

(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)



(10) 国際公開番号

WO 2025/070781 A1

(51) 国際特許分類:

C22C 38/00 (2006.01) H01F 1/147 (2006.01)
C21D 8/12 (2006.01) H01F 27/245 (2006.01)
C21D 9/46 (2006.01) H01F 41/02 (2006.01)
C22C 38/60 (2006.01)

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).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2024/034800

(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 2023-166060 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

(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, 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,

(54) Title: GRAIN-ORIENTED ELECTROMAGNETIC STEEL SHEET AND METHOD FOR PRODUCING GRAIN-ORIENTED ELECTROMAGNETIC 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: Provided is a grain-oriented electromagnetic steel sheet having a magnetic domain control processing line on a surface thereof. The grain-oriented electromagnetic steel sheet satisfies $|\beta_{AII}-|\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$, wherein $|\beta_{AII}|$ is an average value of absolute values of β angles over the entire surface of the grain-oriented electromagnetic steel sheet, and $|\beta_{Dr}|$ is an average value of absolute values of β angles at magnetic domain control points that are intersection points of a plurality of virtual lines with the magnetic domain control processing line, the virtual lines being provided in parallel at 2-mm intervals along the rolling direction of the grain-oriented electromagnetic steel sheet. Also provided is a method for producing a grain-oriented electromagnetic steel sheet, the method comprising: a step of acquiring a magnetic domain image of an original sheet for a grain-oriented electromagnetic steel sheet; a step of determining a magnetic domain control processing region on the basis of the distribution of the magnetic domain widths in the magnetic domain image; and a step of applying a magnetic domain control process to the magnetic domain control processing region determined on the basis of the distribution of the magnetic domain widths.

(57) 要約: 方向性電磁鋼板は、表面に磁区制御処理線を有する方向性電磁鋼板であって、 $|\beta_{AII}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たし、 $|\beta_{AII}|$ は、方向性電磁鋼板の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値であり、 $|\beta_{Dr}|$ は、方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線と、磁区制御処理線との交点である磁区制御点における、 β 角の絶対値の平均値である。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、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、を備える。



WO 2025/070781 A1

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2023-166060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又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、レーザ又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処理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：特開2012-57219号公報

特許文献2：特開2012-12664号公報

特許文献3：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。

[0007] すなわち、磁区制御処理は、方向性電磁鋼板の鉄損を抑制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。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の両方を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、表面に磁区制御処理線を有する方向性電磁鋼板であって、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たし、 $|\beta_{A11}|$ は、前記方向性電磁鋼板の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値であり、 $|\beta_{Dr}|$ は、前記方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線と、前記磁区制御処理線との交点である磁区制御点における、 β 角の絶対値の平均値である。

(2) 好ましくは、上記(1)に記載の方向性電磁鋼板は、 $|\beta_{A11}| - |\beta$

$|\beta_{Dr}| \geq 0.2^\circ$ を満たす。

(3) 好ましくは、上記(1)に記載の方向性電磁鋼板は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.5^\circ$ を満たす。

(4) 好ましくは、上記(1)に記載の方向性電磁鋼板は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 1.0^\circ$ を満たす。

(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は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{All}/2$ を満たし、 σ_{All} は、前記方向性電磁鋼板の前記表面の前記全体にわたる、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差である。

(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は、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たし、 σ_{All} は、前記方向性電磁鋼板の前記表面の前記全体にわたる、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差であり、 σ_{Dr} は、前記磁区制御点における、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差である。

(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、前記磁区制御処理線が熱歪みである。

(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、前記磁区制御処理線が溝である。

(9) 好ましくは、上記(7)に記載の方向性電磁鋼板では、前記磁区制御処理線における、前記熱歪みに導入された引張り強さの最大値が、前記引張り強さの測定点毎に不均一である。

(10) 好ましくは、上記(9)に記載の方向性電磁鋼板では、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たし、 TS_m は、複数の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みに導入された単位MPaでの前記引張り強さであり、 $\sigma^2(TS_m)$ は、 TS_m の分散である。

(11) 好ましくは、上記(9)又は(10)に記載の方向性電磁鋼板では、 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たし、 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})}$ は、前記磁区処理点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の前記磁区処理点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みにおいて導入された単位MPaでの前記引張り強さの最大値の、

算術平均値であり、 $T S_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ は、前記 β 角が β_{Dr} 以上の前記磁区処理点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みに導入された単位MPaでの前記引張強さの前記最大値の、算術平均値である。

(12) 好ましくは、上記(8)に記載の方向性電磁鋼板では、前記磁区制御処理線における前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一である。

(13) 好ましくは、上記(12)に記載の方向性電磁鋼板では、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たし、 D_m は、前記磁区制御点における単位 μm での前記溝の深さの最大値であり、 $\sigma^2(D_m)$ は、 D_m の分散である。

(14) 好ましくは、上記(12)又は(13)に記載の方向性電磁鋼板では、 $D_{m(\beta < \beta_{Dr})} > D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たし、 $D_{m(\beta < \beta_{Dr})}$ は、前記磁区制御点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での前記溝の深さの最大値の算術平均値であり、 $D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ は、前記 β 角が β_{Dr} 以上の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での前記溝の深さの最大値の算術平均値である。

[0011] (15) 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、前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板において、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ とし、 $|\beta_{All}|$ は、前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値であり、 $|\beta_{Dr}|$ は、前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線と、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における、 β 角の絶対値の平均値である。

(16) 好ましくは、上記(15)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。

(17) 好ましくは、上記(15)又は(16)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。

(18) 好ましくは、上記(15)又は(16)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。

(19) 好ましくは、上記(15)に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、前記磁区制御処理領域に磁区制御処理を適用する工程において、磁区制御強度を不均一にする。

発明の効果

[0012] 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。

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]磁区制御処理前の方向性電磁鋼板の磁区幅の分布の一例を示すグラフである。

[図4B]磁区制御処理後の方向性電磁鋼板の磁区幅の分布の一例を示すグラフである。

[図4C]図4A及び図4Bの差分を示すグラフである。

[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。

[図13] $|\beta_{A11}|$ の算出の際に設定される仮想線VL1及び仮想線VL2の説明図である。

[図14]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15]磁区幅の大きさと、磁区制御飽和強度との関係を模式的に示すグラフである。

[図16] β 角の大きさと、磁区制御飽和強度との関係を模式的に示すグラフである。

[図17]磁区制御処理線が熱歪みである方向性電磁鋼板の断面模式図である。

[図18]磁区制御処理線が溝である方向性電磁鋼板の断面模式図である。

[図19]磁区制御処理線が熱歪みである場合における、磁区制御処理線と仮想線との交点における磁区制御強度の測定方法を説明する平面模式図である。

[図20]磁区制御処理線が溝である場合における、磁区制御処理線と仮想線との交点における磁区制御強度の測定方法を説明する平面模式図である。

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、その表面に磁区制御処理線11を有し、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たす。 $|\beta_{A11}|$ は、方向性電磁鋼板1の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値である。 $|\beta_{Dr}|$ は、方向性電磁鋼板1の圧延方向RDに沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線VL3と、磁区制御処理線11との交点である磁区制御点VP2における、 β 角の絶対値の平均値である。

[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そろ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 $\langle 100 \rangle$ 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／又は溝である。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。少なくとも一部の磁区制御処理線 11 は、後述する β 角が大きい領域 12B において途切れている。

[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] (β 角)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 では、 β 角を測定することによって算出される値 $|\beta_{A11}|$ 、及び $|\beta_{Dr}|$ が、所定の関係式を満たす。 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。

[0020] 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。

[0021] ($|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$)

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 1 は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たす。 $|\beta_{A11}|$ は、方向性電磁鋼板 1 の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値である。 $|\beta_{Dr}|$ は、磁区制御処理線 11 における β 角の指標である。具体的には、 $|\beta_{Dr}|$ は、方向性電磁鋼板 1 の圧延方向 RD に沿って平行に 2 mm 間隔で設定される複数の仮想線 VL3 と、磁区制御処理線 11 との交点である磁区制御点 VP2 における、 β 角の絶対値の平均値である。複数の磁区制御点 VP2 それぞれにおいて測定される β 角の絶対値を平均することにより、 $|\beta_{Dr}|$ が得られる。 $|\beta_{A11}|$ 及び $|\beta_{Dr}|$ の測定方法の詳細は後述される。

[0022] 方向性電磁鋼板 1 が $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たす場合、 β 角が小さい領域 12A に優先的に磁区制御処理線 11 が設けられている。一般的に、方向性電磁鋼板 1 は、 β 角が小さい領域 12A、及び β 角が大きい領域

12Bを有する。図1に模式的に例示される方向性電磁鋼板1においては、 β 角が小さい領域12Aに優先的に磁区制御処理線11を配置している。そのため、磁区制御処理線11における β 角の指標である $|\beta_{Dr}|$ は、方向性電磁鋼板1の表面全体にわたる β 角の平均値 $|\beta_{All}|$ よりも小さくなる。一方、図2に示される通常の方法による方向性電磁鋼板1においては、 β 角の分布を考慮せずに磁区制御処理線11が配置される。そのため、磁区制御処理線11における β 角の指標である $|\beta_{Dr}|$ は、方向性電磁鋼板1の表面全体にわたる β 角の平均値 $|\beta_{All}|$ と実質的に同一値となる。

[0023] (基本原理及び作用効果)

本発明者らは、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ が満たされている方向性電磁鋼板1によれば、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、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ が満たされている方向性電磁鋼板1においては、 β 角が小さい領域12A、即ち磁区制御処理前の段階で磁区幅が広がった領域に磁区制御処理線11が設けられている一方で、 β 角が大きい領域12B、即ち磁区制御処理前の段階で磁区幅が狭かった領域に対する磁区制御処理が抑制されているからである。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。

[0024] 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。

[0025] 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 $50\mu\text{m}$ 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。

[0026] 図4Cによれば、磁区制御処理によって50 μ m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500 μ m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。

[0027] 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、磁区制御処理後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 U_a (mJ/mm²)、及び照射ピッチ PL (mm)を、それぞれ、 $U_a = 1.5$ mJ/mm²、 $PL = 4$ mmとした。

[0028] 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500 μ m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、磁区制御前の磁区幅が所定の値よりも狭い領域においては十分に得られないと考えられる。磁区幅が所定の値よりも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。

[0029] 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る。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。

[0030] また、図3に示されるように、磁区制御処理前の磁区幅と、 β 角との間には密接な関係がある。 β 角が小さい領域12Aは、磁区制御処理前の段階における磁区幅が広い領域と略一致する。従って、 β 角が小さい領域12Aに優先的に磁区制御処理線11が設けられ、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ が満たされている方向性電磁鋼板1は、磁区幅が広い領域に優先的に磁区制御処理が行われた方向性電磁鋼板1である。換言すると、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ が満たされている方向性電磁鋼板1は、磁区幅が広い領域に対して優先的に磁区制御処理を行うことにより、低鉄損化及び低騒音化の両方を達成することができる。

[0031] 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。

[0032] ($|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ の好ましい数値範囲)

$|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ は、大きいほど騒音特性を向上させる観点からは好ましい。 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ は、例えば 0.2° 以上、 0.5° 以上、又は 1.0° 以上とされることが一層好ましい。即ち、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.2^\circ$ 、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.5^\circ$ 、又は $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 1.0^\circ$ が満たされることが一層好ましい。これにより、騒音特性の一層の改善が達成される。

[0033] $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ の上限は特に限定されないが、例えば $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ が 5.0° 以下、 4.0° 以下、又は 3.0° 以下であってもよい。

[0034] ($|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ と、 σ_{A11} との関係)

方向性電磁鋼板1は、好ましくは、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ を満たす。 σ_{A11} は、方向性電磁鋼板1の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の標準偏差である。方向性電磁鋼板1の表面において測定される β 角にはばらつきがある。 β 角のばらつきの指標が σ_{A11} である。 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ が $\sigma_{A11}/2$ 超である場合、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。

[0035] (σ_{Dr} と σ_{All} との関係)

方向性電磁鋼板1は、好ましくは、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たす。 σ_{All} は、方向性電磁鋼板1の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の標準偏差であり、 σ_{Dr} は、方向性電磁鋼板1の圧延方向RDに沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線VL3と、磁区制御処理線11との交点である磁区制御点VP2における、 β 角の絶対値の標準偏差である。 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たす方向性電磁鋼板1においては、磁区制御点VP2における β 角のばらつきが、方向性電磁鋼板1の全体的な β 角のばらつきよりも小さくされている。すなわち、この場合、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。

[0036] (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。

[0037] 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。

[0038] 好ましくは、本実施形態では、磁区制御処理前の方向性電磁鋼板の磁区幅に応じて、磁区制御強度を決定する。磁区制御強度とは、磁区制御の手段が熱歪みである場合は熱歪みの量であり、磁区制御の手段が溝である場合は溝

の深さである。

[0039] 磁区制御の強度が大きいほど、磁区を細分化する効果が高い。一方、磁区制御の強度が大きいほど、ヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化を招きやすい。また、本発明者らの新たな知見によれば、方向性電磁鋼板においては、磁区制御飽和強度が一様ではない。

[0040] 磁区制御飽和強度とは、磁区を細分化することによる効果が実質的に飽和する磁区制御強度のことである。磁区制御強度が磁区制御飽和強度以下である場合は、磁区制御強度が大きいほど、鉄損は低減される。しかしながら、磁区制御強度が磁区制御飽和強度を超過する場合は、磁区制御強度を高めても鉄損低減効果はほとんど高められない。一方、磁区制御強度が磁区制御飽和強度を超過する場合であっても、磁区制御の強度が大きいほど、ヒステリシス損が増大し、騒音特性が悪化する。従って、磁区制御強度は、磁区制御飽和強度を超過しない範囲内とすることが極めて好ましい。

[0041] また、本発明者らは、磁区制御飽和強度は β 角と強い相関関係を有することを知見した。 β 角が小さい箇所では、磁区制御飽和強度が大きい。また、磁区制御処理をする前の方向性電磁鋼板において、 β 角と磁区幅の間にも相関関係がある。磁区制御処理をする前の方向性電磁鋼板では、 β 角が大きいほど磁区幅が狭い。ただし、磁区制御処理後の方向性電磁鋼板では、磁区幅と β 角との相関関係は小さくなる。磁区制御処理は、磁区幅を変化させる一方で、 β 角を変化させないからである。

[0042] 従って、磁区幅又は β 角の大きさに応じて、最適な磁区制御強度を選択することが好ましい。具体的には、磁区幅が大きく、 β 角が小さい箇所では、磁区制御強度が大きい磁区制御処理を行い、磁区幅が小さく、 β 角が大きい箇所では、磁区制御強度が小さい磁区制御処理を行うことが好ましい。また、上述の通り、元の磁区幅が所定の値よりも狭い領域には磁区制御処理を施さない。これにより、磁区制御強度が不均一な方向性電磁鋼板が得られる。このような方向性電磁鋼板においては、磁区制御後の方向性電磁鋼板の鉄損がさらに低減される。その一方で、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリ

