

(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
2016 年 10 月 27 日(27.10.2016)



(10) 国際公開番号

WO 2016/171129 A1

- (51) 国際特許分類:
C21D 8/12 (2006.01) C22C 38/60 (2006.01)
B23K 26/364 (2014.01) C25F 3/06 (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01) H01F 1/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/062375
- (22) 国際出願日: 2016 年 4 月 19 日(19.04.2016)
- (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 2015-086302 2015 年 4 月 20 日(20.04.2015) JP
- (71) 出願人: 新日鐵住金株式会社(NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL 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: 濱村 秀行(HAMAMURA Hideyuki); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP). 坂井 辰彦

(SAKAI Tatsuhiko); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP). 茂木 尚(MOGI Hisashi); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP). 高橋 史明(TAKAHASHI Fumiaki); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP). 今井 浩文(IMAI Hirofumi); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP). 奥村 俊介(OKUMURA Shunsuke); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目 6 番 1 号 新日鐵住金株式会社内 Tokyo (JP).

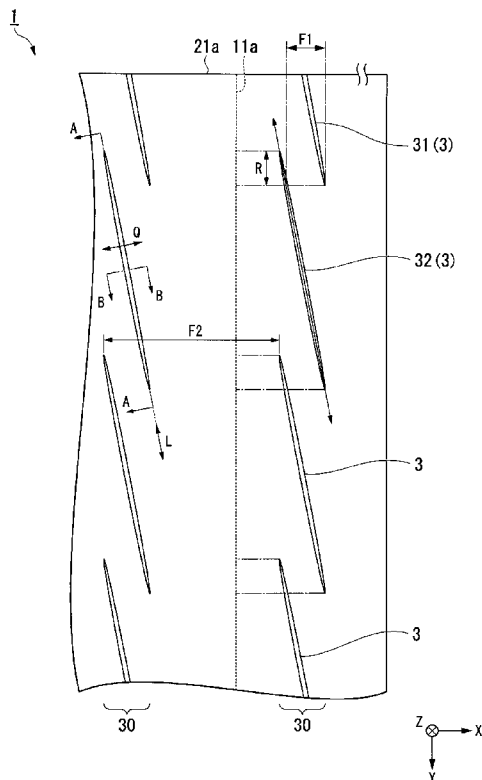
(74) 代理人: 志賀 正武, 外(SHIGA Masatake et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目 9 番 2 号 Tokyo (JP).

(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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,

[続葉有]

(54) Title: ORIENTED ELECTROMAGNETIC STEEL SHEET

(54) 発明の名称: 方向性電磁鋼板



(57) Abstract: This oriented electromagnetic steel sheet is provided with a steel sheet having a surface which has, formed therein, grooves which extend in a direction intersecting the rolling direction, and which have a depth direction that becomes the sheet thickness direction. When viewed from the sheet thickness direction, the surface of the steel sheet has groove groups formed from a plurality of the grooves arranged in the sheet width direction. The grooves which form the groove groups are arranged so as to overlap adjacent grooves on a projection plane orthogonal to the rolling direction. A plurality of the groove groups are arranged in the rolling direction with an interval therebetween.

(57) 要約: 圧延方向と交差する方向に延在しかつ溝深さ方向が板厚方向となる溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備える方向性電磁鋼板であって、前記板厚方向から前記鋼板表面を見た場合に、板幅方向に対して前記溝が複数配されて構成される溝群を有し、前記溝群を構成する前記溝が、前記圧延方向と直交する投影面上で隣り合う溝と重なるように配され、前記溝群が前記圧延方向に対して間隔を有して複数配されている。

WO 2016/171129 A1



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

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユー

ロシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 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

技術分野

[0001] 本発明は方向性電磁鋼板に関する。

本願は、2015年4月20日に日本に出願された特願2015-086302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] 従来から、変圧器の鉄芯（コア）用の鋼板として、特定の方向に優れた磁気特性を発揮する方向性電磁鋼板が知られている。この方向性電磁鋼板は、冷間圧延処理と焼鈍処理との組み合わせによって、結晶粒の磁化容易軸と圧延方向とが一致するように結晶方位が制御された鋼板である。方向性電磁鋼板の鉄損は可能な限り低いことが望ましい。

[0003] 鉄損は、渦電流損とヒステリシス損とに分類される。さらに、渦電流損は、古典的渦電流損と異常渦電流損とに分類される。古典的渦電流損を低減するために、上記のように結晶方位が制御された鋼板（地鉄）の表面に絶縁皮膜が形成された方向性電磁鋼板が一般的に知られている。この絶縁皮膜は、電氣的絶縁性だけでなく、張力及び耐熱性等を鋼板に与える役割も担っている。なお、近年では、鋼板と絶縁皮膜との間にガラス皮膜が形成された方向性電磁鋼板も知られている。

[0004] 一方、異常渦電流損を低減するための方法として、圧延方向に交差する方向に延びる歪みを、圧延方向に沿って所定間隔で形成することにより、180°磁区の幅を狭くする（180°磁区の細分化を行う）磁区制御法が知られている。この磁区制御法は、非破壊的な手段によって歪みを方向性電磁鋼板の鋼板に与える非破壊的磁区制御法と、例えば鋼板の表面に溝を形成するなどの破壊的磁区制御法とに分類される。

[0005] 方向性電磁鋼板を用いて変圧器用の巻コアを製造する場合、方向性電磁鋼板がコイル状に巻かれることに起因して生じる変形歪みを除去するために、

歪み取り焼鈍処理を実施する必要がある。非破壊的磁区制御法によって歪みが付与された方向性電磁鋼板を用いて巻コアを製造する場合、歪み取り焼鈍処理の実施によって歪みが消失するので、磁区細分化効果（つまり異常渦電流損の低減効果）も消失する。

[0006] この他、破壊的磁区制御法によって溝が付与された方向性電磁鋼板を用いて巻コアを製造する場合、歪み取り焼鈍処理の実施によって溝が消失しないので、磁区細分化効果を維持することができる。従って、巻きコアに対しては、異常渦電流損を低減するための方法として破壊的磁区制御法が一般的に採用されている。

[0007] 例えば、特許文献1に開示されるように、レーザ照射により鋼板に歪みを与える方法が実用されている。この他、方向性電磁鋼板の圧延方向に略垂直、且つ圧延方向に一定周期で10～30 μ m程度の深さの溝を形成すると、鉄損が低減される。これは、溝の空隙での透磁率の変化により溝周辺に磁極が発生し、この磁極を源に180°磁壁の間隔が狭くなり、鉄損が改善されるためである。

[0008] 電磁鋼板に溝を形成する方法には、例えば、電解エッチングによって方向性電磁鋼板の鋼板表面に溝を形成する電解エッチング法（下記特許文献2参照）、機械的に歯車を方向性電磁鋼板の鋼板表面にプレスすることにより、鋼板表面に溝を形成する歯車プレス法（下記特許文献3参照）、レーザ照射により鋼板（レーザ照射部）を溶融及び蒸発させるレーザ照射法（下記特許文献4参照）が挙げられる。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：日本国特公昭58-26406号公報

特許文献2：日本国特公昭62-54873号公報

特許文献3：日本国特公昭62-53579号公報

特許文献4：日本国特開2003-129135号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 磁区細分化のための溝を圧延方向に交差する方向に形成する際、一方向に沿って通板する鋼板の一方の側縁から他方の側縁に渡って1つ溝を形成するためには、溝形成速度を速めるか、鋼板の通板速度を遅くする必要がある。しかし、溝形成速度には技術的に上限が存在し、また鋼板の通板速度には工業生産的に下限が存在する。そのため、複数の溝形成装置を用いて、一方向に沿って通板する鋼板の一方の側縁から他方の側縁に渡って複数の溝を形成する場合がある。しかし、鋼板の一方の側縁から他方の側縁に渡って複数の溝を形成した場合、方向性電磁鋼板の鉄損特性が安定的に向上しないという問題があった。

[0011] 本発明は、上記課題に鑑みてなされ、工業生産性に優れ、且つ、鉄損を改善させることができる方向性電磁鋼板を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明は、上記課題を解決して係る目的を達成するために、以下の手段を採用する。

(1) 本発明の第1の態様に係る方向性電磁鋼板は、圧延方向と交差する方向に延在しかつ溝深さ方向が板厚方向となる溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備える方向性電磁鋼板において、前記板厚方向から前記鋼板表面を見た場合に、板幅方向に対して前記溝が複数配されて構成される溝群を有し、前記溝群を構成する前記溝が、前記圧延方向と直交する投影面上で隣り合う溝と重なるように配され、前記溝群が前記圧延方向に対して間隔を有して複数配される。

この方向性電磁鋼板において、前記鋼板の前記板幅方向の端部を基準端部とし、前記溝群の複数の前記溝のうちの隣り合う溝を前記基準端部から近い順に第一の溝、第二の溝とし、前記溝群を構成する各溝での前記溝長手方向の2つの溝端を、前記基準端部から近い順に第一溝端、第二溝端とし、前記投影面に投影された前記第一の溝の輪郭を第一溝長手投影線とし、前記投影面に投影された前記第二の溝の輪郭を第二溝長手投影線とし、前記溝群を構

成する複数の前記溝の輪郭における平均深さを単位 μm で溝群平均深さ D_A とし、前記第二溝長手投影線の前記第一溝端において前記鋼板表面から前記板厚方向への深さが $0.05 \times D_A$ となる前記第二溝長手投影線上の点を第1の点とし、前記第一溝長手投影線の前記第二溝端において前記鋼板表面から前記板厚方向への深さが $0.05 \times D_A$ となる前記第一溝長手投影線上の点を第2の点としたとき、前記投影面において、前記第二溝長手投影線上の前記第1の点と前記基準端部との間の距離が、前記第一溝長手投影線上の前記第2の点と前記基準端部との間の距離より短く、前記第二の溝の前記第一溝端と前記第一の溝の前記第二溝端との間のオーバーラップ領域において、前記第一の溝の前記第二溝端における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝の前記第一溝端における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上である。

[0013] (2) 上記(1)に記載の方向性電磁鋼板において、前記オーバーラップ領域に含まれる前記第一溝長手投影線上の任意の点を P_1 とし、前記オーバーラップ領域に含まれる前記第二溝長手投影線上の点のうち、前記基準端部からの距離が前記点 P_1 と等しい点を P_2 としたとき、前記オーバーラップ領域において、前記第一の溝の前記鋼板表面から前記第一溝長手投影線上の前記点 P_1 までの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝の前記鋼板表面から前記第二溝長手投影線上の前記点 P_2 までの前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上であってもよい。

[0014] (3) 本発明の第2の態様に係る方向性電磁鋼板は、圧延方向と交差する方向に延在しかつ溝深さ方向が板厚方向となる溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備える方向性電磁鋼板であって、前記板厚方向から前記鋼板表面を見た場合に、板幅方向に対して前記溝が複数配されて構成される溝群を有し、前記溝群を構成する前記溝が、前記圧延方向と直交する投影面上で隣り合う溝と重なるように配され、前記溝群が前記圧延方向に対して間隔を有して複数配されている。

この方向性電磁鋼板において、前記鋼板の前記板幅方向の一方の端部を基

準端部とし、前記溝群の複数の前記溝のうちの隣り合う溝を、前記基準端部から近い順に、第一の溝、第二の溝とし、前記溝群を構成する各溝での前記溝長手方向の2つの溝端を、前記基準端部から近い順に、第一溝端、第二溝端とし、前記投影面に投影された前記第一の溝の輪郭を第一溝長手投影線とし、前記投影面に投影された前記第二の溝の輪郭を第二溝長手投影線とし、前記第一溝長手投影線の前記鋼板表面から前記板厚方向に向かう深さの平均値を単位 μm で第一溝平均深さ D_I とし、前記第二溝長手投影線の前記鋼板表面から前記板厚方向に向かう深さの平均値を単位 μm で第二溝平均深さ D_{II} とし、前記第二溝長手投影線の前記第一溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.05 \times D_{II}$ となる点を第3の点とし、前記第一溝長手投影線の前記第二溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.05 \times D_I$ となる点を第4の点としたとき、前記投影面にて、前記第二溝長手投影線上の前記第3の点と前記基準端部との間の距離 L_a が、前記第一溝長手投影線上の前記第4の点と前記基準端部との間の距離 L_b より短く、前記第二の溝の前記第一溝端と前記第一の溝の前記第二溝端との間のオーバーラップ領域において、前記第一の溝における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝における前記鋼板表面から前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.25 \times (D_I + D_{II})$ 以上である。

[0015] (4) 上記(3)に記載の方向性電磁鋼板において、前記第一溝長手投影線の前記第二溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.95 \times D_I$ となる点を第5の点とし、前記第二溝長手投影線の前記第一溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.95 \times D_{II}$ となる点を第6の点としたとき、前記第一溝長手投影線上の前記第5の点と前記基準端部との間の距離 L_c は、前記第二溝長手投影線上の前記第6の点と前記基準端部との間の距離 L_d より短くてもよい。

[0016] (5) 上記(1)～(4)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板において、前記鋼板では前記溝に接する結晶粒の粒径が $5\mu\text{m}$ 以上であってもよい。

発明の効果

[0017] 本発明の上記態様によれば、鉄損に優れた方向性電磁鋼板を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の鋼板表面に形成される溝を示す模式図である。

[図2]図1のA－A線における溝の断面形状を示す図である。

[図3]図1に示すB－B線における溝の断面形状を示す図である。

[図4]溝の輪郭の定義に関する説明図である。

[図5]溝の輪郭の定義に関する説明図である。

[図6]第一角度の定義に関する説明図である。

[図7]第一角度の定義に関する説明図である。

[図8]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の隣り合う溝の溝長手投影線を示す図である。

[図9]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の隣り合う溝同士の溝深さの合計値の分布を示すグラフである。

[図10]図8と比較してオーバーラップ領域の幅が異なる場合の隣り合う溝の溝長手投影線を示す図である。

[図11]図10に示す場合の隣り合う溝同士の溝深さの合計値の分布を示すグラフである。

[図12]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造プロセスを示すフローチャートである。

[図13]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造プロセスの溝加工工程におけるレーザ照射に関する説明図である。

[図14]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造プロセスの溝加工工程におけるレーザ照射に関する説明図である。

[図15]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造プロセスの溝加工工程におけるレーザ照射に関する説明図である。

[図16]本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造プロセスの溝加工工程におけるレーザ照射に関する説明図である。

[図17]本実施形態におけるレーザ法による溝加工工程においてレーザビーム照射の出力と時間との関係を示すグラフである。

[図18]実施例1の方向性電磁鋼板の鋼板表面に形成される溝を示す図である。

[図19]本実施形態の変形例における方向性電磁鋼板の溝群の隣り合う溝の溝長手投影線を示す図である。

[図20]本実施形態の変形例における方向性電磁鋼板の溝群の隣り合う溝の溝長手投影線を示す図である。

[図21]本実施形態の変形例における方向性電磁鋼板の溝群の隣り合う溝の溝長手投影線を示す図である。

[図22]本実施形態の変形例における方向性電磁鋼板の隣り合う溝同士の間隔の合計値の分布を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0019] 以下、図面を参照して本発明の好適な実施形態について説明する。ただし、本発明は本実施形態に開示の構成のみに限定されることなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の変更が可能である。また、下記する数値限定範囲には、下限値及び上限値がその範囲に含まれる。ただし、下限値に「超」と示す数値限定範囲には下限値が含まれず、上限値に「未満」と示す数値限定範囲には上限値が含まれない。

[0020] 図1は、本実施形態に係る方向性電磁鋼板1の平面図である。図2は、図1のA-A線における矢視断面図である。なお、図において、方向性電磁鋼板1の圧延方向をX、方向性電磁鋼板1の板幅方向（同一平面内で圧延方向に直交する方向）をY、方向性電磁鋼板1の板厚方向（XY平面に直交する方向）をZと定義する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板1は、鋼板表面2aに、磁区細分化のための溝3を有する。図1は、本実施形態に係る方向性電磁鋼板を板厚方向Zから見たとき（以下、「平面視」と記載する場合があ

る)の溝3を示す模式図である。

[0021] 図1に示すように、板厚方向Zから溝3を見た場合(溝3を平面視した場合)に、溝3の延在方向(図1に示す矢印L)を溝長手方向Lという。溝3を平面視した場合に、溝3の溝長手方向Lに直交する方向(図1に示す矢印Q)を溝幅方向Qという。実際の方向性電磁鋼板の鋼板表面2a及び溝3は、表面が均一に形成されるものではないが、発明の特徴を説明するために図1から図3、図5から図8、図18から図20では模式的に示している。また、溝3は、板厚方向Zから見た場合(溝3を平面視した場合)に、弓状の形状を有してもよい。ただし、本実施形態では、説明の便宜上、直線形状を有する溝3を例示する。

[0022] 方向性電磁鋼板1は、冷間圧延処理と焼鈍処理との組み合わせによって結晶粒の磁化容易軸と圧延方向Xとが一致するように結晶方位が制御された鋼板(地鉄)2を備え、鋼板2の表面(鋼板表面2a)に溝3を有する。

[0023] 鋼板2は、化学成分として、質量分率で、Si:0.8%~7%、C:0%超~0.085%、酸可溶性Al:0%~0.065%、N:0%~0.012%、Mn:0%~1%、Cr:0%~0.3%、Cu:0%~0.4%、P:0%~0.5%、Sn:0%~0.3%、Sb:0%~0.3%、Ni:0%~1%、S:0%~0.015%、Se:0%~0.015%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる。

[0024] 上記の鋼板2の化学成分は、結晶方位を{110}<001>方位に集積させた後、すなわち、Goss集合組織に制御後の好ましい化学成分である。上記元素のうち、SiおよびCが基本元素であり、酸可溶性Al、N、Mn、Cr、Cu、P、Sn、Sb、Ni、S、およびSeが選択元素である。上記の選択元素は、その目的に応じて含有させればよいので下限値を制限する必要がなく、下限値が0%でもよい。また、これらの選択元素が不純物として含有されても、本実施形態の効果は損なわれない。上記の鋼板2は、上記の基本元素および選択元素の残部がFe及び不純物からなってもよい。なお、不純物とは、鋼板2を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、ス

クラップ、または製造環境等から不可避免的に混入する元素を意味する。

また、電磁鋼板では二次再結晶時に純化焼鈍を経ることが一般的である。純化焼鈍においてはインヒビター形成元素の系外への排出が起きる。特にN、Sについては濃度の低下が顕著で、50 ppm以下になる。通常の純化焼鈍条件であれば、9 ppm以下、さらには6 ppm以下、純化焼鈍を十分に行えば、一般的な分析では検出できない程度（1 ppm以下）にまで達する。

