

(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
2023年10月5日(05.10.2023)



(10) 国際公開番号

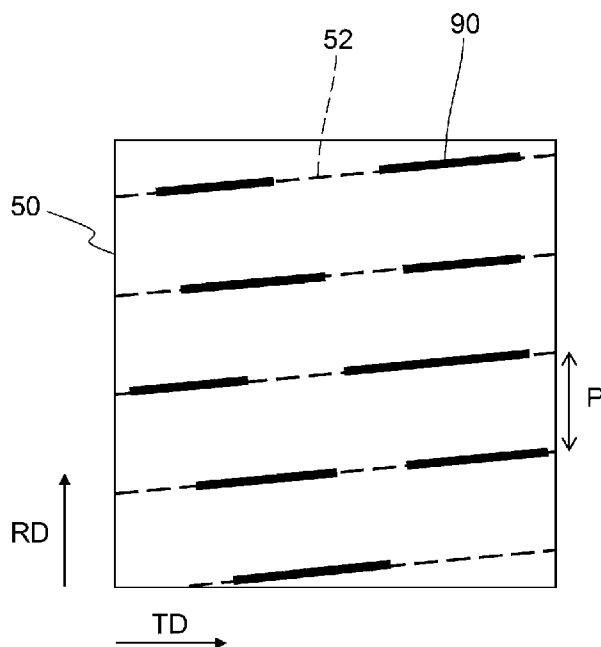
WO 2023/190328 A1

- (51) 国際特許分類:
C21D 8/12 (2006.01) H01F 1/147 (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/012179
- (22) 国際出願日: 2023年3月27日(27.03.2023)
- (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 2022-052344 2022年3月28日(28.03.2022) JP
- (71) 出願人: 日本製鉄株式会社 (NIPPON STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 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 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 松沼 泰史, 外 (MATSUNUMA Yasushi et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, 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,

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

(54) 発明の名称: 方向性電磁鋼板及びその製造方法

[図9]



(57) Abstract: In a grain-oriented electrical steel sheet according to one aspect of the present invention, on the surface of the grain-oriented electrical steel sheet, the tensile stress presence ratio is 50% or more in a first region that is a region where the β angle is 1° or less, the tensile stress presence ratio being the ratio, among the total extension of magnetic domain control treatment lines that form an angle of 0° to 45° with respect to the transverse direction and are arranged side by side in the rolling direction, of portions which are present non-monoperiodically and in which tensile stress is present

WO 2023/190328 A1

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))

in the sheet thickness direction and the β angle being the angle of deviation from the Goss orientation of crystal grains around the transverse direction axis, the tensile stress presence ratio is less than 50% in a second region that is a region where the β angle is more than 2° , and the maximum value of the tensile stress is 40 MPa or more.

(57) 要約 : 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板では、方向性電磁鋼板の表面において、圧延直角方向に対して $0^\circ \sim 45^\circ$ の角度をなし、且つ圧延方向に並ぶ磁区制御処理線の総延長のうち、非単一周期で存在し、板厚方向に対して引張り応力が存在する部分の占める割合である引張り応力存在割合が、圧延直角方向の軸まわりにおける結晶粒の G o s s 方位からのずれ角である β 角が 1° 以下の領域である第 1 領域では 50% 以上であり、引張り応力存在割合が、 β 角が 2° 超の領域である第 2 領域では 50% 未満であり、引張り応力は、最大値が 40 MPa 以上である。

明 細 書

発明の名称：方向性電磁鋼板及びその製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、方向性電磁鋼板及びその製造方法に関する。

本願は、2022年3月28日に、日本に出願された特願2022-052344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、二次再結晶粒が{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おり、エネルギーロス（鉄損）の低減に加え、低騒音化のニーズが高まっている。

[0003] 低鉄損化のため、方向性電磁鋼板の表面に対し、圧延方向に交差する方向にレーザや電子ビームを照射して磁区幅を狭くする磁区細分化技術が以前から知られている。近年、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1～5参照）。

具体的には、特許文献2の技術では、方向性電磁鋼板に磁区細分化処理を施すに際して、仕上焼鈍時のコイルの内巻部分から外巻部分に向けて、鋼板部分に照射するレーザのエネルギー密度を高めていく。特許文献2は、曲率半径が大きくなると β 角の影響で磁区幅が広くなる領域が増加する旨を開示している。

特許文献4は、磁区細分化処理を施した方向性電磁鋼板であって、 β 角が 0.5° 以下の領域と $2^\circ \sim 6^\circ$ の領域を所定量含んでいる鉄損特性と磁歪特性の良好な方向性電磁鋼板を開示している。

特許文献5は、方向性電磁鋼板の磁区細分化の手法として引張応力を付与する旨を開示している。特許文献5には、磁区細分化を促進させ、鉄損を低

減するために、鋼板内部に付与される板厚方向に対する引張応力は、最大値が40MPa以上で鋼板素材の降伏応力以下であることが記載されている。

先行技術文献

特許文献

- [0004] 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：特許第5241095号公報
特許文献4：特開2006-144058号公報
特許文献5：特開2008-127632号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0005] しかしながら、方向性電磁鋼板に磁区細分化処理を施すと、還流磁区によって磁歪特性が変化し、トランスの騒音が増大するという問題が生じる。このように、方向性電磁鋼板の低鉄損化と低騒音化とはトレードオフの関係にあることから、双方が両立し得る最適な磁区細分化技術が求められている。特許文献1～特許文献5のいずれにも、騒音を増大させることなく鉄損を減少させることが可能な磁区細分化処理方法について開示されていない。本発明者らは、磁区細分化処理前の方向性電磁鋼板において磁区幅及び β 角が一樣ではないので、特定の箇所のみ磁区細分化処理を実施することが有効であると考えた。しかし、このような磁区細分化処理方法はいずれの特許文献にも開示されていない。
- [0006] 本開示は、低鉄損化と低騒音化とを両立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

- [0007] (1) 本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板では、方向性電磁鋼板の表面において、圧延直角方向に対して $0^\circ \sim 45^\circ$ の角度をなし、且つ圧延方向に並ぶ磁区制御処理線の総延長のうち、非単一周期で存在し、板厚方向に

対して引張り応力が存在する部分の占める割合である引張り応力存在割合が、圧延直角方向の軸まわりにおける結晶粒のG o s s方位からのずれ角である β 角が 1° 以下の領域である第1領域では50%以上であり、前記引張り応力存在割合が、前記 β 角が 2° 超の領域である第2領域では50%未満であり、前記引張り応力は、最大値が40MPa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、前記引張り応力存在割合が、前記 β 角が 1° 超 2° 以下の領域である第3領域では20%以上80%以下であり、前記第1領域の前記引張り応力存在割合 \geq 前記第3領域の前記引張り応力存在割合 \geq 前記第2領域の前記引張り応力存在割合である。

(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、前記板厚方向に対して前記引張り応力が存在する前記部分は、圧延方向に10.0mm以下の間隔で存在する。

[0008] (4) 本発明の別の実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法は、方向性電磁鋼板の磁区画像を取得する画像取得ステップと、磁区画像の磁区幅の空間分布と、圧延直角方向の軸まわりにおける結晶粒のG o s s方位からのずれ角である β 角とに基づいて、方向性電磁鋼板の圧延直角方向に対して $0^\circ \sim 45^\circ$ の角度をなし、且つ圧延方向に並ぶ磁区制御処理線のうち、引張り応力を導入する箇所を決定する決定ステップと、磁区制御処理線のうち、決定ステップで決定された箇所に引張り応力を導入する応力導入ステップと、を含む。

(5) 好ましくは、上記(4)に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、前記決定ステップは、前記磁区制御処理線のうち、前記 β 角が 1° 以下の箇所を、前記引張り応力を導入する箇所として決定する。

(6) 好ましくは、上記(4)又は(5)に記載の方向性電磁鋼板の製造方法では、前記決定ステップは、2次元フーリエ変換を用いて、前記磁区画像から前記引張り応力を導入する箇所を決定する。

発明の効果

[0009] 本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板によれば、低鉄損化と低騒音化とを両立させることが可能となる。

[0010] 本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法によれば、低鉄損化と低騒音化とを両立した方向性電磁鋼板を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1A]磁区細分化処理前の方向性電磁鋼板の磁区幅の空間分布の一例を示すグラフである。

[図1B]磁区細分化処理後の方向性電磁鋼板の磁区幅の空間分布の一例を示すグラフである。

[図1C]図1A及び図1Bに示す磁区細分化処理の前後で磁区幅が50 μ m以上細分化した領域を示すグラフである。

[図2A]レーザ照射前の磁区幅とレーザ照射後の磁区幅との関係を示すグラフである。

[図2B]方向性電磁鋼板の β 角と180°磁区の幅の平均値との関係を示すグラフである。

[図3]本実施形態に係る画像取得装置のハードウェア構成を示すブロック図である。

[図4]本実施形態に係る解析装置のハードウェア構成を示すブロック図である。

[図5]本実施形態に係るレーザ照射装置の構成を示す模式図である。

[図6]本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7]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8]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9]方向性電磁鋼板の磁区制御処理線のうちの応力導入線を表す模式図であ

る。

[図10]第1領域、第2領域、及び第3領域を特定する方法を説明する模式図である。

[図11]第1領域、第2領域、及び第3領域それぞれにおける引張り応力存在割合を測定する方法を説明する模式図である。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、図面を参照して本発明の実施形態を説明する。

[0013] まず、磁区細分化処理の前後における方向性電磁鋼板の磁区構造を比較する。図1Aは、磁区細分化処理前の方向性電磁鋼板の180°磁区の幅（以下、単に「磁区幅」と呼ぶ。）の空間分布を示している。図1Bは、図1Aの方向性電磁鋼板の表面に対して磁区細分化処理を施した後の磁区幅の空間分布を示している。ここでの磁区細分化処理は、圧延方向（RD）にほぼ垂直な磁区制御処理線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。

[0014] ここで、「180°磁区」とは、磁化方向が結晶の<100>方位であり、且つ圧延方向にほぼ平行な2つの180°磁壁に挟まれた磁区を表す。また、180°磁区の「幅」とは、隣接する磁壁間の距離（磁壁間隔）を表す。

[0015] 図1A及び図1Bに示す磁区幅の空間分布は、方向性電磁鋼板の磁区画像から、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。

[0016] 図1Cは、図1A及び図1Bに示す磁区細分化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おり、元の磁区幅がどの値のときに細分化が生じたのかを可視化したものである。