シス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0043] 図15に、磁区幅に基づいて磁区制御強度を定める方法を模式的に説明するグラフを示す。図15の縦軸は磁区制御強度であり、横軸は磁区幅の大きさである。図15の実線のグラフは、磁区制御飽和強度である。磁区幅が狭い領域においては、磁区制御の効果が得られないので、磁区制御飽和強度は0である。例えば、磁区幅が500 μm を超える領域においては、磁区制御の効果が得られる。そして、磁区幅が500 μm を超える領域においては、磁区幅が拡大するほど、磁区制御飽和強度も大きくなる。そして、例えば、磁区幅が約1200 μm を超える領域においては、磁区制御飽和強度は略一定となる。ここで、磁区制御の効果が得られる領域は、500 μm を超える領域に限定されない。磁区制御飽和強度が略一定となる領域は、約1200 μm を超える領域に限定されない。これらの領域は、種々の条件により変化する。

[0044] 図16に、 β 角に基づいて磁区制御強度を定める方法を模式的に説明するグラフを示す。図16の縦軸は磁区制御強度であり、横軸は β 角の大きさである。図16の実線のグラフは、磁区制御飽和強度である。 β 角が大きい領域においては、磁区制御の効果が得られないので、磁区制御飽和強度は0である。 β 角が所定値を下回る領域においては、磁区制御の効果が得られる。例えば β 角が2.0°以下である場合、磁区制御の効果が得られると推定される。そして、 β 角が所定値を下回る領域においては、 β 角が拡大するほど、磁区制御飽和強度も大きくなる。そして、 β 角がさらに小さい領域においては、磁区制御飽和強度は略一定となる。

[0045] 磁区制御を実施する箇所の磁区幅と、磁区制御強度との関係が、図11における実線のグラフ上にあることが最も好ましい。又は、磁区制御を実施する箇所の β 角と、磁区制御強度との関係が、図16における実線のグラフ上にあることが最も好ましい。磁区制御飽和強度は、磁区制御強度の目標値として用いることができる。

[0046] さらに、磁区制御効果が発現する最小の強度である磁区制御最小強度が存

在する。磁区制御をする場合は、磁区制御強度が、磁区制御最小強度以上であることが一層好ましい。

[0047] ただし、磁区制御強度は、目標値である磁区制御飽和強度に対して若干ばらついていてもよい。図15及び図16において、磁区制御最小強度以上の領域であって、且つ、磁区制御飽和強度のグラフから一定範囲内の領域を、磁区制御強度の目標範囲と称する。磁区制御強度及び磁区制御対象部の磁区幅は、図15及び図16における破線で囲まれた網掛け領域の内部にあることが好ましい。

[0048] これにより、磁区制御強度が不均一な方向性電磁鋼板が得られる。このような方向性電磁鋼板では、 β 角に応じて、磁区制御強度が異なる。このような方向性電磁鋼板においては、磁区制御後の方向性電磁鋼板の鉄損がさらに低減される。その一方で、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0049] 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、図1に示すように直線であってもよく、図14に示すように曲線であってもよい。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が曲線であれば、磁区制御処理の自由度が向上することで、 β 角が小さい箇所のみを選択的に磁区制御処理を行うことが容易となり、方向性電磁鋼板1の性能が向上するため好ましい。

[0050] (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。

[0051] 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。

[0052] 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、M

〇センサ33に対して、偏光面の揃った光を照射する。

[0053] 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の内部を通過して反射層で反射される。反射光は、MOセンサ33の内部を再び通過して、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。

[0054] 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。

[0055] 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。

[0056] 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。

[0057] 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。

[0058] 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。

[0059] 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/F 49 を介してネットワークから受信するようにしてもよい。

[0060] 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。

[0061] 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/F 49 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。

[0062] 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。

[0063] 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。

[0064] 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。

[0065] 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。

[0066] 通板装置515は、原板2を圧延方向RDに通板する。

[0067] 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。

[0068] 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換し、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。

[0069] 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。

[0070] 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

L B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。

[0071] 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。

[0072] 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。

[0073] 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。

[0074] 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が出力するレーザービームLBのパワーのオンとオフを制御する。レーザー照射装置500が解析装置40に電氣的に接続されている場合、応力導入信号は、解析装置40からレーザー照射装置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ー照射装置500に入力されてもよい。

[0075] （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。

- [0076] 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 S 6 2 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 2 1 を決定する工程 S 6 4 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 2 1 に、磁区制御処理を適用する工程 S 6 6 と、を備える。
- [0077] まず、原板 2 の磁区画像を取得する（図 9 の S 6 2 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 3 0 により取得することができる。次いで、磁区画像から 1 8 0 ° 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 4 0 の演算部 4 1 を用いることにより導出可能である。
- [0078] そして、磁区幅が所定値以上（例えば、約 5 0 0 μ m 以上）の領域を、磁区制御処理領域 2 1 として決定する（図 9 の S 6 4 参照）。なお、原板 2 における磁区幅が所定値以上の領域は、方向性電磁鋼板 1 における β 角が小さい領域 1 2 A に対応する。
- [0079] 表示部 4 5 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 2 1 を決定し、磁区制御処理領域 2 1 を表す応力導入信号をレーザ照射装置 5 0 0 に入力するようにしてもよい。
- [0080] 次いで、磁区制御処理領域 2 1 に対して優先的に、磁区制御処理を施す（図 9 の S 6 6 参照）。好ましくは、磁区制御処理領域 2 1 のみに対して、磁区制御処理を施す。磁区制御処理線 1 1 が熱歪みである場合、磁区制御処理は、レーザ照射装置 5 0 0 によるレーザビーム L B 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 1 1 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。
- [0081] 磁区制御処理領域 2 1 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 2 1 を特定するための処理は、例えば、解析装置 4 0 の演算部 4 1 によって実行される。

- [0082] 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 $500\mu\text{m}$ 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。
- [0083] 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。
- [0084] 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。
- [0085] 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。
- [0086] 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。
- [0087] （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 $0 \leq k \leq N_k - 1$ とし、 l 方向の範囲を $0 \leq l \leq$

$N_k - 1$ とした矩形窓の窓関数 $W_a(k, l)$ を用いる(N_k 及び N_l は自然数)。窓関数 $W_a(k, l)$ としては、Hamming窓、Hanning窓、Blackman窓などが適用可能である。

[0088] 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 $W_a(k, l)$ 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 $nS_k \leq k \leq nS_k + N_k - 1$ 、 $mS_l \leq l \leq mS_l + N_l - 1$ 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]

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

[0089] 図10に、磁区画像 G から、観察位置 $(n, m) = (1, 1)$ 、 $(2, 2)$ 、 $(3, 3)$ 、 \dots 、 (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。

[0090] 本実施形態において、窓関数 $W_a(k, l)$ 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。

[0091] (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]

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

ここで、 f_k 及び f_l は空間周波数である。

[0092] 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]

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

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。

[0093] 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。

[0094] (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。

[0095] 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]

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

[0096] 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。

- [0097] 図12に、原板2の一例の平面図を示す。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。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12A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12Bと概ね対応する。図12に示される破線に、磁区制御処理を適用する。
- [0098] 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。
- [0099] 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。
- [0100] 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／又は絶縁被膜を有してもよい

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、フォスフェイト被膜及び／又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、フォスフェイト被膜及び／又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。

[0101] (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 : 0~0.080%、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。

[0102] 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 0.15~0.30mm 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。

[0103] (表面処理)

方向性電磁鋼板 1 及び原板 2 は、フォスフェ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。フォスフェ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。

[0104] 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。

[0105] 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 にもたらしすることができる。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。

[0106] 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。

[0107] (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、 $0^\circ \sim 45^\circ$ 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。

[0108] 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TD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。

[0109] (磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔)

圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔Pは、特に限定されない。間隔Pが小さいほど、鉄損を改善する効果が高められる。一方、間隔Pが大きいほど、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間隔を適宜選択することができる。例えば、圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔Pを1.0mm以上、2.0mm以上、3.0mm以上、又は5.0mm以上としてもよい。圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔Pを10.0mm以下、9.0mm以下、8.0mm以下、又は7.0mm以下としてもよい。

[0110] 図1に例示される方向性電磁鋼板1では、磁区制御処理線11が一定間隔で設けられている。一方、圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線1

1の、圧延方向RDに沿った間隔Pがばらついていてもよい。例えば、圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔Pの平均値を1.0mm以上、2.0mm以上、3.0mm以上、又は5.0mm以上としてもよい。圧延方向RDに沿って隣り合う磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔Pの平均値を10.0mm以下、9.0mm以下、8.0mm以下、又は7.0mm以下としてもよい。

[0111] (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。

[0112] 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。

[0113] (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。

[0114] 溝の深さは特に限定されないが、例えば5 μ m~50 μ mとすることが好

ましい。溝の深さを $6\mu\text{m}$ 以上、 $7\mu\text{m}$ 以上、又は $10\mu\text{m}$ 以上としてもよい。溝の深さを $48\mu\text{m}$ 以下、 $45\mu\text{m}$ 以下、又は $40\mu\text{m}$ 以下としてもよい。

[0115] 溝の幅は特に限定されないが、例えば $10\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ とすることが好ましい。溝の幅を $20\mu\text{m}$ 以上、 $30\mu\text{m}$ 以上、又は $50\mu\text{m}$ 以上と規定してもよい。溝の幅を $280\mu\text{m}$ 以下、 $250\mu\text{m}$ 以下、又は $200\mu\text{m}$ 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。

[0116] (磁区制御点の数)

磁区制御点の数が多いほど、磁区制御処理線が多く、磁区制御処理された領域が広がる。そのため、鉄損低減の観点からは磁区制御点の数が多いことが好ましい。例えば、方向性電磁鋼板1における磁区制御点の数が、 10000mm^2 あたり10点以上、50点以上、又は100点以上であることが好ましい。

[0117] (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辺の長さを 100mm 未満としてもよい。この場合、試料面積の合計値が 10000mm^2 以上となるようにする。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。

[0118] (磁区制御処理線 1 1 の特定方法)

磁区制御処理線 1 1 が溝である場合、磁区制御処理線 1 1 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 1 1 が目視可能となる。

[0119] 磁区制御処理線 1 1 が熱歪みである場合は、磁区制御処理線 1 1 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。

[0120] (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 $\langle 001 \rangle$ 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。

[0121] (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。

[0122] ($|\beta_{A11}|$ の算出方法)

$|\beta_{A11}|$ の算出方法の概要は以下の通りである。方向性電磁鋼板1から採取された試料の表面に対し、図13に例示されるように、格子状に測定点を設定する。それぞれの測定点で、 β 角の絶対値を測定し、これらの平均値を算出する。この平均値を、 $|\beta_{A11}|$ とみなす。

[0123] 具体的には、1辺が100mm以上の試料（図13の、一点鎖線で囲まれた矩形領域）の表面に対し、圧延直角方向TDに平行な仮想線VL1と、圧延方向RDに平行な仮想線VL2とを設定する。仮想線VL1及び仮想線VL2を設定するにあたり、磁区制御処理線11の存在は考慮されない。仮想線VL1の間隔は2mmとする。仮想線VL2の間隔は2mmとする。仮想線VL1及び仮想線VL2は、試料の全面にわたって配置する。仮想線VL1と仮想線VL2との交点VP1における β 角の絶対値を測定する。

[0124] ($|\beta_{Dr}|$ の算出方法)

$|\beta_{Dr}|$ の算出方法は、以下の通りである。まず、1辺が100mm以上の試料（図1又は図2の、一点鎖線で囲まれた矩形領域）の表面において、方向性電磁鋼板1の圧延方向RDに沿って平行に、複数の仮想線VL3を一定間隔で設定する。なお、VL3は、 $|\beta_{A11}|$ の算出時の圧延方向RDに平行な仮想線VL2と同一でもよいし、異なってもよい。仮想線VL3の間隔は2mmとする。仮想線VL3は、試料の全面にわたって配置する。次に、磁区制御点VP2（即ち仮想線VL3と磁区制御処理線11との交点）を特定する。そして、磁区制御点VP2それぞれにおける β 角の絶対値を測定し、これらの平均値を算出する。この平均値を、 $|\beta_{Dr}|$ とみなす。圧延

方向RD及び磁区制御処理線11の特定方法、及び β 角の測定方法は上述の通りである。

[0125] (σ_{AII} の測定方法)

σ_{AII} は、 $|\beta_{AII}|$ の算出に用いた、各測定点における β 角の絶対値の標準偏差を算出することによって求められる。各測定点における β 角の絶対値の特定方法は上述の通りである。

[0126] (σ_{Dr} の測定方法)

σ_{Dr} は、磁区制御点VP2それぞれにおける β 角の絶対値の標準偏差を算出することによって求められる。磁区制御点VP2の特定方法は上述の通りである。

[0127] (原板2及び方向性電磁鋼板1の化学成分の測定方法)

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、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。

[0128] 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/又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/又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の化学成分を分析すればよい。

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

オ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、ウエス等を持ち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。

[0129] (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。

[0130] (磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔の測定方法)

磁区制御処理線11の、圧延方向RDに沿った間隔は、上述の手順で磁区制御処理線11及び圧延方向RDを特定した後で、公知の長さ測定手段を用いて測定することができる。

[0131] (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」 Ultramic roscopy Vol 106, No. 4-5, March 2006, P. 307-313に詳細に説明されている。

- [0132] 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り応力成分を抽出し、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り応力成分を抽出できる。
- [0133] 測定箇所数は、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。そのため、引張り応力の最大値が40MPa以上であるかを判断する目的であれば、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。ただし、後述する $\sigma(TS_m)$ ²、 $TS_m(\beta < 2)$ 、又は $TS_m(\beta \geq 2)$ を求める場合には、測定を中止せず、各測定点での引張り応力を求める。
- [0134] (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が張力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。

[0135] 好ましくは、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、磁区制御処理領域における磁区制御強度を不均一にする。磁区制御強度とは、磁区制御の手段が熱歪み541である場合は、熱歪み541に導入される引張強さの最大値であり、磁区制御の手段が溝542である場合は、溝542の深さの最大値である。

[0136] 「熱歪み541に導入される引張強さの最大値」とは、一つの任意の測定用断面において測定される、引張強さの最大値である。ここで留意すべきは、一つの測定用断面において引張強さの大きさ及び方向はばらついており、従って、一つの測定用断面に対して、一つの「熱歪み541に導入される引張強さの最大値」が特定される点である。図17に模式的に示されるように、熱歪み541は、断面においてある程度の広がりを持っている。レーザが直接的に照射された部位において最も引張強さが大きく、当該部位から離れた部位では引張強さが小さい。即ち、断面における測定部位および測定方向ごとに、引張強さの測定値が異なる。後述の引張強さの測定方法によれば、断面における引張強さの分布、及び最大値を導出することができる。