[0025] 上記鋼板2の化学成分は、鋼の一般的な分析方法によって測定すればよい。例えば、鋼板2の化学成分は、ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) を用いて測定すればよい。具体的には、皮膜除去後の鋼板2の中央の位置から35 mm角の試験片を採取し、ICP発光分析装置（例えば、株式会社島津製作所製 ICP S-8100）により予め作成した検量線に基づいた条件で測定することにより特定できる。なお、CおよびSは燃焼-赤外線吸収法を用い、Nは不活性ガス融解-熱伝導度法を用いて測定すればよい。

[0026] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板1は、溝3及び鋼板表面2a上に絶縁皮膜(不図示)を有してもよい。

[0027] さらに、鋼板表面2aと絶縁皮膜との間にはガラス皮膜(不図示)を備えてもよい。ガラス皮膜は、例えば、フォスフェライト (Mg_2SiO_4)、スピネル ($MgAl_2O_4$) 及びコーディエライト ($Mg_2Al_4Si_5O_{16}$) などの複合酸化物によって構成されている。詳細は後述するが、ガラス皮膜は、方向性電磁鋼板1の製造プロセスの1つである仕上焼鈍工程において、鋼板2に焼き付きが発生することを防止するために形成される皮膜である。従って、ガラス皮膜は、方向性電磁鋼板1の構成要素として必須の要素ではない。絶縁皮膜は、例えば、コロイダルシリカ及びリン酸塩を含有し、電氣的絶縁性だけでなく、張力、耐食性及び耐熱性等を鋼板2に与える役割を担っている。

[0028] なお、方向性電磁鋼板 1 のガラス皮膜および絶縁皮膜は、例えば、次の方法によって除去することができる。ガラス皮膜または絶縁皮膜を有する方向性電磁鋼板 1 を、 $\text{NaOH} : 10 \text{ 質量\%} + \text{H}_2\text{O} : 90 \text{ 質量\%}$ の水酸化ナトリウム水溶液に、 80°C で 15 分間浸漬する。次いで、 $\text{H}_2\text{SO}_4 : 10 \text{ 質量\%} + \text{H}_2\text{O} : 90 \text{ 質量\%}$ の硫酸水溶液に、 80°C で 3 分間、浸漬する。その後、 $\text{HNO}_3 : 10 \text{ 質量\%} + \text{H}_2\text{O} : 90 \text{ 質量\%}$ の硝酸水溶液によって、常温で 1 分間弱浸漬して洗浄する。最後に、温風のブローアで 1 分間弱乾燥させる。なお、上記の方法によって方向性電磁鋼板 1 からガラス皮膜または絶縁皮膜を除去した場合、鋼板 2 の溝 3 の形状や粗さは、ガラス皮膜または絶縁皮膜を形成する前と同等であることが確認されている。

[0029] 溝 3 は、図 1 に示すように、圧延方向 X と交差する方向に延在し、かつ、深さ方向が板厚方向 Z となるように形成されている。方向性電磁鋼板 1 は、板厚方向 Z から鋼板表面 2 a を見た場合に、板幅方向 Y に対して複数配された溝 3 から構成された溝群 30 を有する。そして、溝群 30 を構成する溝 3 は、圧延方向 X と直交する投影面（図 1 の破線 11 a で示す断面）で見たときに、隣り合う溝同士が重なるように配される。

この構成により、方向性電磁鋼板 1 は、板幅方向 Y において複数の溝 3 を形成した場合に、板幅方向 Y に溝 3 が形成された状態を確保し、鉄損を改善させることができる。

[0030] 鋼板の板幅方向 Y の一方の端部を基準端部 21 a としたとき、溝群 30 を構成する複数の溝 3 は、基準端部 21 a から近い順に第一の溝 31、第二の溝 32、第 n の溝 3 n と複数形成されている。この第一の溝 31、第二の溝 32、第 n の溝 3 n は、図 1 に示すように、圧延方向 X と直交する投影面上で隣り合う溝 3 同士の端部が重なるように配される。

また、溝群 30 は、図 1 に示すように、他の溝群 30 と圧延方向 X が離間するように配されていることが好ましい。

[0031] 溝 3 は、図 2 に示すように、溝長手方向 L における両端部において、深さが鋼板表面 2 a から溝 3 の底部 4 に向かって深くなるように傾斜する傾斜部

5が形成されている。このように、溝長手方向Lの両端部に傾斜部5を有する場合、以下の様に隣り合う溝3の端部同士がオーバーラップするように配すると、効果的に鉄損を改善させることができる。

以下の説明における用語を定義する。

[0032] (溝平均深さD)

溝3の深さとは、鋼板表面2aの高さから溝3の表面(底部4)までの板厚方向Zの長さをいう。溝平均深さDは以下のように測定すればよい。板厚方向Zから溝3を見た場合(溝3を平面視した場合)に、観察範囲を溝3の一部に設定する。観察範囲は、溝3の溝長手方向Lにおける端部を除く領域(すなわち、溝底の形状が安定している領域)に設定することが望ましい。例えば、観察範囲は、溝長手方向Lの略中央部で、溝長手方向Lの長さが $30\mu\text{m}$ ~ $300\mu\text{m}$ 程度となるような観察領域とすればよい。次に、レーザ顕微鏡を用いて観察範囲内の高さ分布(溝深さ分布)を得て、この観察範囲内での最大溝深さを求める。同様の測定を、観察範囲を変えて少なくとも3領域以上、より好ましくは10領域にて行う。そして、各観察領域における最大溝深さの平均値を算出し、これが溝平均深さDと定義される。本実施形態における溝3の溝平均深さDは、磁区細分化の効果を好ましく得るために、例えば、 $5\mu\text{m}$ 以上 $100\mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 $10\mu\text{m}$ 超 $40\mu\text{m}$ 以下であるとさらに好ましい。

なお、鋼板表面2aと溝3の表面との間の距離を測定するためには、板厚方向Zにおける鋼板表面2aの位置(高さ)を予め測定しておく必要がある。例えば、各観察範囲内の鋼板表面2aにおける複数箇所のそれぞれについて、レーザ顕微鏡を用いて板厚方向Zの位置(高さ)を測定し、それらの測定結果の平均値を鋼板表面2aの高さとして利用してもよい。また、本実施形態では、後述のように溝平均幅Wを測定する際に溝短手断面を使用するので、この溝短手断面から鋼板表面2aを測定してもよい。なお、レーザ顕微鏡にて鋼板サンプルを観察する際には、この鋼板サンプルの2つの板面(観察面およびその裏面)が略平行であることが好ましい。

[0033] (平均溝幅W)

溝3の幅とは、溝長手方向Lに直交する断面（溝幅方向断面あるいは溝短手断面）で溝3を見た場合の溝短手方向Qの溝開口部の長さをいう。平均溝幅Wは以下のように測定すればよい。溝平均深さDと同様に、板厚方向Zから溝3を見た場合（溝3を平面視した場合）に、観察範囲を溝3の一部に設定する。観察範囲は、溝3の溝長手方向Lにおける端部を除く領域（すなわち、溝底の形状が安定している領域）に設定することが望ましい。

例えば、観察範囲は、溝長手方向Lの略中央部で、溝長手方向Lの長さが $30\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ 程度となるような観察領域とすればよい。次に、レーザ顕微鏡を用いて観察範囲内の任意の1カ所（例えば、観察領域での最大溝深さの位置）にて、溝長手方向Lに直交する溝短手断面を得る。この溝短手断面に現れる鋼板表面2aおよび溝3の輪郭曲線から溝開口部の長さを求める。

[0034] 具体的には、上記溝短手断面に現れる鋼板表面2aおよび溝3の輪郭を成す測定断面曲線MCLに低域フィルタ（カットオフ値 λ_s ）を適用して断面曲線を得た後、その断面曲線に帯域フィルタ（カットオフ値 λ_f 、 λ_c ）を適用して、断面曲線から長い波長成分と短い波長成分を除去すると、図3に示すように、溝短手断面での溝3の輪郭を成すうねり曲線WWCが得られる。うねり曲線は、輪郭の形状そのものを滑らかな線で単純化するのに適した輪郭曲線の一種である。

[0035] 図3に示すように、溝短手断面での溝3のうねり曲線WWC上で、鋼板表面2aから板厚方向Zに沿って溝3の表面までの深さが、溝3の溝平均深さDに対し $0.05 \times D$ となる2つの点（第三点33、第四点34）間を結ぶ線分の長さ（溝開口部） W_n を求める。

同様の測定を、観察範囲を変えて少なくとも3領域以上、より好ましくは10領域にて行う。そして、各観察領域における溝開口部の平均値を算出し、これが平均溝幅Wと定義される。本実施形態における溝3の平均溝幅Wは、磁区細分化の効果を好ましく得るために、例えば $10\mu\text{m}$ 以上 $250\mu\text{m}$

以下であることが好ましい。

なお、鋼板表面 2 a から $0.05 \times D$ となる深さを測定するためには、板厚方向 Z における鋼板表面 2 a の位置（高さ）を予め測定しておく必要がある。例えば、各溝短手断面内のうねり曲線上の鋼板表面 2 a における複数箇所のそれぞれについて、板厚方向 Z の位置（高さ）を測定し、それらの測定結果の平均値を鋼板表面 2 a の高さとして利用してもよい。

[0036] （第一角度 θ ）

溝 3 の第一角度 θ とは、鋼板表面 2 a と溝 3 の端部とが成す角度をいう。第一角度 θ は以下のように測定すればよい。板厚方向 Z から溝 3 を見た場合（溝 3 を平面視した場合）に、観察範囲を溝 3 の溝長手方向 L の端部を含む一部に設定する。板厚方向 Z から溝 3 を平面視し、溝長手方向 L に沿って複数（ n 本）の仮想線 $L_1 \sim L_n$ を観察範囲内に仮想的に設定する（図 6 参照）。観察範囲は、溝 3 の端部を含む領域（すなわち、溝 3 の溝長手方向 L の始まりから溝底の形状が安定している領域までを含む領域）に設定することが望ましい。次に、レーザ顕微鏡（レーザ式表面粗さ測定器）等を用いて、観察範囲内の溝 3 の高さ分布（溝深さ分布）を仮想線 L_1 に沿って測定すると、図 4 に示すように、溝 3 の端部の溝長手方向 L の輪郭を成す測定断面曲線 $MC L_1$ が仮想線 L_1 に沿う形で得られる。

[0037] 上記のように仮想線 L_1 について得られた測定断面曲線 $MC L_1$ に低域フィルタ（カットオフ値 λ_s ）を適用して断面曲線を得た後、その断面曲線に帯域フィルタ（カットオフ値 λ_f 、 λ_c ）を適用して、断面曲線から長い波長成分と短い波長成分を除去すると、図 5 に示すように、溝 3 の端部の溝長手方向 L の輪郭を成すうねり曲線 $LWC 1$ が仮想線 L_1 に沿う形で得られる。

[0038] 図 5 に示すように、うねり曲線 $LWC 1$ を用い、仮想線 L_1 に沿う複数（ n 個）の位置のそれぞれにおいて、鋼板表面 2 a と溝 3 の輪郭（つまりうねり曲線 $LWC 1$ ）との間の板厚方向 Z の距離（深さ $d_1 \sim d_n$ ：単位は μm ）が得られる。さらに、これらの深さ $d_1 \sim d_n$ の平均値（溝深さ D_1 ）が

得られる。同様な測定手法によって、他の仮想線 $L_2 \sim L_n$ のそれぞれについても、溝端部の溝深さ $D_2 \sim D_n$ が得られる。

なお、鋼板表面 $2a$ からの深さ $d_1 \sim d_n$ を測定するためには、板厚方向 Z における鋼板表面 $2a$ の位置（高さ）を予め測定しておく必要がある。例えば、観察範囲内の鋼板表面 $2a$ における複数箇所のそれぞれについて、レーザ顕微鏡を用いて板厚方向 Z の位置（高さ）を測定し、それらの測定結果の平均値を鋼板表面 $2a$ の高さとして利用してもよい。

[0039] 本実施形態では、上記の仮想線 $L_1 \sim L_n$ のうち、溝長手方向 L に沿い且つ溝の平均深さが最大になるという条件を満足する仮想線を溝基準線 BL として選択する。例えば、図6に示すように、仮想線 $L_1 \sim L_n$ のそれぞれについて得られた溝深さ $D_1 \sim D_n$ のうち、溝深さ D_2 が最大である場合、仮想線 L_2 が溝基準線 BL と定義される。

[0040] 図7に示すように、溝基準線 BL に基づくうねり曲線上で、鋼板表面 $2a$ から板厚方向 Z に向かって深さが $0.05 \times D$ となる第一点 5_1 と、鋼板表面 $2a$ から板厚方向 Z に向かって深さが $0.50 \times D$ となる第二点 5_2 とを結ぶ直線を溝端直線 $3E$ とする。そして、溝 3 の第一角度 θ は、溝端直線 $3E$ の鋼板表面 $2a$ に対する傾斜角度と定義する。

なお、第一角度 θ を測定するためには、鋼板表面 $2a$ を直線近似しておく必要がある。

例えば、溝基準線 BL に基づくうねり曲線上で、溝 3 を除いた鋼板表面 $2a$ のみの領域を直線近似すればよい。この直線近似した鋼板表面 $2a$ と溝端直線 $3E$ との傾斜角度を測定すればよい。同様の方法によって、溝 3 の溝長手方向 L における両端部において、溝端直線 $3E$ と鋼板表面 $2a$ とがなす傾斜角度（第一角度 θ ）を求める。

[0041] （溝長手投影線 LWP ）

圧延方向 X と直交する面を投影面とし、この投影面に溝 3 の溝長手方向 L の輪郭を投影した場合、投影面に投影された溝長手方向 L の輪郭を溝長手投影線 LWP と定義する。溝長手投影線 LWP は以下のように測定すればよい

。板厚方向Zから溝3を平面視したときに、観察範囲として、溝3の全体を含む領域、または溝3の端部を含む領域（すなわち、溝3の溝長手方向Lの始まりから溝底の形状が安定している領域までを含む領域）を設定する。この観察範囲内に、溝長手方向Lに沿う複数の仮想線を仮想的に設定する。仮想線 $L_1 \sim L_n$ は、板厚方向Zには任意の高さに設定できるものとする。そして、上記の溝基準線BLで説明した方法と同じ方法によって、溝深さが最大になる仮想線を選択する。選択した仮想線に沿った溝深さ分布を溝3の溝長手方向Lの全体の輪郭（うねり曲線）として上記投影面に投影したときに得られる曲線を溝長手投影線LWPとする。なお、上記の観察範囲として、隣り合う2つの溝の全体を含む領域、または隣り合う2つの溝の重なり合う端部を含む領域（すなわち、一方の溝の溝底の形状が安定している領域、隣り合う2つの溝の溝端が重なる領域、および他方の溝の溝底の形状が安定している領域を含む領域）を設定することが好ましい。溝群30を構成する各溝における溝長手方向Lの2つの溝端を、基準端部21aから近い順に、第一溝端、第二溝端とする。図8には、第一の溝31の第一溝長手投影線LWP1の第一溝端31aおよび第二溝端31bと、第二の溝32の第二溝長手投影線LWP2第一溝端32aおよび第二溝端32bとを模式的に示す。なお、隣り合う溝同士の板幅方向Yにおける位置関係を説明するため、図8では、本実施形態に係る方向性電磁鋼板1の複数の溝3のうち、板幅方向Yに隣り合う二つの溝31、32のみを抽出して記載している。

[0042] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板1は、図1に示すように、板幅方向Yに隣り合う第一の溝31の第二溝端31bと、第二の溝32の第一溝端32aとが、板幅方向Yでオーバーラップするように配される。図8では、板幅方向Yに隣り合う第一の溝31及び第二の溝32は、板厚方向Zから見たとき、端部が重ならない配置を例示した。しかし、第一の溝31及び第二の溝32は、板厚方向Zから見たとき、端部が重なっていてもよい。例えば、第一の溝31及び第二の溝32が、板厚方向Zから見たとき、端部が完全に重なっているのであれば、1本の溝であると見なすことができる。

- [0043] 第二溝長手投影線LWP2における第二の溝32の第一溝端32aの板幅方向Yの位置は、第一溝長手投影線LWP1における第一の溝31の第二溝端31bの板幅方向Yの位置よりも基準端部21a側に位置するように、隣り合う溝同士が板幅方向Yに重なる。図8に示すように、第一の溝31の第二溝端31bと第二の溝32の第一溝端32aとの間が第一の溝31と第二の溝32とが板幅方向Yにおいてオーバーラップする領域Rである。
- [0044] 方向性電磁鋼板1において、板幅方向Yに複数の溝を形成し、且つ、隣り合う溝31、32同士が互いにオーバーラップすることにより、傾斜部5を有する溝31、32、・・・、3nを用いても、鉄損を低く抑えることができる。すなわち、耐錆性を向上させるために、溝長手方向Lの両端部に傾斜部が形成された溝3であっても、複数の溝3を板幅方向Yに配置し、且つ隣り合う互いの溝の両端部を板幅方向Yにオーバーラップさせて配することにより、均一な深さの溝を板幅方向Yに一つ形成した場合と同様に鉄損を改善できる。
- [0045] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板1は、さらに以下の条件を満たすと、方向性電磁鋼板の鉄損をより改善できる。
- [0046] 板幅方向Yに隣り合う第一の溝31と第二の溝32との圧延方向Xの離間距離（図1に示す距離F1）は、圧延方向Xに隣り合う溝群30同士の圧延方向Xの離間距離（図1に示す距離F2）より小さく設定されている。板幅方向Yに設けられた複数の溝31、32、・・・、3nの溝群平均深さを D_A としたとき、第一溝長手投影線LWP1の第二溝端31bにおいて、鋼板表面2aから溝長手方向Lの輪郭までの板厚方向Zの深さが $0.05 \times D_A$ となる位置（第一溝長手投影線LWP1上の点）を第一の溝31の第二溝端31bの $0.05 D_A$ 位置（第2の点）と称する。同様に、第二溝長手投影線LWP2の第一溝端32aにおいて、鋼板表面2aから溝長手方向Lの輪郭までの板厚方向Zの深さが $0.05 \times D_A$ となる位置（第二溝長手投影線LWP2上の点）を第二の溝32の第一溝端32aの $0.05 D_A$ 位置（第1の点）と称する。第二の溝32の第一溝端32aの $0.05 D_A$ 位置（第二溝長手投影

線LWP2上の第1の点)と鋼板2の基準端部21aと間の距離は、第一の溝31の第二溝端31bの $0.05D_A$ 位置(第一溝長手投影線LWP1上の第2の点)と鋼板2の基準端部21aと間の距離よりも短くなるように、第一の溝31と第二の溝32とが配置される。耐錆性を向上させるために、溝長手方向Lの両端部に傾斜部5を形成した溝3であっても、複数の溝3を板幅方向Yに配置し、且つ隣り合う互いの溝31、32の両端部を板幅方向Yにオーバーラップさせることにより、各溝31、32、 $\dots$ 、3nの端部が浅くても、均一な深さの溝を板幅方向Yに一つ形成した場合と同様に鉄損を改善できる。

