の前記熱延鋼板に、一回又は中間焼鈍を挟む複数回の冷間圧延を行って冷延鋼板を得る、冷間圧延工程と、前記冷延鋼板に脱炭焼鈍を施す、脱炭焼鈍工程と、母材鋼板である前記脱炭焼鈍工程後の前記冷延鋼板の表裏面に、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を塗布し、乾燥させた後、仕上げ焼鈍を施すことでガラス被膜を形成する、仕上げ焼鈍工程と、前記ガラス被膜上に張力付与絶縁被膜を形成し、前記母材鋼板と前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜とを備える方向性電磁鋼板を得る、被膜形成工程と、前記方向性電磁鋼板の前記張力付与絶縁被膜の表面に

エネルギー線を照射し、前記母材鋼板に複数の線状の歪を付与する、磁区細分化工程と、を有し、前記磁区細分化工程において、前記複数の線状の歪のうち、隣り合う線状の歪の圧延方向の間隔が3.0～9.0 mmであり、単位Wでのエネルギー線出力Pと、単位mm²でのエネルギー線照射断面積Sを用いて、 (P/S) で定義される、単位W/mm²でのエネルギー線パワー密度 I_p が下記式(3)を満たし、前記エネルギー線出力Pと、単位mm/秒でのエネルギー線走査速度 V_s を用いて、 (P/V_s) で定義される単位J/mmのエネルギー線投入エネルギー U_p が、下記式(4)を満たし、かつ、前記エネルギー線の、単位μmでの、ビームスキャン方向に垂直な方向の径 d_l および前記ビームスキャン方向の径 d_c を用いて、 (d_l/d_c) で定義されるビームアスペクト比、並びに、前記 d_l がそれぞれ下記式(5)および下記式(6)を満たし、前記脱炭焼鈍工程において、550～750℃の第1の温度域での昇温速度 S_1 を500℃/秒以上とし、750～800℃の第2の温度域での昇温速度 S_2 を800℃/秒以上とする、または、前記第2の温度域での前記昇温速度 S_2 を50℃/秒以上としてかつ前記第2の温度域での雰囲気露点を-50℃～20℃とする。

$$250 \leq I_p \leq 2000 \quad (3)$$

$$0.005 < U_p \leq 0.050 \quad (4)$$

$$0.001 < d_l/d_c < 1.000 \quad (5)$$

$$10 \leq d_l < 200 \quad (6)$$

[5] [4]に記載の方向性電磁鋼板の製造方法は、前記脱炭焼鈍工程と前記仕上げ焼鈍工程との間に、さらに、前記冷延鋼板に窒化処理を施す窒化処理工程を有してもよい。

[6] [4] または [5] に記載の方向性電磁鋼板の製造方法は、前記鋼片の前記化学組成が、Sn: 0.01～0.50%、Cu: 0.05～0.50%、のいずれかまたは両方を含んでもよい。

発明の効果

[0016] 本発明の上記態様によれば、鉄損特性と騒音特性とに優れる方向性電磁鋼

板及びその製造方法を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1] X線トポグラフィの測定ジオメトリを示す図である。

[図2] X線トポグラフィの画像データの一例を示す図である。

[図3] 反射回折 X 線強度の分布曲線（ラインプロファイル）の一例を示す図である。

[図4] X 線回折における、多重散乱による動力学的回折を説明する図である。

[図5] X 線回折における、運動力学的回折と動力学的回折とを説明する図である。

発明を実施するための形態

[0018] 本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板（本実施形態に係る方向性電磁鋼板）は、所定の化学組成を有する母材鋼板と、前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と、前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜と、を備える。

また、母材鋼板の表面には、圧延方向と交差する方向、より具体的には圧延方向に対してなす角（ ϕ ）が $60 \sim 120^\circ$ である方向に、連続的にまたは断続的に延在する複数の線状の歪（熱歪）が略平行に形成されており、互いに隣り合う複数の線状の歪の、圧延方向における間隔（ p ）が $3.0 \sim 9.0 \text{ mm}$ であり、X 線トポグラフィで測定した前記複数の線状の歪のそれぞれの幅（延在方向と直交する方向の長さ）が $10 \sim 250 \mu\text{m}$ である。

また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、表面の X 線トポグラフィ画像から得られる、前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 1.50 mm の範囲（線状の歪から圧延方向に $\pm 0.75 \text{ mm}$ の範囲）における X 線トポグラフィスペクトルにおいて、スペクトル強度の最大値を含む X 線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅が、 0.02 mm 以上、 0.10 mm 以下である。

[0019] 以下、本実施形態に係る方向性電磁鋼板について説明する。

[0020] <母材鋼板>

(化学組成)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、線状の歪の状態に大きな特徴があり、方向性電磁鋼板が備える母材鋼板は、その化学組成については限定されない。しかしながら、方向性電磁鋼板として一般に求められる特性を得るため、以下の範囲とする。本実施形態において、各元素の含有量に係る％は、断りがない限り質量％である。

[0021] C : 0.010％以下

C（炭素）は、製造工程における脱炭焼鈍工程の完了までの工程での、鋼板の組織制御に有効な元素である。しかしながら、C含有量が0.010％を超えると、製品板である方向性電磁鋼板の磁気特性（鉄損特性や磁束密度）が低下する。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板において、C含有量は、0.010％以下とする。C含有量は、好ましくは0.005％以下である。C含有量は、低ければ低いほうが好ましいが、C含有量を0.0001％未満に低減しても、組織制御の効果は飽和し、製造コストが嵩むだけとなる。従って、C含有量は、0.0001％以上としてもよい。

[0022] Si : 3.00～4.00％

Si（珪素）は、方向性電磁鋼板の電気抵抗を高めて、鉄損特性を改善する元素である。Si含有量が3.00％未満では、十分な渦電流損低減効果が得られない。そのため、Si含有量は3.00％以上とする。Si含有量は、好ましくは3.20％以上、より好ましくは3.50％以上である。

一方、Si含有量が4.00％を超えると、方向性電磁鋼板が脆化し、通板性が顕著に劣化する。また、方向性電磁鋼板の加工性が低下し、圧延時に鋼板が破断しうる。このため、Si含有量は4.00％以下とする。Si含有量は、好ましくは3.80％以下、より好ましくは3.70％以下である。

スラブ等の鋼片に含有されるSiは一部、 Mg_2SiO_4 を主成分とするガラス被膜の生成に消費されることがある。そのため、出鋼時に比較して、方

向性電磁鋼板では、S i 含有量が減少しても良い。

[0023] Mn : 0.01 ~ 0.50 %

Mn (マンガン) は、製造工程において、S と結合して、MnS を形成する元素である。この析出物は、インヒビター (正常結晶粒成長の抑制剤) として機能し、鋼において、二次再結晶を発現させる。Mn は、更に、鋼の熱間加工性も高める元素である。Mn 含有量が 0.01 % 未満である場合には、上記のような効果を十分に得ることができない。そのため、Mn 含有量は、0.01 % 以上とする。Mn 含有量は、好ましくは 0.02 % 以上、より好ましくは 0.05 % 以上である。

一方、Mn 含有量が 0.50 % を超えると、二次再結晶が発現せずに、鋼の磁気特性が低下する。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板において、Mn 含有量は、0.50 % 以下とする。Mn 含有量は、好ましくは 0.20 % 以下、より好ましくは 0.10 % 以下である。

[0024] N : 0.010 % 以下

N (窒素) は、製造工程において、Al と結合して、インヒビターとして機能する AlN を形成する元素である。しかしながら、N 含有量が 0.010 % を超えると、母材鋼板中に過剰に残存するインヒビターにより、磁気特性が低下する。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板において、N 含有量は、0.010 % 以下とする。N 含有量は、好ましくは 0.008 % 以下、より好ましくは 0.005 % 以下である。

一方、N 含有量の下限值は、特に規定するものではないが、0.0001 % 未満に低減しても、製造コストが嵩むだけとなる。従って、N 含有量は、0.0001 % 以上としてもよい。

[0025] Sol. Al : 0.020 % 以下

Sol. Al (酸可溶性アルミニウム) は、製造工程において、N と結合して、インヒビターとして機能する AlN を形成する元素である。しかしながら、母材鋼板の Sol. Al 含有量が 0.020 % を超えると、母材鋼板中に過剰に残存するインヒビターにより、磁気特性が低下する。従って、本

実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板において、S o l. A l 含有量は、0.020%以下とする。方向性電磁鋼板におけるS o l. A l 含有量は、なるべく低いほうが好ましい。例えば、S o l. A l 含有量は、0.010%以下、または0.001%未満であり、0%でもよい。

一方、S o l. A l 含有量の下限值は、特に規定するものではないが、0.0001%未満に低減しても、製造コストが嵩むだけとなる。従って、S o l. A l 含有量は、0.0001%以上としてもよい。

[0026] P : 0.030%以下

P (リン) は、圧延における加工性を低下させる元素である。P 含有量を0.030%以下とすることにより、圧延加工性が過度に低下することを抑制でき、製造時における破断を抑制することができる。このような観点から、P 含有量は0.030%以下とする。P 含有量は、0.020%以下であることが好ましく、0.010%以下であることがより好ましい。

P 含有量は、その下限が限定されず、0%を含み得るが、化学分析の検出限界値が0.0001%であるため、実用鋼板において、実質的なP 含有量の下限值は、0.0001%である。また、P は集合組織を改善し、磁気特性を改善する効果を有する元素でもある。この効果を得るため、P 含有量を0.001%以上としてもよく、0.005%以上としてもよい。

[0027] S : 0.010%以下

S (硫黄) は、製造工程において、M n と結合して、インヒビターとして機能するM n S を形成する元素である。しかしながら、S 含有量が0.010%を超える場合には、過剰に残存するインヒビターにより、磁気特性が低下する。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板において、S 含有量は、0.010%以下とする。方向性電磁鋼板におけるS 含有量は、なるべく低いほうが好ましい。例えば0.0001%未満であり、0%でもよい。しかしながら、方向性電磁鋼板の母材鋼板中のS 含有量を0.0001%未満に低減しても、製造コストが嵩むだけとなる。従って、S 含有量は、0.0001%以上であってもよい。

[0028] 残部：F e 及び不純物

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板の化学組成は、上述の必須元素を含有し、残部は、F e 及び不純物であってもよい。しかしながら、磁気特性等を高めることを目的として、さらに任意元素として、S n、C u、C r、S e、S b、M oを以下に示す範囲で含有してもよい。これらの元素は不純物として含有されることも許容する。

また、これら以外の元素として、例えばW、N b、B i、T i、N i、C o、Vのいずれか1種あるいは2種以上を合計で1.0%以下含有しても、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の効果を阻害するものではない。

ここで、不純物とは、母材鋼板を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップから、又は、製造環境などから混入するものであり、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の作用に悪影響を及ぼさない含有量で含有することを許容される元素を意味する。

[0029] S n：0～0.50%

S n（スズ）は、G o s s方位を増加させる元素であり、二次再結晶粒を微細化するために有効な元素である。二次再結晶粒が小さければ、磁区細分化を行う際に、投入エネルギーが小さくても十分な鉄損改善効果が得られる。上記効果を得る場合、S n含有量を0.01%以上とすることが好ましい。S n含有量は、より好ましくは0.02%以上、さらに好ましくは0.03%以上である。ただし、S nを含有させると、二次再結晶組織におけるG o s s方位占有率が低下することが懸念される。そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板では、S nを含有させる場合、後述するC uと同時に含有させることが好ましい。

一方、S n含有量が0.50%を超える場合には、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、含有させる場合でも、S n含有量は0.50%以下とする。S n含有量は、好ましくは0.30%以下であり、より好ましくは0.20%以下である。

[0030] C u：0～0.50%

Cu（銅）は、二次再結晶組織におけるGoss方位占有率の増加に寄与する元素である。上記効果を得る場合、Cu含有量を0.05%以上とすることが好ましい。Cu含有量は、より好ましくは0.06%以上、さらに好ましくは0.07%以上である。

