(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
2025年4月3日(03.04.2025)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2025/070776 A1

(51) 国際特許分類:
C22C 38/00 (2006.01) *H01F 41/02* (2006.01)
C21D 8/12 (2006.01) *C21D 9/46* (2006.01)
H01F 1/147 (2006.01) *C22C 38/60* (2006.01)
H01F 27/245 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2024/034793

(22) 国際出願日： 2024年9月27日(27.09.2024)

(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 2023-166102 2023年9月27日(27.09.2023) 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 (JP).

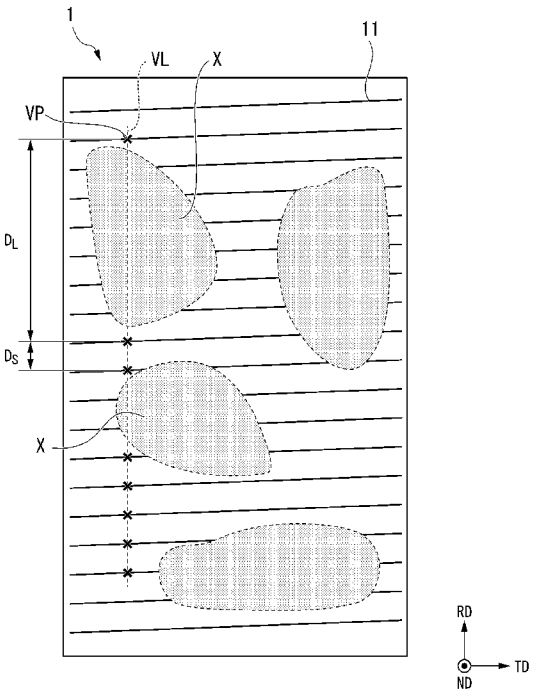
(72) 発明者: 松原 稜(**MATSUBARA Ryo**); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目６番１号 日本製鉄株式会社内 (JP). 川村 悠祐(**KAWAMURA Yusuke**); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目６番１号 日本製鉄株式会社内 (JP). 本間 励(**HONMA Rei**); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目６番１号 日本製鉄株式会社内 (JP). 鈴間 俊之(**SUZUMA Toshiyuki**); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目６番１号 日本製鉄株式会社内 (JP).

(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 (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,

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

(54) 発明の名称： 方向性電磁鋼板、及び方向性電磁鋼板の製造方法



(57) **Abstract:** This grain-oriented electrical steel sheet has a plurality of magnetic domain control processing lines on the surface thereof. When a virtual line is set at a spacing of 5 mm inside an evaluation region, the minimum value D_S of the spacing between magnetic domain control points, which are points of intersection between the virtual line and the magnetic domain control processing lines, is at least 2 mm but less than 20 mm for at least one such virtual line. The ratio D_L/D_S between the maximum value D_L and the minimum value D_S of the spacing between the magnetic domain control points is 3 or more, and the average value $|\beta_L|$ of the absolute value of the β angle, as measured between the two magnetic domain control points for which the spacing is the maximum value D_L, is 1.5° or more.

(57) 要約：この方向性電磁鋼板は、表面に複数の磁区制御処理線を有し、評価領域の内部に仮想線を５ｍｍ間隔で設定した場合に、少なくとも１本の仮想線において、仮想線と磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、磁区制御点の間隔の最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上であり、且つ間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

WO 2025/070776 A1

［続葉有］

KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

明　細　書

発明の名称 ： 方向性電磁鋼板、及び方向性電磁鋼板の製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、方向性電磁鋼板、及び方向性電磁鋼板の製造方法に関する。

本願は、２０２３年９月２７日に、日本に出願された特願２０２３－１６６１０２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、Ｓｉを７質量％以下含有し、且つ、二次再結晶粒が、圧延方向に磁化容易軸＜００１＞が配向した｛１１０｝＜００１＞方位（Ｇｏｓｓ方位）に集積した二次再結晶集合組織を有する、鋼板である。方向性電磁鋼板は、主に電力用トランスの鉄心として用いられている。方向性電磁鋼板には、エネルギーロス（鉄損）の低減が求められる。

[0003] 低鉄損化のために、方向性電磁鋼板の磁区幅を狭くする技術（磁区制御処理による磁区細分化技術）が以前から知られている。方向性電磁鋼板の表面に、圧延方向に交差する方向にレーザまたは電子ビームを照射して熱歪みを導入することにより、磁区幅を狭くすることができる。また、方向性電磁鋼板の表面に、圧延方向に交差する方向に溝を形成することによっても、磁区幅を狭くすることができる。溝の形成方法としては、レーザまたは電子ビームを照射する方法、歯車などの機械的加工による方法、エッチングなどの化学的加工による方法などがあげられる。

[0004] 近年は、鉄損特性が良好な方向性電磁鋼板を提供すべく、磁区細分化に関する様々な改良技術が提案されている（例えば、特許文献１～特許文献３参照）。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：日本国特開２０１２－５７２１９号公報

特許文献2：日本国特開２０１２－１２６６４号公報

特許文献3：日本国特開２０１２－５７２１８号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 方向性電磁鋼板に磁区制御処理を適用すると、還流磁区によって、方向性電磁鋼板の磁歪特性が変化する。これにより、方向性電磁鋼板の騒音特性が悪化する。騒音特性とは、方向性電磁鋼板を材料として製造された電機製品（例えばトランス、及びモータ等）が生じさせる騒音の程度のことである。磁歪とは、強磁性体を磁化したときに、わずかに外形が変形する現象である。方向性電磁鋼板を交流で励磁すると、その磁化の強さの変化に伴って磁歪の大きさが変化することにより、振動が生じる。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。すなわち、磁区制御処理は、方向性電磁鋼板の鉄損を低減するために有効である反面で、方向性電磁鋼板の騒音特性を悪化させる。

[0007] 近年は、方向性電磁鋼板には低鉄損化だけでなく、低騒音化の要求も高まっている。しかしながら、低騒音化と低鉄損化との両方を十分に達成することが可能な磁区細分化技術はこれまで提案されていない。

[0008] 本開示は、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成し得る方向性電磁鋼板、及びその製造方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 本開示の要旨は以下の通りである。

[0010] （１）本開示の一態様に係る方向性電磁鋼板は、表面に複数の磁区制御処理線を備え、前記方向性電磁鋼板に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、前記評価領域の内部に、前記圧延方向に平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線を５ｍｍ間隔で設定した場合において、少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔

の最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

（２）好ましくは、上記（１）に記載の方向性電磁鋼板では、２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

（３）好ましくは、上記（１）又は（２）に記載の方向性電磁鋼板では、前記D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記$|\beta_L|$が１．５°以上である前記仮想線において、前記$|\beta_L|$と、前記磁区制御点の前記間隔が前記最小値D_Sとなる２つの前記磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_S|$とが、下記式を満たす。

$$0.5° \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

（４）好ましくは、上記（１）～（３）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制御処理線との交点である前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

（５）好ましくは、上記（１）～（４）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

（６）好ましくは、上記（１）～（５）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記$|\beta_L|$が１．５°以上である前記仮想線において、前記$|\beta_L|$と、前記磁区制御点の前記間隔が前記最小値D_Sとなる２つの前記磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_S|$とが、下記式を満たす。

$$0.5° \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

（７）好ましくは、上記（１）～（６）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが３以上である前記仮想線のうち、少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、結晶粒界との交点である粒界点の数が２個以下である。

（８）好ましくは、上記（１）～（７）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記粒界点の数が２個以下である。

（９）好ましくは、上記（１）～（８）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記磁区制御処理線が熱歪みである。

（１０）好ましくは、上記（１）～（９）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記磁区制御処理線が溝である。

（１１）好ましくは、上記（１）～（１０）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板では、少なくとも１本の前記仮想線において、前記比D_L/D_Sが３未満である。

[0011] （１２）本開示の別の態様に係る方向性電磁鋼板の製造方法は、方向性電磁鋼板の原板の磁区画像を取得する工程と、前記磁区画像における磁区幅の分布に基づいて、磁区制御処理領域を決定する工程と、磁区幅の分布に基づいて決定された前記磁区制御処理領域に、磁区制御処理を適用する工程と、を備え、前記方向性電磁鋼板に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、前記評価領域の内部に、前記圧延方向に平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線

を５ｍｍ間隔で設定した場合において、少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制御処理によって形成された磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値を２ｍｍ以上２０ｍｍ未満とし、前記磁区制御点の前記間隔の最大値と、前記最小値との比を３以上とする。

（１３）好ましくは、上記（１２）に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、前記磁区幅が所定値以上である領域を前記磁区制御処理領域とする。

（１４）好ましくは、上記（１２）又は（１３）に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、２次元フーリエ変換を用いて前記磁区画像から前記磁区幅の分布を導出する。

（１５）好ましくは、上記（１２）～（１４）の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、レーザ又は電子ビームの照射によって前記磁区制御処理を適用する。

発明の効果

[0012] 本開示の上記態様によれば、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成し得る方向性電磁鋼板、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

[0013] [図1]本開示の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の平面図である。

[図2]通常の方向性電磁鋼板の平面図である。

[図3]β角と磁区幅との関係を示すグラフである。

[図4A]磁区細分化処理前の方向性電磁鋼板の磁区幅の分布の一例を示す図である。

[図4B]磁区細分化処理後の方向性電磁鋼板の磁区幅の分布の一例を示す図である。

[図4C]図４Ａ及び図４Ｂの差分を示す図である。

[図5]磁区制御処理前の磁区幅と磁区制御処理後の磁区幅との関係を示すグラフである。

[図6]画像取得装置のハードウェア構成の一例を示すブロック図である。

[図7]解析装置のハードウェア構成の一例を示すブロック図である。

[図8]レーザ照射装置の構成の一例を示す模式図である。

[図9]本開示の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法を示すフローチャートである。

[図10]方向性電磁鋼板の磁区画像から複数の部分領域を切り出す方法を説明する模式図である。

[図11]方向性電磁鋼板の磁区画像から切り出された複数の部分領域のそれぞれに２次元フーリエ変換を施すことによって得られた複数の部分フーリエ画像の一例である。

[図12]方向性電磁鋼板の原板の平面図である。

発明を実施するための形態

[0014] （１．方向性電磁鋼板１）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１は、表面に複数の磁区制御処理線１１を備え、方向性電磁鋼板１に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤと平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、評価領域の内部に、圧延方向ＲＤに平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で設定した場合において、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、仮想線ＶＬと、磁区制御処理線１１との交点である磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上であり、且つ間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点ＶＰの間で測定される、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である。

[0015] （磁区制御処理線１１）

方向性電磁鋼板１の表面に設けられた複数の磁区制御処理線１１は、１８０°磁区を細分化する働きを有する。磁区を細分化することにより、方向性電磁鋼板１の鉄損を低減することができる。磁区とは、強磁性体の内部に存在する磁気双極子の集まりで、磁気モーメントが一方向に揃っている小さな領域のことである。１８０°磁区とは、磁化方向が結晶の＜１００＞方位であり、且つ圧延方向ＲＤにほぼ平行な２つの１８０°磁壁に挟まれた磁区の

ことである。１８０°磁区の隣接する磁壁間の距離（磁壁間隔）は、１８０°磁区の幅と称される。以下、特に断りが無い限り、１８０°磁区の幅を単に「磁区幅」と称する。

[0016] 磁区制御処理線１１の好適な例は、熱歪み、及び溝である。磁区を細分化することにより、方向性電磁鋼板１の鉄損を抑制することができる。ただし磁区制御処理線１１は、還流磁区によって、方向性電磁鋼板１の磁歪特性を変化させる。これにより、方向性電磁鋼板１の騒音特性が悪化する。

[0017] 磁区制御処理線１１は、方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤに交差する方向に形成される。図２に例示されるような一般的な方向性電磁鋼板１においては、磁区制御処理線１１は、方向性電磁鋼板１の全幅にわたって形成される。しかし図１に例示されるような、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１においては、磁区制御処理線１１を方向性電磁鋼板１の全幅にわたって設けることは必須ではない。

[0018] 図１に例示される方向性電磁鋼板１において、磁区制御処理線１１は直線である。一方、磁区制御処理線１１が曲線であってもよい。磁区制御処理線１１が直線部及び屈曲部を有する形状であってもよい。また、磁区制御処理線１１は方向性電磁鋼板１の片面にあっても両面にあってもよい。磁区制御処理線１１が方向性電磁鋼板１の両面にある場合、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の種々の態様が、方向性電磁鋼板１の少なくとも片面に適用されていればよい。

[0019]（評価領域）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１においては、後述する仮想線ＶＬを設定するために、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤと平行である正方形の評価領域を設定する。

[0020]（圧延方向ＲＤに平行かつ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬ）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１においては、磁区制御処理線１１の間隔を規定するために、仮想線ＶＬを便宜的に用いる。仮想線ＶＬは、評価領域の内部に、５ｍｍ間隔で設定される。図１は例示として１本の仮想線ＶＬ

のみを描いた状態を示している。仮想線ＶＬを複数本設定する場合、図１の仮想線ＶＬに対し、必要本数の他の仮想線を平行に設定することができる。仮想線ＶＬの長さは５０ｍｍである。仮想線ＶＬは、圧延方向ＲＤと平行に延在する。仮想線ＶＬと磁区制御処理線１１との交点は、磁区制御点ＶＰと定義される。磁区制御点ＶＰの間隔は、磁区制御処理線１１の密度の指標となる。磁区制御点ＶＰの間隔とは、仮想線ＶＬに沿って隣り合う２つの磁区制御点ＶＰの間の距離である。

[0021]（磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_S）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満である。磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ未満である場合、磁区制御処理線１１の密度が高くなりすぎて、騒音特性の改善が難しくなる。磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２０ｍｍ超である場合、磁区制御処理線１１の密度が低くなりすぎて、鉄損特性の改善が難しくなる。D_Sは、好ましくは３ｍｍ以上、４ｍｍ以上、または５ｍｍ以上である。D_Sは、好ましくは１８ｍｍ以下、１５ｍｍ以下、または１０ｍｍ以下である。

[0022]（磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sと最大値D_Lとの比率D_L/D_S）

また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、且つ、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上である。D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L/D_Sが３以上となるような仮想線ＶＬを１本以上配置することが可能な方向性電磁鋼板１は、図１に例示されるように、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘを含むこととなる。

[0023] なお、評価領域及び仮想線ＶＬを配置する位置に応じて、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_L及び最小値D_Sは変化しうる。図１に例示される方向性電磁鋼板１においては、D_L/D_Sが３未満となるように評価領域及び仮想線ＶＬを位置決めすることも可能である。しかし、$2\text{mm} \leqq D_S < 20\text{mm}$かつ$3 \leqq D_L/D_S$である仮想線ＶＬを任意の箇所に１本以上配置可能な方向性電磁

鋼板１は、磁区制御点ＶＰの間隔に関する本開示の要件を満たすとみなされる。従って、図１の方向性電磁鋼板１は、磁区制御点ＶＰの間隔に関する本開示の要件を満たす。

[0024] 一方、図２に例示される、方向性電磁鋼板１の全幅にわたって延在する複数の磁区制御処理線１１が等間隔に配置された方向性電磁鋼板１は、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘを含まない。図２の方向性電磁鋼板１には、$3 \leqq D_L / D_S$である仮想線ＶＬを配置することができない。従って、図２の方向性電磁鋼板１は、磁区制御点ＶＰの間隔に関する本開示の要件を満たさない。

[0025] 最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L / D_Sが３以上であればよく、上限は特に限定されない。ただ、必要に応じて、最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L / D_Sの上限は、２４としてもよい。

[0026] （β角）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御処理線１１において測定されたβ角が、所定の範囲内とされる。β角とは、圧延直角方向ＴＤの軸まわりにおける結晶粒のＧｏｓｓ方位からのずれ角である。β角を制御することが、方向性電磁鋼板１の磁気特性の制御に効果的である旨が知られている。なお、圧延面法線方向ＮＤの軸まわりにおける結晶粒のＧｏｓｓ方位からのずれ角はα角と称され、圧延方向ＲＤの軸まわりにおける結晶粒のＧｏｓｓ方位からのずれ角はγ角と称される。

[0027] 図３に示されるように、磁区制御処理前の方向性電磁鋼板１（後述する原板２）において、β角と磁区幅との間には密接な関係がある。図３は、磁区制御処理前の方向性電磁鋼板１のβ角と磁区幅の平均値との関係の一例を示すグラフである。磁区制御処理前の方向性電磁鋼板１においては、β角が小さいほど、磁区幅が大きくなる。ただし、磁区制御処理後の方向性電磁鋼板１においては、図３に示される関係は成り立たない。磁区制御処理は、磁区制御前の磁区幅が広い領域の磁区幅を小さくさせる一方で、結晶粒の方位（α角、β角、γ角）を変化させないからである。