[0047] さらに、以下の条件を満たすと、方向性電磁鋼板1の鉄損をより改善できる。

第二の溝32の第一溝端32aと第一の溝31の第二溝端31bとの間のオーバーラップ領域Rに含まれる第一溝長手投影線LWP1上の任意の点をP1とし、オーバーラップ領域Rに含まれる第二溝長手投影線LWP2上の点のうち、基準端部21aからの距離が点P1と等しい点(つまり板幅方向Yの位置が点P1と同じ点)をP2とする。本実施形態では、オーバーラップ領域Rにおいて、第一の溝31の鋼板表面2aから第一溝長手投影線LWP1上の点P1までの板厚方向Zの深さと、第二の溝32の鋼板表面2aから第二溝長手投影線LWP2上の点P2までの板厚方向Zの深さとの合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上である。すなわち、点P1及びP2がオーバーラップ領域R内のどの位置に存在しようとも、上記の「合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上である」という条件が満たされる。図8及び図9に示すように、オーバーラップ領域Rにおいて、基準端部21aからの距離が等しい各点P(P1、P2)における第一の溝31の深さと第二の溝32の深さとを加算する。この点Pにおける第一の溝31の深さと第二の溝32の深さとの合計値が、板幅方向Yに形成された複数の溝の深さの溝群平均深さ D_A に対し、 $0.5 \times D_A$ 以上となるように溝3が配される。

[0048] 図8に、投影面に溝長手方向Lの輪郭を投影した溝長手投影線を座標上に

示す。図9は、第一の溝31の第一端31aから第二の溝32の第二溝端32bまでの領域の板幅方向Yの位置と合計溝深さとの関係を示したグラフである。溝長手投影線は直線に簡略化して示す。第一の溝31と第二の溝32とは、それぞれの溝端から上記実施形態で説明した底部4の領域まで互いにオーバーラップしている。

このため、図8に示すように、オーバーラップ領域Rでは、第一の溝31と第二の溝32との合計溝深さは、最大で板幅方向Yの溝群平均深さ D_A の略2倍となり、合計溝深さの最小値は板幅方向Yの溝群平均深さ D_A と略等しくなる。

[0049] 図8に示す例に比べ、隣り合う第一の溝31と第二の溝32とのオーバーラップ領域Rの幅が異なる例を図10及び図11に示す。図10に示す例の場合、第一の溝31と第二の溝32のそれぞれの傾斜部5の領域がオーバーラップする。すなわち、第一溝長手投影線LWP1と第二溝長手投影線LWP2とが、第一の溝31と第二の溝32のそれぞれの傾斜部5の位置において交差するようにオーバーラップしている。図11に示すように、オーバーラップ領域Rでは、基準端部21aからの距離が等しい各点P（P1、P2）における第一の溝31と第二の溝32との合計溝深さの最小値は、板幅方向Yの溝群平均深さ D_A より小さくなる。オーバーラップ領域Rの合計深さの最小値と、この溝群30を有する方向性電磁鋼板の到達鉄損とは相関関係がある。なお、第一の溝31と第二の溝32とが上記条件を満たすようにオーバーラップしていれば、溝31、32の溝端部における傾斜角度（第一角度 θ ）は、鉄損特性に影響しない。

[0050] すなわち、第一の溝31と第二の溝32とのオーバーラップ領域Rにおいて、第一の溝31と第二の溝32との深さの合計値が $0.5 \times D_A$ 以上であれば、オーバーラップ領域Rでは、オーバーラップしていない領域である底部4の深さに比べて遜色の無い深さを確保する。これにより、板幅方向Yにおいて、溝部分の深さの急激な減少による磁区細分化効果の低下を抑え、鉄損を改善させることができる。

[0051] より好ましくは、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 とのオーバーラップ領域 R において、板幅方向 Y 上の点 P (P 1、 P 2) における第一の溝 3 1 の深さと第二の溝 3 2 の深さとの合計が、板幅方向 Y に形成された複数の溝の深さの平均値 (溝群平均深さ) D_A に対し、 $0.7 \times D_A$ 以上となるように隣り合う溝が配されると、鉄損を改善するために望ましい板幅方向 Y における溝の深さ (オーバーラップ領域 R においては二つの溝 3 1、 3 2 の合計溝深さ) が十分に得られ、鉄損が改善できる。板幅方向 Y 上の点 P (P 1、 P 2) における第一の溝 3 1 の深さと第二の溝 3 2 の深さとの合計の上限値は制限がないが、磁束密度の低下を考慮すると、溝群平均深さ D_A の 2 倍以下であってもよい。また、板幅方向 Y 上の点 P (P 1、 P 2) における第一の溝 3 1 の深さと第二の溝 3 2 の深さとの合計が、溝群平均深さ D_A の 2 倍以下とすると、板幅方向 Y における溝の深さの変動量が小さく抑えられるので、より効果的に鉄損を安定して改善できる。

[0052] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、溝 3 の溝長手方向 L の両端部 (第一溝端 3 1 a、 3 2 a、第二溝端 3 1 b、 3 2 b) が鋼板表面 2 a に対して垂直であれば、理論上はオーバーラップ領域 R が無くても十分な鉄損が得られると考えられる。

但し、鋼板表面 2 a に対して垂直な端面を有する溝を確実に形成することは難しい場合がある。また、鋼板表面 2 a に対する深さが $10 \mu m$ を越える溝を形成する場合、溝 3 の端部の形状の変化が大きくなる傾向があり、溝 3 の形成後に、鋼板表面 2 a に電気絶縁性を与えるためのコーティングを行う際、溝 3 の端部の隅々までコート剤を塗布し難い場合がある。また、溝 3 の端部の形状が変化に富むために溝 3 の端部におけるコート剤の密着性も十分でない箇所が生じ、コート剤の均一な塗布が難しく耐錆性が課題となる場合がある。このような場合には、溝 3 の両端部に傾斜を付けてもよい。本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、溝 3 の溝長手方向 L の端部に傾斜面を形成することにより、溝 3 の端部の形状を安定させて耐錆性を向上させ、且つ、少なくとも溝 3 の端部の傾斜面を板幅方向 Y の第一溝長手投影線 LWP 1 及

び第二溝長手投影線LWP2においてオーバーラップさせることにより、鉄損と耐錆性とを良好に保つことができるため、好ましい。

[0053] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板1は、さらに、以下の条件を満たすと、耐錆性の向上と、鉄損の改善との両方を実現させることができる。

[0054] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板1に備える溝3は、図2に示すように、溝3の溝長手方向Lにおける溝端31a、31bにおいて、溝端直線3Eと鋼板表面2aとがなす角度（第一角度 θ ）と、溝平均深さDを平均溝幅Wで除したアスペクト比Aとの関係が以下の式（1）を満たすように、溝3の端部が傾斜している。

[0055] $\theta < -21 \times A + 77 \quad \dots (1)$

[0056] 傾斜部5の傾斜角度を示す第一角度 θ は、溝平均深さDを平均溝幅Wで除して得られるアスペクト比 $A = D/W$ に基づき規定される。一般に、溝平均深さDが大きいほど、溝深さに影響を受ける鉄損が改善し、平均溝幅Wが小さいほど、鋼部除去によって劣化する磁束密度の劣化量を小さく抑え、かつ鉄損を改善させることができる。すなわち、アスペクト比Aが大きいほど、磁気特性を好ましく制御できる。一方、アスペクト比Aが大きいほど、コーティング液が溝内部に浸入しにくくなるため、耐錆性が悪化する。特に、溝3の溝端部にて、耐錆性が悪化する。従って、磁気特性と耐錆性とを両立するためには、アスペクト比Aと第一角度 θ とを合わせて制御する必要がある。具体的には、溝3の第一角度 θ が上記式（1）の範囲を外れると、アスペクト比に対する溝3の溝端部の傾斜角度が大きいため、溝3の溝端部にてガラス皮膜または絶縁皮膜が溝3を被覆し難くなる。その結果、溝3の溝端部で錆が発生しやすくなる。

[0057] すなわち、錆の発生を抑えるために、溝平均深さDが深い程、溝端部における傾斜角度（第一角度 θ ）を小さくする必要がある。また、錆の発生を抑えるために、平均溝幅Wが狭いほど、溝端部における傾斜角度（第一角度 θ ）を小さくする必要がある。そして、溝平均深さDと平均溝幅Wと第一角度 θ との関係が式（1）を満足するとき、溝3において磁気特性改善と耐錆性

とが両立する効果を奏する。

[0058] なお、式（１）は、溝３の溝平均深さDが5 μ m以上の場合に好適な範囲である。溝３の溝平均深さDが5 μ m未満であると、溝３の端部の形状のばらつきが小さく、耐錆性の問題が生じ難い。その一方で、溝３の溝平均深さDが5 μ m未満であると、そもそも溝を形成することによる磁区の細分化が十分とならない場合がある。溝３の深さの上限は特に限定されない。しかし、方向性電磁鋼板の板厚方向Zの厚さに対して、溝３の溝平均深さDが30%以上となると、磁性材料である方向性電磁鋼板すなわち鋼板の量が低下し、磁束密度が低下する恐れがある。例えば、巻きトランス用途の方向性電磁鋼板の一般的な厚さが0.35mm以下である点を考慮すると、溝３の平均深さDの上限値は100 μ mとすればよい。溝３は、方向性電磁鋼板の片面のみに形成されていてもよく、両面に形成されていてもよい。

[0059] 上記式（１）に加えて、以下の式（２）を満たすと、錆の発生をより高精度に抑えることが可能となるため、好ましい。

$$[0060] \quad \theta < 32 \times A^2 - 55 \times A + 73 \quad \cdots (2)$$

[0061] さらに、溝平均深さDが15 μ m以上30 μ m以下の範囲である場合、溝３の溝端の第一角度 θ は、溝平均深さD及び平均溝幅Wに対して以下の式（３）を満たすと、耐錆性を向上させる点で、より好ましい。

$$[0062] \quad \theta \leq 0.12 \times W - 0.45 \times D + 57.39 \quad \cdots (3)$$

[0063] また、平均溝幅Wが30 μ mより大きく、100 μ m以下である場合、溝３の溝端の第一角度 θ は、溝平均深さD及び平均溝幅Wに対して以下の式（４）を満たすと、耐錆性を向上させる点で、より好ましい。

$$[0064] \quad \theta \leq -0.37 \times D + 0.12 \times W + 55.39 \quad \cdots (4)$$

[0065] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、溝平均深さDが15 μ m以上30 μ m以下であっても、第一角度 θ が上記式（３）を満たすように溝３を形成すれば、ガラス皮膜または絶縁皮膜がムラなく被覆可能であり、磁気特性と耐錆性とを両立させることができる。

同様に、平均溝幅Wが30 μ m超100 μ m以下であっても、第一角度 θ

が上記式（４）を満たせば、磁気特性と耐錆性とを両立できる。方向性電磁鋼板に複数の溝を形成する場合、全ての溝において、上述の条件を満たすと、高品質な方向性電磁鋼板が得られる。但し、溝の端部が方向性電磁鋼板の板幅方向Ｙの両端面に達している場合、その溝の端部では傾斜部が形成されないため、上述の条件が適用されないのは言うまでもない。

[0066] 溝３には、平均厚さが０以上５μm以下のガラス皮膜と、平均厚さが１μm以上５μm以下の絶縁皮膜とが配置されてもよい。また、鋼板表面２aには、平均厚さが０．５μm以上５μm以下のガラス皮膜と、平均厚さが１μm以上５μm以下の絶縁皮膜とが配置されてもよい。さらに、溝３におけるガラス皮膜の平均厚さが、鋼板表面２a上のガラス皮膜の平均厚さよりも薄くてもよい。

[0067] なお、溝３にガラス皮膜が存在しない構成（つまり溝３におけるガラス皮膜の平均厚さが０である構成）を採用することにより、対向する溝の壁間の距離（溝幅）をより狭くすることが可能となるので、溝３による磁区細分化効果（つまり異常渦電流損の低減効果）をより向上させることができる。

[0068] また、本実施形態では、ガラス皮膜が必須の構成要素ではない。したがって、鋼板２及び絶縁皮膜だけで構成された方向性電磁鋼板についても、上記実施形態を適用することにより、耐錆性向上の効果を得ることができる。鋼板２及び絶縁皮膜だけで構成された方向性電磁鋼板では、溝３に、平均厚さが１μm以上５μm以下の絶縁皮膜が形成され、鋼板表面２aに、平均厚さが１μm以上５μm以下の絶縁皮膜が形成されていてもよい。

[0069] 本実施形態では、鋼板２において、溝３に接する結晶粒（二次再結晶粒）の粒径が平均で５μm以上であることが好ましい。また、溝３に接する結晶粒の粒径の上限は特に限定されないが、この上限を $100 \times 10^3 \mu\text{m}$ 以下としてもよい。溝３の周辺に、溝３の形成に由来する溶融再凝固領域が存在する場合、溝３に接する結晶粒の粒径は微細となる。

この場合、最終的に結晶方位が $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位から逸脱する可能性が高くなり、好ましい磁気特性が得られなくなる可能性が高くなる。従

って、溝3の周辺には、溶融再凝固領域が存在しないことが好ましい。溝3の周辺に溶融再凝固領域が存在しない場合には、溝3に接する結晶粒（二次再結晶粒）の粒径が平均で $5\mu\text{m}$ 以上となる。また、溝3に接する結晶粒の粒径の上限は特に限定されないが、この上限を $100 \times 10^3\mu\text{m}$ 以下としてもよい。

[0070] なお、結晶粒の粒径は、円相当径を意味する。結晶粒の粒径は、例えばASTM E112などの一般的な結晶粒径測定法によって求めればよく、またはEBSD (Electron Back Scattering Diffraction Pattern) 法によって求めてもよい。また、溝3に接する結晶粒は、上記の溝短手断面または板厚方向Zに垂直な断面にて観察すればよい。上記の溶融再凝固領域を有さない溝は、例えば、後述の製造方法によって得ることが可能である。

[0071] 特に、溝短手断面で溝3を見た場合に、鋼板2における溝3の下部に存在する結晶粒（二次再結晶粒）の板厚方向粒径が $5\mu\text{m}$ 以上且つ鋼板2の板厚以下であることが好ましい。この特徴は、鋼板2における溝3の下部に、結晶粒の板厚方向粒径が $1\mu\text{m}$ 程度の微細粒層（溶融再凝固領域）が存在しないことを意味する。

[0072] 次に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板1の製造方法を説明する。図12は、方向性電磁鋼板1の製造プロセスを示すフローチャートである。図12に示すように、最初の鑄造工程S01では、質量分率で、Si: 0.8%~7%、C: 0%超~0.085%、酸可溶性Al: 0%~0.065%、N: 0%~0.012%、Mn: 0%~1%、Cr: 0%~0.3%、Cu: 0%~0.4%、P: 0%~0.5%、Sn: 0%~0.3%、Sb: 0%~0.3%、Ni: 0%~1%、S: 0%~0.015%、Se: 0%~0.015%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる化学成分を有する溶鋼が連続鑄造機に供給されて、スラブが連続的に製出される。続いて、熱間圧延工程S02では、鑄造工程S01から得られたスラブに対して、所定の温度条件（例えば $1150 \sim 1400^\circ\text{C}$ ）で加熱された後、そのスラブに対

して熱間圧延が実施される。これにより、例えば、1.8～3.5 mmの厚さを有する熱延鋼板が得られる。

[0073] 続いて、焼鈍工程S03では、熱間圧延工程S02から得られた熱延鋼板に対して、所定の温度条件（例えば750～1200℃で30秒～10分間加熱するという条件）の下で焼鈍処理が実施される。

[0074] 続いて、冷間圧延工程S04では、焼鈍工程S03にて焼鈍処理が実施された熱延鋼板の表面に必要な応じて酸洗処理が実施された後、熱延鋼板に対して冷間圧延が実施される。これにより、例えば、0.15～0.35 mmの厚さを有する冷延鋼板が得られる。

[0075] 続いて、脱炭焼鈍工程S05では、冷間圧延工程S04から得られた冷延鋼板に対して、所定の温度条件（例えば700～900℃で1～3分間加熱するという条件）で且つ湿潤雰囲気中で熱処理（すなわち、脱炭焼鈍処理）が実施される。このような脱炭焼鈍処理が実施されると、冷延鋼板において、炭素が所定量以下に低減され、一次再結晶組織が形成される。また、脱炭焼鈍工程S05では、冷延鋼板の表面に、シリカ（ SiO_2 ）を主成分として含有する酸化物層が形成される。

[0076] 続いて、焼鈍分離剤塗布工程S06では、マグネシア（ MgO ）を主成分として含有する焼鈍分離剤が、冷延鋼板の表面（酸化物層の表面）に塗布される。続いて、仕上焼鈍工程S07では、焼鈍分離剤が塗布された冷延鋼板に対して、所定の温度条件（例えば1100～1300℃で20～24時間加熱するという条件）の下で熱処理（すなわち、仕上焼鈍処理）が実施される。このような仕上焼鈍処理が実施されると、二次再結晶が冷延鋼板に生じるとともに、冷延鋼板が純化される。その結果、上述の鋼板2の化学組成を有し、結晶粒の磁化容易軸と圧延方向Xとが一致するように結晶方位が制御された冷延鋼板（つまり方向性電磁鋼板1の溝3を形成する前の状態の鋼板2）が得られる。

[0077] また、上記のような仕上焼鈍処理が実施されると、シリカを主成分として含有する酸化物層が、マグネシアを主成分として含有する焼鈍分離剤と反応

して、鋼板 2 の表面にフォルステライト (Mg_2SiO_4) 等の複合酸化物を含むガラス皮膜 (不図示) が形成される。仕上焼鈍工程 S 0 7 では、鋼板 2 がコイル状に巻かれた状態で仕上焼鈍処理が実施される。仕上焼鈍処理中に鋼板 2 の表面にガラス皮膜が形成されることにより、コイル状に巻かれた鋼板 2 に焼き付きが発生することを防止することができる。

[0078] 絶縁皮膜形成工程 S 0 8 では、鋼板表面 2 a に対して、例えばコロイダルシリカ及びリン酸塩を含有する絶縁コーティング液が、ガラス皮膜の上から塗布される。その後、所定の温度条件 (例えば $840 \sim 920^{\circ}C$) の下で熱処理が実施されることにより、ガラス皮膜の表面に絶縁皮膜が形成される。