[0017] 図1Cより、磁区細分化の効果が50μm以上あった領域は、元の磁区幅が広い領域であり、特に、元の磁区幅が約500μm以上の領域に磁区細分化の効果が顕著に現れていることがわかる。すなわち、元の磁区幅によって磁区細分化の効果が異なっている。

[0018] 図2Aに、同一位置におけるレーザ照射前の磁区幅とレーザ照射後の磁区

幅との関係を示す。ここで、照射条件は、平均照射エネルギー密度 U_a (mJ/mm^2)、照射ピッチ PL (mm) を、それぞれ、 $U_a = 1.5 \text{ mJ}/\text{mm}^2$ 、 $PL = 4 \text{ mm}$ とした。

[0019] 図2Aより、約 $500 \mu\text{m}$ 以下の磁区幅の領域にレーザー照射をしても、磁区細分化の効果が現れないことがわかる。

[0020] 以上のことから、鉄損の低減効果は、元の磁区幅が広い領域を磁区細分化することで得られ、元の磁区幅が狭い領域に磁区細分化処理を施しても、鉄損の低減効果は得られず、ヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化を招くものと考えられる。

[0021] 方向性電磁鋼板の鉄損を低減するため、鋼板中の二次再結晶粒を $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位 ($Goss$ 方位) に高度に揃えることが求められている。しかしながら、工業的に方向性電磁鋼板を製造する際、二次再結晶の過程で、理想的な $Goss$ 方位からずれた方位の結晶粒も発生する。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 (即ち、圧延方向 (RD) と磁化容易軸 (100) $\langle 001 \rangle$ との角度偏差の板厚方向成分) を β 角という。なお、図9に示されるように、圧延直角方向 (TD) とは、圧延方向 (RD) と垂直であり、且つ方向性電磁鋼板の板面と平行な方向のことである。図2Bに、方向性電磁鋼板の β 角とレーザー照射前の 180° 磁区幅との関係を示す。図2Bより、 β 角が 2° 以下の領域が元の磁区幅が広いことから (約 $500 \mu\text{m}$ 以上)、 β 角が 2° 以下の領域、より好ましくは β 角が 1° 以下の領域に優先的に磁区細分化処理を施すことが有効であることがわかる。

[0022] また、方向性電磁鋼板の板厚方向に対して、レーザー照射等の手段を用いて適切な引張り応力又はそれに相当する歪みを導入することで、磁区細分化を促進させ、鉄損を低減させる技術が知られている (特許文献3参照)。

[0023] そこで、本実施形態では、方向性電磁鋼板の表面において、 β 角が 1° 以下の領域に対して優先的に、板厚方向に対して適切な引張り応力又はそれに相当する歪みを導入するような磁区制御を行うものとする。

- [0024] 次に、図3～図5を参照して、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の磁区制御を実現するデバイスの構成について説明する。
- [0025] 図3に、方向性電磁鋼板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を示す。画像取得装置30は、光源部31と、磁気光学(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。
- [0026] 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。
- [0027] MOセンサ33は、磁性体の構造を測定する装置であり、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、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。磁性体試料として方向性電磁鋼板が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、方向性電磁鋼板の自発磁化の向きに応じた漏れ磁場が生じるが、この漏れ磁場によって、反射光の偏光面が回転する。
- [0028] イメージセンサ35は、Complementary Metal-Oxide-Semiconductor(CMOS)イメージセンサであり、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で検出することで、漏れ磁場の空間分布を得ることができ、方向性電磁鋼板の磁区構造が明らかとなる。
- [0029] 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、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対し、DSPにより所定のデジタル処理が施されることで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4参照)に出力される。
- [0030] 図4に、方向性電磁鋼板の磁区構造を解析する解析装置40のハードウェア

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り、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。

[0031] 演算部41は、Central Processing Unit（CPU）を有し、メモリ43に記憶されたプログラムに従って、方向性電磁鋼板の磁区画像から磁区構造を解析し、引張り応力を導入する箇所を決定する。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。

[0032] 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時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。

[0033] なお、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するようにしてもよい。あるいは、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、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。

[0034] 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し、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し、また、演算部41による磁区構造の解析結果を表示する。

[0035] 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。

[0036] なお、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。

[0037] なお、図3及び図4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。

[0038] 方向性電磁鋼板の表面に引張り応力を導入させる手段として、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。以下では、レーザ照射により引張り応力を導入するレーザ照射装置の構成について説明する。

[0039] 図5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。

[0040] 通板装置515は、方向性電磁鋼板50を圧延方向（RD）に通板する。

[0041] ポリゴンミラー501は、例えば正多角柱状をなし、正多角柱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。ポリゴンミラー501の平面鏡には、光源装置503からコリメータ505を介してレーザビームLBが一方方向（水平方向）に入射し、平面鏡で反射される。

[0042] 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とにより、レーザビームLBの反射方向が順次変化し、方向性電磁鋼板50の磁区制御処理線52に沿って走査することができる。ここで、磁区制御処理線52は、方向性電磁鋼板50の表面上で、圧延直角方向（TD）に対して $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度をなし、圧延方向（RD）に複数の直線である。好ましくは、複数の磁区制御処理線52は、互いに平行に延在している。また、好ましくは、複数の磁区制御処理線52は等間隔に並べられている。隣接する磁区制御処理線52の

間隔Pは、照射ピッチを表している。

- [0043] 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）でレーザービームLBを出力する。
- [0044] 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ービームLBの光路に設けられており、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ービームLBが集光レンズ507を介して方向性電磁鋼板50の表面に集光されることで、方向性電磁鋼板50の表面の磁区制御処理線52に沿って、鋼板内部に板厚方向に対する引張り応力が導入される。
- [0045] モータ509は、ポリゴンミラー501と連結されており、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。
- [0046] センサ511は、モータ509の駆動軸と連結されており、モータ509によって回転するポリゴンミラー501の回転角度を検出し、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。
- [0047] 制御部513は、プロセッサからなり、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とともに、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。
- [0048] また、制御部513は、磁区制御処理線52のうち引張り応力を導入する箇所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。
- [0049] 次に、図6を参照して、本実施形態に係る方向性電磁鋼板50の製造方法を説明する。

- [0050] まず、画像取得装置30により、方向性電磁鋼板50の磁区画像を取得する（ステップS62：画像取得ステップ）。次いで、解析装置40の演算部41により、磁区画像から180°磁区の幅（磁区幅）の空間分布を導出し、方向性電磁鋼板50の磁区制御処理線52のうち、磁区幅が所定値以上（例えば、約500 μ m以上）の領域に対応する β 角を有する箇所、具体的には、 β 角が1°以下の箇所を、引張り応力の導入により磁区細分化処理を適用する箇所として決定する（ステップS64：決定ステップ）。
- [0051] 本実施形態では、磁区制御処理線52のうち、引張り応力を導入する箇所を「応力導入線」と呼ぶ。演算部41によって実行されるステップS64の処理の詳細については、後に説明する。
- [0052] なお、ステップS64では、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、応力導入線の箇所を決定し、応力導入線の箇所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。
- [0053] 次いで、方向性電磁鋼板50の磁区制御処理線52のうち、ステップS64で決定された箇所に対して優先的に、引張り応力の導入により磁区細分化処理を施す（ステップS66：応力導入ステップ）。好ましくは、ステップS64で決定された箇所のみに対して、磁区細分化処理を施す。ステップS66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。
- [0054] 次に、解析装置40の演算部41によって実行されるステップS64の処理について説明する。
- [0055] 演算部41は、線分法又はフーリエ変換を用いて、方向性電磁鋼板50の磁区幅の空間分布を導出し、方向性電磁鋼板50の磁区制御処理線52のうち、磁区幅が広い領域に相当する β 角が1°以下の箇所を、引張り応力を優先的に導入する箇所と決定する。
- [0056] 線分法では、磁区と垂直な線分を引いて評価するが、線分の間隔は、磁区

と平行な方向1cmあたり3本となるように引き、 180° 磁壁と線分との交点の間隔により磁区幅を導出する。

[0057] フーリエ変換は、方向性電磁鋼板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、方向性電磁鋼板の磁区幅の空間分布を導出する方法について説明する。

[0058] 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。

[0059] 方向性電磁鋼板50の磁区幅の空間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)のステップを実行する。

(A-1) 磁区画像から複数の部分領域を切り出すステップ;

(A-2) ST2DFTを行うステップ;

(A-3) 磁区幅の空間分布を導出するステップ。

以下、各ステップについて詳細に説明する。

[0060] (A-1) 磁区画像から複数の部分領域を切り出すステップ

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 $0 \leq k \leq N_k - 1$ 、 l 方向の範囲を $0 \leq l \leq N_l - 1$ 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。

[0061] 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 $n S_k \leq k \leq n S_k + N_k - 1$ 、 $m S_l \leq l \leq m S_l + N_l - 1$ の範囲を切り出した部分領域のデータ列 $x_{nm}(k - n S_k, l - m S_l)$ が得られる。

[数1]

$$x_{nm}(k - n S_k, l - m S_l) = W_a(k - n S_k, l - m S_l)x(k, l) \quad \dots (1)$$

[0062] 図7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。

[0063] 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。

[0064] (A-2) ST2DFTを行うステップ

部分領域のデータ列を $x_{nm}(n', m') = x_{nm}(k - n S_k, l - m S_l)$ 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。

[0065] 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。

[0066] 例えば、図7に示した各部分領域のデータ列 x_{nm} ($k = n S_k$, $l = m S_l$) に対して2次元フーリエ変換を施すと、図8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。

[0067] (A-3) 磁区幅の空間分布を導出するステップ

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。

[0068] 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、磁区幅の空間分布 $L(n, m)$ が導出される。

[数4]

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

[0069] 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、磁区幅の空間分布 $L(n, m)$ を定量的に導出することが可能となる。上述の図1A~図1C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。

[0070] 演算部41は、磁区幅の空間分布 $L(n, m)$ を導出すると、図9に示す

ように、方向性電磁鋼板 50 の磁区制御処理線 52（図 9 の破線）のうち、磁区幅が所定値以上（例えば、約 500 μm 以上）の領域に対応する β 角を有する箇所、具体的には、 β 角が 1° 以下の箇所を、引張り応力を導入する応力導入線 90（図 9 の実線）として決定する。レーザ照射装置 500 の制御部 513 は、磁区制御処理線 52 のうち応力導入線 90 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、それ以外の箇所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、応力導入線 90 に沿って、鋼板内部に板厚方向に対する引張り応力が導入される。