一方、Cu含有量が0.50%を超える場合には、熱間圧延中に鋼板が脆化する。そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板では、含有させる場合でも、Cu含有量を0.50%以下とする。Cu含有量は、好ましくは0.30%以下、より好ましくは0.20%以下である。

[0031] Cr：0～0.50%

Cr（クロム）は、磁気特性を改善する元素である。原因は明らかでないが、二次再結晶組織におけるGoss方位占有率の増加に寄与して磁気特性を向上させる等の効果があると考えられる。上記効果を得るためには、Cr含有量を、0.01%以上とすることが好ましく、0.02%以上とすることがより好ましく、0.03%以上とすることがさらに好ましい。

一方、Cr含有量が0.50%を超える場合には、Cr酸化物が形成され、磁気特性が低下する。そのため、含有させる場合でも、Cr含有量は、0.50%以下とする。Cr含有量は、好ましくは0.30%以下であり、より好ましくは0.10%以下である。

[0032] Se：0～0.020%

Se（セレン）は、磁気特性改善効果を有する元素である。そのため、含有させてもよい。Seを含有させる場合は、磁気特性改善効果を良好に発揮するため、Se含有量を0.001%以上とすることが好ましい。Se含有量は、より好ましくは0.003%以上であり、さらに好ましくは0.006%以上である。

一方、Se含有量が0.020%を超えると、ガラス被膜の密着性が劣化する。従って、含有させる場合でも、Se含有量を0.020%以下とする。Se含有量は、好ましくは0.015%以下、より好ましくは0.010%以下である。

[0033] Sb : 0 ~ 0.500%

Sb（アンチモン）は、磁気特性改善効果を有する元素である。そのため、含有させてもよい。Sbを含有させる場合は、磁気特性改善効果を良好に発揮するため、含有量を0.005%以上とすることが好ましい。Sb含有量は、より好ましくは0.010%以上であり、さらに好ましくは0.020%以上である。

一方、Sb含有量が0.500%を超えると、ガラス被膜の密着性が顕著に劣化する。従って、含有させる場合でも、Sb含有量を0.500%以下とする。Sb含有量は、好ましくは0.300%以下であり、より好ましくは0.100%以下である。

[0034] Mo : 0 ~ 0.10%

Mo（モリブデン）は、磁気特性改善効果を有する元素である。そのため、含有させてもよい。Moを含有させる場合は、磁気特性改善効果を良好に発揮するため、Mo含有量を0.01%以上とすることが好ましい。Mo含有量は、より好ましくは0.02%以上であり、さらに好ましくは0.03%以上である。

一方、Mo含有量が0.10%を超えると、冷間圧延性が劣化し、破断に至る可能性がある。従って、含有させる場合でも、Mo含有量を0.10%以下とする。Mo含有量は、好ましくは0.08%以下であり、より好ましくは0.05%以下である。

[0035] 上述の通り、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板の化学組成は、上述の必須の元素を含有し、残部がFe及び不純物からなる、もしくは、上述の必須の元素を含有し、さらに任意元素の1種以上を含有し、残部がFe及び不純物からなることが例示される。

[0036] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板の化学組成は、表面に形成されているガラス被膜及び張力付与絶縁被膜を除去してから測定することができる。

具体的には、方向性電磁鋼板を、NaOH : 30 ~ 50質量%及びH₂O :

50～70質量%を含有する80～90℃の水酸化ナトリウム水溶液に、7～10分間浸漬することで、張力付与絶縁被膜を除去する。張力付与絶縁被膜が除去された方向性電磁鋼板を水洗し、水洗後、温風のブローアードで1分間弱、乾燥させる。乾燥後の方向性電磁鋼板（張力付与絶縁被膜を備えていない方向性電磁鋼板）を、30～40質量%のHClを含有し、80～90℃の塩酸水溶液に、1～10分間浸漬することで、グラス被膜を除去する。浸漬後の母材鋼板を水洗し、水洗後、温風のブローアードで1分間弱、乾燥させる。

以上の工程により、方向性電磁鋼板から、母材鋼板を取り出すことができる。

このような母材鋼板の化学組成は、周知の成分分析法により求める。具体的には、ドリルを用いて、母材鋼板から切粉を生成し、その切粉を採取し、採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得る。溶液に対して、ICP-AESを実施して、化学組成の元素分析を実施する。

ここで、母材鋼板の化学組成中のSiについては、JIS G 1212（1997）に規定の方法（けい素定量方法）により求める。具体的には、上述の切粉を酸に溶解させると、酸化ケイ素が沈殿物として析出するので、この沈殿物（酸化ケイ素）をろ紙で濾し取り、質量を測定して、Si含有量を求める。

C含有量及びS含有量については、周知の高周波燃焼法（燃焼－赤外線吸収法）により求める。具体的には、上述の溶液を酸素気流中で高周波加熱により燃焼して、発生した二酸化炭素、二酸化硫黄を検出し、C含有量及びS含有量を求める。

N含有量については、周知の不活性ガス溶融－熱伝導度法を用いて求める。

[0037]（線状の歪）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板が備える母材鋼板には、表面近傍に、レーザービームや電子ビームのようなエネルギー線の照射によって形成された残留

歪である、複数の線状の歪（熱歪）が存在する。この複数の線状の歪は、それぞれが圧延方向に対してなす角 ϕ が $60 \sim 120^\circ$ である方向（圧延方向に対して交差する方向）に、連続的にまたは断続的に延在している。歪は、連続的に直線状に存在してもよく、断続的に一方向に（例えば点線状に）存在してもよい。

このようなエネルギー線の照射によって形成される歪（残留歪）は、特に圧延方向において圧縮歪であり、板厚方向において引張歪となり、歪部及びその板厚方向下側に、還流磁区と呼ばれる、板厚方向に磁化した領域が形成されることが知られている。還流磁区のサイズが所定の大きさ以上である場合に、 180° 磁区幅が細分化し、渦電流損が低減し、鉄損が低下する。一方で、還流磁区サイズが大きくなると交流で励磁した際の磁歪が大きくなって、変圧器の騒音が顕在化する。

[0038] 本発明者らが検討した結果、表面に形成される歪の幅及び板厚方向の歪の導入状態を制御することで、鉄損が低下し（鉄損特性が改善され）、かつ、騒音問題の顕在化が抑えられる（騒音特性が改善される）ことを見出した。

上述したように、残留歪の形成に伴って形成される還流磁区は、 180° 磁区細分化のドライビングフォースであるので、低鉄損化にとって有利であるが、還流磁区によって磁歪の程度が大きくなって、変圧器に組み込んだときの騒音が大きくなる（騒音特性が劣化する）問題があった。従来は、騒音特性の劣化を抑制する場合、エネルギー線の照射ピッチを大きくしたり、エネルギー線の投入エネルギーを弱めたりするなどの対策を行っていた。しかしながら、このような対応は、鉄損特性と騒音特性とがトレードオフの関係であることを前提とした、エネルギー線照射による鉄損改善効果のある程度犠牲にして騒音特性を改善する手段に過ぎなかった。

これに対し、本発明者らが検討した結果、方向性電磁鋼板において、表面からの深さが浅い（表層に局在した）還流磁区領域が形成されるような歪を導入することで、騒音特性の劣化を抑制しつつ、鉄損特性の改善が可能であることが分かった。すなわち、本発明者らは、歪の空間分布制御が鉄損と騒

音とを同時に低くする観点で重要であることを見出した。歪の空間分布状態はX線トポグラフィというX線回折解析手法を用いることで同定が可能である。

[0039] 詳細は後述するが、歪導入が特に強い部分、例えばエネルギー線照射部において、投入エネルギーが特に高い部分は、回折現象そのものが起こらないほどに格子が乱れている（高歪導入領域）。このような部分はX線トポグラフィでは、回折自体が起こらないのでX線トポグラフィ画像は白色化する。そのため、画像から得られるX線トポグラフィスペクトルは、低強度（低い画素値）を示す。

一方、回折現象は起こるものの、残留歪が導入された領域（転位密度が比較的低い領域）が存在する場合、X線トポグラフィでは、X線トポグラフィ画像が黒色化する。そのため、画像から得られるX線トポグラフィスペクトルは、高い強度（高い画素値）を示す。この回折現象が起こる残留歪領域は、磁区細分化効果（鉄損改善効果）を有する一方で、結晶格子自体は損なわれていない。そのため、騒音に及ぼす悪影響は限定的である。

したがって、優れた鉄損特性と優れた騒音特性との両立に大事なのは、回折現象が起こるような残留歪領域を適正量導入させることである。

[0040] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、優れた鉄損特性と優れた騒音特性との両立のため、X線トポグラフィにて測定される複数の線状の歪のそれぞれの幅が、 $10 \sim 250 \mu\text{m}$ であって、かつ、表面のX線トポグラフィ画像から得られる、線状の歪を中心とする圧延方向に 1.50 mm の範囲におけるX線トポグラフィスペクトルにおいて、スペクトル強度の最大値を含むX線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅が、 0.02 mm 以上、 0.10 mm 以下である。

線状の歪の幅が $10 \mu\text{m}$ 未満であると、鉄損の改善効果が得られない。また、ビーム径を $10 \mu\text{m}$ 未満にすることは工業的に難しい。そのため、歪の幅を $10 \mu\text{m}$ 以上とする。歪の幅は、好ましくは $50 \mu\text{m}$ 以上である。

一方、歪の幅が $250 \mu\text{m}$ 超であると、歪に伴って形成される還流磁区体

積が増大し、磁歪の程度が大きくなる。そのため、歪の幅を $250\mu\text{m}$ 以下とする。歪の幅は、好ましくは $200\mu\text{m}$ 以下、より好ましくは $150\mu\text{m}$ 以下である。

また、X線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅が 0.02mm 未満の場合、歪導入範囲が少なく、鉄損改善効果が得られない。一方、半値幅が 0.10mm 超の場合、過剰に歪が導入されていることになり、騒音特性改善効果が得られない。X線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅の好ましい範囲は 0.03mm 以上 0.08mm 以下、より好ましい範囲は、 0.03mm 以上 0.06mm 以下である。

X線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅は母材の結晶方位の影響を受ける。そのため、所定の半値幅とする場合、例えば後述のように脱炭焼鈍の昇温速度を高めて、Goss方位の結晶方位先鋭度を高めておく必要がある。Goss方位の結晶方位先鋭度が劣っている場合、歪導入型の磁区制御を施した際、半値幅が 0.10mm を超え、騒音特性改善効果が得られない。

[0041] 線状の歪の幅は、X線トポグラフィ(XRT)(例えば、Rigaku社製、X線トポグラフィイメージングシステムXRTmicron)を用いて、以下の方法で測定する。X線源のターゲットはCuとし、電圧及び電流はそれぞれ 40kV 及び 30mA とする。検出器におけるCCD解像度はBinning 1×1 ($5.4\mu\text{m}$)とする。CCDの視野サイズは $17\text{mm}\times 13.5\text{mm}$ ($3326\text{pixel}\times 2540\text{pixel}$)とし、Digital分解能は 16bit (65536 階調)とする。

まず鋼板サンプルに対してブラッグの回折条件を満たすようにX線ビームを照射し、回折X線ビームを検出器(CCDカメラ)で露光することにより、回折X線強度のマッピングデータを採取する。回折X線強度を色濃度に変換し、X線のスキャン領域を色濃度分布画像として表示する。これにより、X線トポグラフィ画像(回折X線強度のマッピングデータ)を得る。回折X線強度が増大するほど、X線トポグラフィ画像の色濃度は濃くなる傾向にあ