[0137] 磁区制御強度が均一である場合、磁区細分化処理線54の全体にわたり、熱歪み541に導入される引張強さの最大値は一定値となる。一方、磁区制御強度が不均一である場合、磁区細分化処理線における、熱歪みに導入された引張強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一である。以下、熱歪みに導入された引張強さの最大値を、単に「引張強さ」と称する場合がある。

[0138] 「溝542の深さの最大値」とは、後述の方法によって測定される、一つの任意の測定点における溝542の深さの最大値である。図18に模式的に示されるように、溝542の深さもまた、一つの測定点において一様ではない。一般的に、溝の縁に近いほど、溝の深さは小さい。従って、一つの測定用断面に対して、一つの「溝542の深さの最大値」が特定される。

[0139] 磁区制御強度が均一である場合、磁区細分化処理線54の全体にわたり、溝542の深さの最大値は一定値となる。一方、磁区制御強度が不均一であ

る場合、磁区細分化処理線における、溝542の深さの最大値が、溝の深さの測定点毎に不均一である。以下、溝542の深さの最大値を、単に「溝の深さ」と称する場合がある。

[0140] 上述の通り、 β 角が小さい箇所では、磁区制御飽和強度が大きい。 β 角が小さい箇所では、磁区制御強度が大きい磁区制御処理を行い、 β 角が大きい箇所では、磁区制御強度が小さい磁区制御処理を行うことが好ましい。このように、 β 角の大きさに応じて最適な磁区制御強度を選択する磁区制御処理が施された方向性電磁鋼板においては、磁区制御処理領域における磁区制御強度が不均一になる。 β 角が大きい箇所に設けられた磁区制御処理線では、溝が浅いか、又は熱歪みに導入された引張強さが小さい。 β 角が小さい箇所に設けられた磁区制御処理線では、溝が深いか、又は熱歪みに導入された引張強さが大きい。このような方向性電磁鋼板においては、磁区制御後の方向性電磁鋼板の鉄損がさらに低減される。その一方で、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0141] 磁区制御処理線が熱歪みである場合、方向性電磁鋼板が $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たすことが好ましい。ここで、 TS_m は、複数の仮想線VL3と、磁区制御処理線との交点である、複数の磁区制御点それぞれにおいて測定される、熱歪みに導入された単位MPaでの引張強さである。 $\sigma^2(TS_m)$ は、 TS_m の、分散である。

[0142] $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たす場合、磁区制御強度が磁区幅の大きさ又は β 角の大きさに基づいて変更されており、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0143] TS_m 及び $\sigma^2(TS_m)$ の測定方法の一例を図19に示す。図19における破線が、仮想線VL3である。図19におけるX印及びO印が、仮想線VL3と、磁区制御処理線である熱歪み541との交点である。なお、X印が付された箇所における β 角は、 β_{Dr} 以上であり、O印が付された箇所における β 角は β_{Dr} 未満である。ただし、 $\sigma^2(TS_m)$ の算出に当たって、交点の β 角は考慮する必要がない。

[0144] まず、仮想線VL3と磁区制御処理線である熱歪み541との交点を特定する。熱歪み541が肉眼で視認できない場合は、磁区画像に基づいて熱歪み541を特定する。なお、測定領域の形状は、圧延方向RDに沿った大きさが100mm以上であり、且つ圧延垂直方向TDに沿った大きさが100 μ m以上である長方形とすることが好ましい。長方形の一辺は、圧延方向RDと平行にすることが好ましい。

[0145] そして、測定領域における全ての交点における σ_m を測定し、 σ_m の分散 $\sigma^2(TS_m)$ を算出する。

複数の測定点それぞれにおいて特定された引張強さの最大値 TS_M の分散 $\sigma^2(TS_M)$ は、JIS Z 8101-1:2015「統計用語及び記号—第1部：一般統計用語及び確率で用いられる用語」の段落2.36に記載された母分散の導出方法に従って導出する。

[0146] 又は、磁区制御処理線が熱歪みである場合、方向性電磁鋼板が $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たすことが好ましい。 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})}$ は、方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線VL3と、磁区制御処理線との交点である、複数の磁区処理点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の磁区処理点それぞれにおいて測定される、熱歪みに導入された単位MPaでの引張強さの最大値の、算術平均値である。 $TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ は、 β 角が β_{Dr} 以上の磁区処理点それぞれにおいて測定される、熱歪みに導入された単位MPaでの引張強さの最大値の、算術平均値である。

[0147] $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たす場合、 β 角が小さい所では磁区制御強度が大きく、 β 角が大きい所では磁区制御強度が小さくされている。従って、磁区制御後の方向性電磁鋼板の鉄損がさらに低減される。その一方で、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0148] 一方、磁区制御処理線が溝542である場合、好ましくは、方向性電磁鋼板が $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たす。 D_m は、複数の仮想線VL3と、磁区制御処理線との交点である磁区制御点における単位 μ mでの溝542の深さで

ある。 $\sigma^2(D_m)$ は、 D_m の分散である。

[0149] $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たす場合、磁区制御強度が磁区幅の大きさ又は β 角の大きさに基づいて変更されており、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0150] D_m 及び $\sigma^2(D_m)$ の測定方法の一例を図20に示す。図20における破線が、方向性電磁鋼板の圧延方向RDに沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線VL3である。図20におけるX印及びO印が、仮想線VL3と磁区制御処理線である溝542との交点である。なお、X印が付された箇所における β 角は β_{Dr} 以上であり、O印が付された箇所における β 角は β_{Dr} 未満である。ただし、 $\sigma^2(D_m)$ の算出に当たって、交点の β 角は考慮する必要がない。

[0151] まず、仮想線VL3と磁区制御処理線との交点を特定する。磁区制御処理線が肉眼で視認できない場合は、磁区画像に基づいて磁区制御処理線を特定する。磁区細分化処理線が溝542である場合、磁区細分化処理線を肉眼で視認することは容易である。なお、測定領域の形状は、圧延方向RDに沿った大きさが100mm以上であり、且つ圧延垂直方向TDに沿った大きさが100mm以上である長方形とすることが好ましい。長方形の一辺は、圧延方向RDと平行にすることが好ましい。

[0152] そして、測定領域における全ての交点における溝の深さの最大値 D_m を測定し、溝の深さの最大値 D_m の分散 $\sigma^2(D_m)$ を算出する。溝の最大深さ D_m の測定方法は以下の通りである。Bruker社製、白色干渉顕微鏡Contour GT-1を用いて測定する。使用するレンズは対物5倍（開口数0.12、光学分解能 $2.2\mu\text{m}$ ）内部1倍を用い、光源は白色LED、カメラはモノクロCCD（ 1200×1000 画素）を用いる。画素サイズは、 $1.37\mu\text{m}$ とし、解析ソフトVision64 Map Premium 9.2を用いて、最小二乗平面への当てはめによる傾斜補正を行った後、カットオフ値 2.5mm のガウシアンフィルタを用いて長波長のうねりを除去し解析した。なお、解析時必要に応じて画素サイズを $10\mu\text{m}$ に再サン

リングしてもよい。また、明らかに異常点と判断される部分は解析から除外してもよい、サンプルの性状によって、レンズの種類、フィルタの値、補正の方法を変更してもよい。なお、方向性電磁鋼板に溝が形成されているものの、絶縁被膜等によって表面から凹凸が測定出来ない場合は、公知の方法を用いて絶縁被膜等を除去して上記の測定を行う。

[0153] 又は、磁区制御処理線が溝542である場合、方向性電磁鋼板が $D_m(\beta < \beta_{Dr}) > D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことが好ましい。 $D_m(\beta < \beta_{Dr})$ は、方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2mm間隔で設定される複数の仮想線VL3と磁区制御処理線との交点である、複数の磁区制御点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での溝の深さの最大値の算術平均値である。 $D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ は、 β 角が β_{Dr} 以上の磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での溝の深さの最大値の算術平均値である。

[0154] 当該式が満たされる磁区制御処理線においては、 β 角が小さい所では磁区制御強度が大きく、 β 角が大きい所では磁区制御強度が小さくされている。従って、磁区制御後の方向性電磁鋼板の鉄損がさらに低減される。その一方で、磁区制御後の方向性電磁鋼板のヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化は、一層抑制される。

[0155] $TS_m(\beta < 2)$ 及び $TS_m(\beta \geq 2)$ の測定方法の一例を図20に示す。上述の通り、図20におけるX印及びO印が、仮想線VL3と、磁区制御処理線である溝542との交点である。X印が付された箇所における β 角は β_{Dr} 以上であり、O印が付された箇所における β 角は β_{Dr} 未満である。

[0156] まず、交点における β 角を測定することにより、 β 角が β_{Dr} 以上の交点、及び β 角は β_{Dr} 未満の交点を特定する。次に、 β 角が β_{Dr} 以上の全ての交点における D_m の算術平均値を算出し、これを $D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ とみなす。さらに、 β 角は β_{Dr} 未満の全ての交点における D_m の算術平均値を算出し、これを $D_m(\beta < \beta_{Dr})$ とみなす。交点における溝の深さの最大値 D_m の測定方法は上述の通りである。

実施例

[0157] 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。

[0158] (第1実施例)

J I S C 2 5 5 3 : 2 0 1 9 「方向性電磁鋼帯」の表2において23P085に分類される、板厚0.23mmの同一ロットの方向性電磁鋼板を、原板として用いた。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1において、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の範囲外の値には下線を付した。表2において、下記合否基準を満たさない値には下線を付した。

[0159] 騒音及び変圧器鉄損W16/50の評価方法は以下の通りとした。以下では、変圧器鉄損W16/50を単に鉄損と称する。まず、板厚0.23mmの方向性電磁鋼板を180枚積層して、三相変圧器鉄心を作製した。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。

[0160] 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30.50dBA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。

[0161] 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、三相変圧器の鉄損評価結果（単位W/kg）として表2に記載した。鉄損の評価結果が0.850W/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。

[0162] さらに、磁区制御処理済みの方向性電磁鋼板における $|\beta_{All}|$ 、 $|\beta_{Dr}|$ 、 σ_{All} 及び、 σ_{Dr} を測定し、表2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。

[0163] [表1]

例番号	$ \beta_{All} - \beta_{Dr} $	σ_{All}	σ_{Dr}	磁区制御 処理線の種類	備考
1	0.1	1.5	1.6	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
2	0.1	1.5	1.6	溝	β 角が小さい領域に処理線
3	0.1	1.5	1.6	混在	β 角が小さい領域に処理線
4	0.4	1.2	1.3	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
5	0.6	1.2	1.2	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
6	1.1	1.2	1.2	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
7	2.7	1.5	1.5	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
8	1.3	0.8	1.0	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
9	1.2	1.4	0.8	熱歪み	β 角が小さい領域に処理線
10	<u>0.0</u>	1.5	1.5	熱歪み	全幅にわたる直線処理線
11	<u>0.0</u>	1.4	1.4	熱歪み	ランダムな破線状の処理線
12	<u>0.0</u>	1.3	1.3	熱歪み	規則正しい破線状の処理線
13	<u>-0.5</u>	1.2	1.3	熱歪み	β 角が大きい領域に処理線
14	<u>-1.1</u>	1.2	1.2	熱歪み	β 角が大きい領域に処理線

[0164]

[表2]

例番号	騒音の評価結果	鉄損の評価結果
1	30.20	0.830
2	29.80	0.847
3	30.00	0.837
4	27.70	0.836
5	26.00	0.839
6	25.60	0.845
7	25.40	0.848
8	24.90	0.845
9	24.80	0.845
10	<u>33.60</u>	0.831
11	<u>33.05</u>	0.850
12	<u>32.94</u>	<u>0.852</u>
13	29.20	<u>0.865</u>
14	25.20	<u>0.866</u>

[0165] 例番号10では、全ての磁区制御処理線が方向性電磁鋼板の全幅にわたって形成されていた。その結果、例番号10は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たさなかった。例番号10においては、鉄損が合格範囲内であったが、騒音特性が不合格であった。

[0166] 例番号11では、磁区制御処理線が破線状に形成されていた。つまり例番号11には、例番号1～9と同様に、磁区制御処理が行われない領域を設けた。ただし例番号11では、破線に含まれる磁区制御処理線同士の隙間の大きさをランダムにばらつかせた。磁区制御処理が行われない箇所は、磁区画像における磁区幅の分布を全く考慮せずにランダムに設けられた。その結果、例番号11は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たさなかった。例番号11においては、鉄損が合格範囲内であったが、合格の判定値である0.850と同値であった。また、例番号11においては、騒音特性が不合格であった。

- [0167] 例番号12では、磁区制御処理線が規則正しい破線状に形成されていた。つまり例番号12には、例番号1～9と同様に、磁区制御処理が行われない領域を設けた。ただし例番号12では、破線に含まれる磁区制御処理線同士の間隙の大きさを一定値とした。磁区制御処理が行われない箇所は、磁区画像における磁区幅の分布を全く考慮せずに、規則正しく設けられた。その結果、例番号12は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たさなかった。例番号12においては、鉄損及び騒音特性の両方が不合格であった。
- [0168] 例番号13及び例番号14では、敢えて β 角が大きい領域に磁区制御処理を適用した。これらの例も、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たさなかった。例番号13及び例番号14においては、鉄損が不合格であった。
- [0169] 一方、例番号1～9では、磁区幅の分布に基づいて限定された磁区制御処理領域（ β 角の小さい領域）に、磁区制御処理を適用した。例番号1～9は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たしており、騒音特性及び鉄損の両方が合格範囲内であった。例番号1～9によって、低鉄損化及び低騒音化の両方が達成された。
- [0170] なお、例番号1～9によれば、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}|$ が大きいほど、騒音特性が優れることが確認された。また、例番号6～9では、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11} / 2$ が満たされていた。例9では、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ が満たされていた。これらの例では、騒音特性及び鉄損が一層優れていた。
- [0171] (第2実施例)
- 磁区制御強度を不均一とした方向性電磁鋼板の特性を評価するために、以下に説明する実験を行った。なお、全ての例において、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ は満たされていた。
- [0172] 原板に、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、条件とともに表3及び表4に記載した。なお、原板は、JIS C 2553:2019「方向性電磁鋼帯」の表2において23P085に分類される、板厚0.23mmの同一ロットの方向性電磁鋼板を用いた。

[0173] 騒音及び鉄損の測定方法、及び評価方法は第1実施例と同様とした。

[0174] [表3]