[0071] なお、上述の手順によって得られた磁区画像において、応力導入線 90 が不明瞭な場合がある。この場合は、応力導入線 90 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 50 の板面垂直方向（厚さ方向）に沿って直流磁場を印可することによって、応力導入線 90 を明瞭化することができる。

[0072] 次に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板 50 を説明する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板 50 では、図 9 に例示されるように、方向性電磁鋼板 50 の表面において、圧延直角方向（TD）に対して $0^\circ \sim 45^\circ$ の角度をなし、且つ圧延方向（RD）に並ぶ磁区制御処理線 52 の総延長のうち、非単一周期で存在し、板厚方向に対して引張り応力が存在する部分の占める割合である引張り応力存在割合が、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 角が 1° 以下の領域である第 1 領域では 50% 以上であり、引張り応力存在割合が、 β 角が 2° 超の領域である第 2 領域では 50% 未満であり、引張り応力は、最大値が 40 MPa 以上である。

[0073]（応力導入線 90（板厚方向に対して引張り応力が存在する部分））

本実施形態に係る方向性電磁鋼板 50 は、図 9 に例示されるように、応力導入線 90、即ち板厚方向に対して引張り応力が存在する部分を有する。板厚方向に対して存在する引張り応力とは、図 5 に例示される装置などを用いて方向性電磁鋼板 50 に導入される引張り応力のうち、板厚方向の成分のこ

とである。

[0074] (磁区制御処理線 5 2)

応力導入線 9 0 は、図 9 に例示されるように、磁区制御処理線 5 2 上に配されている。磁区制御処理線 5 2 は、方向性電磁鋼板 5 0 の表面において、圧延直角方向 (T D) に対して $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度をなし、圧延方向 (R D) に沿って並べられている。磁区制御処理線 5 2 は、互いに平行に並べられていることが好ましい。磁区制御処理線 5 2 は、方向性電磁鋼板 5 0 の製造段階におけるレーザビーム L B の焦点の軌跡に対応する。磁区制御処理線 5 2 は、方向性電磁鋼板 5 0 において実体として存在するものではなく、応力導入線 9 0 に沿った仮想線である。応力導入線 9 0 に沿って線を引くこと等により、磁区制御処理線 5 2 を特定することができる。圧延直角方向 (T D) と応力導入線 9 0 の延在方向とがなす角度は、圧延直角方向 (T D) と、当該応力導入線 9 0 が設けられた磁区制御処理線 5 2 の延在方向とがなす角度と同一である。

[0075] なお、方向性電磁鋼板 5 0 において、磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度は一様であってもよいし、ばらついていてもよい。方向性電磁鋼板 5 0 の一部のみにおいて磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度を $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ としてもよいし、方向性電磁鋼板 5 0 の全ての領域において磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度を $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ としてもよい。また、方向性電磁鋼板 5 0 における磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度の平均値を $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ としてもよい。磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度、又はその平均値が、 1° 以上、 3° 以上、又は 5° 以上であってもよい。磁区制御処理線 5 2 と圧延直角方向 (T D) とがなす角度、又はその平均値が、 40° 以下、 35° 以下、又は 30° 以下であってもよい。

[0076] 本実施形態では、応力導入線 9 0 は磁区制御処理線 5 2 上に非単一周期で存在する。応力導入線 9 0 が磁区制御処理線 5 2 上に非単一周期で存在するとは、「1 c m 当たり平均で 1 0 か所以上の応力導入線 9 0 があり、それ

それぞれの応力導入線90の間にある非応力導入線の長さの標準偏差が $20\mu\text{m}$ 以下の場合」には該当しないという意味である。すなわち、本実施形態では、通常のパルスレーザによる磁区制御を鋼板全面に行うことにより得られた磁区細分化処理線90は「非単一周期で存在する」ものではないとみなされる。ただし、 β 角が 1° 以下の領域に選択的にパルスレーザを照射してもよい。

[0077] ここで、磁区細分化を促進させ、鉄損を低減させるために、鋼板内部に付与される板厚方向に対する引張り応力は、最大値が 40MPa 以上であることが好ましい（特許文献3参照）。板厚方向に対する引張り応力の最大値の上限は特に限定されないが、鋼板素材の降伏応力値を超える引張り応力を導入することは難しいので、鋼板素材の降伏応力値を、板厚方向に対する引張り応力の最大値の上限としてもよい。また、板厚方向に対する引張り応力の最大値を、 300MPa 以下、 200MPa 以下、 180MPa 以下、又は 150MPa 以下としてもよい。

また、鉄損を低減する効果を一層高めるため、圧延方向（RD）に沿って測定される、隣り合う磁区制御処理線52の間隔Pを 10.0mm 以下とすることが好ましい。すなわち、最大値が 40MPa 以上の引張り応力が、圧延方向（RD）に 10.0mm 以下の間隔で存在することが好ましい。なお、方向性電磁鋼板において、磁区制御処理線52の間隔Pは一様であってもよいし、ばらついていてもよい。方向性電磁鋼板の一部のみにおいて隣り合う磁区制御処理線52の間隔Pを 10.0mm 以下としてもよいし、方向性電磁鋼板の全ての領域において隣り合う磁区制御処理線52の間隔Pを 10.0mm 以下としてもよい。また、方向性電磁鋼板における隣り合う磁区制御処理線52の間隔Pの平均値を 10.0mm 以下としてもよい。隣り合う磁区制御処理線52の間隔P、又は磁区制御処理線52の間隔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。隣り合う磁区制御処理線52の間隔P、又は磁区制御処理線52の間隔Pの平均値を 9.0mm 以下、 8.0mm 以下、又は 7.0mm 以

下としてもよい。

[0078] 上述のように、 β 角に応じて引張り応力を導入する箇所を決定することにより、 β 角が 0° 付近の領域では、磁区制御処理線52のうち上述の引張り応力が存在する部分（応力導入線90）の占める割合は相対的に高くなり、 β 角が大きい領域では、当該割合は相対的に低くなる。具体的には、磁区制御処理線52のうち応力導入線90の占める割合（引張り応力存在割合）を、磁区制御処理線52の長さの総延長に対する応力導入線90の長さの比率として定義すると、 β 角が 1° 以下の領域である第1領域では応力導入線90が50%以上の割合で存在し、 β 角が 2° 超の領域である第2領域では応力導入線90が50%未満の割合で存在するのが好ましい。第1領域を、 β 角が 1.0° 以下の領域、 β 角が 0.9° 以下の領域、又は β 角が 0.8° 以下の領域と定義してもよい。第2領域を、 β 角が 2.0° 超の領域、 β 角が 2.1° 以上の領域、又は β 角が 2.2° 以上の領域と定義してもよい。

[0079] また、 β 角が 1° 超 2° 以下の領域である第3領域では、引張り応力存在割合が20%以上80%以下であることが好ましい。ここで、第1～第3領域でのそれぞれの引張り応力存在割合は、以下の関係を満たす。

第1領域の引張り応力存在割合 \geq 第3領域の引張り応力存在割合 \geq 第2領域の引張り応力存在割合

第3領域を、 β 角が 1.0° 超 2.0° 以下の領域、 β 角が 1.1° 以上 1.9° 以下の領域、又は β 角が 1.2° 以上 1.8° 以下の領域と定義してもよい。

[0080] なお、X線回折法を用いて、方向性電磁鋼板50の板厚方向における応力値を測定することができるため（特許文献3参照）、板厚方向に対して引張り応力が導入された箇所を特定することができる。

[0081] 以上のように、方向性電磁鋼板50の β 角に応じて、板厚方向に対する引張り応力を圧延面上で線状に分布させることで、磁区細分化処理が促され、ヒステリシス損の増大や騒音特性の悪化などの悪影響を最小限に抑えることができ、磁区細分化の効果を最大限まで高めることができる。これにより、

低鉄損化と低騒音化とを両立させることが可能となる。

[0082] (測定方法)

以下に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板50に関するパラメータの測定方法について説明する。なお、いずれのパラメータの測定も、方向性電磁鋼板50から採取された所定サイズの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50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50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50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10000mm²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。

[0083] (磁区制御処理線52と圧延直角方向(TD)とがなす角度)

磁区制御処理線52と圧延直角方向(TD)とがなす角度の測定方法は以下の通りである。

[0084] まず、試料に含まれる応力導入線90を特定する。応力導入線90が視認可能な態様である場合、応力導入線90を目視で特定すればよい。応力導入線90が視認し難い態様である場合、例えば図3に例示されるような画像取得装置を用いて、磁区画像を撮影する。必要に応じて、方向性電磁鋼板50の板面垂直方向(厚さ方向)に沿って直流磁場を印可しながら、磁区画像を撮影する。磁区画像を観察することにより、応力導入線90の位置を特定することができる。

[0085] 次に、圧延直角方向(TD)を特定する。

(1) 試料が、コイル状の方向性電磁鋼板50から切り出されたものである場合、方向性電磁鋼板50の幅方向が圧延直角方向(TD)であるとみなすことができる。

(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、圧延直角方向 (TD) を方向性電磁鋼板 50 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) とみなし、圧延方向 (RD) に垂直且つ鋼板表面に平行な方向を、圧延直角方向 (TD) とみなす。

(3) 方向性電磁鋼板 50 の表面の圧延疵からの圧延直角方向 (TD) の特定が困難である場合、圧延直角方向 (TD) を方向性電磁鋼板 50 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 50 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 G O S S 方位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) に垂直且つ方向性電磁鋼板 50 の表面に平行な方向を、圧延直角方向 (TD) とみなす。

いずれの場合も、測定の便宜の観点から、試料の一辺と圧延直角方向 (TD) とが一致するように試料を方向性電磁鋼板 50 から切り出すことが好ましい。

[0086] 磁区制御処理線 52 は、方向性電磁鋼板 50 において実体として存在するものではなく、応力導入線 90 に沿った仮想線である。従って、上述の手順で特定された応力導入線 90 と圧延直角方向 (TD) とがなす狭角を、磁区制御処理線 52 と圧延直角方向 (TD) とがなす角度であるとみなすことができる。

[0087] (β 角の測定方法)

方向性電磁鋼板 50 における β 角の測定は、側面反射ラウエ法によって行う。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。

[0088] (第 1 領域、第 2 領域、及び第 3 領域の特定方法)