る（ネガ表示）。また、ロッキングカーブ測定によって強度が最大化できる測定位置を調整することがある。具体的には横軸をX線の入射角 θ_s （°）、縦軸を回折X線強度としたカーブを掃引し、最も強い強度が得られる $\theta_s^{\max}$ （°）を探る。ただし本発明においては θ_s （°） $=\theta_s^{\max}+\sim 0.09$ の位置でX線トポグラフィ画像を得るものとする（透過型電子顕微鏡（TEM）の暗視野像観察におけるウィークビーム法と同じ手法を用いることに対応している）。例えば、ロッキングカーブのピーク位置がX線の入射角 θ_s （°） $=32.8343^\circ$ 、X線の射出角 $\theta_d=83.5257^\circ$ に対し、X線トポグラフィの撮影位置を $\theta_s=32.9200^\circ$ 、 $\theta_d=83.4400^\circ$ としてもよい。図2にX線トポグラフィ画像の一例を示す。

測定に際しては、例えば、方向性電磁鋼板から、幅方向（TD方向）に50mm、圧延方向（RD方向）に150mmのサンプルを採取し、このサンプルの表面に対し、X線ビーム（Cu K α 線）を所望の回折面（hkl）に対してブラッグ回折条件を満たすように照射し、そのときの反射回折X線の強度を高分解能CCDカメラ等で測定して回折X線強度のマッピング画像を作成する（図1参照）。その際、TDI（Time Delay Integration）スキャンを行わず、サンプルを静止させた状態で回折像の静止画を撮影する（Snap Shot）。サンプルの各位置からの回折X線により、CCDカメラの各画素は露光され電荷が蓄積されるので、サンプルをスキャンし、各位置における露光電荷を読み出すことにより回折X線強度のマッピングデータが作成される。

サンプルのRD軸方向（圧延方向）とX線ビームの入射及び反射方向が平行な条件を $g=222$ 測定条件または回折面（222）条件と呼称する。一方、サンプルのTD軸と、X線ビームの入射及び反射方向が平行な条件を $g=310$ 測定条件または回折面（310）条件と呼称する。本実施形態では特に明示しない限りは、測定条件は回折面（310）条件を採用する。

このマッピング画像から、鋼板の圧延方向に対してなす角 ϕ が $60\sim 120^\circ$ である方向に、略等間隔で延在する複数の線状かつ、マッピングデータ

全体のX線回折強度の平均値より低い強度の箇所（色濃度が薄いため、白く見える部分）をエネルギー線によって導入された線状の歪と判断する。

[0042] 前記線状歪の幅および、X線トポグラフィスペクトルのピークの半値幅は、以下の方法で求める。すなわち、上記の方法で得られたX線トポグラフィ画像上で線状の歪において、最も強度が低い位置を歪の中心位置と定義する。歪の中心とする圧延方向に1.50mmの範囲（線状の歪を中心する圧延方向に±0.75mmの範囲）が対象となるように所望の2点間を結ぶ直線上に対して色濃度データ（画素値）を得る。これを、図3に示すように、横軸が測定位置、縦軸が画素値となるようにプロットすることで、反射回折X線強度の分布曲線（ラインプロファイル）を得る（この曲線をX線トポグラフィスペクトルと呼称する。縦軸の画素値は反射回折X線強度に相当する）。

このラインプロファイルにおいて、反射強度の、最大値を I_{max} 、バックグラウンド強度を I_0 とし、 I_{max} を含むX線トポグラフィスペクトルのピーク（ I_{max} を含みかつ、 I_0 よりも強度が大きい連続的な曲線範囲）において、スペクトル強度が $|I_{max} - I_0| / 2$ となる2点間を結んだ長さを、半値幅とする。スペクトルのノイズ除去の観点で、何度か同じ位置を測定し、積算したものを用いてもよい。X線トポグラフィスペクトルは、フィッティング処理により、連続した曲線として近似してもよい。反射強度が I_0 よりも小さく、かつ歪の中心位置を含んだ連続した曲線範囲を線状の歪とする。線状の歪の領域における反射強度を I_z とする。歪の幅は、鋼板サンプルの圧延方向に対して平行な方向の、 $I_z = 0$ となる2点間を結んだ長さとする。

[0043] 一般に、回折X線強度は、結晶格子の歪みが大きいほど強く、歪みの減少と共に弱くなり、歪みがゼロであると一定の値になる（消衰効果）。歪みが非常に小さい結晶格子中では図4に示すようにX線入射方向の進行波と回折面で散乱した回折波が多重干渉（多重散乱）を経たのち回折方向の伝搬波が反射回折X線として結晶表面から出てくる（動力学的回折）。この結晶内の多重干渉は均一で一定な格子面間隔が連続的に形成された回折面で生じ、

その時の回折波の波長は無歪みの結晶格子で形成される回折面間隔に対応した値になる。一方、歪みが大きい領域が局所的に存在する場所では、均一で一定の格子面間隔が形成されないため多重干渉は起こらず、代わりに歪んだ格子面間隔に対応した波長で局所的に一回のみ散乱した回折波が生ずる（図5参照）。この局所的に歪んだ領域で発生した回折波の波長は無歪み領域の多重散乱による回折波の波長と異なるので、歪んだ局所領域で発生した回折波は無歪みの領域での多重散乱に巻き込まれることなく結晶内を進み結晶表面から反射回折X線として出てくる（運動力学的回折）。一般に、回折X線強度は運動力学的回折の方が動力学的回折よりも強い（消衰効果）。また、局所的に多くの歪が導入された箇所は運動力学的回折によりスペクトル強度は強い（例えば最大値を I_{max} とする）。一方、歪みが少ない箇所（母材）は消衰効果によりスペクトル強度はある一定の値となる（例えば I_0 とする）。また、局所的な歪みが過剰となり結晶格子が乱れた部分は、ブラッグ回折そのものが起こらないので、スペクトル強度は弱い（例えば最小値を I_{min} とする）。

[0044] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板において、母材鋼板の表面の複数の線状の歪は、延在方向が、圧延方向に直角な方向に対して、ずれ角度で 30° 以内の範囲である。言い換えれば、複数の線状の歪は、圧延方向に対してなす角 ϕ が $60 \sim 120^\circ$ である方向に、連続的にまたは断続的に延在する。この角度範囲から外れると、鋼板の 180° 磁区細分化作用は少なくなり、十分な鉄損低減効果が得られない。

また、隣り合う複数の線状の残留歪の圧延方向の間隔は、 $3.0 \sim 9.0$ mmとする。圧延方向の間隔が 9.0 mm超であると、 180° 磁区の磁区細分化効果が減少するので鉄損改善効果が不足する。一方、複数の線状の残留歪の間隔を狭くする（照射ピッチを狭くする）と鉄損は小さくなる傾向があるものの、一定の閾値以下になると全ヒステリシス損が増加してむしろ鉄損が劣化し、かつ、騒音特性が劣化する場合がある。そのため、それぞれの隣り合う残留歪の圧延方向の間隔は、 3.0 mm以上とする。複数の線状の

残留歪は略平行でかつその間隔は、略等間隔であることが好ましい。

板幅方向における残留歪の長さは限定されないが、母材鋼板の幅方向の一端からもう一方の端部まで形成されていることが好ましい。不連続（断続）でエネルギー線照射する場合においては、幅方向に対し、特定ピッチで鋼板上にエネルギー線照射する際に、エネルギー線照射部の長径（幅方向に沿った長さ） d_0 と、2つのエネルギー線照射部に挟まれたエネルギー線非照射区間の、幅方向に沿った長さ d_1 とが、 $d_1 \leq 3 \times d_0$ を満たすことが好ましい。 d_0 は $50 \mu\text{m}$ 以上、 50mm 以下の範囲であればよい。

[0045] 隣り合う線状の熱歪の間隔（圧延方向における、線状の歪の中心から隣り合う線状の歪の中心までの距離）は、X線トポグラフィを用いて、上述した条件で、歪の位置を特定することで測定することができる。

[0046] また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、さらに、表面の線状の歪を中心とする圧延方向に 3.0mm の範囲にX線ビームを照射し、 (310) 面のX線反射強度の、最小値を $I_{\min}$ 、バックグラウンド強度を I_0 とし、裏面の線状の歪を中心とする圧延方向に 3.0mm の範囲にX線ビームを照射し、得られた回折面 (310) 面のX線反射強度の、最小値を $J_{\min}$ 、バックグラウンド強度を J_0 としたとき、前記 $I_{\min}$ 、前記 I_0 、前記 $J_{\min}$ 、前記 J_0 が下記式（2）を満足することが好ましい。この場合、鉄損特性及び騒音特性はより向上（改善）する。

$$0.02 \leq |J_0 - J_{\min}| / |I_0 - I_{\min}| \leq 1.00 \quad (2)$$

式（2）を満足することで、騒音特性にとってより好ましい歪分布となる。 $|J_0 - J_{\min}| / |I_0 - I_{\min}|$ を満たすということは、表面近くの還流磁区量に対し、裏面近くの還流磁区量が少ないことを意味する。原因は明らかではないが、歪導入面の裏面表層部の歪も鉄損改善効果を有する可能性があり、 $|J_0 - J_{\min}| / |I_0 - I_{\min}|$ が 0.02 以上であれば、その効果が得られると考えられる。

一方、原因は明らかではないが、 $|J_0 - J_{\min}| / |I_0 - I_{\min}|$ が $1.$

0.0を超える、すなわち裏面の還流磁区量が、表面の還流磁区導入量を超える場合、騒音特性は劣化しやすくなる。そのため、 $|J_0 - J_{min}| / |I_0 - I_{min}|$ を1.0以下とすることで、より好ましい鉄損特性及び騒音特性が得られると考えられる。

[0047] また、表面及び裏面の線状の歪を中心とする圧延方向に3.0mm(±1.5mm)の範囲における回折面(310)面のX線反射強度については、以下の方法で求める。

すなわち、表面であれば、上述した条件で、X線トポグラフィ画像(歪分布画像)を得る。得られた画像上で、歪のある1点を選び、そこから圧延方向(RD方向)に対し平行な直線において、+0.075mmの点Aと-0.075mmの点Bをそれぞれ直線で結ぶ。前記AB間を結ぶ直線上に対して色濃度データ(画素値)を得る。これを、横軸が測定位置、縦軸が画素値(回折強度)となるようにプロットすることで、反射回折X線強度の分布曲線(ラインプロファイル)を得る。点Aの回折強度と点Bの回折強度の平均となる位置の回折強度を I_0 とする。また、回折強度が最も低い位置の回折強度を I_{min} とする。

また、裏面であれば、同様に直線の始点、終点の回折強度の平均となる位置の回折強度を J_0 とし、回折強度が最も低い位置の回折強度を J_{min} とする。

[0048] <ガラス被膜>

本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、母材鋼板の表面上にガラス被膜が形成されている。ガラス被膜は、母材鋼板の片面のみに形成されていてもよいが、両面に対して形成されることが好ましい。

ガラス被膜は、ケイ酸マグネシウムを主成分とする無機質の被膜である。ガラス被膜は、仕上げ焼鈍において、母材鋼板の表面に塗布されたマグネシア(MgO)を含む焼鈍分離剤と母材鋼板の表面の成分とが反応することにより形成され、焼鈍分離剤及び母材鋼板の成分に由来する組成(より詳細には、 Mg_2SiO_4 を主成分とする組成)を有する。

[0049] <張力付与絶縁被膜>

本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、ガラス被膜の表面上に張力付与絶縁被膜が形成されている。張力付与絶縁被膜は、片面のみに形成されていてもよいが、両面に対して形成されることが好ましい。

張力付与絶縁被膜は、方向性電磁鋼板に電気絶縁性を付与することで渦電流損を低減して、方向性電磁鋼板の鉄損を向上させる。また、張力付与絶縁被膜によれば、上記のような電気絶縁性以外にも、耐蝕性、耐熱性、すべり性といった種々の特性が得られる。

更に、張力付与絶縁被膜は、方向性電磁鋼板に張力を付与するという機能を有する。方向性電磁鋼板に張力を付与して、方向性電磁鋼板における磁壁移動を容易にすることで、方向性電磁鋼板の鉄損を向上させることができる。