[0079] 続いて、溝加工工程 S 0 9 では、ガラス皮膜及び絶縁皮膜が形成された鋼板表面 2 a に、溝 3 を形成する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、レーザ法、プレス機械法、エッチング法等の方法により溝を形成することができる。以下、溝形成工程 S 0 9 において、レーザ法、プレス機械法、エッチング法等を用いた場合の溝 3 の形成方法を説明する。

[0080] (レーザ法による溝の形成方法)

レーザ法により溝を形成する方法について説明する。

溝加工工程 S 0 9 では、ガラス皮膜が形成された鋼板の表面 (片面のみ) に対してレーザ光を照射することにより、鋼板 2 の表面に、圧延方向 X に交差する方向に延びる複数の溝 3 が、圧延方向 X に所定間隔で形成される。

[0081] 図 1 2 に示すように、溝加工工程 S 0 9 では、レーザ光源 (図示省略) から出射されたレーザ光 Y L が、光ファイバ 9 を介してレーザ照射装置 1 0 に伝送される。レーザ照射装置 1 0 は、ポリゴンミラーとその回転駆動装置 (ともに図示省略) を内蔵している。レーザ照射装置 1 0 は、ポリゴンミラーの回転駆動によって、レーザ光 Y L を鋼板 2 の表面に向けて照射すると共に、レーザ光 Y L を鋼板 2 の板幅方向 Y と略平行に走査する。

[0082] レーザ光 Y L の照射と同時に、空気又は不活性ガス等のアシストガス 2 5 が、レーザ光 Y L が照射される鋼板 2 の部位に吹き付けられる。不活性ガスは、例えば、窒素又はアルゴン等である。アシストガス 2 5 は、レーザ照射

によって鋼板 2 から溶融又は蒸発した成分を除去する役割を担っている。アシストガス 25 の吹き付けにより、レーザ光 Y L が安定的に鋼板 2 に到達するため、溝 3 が安定的に形成される。また、アシストガス 25 の吹き付けにより、上記成分が鋼板 2 に付着することを抑制することができる。以上の結果、レーザ光 Y L の走査ラインに沿って溝 3 が形成される。

[0083] 鋼板 2 が圧延方向 X と一致する通板方向に沿って搬送されながら、鋼板 2 の表面に対してレーザ光 Y L が照射される。ここで、溝 3 が圧延方向 X に沿って所定の間隔 P L で形成されるように、ポリゴンミラーの回転速度は、鋼板 2 の搬送速度に対して同期制御される。その結果、図 13 に示すように、鋼板 2 の表面に、圧延方向 X と交差する複数の溝 3 が、圧延方向 X に沿って所定間隔 P L で形成される。

[0084] レーザ光源としては、例えばファイバレーザを用いることができる。Y A G レーザ、半導体レーザ、または C O₂ レーザ等の一般的に工業用に用いられる高出力レーザをレーザ光源として使用してもよい。また、溝 3 を安定的に形成することができさえすれば、パルスレーザ、または連続波レーザをレーザ光源として使用してもよい。レーザ光 Y L の照射条件として、例えば、レーザ出力を 200 W ~ 2000 W に、レーザ光 Y L の圧延方向 X における集光スポット径（すなわちレーザ出力の 86 % を含む直径、以下、86 % 径と省略記載）を 10 μ m ~ 1000 μ m に、レーザ光 Y L の板幅方向 Y における集光スポット径（86 % 径）を 10 μ m ~ 4000 μ m に、レーザ走査速度を 1 m / s ~ 100 m / s に、レーザ走査ピッチ（間隔 P L）を 4 mm ~ 10 mm に設定することが好ましい。

[0085] 図 14 に示すように、本実施形態の溝加工工程 S09 では、圧延方向 X に平行な通板方向 T D に沿って搬送される鋼板 2 を平面視したとき、レーザ光 Y L のレーザ走査方向 S D（板幅方向 Y に平行な方向）に対して角度 $\theta 2$ の傾きを持つ方向から、レーザ光 Y L を追従するようにアシストガス 25 が噴射される。また、図 15 に示すように、通板方向 T D に沿って搬送される鋼板 2 を板幅方向 Y（レーザ走査方向 S D）から視たとき、鋼板表面 2 a に対

して角度 $\theta 3$ の傾きを持つ方向から、レーザ光 $Y L$ を追従するようにアシストガス 25 が噴射される。角度 $\theta 2$ は、 90° 以上 180° 以下の範囲で設定されることが好ましく、角度 $\theta 3$ は、 1° 以上 85° 以下の範囲で設定されることが好ましい。また、アシストガス 25 の流量を、毎分 $10 \sim 1000$ リットルの範囲で設定することが好ましい。

さらに、鋼板 2 の通板雰囲気中存在する、 $0.5 \mu m$ 以上の径を有する粒子の数量が、 $1 CF$ (キュービックフィート) 当たり 10 個以上 10000 個未満となるように雰囲気制御を行うことが好ましい。

[0086] 方向性電磁鋼板の全幅にわたるレーザビームの走査は、図 13 に示すように 1 台の走査装置により行われてもよく、図 16 に示すように複数台の走査装置により行われてもよい。光源が 1 台の場合、この光源から出射されたレーザビームを分割してレーザビームとすればよい。複数台のレーザ照射装置 10 を用いる場合、図 16 に示すように、複数台のレーザ照射装置 10 は、圧延方向 X に沿って所定間隔で配置される。また、圧延方向 X から見たときに、各レーザ照射装置 10 のレーザ走査ラインが互いに重ならないように、各レーザ照射装置 10 の板幅方向 Y における位置が設定されている。

[0087] このようなレーザ照射方法を採用することで、複数の溝 3 を鋼板表面 $2a$ に形成することができる。複数台の走査装置を用いることで、板幅方向 Y に照射領域を複数に分割することが可能となるため、レーザビーム 1 本当たりに要する走査及び照射の時間が短縮される。従って、特に高速の通板設備に適している。複数台の走査装置が用いられる場合、各走査装置に入射してくるレーザビームの光源であるレーザ装置は 1 台のみ設けられていてもよく、走査装置毎に 1 台ずつ設けられていてもよい。

[0088] ミラーの一面によりレーザビームが方向性電磁鋼板上に走査されて、方向性電磁鋼板上に所定の長さ (例えば、 $300 mm$) の溝が略幅方向に形成される。圧延方向 X に隣接する溝の間隔、すなわち圧延方向 X (搬送方向) の照射ピッチ PL は、ライン速度 VL 及び照射速度の調整により変更可能である。このように、レーザ照射装置を用いて、方向性電磁鋼板にレーザビーム

を照射して圧延方向Xに一定の走査間隔PL（照射ピッチ、溝間隔）で溝を形成する。すなわち、方向性電磁鋼板の表面にレーザビームを集光して走査しながら照射して、方向性電磁鋼板の搬送方向に略垂直な方向（搬送方向と交差する方向、搬送方向に垂直なベクトルを含む方向）に延在する所定の長さの溝を搬送方向に所定の間隔で形成する。溝3は、例えば、方向性電磁鋼板の搬送方向に略垂直な方向に対しプラス45°からマイナス45°の範囲内で形成される。

[0089] スキャン両端部では、ミラーの動作と同期させてレーザの出力を時間変化させることで溝3の深さを変化させて、溝3の端部31a、31bを傾斜させる。すなわち、図17に示すように、スキャン方向において、溝3の端部となる位置でレーザの出力が変化するように設定する。例えば、溝3の溝幅が100μm、溝深さが20μm、照射ピッチ3mm、鋼板上でのスキャン速度が30m/sの場合、溝端部の第一角度θを60°以下とするためには、一つの溝の形成開始時と形成終了時において、レーザの出力に変化を与える時間ΔTを0.0004ms以上とする。これにより、溝3の溝長手方向Lの端部において上述の第一角度θで傾斜した溝3が形成される。

[0090] レーザビームの照射は、例えば、図13に示すように、光源であるレーザ装置から出射されたレーザビームを、走査装置が、方向性電磁鋼板の圧延方向Xにほぼ垂直な板幅方向Yに所定の間隔PLで走査することにより行われる。この際、空気又は不活性ガス等のアシストガスが方向性電磁鋼板のレーザビームが照射される部位に吹き付けられる。これらの結果、方向性電磁鋼板の表面のレーザビームが照射された部分に溝が形成される。圧延方向Xは通板方向と一致している。

[0091] レーザビームの照射を行う際の方向性電磁鋼板の温度は特に限定しない。例えば、室温程度の方向性電磁鋼板に対してレーザビームの照射を行うことができる。レーザビームを走査する方向は板幅方向Yと一致している必要はない。しかし、作業効率等の観点及び圧延方向Xに長い短冊状に磁区を細分する点から、走査方向と板幅方向Yとがなす角は0°～90°の範囲であり

、 45° 以内であることが好ましい。走査方向と板幅方向 Y とがなす角は 20° 以内であることがより好ましく、 10° 以内であることが更に一層好ましい。

[0092] (プレス機械法による溝の形成方法)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 の溝 3 をプレス機械法により製造する方法について説明する。プレス機械法により方向性電磁鋼板に溝 3 を形成する場合、溝 3 の形状に対応させた歯型を用いて公知のプレス機械方法により溝を形成する。すなわち、歯型の長さ方向における端部に第一角度 θ と同じ角度の傾斜部を形成した歯型を用いて溝 3 が形成される。

[0093] (電解エッチング法による溝の形成方法)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 の溝を電解エッチング法により製造する方法について説明する。

絶縁皮膜形成工程 S 0 8 後の方向性電磁鋼板 1 の表面に、溝の形状に対応する部分を開口させたエッチングレジスト層を印刷等により形成する。エッチングレジスト層の開口は、溝端部に対応する箇所では、溝長手方向 L の中央部に比べて両端部の開口幅が狭くなるように短手方向の開口幅が徐々に小さくなるように傾斜したエッチングレジストを形成する。例えば、溝平均深さ D が $20\mu\text{m}$ 、溝短手方向 Q の溝幅が $50\mu\text{m}$ 、且つ第一角度 θ を 55° 以下にするためには、エッチングレジストの開口は、溝短手方向 Q の開口幅を $100\mu\text{m}$ 以上に設定し、溝端部に対応して傾斜する箇所の溝長手方向 L の長さが $14\mu\text{m}$ となるように形成される。この結果、エッチングレジストの開口幅が狭く設定された溝端部には傾斜部 5 が形成される。その後、エッチング液 (NaCl 等) を用いて、液温 30°C で 20 秒エッチング処理を施す。続いて、方向性電磁鋼板からエッチングレジストを剥離することにより、鋼板表面 2 a に溝 3 を形成する。

[0094] 溝加工工程 S 0 9 で溝 3 を形成した後、再度、上記絶縁皮膜形成工程と同様の処理を行う (再絶縁皮膜形成工程 S 1 0)。得られる絶縁皮膜の厚さは、 $2\sim 3\mu\text{m}$ である。以上により本実施の形態に係る方向性電磁鋼板が得ら

れる。

[0095] 上記のように製造された方向性電磁鋼板 1 の鋼板 2 は、化学成分として、質量分率で、S i : 0.8%~7%、C : 0%超~0.085%、酸可溶性 A l : 0%~0.065%、N : 0%~0.012%、M n : 0%~1%、C r : 0%~0.3%、C u : 0%~0.4%、P : 0%~0.5%、S n : 0%~0.3%、S b : 0%~0.3%、N i : 0%~1%、S : 0%~0.015%、S e : 0%~0.015%、を含有し、残部が F e 及び不純物からなる。

[0096] なお、上記実施形態では、鋼板表面 2 a に絶縁皮膜が形成された後に、レーザー照射によって鋼板表面 2 a に溝 3 を形成するという製造プロセスを採用する場合を例示した。この場合、レーザー照射直後の溝 3 は外部に露出しているので、溝 3 の形成後に、再度、絶縁皮膜を鋼板 2 上に形成する必要がある。ただし、本実施形態では、鋼板表面 2 a に絶縁皮膜が形成される前に、鋼板表面 2 a に向けてレーザー光 Y L を照射することにより、鋼板表面 2 a に溝 3 を形成し、その後に、絶縁皮膜を鋼板 2 上に形成するという製造プロセスを採用してもよい。または、本実施形態では、鋼板 2 に溝 3 が形成された後に、ガラス皮膜または絶縁皮膜が形成されてもよい。

[0097] 従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板には、二次再結晶のための高温焼鈍が完了し且つガラス皮膜及び絶縁皮膜のコーティングが完了した方向性電磁鋼板 1 が含まれるが、同様に、ガラス皮膜及び絶縁皮膜のコーティングが完了する前の方向性電磁鋼板も含まれる。すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板を用いて、後工程として、ガラス皮膜及び絶縁皮膜の形成を行うことで最終製品を得てもよい。なお、上記したように、上記の皮膜除去方法を行った場合、ガラス皮膜または絶縁皮膜を除去した後の溝 3 の形状や粗さは、ガラス皮膜または絶縁皮膜を形成する前と同等であることが確認されている。

[0098] なお、上記実施形態では、仕上焼鈍工程 S 0 7 の後に溝加工工程（レーザー照射工程）S 0 9 を実施する場合を例示したが、冷間圧延工程 S 0 4 と脱炭

焼鈍工程 S O 5 との間に溝加工工程を実施してもよい。すなわち、冷間圧延工程 S O 4 から得られる冷延鋼板に対してレーザ照射及びアシストガス噴射を行うことにより、冷延鋼板の鋼板表面 2 a に溝 3 を形成した後、その冷延鋼板に対して脱炭焼鈍を実施してもよい。

[0099] 本実施形態では、溝 3 の延在方向である溝長手方向 L が、圧延方向 X 及び板幅方向 Y に対して交差する方向である例を示した。しかし、本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 の溝 3 の延在方向は、これに限定されない。例えば、溝 3 の溝長手方向 L が圧延方向 X に略直交していても、磁気特性改善と耐錆性とを両立させることができる。

[0100] 本実施形態では、上述の特徴を有する溝形状とすることにより、鋼板表面 2 a に $15\ \mu\text{m}$ 以上の深さの溝 3 において耐錆性を向上させることができる。したがって、方向性電磁鋼板 1 に形成される溝 3 の数は特に限定されない。例えば、板幅方向 Y 及び圧延方向 X に複数の溝 3 を形成してもよい。

[0101] 本実施形態では、平面視したときの溝 3 の形状（溝 3 と鋼板表面 2 a との境界部分の形状）が長楕円である例を図示した。しかし、方向性電磁鋼板 1 の溝 3 の形状はこれに限定されない。例えば、溝 3 は、溝長手方向 L の端部に傾斜部を有し、上記の式（1）の関係を満たしさえすれば、どのような形状でもよい。

[0102] 図 3 では、溝短手方向 Q から見た溝 3 の形状が、溝短手方向 Q にて溝幅中心を基準として非対称形状である例を示した。しかし、溝 3 の形状はこれに限定されない。

[0103] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、溝平均深さ D が $10\ \mu\text{m}$ 以上 $50\ \mu\text{m}$ 以下の場合により効果を奏する。

[0104] 本実施形態では、溝 3 の延在方向である溝長手方向 L が、圧延方向 X 及び板幅方向 Y に対して交差する方向である例を示したがこれに限定されず、溝 3 は圧延方向 X と交差する方向に延在する構成であればよい。例えば、溝 3 の延在方向が圧延方向 X に略直交する方向であっても溝 3 の耐錆性を抑えることができる。

[0105] さらに、本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、上記のように板幅方向 Y の複数の溝同士にオーバーラップ領域を設けることにより、傾斜面を有する溝 3 1、3 2、・・・、3 n を用いても、鉄損を低く抑えることができる。すなわち、本実施形態の方向性電磁鋼板 1 のように、耐錆性を向上させるために溝長手方向 L の両端部に傾斜面を形成した溝 3 であっても、複数の溝 3 を板幅方向 Y に配置し、且つ互いに隣り合う溝 3 の両端部を板幅方向 Y にオーバーラップさせることにより、各溝 3 1、3 2、・・・、3 n の端部が浅くても、均一な深さの溝 3 を板幅方向 Y に一つ形成した場合と同様に鉄損を改善できる。

[0106] (変形例)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 の変形例を示す。本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、別の観点から以下の様に規定することもできる。

図 19 に示すように、上記投影面に投影された第一の溝 3 1 の輪郭である第一溝長手投影線 LWP 1 の鋼板表面 2 a から板厚方向 Z に向かう深さの平均値を単位 μm で第一溝平均深さ D_I とする。投影面に投影された第二の溝 3 2 の輪郭である第二溝長手投影線 LWP 2 の鋼板表面 2 a から板厚方向 Z に向かう深さの平均値を単位 μm で第二溝平均深さ D_{II} とする。本変形例に係る方向性電磁鋼板 1 の上記オーバーラップ領域 R は、上記投影面にて、第二溝長手投影線 LWP 2 の第一溝端 3 2 a における鋼板表面 2 a から板厚方向 Z に向かって深さが $0.05 \times D_{II}$ となる点（第 3 の点）と、第一溝長手投影線 LWP 1 の第二溝端 3 1 b における鋼板表面 2 a から板厚方向 Z に向かって深さが $0.05 \times D_I$ となる点（第 4 の点）との間の距離としても規定できる。

[0107] 方向性電磁鋼板 1 において、複数の溝 3 が互いに板幅方向 Y にオーバーラップするように各溝 3 を形成することにより、各溝 3 が傾斜部 5 を有していても、鉄損を低く抑えることができる。すなわち、耐錆性を向上させるために溝長手方向 L の両端部に傾斜部 5 を形成した溝 3 であっても、複数の溝 3 を板幅方向 Y に配置し、且つ互いに隣り合う溝 3 の両端部を板幅方向 Y にオ

オーバーラップさせることにより、均一な深さの溝3を板幅方向Yに一つ形成した場合と同様に鉄損を改善できる。

[0108] 本変形例に係る方向性電磁鋼板1は、さらに以下の条件を満たすと、鉄損をより好ましく改善できる。具体的には、上記投影面にて、第二溝長手投影線LWP2上の上記第3の点と基準端部21aとの間の距離Laが、第一溝長手投影線LWP1上の上記第4の点と基準端部21aとの間の距離Lbよりも短い。この結果、確実に隣り合う互いの溝3の両端部を板幅方向Yにオーバーラップさせることができるので、鉄損を好ましく改善できる。