例番号	$\sigma^2(TS_m)$	$TS_m(\beta < \beta_{Dr})$	$TS_m(\beta \geq \beta_{Dr})$	$ \beta_{All} - \beta_{Dr} $	σ_{All}	σ_{Dr}	騒音の評価結果	鉄損の評価結果
A1	<u>0.2</u>	148	151	0.1	0.5	0.7	30.26	0.830
A2	<u>2.3</u>	151	153	0.2	0.5	0.7	24.35	0.820
A3	5.1	147	162	0.2	0.5	0.7	24.24	0.807
A4	<u>2.7</u>	181	123	0.2	0.5	0.7	22.73	0.820
A5	5.1	175	111	0.2	0.5	0.7	22.75	0.805
A6	<u>3.1</u>	152	153	0.2	0.3	0.5	23.83	0.814
A7	5.3	149	158	0.3	0.4	0.5	23.75	0.801
A8	<u>2.6</u>	176	141	0.3	0.4	0.5	22.84	0.813
A9	5.1	198	150	0.3	0.4	0.5	22.32	0.800
A10	<u>3.2</u>	155	157	0.2	0.5	0.4	23.43	0.819
A11	5.1	148	159	0.3	0.7	0.5	23.42	0.807
A12	<u>2.8</u>	181	132	0.3	0.7	0.5	22.21	0.820
A13	5.2	198	155	0.3	0.7	0.5	21.98	0.807
A14	5.5	204	148	0.5	0.4	0.3	21.55	0.797

[0175] 例番号A1は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たしていたので、従来の

方向性電磁鋼板よりも良好な鉄損評価結果及び騒音評価結果を示した。

[0176] 一方、例番号A2は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であった。例番号A2の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1より一層優れていた。

[0177] 例番号A3は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であり、さらに $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たしていた。例番号A3の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1及びA2より一層優れていた。

[0178] 例番号A4は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であり、さらに $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たしていた。例番号A4の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1及びA2より一層優れていた。

[0179] 例番号A5は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であり、さらに $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ 及び $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たしていた。例番号A5の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1～A5より一層優れていた。

[0180] 例番号A6は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であり、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ を満たしていた。例番号A6の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1、A2より一層優れていた。

[0181] 例番号A7は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たすことに加え

て、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11} / 2$ を満たしていた。例番号A7の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1～A3、及びA6より一層優れていた。

[0182] 例番号A8は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たすことに加えて、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11} / 2$ を満たしていた。例番号A8の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1～A4、及びA6より一層優れていた。

[0183] 例番号A9は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ 及び $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たすことに加えて、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11} / 2$ を満たしていた。例番号A9の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1～A5、及びA6～A8より一層優れていた。

[0184] 例番号A10は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号A10の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1、A2より一層優れていた。

[0185] 例番号A11は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たすことに加えて、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号A11の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1～A3、及びA10より一層優れていた。

[0186] 例番号A12は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たすことに加えて、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号A12の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1～A4、及びA10より一層優

れていた。

[0187] 例番号A13は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ 及び $TS_m(\beta < \beta_{Dr}) > TS_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加えて、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号A13の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号A1～A5、及びA10～A12より一層優れていた。

[0188] 例番号A14は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、熱歪みの量に導入された引張り強さの最大値が、引張り強さの測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ 及び $TS_m(\beta < \beta_{Dr}) > TS_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加えて、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11} / 2$ 及び $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号A14の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号A1～A14の中で最も優れていた。

[0189]

[表4]

例番号	$\sigma^2(D_m)$	$D_m(\beta < \beta_{Dr})$	$D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$	$ \beta_{All} - \beta_{Dr} $	σ_{All}	σ_{Dr}	騒音の評価結果	鉄損の評価結果
B1	<u>0.3</u>	25	25	0.1	0.5	0.7	30.07	0.831
B2	<u>1.2</u>	25	31	0.2	0.5	0.7	24.14	0.823
B3	3.4	28	32	0.2	0.5	0.7	24.06	0.809
B4	<u>1.8</u>	35	28	0.2	0.5	0.7	22.53	0.821
B5	3.4	31	22	0.2	0.5	0.7	22.52	0.808
B6	<u>1.6</u>	28	29	0.2	0.3	0.5	23.64	0.817
B7	3.3	26	38	0.3	0.4	0.5	23.54	0.802
B8	<u>2.7</u>	35	15	0.3	0.4	0.5	22.64	0.814
B9	3.1	27	18	0.3	0.4	0.5	22.21	0.803
B10	<u>2.1</u>	27	30	0.2	0.5	0.4	23.22	0.822
B11	3.4	28	38	0.3	0.7	0.5	23.22	0.809
B12	<u>1.9</u>	30	18	0.3	0.7	0.5	22.02	0.821
B13	3.2	28	25	0.3	0.7	0.5	21.78	0.809
B14	3.6	36	10	0.5	0.4	0.3	21.37	0.798

[0190] 例番号B1は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たしていたので、従来の方向性電磁鋼板よりも良好な鉄損評価結果及び騒音評価結果を示した。

- [0191] 例番号B2は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であった。例番号B2の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1より一層優れていた。
- [0192] 例番号B3は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、さらに $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たしていた。例番号B3の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1及びB2より一層優れていた。
- [0193] 例番号B4は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、さらに $D_{m(\beta < \beta_{Dr})} > D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たしていた。例番号B4の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1及びB2より一層優れていた。
- [0194] 例番号B5は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、さらに $\sigma^2(D_m) > 3.0$ 及び $D_{m(\beta < \beta_{Dr})} > D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たしていた。例番号B5の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1～B5の中で最も優れていた。
- [0195] 例番号B6は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ を満たしていた。例番号B6の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1及びB2より一層優れていた。
- [0196] 例番号B7は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たすことに加え、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ を満たしていた。例番号B7の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B1、B2、B6より一層優れていた。
- [0197] 例番号B8は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均

一であり、 $D_m(\beta < \beta_{Dr}) > D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加え、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{All}/2$ を満たしていた。例番号B 8の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B 1、B 2、B 6より一層優れていた。

[0198] 例番号B 9は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ 及び $D_m(\beta < \beta_{Dr}) > D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加え、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{All}/2$ を満たしていた。例番号B 9の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、B 1～B 5、及びB 6～B 8より一層優れていた。

[0199] 例番号B 10は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たしていた。例番号B 10の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B 1及びB 2より一層優れていた。

[0200] 例番号B 11は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たすことに加え、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たしていた。例番号B 7の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、例番号B 1、B 2、B 10より一層優れていた。

[0201] 例番号B 12は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $D_m(\beta < \beta_{Dr}) > D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加え、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たしていた。例番号B 12の鉄損及び騒音の評価結果は、例番号B 1、B 2、B 10より一層優れていた。

[0202] 例番号B 13は、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ 及び $D_m(\beta < \beta_{Dr}) > D_m(\beta \geq \beta_{Dr})$ を満たすことに加え、 $\sigma_{Dr} < \sigma_{All}$ を満たしていた。例番号B 13の鉄損及び騒音の評価結果の少なくとも一方は、B 1～B 5、及びB 10～B 12より一層優れて

いた。

[0203] 例番号B14は、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たすことに加えて、磁区制御処理線における、前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であり、 $\sigma^2(D_m) > 3.0$ 及び $D_{m(\beta < \beta_{Dr})} > D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たすことに加え、 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ 及び $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たしていた。例番号B14の鉄損及び騒音の評価結果は、B1～B14の中で最も優れていた。

符号の説明

- [0204] 1 方向性電磁鋼板
- 1 1 磁区制御処理線
 - 1 2 A β 角が小さい領域
 - 1 2 B β 角が大きい領域
 - RD 圧延方向
 - TD 圧延直角方向
 - ND 圧延面法線方向
 - VL1 $|\beta_{A11}|$ 算出用の、TDに平行な仮想線
 - VL2 $|\beta_{A11}|$ 算出用の、RDに平行な仮想線
 - VL3 $|\beta_{Dr}|$ 算出用の、TDに平行な仮想線
 - VP1 仮想線VL1と仮想線VL2との交点
 - VP2 磁区制御点
- 2 原板
- 2 1 磁区制御処理領域
 - 2 2 非磁区制御処理領域
- 30 画像取得装置
- 3 1 光源部
 - 3 3 MOセンサ
 - 3 5 イメージセンサ
 - 3 7 信号処理部

- 4 0 解析装置
- 4 1 演算部
- 4 3 メモリ
- 4 5 表示部
- 4 7 入力部
- 4 9 通信 I / F
- 5 0 0 レーザ照射装置
- 5 0 1 ポリゴンミラー
- 5 0 3 光源装置
- 5 0 5 コリメータ
- 5 0 7 集光レンズ
- 5 0 9 モータ
- 5 1 1 センサ
- 5 1 3 制御部
- 5 1 5 通板装置

請求の範囲

- [請求項1] 表面に磁区制御処理線を有する方向性電磁鋼板であって、
 $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ を満たし、
 $|\beta_{A11}|$ は、前記方向性電磁鋼板の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値であり、
 $|\beta_{Dr}|$ は、前記方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に2 m間隔で設定される複数の仮想線と、前記磁区制御処理線との交点である磁区制御点における、 β 角の絶対値の平均値である方向性電磁鋼板。
- [請求項2] $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.2^\circ$ を満たす請求項1に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項3] $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.5^\circ$ を満たす請求項1に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項4] $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| \geq 1.0^\circ$ を満たす請求項1に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項5] $|\beta_{A11}| - |\beta_{Dr}| > \sigma_{A11}/2$ を満たし、
 σ_{A11} は、前記方向性電磁鋼板の前記表面の前記全体にわたる、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差である
請求項1～4の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項6] $\sigma_{Dr} < \sigma_{A11}$ を満たし、
 σ_{A11} は、前記方向性電磁鋼板の前記表面の前記全体にわたる、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差であり、
 σ_{Dr} は、前記磁区制御点における、前記 β 角の前記絶対値の標準偏差である
請求項1～4の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項7] 前記磁区制御処理線が熱歪みである請求項1～4の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項8] 前記磁区制御処理線が溝である請求項1～4の何れか一項に記載の

方向性電磁鋼板。

[請求項9] 前記磁区制御処理線における、前記熱歪みに導入された引張り強さの最大値が、前記引張り強さの測定点毎に不均一であることを特徴とする請求項7に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項10] $\sigma^2(TS_m) > 5.0$ を満たし、
 TS_m は、複数の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みに導入された単位MPaでの前記引張り強さであり、
 $\sigma^2(TS_m)$ は、 TS_m の分散である、
 ことを特徴とする請求項9に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項11] $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})} > TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たし、
 $TS_{m(\beta < \beta_{Dr})}$ は、前記磁区処理点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の前記磁区処理点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みにおいて導入された単位MPaでの前記引張り強さの最大値の、算術平均値であり、
 $TS_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ は、前記 β 角が β_{Dr} 以上の前記磁区処理点それぞれにおいて測定される、前記熱歪みに導入された単位MPaでの前記引張り強さの前記最大値の、算術平均値である、
 ことを特徴とする請求項9又は10に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項12] 前記磁区制御処理線における前記溝の深さの最大値が、前記溝の測定点毎に不均一であることを特徴とする請求項8に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項13] $\sigma^2(D_m) > 3.0$ を満たし、
 D_m は、前記磁区制御点における単位 μm での前記溝の深さの最大値であり、
 $\sigma^2(D_m)$ は、 D_m の分散である、
 ことを特徴とする請求項12に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項14] $D_{m(\beta < \beta_{Dr})} > D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ を満たし、
 $D_{m(\beta < \beta_{Dr})}$ は、前記磁区制御点のうち、 β 角が β_{Dr} 未満の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での前記溝の深さの

最大値の算術平均値であり、

$D_{m(\beta \geq \beta_{Dr})}$ は、前記 β 角が β_{Dr} 以上の前記磁区制御点それぞれにおいて測定される、単位 μm での前記溝の深さの最大値の算術平均値である、

ことを特徴とする請求項 12 又は 13 に記載の方向性電磁鋼板。

[請求項15]

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、

前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板において、 $|\beta_{All}| - |\beta_{Dr}| \geq 0.1^\circ$ とし、

$|\beta_{All}|$ は、前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板の表面の全体にわたる、 β 角の絶対値の平均値であり、

$|\beta_{Dr}|$ は、前記磁区制御処理が適用された前記方向性電磁鋼板の圧延方向に沿って平行に 2 mm 間隔で設定される複数の仮想線と、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における、 β 角の絶対値の平均値である

方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項16]

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ことを特徴とする請求項 15 に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項17]

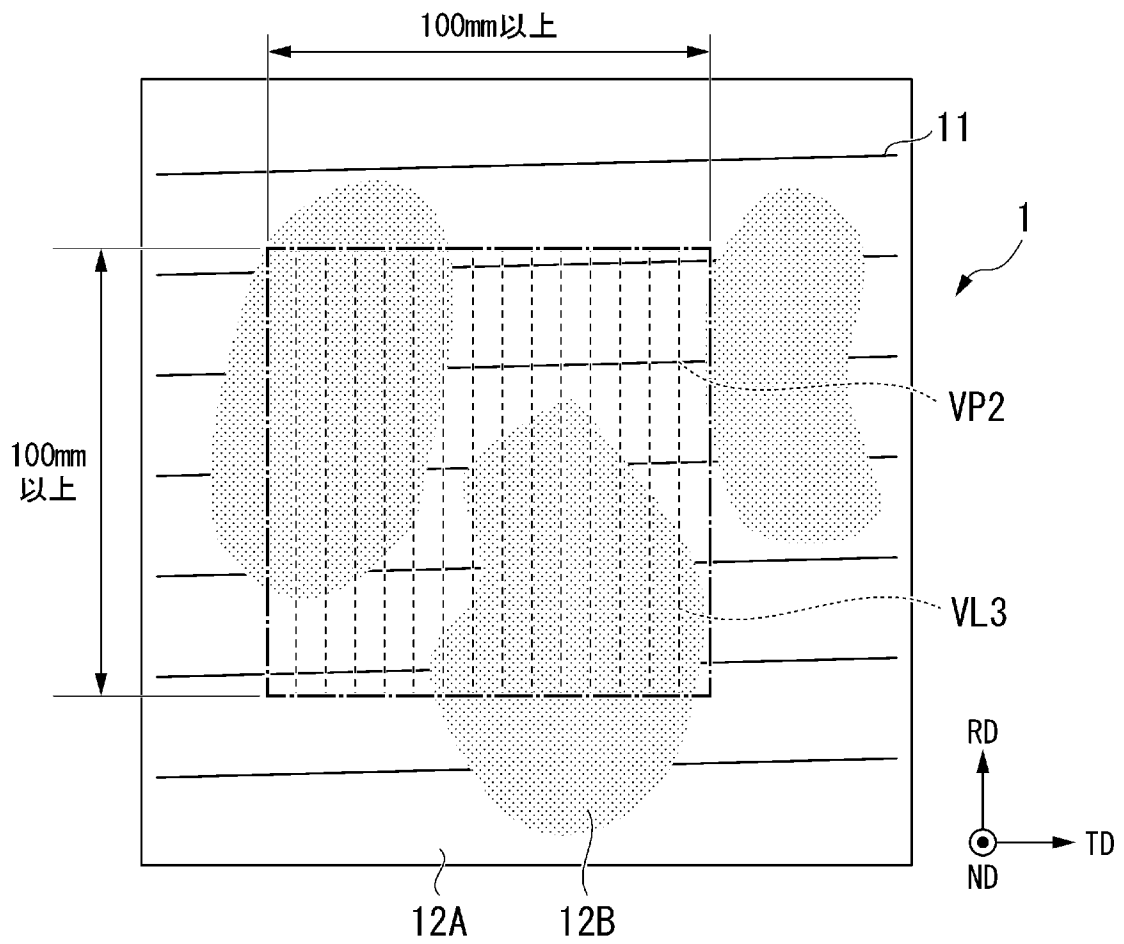
2次元フーリエ変換を用いて、前記磁区画像から前記磁区幅の分布を導出することを特徴とする請求項 15 又は 16 に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項18]