[0028] （｜β_L｜）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、最も長い間隔を有する２つの磁区制御点ＶＰの間で測定されるβ角が規定される。具体的には、少なくとも１本の、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L/D_Sが３以上の仮想線ＶＬにおいて、間隔が上述の最大値D_Lとなる２つの磁区制御点ＶＰの間で測定される、β角の絶対値の平均値｜β_L｜が１．５°以上である。図１に示されるように、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L/D_Sが３以上である仮想線ＶＬには、磁区制御処理が行われていない領域Ｘが存在し、隣り合う磁区制御点ＶＰが広く離れた箇所がある。一方、全幅にわたって延在する複数の磁区制御処理線１１が等間隔に配置された、通常の磁区制御処理後の方向性電磁鋼板１においては、磁区制御処理が行われていない領域Ｘが存在しない。また、仮に、通常の磁区制御処理後の方向性電磁鋼板１において、磁区制御処理が行われていない領域Ｘが存在したとしても、すなわち、方向性電磁鋼板１が、複数の磁区制御処理線１１がランダムに、不等間隔に配置された方向性電磁鋼板１であっても、その領域Ｘにおける磁区幅は広く、またβ角は小さい。従って、仮に、通常の方向性電磁鋼板１に、磁区制御処理が行われていない領域Ｘが設けられていた場合、当該領域を通る仮想線ＶＬにおけるβ角の絶対値の平均値は小さい値であり、磁区幅は大きい値となる。当業者であれば、磁区制御処理が行われていない領域Ｘを、可能な限り小さくしようとするはずである。しかし、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御処理が行われていない領域Ｘおける磁区幅は狭く、領域Ｘにおいて測定される｜β_L｜が、大きい値とされているのである。

[0029] ｜β_L｜は１．５°以上、２．０°以上、または２．５°以上であることが一層好ましい。｜β_L｜の上限値は特に限定されないが、例えば１０．０°以下、７．０°以下、又は５．０°以下であることが一層好ましい。

[0030] （基本原理及び作用効果）

本発明者らは、２ｍｍ≦D_S＜２０ｍｍ、３≦D_L/D_S、且つ１．５°≦｜

β_L｜である仮想線ＶＬを１本以上設定可能な方向性電磁鋼板において、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成することができることを知見した。何故なら、このような方向性電磁鋼板１においては、鉄損の低減に寄与する部分にのみ磁区制御処理が適用されており、磁区制御処理が不要な部分には磁区制御処理線１１が設けられていないからである。以下、図４Ａ～図４Ｃ等を参照しながら、本開示の基本原理及び作用効果について説明する。

[0031] まず本発明者らは、磁区制御処理の前後における方向性電磁鋼板１の磁区構造を比較した。図４Ａに、磁区制御処理前の方向性電磁鋼板１の磁区幅の分布の一例を示す。図４Ｂに、図４Ａの方向性電磁鋼板１の表面に対して磁区制御処理を施した後の磁区幅の分布を示す。ここでの磁区制御処理は、圧延方向ＲＤにほぼ垂直な方向に沿って連続波のレーザ照射をすることによってなされたものである。図４Ａ及び図４Ｂに示す磁区幅の分布は、方向性電磁鋼板１の磁区画像から、後述の２次元フーリエ変換を用いて導出されたものである。

[0032] さらに図４Ｃに、図４Ａ及び図４Ｂの差分を示す。図４Ｃは、図４Ａ及び図４Ｂに示す磁区制御処理の前後において、磁区幅が５０μｍ以上細分化した領域を表している。図４Ｃによれば、磁区制御処理によって磁区幅が細分化された領域が可視化される。

[0033] 図４Ｃによれば、磁区制御処理によって５０μｍ以上の磁区細分化が生じた領域は、図４Ａの暗色部、即ち磁区制御処理の前段階において磁区幅が広い領域であることがわかる。特に、元の磁区幅が約５００μｍ以上の領域において、磁区細分化効果が顕著に現れていることがわかる。一方、図４Ａの明色部、即ち磁区制御処理の前段階において磁区幅が狭い領域においては、磁区制御処理の効果がほとんど現れていない。磁区制御処理前の磁区幅に応じて、磁区制御処理の効果が異なるのである。

[0034] 本発明者らは、磁区制御処理によって生じる磁区幅の減少量と、磁区制御処理前の磁区幅との関係をさらに詳細に調査した。図５に、同一位置における磁区制御処理前の磁区幅と、磁区制御処理前の磁区幅との関係を示す。磁

区制御処理は、レーザ照射とした。レーザ照射の際には、平均照射エネルギー密度Ｕａ（ｍＪ／ｍｍ^2）、及び照射ピッチＰＬ（ｍｍ）を、それぞれ、Ｕａ＝１．５ｍＪ／ｍｍ^2、ＰＬ＝４ｍｍとした。

[0035] 図５によれば、磁区幅が狭い領域においては、磁区制御処理による磁区細分化効果が現れにくいことがわかる。特に、磁区幅が約５００μｍ以下の領域においては、磁区制御処理の前後で磁区幅が略同一であった。従って、磁区制御処理による鉄損の低減効果は、磁区制御前の磁区幅が広い領域においては大きいが、磁区制御前の磁区幅が十分に狭い領域においては充分に得られないと考えられる。磁区幅が狭い領域に形成される磁区制御処理線１１は、還流磁区による騒音特性の悪化を招くものと考えられる。

[0036] 以上の知見によれば、従来の方向性電磁鋼板１の磁区制御処理においては、磁区制御が不要な部分にまで磁区制御を行っており、これが騒音の増大に寄与していることが明らかとなった。また、磁区幅が広い領域（即ちβ角が小さい領域）に優先的に磁区制御処理を行うことが、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成するために極めて有効であることがわかった。磁区幅が広い領域における磁区制御処理は、鉄損を低減することができる。また、磁区幅が狭い領域（即ちβ角が大きい領域）における磁区制御処理を最小限とすることにより、騒音特性の悪化を防止することができる。

[0037] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御処理前に磁区幅が狭かった領域には、磁区制御処理線１１が設けられていない。そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１は、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘを含む。この領域Ｘを横切るように評価領域及び仮想線ＶＬを設定した場合、２ｍｍ≦D_S＜２０ｍｍ、且つ３≦D_L／D_Sとなる。磁区制御処理線１１を設けないことにより、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の騒音特性は改善される。

[0038] また、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘは、磁区制御処理前に磁区幅が狭く、β角が大きかった領域である。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘにおいてもβ

角が大きい。したがって、この領域Ｘを横切るように評価領域及び仮想線ＶＬを設定した場合、１．５°≦｜β_L｜となる。本実施形態に係る方向性電磁鋼板１において、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘは、鉄損特性を悪化させない。

[0039] 加えて、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御処理前に磁区幅が広い領域には磁区制御処理が行われている。従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の鉄損は磁区制御処理により改善されている。

[0040] 以上、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の、最も基本的な態様について説明した。以下、一層好ましい態様について説明する。

[0041] （２ｍｍ≦D_S＜２０ｍｍ、３≦D_L／D_S、且つ１．５°≦｜β_L｜である仮想線ＶＬの本数）

本発明者らの検討結果によれば、磁区制御処理前の原板２において、磁区幅が狭い領域（磁区制御処理を必要としない領域）は、原板２の表面全体に散在していた。原板２の表面全体に散在する磁区幅が狭い領域を全て回避して、適切に磁区制御をすることが好ましい。これにより、磁区制御処理後の方向性電磁鋼板１においても、磁区制御処理線１１が設けられない領域Ｘが、表面全体に散在していることが望ましい。

[0042] 従って、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、評価領域の内部に、圧延方向ＲＤに平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で設定した場合において、２本以上の仮想線のそれぞれにおいて、磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L／D_Sが３以上であり、間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点ＶＰの間で測定される、β角の絶対値｜β_L｜が１．５°以上であることが好ましい。１ｍｍ≦D_S＜２０ｍｍ、３≦D_L／D_S、且つ１．５°≦｜β_L｜である仮想線ＶＬの本数は、３以上、４以上、５以上、又は１０以上であることが一層好ましい。

[0043] （｜β_L｜と｜β_S｜との関係）

２ｍｍ≦D_S＜２０ｍｍ、３≦D_L／D_S、且つ１．５°≦｜β_L｜である仮

想線ＶＬにおいては、｜β_L｜と、間隔が上記最小値D_Sである２つの磁区制御点ＶＰの間で測定されるβ角の絶対値の平均値｜β_S｜とが、下記式を満たすことが一層好ましい。

$$0.5^\circ \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

｜β_L｜－｜β_S｜が０．５°以上である場合、磁区制御処理を施す領域をβ角によって選択的に決定していることを示している。磁区制御前の磁区幅の広い、鉄損低減効果が大きい領域に集中して磁区制御処理を施していることから、騒音特性の一層の改善が達成される。

[0044]（磁区制御処理線１１の態様）

磁区制御処理線１１の種類は特に限定されないが、好適な例は熱歪み、及び／または溝である。熱歪みは、例えばレーザの照射、電子ビームの照射、及びイオン注入等の手段を用いて形成することができる。溝は、例えばレーザの照射、電子ビームの照射、及び機械加工等の手段を用いて形成することができる。

[0045] 熱歪みは、歪取焼鈍又はこれに準じる熱処理によって消滅する。そのため、方向性電磁鋼板１が熱処理される場合は、磁区制御処理線１１を溝とすることが好ましい。一方、熱歪みは容易に形成することができるので、製造工程の簡略化が求められる場合は、磁区制御処理線１１を熱歪みとすることが好ましい。方向性電磁鋼板１が、熱歪み及び溝の両方を備えてもよい。

[0046]（最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L／D_Sが５以上）

本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御前の磁区幅の広い領域に選択的に磁区制御処理を施すことを特徴とするが、この場合、一般的な結晶粒サイズを有する鋼板よりも、粗大な結晶粒サイズを有する鋼板に対して上記処理を施すことで、さらに顕著な効果を得ることができる。

[0047] 例えば、一般的に、磁束密度を高めるためにＧｏｓｓ方位への方位集積度を高めようとすると、製造方法に起因して結晶粒径が大きくなる傾向を持つ。このような粗大な結晶粒サイズを有する鋼板は、磁束密度に優れるが、結晶粒が大きすぎるため磁区制御処理を施さない場合に鉄損が高い傾向にあり

、そのため、磁区制御を施すことが実質的に必要となる。しかし、上記したように、従来の磁区制御処理を施せば、方向性電磁鋼板の鉄損を低減するのに有効である反面で、方向性電磁鋼板の騒音特性を悪化させやすい。

[0048] 一方、粗大な結晶粒サイズを有する鋼板に対して、本実施形態のように、磁区制御前の磁区幅の広い領域に選択的に磁区制御処理を施せば、磁束密度に優れることに加えて、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成し得る方向性電磁鋼板を得ることができる。

[0049] 粗大な結晶粒サイズを有する鋼板に対して、上記した本実施形態に特有の磁区制御処理を施せば、鋼板が粗大な結晶粒サイズを有することに起因して、上記した特徴のうち、特に、最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sの値が変化する。

[0050] 具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、下記の特徴を満たすことが好ましい。少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、仮想線ＶＬと、磁区制御処理線１１との交点である磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L/D_Sが５以上であり、且つ間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点ＶＰの間で測定される、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上であることが好ましい。

[0051] 上記に加えて、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、下記の特徴をさらに満たすことが好ましい。２本以上の仮想線ＶＬのそれぞれにおいて、磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L/D_Sが５以上であり、且つ間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点ＶＰの間で測定される、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上であることが好ましい。

[0052] 上記に加えて、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、下記の特徴をさらに満たすことが好ましい。D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、D_L/D_Sが５以上であり、且つ$|\beta_L|$が１．５°以上である仮想線ＶＬにおいて、$|\beta_L|$と、磁区制御点ＶＰの間隔が最小値D_Sとなる２つの磁区制御点ＶＰの

間で測定されるβ角の絶対値の平均値｜β_S｜とが、下記式を満たすことが好ましい。

$$0.5^\circ \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

[0053] 粗大な結晶粒サイズを有する鋼板に対して、上記した本実施形態に特有の磁区制御処理を施すことで、最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sの値が上記した特徴的な値となるため、本実施形態では、方向性電磁鋼板１の結晶粒径を規定する必要がない。本実施形態に特有の磁区制御処理を施して比D_L/D_Sの値が３以上であることを前提として、その上で、比D_L/D_Sの値が５以上であるとき、方向性電磁鋼板１の結晶粒径は、従来と比較して粗大であるとみなせる。

[0054] なお、一般的な結晶粒サイズを有する方向性電磁鋼板では、最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sの値が５未満となることが多い。

[0055] ただ、粗大な結晶粒サイズを有する鋼板の判断方法として、仮想線と結晶粒界との交点の数を指標として用いればよい。例えば、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上である仮想線ＶＬのうち、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、仮想線ＶＬと結晶粒界との交点である粒界点の数が２個以下であればよい。

[0056] 上記に加えて、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、２本以上の仮想線ＶＬのそれぞれにおいて、上記粒界点の数が２個以下であってもよい。

[0057] なお、一般的な結晶粒サイズを有する方向性電磁鋼板では、上記粒界点の数が、３～１０程度となる。

[0058]（最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３未満である仮想線ＶＬの本数）

また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、磁区制御前の磁区幅の広い領域に選択的に磁区制御処理を施すことを特徴とするが、この場合、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、比D_L/D_Sが３以上であり、且つ｜β_L｜が１．５°以上である一方で、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、最大値D_Lと最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３

未満となることがある。

[0059] そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、上記の比D_L/D_Sが３未満であってもよい。

[0060] なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１では、比D_L/D_Sが３未満である仮想線ＶＬが、必ずしも、一辺の長さが５０ｍｍであり且つ一辺が方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域に含まれるわけではない。例えば、上記の評価領域を２０領域設定したときに、少なくとも１つの評価領域に、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、比D_L/D_Sが３以上であり、且つ$|\beta_L|$が１．５°以上である仮想線ＶＬと、比D_L/D_Sが３未満である仮想線ＶＬとがともに含まれれば、磁区制御前の磁区幅の広い領域に対して選択的に磁区制御処理を施しているとみなすことができる。

[0061]（２．方向性電磁鋼板１の製造装置）

次に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の製造装置の一例について説明する。ただし、以下に説明される製造装置は例示的なものに過ぎない。本実施形態に係る方向性電磁鋼板１は、任意の装置を用いて製造可能である。

[0062] 図６に、原板２、即ち磁区制御処理前の方向性電磁鋼板１の磁区画像を取得する画像取得装置３０のハードウェア構成の一例を示す。画像取得装置３０は、光源部３１と、磁気光学センサ（ＭＯセンサ３３）と、イメージセンサ３５と、信号処理部３７とを備える。

[0063] 光源部３１は、発光ダイオード（ＬＥＤ）からなる光源を有しており、ＭＯセンサ３３に対して、偏光面の揃った光を照射する。

[0064] ＭＯセンサ３３は、磁性体の磁区構造を測定する装置である。ＭＯセンサ３３は、測定対象である磁性体試料が載置される観察面を有する。光源部３１から照射された光は、ＭＯセンサ３３の内部を通って反射層で反射される。反射光は、ＭＯセンサ３３の内部を再び通って、ＭＯセンサ３３の外部に出力される。磁性体試料である原板２がＭＯセンサ３３の観察面上に載置されると、ＭＯセンサ３３の内部に、原板２の自発磁化の向きに応じた漏れ磁場が生じる。この漏れ磁場によって、反射光の偏光面が回転する。

[0065] イメージセンサ３５は、Ｃｏｍｐｌｅｍｅｎｔａｒｙ Ｍｅｔａｌ－Ｏｘｉｄｅ－Ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒ（ＣＭＯＳ）イメージセンサである。イメージセンサ３５は、ＭＯセンサ３３からの反射光を受光面に結像させて光電変換し、光電変換後のアナログ信号を信号処理部３７に出力する。偏光面が回転した反射光をイメージセンサ３５で検出することにより、漏れ磁場の分布を得ることができ、原板２の磁区構造が明らかとなる。

[0066] 信号処理部３７は、アンプ、ＡＤコンバータ、Ｄｉｇｉｔａｌ Ｓｉｇｎａｌ Ｐｒｏｃｅｓｓｏｒ（ＤＳＰ）等を有する。イメージセンサ３５から出力されたアナログ信号は、アンプにより増幅される。そしてアナログ信号は、ＡＤコンバータによりデジタル信号に変換される。このデジタル信号に、ＤＳＰを用いた所定のデジタル処理を施すことにより、画像信号が生成される。信号処理部３７で生成された画像信号は、ケーブルを介して、又は無線通信により、解析装置４０（図７参照）に出力される。