第 1 領域、第 2 領域、及び第 3 領域の特定方法は以下の通りである。図 10 に例示されるように、まず、試料の表面に仮想的な格子 L を設定する。これにより、試料の表面を、格子 L によって区切られた複数のセル C として分割する。セル C の形状は、例えば 1 辺 2 mm の正方形とする。そして、セル C それぞれの中心を測定点として、実側面反射ラウエ法による結晶方位の測

定を実施する。これにより、測定点の β 角を特定し、測定点が第1領域A1、第2領域A2、及び第3領域A3のいずれに属するかを判定する。そして、中心が第1領域A1であると判定されたセルCは、その全体にわたって第1領域A1であるとみなす。同様に、中心が第2領域A2であると判定されたセルCは、その全体にわたって第2領域A2であるとみなし、中心が第3領域A3であると判定されたセルCは、その全体にわたって第3領域A3であるとみなす。図10においては、第1領域A1であるとみなされた測定点を黒色の丸印P1として表記し、第2領域A2であるとみなされた測定点を灰色の丸印P2として表記し、第3領域A3であるとみなされた測定点を黒色の丸印P3として表記している。上述の手順により、図10及び図11に示されるように、方向性電磁鋼板50の表面における第1領域A1、第2領域A2、及び第3領域A3を特定することができる。

[0089] (第1領域、第2領域、及び第3領域における引張り応力存在割合の算出方法)

磁区制御処理線52と圧延直角方向(TD)とがなす角度の測定方法の説明において示された手順により、図11に示されるように、第1領域A1、第2領域A2、及び第3領域A3にそれぞれにおける磁区制御処理線52及び応力導入線90を特定する。試料の全ての第1領域A1に含まれる全ての応力導入線90の合計長さを、試料の全ての第1領域A1に含まれる全ての磁区制御処理線52で割った値が、第1領域A1における引張り応力存在割合である。同様に、試料の全ての第2領域A2に含まれる全ての応力導入線90の合計長さを、試料の全ての第2領域A2に含まれる全ての磁区制御処理線52で割った値が、第2領域A2における引張り応力存在割合であり、試料の全ての第3領域A3に含まれる全ての応力導入線90の合計長さを、試料の全ての第3領域A3に含まれる全ての磁区制御処理線52で割った値が、第3領域A3における引張り応力存在割合である。

[0090] (応力導入線90における、板厚方向に対する引張り応力の測定方法)

応力導入線90における、板厚方向に対する引張り応力の大きさは、EB

SD 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。

[0091] EBSD Wilkinson法およびBLG Vantage社製Cross Courtによって板厚方向に対する引張り応力の大きさを測定する際には、まず、磁区制御処理線と圧延直角方向（TD）とがなす角度の測定方法の説明において示された手順により、応力導入線90を特定する。次に、応力導入線90を通り、且つ応力導入線90に垂直に、方向性電磁鋼板50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、応力導入線90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、板厚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。

[0092] 測定箇所数は、例えば10とする。方向性電磁鋼板50の少なくとも1箇所において、板厚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50が有する応力処理線における板厚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。板厚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。

[0093] 応力導入線90（即ち、板厚方向に対して所定の引張り応力が存在する部分）の、圧延方向（RD）に沿った間隔の測定方法は以下の通りである。まず、磁区制御処理線と圧延直角方向（TD）とがなす角度の測定方法の説明において示された手順により、圧延方向（RD）、及び応力導入線90を特定する。次に、圧延方向（RD）に沿った応力導入線90の間隔を測定すれ

ばよい。

[0094] 応力導入線90が非単一周期で存在するか否かの判定方法は、以下の通りである。まず、上述の手順により、試料に含まれる磁区制御処理線52及び応力導入線90を特定する。上述の通り、「1cmあたりに平均で10か所以上の応力導入線90があり、それぞれの応力導入線90の間にある非磁区細分化処理線の長さの標準偏差が20 μ m超の場合」には、応力導入線90が非単一周期で存在するとみなされる。従って、判定にあたっては、試料（例えば両辺の長さが100mmの矩形試料）に含まれる複数の磁区制御処理線52それぞれにおいて、応力導入線90が1cmあたりに平均で10か所以上含まれるか否かを判定する。例えば、試料に含まれる1本の磁区制御処理線52の長さがXcmであり、当該磁区制御処理線52に含まれる応力導入線90の個数がy個であった場合、当該磁区制御処理線52には、1cmあたりに平均でy/Xか所の応力導入線90があると判定される。さらに、応力導入線90が1cmあたりに平均で10か所以上含まれると判定された磁区制御処理線52それぞれにおいて、非磁区細分化処理線の長さの標準偏差が20 μ m以下であるか否かを判定する。試料に含まれる全ての磁区制御処理線52のうち、50%以上において応力導入線90が非単一周期で設けられている場合、当該試料においては応力導入線90が非単一周期で存在すると判断される。

実施例

[0095] 実施例により本発明の一態様の効果を更に具体的に説明する。ただし、実施例での条件は、本発明の実施可能性及び効果を確認するために採用した一条件例に過ぎない。本発明は、この一条件例に限定されない。本発明は、本発明の要旨を逸脱せず、本発明の目的を達成する限り、種々の条件を採用し得る。

[0096] 板厚が0.20mmであり、800A/mで励磁した際の磁束密度B8が1.87T以上であり、励磁周波数が50Hzであり、励磁磁束密度1.7Tで測定された鉄損が0.80W/kg以下である、同一ロットの方向性電

磁鋼板に対して、表1に示す種々の条件で磁区細分化処理を実施した。なお、いずれの実施例及び比較例においても、照射ピッチ PL 、平均照射エネルギー密度 U_a 、及び磁区制御処理線と圧延直角方向とがなす角度は一定値とした。これにより得られた、磁区細分化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及び表3に記載した。表2において、不適切な値には下線を付した。

[0097] 騒音及び鉄損の評価方法は以下の通りとした。まず、板厚 0.20 mm の方向性電磁鋼板を 204 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 150 mm とした。三相変圧器鉄心の外形の高さ及び幅はともに 750 mm 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 50 Hz 、及び励磁磁束密度 1.7 T とした。

[0098] 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 30 cm 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3に記載した。騒音の評価結果が 32.00 dBA 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。

[0099] 鉄損は、上述の通り周波数 50 Hz 、及び励磁磁束密度 1.7 T 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3に記載した。鉄損の評価結果が 0.870 W/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。

[0100] さらに、磁区細分化処理済みの方向性電磁鋼板における、磁区制御処理線と圧延直角方向とがなす角度、第1領域、第2領域、又は第3領域における引張り応力存在割合、及び板厚方向に対する引張り応力を測定し、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100 mm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。板厚方向に対する引張り応力は、10箇所で測定された。表には、10箇所での引張り応力の測定値のうち最大の値を記載した。

[0101] [表1]

	照射ピッチPL (引張り応力存在位置の 圧延方向の間隔) (mm)	平均照射 エネルギー密度 U_a (mJ/mm ²)
1		
2	5.0	2.0
3	5.0	2.0
4	5.0	2.0
5	5.0	2.0
6	5.0	2.0
7	5.0	0.5
8	11.0	2.0
9	11.0	2.0
10	6.0	2.0
11	6.0	2.0
12	6.0	2.0
13	4.0	2.0
14	2.0	2.0
15	6.0	2.0
16	8.0	2.0
17	10.0	2.0
18	6.0	2.0
19	6.0	2.0
20	6.0	2.0
21	6.0	5.0
22	6.0	3.0
23	6.0	1.5
24	6.0	1.0
25	6.0	0.8

[0102]

[表2]

	磁区制御処理線と 圧延直角方向TDとが なす角度 (°)	引張り応力存在割合 (%)			第1領域 \geq 第3領域 \geq 第2領域	引張り応力の 最大値 (MPa)
		第1 領域	第2 領域	第3 領域		
1	なし	0	0	0		
2	50	87	46	67	満たす	185
3	5	34	45	30	満たさない	179
4	5	48	40	46	満たす	177
5	5	63	68	60	満たさない	182
6	5	64	52	59	満たす	184
7	5	70	41	54	満たす	38
8	5	77	43	83	満たさない	193
9	5	75	41	70	満たす	196
10	5	69	34	18	満たさない	171
11	5	63	46	81	満たさない	194
12	5	67	34	72	満たさない	188
13	0	67	31	58	満たす	178
14	5	63	38	54	満たす	191
15	5	69	38	51	満たす	203
16	5	66	40	56	満たす	186
17	5	62	35	55	満たす	173
18	20	67	36	40	満たす	193
19	30	60	41	56	満たす	187
20	40	64	33	41	満たす	193
21	5	51	3	21	満たす	323
22	5	62	15	34	満たす	241
23	5	75	42	63	満たす	137
24	5	84	46	69	満たす	86
25	5	95	48	78	満たす	46

[0103]

[表3]

	騒音の評価結果 @1.7T (dBA)	鉄損の評価結果 @1.7T (W/kg)
1	28.50	0.970
2	33.71	0.933
3	31.24	0.903
4	30.21	0.884
5	33.17	0.844
6	32.57	0.793
7	29.64	0.914
8	31.73	0.863
9	29.88	0.843
10	30.61	0.815
11	30.88	0.771
12	30.32	0.793
13	28.52	0.735
14	29.34	0.736
15	28.74	0.750
16	29.15	0.785
17	29.43	0.795
18	29.12	0.762
19	29.66	0.777
20	29.86	0.789
21	29.87	0.756
22	29.21	0.743
23	28.45	0.756
24	28.63	0.777
25	28.72	0.794

[0104] 例1では、磁区細分化処理が行われなかった。例1では、応力導入線が設けられなかったため、騒音評価結果の悪化は見られなかった。一方、例1では、低鉄損化が達成されなかった。

[0105] (角度が不適切な例)

例2では、磁区制御処理線と圧延直角方向がなす角度が過剰であった。例2においては、騒音評価結果が悪化した一方で、低鉄損化が達成されなかった。

[0106] (第1領域における引張り応力存在割合が不適切な例)

例3及び例4では、応力の導入を均一的に行った。そして、例3及び例4では、第1領域及び第2領域の両方における引張り応力存在割合が低い水準とされた。例3及び例4においては、騒音は低い水準に抑制されていたが、低鉄損化が達成されなかった。

[0107] (第2領域における引張り応力存在割合が過剰な例)