張力付与絶縁被膜は、例えば、リン酸塩とコロイダルシリカとを主成分とするコーティング液をガラス被膜の表面に塗布し、焼付けることによって形成される公知の被膜であってよい。

[0050] <母材鋼板の板厚：0.17～0.30mm>

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の母材鋼板の板厚は限定されないが、低鉄損と共に、低騒音や低振動が求められるトランスの鉄心への適用を考慮した場合、0.17～0.30mmであることが好ましい。板厚が薄いほど渦電流損の低減効果が享受でき、良好な鉄損が得られるので、母材鋼板のより好ましい板厚は0.23mm以下、さらに好ましい板厚は0.20mm以下である。0.17mm未満の母材鋼板を製造するには特殊な設備が必要になり、製造コストアップ等、生産面で好ましくない。従って、工業的に好ましい板厚は0.17mm以上である。より好ましくは0.18mm以上である。

[0051] <製造方法>

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、以下の工程を含む製造方法によって製造できる。

(i) 質量%で、C : 0.010~0.200%、Si : 3.00~4.00%、Mn : 0.01~0.50%、N : 0.020%以下、Sol. Al : 0.010~0.040%、P : 0.030%以下、S : 0.005~0.040%、Sn : 0~0.50%、Cu : 0~0.50%、Bi : 0~0.020%、Cr : 0~0.50%、Se : 0~0.020%、Sb : 0~0.500%、Mo : 0~0.10%、残部 : Fe 及び不純物からなる化学組成を有する鋼片を加熱した後に熱間圧延し、熱延鋼板を得る熱間圧延工程、

(ii) 前記熱延鋼板に熱延板焼鈍を施す熱延板焼鈍工程、

(iii) 前記熱延板焼鈍工程後の前記熱延鋼板に、一回、又は、中間焼鈍を挟む複数回の冷間圧延を行って、冷延鋼板を得る冷間圧延工程、

(iv) 前記冷延鋼板に脱炭焼鈍を施す脱炭焼鈍工程、

(v) 母材鋼板である前記脱炭焼鈍工程後の前記冷延鋼板の表裏面に、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を塗布し、乾燥させた後、仕上げ焼鈍を施すことでガラス被膜を形成する、仕上げ焼鈍工程、

(vi) 前記ガラス被膜上に張力付与絶縁被膜を形成し、前記母材鋼板と前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜とを備える方向性電磁鋼板を得る、被膜形成工程、及び

(vii) 前記方向性電磁鋼板の前記張力付与絶縁被膜の表面にエネルギー線を照射し、前記母材鋼板に複数の線状の歪を付与する、磁区細分化工程。

以下、これらの工程について、詳細に説明する。以下の説明において、各工程における何らかの条件が記載されていない場合には、公知の条件を適宜適用して各工程を行うことが可能である。

[0052] <熱間圧延工程>

熱間圧延工程では、例えば質量%で、C : 0.010~0.200%、Si : 3.00~4.00%、Mn : 0.01~0.50%、N : 0.020%以下、Sol. Al : 0.010~0.040%、P : 0.030%以下

、S : 0.005 ~ 0.040%、Sn : 0 ~ 0.50%、Cu : 0 ~ 0.50%、Bi : 0 ~ 0.020%、Cr : 0 ~ 0.50%、Se : 0 ~ 0.020%、Sb : 0 ~ 0.500%、Mo : 0 ~ 0.10%を含有し、残部がFe及び不純物からなる化学組成を有するスラブ等の鋼片を、加熱した後熱間圧延し、熱延鋼板を得る。鋼片の加熱温度は、特に限定しないが1100 ~ 1450℃の範囲内とすることが好ましい。加熱温度は、より好ましくは1300 ~ 1400℃である。

熱間圧延条件については、特に限定されず、求められる特性に基づいて適宜設定すればよい。熱間圧延によって得られる熱延鋼板の板厚は、例えば、2.0mm以上3.0mm以下の範囲内であることが好ましい。

鋼片の化学組成を上記の範囲とするのは、以下の製造工程を考慮した上で上述した母材鋼板の化学組成を得るためである。

[0053] <熱延板焼鈍工程>

熱延板焼鈍工程は、熱間圧延工程を経て製造された熱延鋼板を焼鈍する工程である。このような焼鈍処理を施すことで、鋼板組織に再結晶が生じ、良好な磁気特性を実現することが可能となる。

本実施形態の熱延板焼鈍工程では、公知の方法に従い、熱間圧延工程を経て製造された熱延鋼板を焼鈍すればよい。焼鈍に際して熱延鋼板を加熱する手段については、特に限定されるものではなく、公知の加熱方式を採用することが可能である。また、焼鈍条件についても、特に限定されるものではないが、例えば、熱延鋼板に対して、900 ~ 1200℃の温度域で10秒 ~ 5分間の焼鈍を行うことができる。

[0054] <冷間圧延工程>

冷間圧延工程では、熱延板焼鈍工程後の熱延鋼板に対して、複数のパスを含む冷間圧延を実施し、板厚が0.17 ~ 0.30mmの冷延鋼板を得る。冷間圧延は、一回の（中間焼鈍を挟まない一連の）冷間圧延でもよく、冷延工程の最終パスの前に、冷延を中断し少なくとも1回または2回以上の中間焼鈍を実施して、中間焼鈍をはさむ複数回の冷間圧延を施してもよい。

中間焼鈍を行う場合、 $1000\sim1200^{\circ}\text{C}$ の温度に $5\sim180$ 秒間保持することが好ましい。焼鈍雰囲気は特には限定されない。中間焼鈍の回数は製造コストを考慮すると3回以内が好ましい。

また、冷間圧延工程の前に、熱延鋼板の表面に対して公知の条件で酸洗を施してもよい。

[0055] 本実施形態の冷間圧延工程では、公知の方法に従い、熱延鋼板を冷間圧延し、冷延鋼板とすればよい。例えば、最終圧下率は、 80% 以上 95% 以下の範囲内とすることができる。最終圧下率が 80% 未満である場合には、 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位が圧延方向に高い集積度をもつGoss核を得ることができない可能性が高くなり、好ましくない。一方、最終圧下率が 95% を超える場合には、後工程である仕上げ焼鈍工程において、二次再結晶が不安定となる可能性が高くなるため、好ましくない。最終圧下率を上記範囲内とすることにより、 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位が圧延方向に高い集積度をもつGoss核を得るとともに、二次再結晶の不安定化を抑制することができる。

最終圧下率とは、冷間圧延の累積圧下率であり、中間焼鈍を行う場合には、最終中間焼鈍後の冷間圧延の累積圧下率である。

[0056] <脱炭焼鈍工程>

脱炭焼鈍工程では、得られた冷延鋼板に対して脱炭焼鈍を行う。脱炭焼鈍では、冷延鋼板を一次再結晶させるとともに、磁気特性に悪影響を及ぼすCを鋼板から除去する。

脱炭焼鈍工程では、Goss核を増加させ、後述する仕上げ焼鈍時に得られる二次再結晶粒を微細にする。粒界自体が磁極（漏れ磁束の生成サイト）としての機能を有することを考えれば、二次再結晶粒の微細化により、系全体の静磁エネルギーは高まる。すなわち、磁区細分化のドライビングフォースが高い状態になるので、過度な還流磁区導入に頼ることなく、低鉄損と低騒音との両立が可能になる。

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法では、Goss核を増加させ

るために、脱炭焼鈍の加熱時に、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域（第1の温度域）での昇温速度を速くし、当該温度域に滞留する時間を短くする。具体的には、第1の温度域での昇温速度が $500^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 未満であると、Goss核の増加が不十分となる。そのため、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域での昇温速度を $500^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上とする。昇温速度の上限は限定されないが、昇温速度を $2000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 超にすると、装置負荷が高くなりすぎることが懸念される。そのため、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域での昇温速度を $2000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以下としてもよい。このような条件での脱炭焼鈍によって二次再結晶後の結晶方位の先鋭度は理想的なGoss方位に近づく。すなわち結晶方位分散が比較的小さい二次再結晶組織が得られる。このような組織に対し、後述する条件で歪導入を行うことで、低鉄損と低騒音との両立が可能になる。

[0057] しかしながら、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域を $500^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上の昇温速度で加熱すると、この温度域で鋼板表面に生成する酸化膜はほとんど SiO_2 となる。なぜなら、ほかの酸化膜に比べて SiO_2 が最も生成速度が速いからである。 SiO_2 は脱炭を抑制する作用があるので、 SiO_2 の膜厚生成量が過剰にならないことが脱炭促進の観点から好ましい。

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法では、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域を $500^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上の昇温速度で加熱する場合でも、 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域（第2の温度域）の昇温速度を速くすること、または $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域の昇温速度を速くするとともに露点雰囲気を制御することにより、 $550\sim 750^{\circ}\text{C}$ の温度域で生成した SiO_2 の厚膜化を回避することが出来る。

具体的には、昇温速度のみを制御する場合、 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域の昇温速度を $800^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上にする。昇温速度が $800^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 未満では、 SiO_2 の成長（酸化膜の厚膜化）を十分に抑制できない。 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域の昇温速度は、好ましくは $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上である。昇温速度の上限は限定されないが、昇温速度を $2000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 超にすると、装置負荷が高くなりすぎることが懸念される。そのため、 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域での

昇温速度を $2000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以下としてもよい。

また、 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度域（第2の温度域）における昇温速度と雰囲気露点とを同時に制御する場合、 SiO_2 の成長抑制の観点からは、雰囲気露点を $-50\sim 20^{\circ}\text{C}$ とした上で、昇温速度を $50^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上とする。雰囲気露点が 20°C 超または昇温速度が $50^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 未満では、 SiO_2 の成長を十分に抑制できない。一方、雰囲気露点は低ければ低いほど好ましい。そのため下限は特に設けないが、 -50°C 未満を実現するためには特殊な設備が必要になり工業的には好ましくない。したがって、雰囲気露点の下限を -50°C としてもよい。

第1の温度域における雰囲気については、特に限定されず、公知の条件を適用できる。

[0058] <窒化処理工程>

脱炭焼鈍工程と後述する仕上げ焼鈍工程との間に、窒化処理を行ってもよい。

窒化処理工程では、例えば脱炭焼鈍工程後の冷延鋼板を窒化処理雰囲気（水素、窒素、及びアンモニア等の窒化能を有するガスを含有する雰囲気）内で $700\sim 850^{\circ}\text{C}$ 程度に維持する。ここで、冷延鋼板のN含有量が質量基準で $40\sim 1000\text{ppm}$ となるように、鋼板に窒化処理を施すことが好ましい。窒化処理後の冷延鋼板のN含有量が 40ppm 未満では冷延鋼板内にAINが十分に析出せず、AINがインヒビターとして機能しない可能性がある。このため、AINをインヒビターとして活用する場合、窒化処理後の冷延鋼板のN含有量は 40ppm 以上とすることが好ましい。

一方、冷延鋼板のN含有量が 1000ppm 超となった場合、仕上げ焼鈍において二次再結晶完了後も鋼板内に過剰にAINが存在する。このようなAINは鉄損劣化の原因となる。このため、窒化処理後の冷延鋼板のN含有量は 1000ppm 以下とすることが好ましい。

[0059] <仕上げ焼鈍工程>

仕上げ焼鈍工程では、脱炭焼鈍工程で得られた、またはさらに窒化処理が

行われた、冷延鋼板の片面または両面に対して所定の焼鈍分離剤を塗布した後に、仕上げ焼鈍を施す。仕上げ焼鈍は、一般に、鋼板をコイル状に巻いた状態において、長時間行われる。従って、仕上げ焼鈍に先立ち、コイルの巻きの内と外との焼付きの防止を目的として、焼鈍分離剤を冷延鋼板に塗布し、乾燥させる。

塗布する焼鈍分離剤として、 MgO を主成分とする（例えば重量分率で80%以上含む）焼鈍分離剤を用いる。 MgO を主成分とする焼鈍分離剤を用いることで、母材鋼板の表面にガラス被膜を形成することができる。 MgO を主成分としない場合には、一次被膜（ガラス被膜）は形成されない。なぜならば、一次被膜は Mg_2SiO_4 または $MgAl_2O_4$ 化合物だからであり、形成反応に必要な Mg が欠乏するからである。