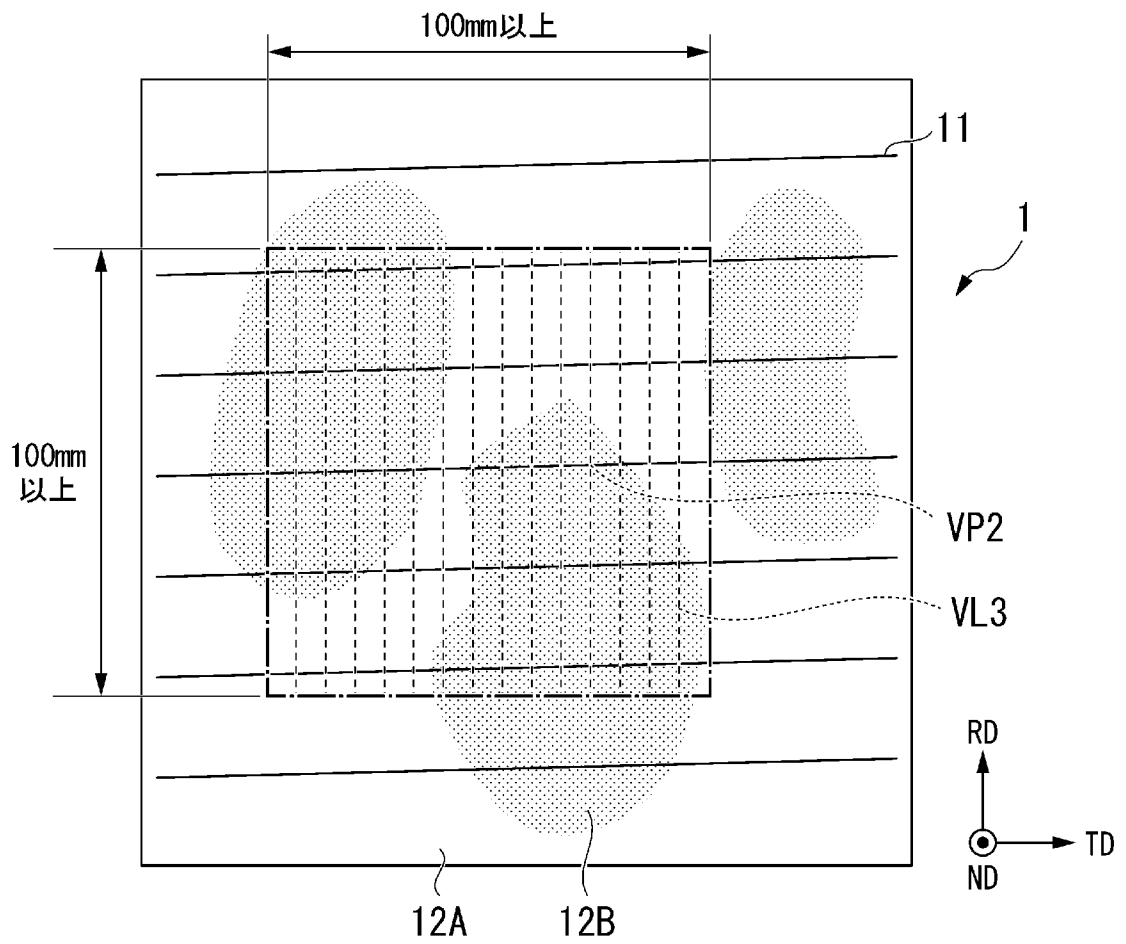
レーザ又は電子ビームの照射によって前記磁区制御処理を適用することを特徴とする請求項 15 又は 16 に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項19] 前記磁区制御処理領域に磁区制御処理を適用する工程において、磁区制御強度を不均一にすることを特徴とする請求項15に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

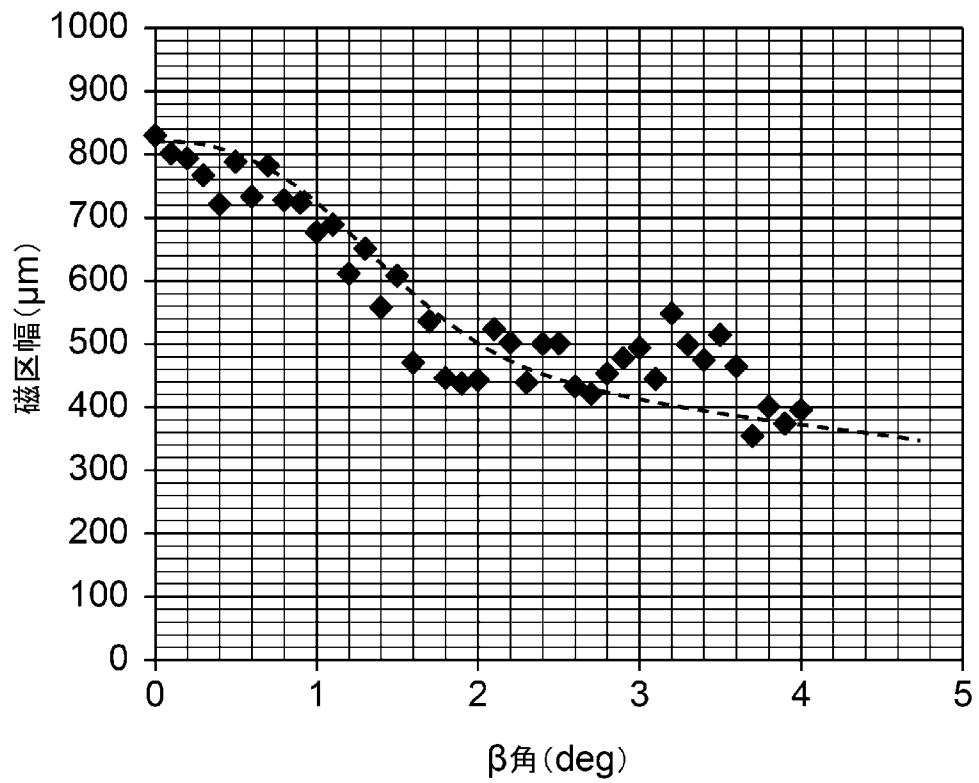
[図1]



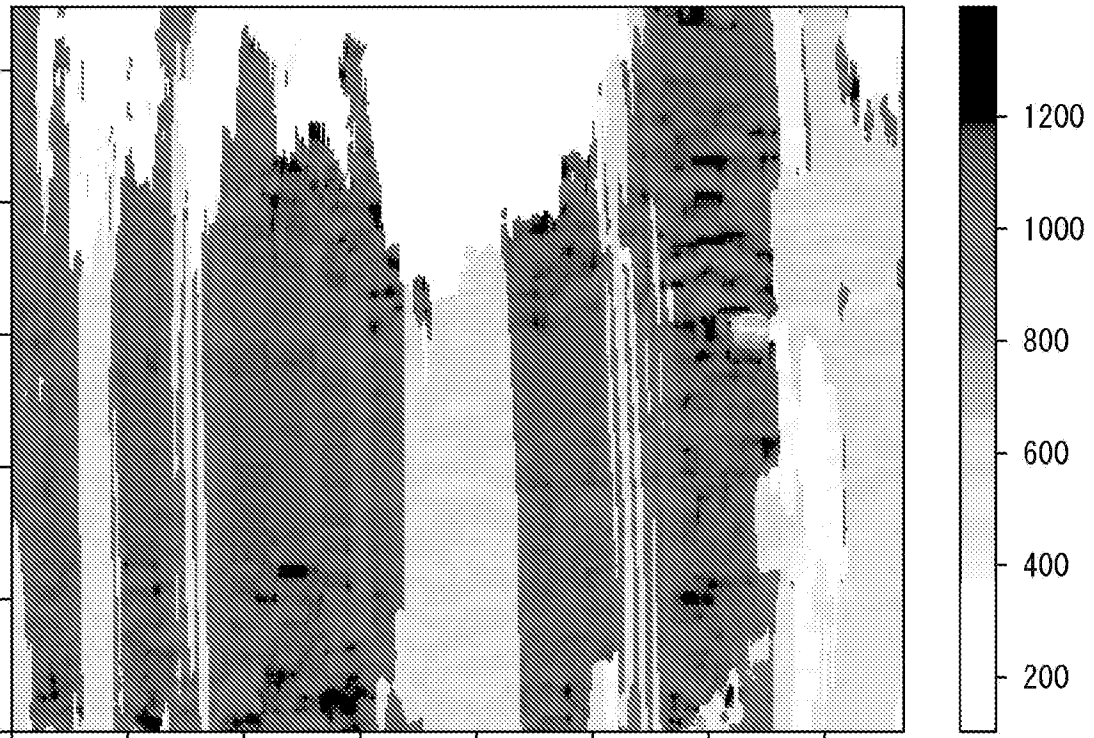
[图2]



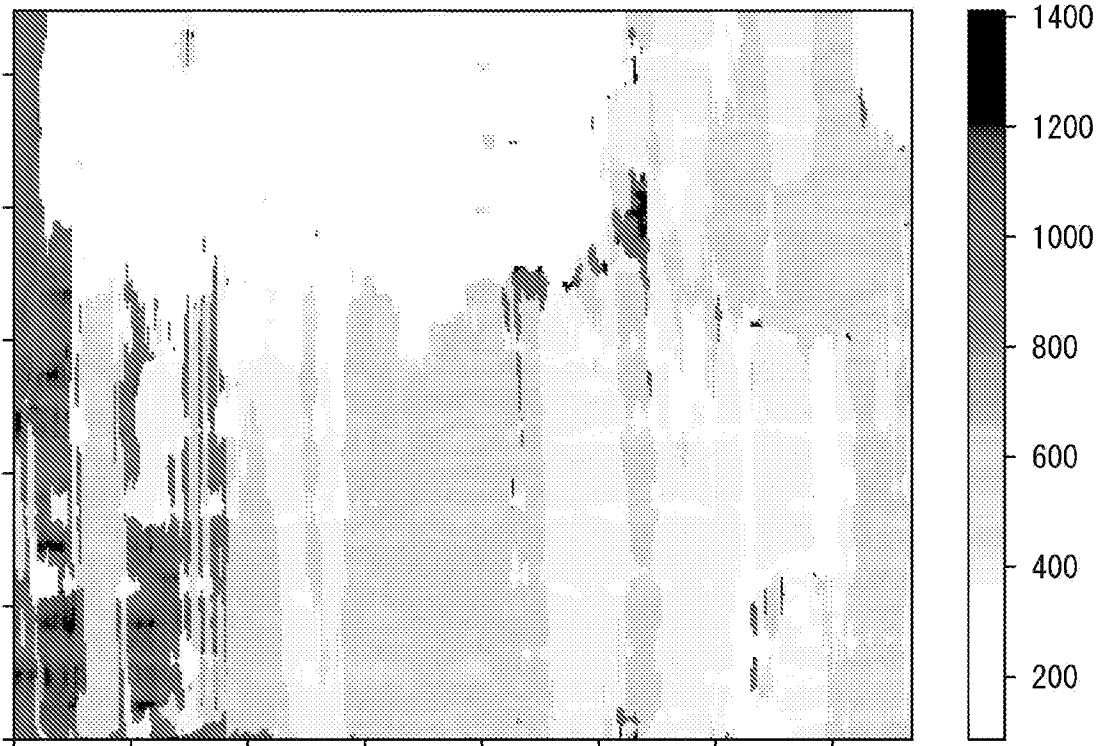
[图3]



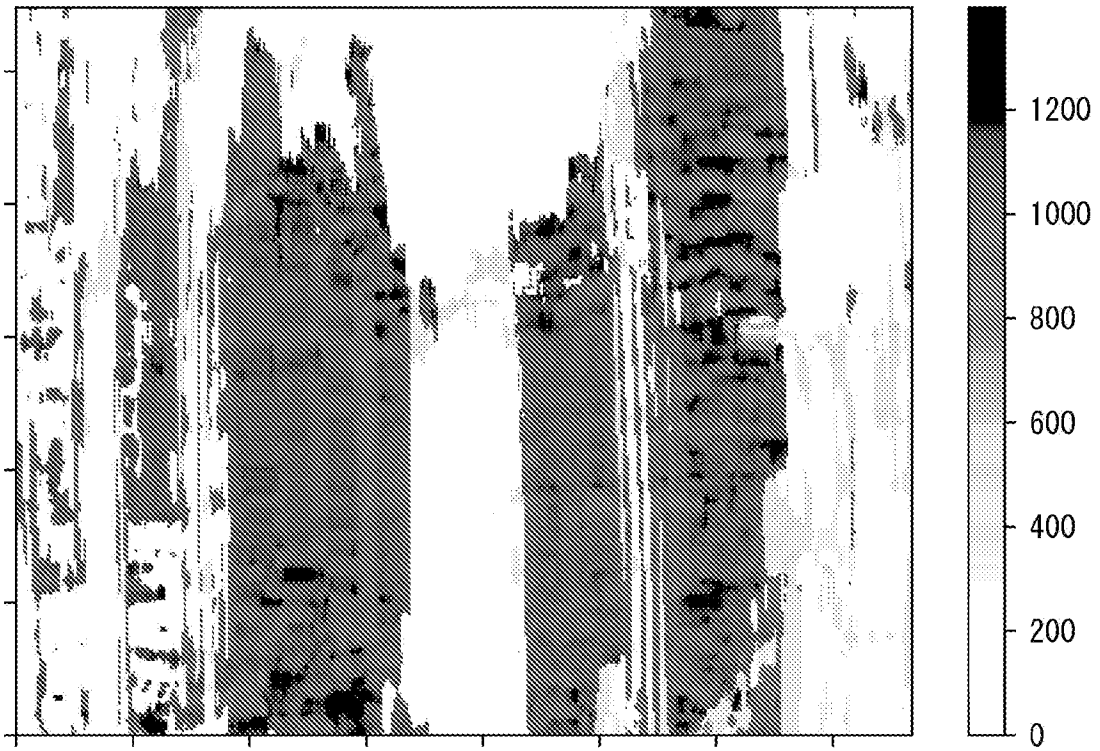
[図4A]



