

(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)



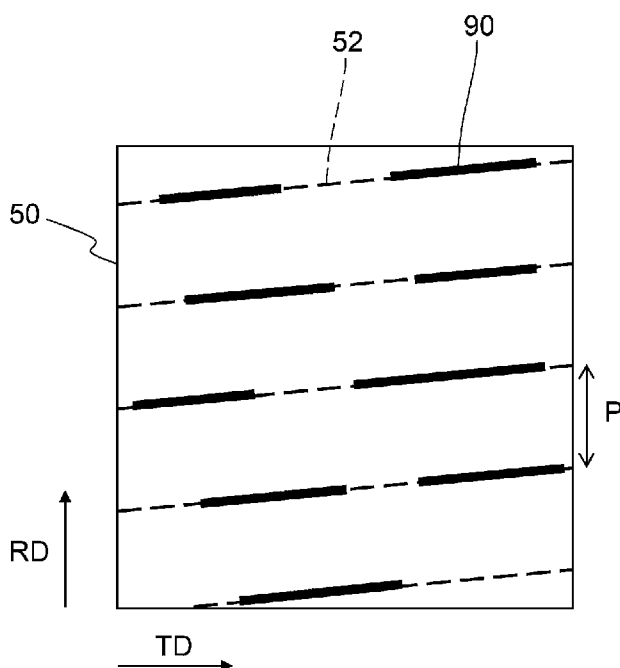
(10) 国際公開番号

WO 2023/190331 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/JP2023/012183
- (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 2022-052345 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 MAGNETIC STEEL PLATE 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



(57) Abstract: In a surface of this grain-oriented magnetic steel plate, a ratio (a groove presence ratio), of a total length of magnetic-domain control processing lines aligned in a rolling direction and forming an angle of 0° to 45° with respect to a rolling perpendicular direction, occupied by a section (a groove formation line) where a groove having a depth of $5\ \mu\text{m}$ to $50\ \mu\text{m}$ and a width of $10\ \mu\text{m}$ to $300\ \mu\text{m}$ is present, is equal to or greater than 50% in a first region, which is a region where a β angle is equal to or less than 1° , the β angle being a deviation angle from a crystal grain Goss orientation around the axis of the rolling perpendicular direction. The groove presence ratio is less than 50% in a second region, which is

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))

a region where the β angle is greater than 2° .

(57) 要約: 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、 $5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分(溝形成線)の占める割合(溝存在割合)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、溝存在割合が、 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2022-052345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）。

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：特開2012-77380号公報

特許文献4：特開2012-126973号公報

特許文献5：特許第3148092号公報

特許文献6：国際公開第2016/056501号

特許文献7：国際公開第2013-160955号

特許文献8：特開2015-206114号公報

特許文献9：特開2012-57219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9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、 $5 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ の深さ及び $10 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分の占める割合である溝存在割合が、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、前記溝存在割合が、 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、前記溝存在割合が、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領域の前記溝存在割合 $\geq$ 前記第3領域の前記溝存在割合 $\geq$ 前記第2領域の前記溝存在割合である。

(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、5

$\mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ の深さ及び $10 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ の幅を有する前記溝は、圧延方向に $1 \sim 20 \text{mm}$ 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Goss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、 $5 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ の深さ及び $10 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ の幅を有する溝を形成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溝を形成する溝形成ステップと、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、前記溝を形成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磁区幅の空間分布を導出する。

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 $50 \mu\text{m}$ 以上細分化した領域を示すグラフである。

[図2A]溝形成前の磁区幅と溝形成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溝形成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溝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 $0^\circ \sim$

45°の角度をなした磁区制御処理線に沿って溝を形成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溝形成前の磁区幅と溝形成後の磁区幅との関係を示す。ここで、溝形成の条件は、溝深さ20μm、溝幅100μm、溝ピッチ4mmで形成した。

[0019] 図2Aより、約500μm以下の磁区幅の領域に溝を形成しても、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、透磁率の低下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}<001>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) <001>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 μ 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、方向性電磁鋼板の表面において、圧延直角方向(TD)に対して0°~45°の範囲内で、所定の深さ及び所定の幅を有する溝を圧延方向(RD)に所定間隔で形成することで、鉄損を低減させる技術が知られている(特許文献5参照)。

[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、所定の深さ及び所定の幅を有する溝を形成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の内部を再び通って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3