仕上げ焼鈍は例えば水素及び窒素を含有する雰囲気ガス中で、 $1150 \sim 1250^{\circ}C$ まで昇温し、その温度域で10～60時間焼鈍する条件で行えばよい。

[0060] <被膜形成工程>

被膜形成工程では、仕上げ焼鈍後の冷延鋼板の片面又は両面に対し、張力付与絶縁被膜を形成する。張力付与絶縁被膜の形成の条件については、特に限定されるものではなく、公知の絶縁被膜処理液を用いて、公知の方法により処理液の塗布及び乾燥を行えばよい。鋼板表面に張力付与絶縁被膜を形成することで、方向性電磁鋼板の磁気特性を更に向上させることが可能となる。

絶縁被膜（張力付与絶縁被膜）が形成される鋼板の表面は、処理液を塗布する前に、アルカリなどによる脱脂処理や、塩酸、硫酸、リン酸などによる酸洗処理など、任意の前処理を施された表面であってもよいし、これら前処理が施されない仕上げ焼鈍後のままの表面であってもよい。

鋼板の表面に形成される絶縁被膜は、方向性電磁鋼板の絶縁被膜として用いられるものであれば、特に限定されるものではなく、公知の絶縁被膜を用いることが可能である。このような絶縁被膜として、例えば、リン酸塩およ

びコロイダルシリカを主成分とする被膜を挙げることができる。また、無機物を主体とし、更に有機物を含んだ複合絶縁被膜を挙げることができる。ここで、複合絶縁被膜とは、例えば、クロム酸金属塩、リン酸金属塩又はコロイダルシリカ、Zr化合物、Ti化合物等の無機物の少なくとも何れかを主体とし、微細な有機樹脂の粒子が分散している絶縁被膜である。特に、近年ニーズの高まっている製造時の環境負荷低減の観点からは、リン酸金属塩やZrあるいはTiのカップリング剤、又は、これらの炭酸塩やアンモニウム塩を出発物質として用いた絶縁被膜が用いられることがある。

[0061] <磁区細分化工程>

磁区細分化工程では、レーザービームや電子ビームなどのエネルギー線を張力付与絶縁被膜の表面に照射することにより、母材鋼板の表面近傍（表面から鋼板内部にかけて）に、圧延方向に対してなす角 ϕ が $60 \sim 120^\circ$ である方向に延在する複数の線状の歪を導入する。磁区細分化工程では、圧延方向に所定の間隔で、複数の線状の歪（エネルギー線照射による急速加熱とその後の急速冷却によって生じる熱歪）を形成するが、その間隔（すなわち、隣り合う歪の間隔（ p ））は、圧延方向に $3.0 \sim 9.0 \text{ mm}$ とする。

複数の線状の歪の圧延方向の間隔 p が 9.0 mm 超であると、鉄損改善効果が不足する。

エネルギー線としては、レーザービーム及び電子ビームが挙げられる。レーザービームは、連続波レーザーでもパルスレーザーでもよい。レーザービームの種類は例えば、ファイバーレーザー、YAGレーザー、又は CO_2 レーザーを挙げることができる。電子ビームは、連続ビームでも断続ビームでもよい。

[0062] また、上述したように、低鉄損と低騒音とを両立した方向性電磁鋼板を得るため、磁区細分化工程では、張力絶縁被膜の上からエネルギー線を照射することで、母材鋼板に対し、歪を導入し、表面からの深さが浅い還流磁区を形成する。

具体的には、単位 W でのレーザー出力 P と、単位 mm^2 でのレーザー照射断面積 S を用いて、 P/S で定義されるレーザーパワー密度 I_p が下記式（3）を満

たし、かつ、レーザ出力 P と、単位 $\text{mm}/\text{秒}$ でのレーザ走査速度 V_s を用いて、 (P/V_s) で定義される単位 J/mm のレーザ投入エネルギー U_p が、下記式(4)を満たすように、レーザビームを照射する。

$$250 \leq I_p \leq 2000 \quad \text{式(3)}$$

$$0.005 < U_p \leq 0.050 \quad \text{式(4)}$$

I_p が250未満では、十分なエネルギーが投入されず、磁区細分化効果(鉄損改善効果)が得られない。そのため、 I_p は250以上である。 I_p は、好ましくは500以上である。

一方、 I_p が2000超となると、磁区細分化効果を超えて、余剰の熱歪が導入されることで、騒音特性が劣化する。そのため、 I_p は2000以下である。 I_p は好ましくは1750以下、より好ましくは1500以下である。

また、 U_p が0.005以下では、照射効果が十分に得られず鉄損が十分に改善しない。そのため、 U_p は0.005超である。一方、 U_p が0.050超であると、騒音特性が劣化する。そのため、 U_p は0.050以下である。

ここでは具体例としてレーザビームについて説明したが、電子ビームなどの他のエネルギー線手段を用いる場合も同様である。

[0063] さらに、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法では、エネルギー線の照射に際し、エネルギー線の、単位 μm での、ビームスキャン方向(走査方向)に垂直な方向の径 d_l およびビームスキャン方向の径 d_c を用いて、 (d_l/d_c) で定義されるビームアスペクト比が、下記式(5)を満足するように制御する。

$$0.001 < d_l/d_c < 1.000 \quad (5)$$

ビームアスペクト比が0.001以下では、ビーム照射に伴い抜熱が起こり、投入エネルギーの投入効率が下がり、十分な磁区細分化効果(鉄損改善効果)が得られない。そのため、ビームアスペクト比は0.001超である。

一方、ビームアスペクト比が1.000以上である場合、ビーム照射に伴

う加熱は起こらないが、代わって、残留応力が発生し、低騒音効果が得られない。そのため、ビームアスペクト比は1.000未満である。ビームアスペクト比は、好ましくは0.050未満、より好ましくは0.005未満である。

[0064] また、エネルギー線の、単位 μm でのビームスキャン方向に垂直な方向の径 d_l は、下記(6)式を満足するようにする。

$$10 \leq d_l < 200 \quad (6)$$

d_l が10未満のビームを作り出すことは工業的に難しい。そのため、 d_l は10以上である。

一方、 d_l が200以上となると、磁区細分化効果を超えて、余剰の熱歪が導入されることで、騒音特性が劣化する。そのため、 d_l は200未満である。 d_l は好ましくは150未満、より好ましくは100未満である。

[0065] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法では、上述の通り、比較的強い I_p のエネルギー線を、ビームアスペクト比が小さい状態で照射する。このような照射は通常行われない。なぜなら、ビームアスペクト比を小さくすることは、照射エネルギーを分散させることにつながり、 I_p を高める効果が低くすると考えられるからである。

しかしながら、本発明者らは、歪の空間分布制御が鉄損と騒音とを同時に低くする観点で重要であるとの新たな知見に基づいて検討した結果、上記の照射条件が好ましいことを初めて見出した。

実施例

[0066] 表1に示すように、鋼番号(A～G)毎に化学組成が異なる鋼片を準備した。

次いで、各鋼片を用いて、方向性電磁鋼板(試験No. 1～28)を製造した。

具体的には、鋼B、E、Fを1100～1200℃の範囲内の温度に加熱した後、鋼を熱間圧延し、これにより、板厚が $2.3 \pm 0.3\text{ mm}$ の熱延鋼板を作製した。また、鋼片A、C、D、Gを1300～1400℃の範囲内

の温度に加熱した後、鋼片を熱間圧延し、これにより、板厚 2.3 ± 0.3 mm の熱延鋼板を作製した。

次いで、得られた熱延鋼板に対して熱延板焼鈍を実施した。具体的には、熱延鋼板を焼鈍温度 $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 、保持時間 $10 \sim 200$ 秒の条件で焼鈍した。

次いで、熱延焼鈍後の熱延鋼板に対して酸洗等により表面スケールを除去した後に、一回又は焼鈍を挟む二回の冷間圧延を行って、母材の板厚が $0.19 \sim 0.23$ mm の冷延鋼板を作製した。

得られた冷延鋼板に対し、表 2 に示す条件で脱炭焼鈍を行った。また、脱炭焼鈍の均熱工程では $800 \sim 840^{\circ}\text{C}$ の温度で $100 \sim 150$ 秒間実施した。その際の酸化度 $(\text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2) = 0.3 \sim 0.5$ に制御した。鋼 B、E、F を用いた試験 No. 2、5、6、9、10、14、16、18、23、26、27 についてはさらに窒化処理を施した。

次いで、冷延鋼板に対して仕上げ焼鈍工程を実施した。具体的には、冷延鋼板の表面に酸化マグネシウム (MgO) を主成分（重量分率で 80% 以上）とする焼鈍分離剤を塗布した。

次いで、焼鈍分離剤が塗布された冷延鋼板を $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ に焼鈍し、母材鋼板上にガラス被膜を有する鋼板を作製した。

次いで、この鋼板に対して被膜形成工程を実施した。具体的には、鋼板の表面（より詳細には、一次被膜であるガラス被膜の表面）に、コロイダルシリカ及びリン酸塩を主体とする絶縁被膜形成液を塗布して熱処理（焼付）した。これにより母材鋼板と母材鋼板上に形成されているガラス被膜とガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜とを備える方向性電磁鋼板を得た。

[0067]

[表1]

鋼	スラブ（質量％、残部Fe及び不純物）													
	C	Si	Mn	N	SolAl	P	S	Sn	Cu	Bi	Cr	Se	Sb	Mo
A	0.085	3.45	0.08	0.010	0.026	0.010	0.022	0.15	-	-	-	-	-	-
B	0.061	3.50	0.25	0.010	0.029	-	0.010	-	0.20	-	-	-	-	-
C	0.055	3.20	0.40	0.020	0.020	0.030	0.020	-	-	0.005	0.06	-	-	-
D	0.077	3.45	0.09	0.008	0.020	0.010	0.020	-	-	-	-	0.010	0.005	0.01
E	0.035	3.25	0.32	0.020	0.040	-	0.028	-	-	-	-	-	-	-
F	0.055	3.40	0.10	0.010	0.033	0.020	0.010	-	-	-	-	-	-	-
G	0.082	3.35	0.08	0.008	0.024	0.010	0.024	-	-	-	-	-	-	-

[0068]

[表2]

試験 No.	素材(母材鋼板)		脱炭焼鈍工程		
	鋼	厚さ	550-750℃ 昇温速度	750-800℃ 昇温速度	750-800℃ 雰囲気露点
		mm	℃/秒	℃/秒	℃
1	A	0.22	700	1000	-20
2	B	0.22	500	800	30
3	C	0.23	700	800	30
4	D	0.23	700	1000	40
5	E	0.23	1000	1200	30
6	F	0.23	1300	1200	0
7	G	0.22	1000	1200	-10
8	D	0.20	500	50	-30
9	E	0.20	500	50	-30
10	F	0.19	500	50	-20
11	A	0.19	700	50	-20
12	G	0.22	900	100	0
13	D	0.22	<u>400</u>	50	0
14	F	0.22	600	<u>50</u>	<u>25</u>
15	A	0.22	600	800	30
16	B	0.22	600	800	30
17	A	0.23	600	100	0
18	B	0.23	600	100	0
19	C	0.23	700	1000	0
20	D	0.23	700	1000	0
21	D	0.22	700	50	0
22	A	0.22	700	1000	0
23	B	0.22	500	800	0
24	C	0.23	700	800	-10
25	D	0.23	700	1000	-10
26	E	0.23	1000	1200	-20
27	F	0.23	1300	1200	-20
28	G	0.22	1000	1200	-20

[0069] [母材鋼板の化学組成の分析]