[0067] 図７に、原板２の磁区構造を解析する解析装置４０のハードウェア構成を示す。解析装置４０は、パーソナルコンピュータ（ＰＣ）等のコンピュータデバイスである。解析装置４０は、演算部４１と、メモリ４３と、表示部４５と、入力部４７と、通信Ｉ／Ｆ４９とを備える。

[0068] 演算部４１は、Ｃｅｎｔｒａｌ Ｐｒｏｃｅｓｓｉｎｇ Ｕｎｉｔ（ＣＰＵ）を有する。演算部４１は、メモリ４３に記憶されたプログラムに従って、原板２の磁区画像から磁区構造を解析する。そして演算部４１は、磁区制御処理を適用する箇所である磁区制御処理領域２１を決定する。演算部４１によって実行される処理については、後に詳細に説明する。

[0069] メモリ４３は、Ｒｅａｄ Ｏｎｌｙ Ｍｅｍｏｒｙ（ＲＯＭ）及びＲａｎｄｏｍ Ａｃｃｅｓｓ Ｍｅｍｏｒｙ（ＲＡＭ）を有する。ＲＯＭは、演算部４１のＣＰＵによって実行されるプログラム、及びこれらのプログラムの実行のために必要なデータを格納する。ＲＯＭに格納されたプログラム及びデータは、ＲＡＭにロードされて実行される。

[0070] メモリ４３は、ハードディスクドライブ（ＨＤＤ）等の磁気メモリ、又は

光ディスク等の光メモリを有してもよい。あるいは、メモリ４３は、解析装置４０に着脱可能で、コンピュータ読み取り可能な記録媒体にプログラムやデータを格納するようにしてもよい。あるいは、メモリ４３は、演算部４１で実行されるプログラムを、通信Ｉ／Ｆ４９を介してネットワークから受信するようにしてもよい。

[0071] 表示部４５は、液晶ディスプレイ（ＬＣＤ）、プラズマディスプレイ、又は有機エレクトロ・ルミネッセンス（ＥＬ）ディスプレイ等のディスプレイを有する。表示部４５は、画像取得装置３０から出力された画像信号に基づいて画像を表示する。また、表示部４５は、演算部４１による磁区構造の解析結果を表示する。

[0072] 入力部４７は、マウス、キーボード等の入力デバイスを有する。通信Ｉ／Ｆ４９は、Ｌｏｃａｌ　Ａｒｅａ　Ｎｅｔｗｏｒｋ（ＬＡＮ）、Ｗｉｄｅ　Ａｒｅａ　Ｎｅｔｗｏｒｋ（ＷＡＮ）、インターネット等のネットワークを介して外部機器との間でデータの送受信を行うためのインターフェースである。

[0073] 演算部４１として、ＣＰＵ等の汎用ハードウェアの代わりに、磁区構造の解析に特化した、特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ）又はＦｉｅｌｄ　Ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ　Ｇａｔｅ　Ａｒｒａｙ（ＦＰＧＡ）等の専用ハードウェアを採用してもよい。

[0074] なお、図６及び図７は、画像取得装置３０と解析装置４０とが別々のデバイスである場合を示しているが、画像取得装置３０及び解析装置４０が一体化したシステムを採用してもよい。

[0075] 原板２の表面に熱歪みを導入する手段として、レーザの照射、電子ビームの照射、イオン注入等の公知の手段を採用することができる。原板２の表面に溝を形成する手段として、レーザの照射、電子ビームの照射、機械加工等の公知の手段を採用することができる。以下では、レーザ照射により熱歪みを導入するレーザ照射装置５００の構成について説明する。

[0076] 図８に、レーザ照射装置５００の構成を示す。レーザ照射装置５００は、

ポリゴンミラー５０１と、光源装置５０３と、コリメータ５０５と、集光レンズ５０７と、モータ５０９と、センサ５１１と、制御部５１３と、通板装置５１５とを備える。

[0077] 通板装置５１５は、原板２を圧延方向ＲＤに通板する。

[0078] ポリゴンミラー５０１は、例えば正多角柱状をなす。正多角柱状のポリゴンミラー５０１を構成する複数の側面に、それぞれ、複数の平面鏡が設けられている。レーザビームＬＢが、光源装置５０３からコリメータ５０５を介して、ポリゴンミラー５０１の平面鏡に一方向（水平方向）に入射し、平面鏡で反射される。

[0079] ポリゴンミラー５０１は、モータ５０９からの駆動によって回転軸Ｏ１周りに回転可能である。ポリゴンミラー５０１の回転角度に応じて、平面鏡に対するレーザビームＬＢの入射角が順次変化する。これにより、レーザビームＬＢの反射方向が順次変化し、原板２の表面を走査することができる。図８の符号Ｐは、隣接する磁区制御処理線１１の間隔、即ちレーザビームＬＢの照射ピッチを表している。

[0080] 光源装置５０３は、制御部５１３の制御のもとで、所定の照射方式（例えば、連続照射方式又はパルス照射方式）でレーザビームＬＢを出力する。

[0081] 集光レンズ５０７は、ポリゴンミラー５０１から反射されたレーザビームＬＢの光路に設けられている。集光レンズ５０７は、所定の焦点距離の集光光学系を構成している。ポリゴンミラー５０１から反射されたレーザビームＬＢが、集光レンズ５０７を介して原板２の表面に集光されることで、原板２の表面に熱歪みが導入される。

[0082] モータ５０９は、ポリゴンミラー５０１と連結されている。モータ５０９は、制御部５１３の制御のもとで、ポリゴンミラー５０１を回転駆動する。

[0083] センサ５１１は、モータ５０９の駆動軸と連結されている。センサ５１１は、モータ５０９によって回転するポリゴンミラー５０１の回転角度を検出する。さらにセンサ５１１は、検出した回転角度を示す信号（以下、回転角度信号という。）を制御部５１３に出力する。

[0084] 制御部５１３は、プロセッサからなる。制御部５１３は、光源装置５０３、モータ５０９、センサ５１１、及び通板装置５１５と接続されている。制御部５１３は、通板装置５１５から速度信号の入力を受ける。さらに制御部５１３は、モータ５０９に対して、ポリゴンミラー５０１の回転駆動を指示する信号を出力する。

[0085] また、制御部５１３は、磁区制御処理領域２１を表す応力導入信号と、センサ５１１から出力された回転角度信号とに基づいて、光源装置５０３が出力するレーザビームＬＢのパワーのオンとオフを制御する。レーザ照射装置５００が解析装置４０に電気的に接続されている場合、応力導入信号は、解析装置４０からレーザ照射装置５００に入力される。なお、応力導入信号は、オペレータによってレーザ照射装置５００に入力されてもよい。

[0086] （３．方向性電磁鋼板１の製造方法）

次に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の製造方法について説明する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の製造方法によれば、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１を好適に製造することができる。ただし、以下に説明される製造方法は、方向性電磁鋼板１の好適な製造方法の一例にすぎず、方向性電磁鋼板１を限定するものではない。なお、説明の便宜のために、製造方法の説明において製造装置に適宜言及する。しかし、以下に言及される製造装置は、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の製造方法を実施するための好適例に過ぎない。

[0087] 本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の製造方法は、図９のフローチャートに示されるように、方向性電磁鋼板１の原板２の磁区画像を取得する工程Ｓ６２と、磁区画像における磁区幅の分布に基づいて、磁区制御処理領域２１を決定する工程Ｓ６４と、磁区幅の分布に基づいて決定された、磁区制御処理領域２１に、磁区制御処理を適用する工程Ｓ６６と、を備え、方向性電磁鋼板１に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤと平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、評価領域の内部に、圧延方向ＲＤに平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で設

定した場合において、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、仮想線ＶＬと、磁区制御処理線１１との交点である磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_Sを２ｍｍ以上２０ｍｍ未満とし、磁区制御点ＶＰの間隔の最大値D_Lと、最小値との比を３以上とする。

[0088] まず、原板２の磁区画像を取得する（図９のＳ６２参照）。原板２とは、磁区制御処理を適用する前の方向性電磁鋼板１のことである。磁区画像は、例えば画像取得装置３０により取得することができる。次いで、磁区画像から１８０°磁区の幅（磁区幅）の分布を導出する。原板２における磁区幅の分布は、例えば解析装置４０の演算部４１を用いることにより導出可能である。

[0089] そして、磁区幅が所定値以上（例えば、約５００μｍ以上）の領域を、磁区制御処理領域２１として決定する（図９のＳ６４参照）。図１２に、図１の方向性電磁鋼板１の原板２を示す。図１２における網掛け領域が、磁区制御処理領域２１である。また、図１２における白色領域が、非磁区制御処理領域２２である。磁区制御処理領域２１の磁区幅は所定値以上である。非磁区制御処理領域２２の磁区幅は所定値未満である。磁区制御処理領域２１におけるβ角の絶対値は、非磁区制御処理領域２２よりも小さい傾向にある。

[0090] 表示部４５に表示された磁区画像をオペレータの目視で観察することによって、磁区制御処理領域２１を決定し、磁区制御処理領域２１を表す応力導入信号をレーザ照射装置５００に入力するようにしてもよい。

[0091] 次いで、磁区制御処理領域２１に対して優先的に、磁区制御処理を施す（図９のＳ６６参照）。好ましくは、磁区制御処理領域２１のみに対して、磁区制御処理を施す。磁区制御処理線１１が熱歪みである場合、磁区制御処理は、レーザ照射装置５００によるレーザビームＬＢの照射によって実行してもよいし、イオン注入や電子ビームの照射などの他の手段を採用してもよい。磁区制御処理線１１が溝である場合、磁区制御処理は、機械加工のための工具を用いて実行してもよい。

[0092] 磁区制御処理領域２１を決定する方法の一例について詳細に説明する。磁

区制御処理領域２１を特定するための処理は、例えば、解析装置４０の演算部４１によって実行される。

[0093] 演算部４１は、例えば線分法又はフーリエ変換を用いて、原板２の磁区幅の分布を導出する。そして演算部４１は、磁区幅が所定値以上（例えば、約５００μｍ以上）の領域を、磁区制御処理を優先的に適用する箇所として決定する。

[0094] 線分法では、磁区と垂直な線分を引いて評価する。線分の間隔は、磁区と平行な方向１ｃｍあたり３本となるように引く。１８０°磁壁と線分との交点の間隔に基づいて、磁区幅を導出する。

[0095] フーリエ変換は、方向性電磁鋼板１及び原板２等のような、周期的な磁区構造を有する磁性体の磁区構造を解析する手段として特に有効である。以下では、音声信号の時間・周波数解析に古くから用いられている信号処理法の一つである短区間フーリエ変換（ｓｈｏｒｔ－ｔｅｒｍ Ｆｏｕｒｉｅｒ ｔｒａｎｓｆｏｒｍ）を２次元領域に拡張した短区間２次元フーリエ変換（以下、「ＳＴ２ＤＦＴ」と呼ぶ。）を用いて、原板２の磁区幅の分布を導出する方法について説明する。

[0096] 画像取得装置３０で取得された画像信号が表す画像（磁区画像）を２次元座標（ｋ－ｌ座標）のデータ列としてｘ（ｋ，ｌ）と表記する。本実施形態において解析対象とする磁区画像は、グレースケールなど、２種類の色によって二値化された画像、又は３以上の階調（多階調）で表現された画像である。

[0097] 原板２の磁区幅の分布を導出するため、演算部４１は、以下の（Ａ－１）、（Ａ－２）及び（Ａ－３）の処理を実行する。

（Ａ－１）磁区画像から複数の部分領域を切り出す処理；

（Ａ－２）ＳＴ２ＤＦＴを行う処理；

（Ａ－３）磁区幅の分布を導出する処理.

以下、Ａ－１～Ａ－３の処理について詳細に説明する。

[0098] （Ａ－１）磁区画像から複数の部分領域を切り出す処理

磁区画像から複数の部分領域を切り出して、それぞれの周波数構造を分析するために、ｋ方向の範囲を０≦ｋ≦N_k－１とし、ｌ方向の範囲を０≦ｌ≦N_l－１とした矩形窓の窓関数Ｗａ（ｋ，ｌ）を用いる（N_k及びN_lは自然数）。窓関数Ｗａ（ｋ，ｌ）としては、Ｈａｍｍｉｎｇ窓、Ｈａｎｎｉｎｇ窓、Ｂｌａｃｋｍａｎ窓などが適用可能である。

[0099] 磁区画像のデータ列ｘ（ｋ，ｌ）における観察位置をインデックス（ｎ，ｍ）で表記し、ｋ方向及びｌ方向における窓関数Ｗａ（ｋ，ｌ）のシフト量を、それぞれ、S_k及びS_lと表記すると（ｎ、ｍ、S_k、S_lは整数）、式（１）のように、磁区画像から$nS_k \leqq k \leqq nS_k + N_k - 1$、$mS_l \leqq l \leqq mS_l + N_l - 1$の範囲を切り出した部分領域のデータ列$x_{nm}(k - nS_k, l - mS_l)$が得られる。

[数1]

$$x_{nm}(k - nS_k, l - mS_l) = W_a(k - nS_k, l - mS_l)x(k, l) \qquad \cdots(1)$$

[0100] 図１０に、磁区画像Ｇから、観察位置（ｎ，ｍ）＝（１，１）、（２，２）、（３，３）、…、（Ｐ，Ｑ）（Ｐ及びＱは自然数）のそれぞれに対応する部分領域が切り出された例を示している。

[0101] 本実施形態において、窓関数Ｗａ（ｋ，ｌ）の範囲を定めるN_k及びN_lは、それぞれ、部分領域におけるｋ方向の画素数及びｌ方向の画素数に対応するパラメータである。

[0102] （Ａ－２）ＳＴ２ＤＦＴを行う処理

部分領域のデータ列を$x_{nm}(n', m') = x_{nm}(k - nS_k, l - mS_l)$と定義し、$x_{nm}(n', m')$に対して２次元フーリエ変換を施すと、式（２）のように、観察位置（ｎ，ｍ）の部分領域に対応する部分フーリエ画像Ｘ（f_k，f_l，ｎ，ｍ）が得られる。

[数2]

$$X(f_k, f_l, n, m) = \sum_{n'=0}^{N_k-1} \sum_{m'=0}^{N_l-1} x_{nm}(n', m') \exp\left\{-2\pi j\left(\frac{f_k n'}{N_k} + \frac{f_l m'}{N_l}\right)\right\} \qquad \cdots(2)$$

ここで、f_k及びf_lは空間周波数である。

[0103] 空間周波数f_kの分解能をΔf_k、空間周波数f_lの分解能をΔf_lと表記すると、Δf_k及びΔf_lは式（３）のように定義される。

[数3]

$$\begin{cases} \Delta f_k = \dfrac{2}{N_k \Delta k} \\ \Delta f_l = \dfrac{2}{N_l \Delta l} \end{cases} \quad \cdots (3)$$

ここで、Δｋ及びΔｌは、それぞれ、磁区画像におけるｋ方向の空間分解能及びｌ方向における空間分解能である。

[0104] 例えば、図１０に示した各部分領域のデータ列x_{nm}（ｋ－ｎS_k，ｌ－ｍS_l）に対して２次元フーリエ変換を施すと、図１１に示すように、観察位置（ｎ，ｍ）ごとに部分フーリエ画像Ｘ（f_k，f_l，ｎ，ｍ）が得られる。

[0105] （Ａ－３）磁区幅の分布を導出する処理

部分フーリエ画像Ｘ（f_k，f_l，ｎ，ｍ）が得られると、部分フーリエ画像Ｘ（f_k，f_l，ｎ，ｍ）のスポットのピーク位置の座標（ｋ成分f_k^{max}（ｎ，ｍ）及びｌ成分f_l^{max}（ｎ，ｍ））が求められる。なお、ピーク位置の導出について、ｋ＝０、ｌ＝０の近傍の領域は、画像のコントラストに大きく依存する部分であるため、除外する。

[0106] そして、式（３）で定義した空間周波数の分解能と、部分フーリエ画像のスポットのピーク位置とから、式（４）のように、磁区幅の分布Ｌ（ｎ，ｍ）が導出される。

[数4]

$$L(n,m) = \frac{1}{\sqrt{\left(\Delta f_k f_k^{max}(n,m)\right)^2 + \left(\Delta f_l f_l^{max}(n,m)\right)^2}} \quad \cdots (4)$$