3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、溝を形成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溝を形成させる手段として、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、レーザ照射により溝を形成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 5 1 5 とを備える。

- [0040] 通板装置 5 1 5 は、方向性電磁鋼板 5 0 を圧延方向（R D）に通板する。
- [0041] ポリゴンミラー 5 0 1 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 5 0 1 の平面鏡には、光源装置 5 0 3 からコリメータ 5 0 5 を介してレーザービーム L B が一方向（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 5 0 1 は、モータ 5 0 9 からの駆動によって回転軸 O 1 周りに回転可能である。ポリゴンミラー 5 0 1 の回転角度に応じて、平面鏡に対するレーザービーム L B の入射角が順次変化することにより、レーザービーム L B の反射方向が順次変化し、方向性電磁鋼板 5 0 の磁区制御処理線 5 2 に沿って走査することができる。ここで、磁区制御処理線 5 2 は、方向性電磁鋼板 5 0 の表面上で、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）に並ぶ複数の直線である。好ましくは、複数の磁区制御処理線 5 2 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 5 2 は等間隔に並べられている。隣接する磁区制御処理線 5 2 の間隔 P は、溝形成間隔を表している。
- [0043] 光源装置 5 0 3 は、制御部 5 1 3 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 L B を出力する。
- [0044] 集光レンズ 5 0 7 は、ポリゴンミラー 5 0 1 から反射されたレーザービーム L B 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 5 0 1 から反射されたレーザービーム L B が集光レンズ 5 0 7 を介して方向性電磁鋼板 5 0 の表面に集光されることで、方向性電磁鋼板 5 0 の表面の磁区制御処理線 5 2 に沿って溝が形成される。
- [0045] モータ 5 0 9 は、ポリゴンミラー 5 0 1 と連結されており、制御部 5 1 3 の制御のもとで、ポリゴンミラー 5 0 1 を回転駆動する。
- [0046] センサ 5 1 1 は、モータ 5 0 9 の駆動軸と連結されており、モータ 5 0 9 によって回転するポリゴンミラー 5 0 1 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 5 1 3 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のうち溝を形成する箇所を表す溝形成信号と、センサ511から出力された回転角度信号とに基づいて、光源装置503が出力するレーザビームLBのパワーのオンとオフを制御する。レーザ照射装置500が解析装置40に電氣的に接続されている場合、溝形成信号は、解析装置40からレーザ照射装置500に入力される。なお、溝形成信号は、オペレータによってレーザ照射装置500に入力されてもよい。

[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、溝の形成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、溝を形成する箇所を「溝形成線」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、溝形成線の箇所を決定し、溝形成線の箇所を表す溝形成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S6

4で決定された箇所に対して優先的に、所定の深さ及び所定の幅を有する溝を形成することにより磁区細分化処理を施す（ステップS66：溝形成ステップ）。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、電子ビームの照射や機械加工、エッチング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° 以下の領域に対して優先的に溝を形成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 $nS_k \leq k \leq nS_k + N_k - 1$ 、 $mS_l \leq l \leq mS_l + N_l - 1$ 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]

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

[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 $x_{nm}(n', m') = x_{nm}(k - nS_k, l - mS_l)$ 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]

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

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]

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

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

[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、溝が形成される溝形成線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のうち溝形成線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、溝形成線90に沿って溝が形成される。

[0071] 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°～45°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、5 μm ～50 μm の深さ及び10 μm ～300 μm の幅を有する溝が存在する部分の占める割合である溝存在割合が、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、溝存在割合が、 β 角が2°超の領域である第2領域では50%未満である。

[0072] （溝形成線90（5 μm ～50 μm の深さ及び10 μm ～300 μm の幅を有する溝が存在する部分））

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、 $5\mu\text{m}$ ～ $50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m}$ ～ $300\mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分を有する。ここで、 $5\mu\text{m}$ ～ $50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m}$ ～ $300\mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分を「溝形成線90」と称する。磁区細分化を促進させ、鉄損を低減させるために、溝の深さを $5\mu\text{m}$ ～ $50\mu\text{m}$ 、溝の幅を $10\mu\text{m}$ ～ $300\mu\text{m}$ とすることが好ましい（特許文献5参照）。深さ、及び／又は幅が上述の範囲外にある溝は、溝形成線90を構成するものとはみなされない。後述する溝存在割合の算出にあたって、深さ、及び／又は幅が上述の範囲外にある溝は考慮されない。