上記の要領で得られた磁区細分化前の各試験No. の方向性電磁鋼板の母材鋼板の化学組成を、次の方法により求めた。

始めに、各試験No. の方向性電磁鋼板から、張力付与絶縁被膜を除去した。具体的には、方向性電磁鋼板を、NaOH：30～50質量%及びH₂O：50～70質量%を含有し、80～90℃の水酸化ナトリウム水溶液に、7～10分間浸漬した。浸漬後の方向性電磁鋼板（張力付与絶縁被膜が除去

された方向性電磁鋼板）を水洗した。水洗後、温風のブローアードで1分間弱、乾燥させた。

次に、張力付与絶縁被膜を備えていない方向性電磁鋼板から、ガラス被膜を除去した。具体的には、方向性電磁鋼板を、30～40質量%のHClを含有し、80～90℃の塩酸水溶液に、1～10分間浸漬した。これにより、母材鋼板上からガラス被膜が除去された。浸漬後の母材鋼板を水洗した。水洗後、温風のブローアードで1分間弱、乾燥させた。以上の工程により、方向性電磁鋼板から、母材鋼板を取り出した。

取り出した母材鋼板の化学組成を、周知の成分分析法により求めた。具体的には、ドリルを用いて、母材鋼板から切粉を生成し、その切粉を採取した。採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得た。溶液に対して、ICP-AESを実施して、化学組成の元素分析を実施した。母材鋼板の化学組成中のSiについては、JIS G 1212（1997）に規定の方法（けい素定量方法）により求めた。具体的には、上述の切粉を酸に溶解させると、酸化ケイ素が沈殿物として析出した。この沈殿物（酸化ケイ素）をろ紙で濾し取り、質量を測定して、Si含有量を求めた。C含有量及びS含有量については、周知の高周波燃焼法（燃焼－赤外線吸収法）により求めた。具体的には、上述の溶液を酸素気流中で高周波加熱により燃焼して、発生した二酸化炭素、二酸化硫黄を検出し、C含有量及びS含有量を求めた。N含有量については、周知の不活性ガス溶融－熱伝導度法を用いて求めた。以上の分析法により、母材鋼板の化学組成を求めた。結果を表3に示す。

[0070]

[表3]

試験 No.	鋼	母材鋼板（質量%、残部Fe及び不純物）												
		C	Si	Mn	N	Sol.Al	P	S	Sn	Cu	Cr	Se	Sb	Mo
1	A	0.001	3.28	0.06	0.002	0.001	0.010	0.001	0.15	-	-	-	-	-
2	B	0.002	3.35	0.20	0.002	0.002	-	0.001	-	0.20	-	-	-	-
3	C	0.002	3.11	0.40	0.001	0.001	0.030	0.001	-	-	0.06	-	-	-
4	D	0.002	3.30	0.08	0.002	0.001	0.010	0.001	-	-	-	0.005	0.005	0.01
5	E	0.001	3.18	0.30	0.001	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-
6	F	0.002	3.29	0.10	0.001	0.002	0.020	0.001	-	-	-	-	-	-
7	G	0.002	3.20	0.07	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	-	-	-
8	D	0.002	3.40	0.09	0.002	0.001	0.010	0.001	-	-	-	0.008	0.005	0.01
9	E	0.002	3.10	0.29	0.003	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-
10	F	0.002	3.31	0.08	0.004	0.001	0.020	0.001	-	-	-	-	-	-
11	A	0.001	3.26	0.07	0.002	0.002	0.010	0.001	0.14	-	-	-	-	-
12	G	0.002	3.20	0.06	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	-	-	-
13	D	0.001	3.38	0.09	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	0.007	0.004	0.01
14	F	0.011	3.29	0.08	0.001	0.002	0.015	0.001	-	-	-	-	-	-
15	A	0.002	3.25	0.07	0.002	0.002	0.009	0.001	0.15	-	-	-	-	-
16	B	0.001	3.33	0.19	0.001	0.001	-	0.001	-	0.20	-	-	-	-
17	A	0.001	3.29	0.07	0.004	0.001	0.010	0.001	0.13	-	-	-	-	-
18	B	0.002	3.37	0.18	0.002	0.001	-	0.001	-	0.18	-	-	-	-
19	C	0.002	3.09	0.37	0.003	0.001	0.030	0.001	-	-	0.06	-	-	-
20	D	0.002	3.23	0.07	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	0.008	0.005	0.01
21	D	0.001	3.33	0.07	0.001	0.001	0.009	0.001	-	-	-	0.006	0.004	0.01
22	A	0.001	3.28	0.06	0.002	0.001	0.010	0.001	0.15	-	-	-	-	-
23	B	0.002	3.33	0.19	0.002	0.001	-	0.001	-	0.20	-	-	-	-
24	C	0.002	3.09	0.38	0.001	0.001	0.020	0.001	-	-	0.06	-	-	-
25	D	0.002	3.29	0.08	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	0.005	0.005	0.01
26	E	0.001	3.18	0.29	0.001	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-
27	F	0.002	3.38	0.10	0.001	0.002	0.020	0.001	-	-	-	-	-	-
28	G	0.002	3.19	0.05	0.001	0.001	0.010	0.001	-	-	-	-	-	-

[0071] 表には示さないが、鉄損改善率を評価するため、各試験No.の方向性電磁鋼板について、磁区細分化前の鉄損について評価した。各試験No.の方向性電磁鋼板から、板幅中央位置を含む、幅60mm×長さ300mmのサンプルを採取した。サンプルの長さ方向は、圧延方向に平行とした。採取されたサンプルは露点0℃以下の窒素雰囲気中で800℃、2時間保持し、サンプル採取時に導入された歪除去を実施した。

このサンプルを用いて、周波数を50Hz、最大磁束密度を1.7Tとしたときの鉄損 $W_{17/50}$ (W/kg) を測定した。

[0072] その後、各試験No.の方向性電磁鋼板に対して、連続波レーザまたは断

続波レーザを用いて、表4および表5に示す条件で方向性電磁鋼板表面にエネルギー線照射を行うことで磁区細分化を行った。磁区細分化後の方向性電磁鋼板について、騒音特性及び磁気特性の評価試験を実施した。

[0073] [騒音特性評価]

前記磁区制御を施した幅60mm×長さ300mmのサンプルに対し、磁歪測定装置を用いて、交流磁歪測定法により磁歪を測定した。磁歪測定装置は、レーザードップラ振動計と、励磁コイルと、励磁電源と、磁束検出コイルと、増幅器と、オシロスコープとを備える装置とした。

具体的には、圧延方向に最大磁束密度が1.7Tとなるように、サンプルに交流磁界を印加した。磁区の伸縮によるサンプルの長さの変化を、レーザードップラ振動計で測定し、磁歪信号を得た。得られた磁歪信号をフーリエ解析して、磁歪信号の各周波数成分 f_n (n は1以上の自然数)の振幅 C_n を求めた。各周波数成分 f_n のA補正係数 α_n を用いて、次式で示される磁歪速度レベルLVA (dB)を求めた。

$$LVA = 20 \times \log \left(\sqrt{ \left(\sum (\rho_c \times 2\pi \times f_n \times \alpha_n \times C_n / \sqrt{2} \right)^2 } / P_{e0} \right)$$

ここで、 ρ_c は固有音響抵抗であり、 $\rho_c = 400$ とした。 P_{e0} は最小可聴音圧であり、 $P_{e0} = 2 \times 10^{-5}$ (Pa)を用いた。A補正係数 α_n は、JIS C 1509-1 (2005)の表2に記載の値を用いた。

得られた磁歪速度レベル (LVA) に基づいて、以下の基準に則して騒音特性を評価した。磁歪速度レベルが、60 dBA未満であれば、「騒音特性に優れる」と判断した。50 dBA未満であれば特に優れると判断した。磁歪速度レベルが60 dBA以上で、「騒音特性が不十分」とであるとした。

結果を表5に示す。

[0074] [磁気特性評価]

磁気特性としては、磁区制御による鉄損改善効果を評価すべく、鉄損改善率で評価した。

前記磁区制御を施した幅60mm×長さ300mmのサンプルを用いて、

周波数を 50 Hz、最大磁束密度を 1.7 T としたときの鉄損 $W_{1.7/50}$ (W/kg) を測定した。

そして、ここで測定した鉄損 $W_{1.7/50}$ (W/kg) と磁区制御前に測定した鉄損 $W_{1.7/50}$ (W/kg) とを用い、鉄損改善率 (%) を [(磁区制御前の鉄損 - 磁区制御後の鉄損) × 100] / 磁区制御前の鉄損、として計算して求めた。

鉄損改善率が 5 % 以上で「鉄損改善効果あり」と判断し、鉄損改善率が 10 % 以上で「鉄損改善効果大いにあり」と判断した。

ただし、磁区制御後の鉄損が 0.85 W/kg を超えた材料については、磁区制御の改善率に因らず「磁気特性が不十分」とであると判断とした。

また、合わせて、このサンプルを用いて、単板磁気特性試験 (SST 試験) により、磁束密度 (T) を求めた。具体的には、サンプルに 800 A/m の磁場を付与して、磁束密度 (T) を求めた。

結果を表 5 に示す。

[0075] 今回の評価では磁気特性および騒音特性において、それぞれ「鉄損改善効果あり」かつ「騒音特性に優れる」場合においてのみ合格、すなわち発明例とした。磁気特性および騒音特性いずれかのうち、少なくとも一方が、「騒音特性が不十分」または「磁気特性が不十分」であった場合、「比較例」とした。

[0076]

[表4]

試験 No.	磁区細分化工程						
	エネルギー線の 種類	連続/ 断続	照射面 表面/ 表面及び裏面	Ip	Up	dl/dc	dl
				W/mm ²	J/mm	—	μm
1	レーザ	連続	表面のみ	1989	0.010	0.075	60
2	レーザ	連続	表面のみ	331	0.010	0.039	150
3	レーザ	連続	表面のみ	331	0.008	0.039	150
4	レーザ	連続	表面のみ	331	0.008	0.039	150
5	レーザ	連続	表面のみ	1102	0.014	0.039	150
6	レーザ	連続	表面のみ	1654	0.014	0.026	100
7	レーザ	連続	表面のみ	1654	0.010	0.026	100
8	レーザ	連続	表面のみ	1102	0.008	0.016	60
9	レーザ	連続	表面のみ	1102	0.008	0.016	60
10	レーザ	連続	表面及び裏面	1102	0.008	0.016	60
11	レーザ	連続	表面のみ	1984	0.016	0.008	30
12	レーザ	断続	表面のみ	1984	0.010	0.008	30
13	レーザ	連続	表面のみ	1323	0.018	0.013	50
14	レーザ	連続	表面のみ	1323	0.012	0.013	50
15	レーザ	連続	表面のみ	1323	0.024	0.013	50
16	レーザ	連続	表面のみ	1323	0.005	0.013	50
17	レーザ	連続	表面のみ	<u>220</u>	0.010	0.019	75
18	レーザ	連続	表面のみ	<u>6614</u>	0.010	0.019	75
19	レーザ	連続	表面のみ	661	<u>0.056</u>	0.026	100
20	レーザ	連続	表面のみ	661	<u>0.001</u>	0.026	100
21	レーザ	連続	表面のみ	661	0.010	0.026	100
22	レーザ	連続	表面のみ	1886	0.012	<u>1.200</u>	180
23	レーザ	連続	表面のみ	265	0.012	0.065	<u>250</u>
24	レーザ	連続	表面のみ	700	0.013	0.003	100
25	レーザ	連続	表面のみ	1075	0.013	0.016	60
26	レーザ	連続	表面のみ	796	0.013	0.002	60
27	レーザ	連続	表面のみ	1929	0.015	0.016	60
28	レーザ	連続	表面のみ	1929	0.042	0.016	60

[0077]

[表5]