[0109] 本変形例に係る方向性電磁鋼板1は、さらに以下の条件を満たすと、鉄損をより好ましく改善できる。具体的には、上記投影面にて、オーバーラップ領域R内で板厚方向Zに平行となる基準線を設定し、オーバーラップ領域R内の何れの基準線上でも、第一溝長手投影線LWP1の鋼板表面2aから板厚方向Zに向かう深さと、第二溝長手投影線LWP2の鋼板表面2aから板厚方向Zに向かう深さとの合計深さが、単位 μm で、 $0.25 \times (D_I + D_{II})$ 以上である。このとき($D_I = D_{II} = D_A$ の場合には $0.5 \times D_A$ 以上であるとき)、確実に互いに隣り合う溝3の両端部を板幅方向Yにオーバーラップさせることができるので、鉄損を好ましく改善できる。言い換えれば、オーバーラップ領域Rで、第一溝長手投影線LWP1および第二溝長手投影線LWP2の合計深さが、 $0.25 \times (D_I + D_{II})$ 以上であるとき($D_I = D_{II} = D_A$ の場合には $0.5 \times D_A$ 以上であるとき)、上記のように鉄損を好ましく改善できる。上記の合計深さを $0.35 \times (D_I + D_{II})$ 以上とすることが好ましく、上記の合計深さを $0.45 \times (D_I + D_{II})$ 以上とすることがより好ましい。

[0110] 第一溝長手投影線LWP1の第二溝端31bにおける鋼板表面2aから板厚方向Zに向かって深さが $0.95 \times D_I$ となる点を第5の点とし、第二溝長手投影線LWP2の第一溝端32aにおける鋼板表面2aから板厚方向Zに向かって深さが $0.95 \times D_{II}$ となる点を第6の点とする。第一溝長手投影線LWP1上の上記第5の点と基準端部との間の距離Lcは、第二溝長手投影線LWP2上の上記第6の点と基準端部21aとの間の距離Ldより短くて

もよい。この結果、溝 3 の形成によって除去される鋼部を低減することができるので、磁束密度の劣化量を小さく抑えてかつ鉄損を改善させることができる。また、第一溝長手投影線 LWP 1 の上記距離 L_c が、第二溝長手投影線 LWP 2 の上記距離 L_a より短くなるように溝同士がオーバーラップしても同様の効果を奏する。

[0111] 図 19 から図 21 に、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 とのオーバーラップ領域 R の幅が異なる例を示す。具体的には、図 19 には、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 とが、それぞれの傾斜部 5 及び第一の溝 3 1 の底部 4 a の一部と第二の溝 3 2 の底部 4 b の一部とがオーバーラップしている例を示す。図 20 には、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 とが、それぞれの傾斜部 5 の大部分が互いにオーバーラップする例を示す。すなわち、図 20 に示す例は、第一溝長手投影線 LWP 1 と第二溝長手投影線 LWP 2 とが、それぞれの傾斜部 5 にて交差するようにオーバーラップしている。図 21 には、図 20 と同様に第一溝長手投影線 LWP 1 と第二溝長手投影線 LWP 2 とが、それぞれの傾斜部 5 にて交差し、且つ、第一溝長手投影線 LWP 1 の上記距離 L_c が、第二溝長手投影線 LWP 2 の上記距離 L_a より短くなるように溝同士がオーバーラップする例を示す。また、図 22 に、図 21 に示した第一溝長手投影線 LWP 1 および第二溝長手投影線 LWP 2 の合計深さのプロファイルを示す。図 22 に示すように、図 21 に示す例のオーバーラップ領域 R では、基準端部 2 1 a からの距離が等しい各点 P における第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 との合計溝深さの最小値は、 $0.5 \times (D_I + D_{II})$ より小さくなる ($D_I = D_{II} = D_A$ の場合には溝群平均深さ D_A より小さくなる)。オーバーラップ領域 R での合計深さの最小値と、溝群 3 0 を有する方向性電磁鋼板 1 の鉄損特性との間には、相関関係がある。なお、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 とが上記条件を満たすようにオーバーラップしていれば、溝端部における傾斜角度（第一角度 θ ）は、鉄損特性に影響しない。

[0112] すなわち、オーバーラップ領域 R で、第一の溝 3 1 と第二の溝 3 2 との合計溝深さが、オーバーラップしていない領域の深さに比べて遜色の無い深さ

であるとき ($0.25 \times (D_I + D_{II})$ 以上であるとき)、溝深さの急激な減少による磁区細分化効果の低下を抑え、鉄損を改善させることができる。

[0113] オーバーラップ領域 R では、第一の溝 31 と第二の溝 32 との合計溝深さは、最大で $D_I + D_{II}$ となる ($D_I = D_{II} = D_A$ の場合には溝群平均深さ D_A の 2 倍となる)。また、上記のように、合計溝深さは、最小でも $0.25 \times (D_I + D_{II})$ となる ($D_I = D_{II} = D_A$ の場合には $0.5 \times D_A$ となる) ことが好ましい。第一の溝 31 及び第二の溝 32 の合計溝深さの上限値は特に制限されないが、上述のように、最大で $D_I + D_{II}$ となる。なお、第一の溝 31 及び第二の溝 32 の合計溝深さを、 $0.75 \times (D_I + D_{II})$ 以下、 $0.65 \times (D_I + D_{II})$ 以下とすると、合計溝深さの変動量が小さく抑えられるので、より効果的に鉄損を安定して改善できる。これらの点は図 21 に示した方向性電磁鋼板の例でも同様である。

実施例

[0114] 以下、実施例により本発明の一態様の効果を更に具体的に説明するが、実施例での条件は、本発明の実施可能性及び効果を確認するために採用した一条件例であり、本発明は、この一条件例に限定されない。本発明は、本発明の要旨を逸脱せず、本発明の目的を達成する限り、種々の条件を採用し得る。

[0115] 質量分率で、Si : 3.0%、酸可溶性 Al : 0.05%、C : 0.08%、N : 0.01%、Mn : 0.12%、Cr : 0.05%、Cu : 0.04%、P : 0.01%、Sn : 0.02%、Sb : 0.01%、Ni : 0.005%、S : 0.007%、Se : 0.001%、を含有し、残部が Fe 及び不純物からなる化学成分を有するスラブを準備した。このスラブに対して、熱間圧延工程 S02 を実施し、2.3mm の厚さを有する熱間圧延材を作製した。

[0116] 次に、熱間圧延材に対して、温度 1000°C で 1 分間の条件で熱処理を行った (焼鈍工程 S03)。熱処理後に酸洗処理を施した上で冷間圧延を実施し (冷間圧延工程 S04)、0.23mm の厚さを有する冷間圧延材を作製

した。

[0117] この冷間圧延材に対して、温度 800°C で2分間の条件で脱炭焼鈍を実施した（脱炭焼鈍工程S05）。

脱炭焼鈍後の冷間圧延材の両面に、マグネシアを主成分とする焼鈍分離剤を塗布した（焼鈍分離剤塗布工程S06）。焼鈍分離剤を塗布した冷間圧延材をコイル状に巻き取った状態で炉に装入し、温度 1200°C で20時間最終仕上焼鈍工程S07を実施し、表面にガラス皮膜が形成された鋼板地鉄を作製した。

[0118] 次に、ガラス皮膜の上に、リン酸アルミニウムを主成分とする絶縁材を塗布し、温度 850°C 、1分間で焼き付けを行い、絶縁皮膜を形成した（絶縁皮膜形成工程S08）。

続いて、レーザ法を用いて、レーザ走査ピッチ（間隔PL）は 3 mm に設定し、ビーム径は圧延方向Xに 0.1 mm 、スキャン方向に 0.3 mm 、スキャン速度 30 m/s に設定し、溝平均深さDが $20\text{ }\mu\text{ m}$ 、平均溝幅Wが $100\text{ }\mu\text{ m}$ 、アスペクト比0.2、第一角度 θ が 60° の各溝31、32、 $\dots$ 、3nを鋼板表面2aの板幅方向Yに複数形成した（溝加工工程S09）。溝加工工程S09後、再度リン酸アルミニウムを主成分とする絶縁材を塗布し、温度 850°C 、1分間で焼き付けを行い、絶縁皮膜を形成し（再絶縁皮膜形成工程S10）、方向性電磁鋼板を得た。

[0119] 最終的に得られた上記方向性電磁鋼板中の鋼板（溝が形成された鋼板）は、主にSi：3.0%含有していた。

[0120] 各溝31、32、 $\dots$ 、3nは、板幅方向Yに対する傾斜角度 θ_4 が 15° 、溝31の溝端31aと溝端31bとを結ぶ線と、溝31の隣に位置する溝32の溝端32aと溝端32bとを結ぶ線同士の間隔距離Gが 1 mm とし、 3 mm オーバーラップさせ、第一の溝31の第二溝端32bと、第二の溝32の第一溝端32aとは、第一の溝31の第二溝端32bと、第二の溝32の第一溝端32aとを結ぶ線分mの長さが約 3.4 mm 、線分mの板幅方向Yに対する角度 θ_5 が約 150° となるように、複数配置した（図

18参照)。実施例1の方向性電磁鋼板100の投影面における溝長手投影線LWPにおいて、第二の溝32の第一溝端32aは、第一の溝31の第二溝端31bよりも基準端部21a側に位置し、オーバーラップ領域Rを有する。実施例1の溝群平均深さ D_A は $20\mu\text{m}$ であり、オーバーラップ領域R内における合計溝深さの最小値は $20\mu\text{m}$ であり、 $0.5 \times D_A$ 以上であった。さらに、この板幅方向Yに複数配置した溝を、圧延方向Xに 3mm のピッチで離間させて連続して形成した。

[0121] 実施例1と合計溝深さの最小値が異なる実施例2～実施例4を用意した。すなわち、実施例2は、オーバーラップ領域Rにおける合計溝深さの最小値が $10\mu\text{m}$ であり、実施例3は、同最小値が $15\mu\text{m}$ であり、実施例4は同最小値が $25\mu\text{m}$ の例である。

[0122] (比較例1)

比較例1では、実施例1の方向性電磁鋼板100と同じ形状の溝をオーバーラップ領域Rが無いように配した方向性電磁鋼板を用意した。すなわち、溝平均深さDが $20\mu\text{m}$ 、平均溝幅Wが $100\mu\text{m}$ 、アスペクト比0.2、第一角度 θ が 60° の溝を板幅方向Yに対し複数配したが、比較例1の方向性電磁鋼板の投影面における溝長手投影線では、オーバーラップ領域Rが形成されないように配した。溝長手投影線において、第一の溝31の第二溝端31bは、第二の溝32の第一溝端32aよりも基準端部21a側に位置し、第二の溝32の第一溝端32aと第一の溝31の第二溝端31bとを結ぶ線分の傾斜角度は、溝長手方向Lに対し直角かつ板幅方向Yに対し 75° となるように配した。すなわち、合計溝深さの最小値は $0\mu\text{m}$ である。

[0123] (比較例2)

比較例2では、実施例1と同様に溝をオーバーラップさせて配置しているが、オーバーラップ領域R内における合計溝深さの最小値が、 $0.5 \times D_A$ 未満の方向性電磁鋼板を用意した。すなわち、比較例2として、溝群平均深さ D_A が $20\mu\text{m}$ であり、オーバーラップ領域R内における合計溝深さの最小値が $5\mu\text{m}$ である方向性電磁鋼板を用意した。

- [0124] 実施例 1 ～ 4 及び比較例 1、2 の各方向性電磁鋼板から溝を一つ以上含む 600 mm 角の試験片を 30 枚用意した。
- [0125] 上記輪郭の特定方法に基づき、実施例 1 及び比較例 1、2 の溝の輪郭を特定した。まず、非接触レーザ距離計（キーエンス社製 VK-9700）を用いて、各実施例及び比較例の溝に対し、溝長手方向 L の 10 本の直線 $L_1 \sim L_{10}$ 上の二次元高さ分布を測定した。測定結果に基づき、溝の溝長手断面の輪郭をそれぞれ 10 パターン得た。10 パターンの溝長手断面の輪郭から、それぞれ溝平均深さ D を算出し、溝平均深さ D が最も深かった溝長手断面の輪郭を、代表パターンとして抽出した。代表パターンの溝平均深さ D を表 1 の溝深さ D に示す。
- [0126] 実施例 1 の複数の溝群 30 について、それぞれ、溝群平均深さ D_A 、オーバーラップ領域 R における各点の合計溝深さを測定した。その結果、実施例 1 の溝群平均深さ D_A は $20 \mu\text{m}$ であり、オーバーラップ領域 R 内における合計溝深さの最小値は $20 \mu\text{m}$ であり、全て $0.5 \times D_A$ 以上であった。オーバーラップ領域 R の合計溝深さの最小値と到達鉄損には相関があり、実施例 1 では合計深さの最小値が $10 \mu\text{m}$ 以上となるようにオーバーラップ領域 R を形成すると、到達鉄損 0.75 W/kg 以下にできることが明らかとなった。また、実施例 1 の溝 3 の第一角度 θ が 30° 、 45° である場合と実施例 1 とを比較した結果、溝群 30 を構成する隣り合う溝 3 同士がオーバーラップし、且つ合計深さの最小値が $0.5 \times D_A$ 以上であれば、溝 3 の第一角度 θ が 30° 、 45° 、 60° の場合で、鉄損はほぼ変化しなかった。
- [0127] 実施例 1 の試験片 30 枚を、最大磁束密度が 1.7 T 、周波数が 50 Hz の条件下で交流励磁したときの鉄損 $W_{1.7/50}$ (W/kg) を測定し、平均値を算出した。比較例 1 の試験片 30 枚も同様に測定し、鉄損の平均値を算出した。実施例 1 の試験片の鉄損の平均値は $W_{1.7/50} = 0.72$ (W/kg) であり、比較例 1 の試験片の鉄損の平均値は $W_{1.7/50} = 0.80$ (W/kg) となった。この結果、実施例 1 の方向性電磁鋼板の方が、比較例 1 の方向性電磁鋼板より鉄損が優れていた。

[0128] 実施例 1 ～ 4 及び比較例 1、2 の鉄損改善について比較した。比較結果を表 1 に示す。

鉄損改善の評価は、実施例 1 ～ 4 及び比較例 1、2 の溝加工を行う前の鋼板（絶縁皮膜形成工程 S O 8 後の鋼板）の鉄損を測定し、これを基準鉄損とし、基準鉄損に対する鉄損の改善率を求めた。その結果、鉄損改善率は実施例 2 及び実施例 3 で良好な結果が得られた。また、実施例 1 及び実施例 4 は、鉄損改善率が 20 % と非常に高い結果が得られた。比較例 1 及び比較例 2 は、実施例 1 ～ 4 の方向性電磁鋼板に比べて鉄損改善率が低かった。

[0129] [表1]

	溝群平均深さ D_A (単位: μm)	オーバーラップ領域R における合計溝深さの 最小値 (単位: μm)	鉄損改善率 (単位: %)
実施例1	20	20	20
実施例2	20	10	16
実施例3	20	15	18
実施例4	20	25	20
比較例1	20	0	10
比較例2	20	5	12

[0130] (実施例 5 ～ 18)

レーザ法を用いて、レーザ走査ピッチ（間隔 P L）は 3 mm に設定し、ビーム径は圧延方向 X に 0.1 mm、スキャン方向に 0.3 mm、スキャン速度 30 m / s に設定し、溝平均深さ D、溝長手方向 L の平均溝幅 W、及び第一角度 θ が以下の表 1 に示す溝を鋼板表面 2 a に形成した方向性電磁鋼板を用意した。また、比較例として、溝平均深さ D、溝長手方向 L の平均溝幅 W、及び第一角度 θ が以下の表 2 に示す溝を形成した方向性電磁鋼板を用意した。

[0131] 溝短手方向 Q の断面における輪郭は、同じ非接触レーザ距離計を用いて、溝短手方向 Q の 20 本の直線における溝の二次元高さ分布を測定した。測定

結果に基づき、溝の溝短手断面の輪郭を20パターン得た。得られた20パターンの溝短手断面の輪郭において、鋼板表面2aから溝の表面（輪郭上）までの深さを測定し、溝短手平均深さ D_s を算出した。溝短手断面形状において、溝短手平均深さ $D_s \times 0.05$ の地点を2点抽出し、2点間の距離を溝幅 W として測定した。20パターンのそれぞれで得られた溝幅 W の平均値を平均溝幅として算出した。実施例5～18及び比較例3～5でそれぞれ得られた方向性電磁鋼板の平均溝幅（単位 μm ）を表2に示す。

[0132]

[表2]

	溝群 平均深さ D_A (μm)	オーバーラップ領域R における合計溝深さの 最小値 (μm)	鉄損改善	平均溝幅 W (μm)	アスペクト比 $A=D/W$	第一角度 θ ($^\circ$)	$32 \times A^2 - 55 \times A + 73$	$21 \times A + 77$	錆発生 の有無	耐錆性
実施例5	10	10	良	200	0.05	70.0	70.3	76.0	なし	優良
実施例6	50	30	良	200	0.25	56.0	61.3	71.8	なし	優良
実施例7	10	10	良	30	0.33	55.0	58.2	70.0	なし	優良
実施例8	20	10	良	50	0.40	54.0	56.1	68.6	なし	優良
実施例9	15	15	良	30	0.50	52.5	53.5	66.5	なし	優良
実施例10	15	15	良	20	0.75	48.0	49.8	61.3	なし	優良
実施例11	50	30	良	50	1.00	48.0	50.0	56.0	なし	優良
実施例12	15	15	良	300	0.05	73	70.3	76.0	あり	良
実施例13	50	30	良	200	0.25	65	61.3	71.8	あり	良
実施例14	50	30	良	150	0.33	60.5	58.2	70.0	あり	良
実施例15	10	10	良	25	0.40	58	56.1	68.6	あり	良
実施例16	50	30	良	100	0.50	56	53.5	66.5	あり	良
実施例17	15	15	良	20	0.75	53	49.8	61.3	あり	良
実施例18	50	30	良	50	1.00	51	50.0	56.0	あり	良
比較例3	20	0	不良	100	0.20	75	63.3	72.8	あり	不良
比較例4	20	0	不良	50	0.40	70	56.1	68.6	あり	不良
比較例5	20	5	不良	20	1.00	60	50.0	56.0	あり	不良

[0133] 実施例 5、6 は、上記実施形態に記載の式 (1) 及び式 (2) の関係のみを満足する例である。実施例 12～18 は、上記実施形態に記載の式 (1) の関係のみを満足する例である。実施例 8 及び 9 は、上記実施形態に記載の式 (1) から式 (4) の関係を満足する例である。実施例 7 は、上記実施形態に記載の式 (1)、式 (2) 及び式 (4) の関係を満足する例である。実施例 10 は、上記実施形態に記載の式 (1)、式 (2)、及び式 (3) の関係を満足する例である。また、比較例 3～5 は、上記式 (1) を満足しない方向性電磁鋼板を用意した。