例5及び例6では、応力の導入を均一的に行った。そして、例5及び例6では、第1領域及び第2領域の両方における引張り応力存在割合が高い水準とされた。例3及び例4においては、低鉄損化が達成されていたが、低騒音化は達成されなかった。

[0108] 例7では、応力の導入を、 β 角が 1° 以下の箇所に対して優先的に行った。ただし、例7では平均照射エネルギー密度が低い値とされ、応力導入線における引張り応力が不足した。例7では、低鉄損化が達成されなかった。

[0109] 例8～例25では、応力の導入を、 β 角が 1° 以下の箇所に対して優先的に行った。また、例8～例25では、応力導入線における引張り応力の最大値も適切な範囲内とされた。例8～例25では、低鉄損化及び低騒音化の両方が達成された。また、第1領域の引張り応力存在割合 \geq 第3領域の引張り応力存在割合 \geq 第2領域の引張り応力存在割合の関係が満たされた例、及び圧延方向に沿った応力導入線の間隔が10.0mm以下の例においては、鉄損及び騒音が一層低減されていた。

符号の説明

- [0110] 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

- 4 3 メモリ
- 4 5 表示部
- 4 7 入力部
- 4 9 通信 I / F
- 5 0 方向性電磁鋼板
- 5 2 磁区制御処理線
- 9 0 応力導入線（板厚方向に対して引張り応力が存在する部分）
- 5 0 0 レーザ照射装置
- L 格子
- C セル
- A 1 第 1 領域
- A 2 第 2 領域
- A 3 第 3 領域
- P 1 第 1 領域と判定された測定点
- P 2 第 2 領域と判定された測定点
- P 3 第 3 領域と判定された測定点
- R D 圧延方向
- T D 圧延直角方向

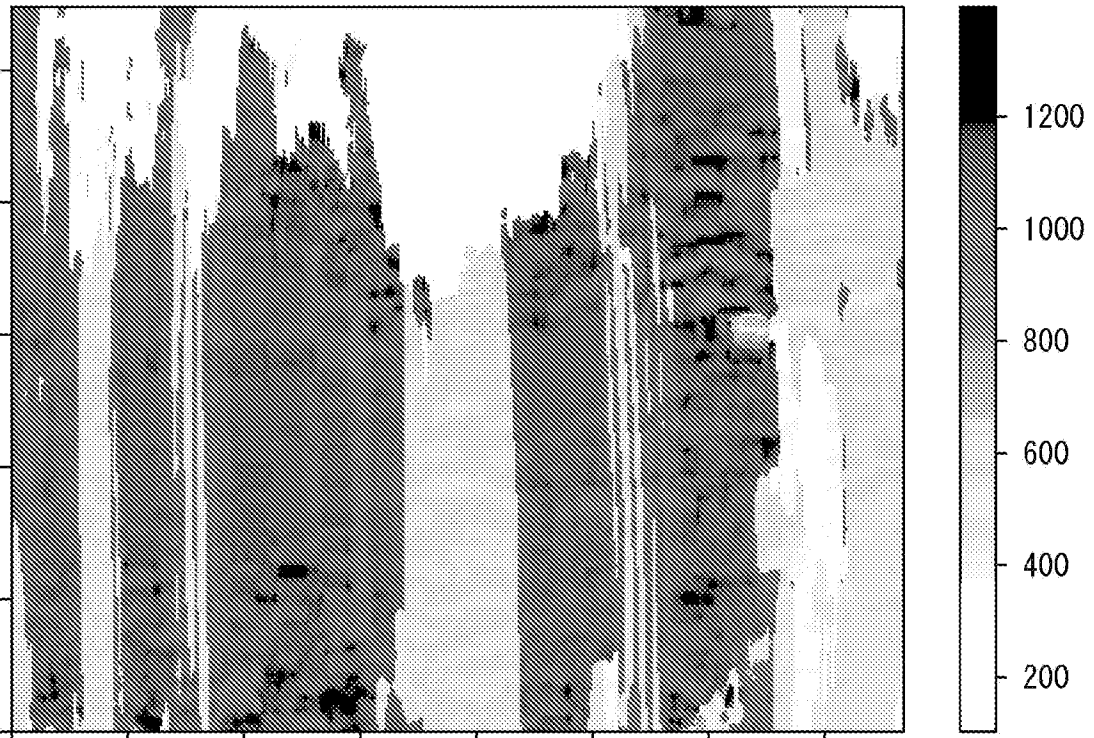
請求の範囲

- [請求項1] 方向性電磁鋼板の表面において、圧延直角方向に対して $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度をなし、且つ圧延方向に並ぶ磁区制御処理線の総延長のうち、非単一周期で存在し、板厚方向に対して引張り応力が存在する部分の占める割合である引張り応力存在割合が、圧延直角方向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 角が 1° 以下の領域である第1領域では50%以上であり、
- 前記引張り応力存在割合が、前記 β 角が 2° 超の領域である第2領域では50%未満であり、
- 前記引張り応力は、最大値が40MPa以上である、
方向性電磁鋼板。
- [請求項2] 前記引張り応力存在割合が、前記 β 角が 1° 超 2° 以下の領域である第3領域では20%以上80%以下であり、
- 前記第1領域の前記引張り応力存在割合 \geq 前記第3領域の前記引張り応力存在割合 \geq 前記第2領域の前記引張り応力存在割合である、請求項1に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項3] 前記板厚方向に対して前記引張り応力が存在する前記部分は、圧延方向に10.0mm以下の間隔で存在する、請求項1又は2に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項4] 方向性電磁鋼板の磁区画像を取得する画像取得ステップと、
- 前記磁区画像の磁区幅の空間分布と、圧延直角方向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 角とに基づいて、前記方向性電磁鋼板の圧延直角方向に対して $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度をなし、且つ圧延方向に並ぶ磁区制御処理線のうち、引張り応力を導入する箇所を決定する決定ステップと、
- 前記磁区制御処理線のうち、前記決定ステップで決定された箇所に前記引張り応力を導入する応力導入ステップと、
- を含む、方向性電磁鋼板の製造方法。

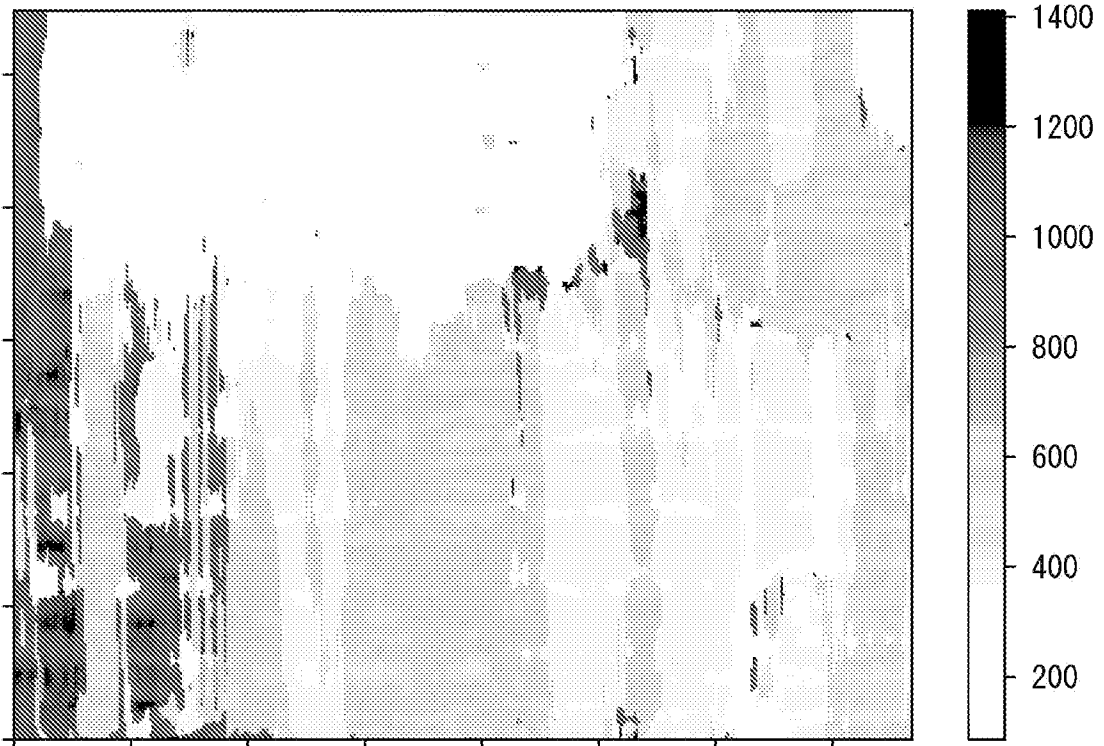
[請求項5] 前記決定ステップは、前記磁区制御処理線のうち、前記 β 角が 1° 以下の箇所を、前記引張り応力を導入する箇所として決定する、請求項4に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[請求項6] 前記決定ステップは、2次元フーリエ変換を用いて、前記磁区画像から前記引張り応力を導入する箇所を決定する、請求項4又は5に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

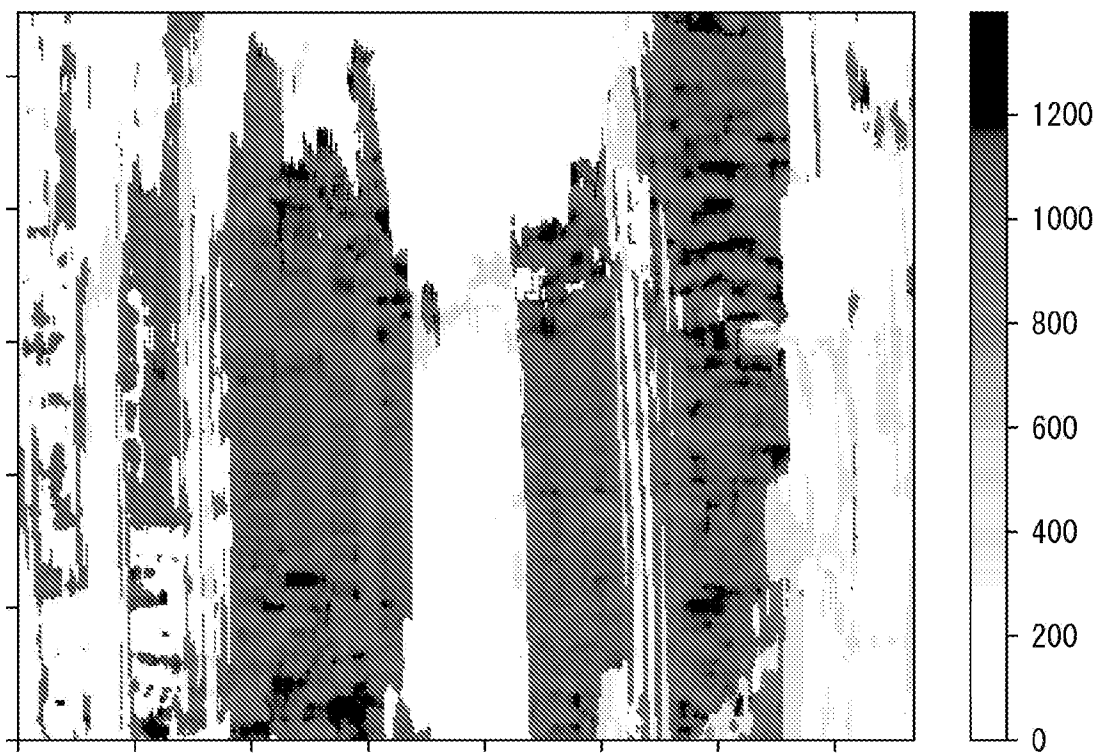
[図1A]