[0107] このように、ＳＴ２ＤＦＴを用いることにより、磁区画像の位置情報を保

ったまま、磁区幅の分布Ｌ（ｎ，ｍ）を定量的に導出することが可能となる。上述の図４Ａ～図４Ｃは、ＳＴ２ＤＦＴによって導出された磁区幅の解析結果を表している。

[0108] 図１２に、原板２の一例の平面図を示す。図１２の原板２は、図１の方向性電磁鋼板１の材料である。図１２には、磁区画像に基づいて特定された、原板２の磁区制御処理領域２１及び非磁区制御処理領域２２が示される。磁区制御処理領域２１は、磁区幅が所定値以上の領域である。原板２の磁区制御処理領域２１は、方向性電磁鋼板１におけるβ角が小さい領域と概ね対応する。また、原板２の非磁区制御処理領域２２は、方向性電磁鋼板１におけるβ角が大きい領域と概ね対応する。非磁区制御処理領域２２は、磁区幅が所定値未満の領域であり、β角が大きい領域である。図１２に示される、磁区制御処理領域２１の内部に設けられた破線に、磁区制御処理を適用する。この際、方向性電磁鋼板１に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤと平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、評価領域の内部に、圧延方向ＲＤに平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で設定した場合において、少なくとも１本の仮想線ＶＬにおいて、仮想線と、磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値を２ｍｍ以上２０ｍｍ未満とし、磁区制御点の間隔の最大値と、最小値との比を３以上とする。これにより、間隔が最大値D_Lである２つの磁区制御点のβ角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である、図１の方向性電磁鋼板１が得られる。

[0109] 演算部４１が磁区幅の分布Ｌ（ｎ，ｍ）を導出すると、演算部４１は、磁区幅が所定値以上の領域を、磁区制御処理領域２１（即ち、磁区制御処理を適用する領域）として決定する。レーザ照射装置５００の制御部５１３は、磁区制御処理領域２１に対するレーザビームＬＢのパワーをオンとし、好ましくは、非磁区制御処理領域２２（即ち、磁区制御処理領域２１以外の領域）に対するレーザビームＬＢのパワーをオフにするよう制御する。これにより、原板２の磁区制御処理領域２１に磁区制御処理線１１が導入される。ま

た、原板２の非磁区制御処理領域２２においては、磁区制御処理線１１の導入が最小限に抑制される。

[0110] なお、上述の手順によって、磁区制御処理後の方向性電磁鋼板１の磁区画像を得ることもできる。方向性電磁鋼板１の磁区画像において、磁区制御処理線１１が不明瞭な場合がある。この場合は、磁区制御処理線１１が明確に確認できるように、観察条件を調整してもよい。例えば、方向性電磁鋼板１の板面垂直方向（厚さ方向）に沿って直流磁場を印加することによって、磁区制御処理線１１を明瞭化することができる。

[0111] 以上、本開示の実施の形態について説明したが、本開示はこれに限定されることなく、その発明の技術的思想を逸脱しない範囲で適宜変更可能である。以下に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１、及びその製造方法の一層好適な例について説明する。断りが無い限り、以下に説明する好適な態様は、方向性電磁鋼板１、及びその製造方法の両方に適用可能である。本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、後述するように、母材鋼板の表面にフォルステライト被膜及び／または絶縁被膜を有してもよい。

[0112] 以下、それぞれについて説明する。ただし、方向性電磁鋼板が、母材鋼板と、フォルステライト被膜及び／または絶縁被膜とを有している場合、以下の、化学組成、磁区制御処理線、磁区制御領域、非磁区制御処理線に関する規定は、母材鋼板に関する規定である。ただし、板厚に関する規定は、母材鋼板と、フォルステライト被膜及び／または絶縁被膜とを含めた方向性電磁鋼板全体に関する規定である。

[0113]（化学組成及び板厚）

方向性電磁鋼板１及び原板２の化学組成は限定されず、公知の方向性電磁鋼板１と同等であればよい。例えば方向性電磁鋼板１及び原板２は、化学組成として、質量％で、Ｓｉ：２．５００～７．０００％、Ｍｎ：０．００～１．０００％、Ｃ：０～０．０８５％、酸可溶性Ａｌ：０～０．０６５％、Ｎ：０～０．０１２％、Ｃｒ：０～０．３００％、Ｃｕ：０～０．４００％、Ｐ：０～０．５００％、Ｓｎ：０～０．３００％、Ｓｂ：０～０．３００

％、Ｎｉ：０～１．０００％、Ｓ：０～０．０１５％、Ｓｅ：０～０．０１５％、Ｂｉ：０～０．０２０％、Ｎｂ：０～０．０３０％、Ｖ：０～０．０３０％、Ｍｏ：０～０．０３０％、Ｔａ：０～０．０３０％、Ｗ：０～０．０３０％、Ｂ：０～０．００８０％、Ｔｉ：０～０．０１５％を含有することができる。化学組成の残部は、Ｆｅ及び不純物を含む。

[0114] 方向性電磁鋼板１及び原板２の板厚は限定されないが、例えば０．１５ｍｍ～０．３０ｍｍであることが好ましい。０．３０ｍｍ以下とすることにより、古典的渦電流損を抑制し、鉄損を一層改善することができる。一方、板厚を０．１５ｍｍ以上とすることにより、圧延効率を向上させて、生産性を改善することができる。

[0115] （表面処理）

方向性電磁鋼板１及び原板２は、フォルステライト被膜を有してもよい。また、方向性電磁鋼板１及び原板２は、絶縁被膜を有してもよい。フォルステライト被膜及び絶縁被膜は、方向性電磁鋼板１の片面に形成されていても、両面に形成されていてもよい。

[0116] フォルステライト被膜は、例えば、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。フォルステライト被膜は例えば、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る。フォルステライト被膜は、例えば、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。一方、仕上げ焼鈍においてAl_2O_3を主体とする焼鈍分離剤を用いた場合には、フォルステライト被膜が形成されない場合がある。

[0117] 絶縁被膜は、方向性電磁鋼板１に電気絶縁性及び張力を付与する機能を有する。方向性電磁鋼板１に張力を付与して、方向性電磁鋼板１における磁壁移動を容易にすることで、方向性電磁鋼板１の鉄損を低減することができる。また、絶縁被膜によれば、耐蝕性、耐熱性、すべり性といった種々の特性を方向性電磁鋼板１にもたらすことができる。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溶液をフォルステライト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。

[0118] 絶縁被膜は、仕上げ焼鈍後かつ磁区制御処理後に形成することが好ましい。一方、仕上げ焼鈍工程後かつ磁区制御処理前に絶縁被膜を形成してもよい。磁区制御処理前に絶縁被膜を形成する場合、磁区制御処理線１１において絶縁被膜が剥離する場合がある。従って、磁区制御処理の後に、磁区制御処理線１１に対して絶縁被膜を再度形成することが好ましい。

[0119] （磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度）

磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度は特に限定されない。磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとが略平行であってもよい。即ち、磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度が実質的に０°であってもよい。一方、図１に例示されるように、磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度が０°超であってもよい。例えば磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度を、０°～４５°の範囲内の任意の値としてもよい。磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度を、１°以上、３°以上、又は５°以上としてもよい。磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度を、４０°以下、３５°以下、又は３０°以下としてもよい。

[0120] 図１に例示されるように、全ての磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度が同一であってもよい。即ち、全ての磁区制御処理線１１が互いに平行に延在していてもよい。一方、磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度がばらついていてもよい。即ち、複数の磁区制御処理線１１の一部又は全部が、互いに非平行に延在していてもよい。磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度の平均値を、１°以上、３°以上、又は５°以上としてもよい。磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度の平均値を、４０°以下、３５°以下、又は３０°以下としてもよい。角度の平均値は１本の磁区制御処理線に対し、複数の位置で圧延直角方向Ｔ

Ｄとなす角度を測定、あるいは複数本の磁区制御処理線が圧延直角方向ＴＤとなす角度を１点あるいは複数の位置で測定し、その平均値を算出すればよい。

[0121]（熱歪みにおいて導入される引張り応力の大きさ）

磁区制御処理線１１は、熱歪みであってもよい。熱歪みにおいては、引張り応力が導入されている。引張り応力が大きいほど、鉄損を改善する効果が高められる。一方、引張り応力が小さいほど、騒音特性が改善する。方向性電磁鋼板１に求められる特性に応じた引張り応力を適宜選択することができる。

[0122] 引張り応力の大きさは特に限定されないが、例えば磁区制御処理線１１の少なくとも一部において、任意の方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上、６０ＭＰａ以上、８０ＭＰａ以上であることが好ましい。少なくとも１つの方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上である場合、「任意の方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上」との要件が満たされているとみなされる。また、例えば磁区制御処理線１１の少なくとも一部において、任意の方向に対する引張り応力が３００ＭＰａ以下、２００ＭＰａ以下、１８０ＭＰａ以下、又は１５０ＭＰａ以下であることが好ましい。磁区制御処理線１１における任意の方向に対する引張り応力は、一様であってもよいし、ばらついていてもよい。

[0123]（溝の深さ及び幅）

磁区制御処理線１１は、溝であってもよい。溝の深さ及び幅が大きいほど、鉄損を改善する効果が高められる。一方、溝の深さ及び幅が小さいほど、騒音特性が改善する。方向性電磁鋼板１に求められる特性に応じた溝の形状を適宜選択することができる。

[0124] 溝の深さは特に限定されないが、例えば５μｍ～５０μｍとすることが好ましい。溝の深さを６μｍ以上、７μｍ以上、又は１０μｍ以上としてもよい。溝の深さを４８μｍ以下、４５μｍ以下、又は４０μｍ以下としてもよい。

[0125] 溝の幅（開口部における幅）は特に限定されないが、例えば１０μｍ～３００μｍとすることが好ましい。溝の幅を２０μｍ以上、３０μｍ以上、又は５０μｍ以上と規定してもよい。溝の幅を２８０μｍ以下、２５０μｍ以下、又は２００μｍ以下と規定してもよい。溝の深さ及び幅は、一様であってもよいし、ばらついていてもよい。ばらつく場合、複数の溝の深さ、幅の平均が上記の範囲であることが好ましい。

[0126]（測定方法）

以下に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板１の種々のパラメータの測定方法を説明する。なお、いずれのパラメータの測定も、方向性電磁鋼板１から採取された試料に対して行われる。例えば、両辺の長さが１００ｍｍ（又は１００ｍｍ以上）の矩形試料を、方向性電磁鋼板１から切り出して、測定に供することができる。方向性電磁鋼板１がコイルである場合は、コイルの任意の箇所から試料を採取すればよい。また、方向性電磁鋼板１が、変圧器やモータなどの電機製品に組み込まれた部品とされている場合も、当該部品の任意の箇所から試料を採取すればよい。部品のサイズが小さい場合、試料の１辺の長さが５０ｍｍ以上であれば、試料の１辺の長さを１００ｍｍ未満としてもよい。その際、試料に機械歪み等の影響を最小とするためワイヤーカット加工等の方法で試料を採取することが望ましい。

[0127]（磁区制御処理線１１の特定方法）

磁区制御処理線１１が溝である場合、磁区制御処理線１１は目視で特定可能である。方向性電磁鋼板１が絶縁被膜を有する場合は、公知の剥離剤を用いて絶縁被膜を除去することによって、磁区制御処理線１１が目視可能となる。

[0128] 磁区制御処理線１１が熱歪みである場合は、磁区制御処理線１１が目視で特定できないことがある。この場合、例えば図６に例示されるような画像取得装置３０を用いて、磁区画像を撮影する。必要に応じて、方向性電磁鋼板１の圧延面法線方向ＮＤに沿って直流磁場を印加しながら、磁区画像を撮影する。磁区画像を観察することにより、熱歪みの位置を特定することができ

る。

[0129]（圧延方向ＲＤ及び圧延直角方向ＴＤの特定方法）

方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤ及び圧延直角方向ＴＤは、以下に挙げる手段によって特定される。

（１）試料が、コイル状の方向性電磁鋼板１から切り出されたものである場合、コイルの幅方向を圧延直角方向ＴＤとみなす。また、圧延直角方向ＴＤ及び圧延面法線方向ＮＤに垂直な方向を、圧延方向ＲＤとみなす。

（２）試料が、電機製品の部品等から切り出されたものである場合、圧延方向ＲＤ及び圧延直角方向ＴＤを方向性電磁鋼板１の表面の圧延疵から特定する。圧延疵の延在方向を、圧延方向ＲＤとみなす。圧延方向ＲＤ及び圧延面法線方向ＮＤに垂直な方向を、圧延直角方向ＴＤとみなす。

（３）方向性電磁鋼板１の表面の圧延疵から圧延方向ＲＤ及び圧延直角方向ＴＤを特定することが困難である場合、圧延方向ＲＤ及び圧延直角方向ＴＤを方向性電磁鋼板１の結晶方位から特定する。具体的には、評価対象となる方向性電磁鋼板１の結晶方位を複数点で測定する。そして、当該測定点における結晶方位が圧延面法線方向ＮＤ（板厚方向）となす角度が最も直角に近い磁化容易軸＜００１＞からのずれ角が最小となる方向を、圧延方向ＲＤとみなし、圧延方向ＲＤ及び圧延面法線方向ＮＤに垂直な方向を、圧延直角方向ＴＤとみなす。

[0130]（磁区制御点ＶＰの間隔の最小値D_S及び最大値D_L）

磁区制御処理点の間隔の最小値D_S及び最大値D_Lは、以下の手順に沿って算出する。まず、方向性電磁鋼板１に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板１の圧延方向ＲＤと平行である正方形の評価領域を設定する。そして、評価領域の内部に、圧延方向ＲＤに平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で方向性電磁鋼板１の表面に設定する。次に、仮想線ＶＬと磁区制御処理線１１との交点である磁区制御点ＶＰを特定する。圧延方向ＲＤ及び磁区制御処理線１１の特定は、上述の手順に従って行う。そして、隣り合う磁区制御点ＶＰ同士の間隔を測定し、これら測定値の最小

値及び最大値を求める。

[0131] 評価領域及び仮想線ＶＬを設定する場所は限定されない。D_S及びD_L/D_Sが本開示の範囲内となる仮想線ＶＬが設定可能な任意の場所に、仮想線ＶＬを設定すればよい。例えば、磁区制御処理線１１が設けられていない領域Ｘを通るように仮想線ＶＬを設定すればよい。一方、D_S及びD_L/D_Sが本開示の範囲内となるような仮想線ＶＬを設定可能な場所が発見できなかった場合は、本開示の要件が満たされていないと推定される。

[0132]（β角の測定方法）

β角は、側面反射ラウエ法によって測定する。側面反射ラウエ法は、結晶方位の測定方法として広く知られている。ただし、β角は、測定し得られた数値の小数第二位を四捨五入して得られた値とする。すなわち、β角の有効数字を小数第一位までとする。

[0133]（$|\beta_L|$及び$|\beta_S|$）

$|\beta_L|$は、以下の手順で測定される。まず、上述の手段により、その間隔が仮想線ＶＬにおける最大値D_Lとなる、２つの隣り合う磁区制御点ＶＰを特定する。これらの磁区制御点ＶＰの間におけるβ角を、磁区制御点ＶＰの中点から１ｍｍ間隔で上述の手段によって測定する。なお、偶然に、間隔がD_Lとなる箇所が、１本の仮想線ＶＬにおいて２以上形成される場合がある。この場合、間隔が最大値D_Lとなる２つの隣り合う磁区制御点ＶＰが２組以上存在することになる。この場合、それぞれの隣り合う磁区制御点ＶＰの間におけるβ角を、磁区制御点ＶＰの中点から１ｍｍ間隔で測定し、そのβ角の絶対値の平均値を、当該仮想線ＶＬにおける$|\beta_L|$とみなせばよい。

$|\beta_S|$の測定手順は、$|\beta_L|$と同様である。まず、上述の手段により、その間隔が仮想線ＶＬにおける最小値D_Sとなる、２つの隣り合う磁区制御点ＶＰを特定する。これらの磁区制御点ＶＰの間におけるβ角を、上述の手段によって測定する。なお、偶然に、間隔がD_Sとなる箇所が、１本の仮想線ＶＬにおいて２以上形成される場合がある。この場合、間隔が最小値D_Sとなる２つの隣り合う磁区制御点ＶＰが２組以上存在することになる。この場合、

それぞれの隣り合う磁区制御点ＶＰの間におけるβ角を、１ｍｍ間隔で測定し、そのβ角の絶対値の平均値を、当該仮想線ＶＬにおける$|\beta_S|$とみなせばよい。

[0134] 複数の仮想線ＶＬそれぞれにおいて、上述の手順に従って、D_S、D_L、$|\beta_L|$及び$|\beta_S|$を求める。１本以上の仮想線ＶＬにおいて、$2mm \leqq D_S \leqq 20mm$、$3 \leqq D_L/D_S$、且つ$1.5^\circ \leqq |\beta_L|$である場合、試料は本開示に係る方向性電磁鋼板であるとみなされる。本開示の要件を満たす仮想線ＶＬの本数は、多いほど好ましい。