[0134] 耐錆性の評価は、上記実施例及び比較例の各方向性電磁鋼板から溝を一つ含む 30 mm 角の試験片を採取し、その試験片を、温度が 50℃、湿度が 95% 以上に維持された室内で 48 時間放置した後、各試験片における錆の発生状況を確認した。錆の発生の有無は、目視により確認した。この他、耐錆性については、温度 50℃ 及び湿度 91% の雰囲気中に試験片を 1 週間放置して、その前後における試験片の重量変化に基づいて評価した。錆が発生すると試験片の重量が増加するため、重量増加量が少ないものほど耐錆性が良いと判断した。具体的には、重量増加量が 1.0 mg/m^2 以下の試験片の耐錆性を“優良”と評価し、重量増加量が 5.0 mg/m^2 以下の試験片の耐錆性を“良”と評価し、重量増加量が 10.0 mg/m^2 超の試験片の耐錆性を“不良”と評価した。表 1 に示すように、実施例 5～18 の方向性電磁鋼板の耐錆性を検証した結果、少なくとも式 (1) を満足する溝を形成することにより、方向性電磁鋼板の耐錆性が向上することが確認された。

比較例 3～5 は耐錆性の評価が不良となった。

[0135] 実施例 1～18 では、鋼板中の溝に接する結晶粒の粒径が $5 \mu\text{m}$ 以上であった。

産業上の利用可能性

[0136] 本発明の上記態様によれば、地鉄の表面に複数の溝が形成された方向性電磁鋼板の鉄損を改善し、且つ耐錆性を向上させることが可能であるので、産業上の利用可能性を十分に有する。

符号の説明

[0137] 1 方向性電磁鋼板

2 鋼板

2 a 鋼板表面

3 溝

X 圧延方向

Y 板幅方向

Z 板厚方向

D 溝平均深さ

D_A 溝群平均深さ

θ 第一角度

W 平均溝幅

5 1 第1点

5 2 第2点

3 E 溝端直線

3 O 溝群

3 1 第1の溝

3 2 第2の溝

3 1 a 第1溝端

3 2 b 第2溝端

請求の範囲

[請求項1]

圧延方向と交差する方向に延在しかつ溝深さ方向が板厚方向となる溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備える方向性電磁鋼板において、

前記板厚方向から前記鋼板表面を見た場合に、板幅方向に対して前記溝が複数配されて構成される溝群を有し、

前記溝群を構成する前記溝が、前記圧延方向と直交する投影面上で隣り合う溝と重なるように配され、

前記溝群が前記圧延方向に対して間隔を有して複数配され、

前記鋼板の前記板幅方向の端部を基準端部とし、前記溝群の複数の前記溝のうちの隣り合う溝を前記基準端部から近い順に第一の溝、第二の溝とし、

前記溝群を構成する各溝での前記溝長手方向の2つの溝端を、前記基準端部から近い順に第一溝端、第二溝端とし、

前記投影面に投影された前記第一の溝の輪郭を第一溝長手投影線とし、

前記投影面に投影された前記第二の溝の輪郭を第二溝長手投影線とし、

前記溝群を構成する複数の前記溝の輪郭における平均深さを単位 μm で溝群平均深さ D_A とし、

前記第二溝長手投影線の前記第一溝端において前記鋼板表面から前記板厚方向への深さが $0.05 \times D_A$ となる前記第二溝長手投影線上の点を第1の点とし、

前記第一溝長手投影線の前記第二溝端において前記鋼板表面から前記板厚方向への深さが $0.05 \times D_A$ となる前記第一溝長手投影線上の点を第2の点としたとき、

前記投影面において、前記第二溝長手投影線上の前記第1の点と前記基準端部との間の距離が、前記第一溝長手投影線上の前記第2の点

と前記基準端部との間の距離より短く、

前記第二の溝の前記第一溝端と前記第一の溝の前記第二溝端との間のオーバーラップ領域において、前記第一の溝の前記第二溝端における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝の前記第一溝端における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上である

ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

[請求項2] 前記オーバーラップ領域に含まれる前記第一溝長手投影線上の任意の点をP1とし、

前記オーバーラップ領域に含まれる前記第二溝長手投影線上の点のうち、前記基準端部からの距離が前記点P1と等しい点をP2としたとき、

前記オーバーラップ領域において、前記第一の溝の前記鋼板表面から前記第一溝長手投影線上の前記点P1までの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝の前記鋼板表面から前記第二溝長手投影線上の前記点P2までの前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.5 \times D_A$ 以上であることを特徴とする請求項1に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項3] 圧延方向と交差する方向に延在しかつ溝深さ方向が板厚方向となる溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備える方向性電磁鋼板であって、

前記板厚方向から前記鋼板表面を見た場合に、板幅方向に対して前記溝が複数配されて構成される溝群を有し、

前記溝群を構成する前記溝が、前記圧延方向と直交する投影面上で隣り合う溝と重なるように配され、

前記溝群が前記圧延方向に対して間隔を有して複数配され、

前記鋼板の前記板幅方向の一方の端部を基準端部とし、前記溝群の複数の前記溝のうちの隣り合う溝を、前記基準端部から近い順に、第一の溝、第二の溝とし、

前記溝群を構成する各溝での前記溝長手方向の2つの溝端を、前記基準端部から近い順に、第一溝端、第二溝端とし、

前記投影面に投影された前記第一の溝の輪郭を第一溝長手投影線とし、

前記投影面に投影された前記第二の溝の輪郭を第二溝長手投影線とし、

前記第一溝長手投影線の前記鋼板表面から前記板厚方向に向かう深さの平均値を単位 μm で第一溝平均深さ D_I とし、

前記第二溝長手投影線の前記鋼板表面から前記板厚方向に向かう深さの平均値を単位 μm で第二溝平均深さ D_{II} とし、

前記第二溝長手投影線の前記第一溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.05 \times D_{II}$ となる点を第3の点とし、

前記第一溝長手投影線の前記第二溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.05 \times D_I$ となる点を第4の点としたとき、

前記投影面にて、前記第二溝長手投影線上の前記第3の点と前記基準端部との間の距離 L_a が、前記第一溝長手投影線上の前記第4の点と前記基準端部との間の距離 L_b より短く、

前記第二の溝の前記第一溝端と前記第一の溝の前記第二溝端との間のオーバーラップ領域において、前記第一の溝における前記鋼板表面からの前記板厚方向の深さと、前記第二の溝における前記鋼板表面から前記板厚方向の深さとの合計深さが $0.25 \times (D_I + D_{II})$ 以上である

ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

[請求項4]

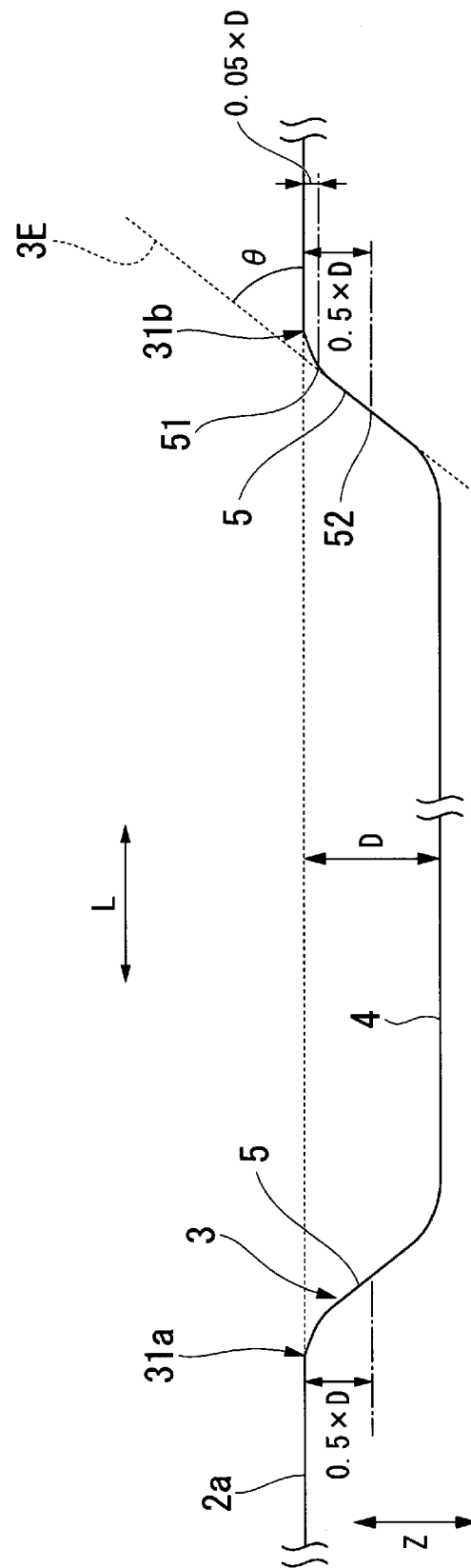
前記第一溝長手投影線の前記第二溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.95 \times D_I$ となる点を第5の点とし、

前記第二溝長手投影線の前記第一溝端における前記鋼板表面から前記板厚方向に向かって深さが $0.95 \times D_{II}$ となる点を第6の点としたとき、

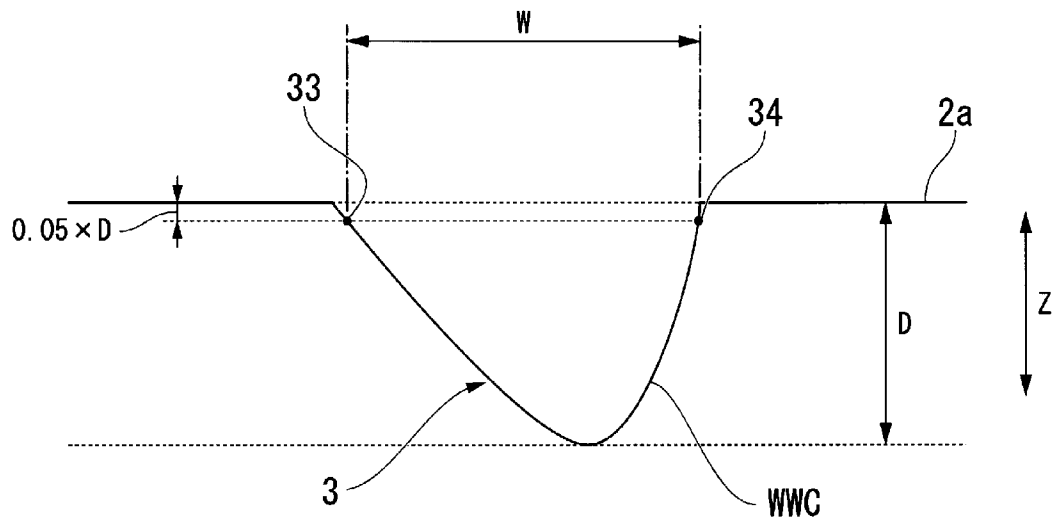
前記第一溝長手投影線上の前記第5の点と前記基準端部との間の距離 L_c は、前記第二溝長手投影線上の前記第6の点と前記基準端部との間の距離 L_d より短いことを特徴とする請求項3に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項5] 前記鋼板では前記溝に接する結晶粒の粒径が $5 \mu m$ 以上であることを特徴とする請求項1から請求項4のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板。

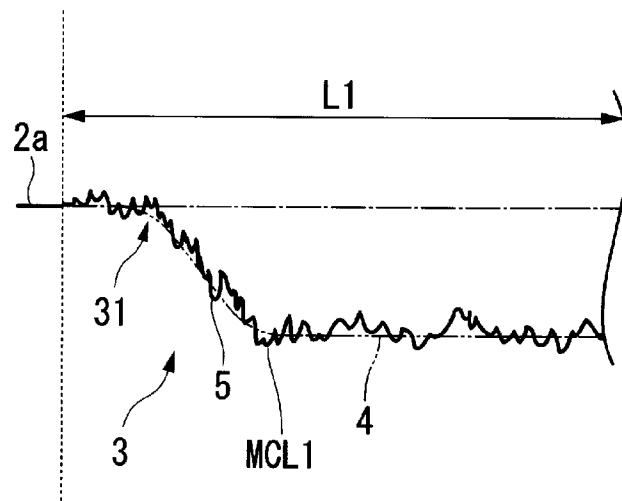
[図2]



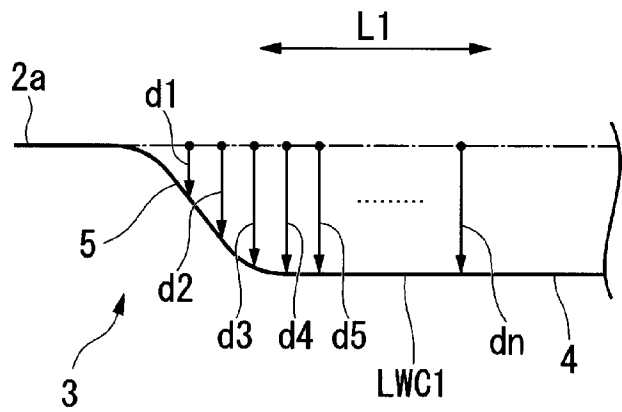
[図3]



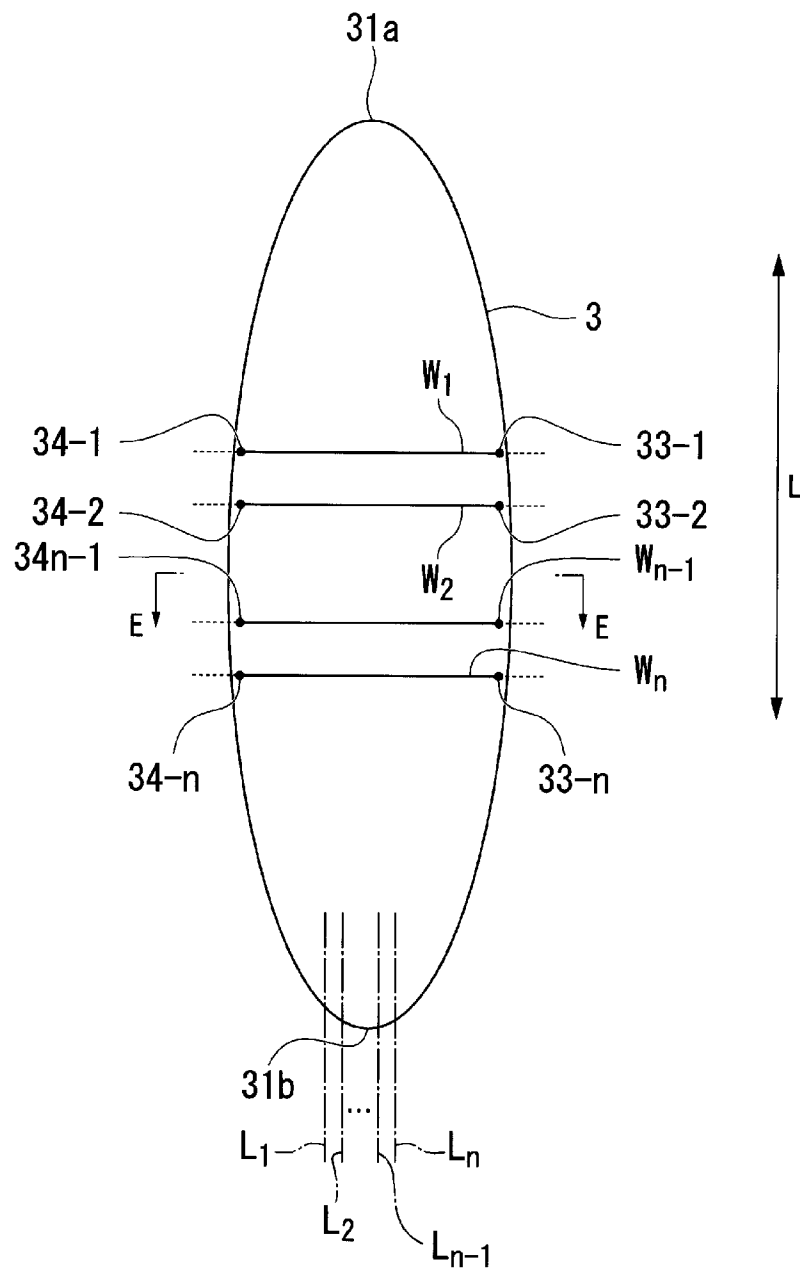
[図4]



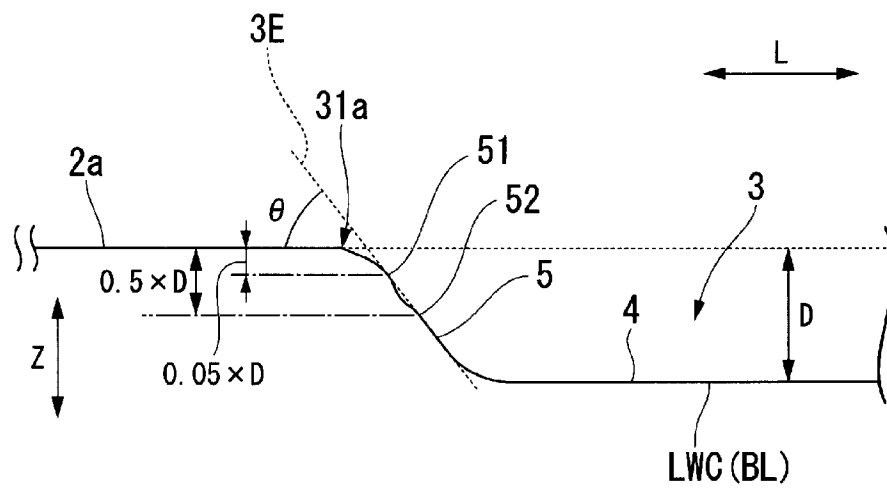
[図5]



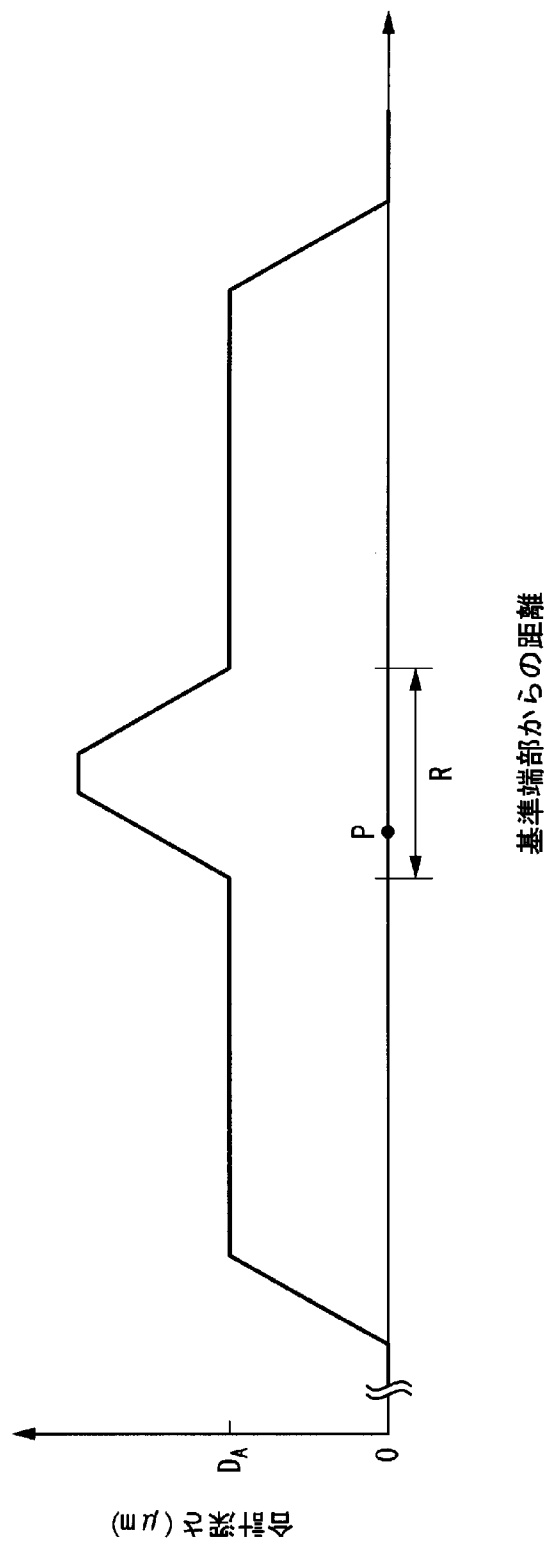
[図6]