試験 No.	歪			(310)面のX線回折強度			磁気特性			騒音 特性	備考
	延在方向 (圧延方向となす角) °	間隔 mm	幅 μm	XRTピーク 半値幅 mm	$\frac{ J_0 - J_{min} }{ I_0 - I_{min} }$	／	磁区制御 前の鉄損 W/kg	磁区制御 後の鉄損 W/kg	磁束 密度 T	鉄損 改善率 %	
1	85	5.0	65	0.02	1.14		0.82	0.75	1.95	9%	発明例
2	87	5.0	150	0.02	1.36		0.81	0.74	1.94	9%	発明例
3	88	4.0	153	0.07	1.20		0.83	0.76	1.95	8%	発明例
4	88	4.0	153	0.07	1.20		0.82	0.74	1.94	10%	発明例
5	88	7.0	155	0.04	0.51		0.88	0.78	1.92	11%	発明例
6	88	7.0	102	0.06	0.45		0.87	0.77	1.91	11%	発明例
7	88	5.0	103	0.06	0.35		0.85	0.76	1.93	11%	発明例
8	87	4.0	63	0.05	0.28		0.79	0.70	1.94	11%	発明例
9	87	4.0	62	0.04	0.59		0.78	0.69	1.94	12%	発明例
10	87	4.0	61	0.04	0.43		0.79	0.69	1.95	13%	発明例
11	83	8.0	50	0.06	0.44		0.78	0.67	1.92	14%	発明例
12	86	5.0	50	0.04	0.38		0.82	0.75	1.92	9%	発明例
13	87	9.0	50	0.12	0.01		0.80	0.75	1.94	6%	比較例
14	88	6.0	60	0.99	0.01		0.92	0.89	1.95	3%	比較例
15	85	12.0	60	0.02	1.25		0.85	0.82	1.93	4%	比較例
16	89	2.0	60	0.02	1.20		0.86	0.78	1.92	9%	比較例
17	82	5.0	80	0.15	1.54		0.81	0.79	1.94	2%	比較例
18	90	5.0	80	0.01	2.52		0.83	0.73	1.93	12%	比較例
19	79	4.0	105	0.25	1.60		0.82	0.73	1.96	11%	比較例
20	90	4.0	105	0.01	1.56		0.82	0.79	1.95	4%	比較例
21	88	5.0	103	0.07	0.95		0.83	0.73	1.93	12%	発明例
22	79	6.0	183	0.01	1.02		0.88	0.77	1.93	13%	比較例
23	88	6.0	253	0.04	1.05		0.87	0.77	1.92	11%	比較例
24	89	5.0	105	0.03	0.25		0.83	0.72	1.92	13%	発明例
25	87	6.0	63	0.03	0.38		0.83	0.73	1.92	12%	発明例
26	89	5.0	62	0.04	0.35		0.79	0.69	1.93	13%	発明例
27	88	6.0	61	0.05	0.27		0.82	0.72	1.94	12%	発明例
28	85	6.0	60	0.03	0.32		0.81	0.71	1.94	12%	発明例

[0078] 表1～5から分かるように、発明例である試験No. 1～12および21、24～28は磁気特性及び騒音特性に優れている。すなわち、「鉄損改善率が5%以上」かつ「磁区制御後の鉄損が0.85W/kg以下」かつ「磁歪速度レベルが、60dBA未満」であった。

試験No. 5～11および試験No. 21については鉄損改善率が10%を超えたうえ、磁歪速度レベルは50dBA未満であり、特に良好な特性だ

った。これは、レーザ照射条件である I_p および U_p がより好ましい制御範囲内にあったためである。

試験N o. 1～4 および試験N o. 12は、レーザ照射条件である I_p および U_p 共に好ましいまたはより好ましい範囲を外れていたものの、本発明範囲を満足する範囲であったため、発明効果は享受できた。

[0079] これに対し、試験N o. 13～20、22、23は比較例であり、磁気特性及び騒音特性の少なくとも一方が劣っていた。

試験N o. 13については、脱炭焼鈍の昇温工程において本発明範囲を外れていた。すなわち、試験N o. 13は二次再結晶組織においてG o s s粒の方位先鋭度が十分でなかった。そのため、歪導入条件を本発明範囲内で実施したにも拘わらず、X線トポグラフィスペクトルの半値幅が本発明範囲を外れ、騒音特性に劣っていた。

試験N o. 14は脱炭が十分でなかった。このため、磁区制御後であっても鉄損は0.85W/kgを超えており、鉄損改善率も低かった。

試験N o. 15は、線状の歪の間隔が9.0mmを超えた。その結果、歪の導入間隔が広がったため、磁区制御されていない二次再結晶粒の存在頻度が増えた。結果として磁区制御効果が不十分であり、鉄損改善率が5%に至らなかった。

試験N o. 16は、線状の歪の間隔が3.0mm未満であった。過剰に歪が導入されたことで、騒音特性に劣っていた。

試験N o. 17～20は歪付与条件が本発明範囲を外れた。

試験N o. 17は I_p が小さく、試験N o. 20は U_p が小さかったため磁区細分化効果が得られず、X線トポグラフィスペクトルの半値幅が本発明範囲を外れ、鉄損改善率が5%に至らなかった。

試験N o. 18は I_p が大きく、試験N o. 19は U_p が大きかったため、X線トポグラフィスペクトルの半値幅が本発明範囲を外れ、騒音特性に劣っていた。

試験No. 22は、ビームアスペクト比が1.000を超えていたことで、X線トポグラフィスペクトルの半値幅が本発明範囲を外れ、所望の低騒音効果が得られなかった。

試験No. 23は、ビームスキャン方向に垂直な方向の径d1が200 μ m以上であったために、歪の幅が大きくなり、余剰な熱歪が導入されてしまい、低騒音効果が得られなかった。

産業上の利用可能性

[0080] 本発明に依れば、鉄損特性と騒音特性とに優れる方向性電磁鋼板及びその製造方法を提供することができ、産業上の利用可能性が高い。

請求の範囲

[請求項1]

母材鋼板と、
前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と、
前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜と、
を備え、
前記母材鋼板は、質量％で、
C : 0.010％以下、
Si : 3.00～4.00％、
Mn : 0.01～0.50％、
N : 0.010％以下、
Sol. Al : 0.020％以下、
P : 0.030％以下、
S : 0.010％以下、
Sn : 0～0.50％、
Cu : 0～0.50％、
Cr : 0～0.50％、
Se : 0～0.020％、
Sb : 0～0.500％、
Mo : 0～0.10％、
残部 : Fe 及び不純物、からなる化学組成を有し、
前記母材鋼板の表面には、圧延方向に対して交差する方向に連続的にまたは断続的に延在する、複数の線状の歪が存在し、
互いに隣り合う前記複数の線状の歪の、前記圧延方向における間隔 p が 3.0～9.0 mm であり、
前記線状の歪の幅が、10～250 μ m であり、
表面のX線トポグラフィ画像から得られる、前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 1.50 mm の範囲におけるX線トポグラフィスペクトルにおいて、スペクトル強度の最大値を含む前記X線トポグラ

フィスペクトルのピークの半値幅が、 0.02 mm 以上、 0.10 mm 以下である、

ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

[請求項2] 前記表面の前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 3.0 mm の範囲にX線ビームを照射し、 (310) 面のX線反射強度の、最小値を $I_{\min}$ 、バックグラウンド強度を I_0 とし、裏面の前記線状の歪を中心とする前記圧延方向に 3.0 mm の範囲にX線ビームを照射し、得られた回折面 (310) 面のX線反射強度の、最小値を $J_{\min}$ 、バックグラウンド強度を J_0 としたとき、前記 $I_{\min}$ 、前記 I_0 、前記 $J_{\min}$ 、前記 J_0 が下記式(2)を満足する、

ことを特徴とする請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

$$0.02 \leq |J_0 - J_{\min}| / |I_0 - I_{\min}| \leq 1.00 \quad (2)$$

[請求項3] 前記母材鋼板の前記化学組成が、

$\text{Sn} : 0.01 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Cu} : 0.05 \sim 0.50\%$ 、のいずれかまたは両方を含む、

ことを特徴とする請求項1または2に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項4] 請求項1または2に記載の方向性電磁鋼板の製造方法であって、

質量%で、 $\text{C} : 0.010 \sim 0.200\%$ 、 $\text{Si} : 3.00 \sim 4.00\%$ 、 $\text{Mn} : 0.01 \sim 0.50\%$ 、 $\text{N} : 0.020\%$ 以下、 $\text{S} : 0.005 \sim 0.040\%$ 、 $\text{Sn} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Cu} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Bi} : 0 \sim 0.020\%$ 、 $\text{Cr} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Se} : 0 \sim 0.020\%$ 、 $\text{Sb} : 0 \sim 0.500\%$ 、 $\text{Mo} : 0 \sim 0.10\%$ 、残部： Fe 及び不純物、からなる化学組成を有する鋼片を加熱した後、熱間圧延し、熱延鋼板を得る、熱間圧延工程と、

前記熱延鋼板に熱延板焼鈍を施す、熱延板焼鈍工程と、

前記熱延板焼鈍工程後の前記熱延鋼板に、一回又は中間焼鈍を挟む

複数回の冷間圧延を行って冷延鋼板を得る、冷間圧延工程と、

前記冷延鋼板に脱炭焼鈍を施す、脱炭焼鈍工程と、

母材鋼板である前記脱炭焼鈍工程後の前記冷延鋼板の表裏面に、 MgO を主成分とする焼鈍分離剤を塗布し、乾燥させた後、仕上げ焼鈍を施すことでガラス被膜を形成する、仕上げ焼鈍工程と、

前記ガラス被膜上に張力付与絶縁被膜を形成し、前記母材鋼板と前記母材鋼板上に形成されているガラス被膜と前記ガラス被膜上に形成されている張力付与絶縁被膜とを備える方向性電磁鋼板を得る、被膜形成工程と、

前記方向性電磁鋼板の前記張力付与絶縁被膜の表面にエネルギー線を照射し、前記母材鋼板に複数の線状の歪を付与する、磁区細分化工程と、

を有し、

前記磁区細分化工程において、

前記複数の線状の歪のうち、隣り合う線状の歪の圧延方向の間隔が $3.0 \sim 9.0 \text{ mm}$ であり、

単位 W でのエネルギー線出力 P と、単位 mm^2 でのエネルギー線照射断面積 S を用いて、 (P/S) で定義される、単位 W/mm^2 でのエネルギー線パワー密度 I_p が下記式(3)を満たし、

前記エネルギー線出力 P と、単位 $\text{mm}/\text{秒}$ でのエネルギー線走査速度 V_s を用いて、 (P/V_s) で定義される単位 J/mm のエネルギー線投入エネルギー U_p が、下記式(4)を満たし、かつ、

前記エネルギー線の、単位 μm での、ビームスキャン方向に垂直な方向の径 d_l および前記ビームスキャン方向の径 d_c を用いて、 (d_l/d_c) で定義されるビームアスペクト比、並びに、前記 d_l がそれぞれ下記式(5)および下記式(6)を満たし、

前記脱炭焼鈍工程において、

$550 \sim 750^\circ\text{C}$ の第1の温度域での昇温速度 S_1 を $500^\circ\text{C}/$

秒以上とし、

750～800℃の第2の温度域での昇温速度S2を800℃／秒以上とする、または、前記第2の温度域での前記昇温速度S2を50℃／秒以上としてかつ前記第2の温度域での雰囲気露点を－50℃～20℃とする、