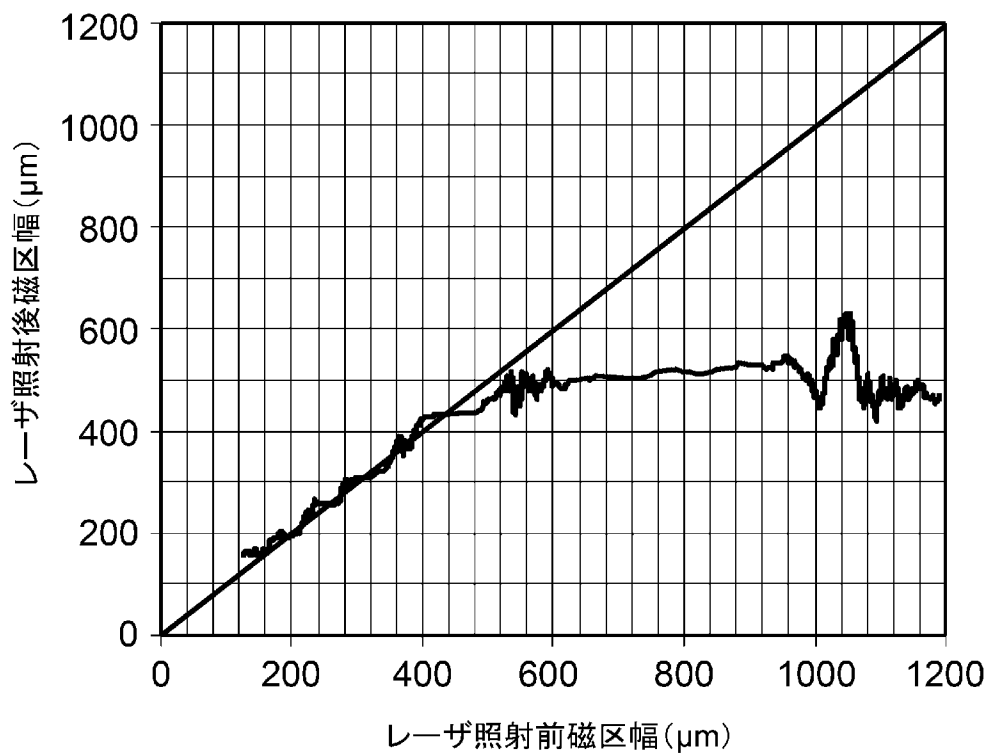
[図1B]



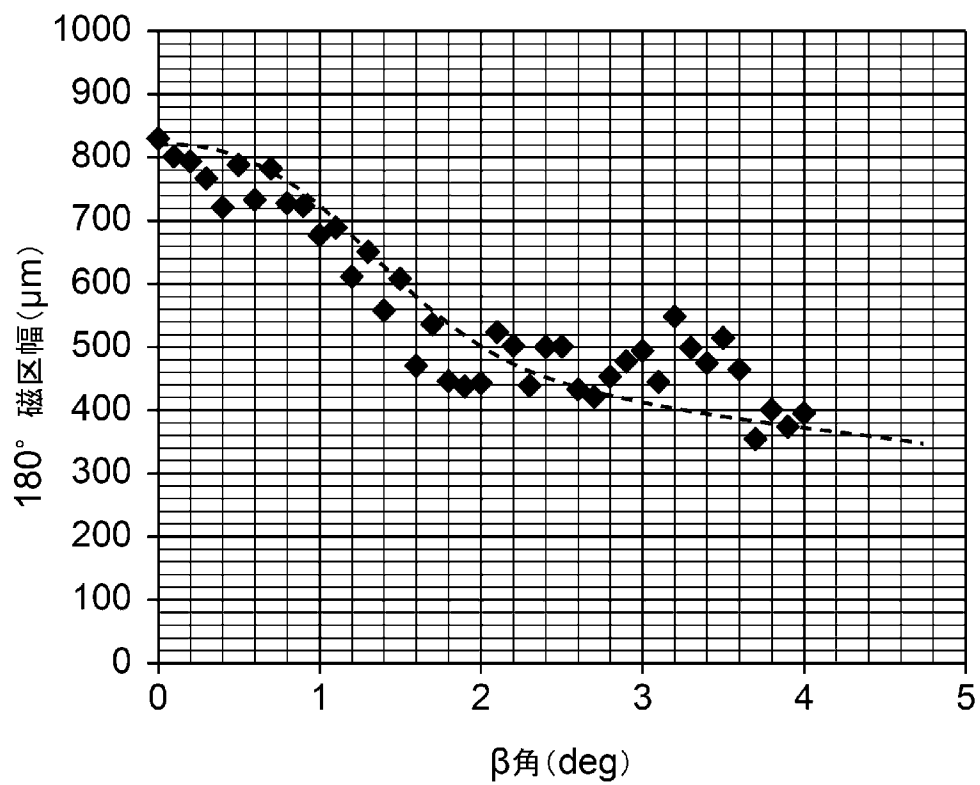
[図1C]



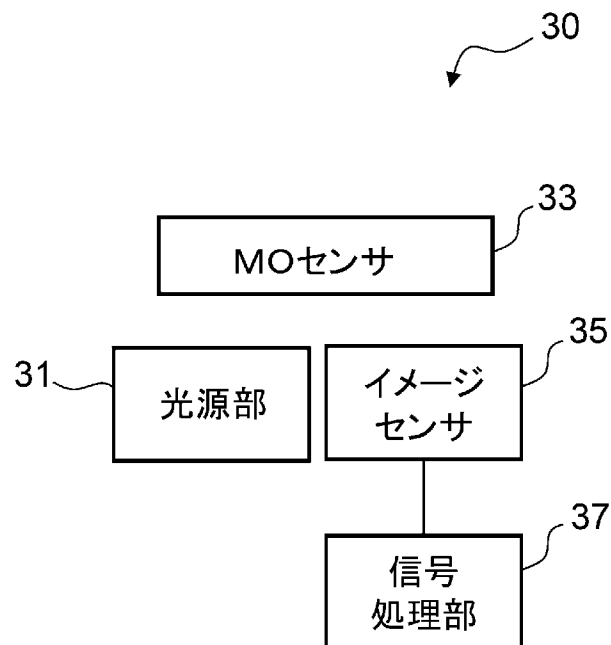
[図2A]



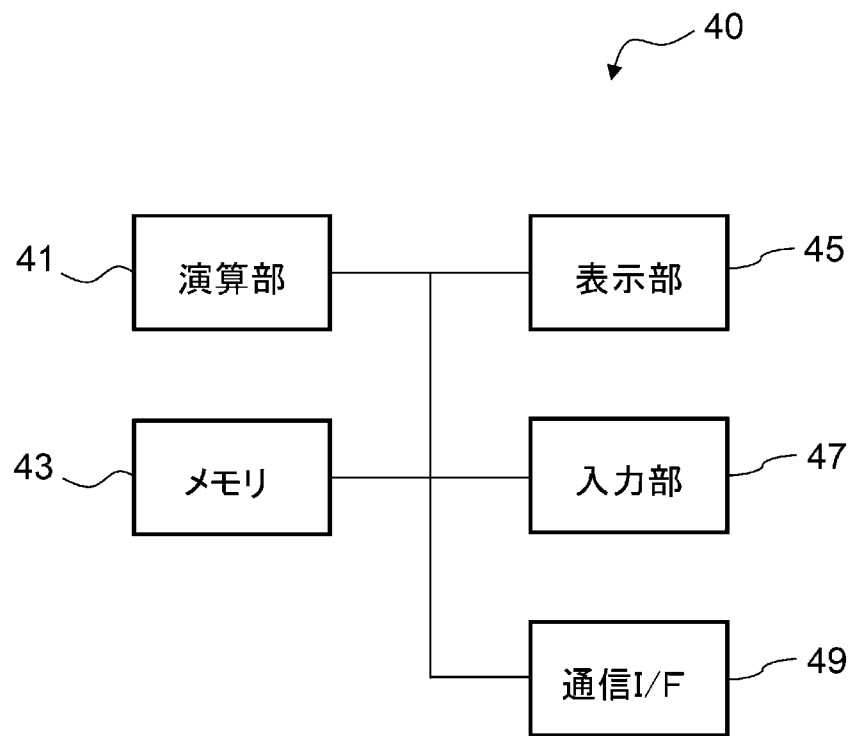
[図2B]