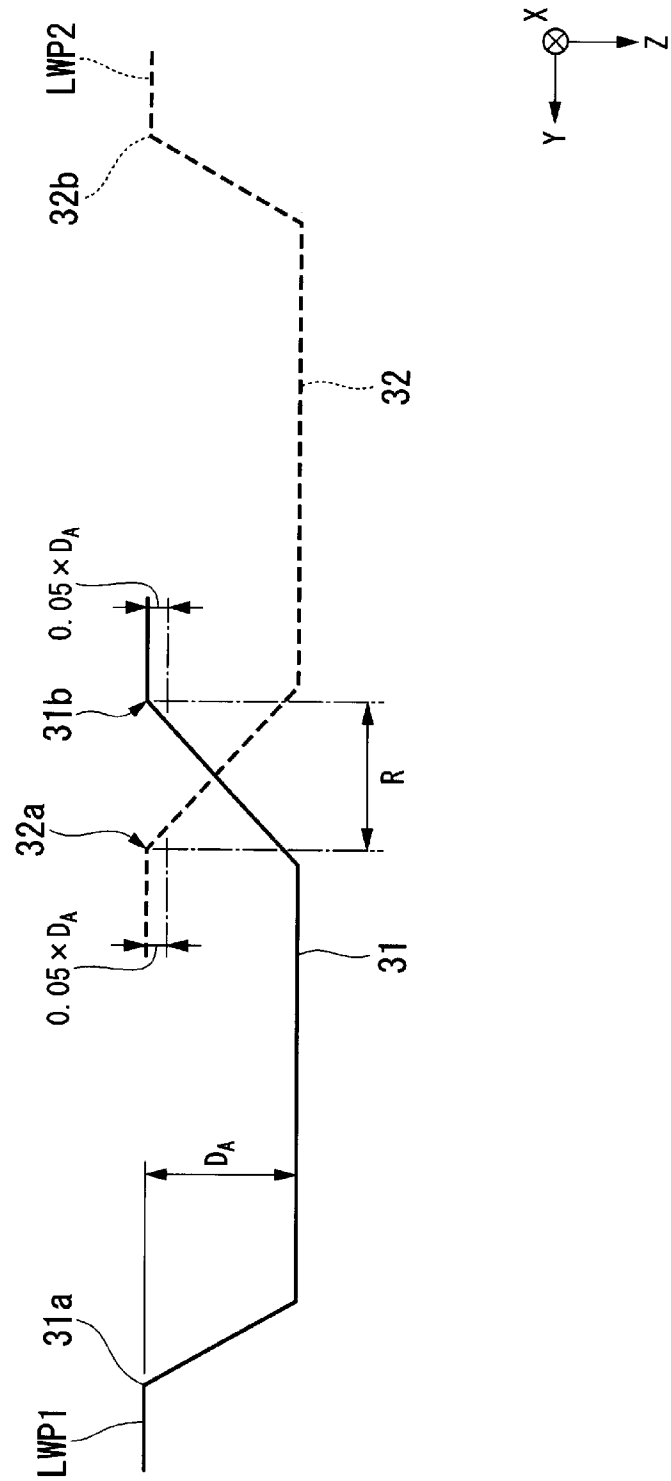
[図7]



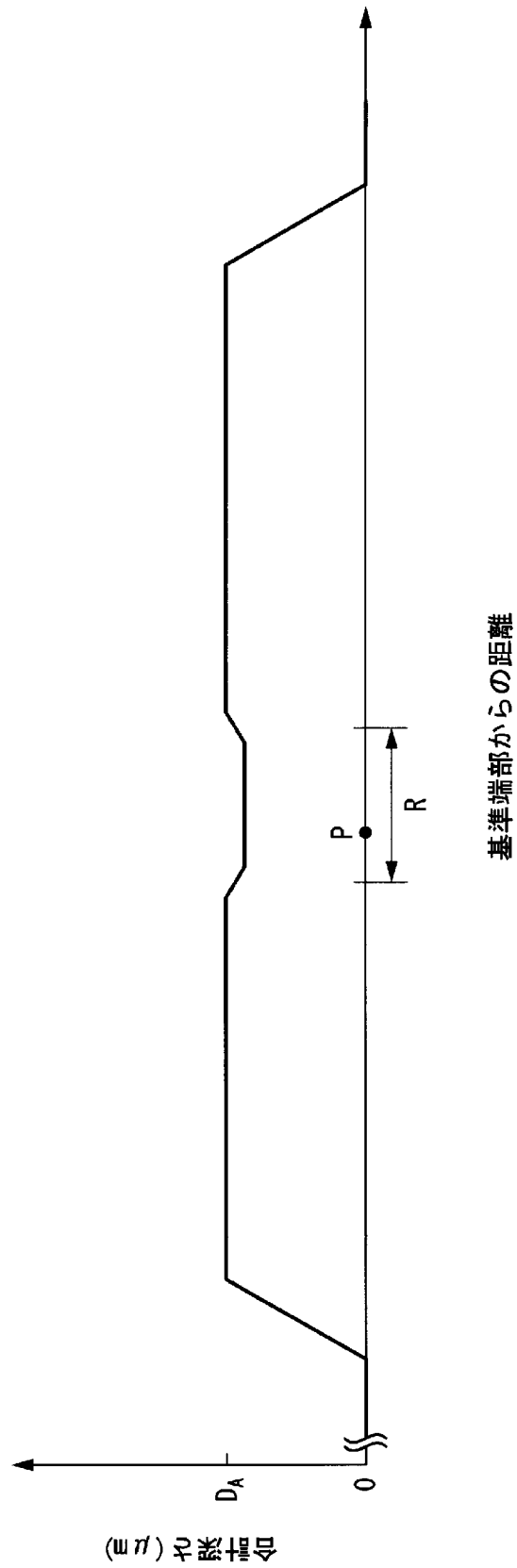
[図9]



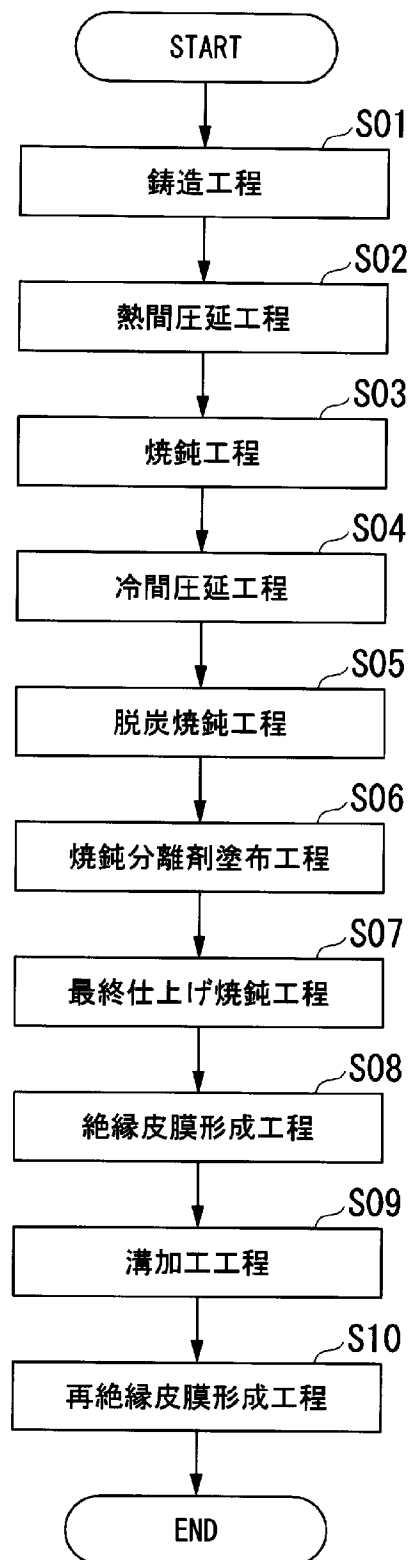
[図10]



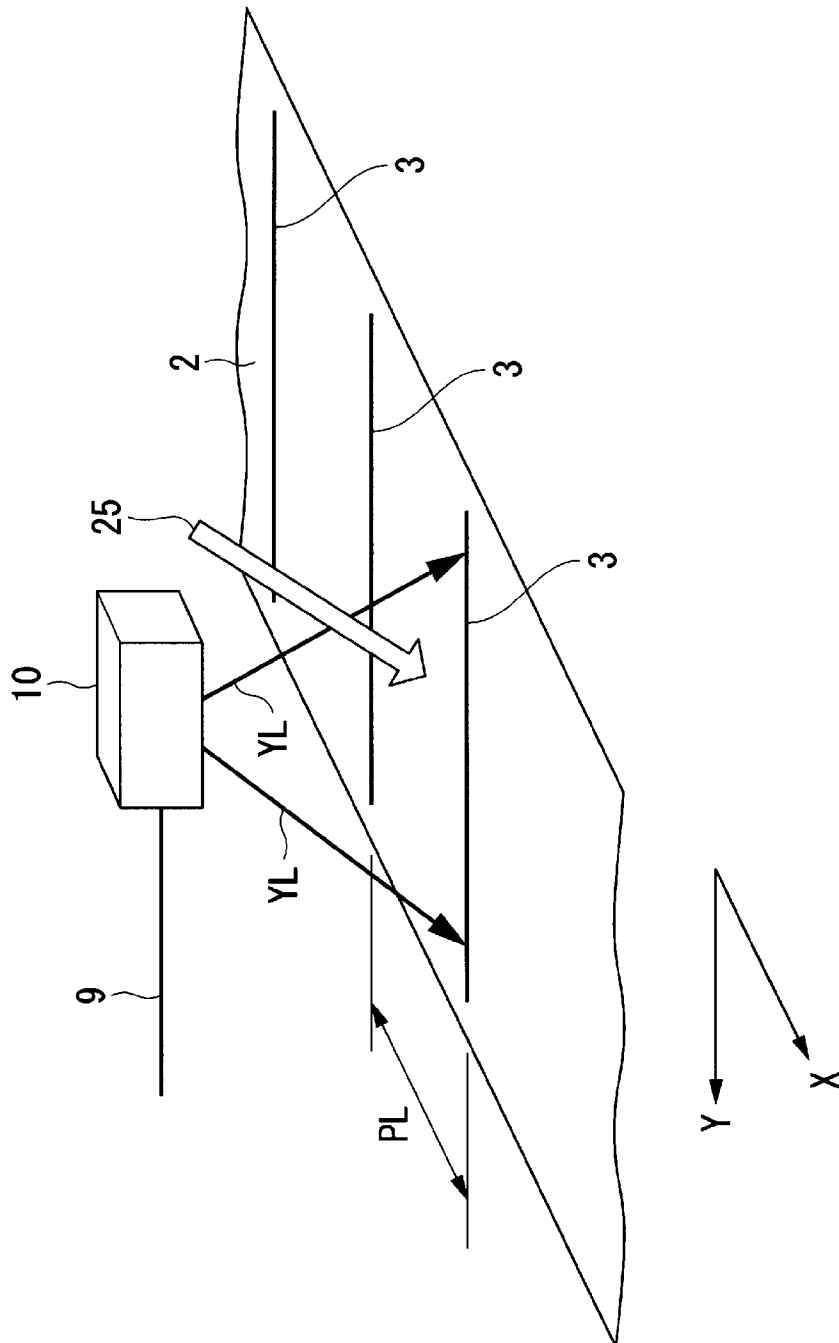
[図11]



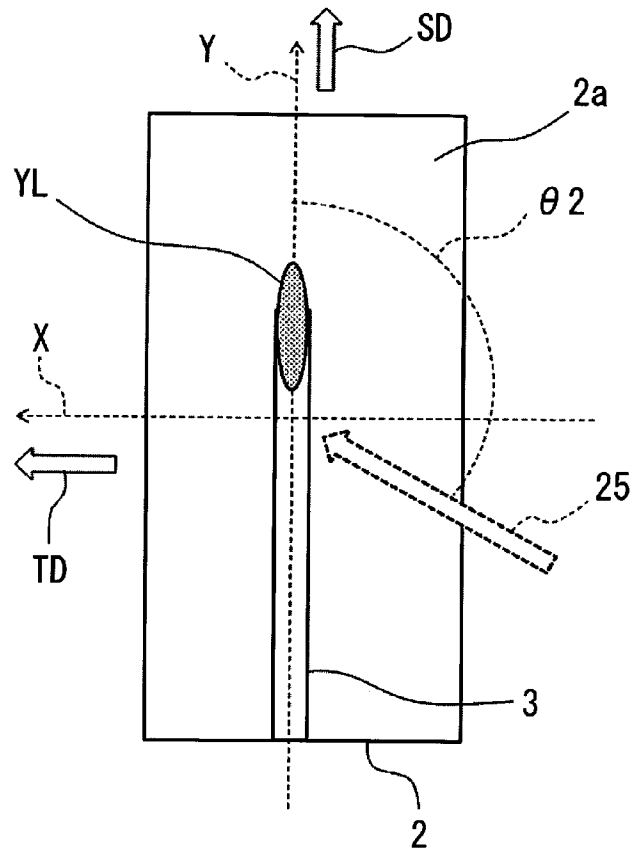
[図12]



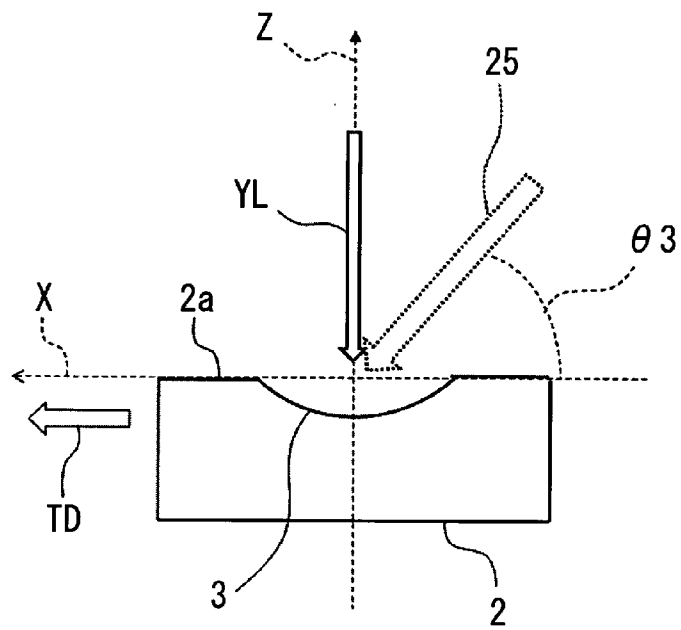
[図13]



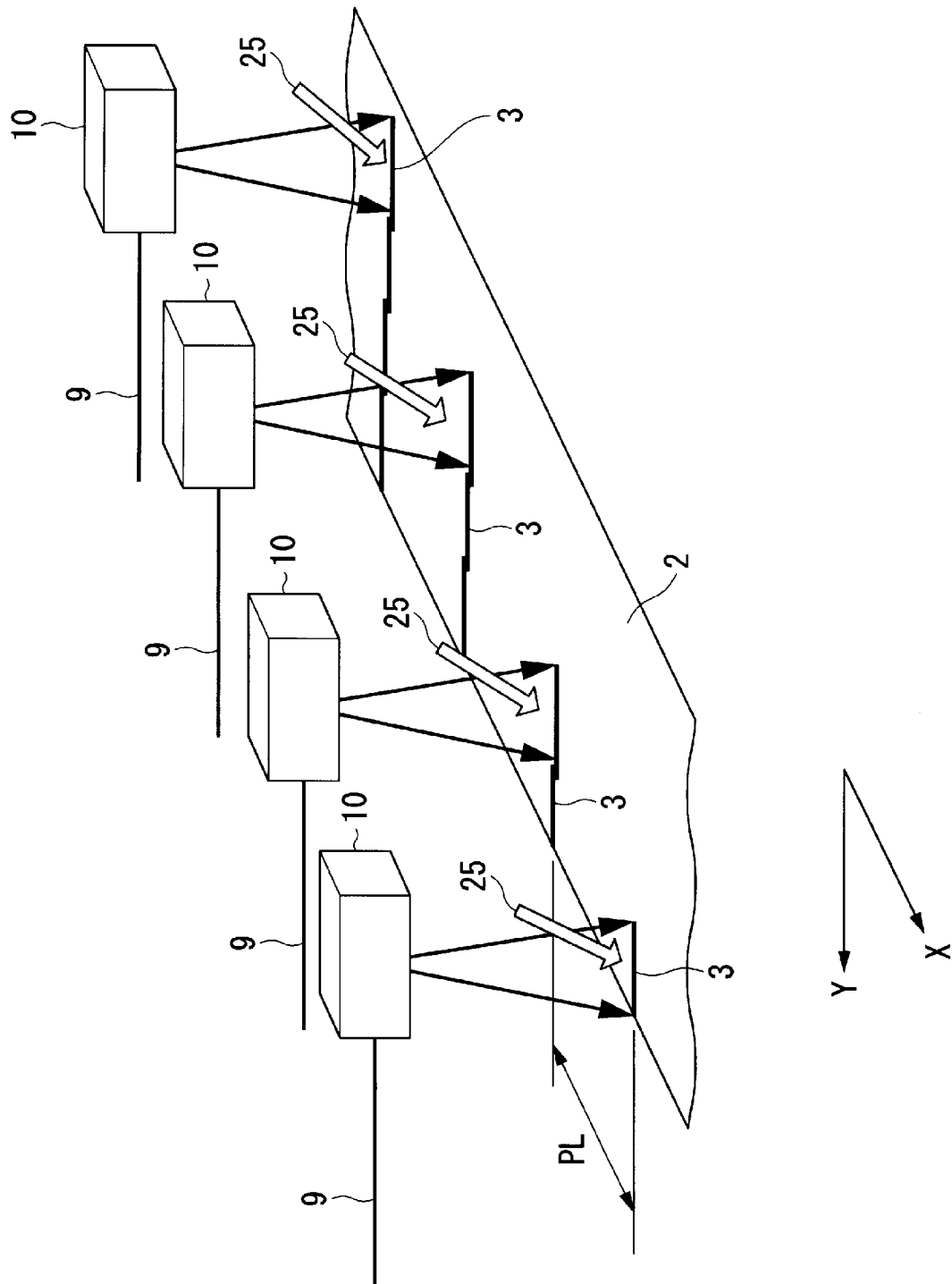
[図14]