溝形成線90を構成する溝の深さを $6\mu\text{m}$ 以上、 $7\mu\text{m}$ 以上、又は $10\mu\text{m}$ 以上と規定してもよい。溝形成線90を構成する溝の深さを $48\mu\text{m}$ 以下、 $45\mu\text{m}$ 以下、又は $40\mu\text{m}$ 以下と規定してもよい。溝形成線90を構成する溝の幅を $20\mu\text{m}$ 以上、 $30\mu\text{m}$ 以上、又は $50\mu\text{m}$ 以上と規定してもよい。溝形成線90を構成する溝の幅を $280\mu\text{m}$ 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、溝形成線90において一様であってもよいし、上述の範囲内であればついてもよい。

[0073] さらに、磁区細分化を促進させ、鉄損を低減させるために、圧延方向（RD）に沿って測定される、隣り合う溝の間隔Pを 1mm ～ 20mm とすることが好ましい（特許文献5参照）。なお、方向性電磁鋼板において、溝の間隔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溝の間隔Pを 1mm ～ 20mm 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溝の間隔Pを 1mm ～ 20mm としてもよい。また、方向性電磁鋼板における溝の間隔Pの平均値を $1\sim 20\text{mm}$ としてもよい。隣り合う溝の間隔P、又は溝の間隔Pの平均値を 2mm 以上、 3mm 以上、又は 5mm 以上としてもよい。隣り合う溝の間隔P、又は溝の間隔Pの平均値を 18mm 以下、 16mm 以下、又は 15mm 以下としてもよい。

[0074] なお、方向性電磁鋼板の表面に張力絶縁被膜が形成されていてもよい。こ

の場合、溝の深さ、溝の幅、及び圧延方向に沿った溝の間隔とは、素地鋼板に設けられた溝における値である。方向性電磁鋼板が張力絶縁被膜を有する場合、溝の深さ、溝の幅、及び圧延方向に沿った溝の間隔は、張力絶縁被膜を除去してから測定される。

[0075] (磁区制御処理線 52)

溝形成線 90 は、図 9 に例示されるように、磁区制御処理線 52 上に配されている。磁区制御処理線 52 は、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 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度をなして、圧延方向 (RD) に沿って並べられている。磁区制御処理線 52 は、互いに平行に並べられていることが好ましい。溝がレーザによって形成されたものである場合、磁区制御処理線 52 は、方向性電磁鋼板 50 の製造段階におけるレーザビーム LB の焦点の軌跡に対応する。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、溝形成線 90 に沿った仮想線である。溝形成線 90 に沿って線を引くこと等により、磁区制御処理線 52 を特定することができる。圧延直角方向 (TD) と応力導入線 90 の延在方向とがなす角度は、圧延直角方向 (TD) と、当該応力導入線 90 が設けられた磁区制御処理線 52 の延在方向とがなす角度と同一である。

[0076] なお、方向性電磁鋼板 50 において、磁区制御処理線 52 と圧延直角方向 (TD) とがなす角度は一樣であってもよいし、ばらついていてもよい。方向性電磁鋼板 50 の一部のみににおいて磁区制御処理線 52 と圧延直角方向 (TD) 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 50 の全ての領域において磁区制御処理線 52 と圧延直角方向 (TD) 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 50 における磁区制御処理線 52 と圧延直角方向 (TD) 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 52 と圧延直角方向 (TD) 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 52 と圧延直角方向 (TD) 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。

[0077] 本実施形態では、溝形成線 90 は磁区制御処理線 52 上に非単一周期で存在してもよい。溝形成線 90 が非単一周期で存在するとは、「1 cm 当たり平均で 10 か所以上の溝形成線 90 があり、それぞれの溝形成線 90 の間にある非溝形成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溝形成線 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。

[0078] 上述のように、 β 角に応じて溝を形成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 のうち上述の溝が存在する部分（溝形成線 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 のうち溝形成線 90 の占める割合（溝存在割合）を、磁区制御処理線 52 の長さの総延長に対する溝形成線 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 領域では溝形成線 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 領域では溝形成線 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、溝存在割合が 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溝存在割合は、以下の関係を満たす。

第 1 領域の溝存在割合 $\geq$ 第 3 領域の溝存在割合 $\geq$ 第 2 領域の溝存在割合
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] 本実施形態では、方向性電磁鋼板 50 の任意の位置から採取した所定サイ