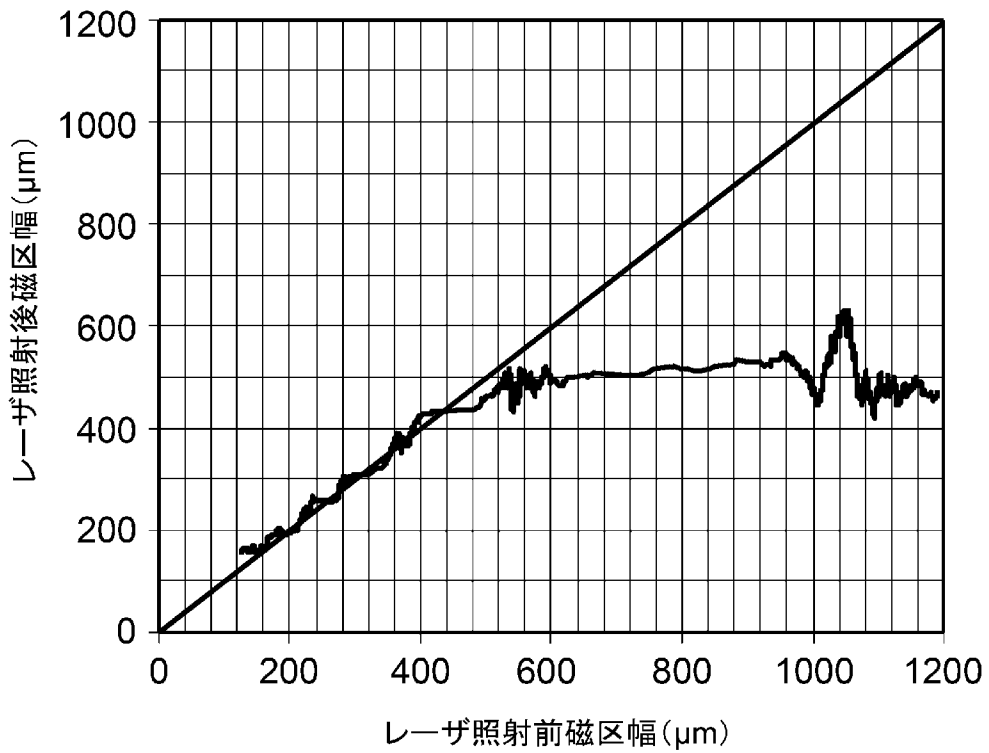
[図4B]



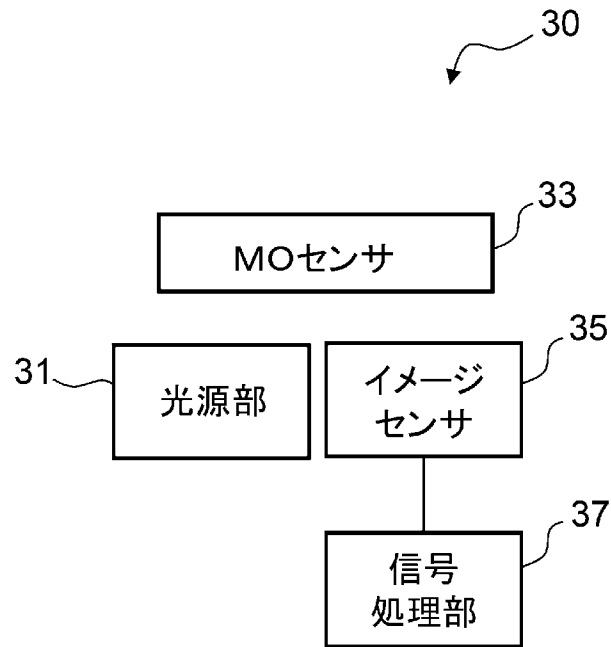
[図4C]



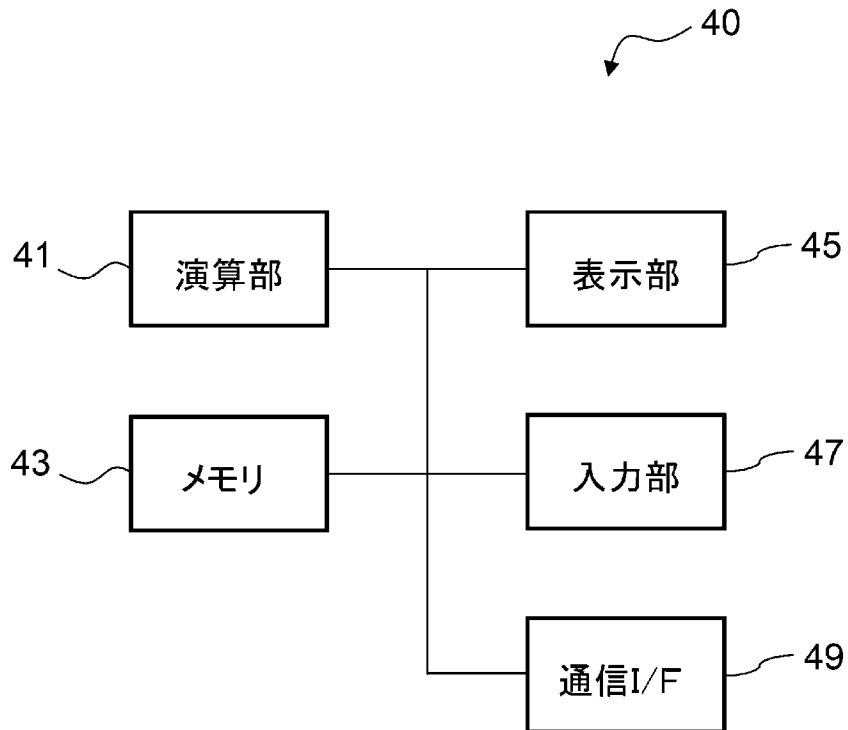
[図5]



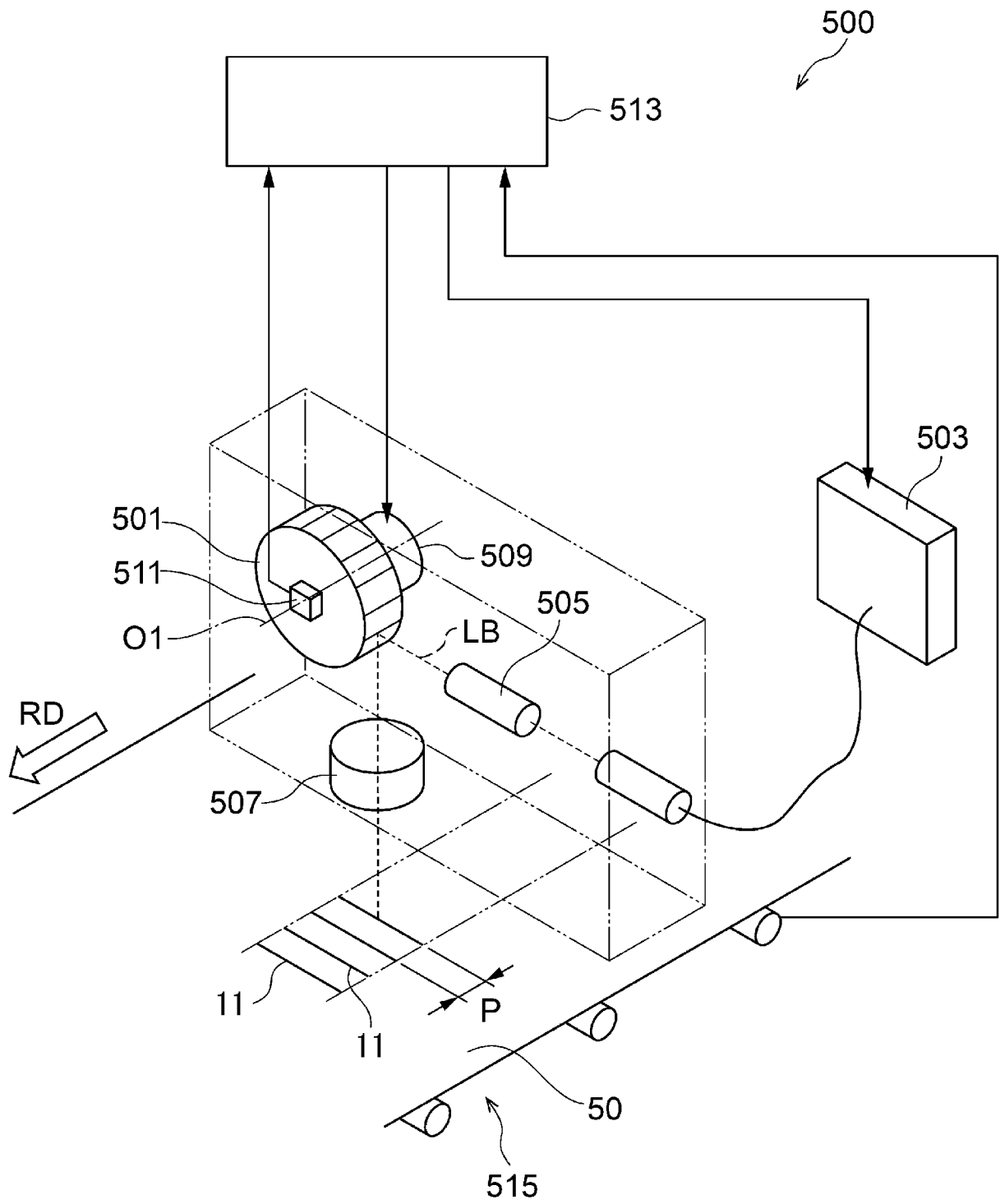
[図6]



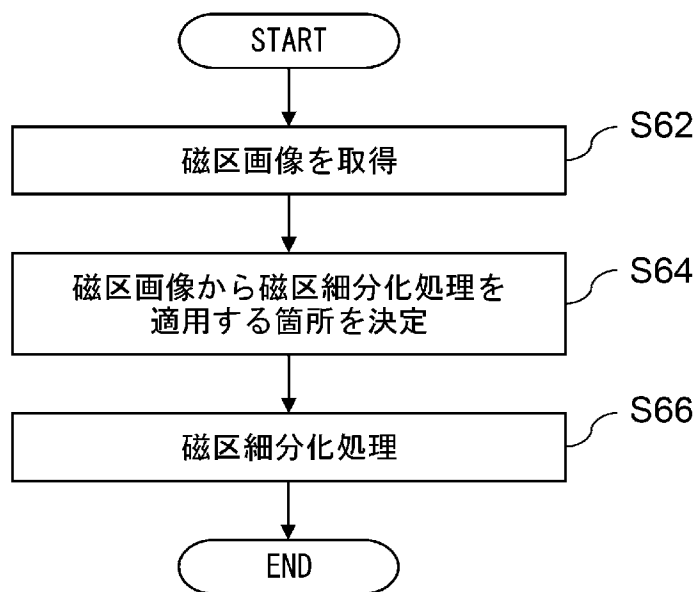
[図7]



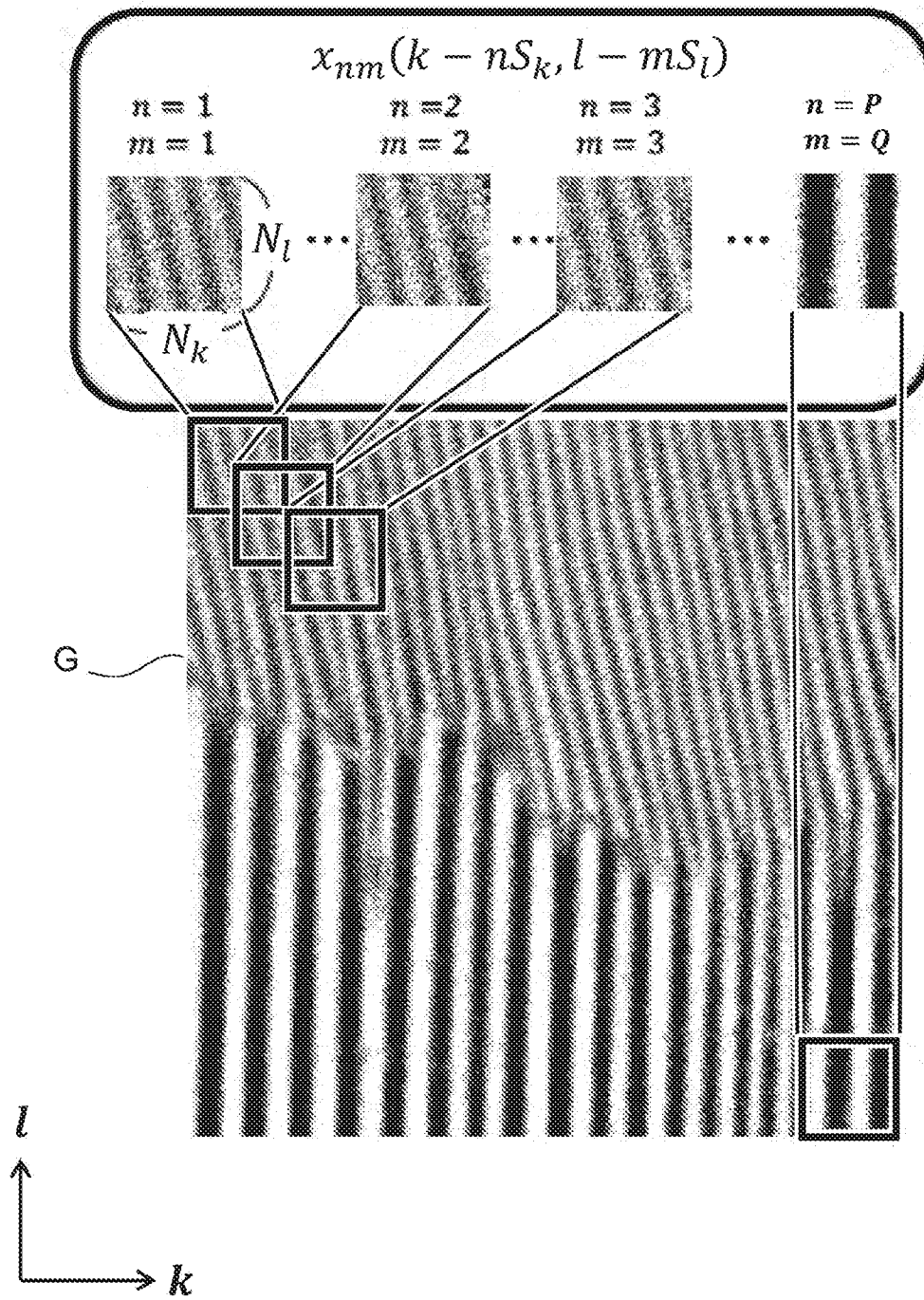
[図8]