[0135] （原板２及び方向性電磁鋼板１の化学組成の測定方法）

方向性電磁鋼板１及び原板２の化学組成は、鋼の一般的な分析方法によって測定すればよい。例えば、化学組成は、ＩＣＰ－ＡＥＳ（Ｉｎｄｕｃｔｉｖｅｌｙ Ｃｏｕｐｌｅｄ Ｐｌａｓｍａ－Ａｔｏｍｉｃ Ｅｍｉｓｓｉｏｎ Ｓｐｅｃｔｒｏｍｅｔｒｙ）を用いて測定すればよい。具体的には、試料の厚み方向の中央部から試験片を取得し、島津製作所製ＩＣＰＳ－８１００等（測定装置）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、方向性電磁鋼板１及び原板２の化学組成を測定できる。ＩＣＰ－ＡＥＳでは測定が困難なＣおよびＳの含有量は、燃焼－赤外線吸収法を用いて測定すればよい。Ｎの含有量は、不活性ガス融解－熱伝導度法を用いて測定すればよい。

[0136] 方向性電磁鋼板１及び原板２にフォルステライト被膜及び／または絶縁被膜が形成されている場合には、方向性電磁鋼板１及び原板２からフォルステライト被膜及び／または絶縁被膜を除去してから、方向性電磁鋼板１及び原板２の化学組成を分析すればよい。フォルステライト被膜は例えば、試料を硫酸に浸漬させた後に、硝酸に浸漬させることによって除去することができる。硫酸、硝酸の温度と濃度浸漬させる時間等の条件は試料の地鉄が過度に溶解しないよう適宜調整する。フォルステライト被膜の除去作業の条件の一例は以下の通りである。まず、８０℃で１０％の濃度の硫酸に試料を３分浸漬させる。その後、ウエス等を用いて試料の表面を水洗いし表面に付着した

スラッジを除去する。その後、試料を乾燥させる。さらに、室温で１０％の濃度の硝酸に、試料を５秒間程度攪拌しながら浸漬させる。絶縁被膜は例えば、試料を水酸化ナトリウム溶液に浸漬させた後に、希硫酸、及び硝酸に浸漬させることによって除去することができる。なお、水酸化ナトリウム、希硫酸、硝酸溶液の温度と濃度、浸漬させる時間等の条件は試料の地鉄が過度に溶解しないよう適宜調整する。絶縁被膜の除去作業の条件の一例は以下の通りである。まず、８０℃で２０％の濃度の水酸化ナトリウム溶液に、試料を１５分間浸漬させる。その後、試料を乾燥させる。そして、８０℃で１０％の濃度の希硫酸に、試料を４分間浸漬させる。その後、ウエス等で、試料の表面に付着したスラッジを除去する。さらに、室温で１０％の濃度の硝酸に、試料を１０秒間程度攪拌しながら浸漬させる。

[0137] （磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度の測定方法）

磁区制御処理線１１と圧延直角方向ＴＤとがなす角度は、上述の手順で磁区制御処理線１１及び圧延直角方向ＴＤを特定した後で、公知の角度測定手段を用いて測定することができる。

[0138] （熱歪みにおいて導入される、引張り応力の大きさの測定方法）

熱歪みにおいて導入される引張り応力の大きさは、ＥＢＳＤ Ｗｉｌｋｉｎｓｏｎ法およびＢＬＧ Ｖａｎｔａｇｅ社製Ｃｒｏｓｓ Ｃｏｕｒｔにより測定する。ＥＢＳＤ Ｗｉｌｋｉｎｓｏｎ法は、Ａ．Ｊ．Ｗｉｌｋｉｎｓｏｎ，ｅｔ ａｌ．「Ｈｉｇｈ－ｒｅｓｏｌｕｔｉｏｎ ｅｌａｓｔｉｃ ｓｔｒａｉｎ ｍｅａｓｕｒｅｍｅｎｔ ｆｒｏｍ ｅｌｅｃｔｒｏｎ ｂａｃｋｓｃａｔｔｅｒ ｄｉｆｆｒａｃｔｉｏｎ ｐａｔｔｅｒｎｓ：Ｎｅｗ ｌｅｖｅｌｓ ｏｆ ｓｅｎｓｉｔｉｖｉｔｙ」Ｕｌｔｒａｍｉｃｒｏｓｃｏｐｙ Ｖｏｌ １０６，Ｎｏ．４－５，Ｍａｒｃｈ ２００６，Ｐ．３０７－３１３に詳細に説明されている。

[0139] ＥＢＳＤ Ｗｉｌｋｉｎｓｏｎ法およびＢＬＧ Ｖａｎｔａｇｅ社製Ｃｒｏｓｓ Ｃｏｕｒｔによって熱歪みにおいて導入される引張り応力の大きさを測定する際には、まず、上述の手順で磁区制御処理線１１を特定する。次

に、磁区制御処理線１１を通り、且つ磁区制御処理線１１に垂直に、方向性電磁鋼板１を切断する。この切断面を、測定面として用いる。測定面に含まれる、磁区制御処理線１１の断面に対して、ＥＢＳＤ　Ｗｉｌｋｉｎｓｏｎ法およびＢＬＧ　Ｖａｎｔａｇｅ社製Ｃｒｏｓｓ　Ｃｏｕｒｔによって解析を行い、任意の方向に対する引張応力成分を抽出し、その大きさを測定する。例えば、圧延面法線方向ＮＤ、磁区制御処理線１１と平行な方向、圧延面法線方向ＮＤと磁区制御処理線１１とに垂直な方向の引張応力成分を抽出できる。

[0140] 測定箇所の数は、例えば１０とする。方向性電磁鋼板１の少なくとも１箇所において、任意の方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上である場合（即ち、少なくとも１つの方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上である場合）、当該方向性電磁鋼板１が有する磁区制御処理線における任意の方向に対する引張り応力の最大値は、４０ＭＰａ以上であると判断される。任意の方向に対する引張り応力が４０ＭＰａ以上である測定点が発見された時点で、引張り応力の測定を中止してもよい。

[0141] （溝の深さ及び幅の測定方法）

溝の深さ及び幅は、公知の三次元測定機を用いて試料の表面形状を特定することにより測定可能である。方向性電磁鋼板１が絶縁被膜を有する場合は、上述の手順で絶縁被膜を除去してから試料表面の三次元測定を行う。

実施例 1

[0142] 実施例により本開示の一態様の効果を更に具体的に説明する。ただし、実施例での条件は、本開示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に過ぎない。本開示は、この一条件例に限定されない。本開示は、本開示の要旨を逸脱せず、本開示の目的を達成する限り、種々の条件を採用し得る。

[0143] （実施例１）

板厚０．２０ｍｍの同一ロットの方向性電磁鋼板（一般的な結晶粒サイズを有する方向性電磁鋼板）を、原板として用いた。この電磁鋼板は、例えば

仕上げ焼鈍の昇温過程で１０００℃から１２００℃までの平均昇温速度を１５℃／時間とした。この原板に、表１に示す種々の条件で磁区制御処理を実施した。これにより得られた、磁区制御処理済みの方向性電磁鋼板の騒音、及び鉄損を評価して、表２に記載した。表２において、不合格と判定された値には下線を付した。

[0144] なお、磁区制御処理線の形状は、以下の何れかとした。試料に適用された形状を、表１の「備考」列に記載した。

Ａ：上述のようにβ角が小さい領域に磁区制御処理線を形成した。

Ｂ：原板の全幅にわたって、直線状に磁区制御処理線を形成した。

Ｃ：ランダムな破線状の磁区制御処理線を形成した。

Ｄ：各結晶粒の圧延方向の中央から圧延方向ＲＤに±４ｍｍ以内の領域のみに、間隔が４ｍｍで磁区制御処理線を形成した。なお、仕上げ焼鈍時にその結晶粒があった位置の鋼板の曲率半径は、２５０ｍｍであった。

[0145] 騒音及び鉄損の評価方法は以下の通りとした。まず、板厚０．２０ｍｍの方向性電磁鋼板を２０５枚積層して、三相変圧器鉄心を作成した。三相変圧器鉄心の足及びヨークの幅はともに１５０ｍｍとした。三相変圧器鉄心の外形の高さ及び幅はともに７５０ｍｍとした。これら三相変圧器鉄心の、騒音および鉄損を測定した。測定条件は、周波数６０Ｈｚ、及び励磁磁束密度１．５Ｔとした。

[0146] 騒音の測定にあたっては、当該三相変圧器鉄心が組み込まれた変圧器の周囲８箇所に、等間隔にマイクロフォンを配置した。変圧器とマイクロフォンとの距離は３０ｃｍとした。これらマイクロフォンによる騒音測定結果にＡ特性補正し、平均化することで得られた値を、方向性電磁鋼板の騒音評価結果（単位ｄＢＡ）として表２に記載した。騒音の評価結果が３０．２５ｄＢＡ以下の例を、低騒音化が達成された例であると判定した。不合格と判定された騒音評価結果には下線を付した。

[0147] 鉄損は、上述の通り周波数６０Ｈｚ、及び励磁磁束密度１．５Ｔで励磁が行われたときの、一次側及び二次側の電圧及び電流をパワーアナライザで測

定することにより求めた。求められた鉄損を、方向性電磁鋼板の鉄損評価結果（単位W／ｋｇ）として表２に記載した。鉄損の評価結果が０．７５６Ｗ／ｋｇ以下の例を、低鉄損化が達成された例であると判定した。不合格と判定された騒音評価結果には下線を付した。

[0148] さらに、磁区制御処理済みの方向性電磁鋼板における、磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、且つD_L／D_Sが３以上である仮想線の本数を測定し、表１に記載した。測定方法は、原則的に上述の手順に従った。両辺の長さが１００ｍｍの矩形試料を、騒音及び鉄損の測定用の三相変圧器鉄心から切り出して、測定に供した。この矩形試料に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域を設定し、評価領域の内部に、圧延方向に平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線ＶＬを５ｍｍ間隔で設定した。仮想線の本数は９本であった。この９本の仮想線V_Lそれぞれにおける、磁区制御点の間隔の標準偏差を測定した。そして、磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、且つD_L／D_Sが３以上となった仮想線V_Lの本数を、表１の「磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L／D_Sが３以上のV_L本数」列に記載した。

[0149] また、上記手順によって特定された、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L／D_Sが３以上となった仮想線ＶＬそれぞれに沿って、β角を測定した。そして、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満且つD_L／D_Sが３以上となった仮想線ＶＬのうち、磁区制御点間隔が最大値D_Lとなる２つの磁区制御点の間で測定される、β角の絶対値の平均値｜β_L｜が１．５°以上であるＶＬの本数を、表１の「｜β_L｜１．５°以上のＶＬ本数」列に記載した。当該列に記載の数が１である試料は、１本の仮想線において最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、D_L／D_Sが３以上であり、｜β_L｜が１．５°以上である方向性電磁鋼板に該当する。当該列に記載の数が２以上である試料は、２本以上の仮想線のそれぞれにおいて、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満、D_L／D_Sが３以上、且つ｜β_L｜が１．５°以上である方向性電磁鋼板に該当する。

[0150] さらに、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満、D_L/D_Sが３以上、且つ$|\beta_L|$が１．５°以上となった仮想線ＶＬのうち、$|\beta_L|$と、磁区制御点の間隔が最小値である２つの磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_S|$とが０．５°≦$|\beta_L|-|\beta_S|$を満たすＶＬの本数を、表１の「$|\beta_L|-|\beta_S|$≧０．５°を満たすＶＬ本数」列に記載した。

[0151] なお、表中には示さないが、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満で且つD_L/D_Sが３以上である仮想線ＶＬの何れでも、仮想線ＶＬと結晶粒界との交点である粒界点の数は３以上であった。また、表中には示さないが、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満で且つD_L/D_Sが３以上である仮想線ＶＬの何れでも、D_L/D_Sの値は５未満であった。

[0152] [表1]

	D_Sが2mm以上20mm未満且つD_L/D_Sが3以上のVL本数	$\|\beta_L\|$が1.5°以上のVL本数	$\|\beta_L\|-\|\beta_S\|$≧0.5°を満たすVL本数	磁区制御処理線の種類	備考
1	1	1	0	熱歪み	A
2	1	1	0	混在	A
3	1	1	0	溝	A
4	6	2	0	熱歪み	A
5	7	4	0	熱歪み	A
6	7	5	0	熱歪み	A
7	1	1	1	熱歪み	A
8	7	5	3	熱歪み	A
9	0	0	0	熱歪み	B
10	7	0	0	熱歪み	C
11	9	0	0	熱歪み	D

[0153]

[表2]

	鉄損評価 W／kg	騒音評価 dBA	
1	0.701	30.24	本発明例
2	0.722	29.84	本発明例
3	0.741	28.85	本発明例
4	0.715	27.99	本発明例
5	0.712	27.52	本発明例
6	0.714	27.25	本発明例
7	0.711	26.62	本発明例
8	0.715	26.31	本発明例
9	0.705	31.64	比較例
10	0.789	28.60	比較例
11	0.782	28.30	比較例

[0154] 例９では、原板の全幅にわたって、直線状に磁区制御処理線を形成した。従って例９では、D_L/D_Sが３以上となるような仮想線ＶＬを設定することができなかった。例９では、鉄損評価結果が良好であったが、騒音評価結果が不良であった。これは、磁区制御が不要な箇所にも磁区制御処理線が形成されたからであると推定される。

[0155] 例１０では、破線状の磁区制御処理線を形成した。１本の破線における、磁区制御処理線同士の間隔はランダムな値とした。例１０では、D_L/D_Sが３以上となるような仮想線ＶＬを設定することができた。しかしながら、これらの仮想線の全てにおいて、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$は１．５°未満であった。例１０では、騒音評価結果が良好であったが、鉄損評価結果が不良であった。これは、磁区制御が必要な箇所に、磁区制御処理線が形成されなかったからであると推定される。

[0156] 例１１では、各結晶粒の圧延方向の中央から圧延方向ＲＤに±４ｍｍ以内の領域のみに、間隔が４ｍｍで磁区制御処理線を形成した。なお、仕上げ焼鈍時にその結晶粒があった位置の鋼板の曲率半径は、２５０ｍｍであった。例１１の結果は、例１０の結果と同様であった。すなわち、例１１では、D_L

／D_Sが３以上となるような仮想線ＶＬを設定することができた。しかしながら、これらの仮想線の全てにおいて、β角の絶対値の平均値｜β_L｜は１．５°未満であった。例１１では、騒音評価結果が良好であったが、鉄損評価結果が不良であった。これは、磁区制御が必要な箇所に、磁区制御処理線が形成されなかったからであると推定される。

[0157] 一方、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満、D_L／D_Sが３以上、且つ｜β_L｜が１．５°以上である仮想線ＶＬを１本以上設定可能な例においては、鉄損評価結果及び騒音評価結果の両方が良好であった。

[0158] （実施例２）

原板として用いた方向性電磁鋼板の種類を除いて、上記した実施例１と同じ条件にて方向性電磁鋼板への磁区制御処理を実施した。具体的には、板厚０．２０ｍｍの同一ロットの方向性電磁鋼板（粗大な結晶粒サイズを有する方向性電磁鋼板）を、原板として用いた。この電磁鋼板は、例えば仕上げ焼鈍の昇温過程で１０００℃から１２００℃までの平均昇温速度を５℃／時間未満とした。この原板に、表３に示す種々の条件で磁区制御処理を実施した。これにより得られた、磁区制御処理済みの方向性電磁鋼板の磁束密度、騒音、及び鉄損を評価して、表４に記載した。表４において、不合格と判定された値には下線を付した。

[0159] 磁区制御処理線の形状は、上記した実施例１と同じであり、騒音及び鉄損の評価方法も、上記した実施例１と同じであり、製造結果および評価結果の表中への表記方法も、上記した実施例１と同じである。

[0160] 磁束密度の評価方法は以下の通りとした。磁束密度は、ＪＩＳ Ｃ ２５５０－１：２０１１に規定されたエプスタイン法で測定することにより求めた。８００Ａ／ｍで励磁したときの鋼板の圧延方向の磁束密度B_8（Ｔ）を測定した。測定した磁束密度を、方向性電磁鋼板の磁束密度評価結果（単位Ｔ）として表４に記載した。磁束密度の評価結果が１．９３５Ｔ以上の例を、一般的な結晶粒サイズを有する方向性電磁鋼板よりも磁束密度に好ましく優れる例であると判定した。

[0161] なお、表中には示さないが、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満で且つD_L／D_Sが３以上である仮想線ＶＬの何れでも、仮想線ＶＬと結晶粒界との交点である粒界点の数は２以下であった。

[0162] [表3]

	D_Sが2mm以上20mm未満且つD_L／D_Sが5以上のVL本数	$\lvert\beta_L\rvert$が1．5°以上のVL本数	$\lvert\beta_L\rvert-\lvert\beta_S\rvert\geqq$0．5°を満たすVL本数	磁区制御処理線の種類	備考
12	1	1	0	熱歪み	A
13	1	1	0	混在	A
14	1	1	0	溝	A
15	4	2	0	熱歪み	A
16	6	4	0	熱歪み	A
17	7	5	0	熱歪み	A
18	1	1	1	熱歪み	A
19	7	5	3	熱歪み	A
20	0	0	0	熱歪み	B
21	6	0	0	熱歪み	C
22	9	0	0	熱歪み	D