ズ（例えば、100mm角以上）の試料において、上述の溝存在割合を満たしていればよい。

[0081] 以上のように、方向性電磁鋼板50の β 角に応じて線状の溝を形成することで、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、透磁率の低下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、試料に含まれる溝形成線90を特定する。三次元測定機を用いて試料の表面を計測することにより、5 μ m～50 μ mの深さ及び10 μ m～300 μ mの幅を有する溝の位置を特定し、これを溝形成線90とみなす。方向性電磁鋼板50が張力絶縁被膜を有する場合は、張力絶縁被膜を除去してから試料表面の三次元測定を行う。張力絶縁被膜は例えば、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。張力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。

[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GOS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、溝形成線 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溝形成線 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 領域における溝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及び溝形成線90を特定する。試料の全ての第1領域A1に含まれる全ての溝形成線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における溝存在割合である。同様に、試料の全ての第2領域A2に含まれる全ての溝形成線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における溝存在割合であり、試料の全ての第3領域A3に含まれる全ての溝形成線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における溝存在割合である。

[0090] 溝形成線90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)、及び溝形成線90を特定する。次に、圧延方向(RD)に沿った溝形成線90の間隔を測定すればよい。

[0091] 溝形成線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及び溝形成線90を特定する。上述の通り、「1cmあたりに平均で10か所以上の溝形成線90があり、それぞれの溝形成線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、溝形成線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、溝形成線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に含まれる溝形成線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 か所の溝形成線90があると判定される。さらに、溝形成線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 $20\mu\text{m}$ 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%以上において溝形成線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溝形成線90が非単一周期で存在すると判断される。

実施例

[0092] 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。

[0093] 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に、表1に示す種々の条件で磁区細分化処理を実施した。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。

[0094] 騒音及び鉄損の評価方法は以下の通りとした。まず、板厚0.23mmの方向性電磁鋼板を180枚積層して、三相変圧器鉄心を作成した。三相変圧器鉄心の足及びヨークの幅はともに150mmとした。三相変圧器鉄心の外形の高さ及び幅はともに750mmとした。これら三相変圧器鉄心の、騒音および鉄損を測定した。測定条件は、周波数50Hz、及び励磁磁束密度1.5Tとした。

[0095] 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dB A）として表3に記載した。騒音の評価結果が25.00dB A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。

[0096] 鉄損は、上述の通り周波数 50 Hz、及び励磁磁束密度 1.5 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 0.70 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。

[0097] さらに、磁区細分化処理済みの方向性電磁鋼板における、溝と圧延直角方向とがなす角度、溝の深さ、溝の幅、溝間隔、及び第 1 領域、第 2 領域、又は第 3 領域における溝存在割合を測定し、表 2 に記載した。なお、全ての例において、溝と圧延直角方向とがなす角度、溝の深さ、溝の幅、及び溝間隔が一定値となるように、溝を形成した。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。

[0098] なお、上述の測定方法に従えば、溝形状が不適切な例（即ち溝深さ又は溝の幅が不足又は超過した例）においては、溝存在割合が 0 % となる。しかし参考のために、表 2 には、不適切な形状の溝を溝形成線とみなした場合の溝存在割合を記載した。

[0099]

[表1]

	磁区制御処理線と 圧延直角方向TDとが なす角度(°)	溝の深さ (μm)	溝の幅 (μm)	平均溝間隔 (mm)
1	なし			
2	50	23	152	8
3	15	4	155	8
4	15	53	162	8
5	15	8	9	8
6	15	28	302	8
7	15	24	145	0.8
8	15	27	132	21
9	15	26	136	8
10	15	29	170	8
11	15	22	161	8
12	15	28	162	8
13	15	21	188	8
14	0	30	169	8
15	15	31	160	8
16	30	25	181	8
17	45	20	142	8
18	15	6	149	8
19	15	48	142	8
20	15	14	12	8
21	15	24	65	8
22	15	31	296	8
23	15	21	158	1
24	15	24	137	10
25	15	20	129	20
26	15	27	186	8
27	15	29	125	8
28	15	25	149	8
29	15	21	151	8

[0100]

[表2]