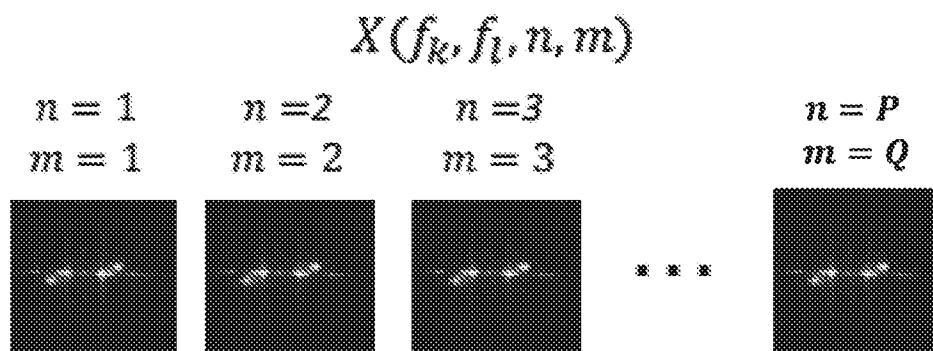
[図9]



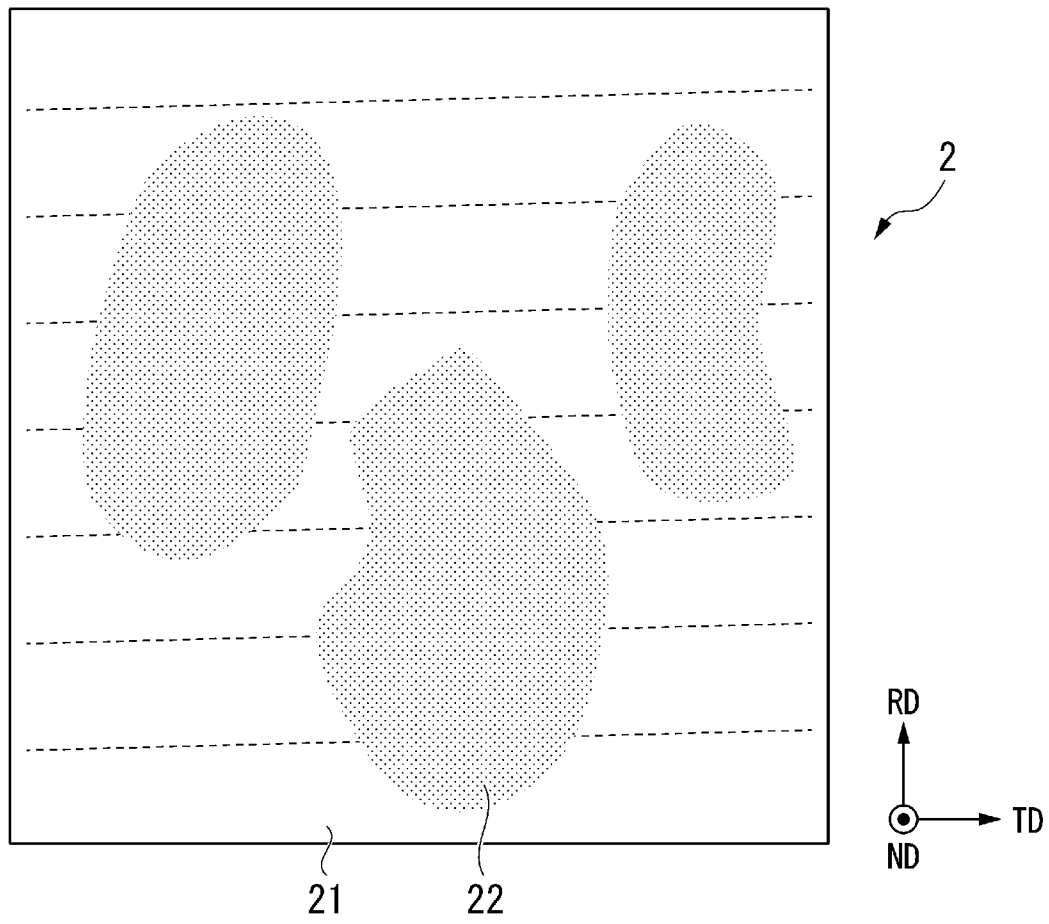
[図10]



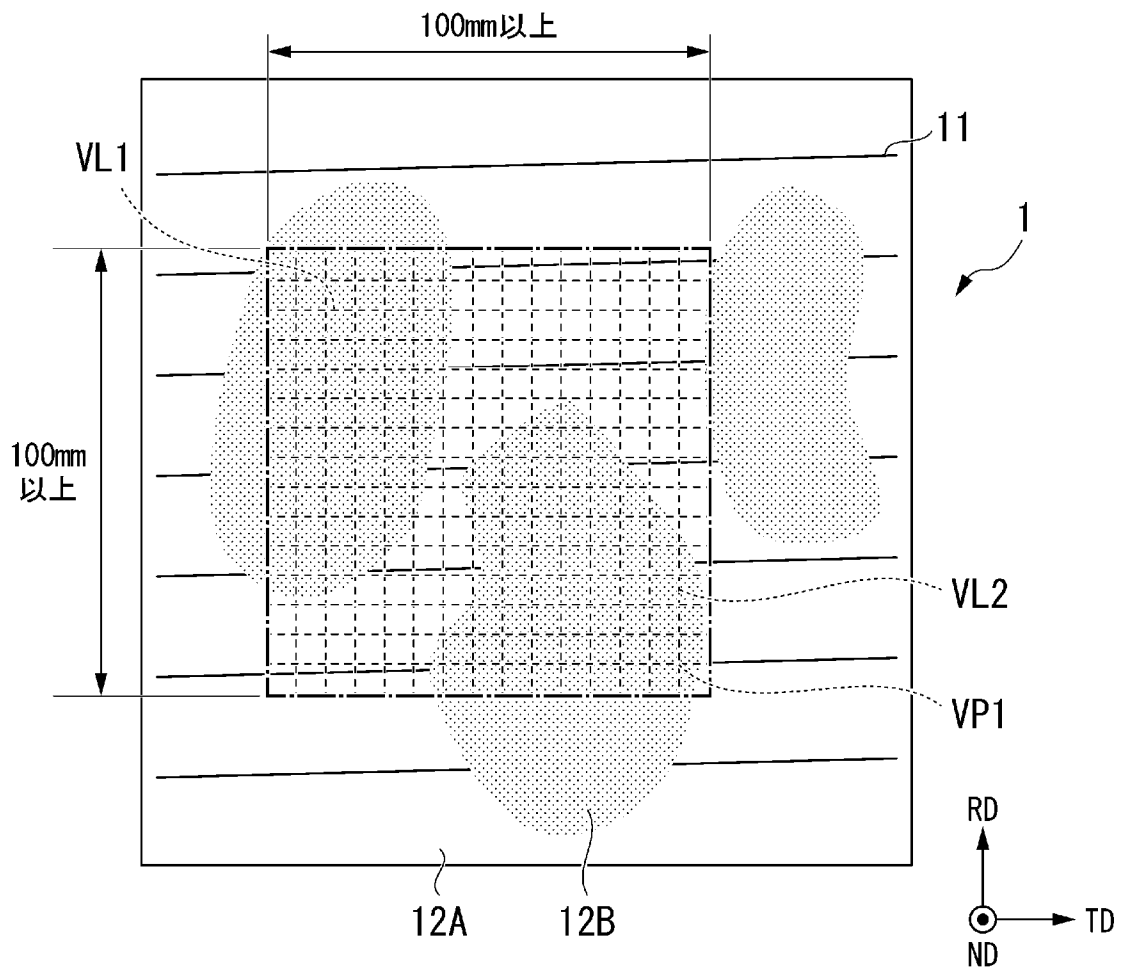
[図11]



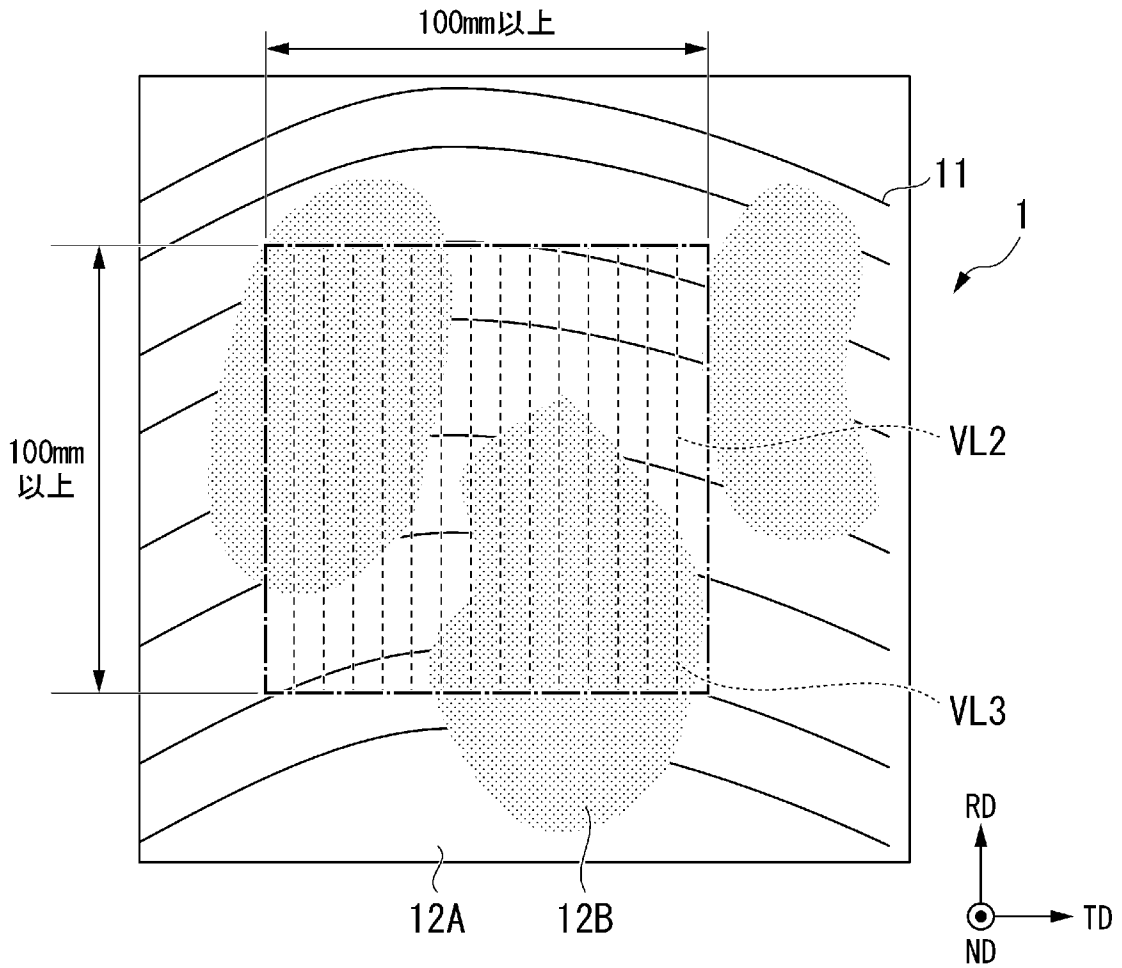
[図12]



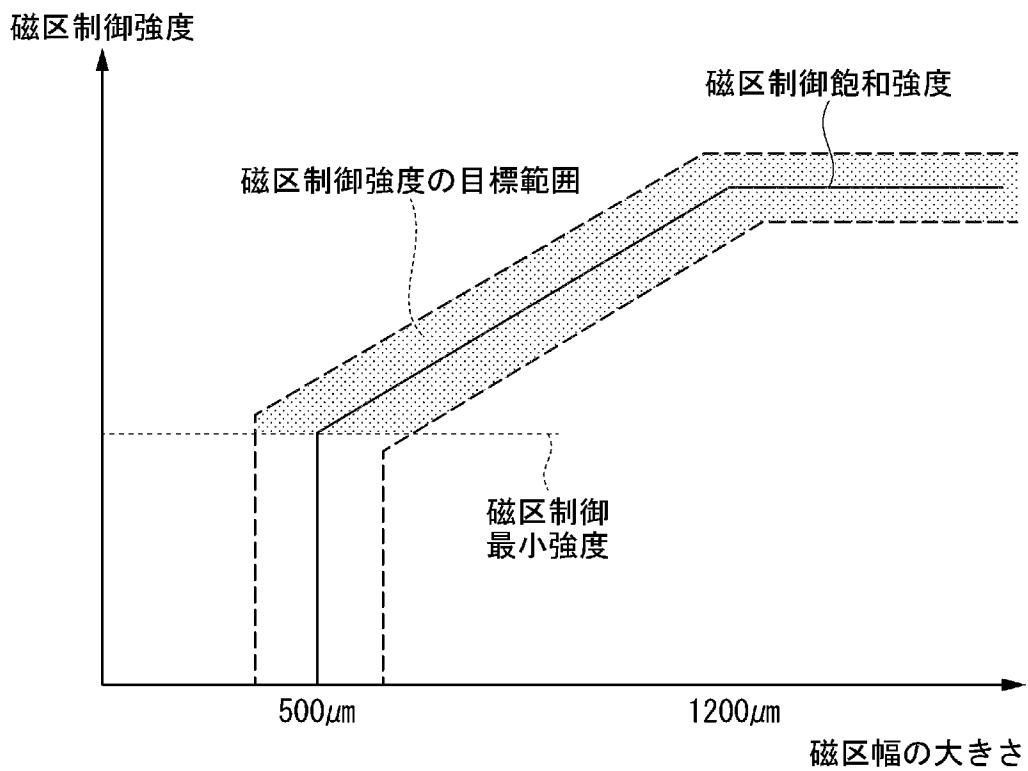
[図13]