[0163] [表4]

	磁束密度評価 T	鉄損評価 W／kg	騒音評価 dBA	
12	1.935	0.670	26.20	本発明例
13	1.941	0.691	26.12	本発明例
14	1.938	0.699	26.09	本発明例
15	1.936	0.688	25.71	本発明例
16	1.940	0.685	25.32	本発明例
17	1.936	0.687	24.98	本発明例
18	1.941	0.690	24.57	本発明例
19	1.935	0.670	24.03	本発明例
20	1.937	0.675	30.28	比較例
21	1.939	0.761	26.48	比較例
22	1.941	0.769	26.15	比較例

[0164] D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満、D_L／D_Sが５以上、且つ｜β_L｜が１．５°以上である仮想線ＶＬを１本以上設定可能な例においては、磁束密度結果、鉄損評価結果、及び騒音評価結果のすべてが良好であった。一般的に、粗大な結晶粒サイズを有する鋼板は、磁束密度に優れるが、従来の磁区制御処理を施すことによって、騒音特性が悪化しやすい。一方、表３および表４に示す例１２～１９は、β角が小さい領域に選択的に磁区制御処理線を形成しているので、上記したように、磁束密度結果、鉄損評価結果、及び騒音評価結果のすべてが良好であった。

[0165] 同様に、D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満で且つD_L／D_Sが３以上である仮想線ＶＬについて、結晶粒界との交点である粒界点の数が２以下である例１２～１９においては、磁束密度結果、鉄損評価結果、及び騒音評価結果のすべてが良好であった。

産業上の利用可能性

[0166] 本開示によれば、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成し得る方向性電磁鋼板、及びその製造方法を提供することができる。よって、産業上の利用可能性が高い。

符号の説明

[0167] １　方向性電磁鋼板

１１　磁区制御処理線

ＲＤ　圧延方向

ＴＤ　圧延直角方向

ＮＤ　圧延面法線方向

ＶＬ　仮想線

ＶＰ　磁区制御点

D_L　磁区制御点の間隔の最大値

D_S　磁区制御点の間隔の最小値

Ｘ　磁区制御処理線が設けられない領域

２　原板

２１　磁区制御処理領域

２２　非磁区制御処理領域

３０　画像取得装置

３１　光源部

３３　ＭＯセンサ

３５　イメージセンサ

３７　信号処理部

４０　解析装置

４１　演算部

４３　メモリ

４５　表示部

４７　入力部

４９　通信Ｉ／Ｆ

５００　レーザ照射装置

５０１　ポリゴンミラー

５０３　光源装置

５０５　コリメータ

５０７　集光レンズ

５０９　モータ

５１１　センサ

５１３　制御部

５１５　通板装置

請求の範囲

[請求項1] 表面に複数の磁区制御処理線を備える方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、前記評価領域の内部に、前記圧延方向に平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線を５ｍｍ間隔で設定した場合において、

少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの比D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、β角の絶対値の平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である

方向性電磁鋼板。

[請求項2] ２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である

請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項3] 前記D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記D_L/D_Sが３以上であり、且つ前記$|\beta_L|$が１．５°以上である前記仮想線において、前記$|\beta_L|$と、前記磁区制御点の前記間隔が前記最小値D_Sとなる２つの前記磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_S|$とが、下記式を満たす

請求項１又は２に記載の方向性電磁鋼板。

$$0.5° \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

[請求項4] 少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制

御処理線との交点である前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である

請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項5] ２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記磁区制御点の前記間隔の前記最小値D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記間隔が前記最大値D_Lとなる２つの前記磁区制御点の間で測定される、前記β角の前記絶対値の前記平均値$|\beta_L|$が１．５°以上である

請求項４に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項6] 前記D_Sが２ｍｍ以上２０ｍｍ未満であり、前記D_L/D_Sが５以上であり、且つ前記$|\beta_L|$が１．５°以上である前記仮想線において、前記$|\beta_L|$と、前記磁区制御点の前記間隔が前記最小値D_Sとなる２つの前記磁区制御点の間で測定されるβ角の絶対値の平均値$|\beta_S|$とが、下記式を満たす

請求項４又は５に記載の方向性電磁鋼板。

$$0.5° \leqq |\beta_L| - |\beta_S|$$

[請求項7] 前記磁区制御点の前記間隔の前記最大値D_Lと、前記最小値D_Sとの前記比D_L/D_Sが３以上である前記仮想線のうち、少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、結晶粒界との交点である粒界点の数が２個以下である

請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項8] ２本以上の前記仮想線のそれぞれにおいて、前記粒界点の数が２個以下である

請求項７に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項9] 前記磁区制御処理線が熱歪みである請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項10] 前記磁区制御処理線が溝である請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項11] 少なくとも１本の前記仮想線において、前記比D_L／D_Sが３未満である

請求項１に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項12] 方向性電磁鋼板の原板の磁区画像を取得する工程と、

前記磁区画像における磁区幅の分布に基づいて、磁区制御処理領域を決定する工程と、

磁区幅の分布に基づいて決定された前記磁区制御処理領域に、磁区制御処理を適用する工程と、

を備え、

前記方向性電磁鋼板に、一辺の長さが５０ｍｍであり、且つ一辺が前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行である正方形の評価領域を設定し、さらに、前記評価領域の内部に、前記圧延方向に平行且つ長さ５０ｍｍの仮想線を５ｍｍ間隔で設定した場合において、

少なくとも１本の前記仮想線において、前記仮想線と、前記磁区制御処理によって形成された磁区制御処理線との交点である磁区制御点の間隔の最小値を２ｍｍ以上２０ｍｍ未満とし、前記磁区制御点の前記間隔の最大値と、前記最小値との比を３以上とする

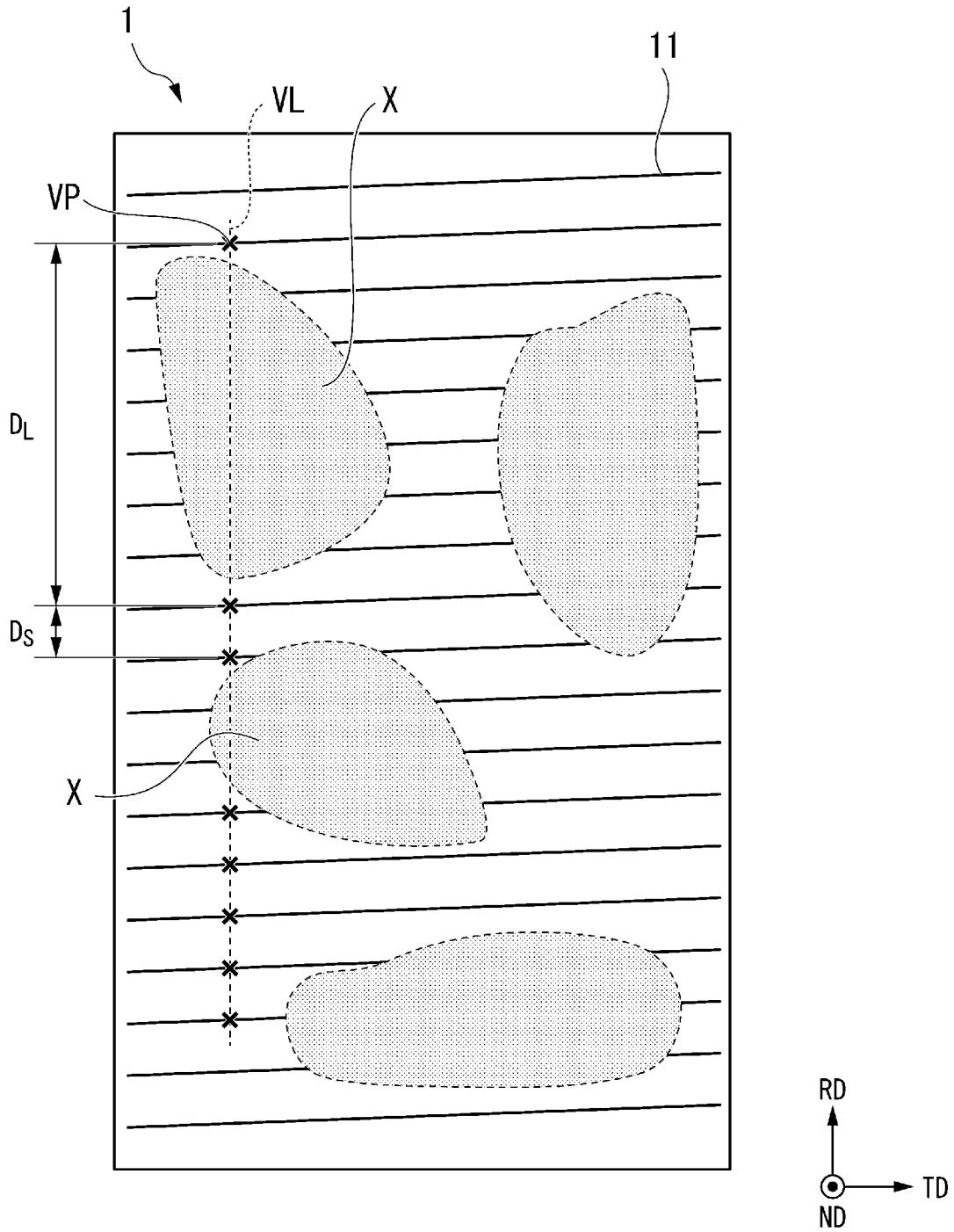
方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項13] 前記磁区幅が所定値以上である領域を前記磁区制御処理領域とする請求項１２に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

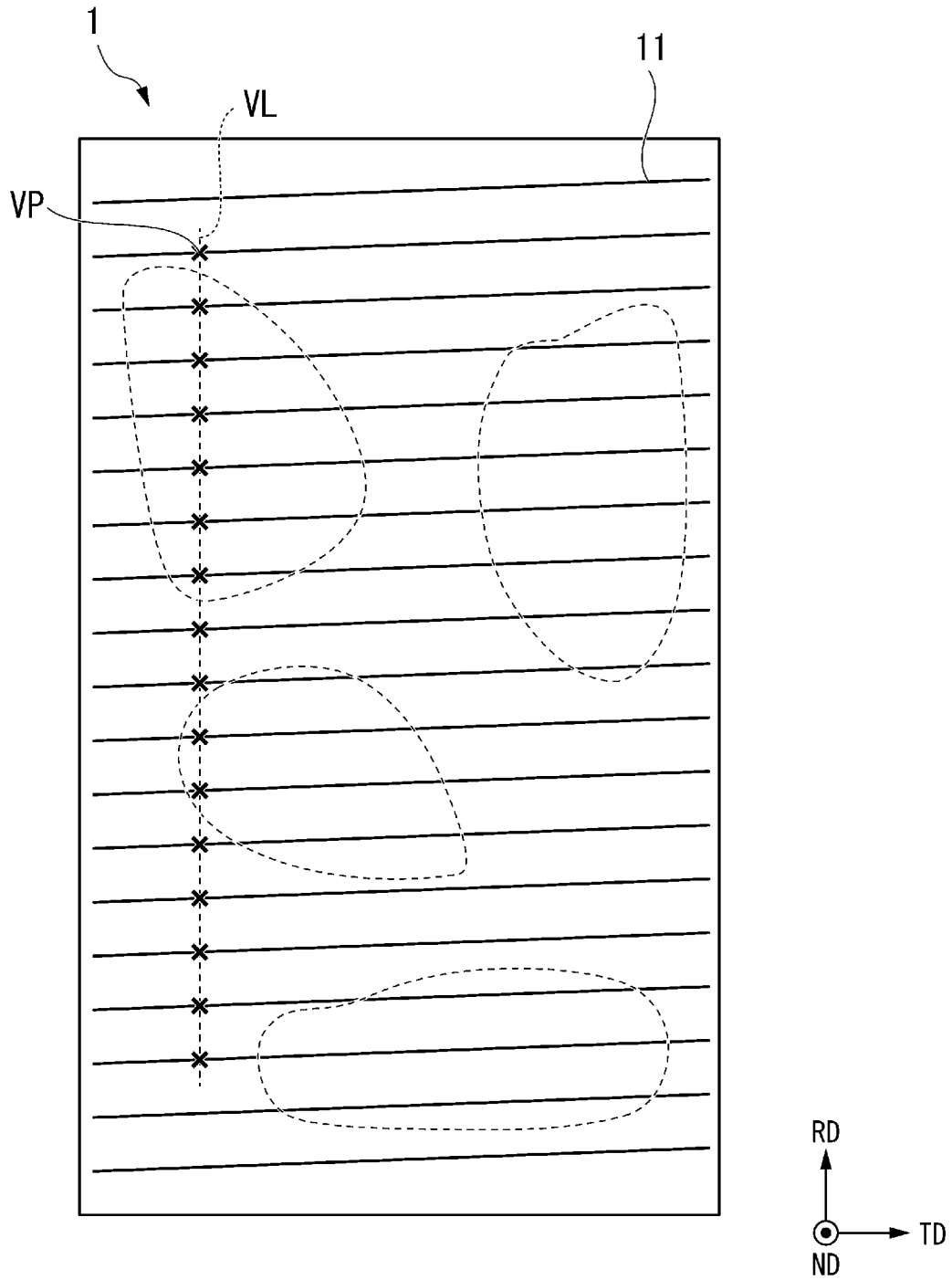
[請求項14] ２次元フーリエ変換を用いて前記磁区画像から前記磁区幅の分布を導出する請求項１２又は１３に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項15] レーザ又は電子ビームの照射によって前記磁区制御処理を適用する請求項１２又は１３に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

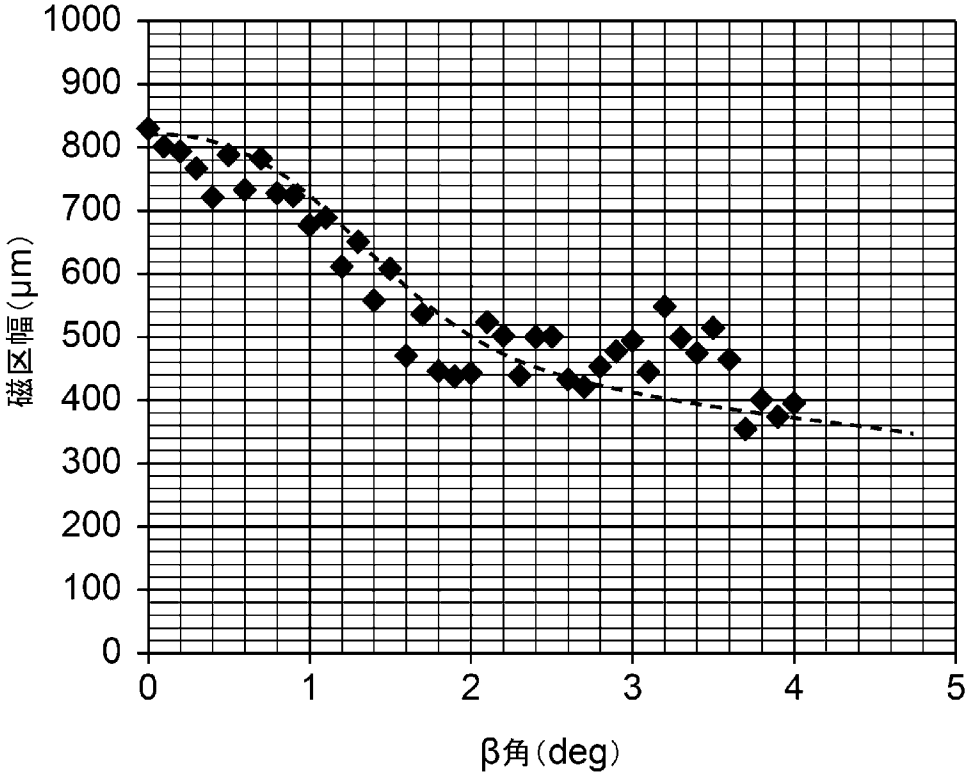
[図1]