	第1領域における 溝存在割合 (%)	第2領域における 溝存在割合 (%)	第3領域における 溝存在割合 (%)	第1領域 $\geq$ 第3領域 $\geq$ 第2領域
1	<u>0</u>	0	0	
2	62	34	55	満たす
3	77	25	54	満たす
4	80	33	48	満たす
5	66	28	58	満たす
6	74	36	48	満たす
7	68	25	53	満たす
8	76	38	61	満たす
9	<u>49</u>	34	45	満たす
10	72	<u>51</u>	58	満たす
11	62	38	19	満たさない
12	84	48	81	満たす
13	75	32	26	満たさない
14	81	29	50	満たす
15	73	15	59	満たす
16	68	33	54	満たす
17	75	34	41	満たす
18	63	33	50	満たす
19	77	41	58	満たす
20	76	39	45	満たす
21	77	47	55	満たす
22	59	28	57	満たす
23	61	43	60	満たす
24	54	44	46	満たす
25	74	26	53	満たす
26	51	21	22	満たす
27	97	34	79	満たす
28	73	3	58	満たす
29	65	49	55	満たす

[0101]

[表3]

	騒音の評価結果@1.5T (dBA)	鉄損の評価結果@1.5T (W/kg)
1	20.15	<u>0.721</u>
2	<u>27.23</u>	<u>0.741</u>
3	21.34	<u>0.712</u>
4	<u>26.45</u>	<u>0.713</u>
5	20.39	<u>0.713</u>
6	<u>26.04</u>	<u>0.740</u>
7	22.55	0.695
8	23.84	0.698
9	23.37	<u>0.712</u>
10	<u>26.15</u>	0.649
11	24.21	0.688
12	24.76	0.662
13	24.35	0.682
14	19.64	0.621
15	20.56	0.632
16	22.17	0.644
17	23.74	0.672
18	20.74	0.671
19	23.11	0.655
20	20.16	0.674
21	20.13	0.656
22	23.18	0.675
23	21.42	0.675
24	21.56	0.630
25	23.14	0.676
26	22.51	0.676
27	20.06	0.658
28	19.40	0.675
29	23.71	0.639

[0102] 例1では、磁区細分化処理が行われなかった。例1では、溝形成線が設けられなかったので、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。

[0103] (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。

[0104] (溝深さが不適切な例)

例 3 では、溝の深さが不足していた。例 3 においては、低鉄損化が達成されなかった。例 4 では、溝の深さが過剰であった。例 4 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。

[0105] (溝幅が不適切な例)

例 5 では、溝の幅が不足していた。例 5 においては、低鉄損化が達成されなかった。例 6 では、溝の幅が過剰であった。例 6 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 領域における溝存在割合が不適切な例)

例 9 では、磁区制御処理線において溝を均一的に形成した。そして、例 9 では、第 1 領域及び第 2 領域の両方における溝存在割合が低い水準とされた。例 9 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 領域における溝存在割合が不適切な例)

例 10 では、磁区制御処理線において溝を均一的に形成した。そして、例 10 では、第 1 領域及び第 2 領域の両方における溝存在割合が高い水準とされた。例 10 においては、低鉄損化が達成されたが、騒音評価結果が悪化した。

[0108] 例 7、例 8、及び例 11～例 29 では、溝の形成を、 β 角が 1° 以下の箇所に対して優先的に行った。また、例 7、例 8、及び例 11～例 29 では、溝形成線における溝の形状も適切な範囲内とされた。例 7、例 8、及び例 11～例 29 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 領域の溝存在割合 $\geq$ 第 3 領域の溝存在割合 $\geq$ 第 2 領域の溝存在割合の関係が満たされた例においては、鉄損及び騒音が一層低減されていた。

符号の説明

- [0109] 3 0 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 方向性電磁鋼板
- 5 2 磁区制御処理線
- 9 0 溝形成線（ $5\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$ の深さ及び $10\ \mu\text{m} \sim 300\ \mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分）
- 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