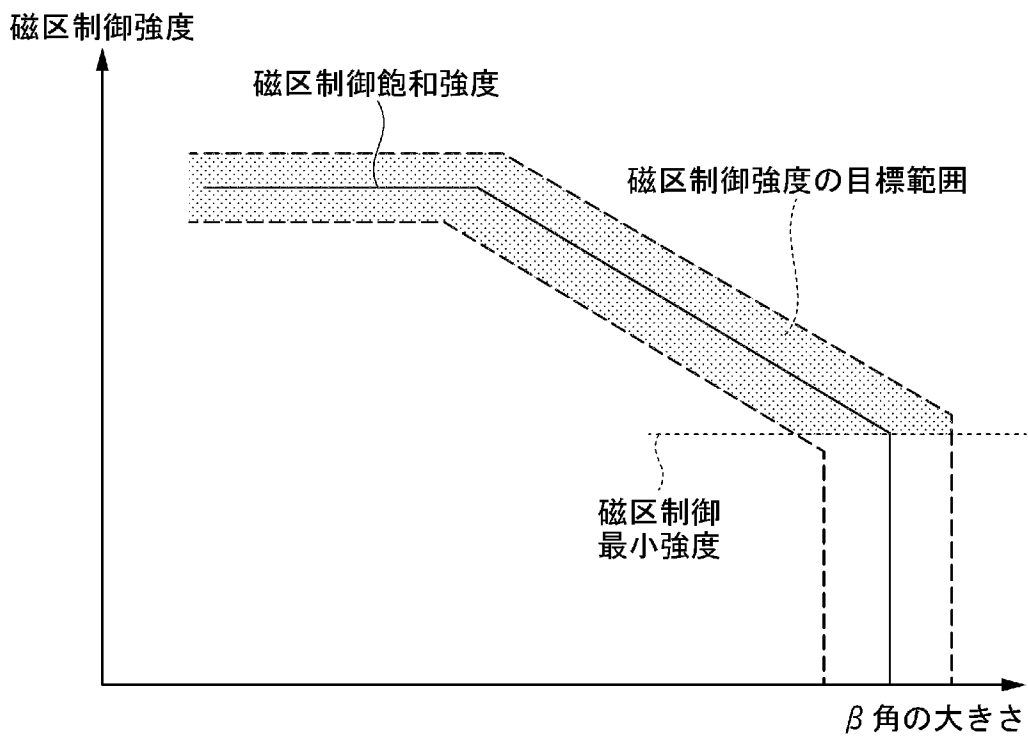
[図14]



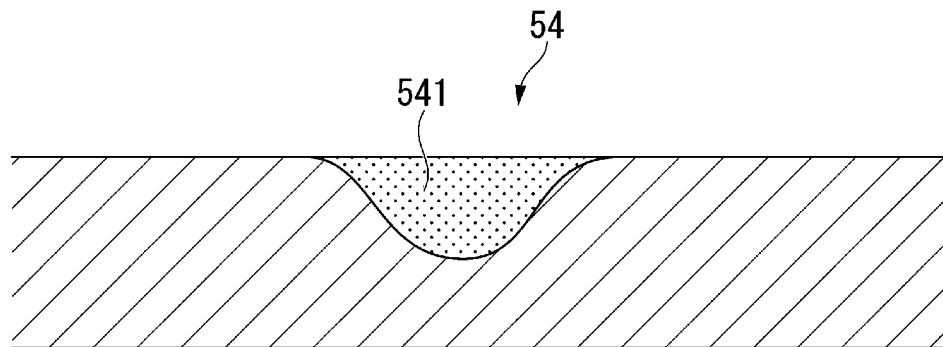
[図15]



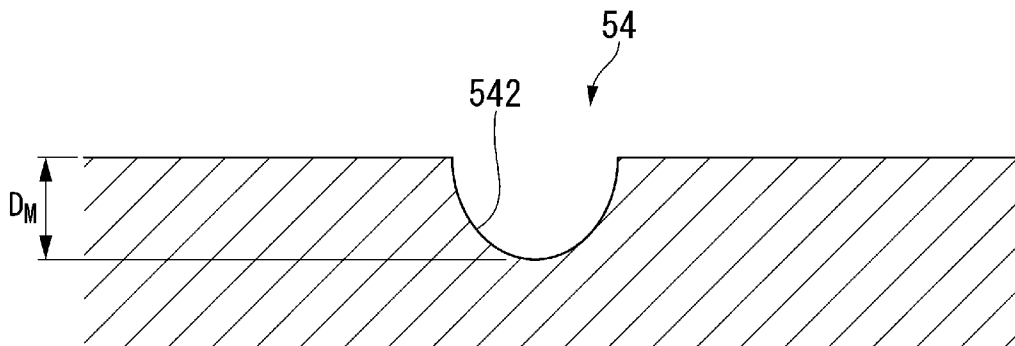
[図16]



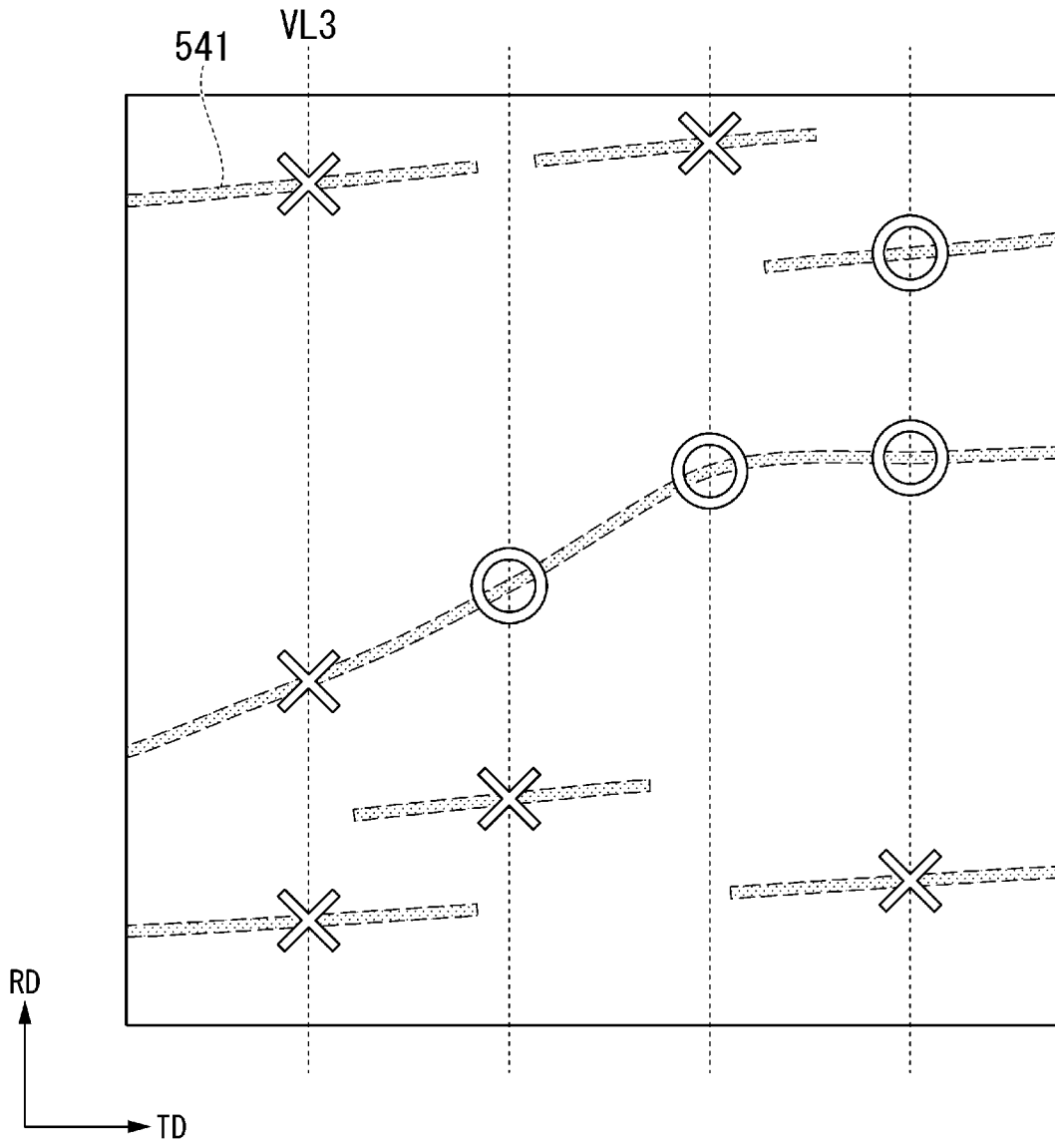
[図17]



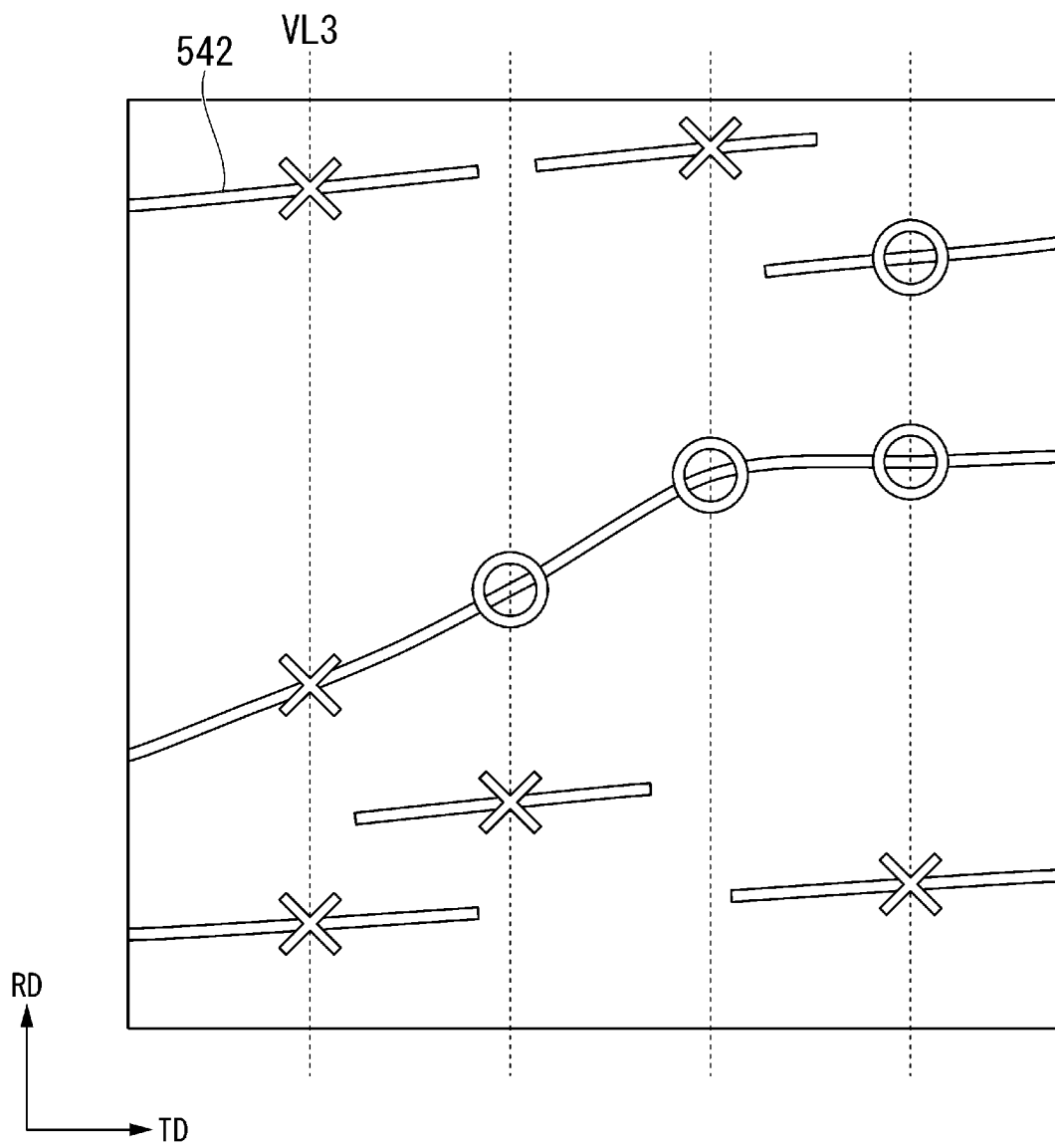
[図18]



[図19]



[図20]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/034800

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>C22C 38/00</i> (2006.01)i; <i>C21D 8/12</i> (2006.01)i; <i>C21D 9/46</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/60</i> (2006.01)i; <i>H01F 1/147</i> (2006.01)i; <i>H01F 27/245</i> (2006.01)i; <i>H01F 41/02</i> (2006.01)i		
FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; C21D8/12 B; C22C38/60; C21D9/46 501B; H01F27/245 150; H01F41/02 B; C21D8/12 D		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) C21D8/12; C21D9/46; C22C38/00-38/60; H01F1/147; H01F27/245; H01F41/02; B23K15/08; B23K26/00-26/70		
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 2006-144058 A (NIPPON STEEL CORPORATION) 08 June 2006 (2006-06-08) entire text, all drawings	1-19
A	JP 11-293340 A (KAWASAKI STEEL CORP.) 26 October 1999 (1999-10-26) entire text, all drawings	1-19
P, A	WO 2023/190331 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 05 October 2023 (2023-10-05) entire text, all drawings	1-19
P, A	WO 2023/190328 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 05 October 2023 (2023-10-05) entire text, all drawings	1-19
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 21 November 2024		Date of mailing of the international search report 10 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
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2024/034800

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2006-144058	A	08 June 2006	(Family: none)	
JP	11-293340	A	26 October 1999	(Family: none)	
WO	2023/190331	A1	05 October 2023	CN 118647742	A
				entire text, all drawings	
				KR 10-2024-0129194	A
WO	2023/190328	A1	05 October 2023	CN 118696142	A
				entire text, all drawings	
				KR 10-2024-0136374	A

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; C21D 9/46(2006.01)i; C22C 38/60(2006.01)i; H01F 1/147(2006.01)i; H01F 27/245(2006.01)i; H01F 41/02(2006.01)i FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; C21D8/12 B; C22C38/60; C21D9/46 501B; H01F27/245 150; H01F41/02 B; C21D8/12 D		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） C21D8/12; C21D9/46; C22C38/00-38/60; H01F1/147; H01F27/245; H01F41/02; B23K15/08; B23K26/00-26/70 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 2006-144058 A（新日本製鉄株式会社）08.06.2006（2006-06-08） 全文、全図	1-19
A	JP 11-293340 A（川崎製鉄株式会社）26.10.1999（1999-10-26） 全文、全図	1-19
P, A	WO 2023/190331 A1（日本製鉄株式会社）05.10.2023（2023-10-05） 全文、全図	1-19
P, A	WO 2023/190328 A1（日本製鉄株式会社）05.10.2023（2023-10-05） 全文、全図	1-19
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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、一般的技术水準を示すもの “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 21.11.2024	国際調査報告の発送日 10.12.2024	
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） 河口 展明 4K 3770 電話番号 03-3581-1101 内線 3435	

国際調査報告
特許ファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2024/034800

引用文献	公表日	特許ファミリー文献	公表日
JP 2006-144058 A	08.06.2006	(ファミリーなし)	
JP 11-293340 A	26.10.1999	(ファミリーなし)	
WO 2023/190331 A1	05.10.2023	CN 118647742 A 全文、全図	
		KR 10-2024-0129194 A	
WO 2023/190328 A1	05.10.2023	CN 118696142 A 全文、全図	
		KR 10-2024-0136374 A	