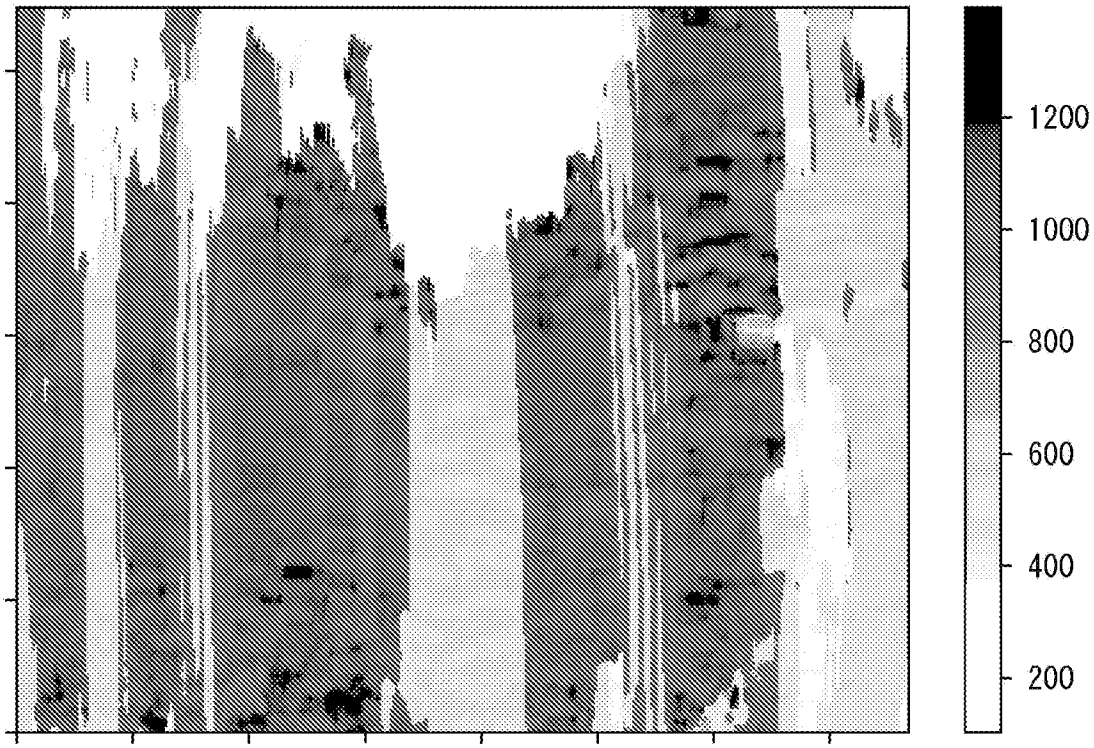
[図2]



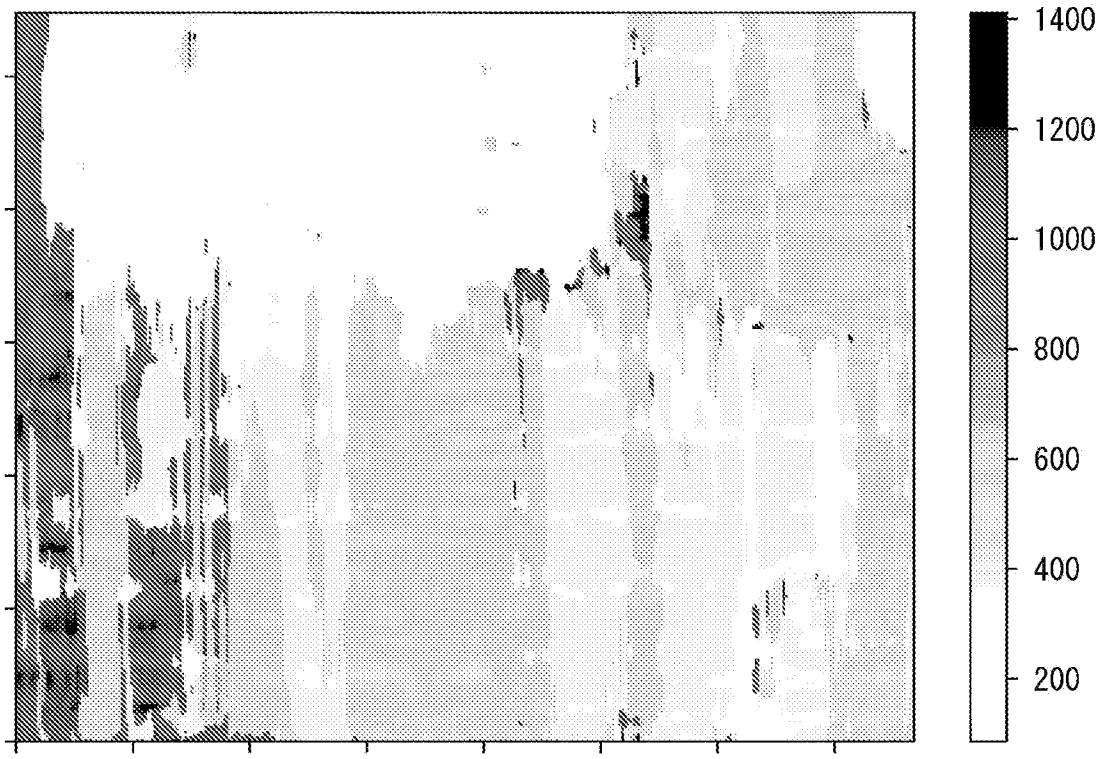
[図3]


1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
磁区幅(μm)
0
1
2
3
4
5
β角(deg)

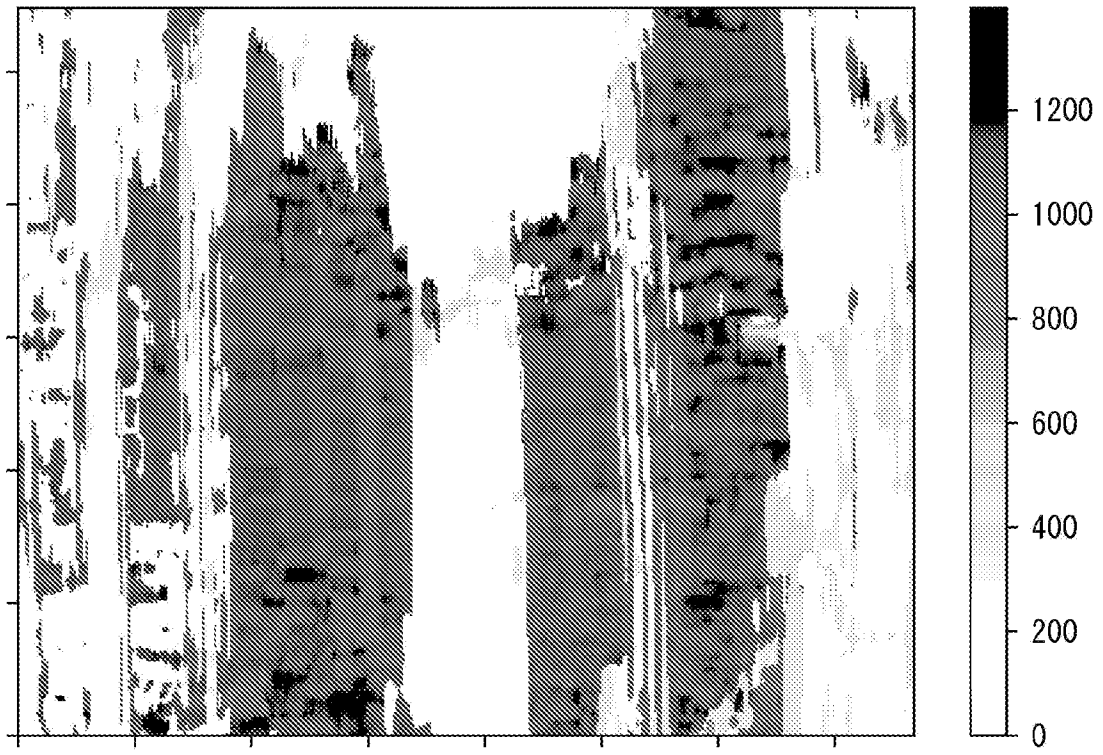
[図4A]


1200
1000
800
600
400
200

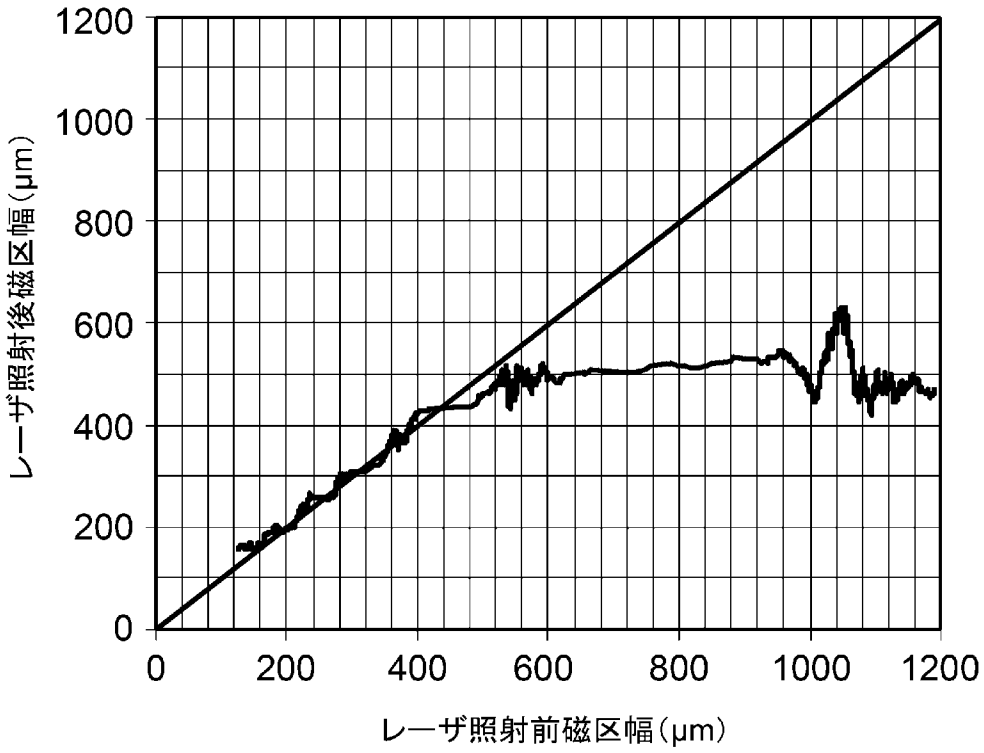
[図4B]



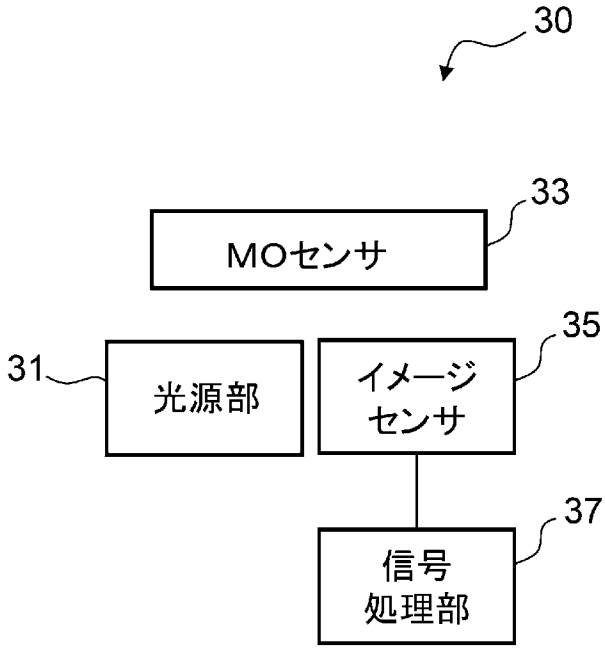
[図4C]



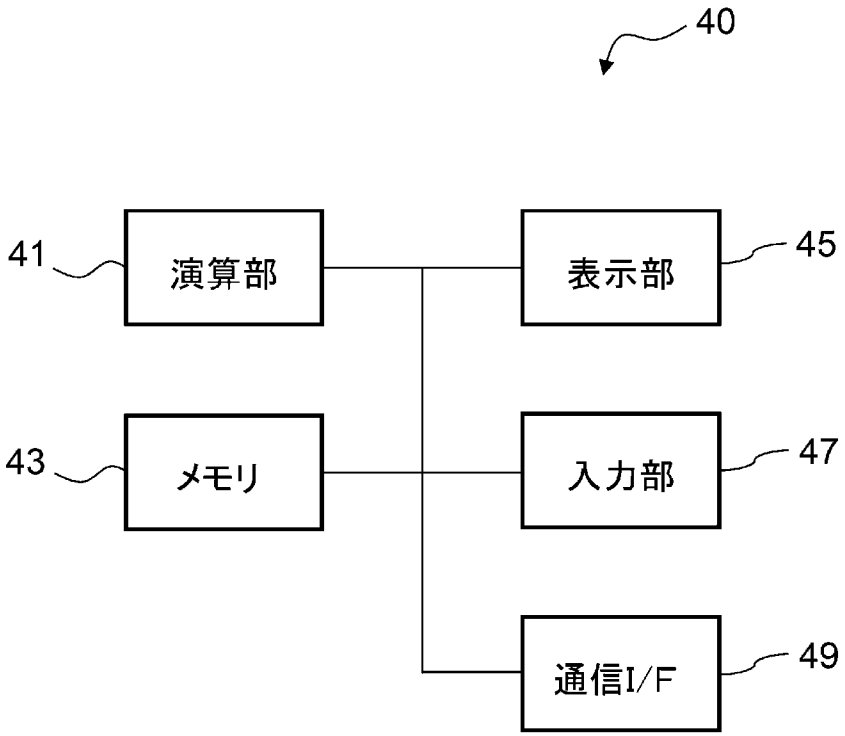
[図5]


1200
1000
800
600
400
200
0
0
200
400
600
800
1000
1200
レーザ照射後磁区幅（μm）
レーザ照射前磁区幅（μm）

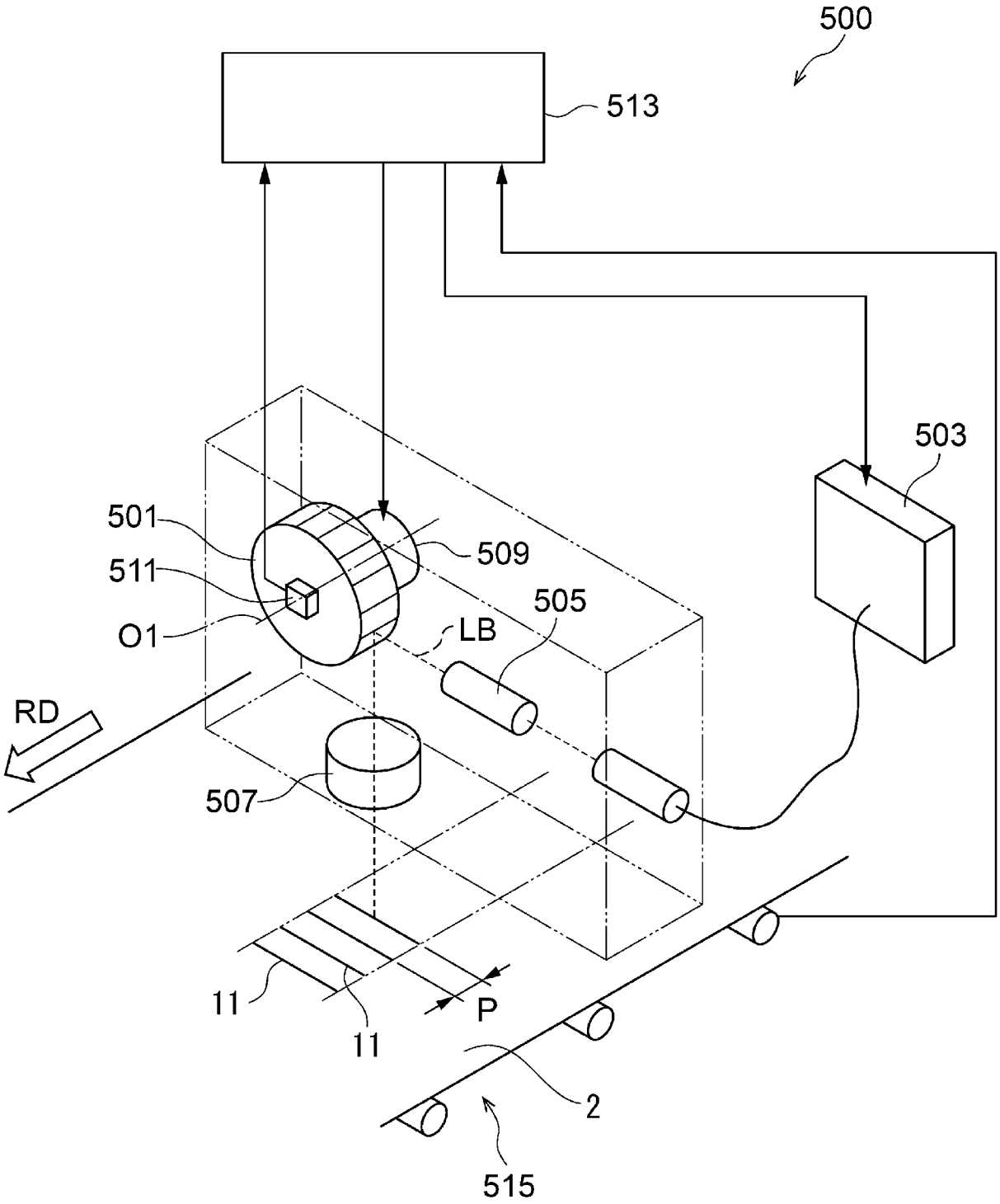
[図6]