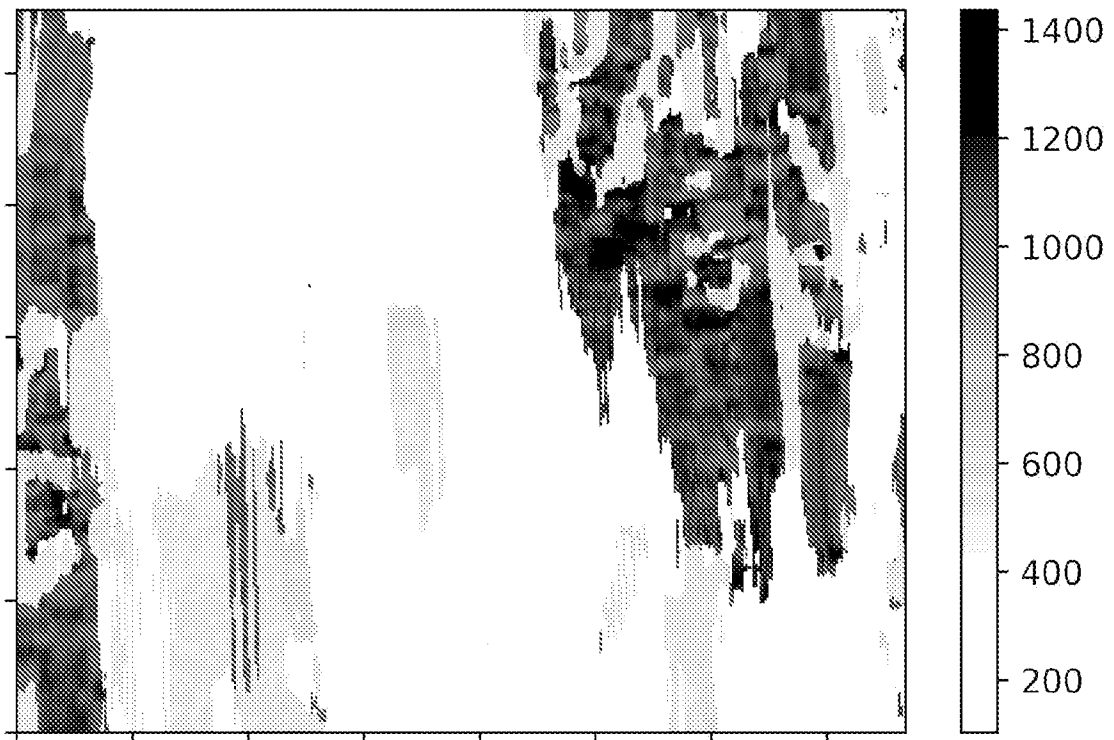
請求の範囲

- [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、 $5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ の幅を有する溝が存在する部分の占める割合である溝存在割合が、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、
前記溝存在割合が、前記 β 角が 2° 超の領域である第2領域では50%未満である、方向性電磁鋼板。
- [請求項2] 前記溝存在割合が、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領域の前記溝存在割合 $\geq$ 前記第3領域の前記溝存在割合 $\geq$ 前記第2領域の前記溝存在割合
である、請求項1に記載の方向性電磁鋼板。
- [請求項3] $5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ の幅を有する前記溝は、圧延方向に1～20mm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、 $5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ の深さ及び $10\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ の幅を有する溝を形成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溝を形成する溝形成ステップと、
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°