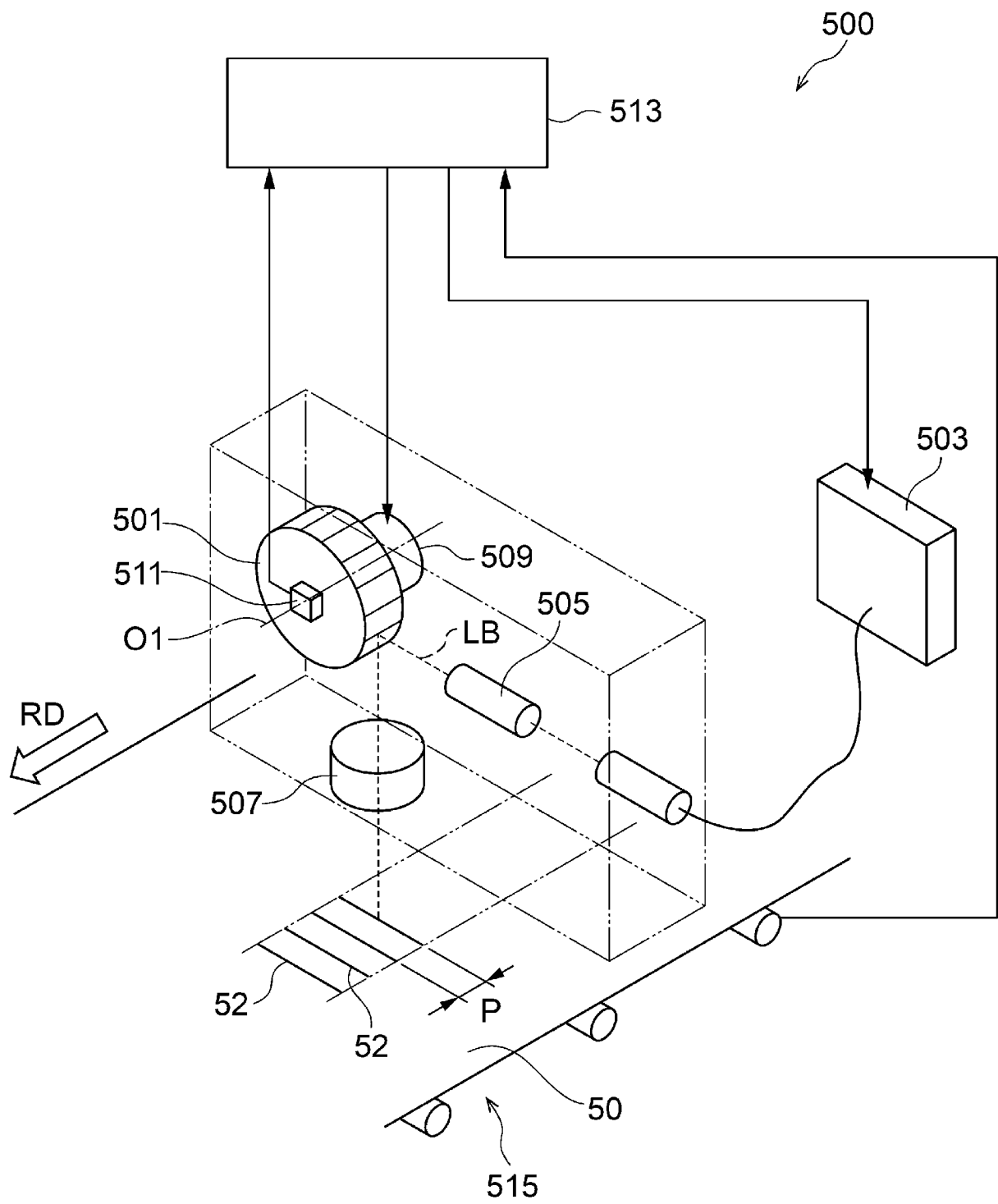
[図3]



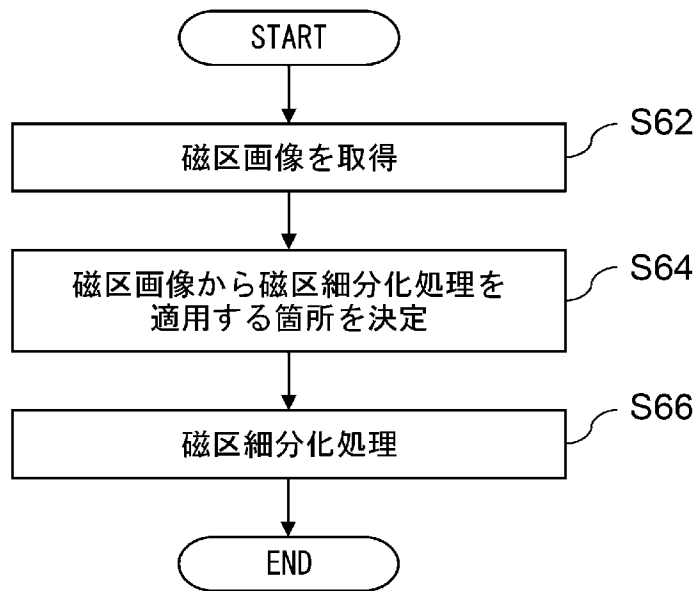
[図4]



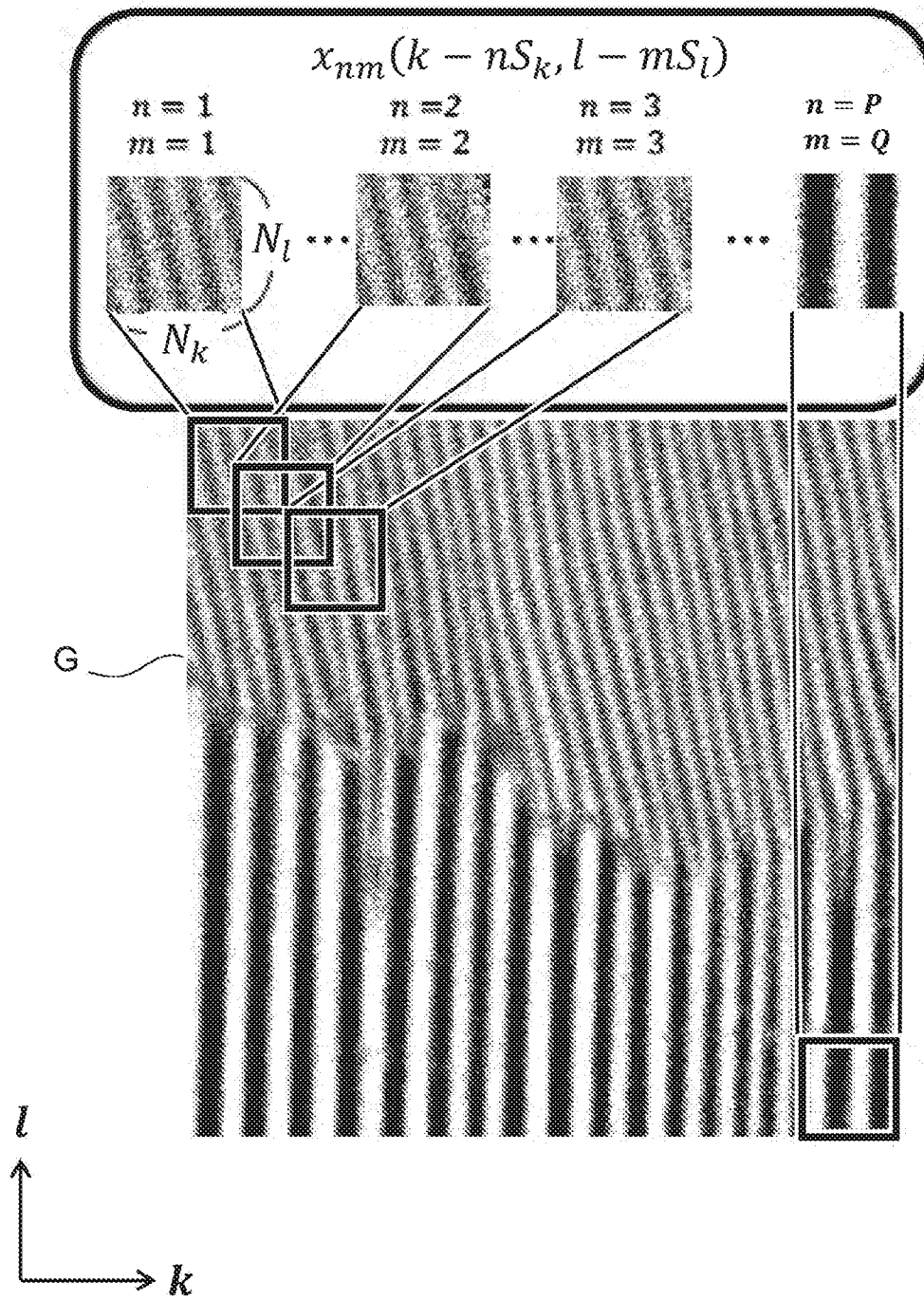
[図5]



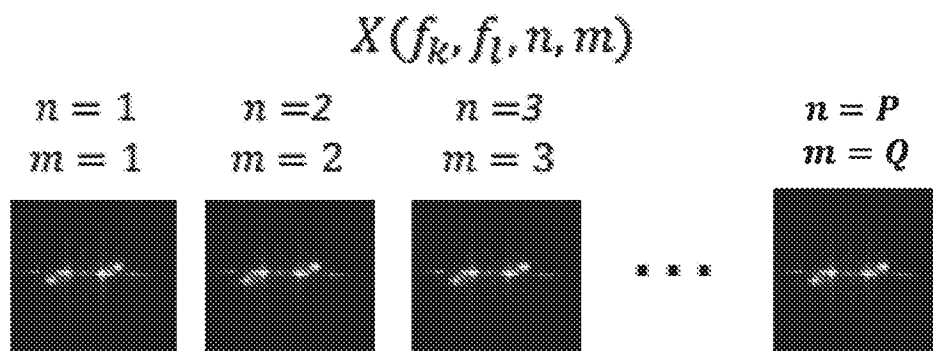
[図6]