ことを特徴とする方向性電磁鋼板の製造方法。

$$250 \leq l_p \leq 2000 \quad (3)$$

$$0.005 < U_p \leq 0.050 \quad (4)$$

$$0.001 < d_l / d_c < 1.000 \quad (5)$$

$$10 \leq d_l < 200 \quad (6)$$

[請求項5] 前記脱炭焼鈍工程と前記仕上げ焼鈍工程との間に、さらに、前記冷延鋼板に窒化処理を施す窒化処理工程を有する、

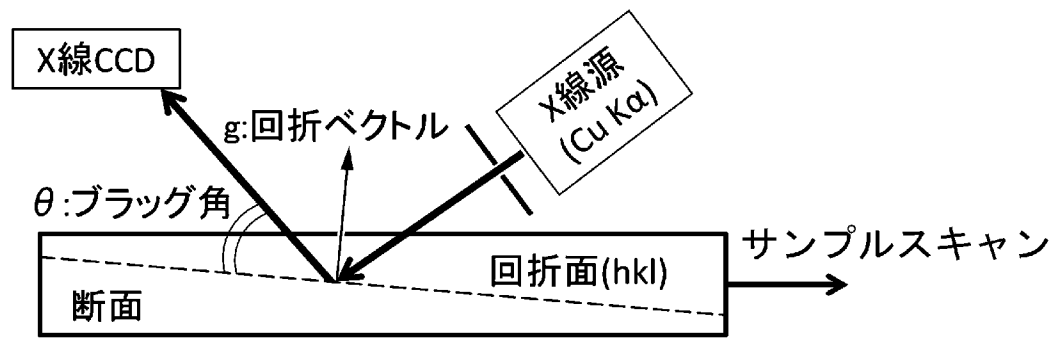
ことを特徴とする請求項4に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項6] 前記鋼片の前記化学組成が、

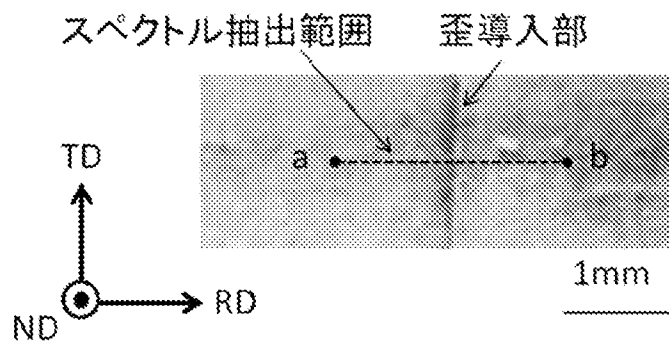
Sn：0.01～0.50%、Cu：0.05～0.50%、のいずれかまたは両方を含む、

ことを特徴とする請求項4または5に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

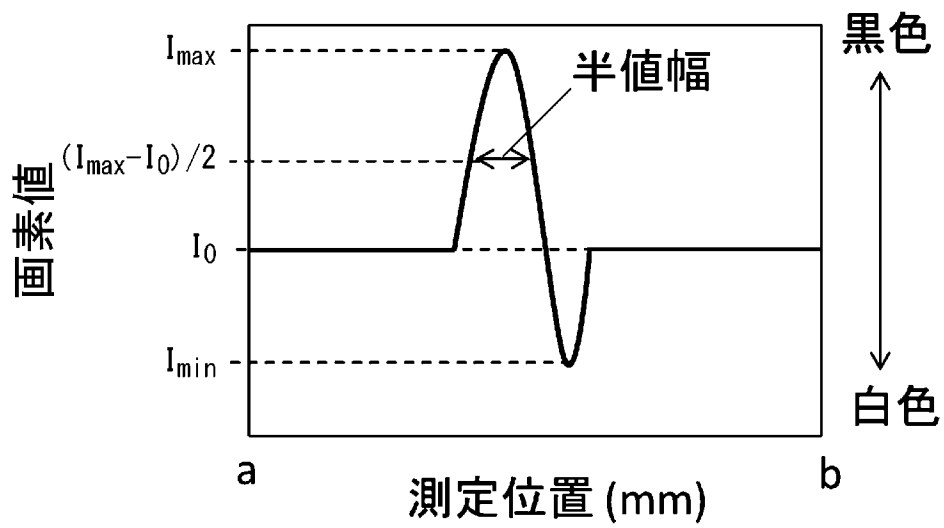
[図1]



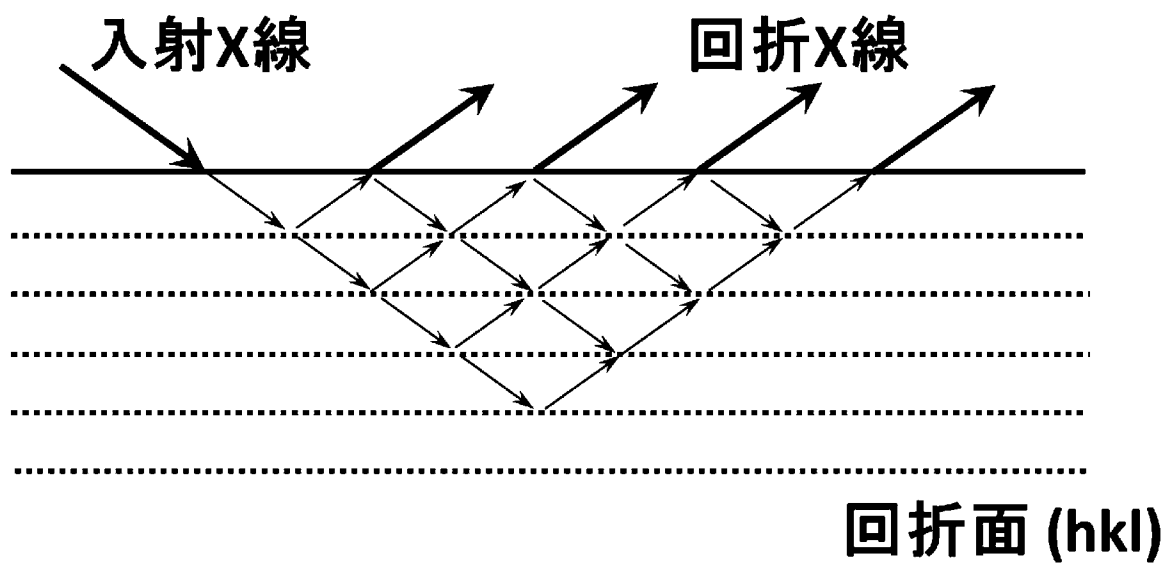
[図2]



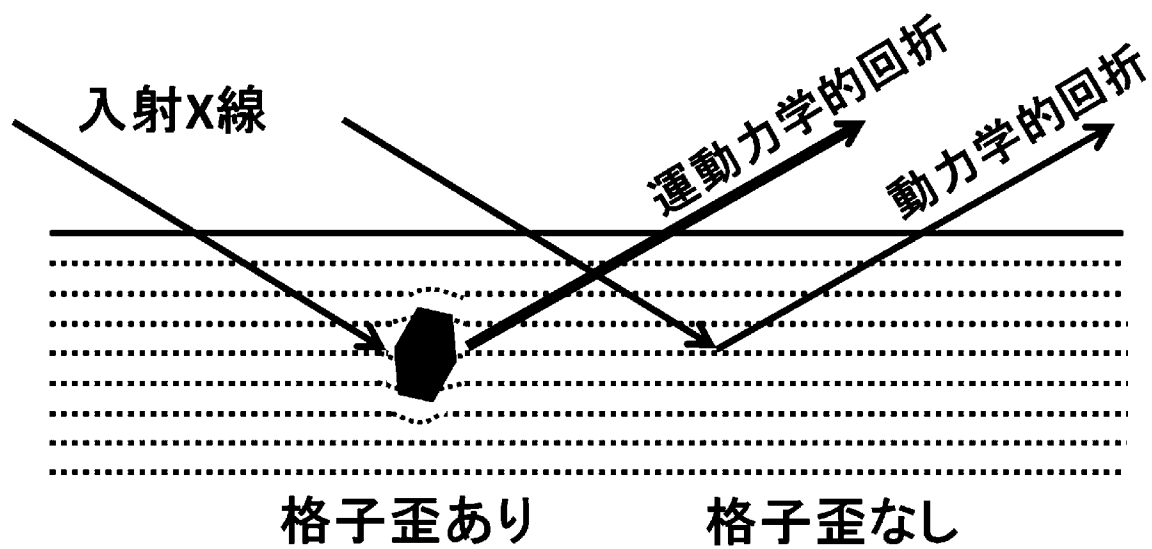
[図3]



[図4]



[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/015222

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**C21D 8/12**(2006.01)i; **C22C 38/00**(2006.01)i; **C22C 38/60**(2006.01)i; **H01F 1/147**(2006.01)i

FI: C21D8/12 D; C22C38/00 303U; C22C38/60; H01F1/147 183

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)

C21D8/12; C21D9/46; C22C38/00-38/60; H01F1/147

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 1971-2022

Registered utility model specifications of Japan 1996-2022

Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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.
A	WO 2019/182154 A1 (NIPPON STEEL CORP) 26 September 2019 (2019-09-26) claims, paragraphs [0005], [0014]-[0163], fig. 1-7	1-6
A	JP 5841594 B2 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 13 January 2016 (2016-01-13) paragraph [0036]	1-6
A	WO 2019/013348 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 17 January 2019 (2019-01-17) entire text	1-6
A	JP 2017-88968 A (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 25 May 2017 (2017-05-25) entire text	1-6
A	JP 2021-46592 A (NIPPON STEEL CORP) 25 March 2021 (2021-03-25) entire text	1-6

☐ 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

30 May 2022

Date of mailing of the international search report

07 June 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/015222

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2019/182154	A1	26 September 2019	US 2021/0043345 A1 claims, paragraphs [0015], [0046]-[0238], fig. 1-7 EP 3770281 A1 KR 10-2020-0121873 A CN 111868271 A	
JP	5841594	B2	13 January 2016	WO 2012/164702 A1 paragraph [0036] CN 103596720 A KR 10-2016-0070843 A	
WO	2019/013348	A1	17 January 2019	US 2020/0123632 A1 entire text EP 3653756 A1 CN 110832118 A KR 10-2020-0021999 A	
JP	2017-88968	A	25 May 2017	(Family: none)	
JP	2021-46592	A	25 March 2021	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） C21D 8/12(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; C22C 38/60(2006.01)i; H01F 1/147(2006.01)i FI: C21D8/12 D; C22C38/00 303U; C22C38/60; H01F1/147 183														
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）） C21D8/12; C21D9/46; C22C38/00-38/60; H01F1/147														
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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2022年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2022年	日本国実用新案登録公報	1996-2022年	日本国登録実用新案公報	1994-2022年				
日本国実用新案公報	1922-1996年													
日本国公開実用新案公報	1971-2022年													
日本国実用新案登録公報	1996-2022年													
日本国登録実用新案公報	1994-2022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												
A	WO 2019/182154 A1（日本製鉄株式会社）26.09.2019（2019-09-26） 請求の範囲、段落0005、0014-0163、図1-7	1-6												
A	JP 5841594 B2（新日鐵住金株式会社）13.01.2016（2016-01-13） 段落0036	1-6												
A	WO 2019/013348 A1（新日鐵住金株式会社）17.01.2019（2019-01-17） 全文	1-6												
A	JP 2017-88968 A（新日鐵住金株式会社）25.05.2017（2017-05-25） 全文	1-6												
A	JP 2021-46592 A（日本製鉄株式会社）25.03.2021（2021-03-25） 全文	1-6												
☐ 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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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	“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	“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	“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）	“&” 同一パテントファミリー文献	“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	
* 引用文献のカテゴリー	“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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													
“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	“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													
“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）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“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														
国際調査を完了した日 30.05.2022	国際調査報告の発送日 07.06.2022													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 河川 展明 4K 3770 電話番号 03-3581-1101 内線 3435													

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2022/015222

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2019/182154	A1	26.09.2019	US 2021/0043345 A1 請求の範囲、段落 0 0 1 5、0 0 4 6－0 2 3 8、 図 1－7 EP 3770281 A1 KR 10-2020-0121873 A CN 111868271 A	
JP	5841594	B2	13.01.2016	WO 2012/164702 A1 段落 0 0 3 6 CN 103596720 A KR 10-2016-0070843 A	
WO	2019/013348	A1	17.01.2019	US 2020/0123632 A1 全文 EP 3653756 A1 CN 110832118 A KR 10-2020-0021999 A	
JP	2017-88968	A	25.05.2017	(ファミリーなし)	
JP	2021-46592	A	25.03.2021	(ファミリーなし)	