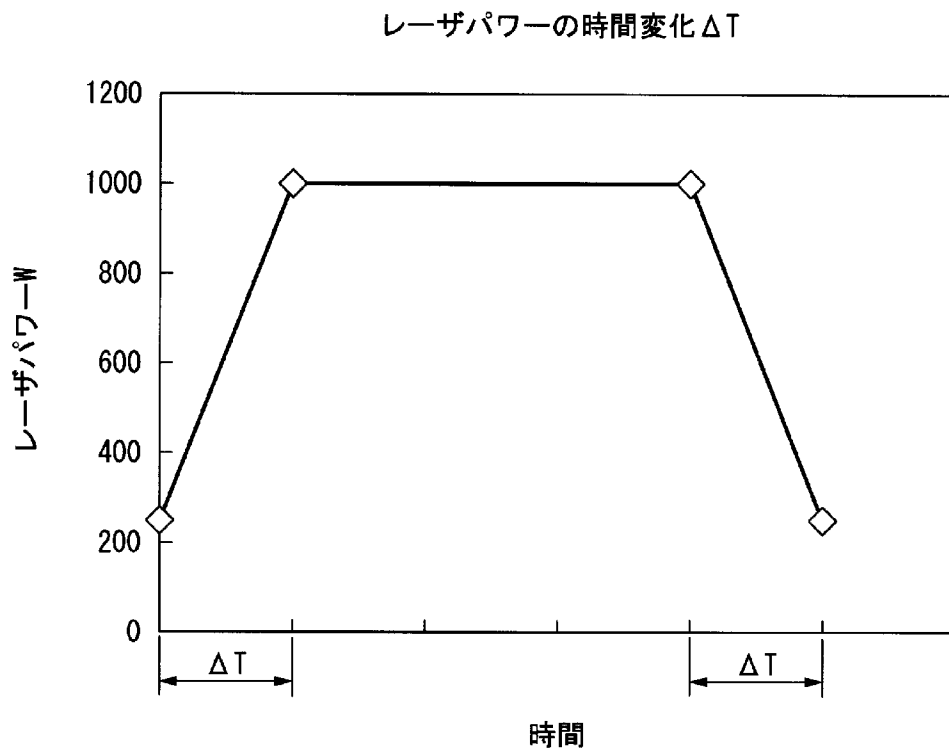
[図15]



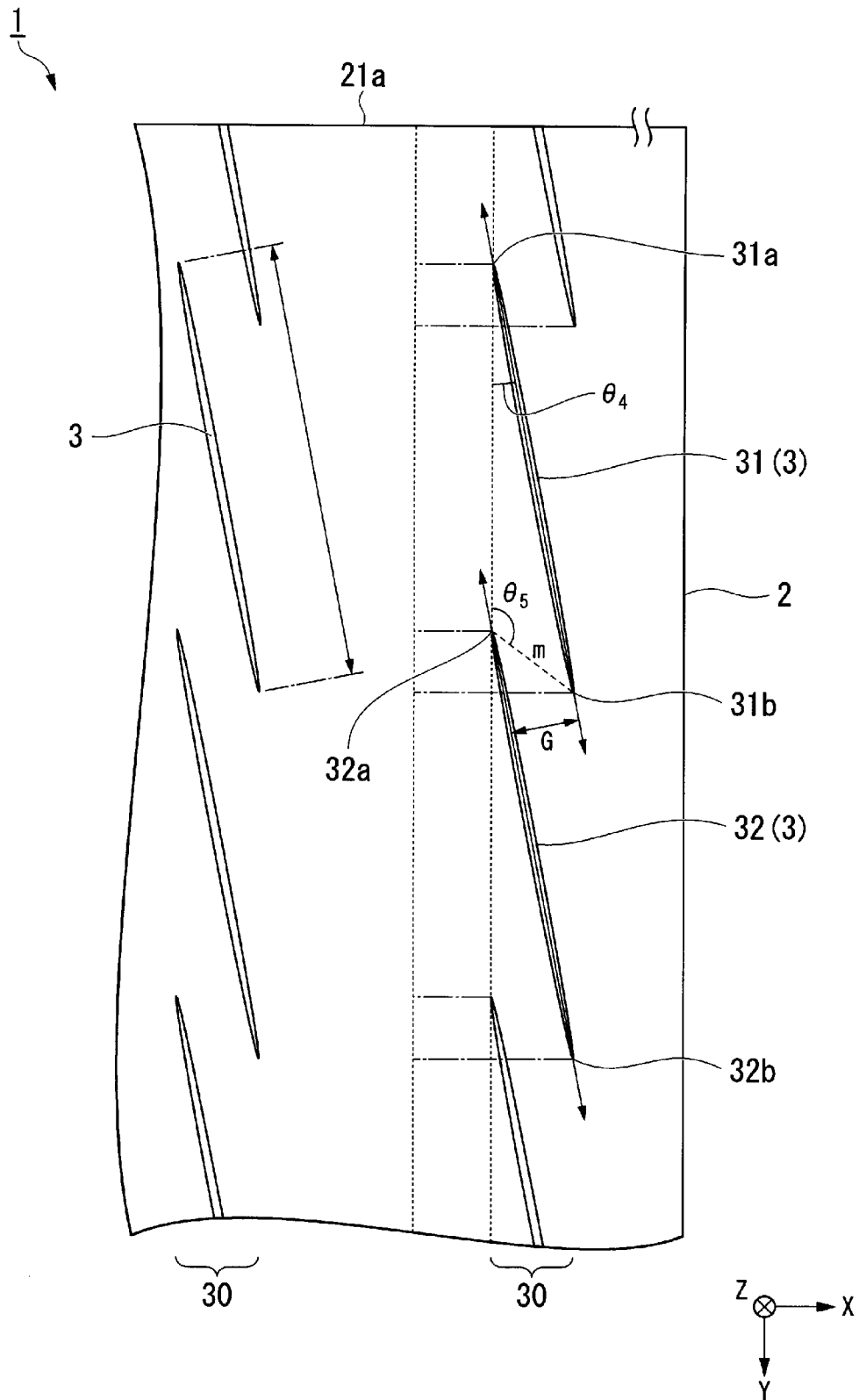
[図16]



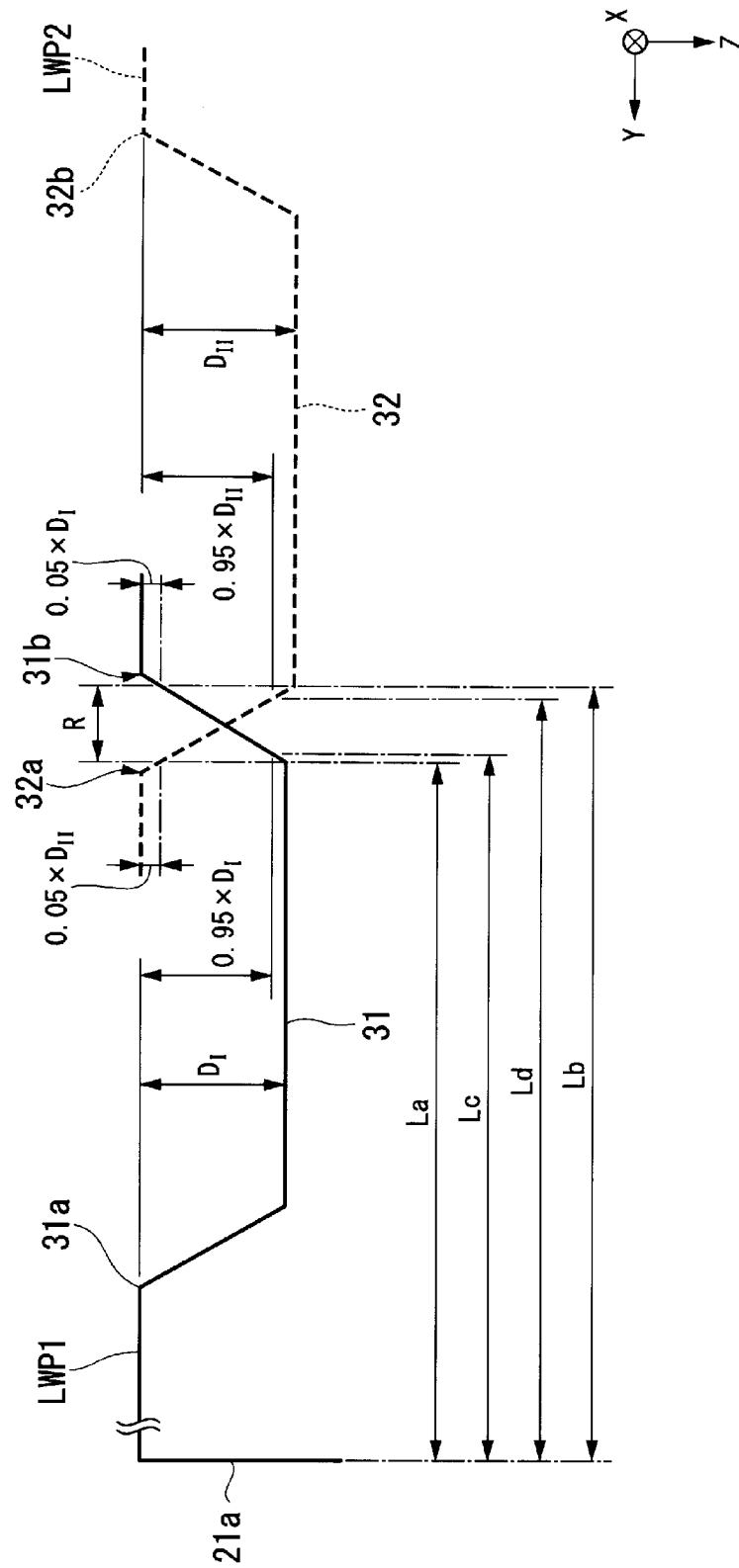
[図17]



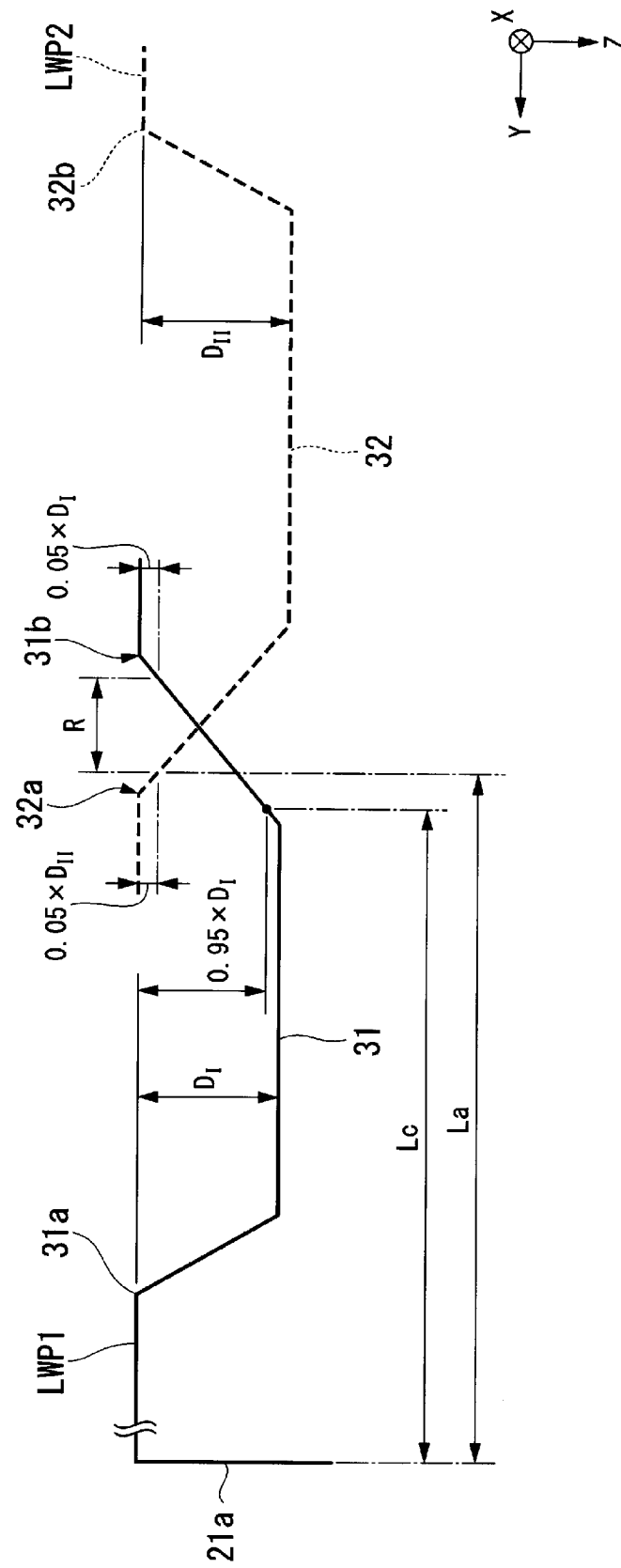
[図18]



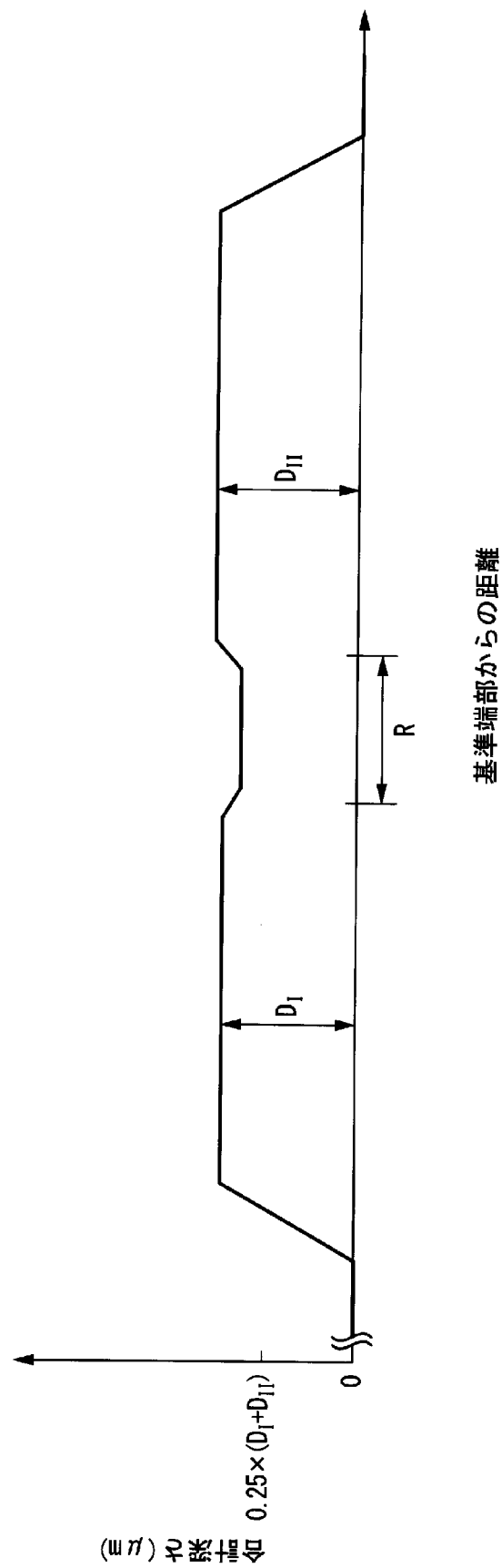
[図20]



[図21]



[図22]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/062375

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C21D8/12(2006.01)i, B23K26/364(2014.01)i, C22C38/00(2006.01)i, C22C38/60(2006.01)i, C25F3/06(2006.01)i, H01F1/16(2006.01)i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C21D8/12, C22C38/00-38/60, B23K26/364, C25F3/06, H01F1/16

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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 2012/033197 A1 (Nippon Steel Corp.), 15 March 2012 (15.03.2012), & US 2013/0139932 A1 & EP 2615184 A1 & CN 103097557 A & KR 10-2013-0043232 A & TW 201224158 A1 & RU 2509813 C1	1-5
A	JP 11-279645 A (Nippon Steel Corp.), 12 October 1999 (12.10.1999), (Family: none)	1-5
A	JP 2012-102395 A (JFE Steel Corp.), 31 May 2012 (31.05.2012), (Family: none)	1-5
A	JP 58-19440 A (Nippon Steel Corp.), 04 February 1983 (04.02.1983), (Family: none)	1-5

☒ 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
20 July 2016 (20.07.16)

Date of mailing of the international search report
02 August 2016 (02.08.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/062375

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, A	WO 2015/111434 A1 (JFE Steel Corp.), 30 July 2015 (30.07.2015), (Family: none)	1-5

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. C21D8/12(2006.01)i, B23K26/364(2014.01)i, C22C38/00(2006.01)i, C22C38/60(2006.01)i, C25F3/06(2006.01)i, H01F1/16(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. C21D8/12, C22C38/00-38/60, B23K26/364, C25F3/06, H01F1/16

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 6 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 6 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 6 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 2012/033197 A1 (新日本製鐵株式会社) 2012.03.15, & US 2013/0139932 A1 & EP 2615184 A1 & CN 103097557 A & KR 10-2013-0043232 A & TW 201224158 A1 & RU 2509813 C1	1-5
A	JP 11-279645 A (新日本製鐵株式会社) 1999.10.12, (ファミリーなし)	1-5
A	JP 2012-102395 A (J F E スチール株式会社) 2012.05.31, (ファミリーなし)	1-5

☑ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 0 . 0 7 . 2 0 1 6

国際調査報告の発送日

0 2 . 0 8 . 2 0 1 6

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田口 裕健

4 K

4 6 6 3

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 4 3 5

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 58-19440 A (新日本製鐵株式会社) 1983. 02. 04, (ファミリーなし)	1-5
P, A	WO 2015/111434 A1 (J F E スチール株式会社) 2015. 07. 30, (ファミリーなし)	1-5