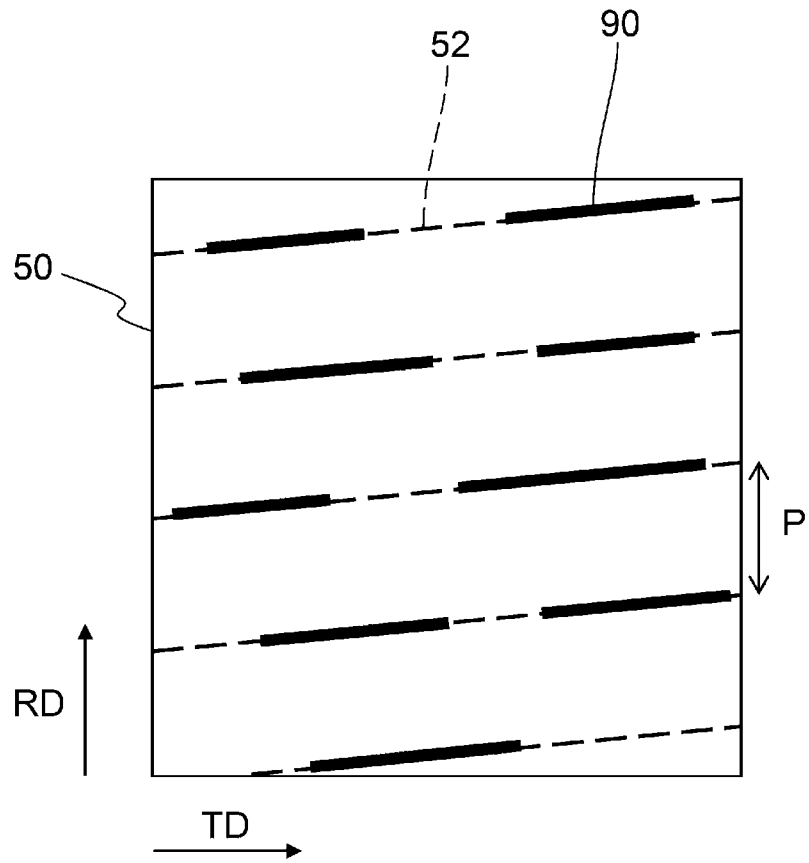
[図7]



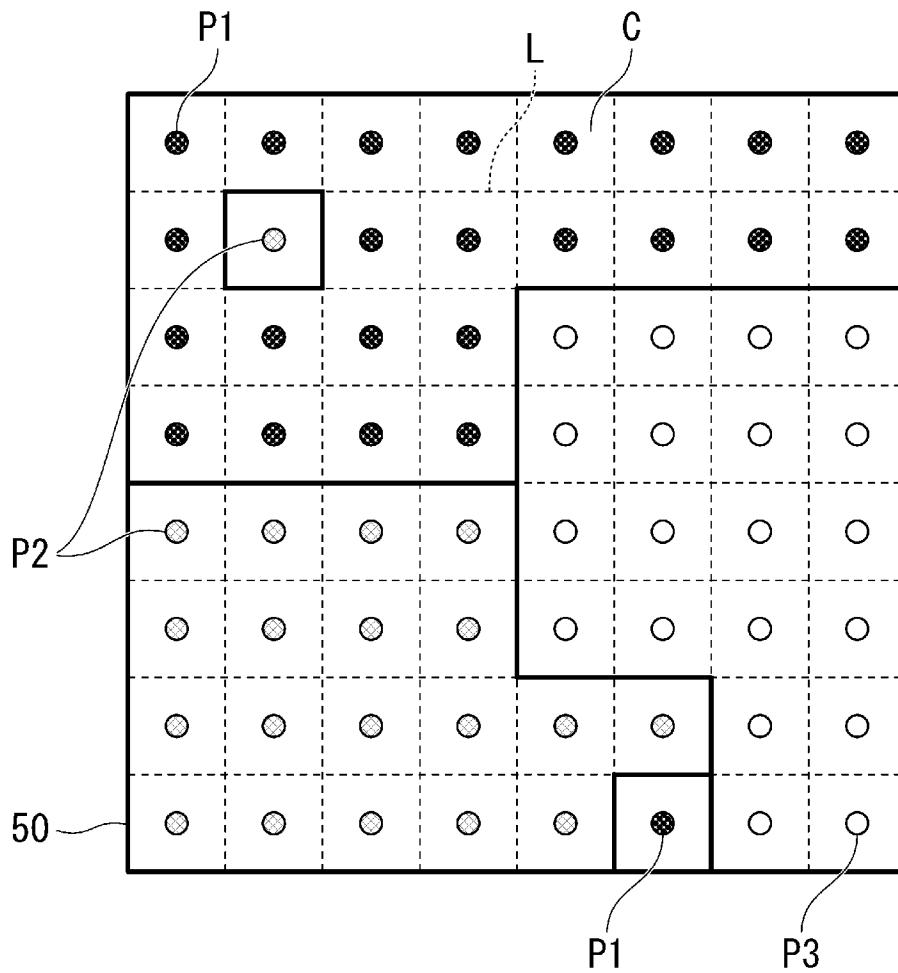
[図8]



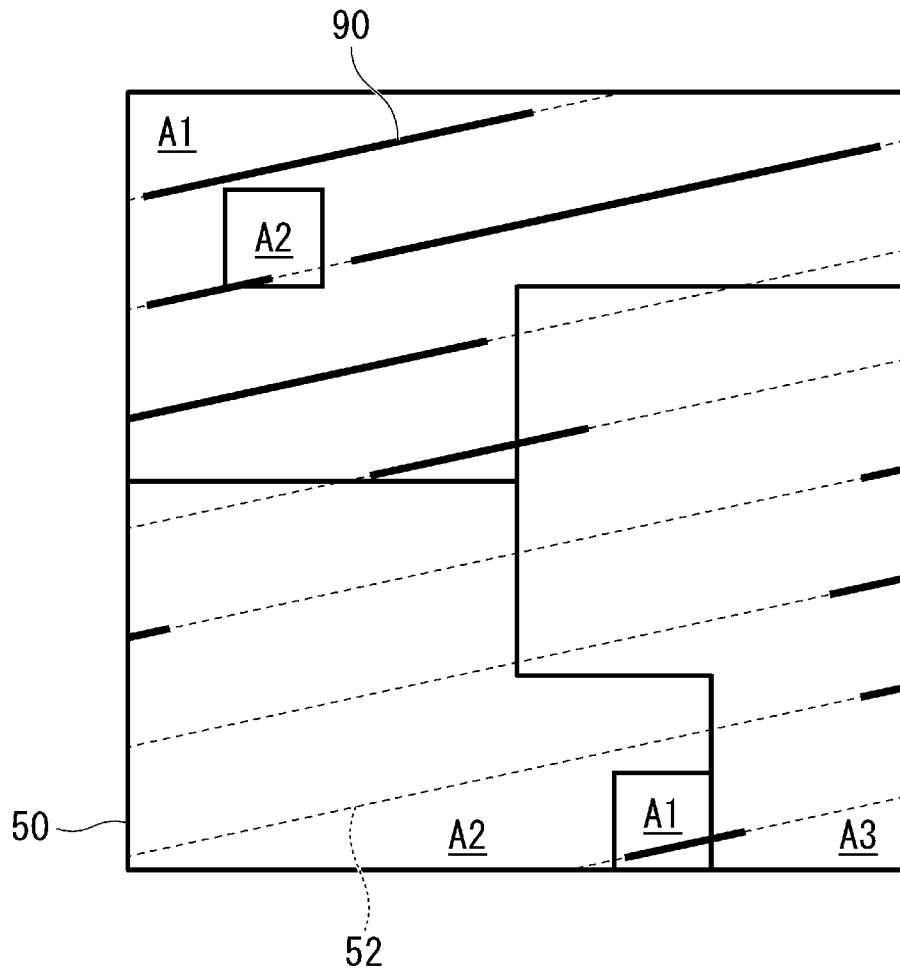
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/012179

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>C21D 8/12</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/00</i> (2006.01)i; <i>H01F 1/147</i> (2006.01)i FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; 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; H01F1/147		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023		
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.
Y	JP 11-293340 A (KAWASAKI SEITETSU KK) 26 October 1999 (1999-10-26) claims, paragraphs [0004], [0007]-[0012], [0014], fig. 1	1-6
Y	JP 2008-127632 A (NIPPON STEEL CORPORATION) 05 June 2008 (2008-06-05) claims, paragraphs [0001], [0011], [0015]-[0040]	1-6
Y	JP 2012-57218 A (JFE STEEL CORP.) 22 March 2012 (2012-03-22) claims, paragraphs [0001]-[0006], [0010]-[0014]	1-3
A		4-6
Y	JP 2020-169373 A (NIPPON STEEL CORP.) 15 October 2020 (2020-10-15) claims, paragraphs [0001]-[0009], [0020]-[0049]	4-6
A		1-3
A	JP 55-119125 A (NIPPON STEEL CORP.) 12 September 1980 (1980-09-12) p. 1, lower left column, line 19 to p. 2, lower right column, line 19, fig. 2	1-6
A	CN 106282512 A (BAOSHAN IRON & STEEL) 04 January 2017 (2017-01-04) entire text, all drawings	1-6
<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 "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 12 June 2023		Date of mailing of the international search report 27 June 2023
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/JP2023/012179

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 11-293340 A	26 October 1999	(Family: none)	
JP 2008-127632 A	05 June 2008	(Family: none)	
JP 2012-57218 A	22 March 2012	(Family: none)	
JP 2020-169373 A	15 October 2020	(Family: none)	
JP 55-119125 A	12 September 1980	(Family: none)	
CN 106282512 A	04 January 2017	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） C21D 8/12(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; H01F 1/147(2006.01)i FI: C22C38/00 303U; H01F1/147 175; 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; H01F1/147 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2023年 日本国実用新案登録公報 1996-2023年 日本国登録実用新案公報 1994-2023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
Y	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, 0004, 0007-0012, 0014, 図1	1-6
Y	JP 2008-127632 A (新日本製鐵株式会社) 05.06.2008 (2008 - 06 - 05) 特許請求の範囲, 0001, 0011, 0015-0040	1-6
Y A	JP 2012-57218 A (J F E スチール株式会社) 22.03.2012 (2012 - 03 - 22) 特許請求の範囲, 0001-0006, 0010-0014	1-3 4-6
Y 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, 0001-0009, 0020-0049	4-6 1-3
A	JP 55-119125 A (新日本製鐵株式会社) 12.09.1980 (1980 - 09 - 12) 第1頁左下欄第19行-第2頁右下欄第19行, 第2図	1-6
A	CN 106282512 A (BAOSHAN IRON & STEEL) 04.01.2017 (2017 - 01 - 04) 全文, 全図	1-6
<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、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と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	
12.06.2023	27.06.2023	
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	

国際調査報告
特許ファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/012179

引用文献	公表日	特許ファミリー文献	公表日
JP 11-293340 A	26.10.1999	(ファミリーなし)	
JP 2008-127632 A	05.06.2008	(ファミリーなし)	
JP 2012-57218 A	22.03.2012	(ファミリーなし)	
JP 2020-169373 A	15.10.2020	(ファミリーなし)	
JP 55-119125 A	12.09.1980	(ファミリーなし)	
CN 106282512 A	04.01.2017	(ファミリーなし)	