30
33
MOセンサ
31
光源部
35
イメージ
センサ
37
信号
処理部

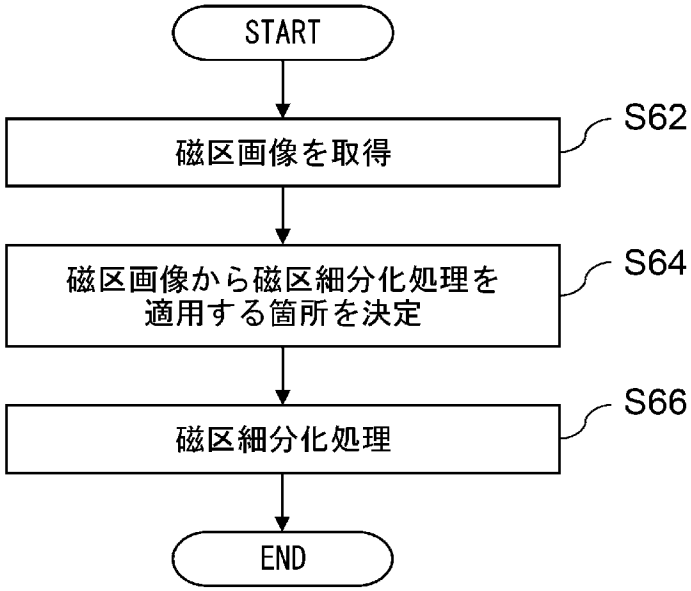
[図7]



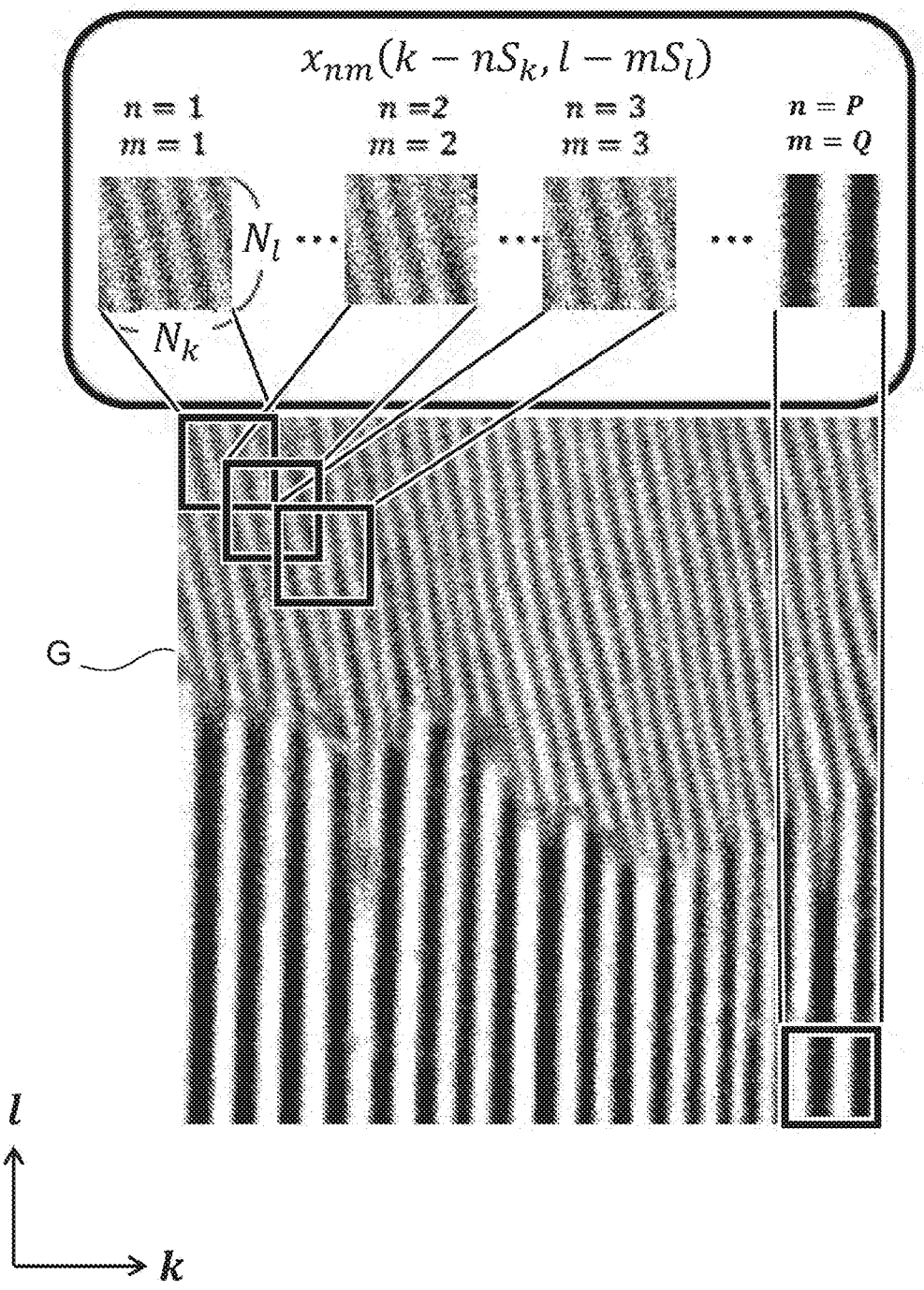
[図8]



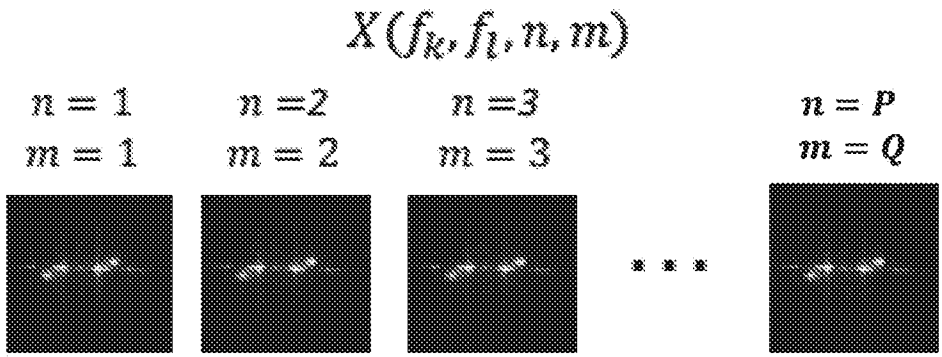
[図9]


START
磁区画像を取得
S62
磁区画像から磁区細分化処理を
適用する箇所を決定
S64
磁区細分化処理
S66
END

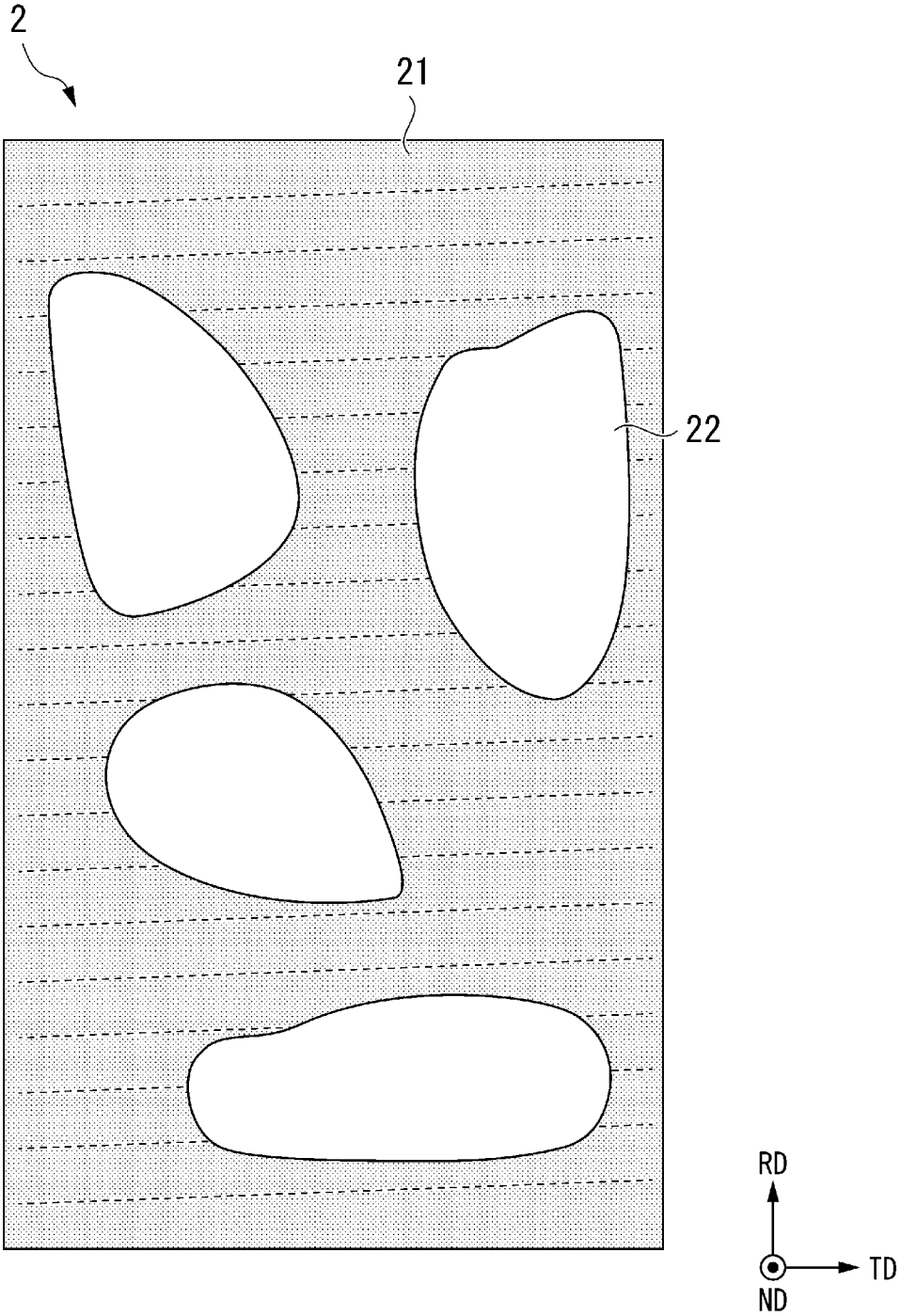
[図10]


$x_{nm}(k-nS_k, l-mS_l)$
$n=1$ $m=1$
$n=2$ $m=2$
$n=3$ $m=3$
$n=P$ $m=Q$
N_l
N_k
G
l
k

[図11]


$X(f_k, f_l, n, m)$
$n=1$ $m=1$
$n=2$ $m=2$
$n=3$ $m=3$
$n=P$ $m=Q$

[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/034793

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C22C 38/00(2006.01)i; ***C21D 8/12***(2006.01)i; ***H01F 1/147***(2006.01)i; ***H01F 27/245***(2006.01)i; ***H01F 41/02***(2006.01)i; *C21D 9/46*(2006.01)n; *C22C 38/60*(2006.01)n
FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; H01F41/02 B; H01F27/245 150; C21D8/12 D; C21D9/46 501B; C22C38/60

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)

C22C38/00-C22C38/60; C21D8/12; C21D9/46; H01F1/147; H01F27/245; H01F41/02

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024
Registered utility model specifications of Japan 1996-2024
Published registered utility model applications of Japan 1994-2024

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	JP 11-124629 A (KAWASAKI STEEL CORP.) 11 May 1999 (1999-05-11) claims, paragraphs [0001]-[0008], [0011]-[0017], [0020]-[0022], table 1, fig. 1-3	1-15
A	JP 2012-67349 A (JFE STEEL CORPORATION) 05 April 2012 (2012-04-05) claims, paragraphs [0001]-[0008]	1-15
A	WO 2012/032792 A1 (JFE STEEL CORPORATION) 15 March 2012 (2012-03-15) claims, paragraphs [0001], [0018]-[0019], fig. 1	1-15
A	JP 11-293340 A (KAWASAKI STEEL CORP.) 26 October 1999 (1999-10-26) claims, paragraphs [0001]-[0005], [0007]-[0008]	1-15
A	JP 2020-169373 A (NIPPON STEEL CORPORATION) 15 October 2020 (2020-10-15) claims, paragraphs [0001]-[0012], [0018]-[0037]	1-15
A	JP 2022-515236 A (POSCO) 17 February 2022 (2022-02-17) entire text, all drawings	1-15

☑ 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
"D" document cited by the applicant in the international application
"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	Date of mailing of the international search report
03 December 2024	**17 December 2024**
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

International application No.
PCT/JP2024/034793

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 10-2017-0074608 A (POSCO) 30 June 2017 (2017-06-30) entire text, all drawings	1-5
P, A	WO 2023/190331 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 05 October 2023 (2023-10-05) entire text, all drawings	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2024/034793

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 11-124629 A	11 May 1999	(Family: none)	
JP 2012-67349 A	05 April 2012	(Family: none)	
WO 2012/032792 A1	15 March 2012	US 2013/0160901 A1 claims, paragraphs [0002], [0044]-[0046], fig. 1 EP 2615189 A1 CN 103097563 A KR 10-2013-0037224 A	
JP 11-293340 A	26 October 1999	(Family: none)	
JP 2020-169373 A	15 October 2020	(Family: none)	
JP 2022-515236 A	17 February 2022	US 2022/0051837 A1 entire text, all drawings WO 2020/130645 A1 EP 3901971 A1 KR 10-2020-0076508 A CN 113196422 A	
KR 10-2017-0074608 A	30 June 2017	(Family: none)	
WO 2023/190331 A1	05 October 2023	KR 10-2024-0129194 A entire text, all drawings CN 118647742 A	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/034793

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

C22C 38/00(2006.01)i; C21D 8/12(2006.01)i; H01F 1/147(2006.01)i; H01F 27/245(2006.01)i; H01F 41/02(2006.01)i; C21D 9/46(2006.01)n; C22C 38/60(2006.01)n
FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; H01F41/02 B; H01F27/245 150; C21D8/12 D; C21D9/46 501B; C22C38/60

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））

C22C38/00-C22C38/60; C21D8/12; C21D9/46; H01F1/147; H01F27/245; H01F41/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２４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	JP 11-124629 A (川崎製鉄株式会社) 11.05.1999 (1999-05-11) 特許請求の範囲,0001-0008,0011-0017,0020-0022,表1,図1-図3	1-15
A	JP 2012-67349 A (ＪＦＥスチール株式会社) 05.04.2012 (2012-04-05) 特許請求の範囲,0001-0008	1-15
A	WO 2012/032792 A1 (ＪＦＥスチール株式会社) 15.03.2012 (2012-03-15) 請求の範囲,0001,0018-0019,図1	1-15
A	JP 11-293340 A (川崎製鉄株式会社) 26.10.1999 (1999-10-26) 特許請求の範囲,0001-0005,0007-0008	1-15
A	JP 2020-169373 A (日本製鉄株式会社) 15.10.2020 (2020-10-15) 特許請求の範囲,0001-0012,0018-0037	1-15
A	JP 2022-515236 A (ポスコ) 17.02.2022 (2022-02-17) 全文,全図	1-15

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
"D" 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
"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
"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	国際調査報告の発送日
03.12.2024	17.12.2024

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）
鈴木　葉子 4K 3557

電話番号 03-3581-1101 内線 3435

国際出願番号
PCT/JP2024/034793

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	KR 10-2017-0074608 A (POSCO) 30.06.2017 (2017-06-30) 全文,全図	1-5
P, A	WO 2023/190331 A1 (日本製鉄株式会社) 05.10.2023 (2023-10-05) 全文,全図	1-15

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/JP2024/034793

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 11-124629 A	11.05.1999	（ファミリーなし）	
JP 2012-67349 A	05.04.2012	（ファミリーなし）	
WO 2012/032792 A1	15.03.2012	US 2013/0160901 A1 請求の範囲,0002, 0044-0046,図1 EP 2615189 A1 CN 103097563 A KR 10-2013-0037224 A	
JP 11-293340 A	26.10.1999	（ファミリーなし）	
JP 2020-169373 A	15.10.2020	（ファミリーなし）	
JP 2022-515236 A	17.02.2022	US 2022/0051837 A1 全文,全図 WO 2020/130645 A1 EP 3901971 A1 KR 10-2020-0076508 A CN 113196422 A	
KR 10-2017-0074608 A	30.06.2017	（ファミリーなし）	
WO 2023/190331 A1	05.10.2023	KR 10-2024-0129194 A 全文,全図 CN 118647742 A	