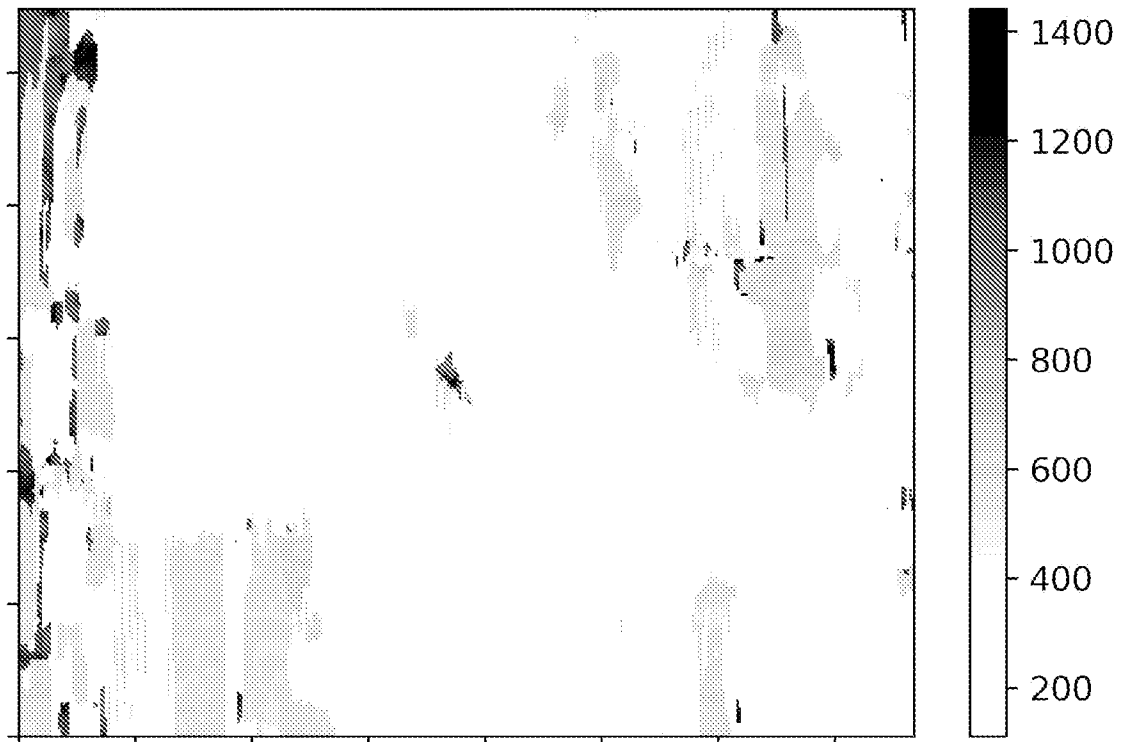
以下の箇所を、前記溝を形成する箇所として決定する、請求項 4 に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

[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磁区幅の空間分布を導出する、請求項 4 又は 5 に記載の方向性電磁鋼板の製造方法。

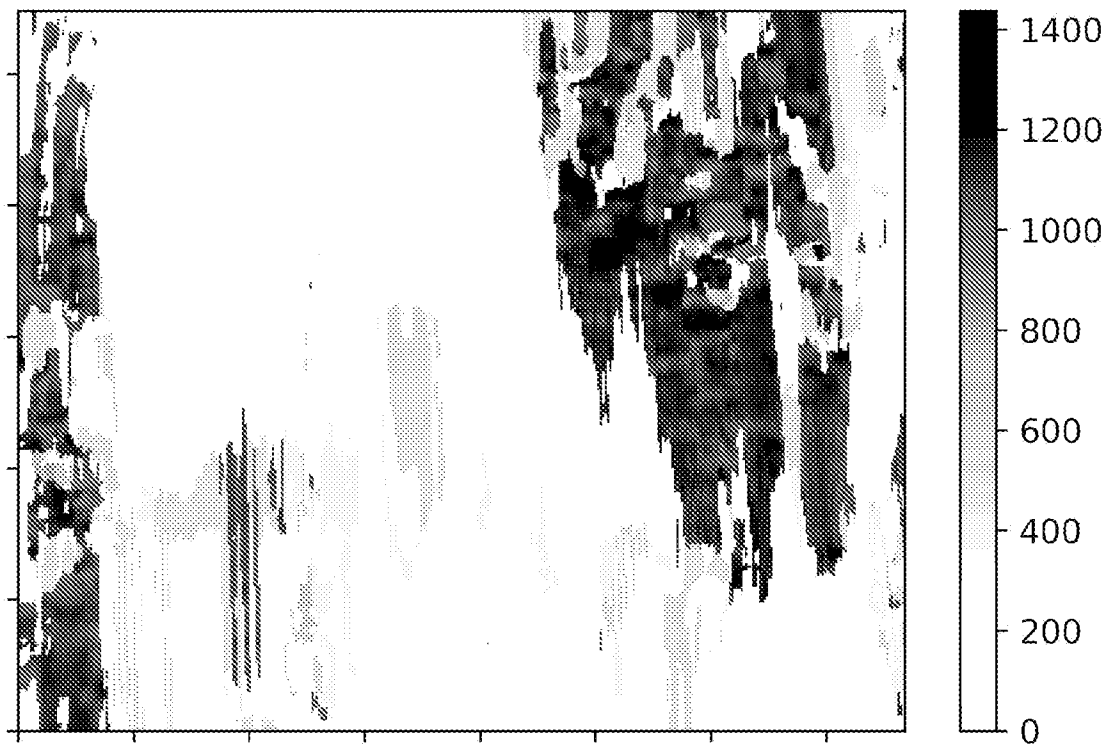
[図1A]



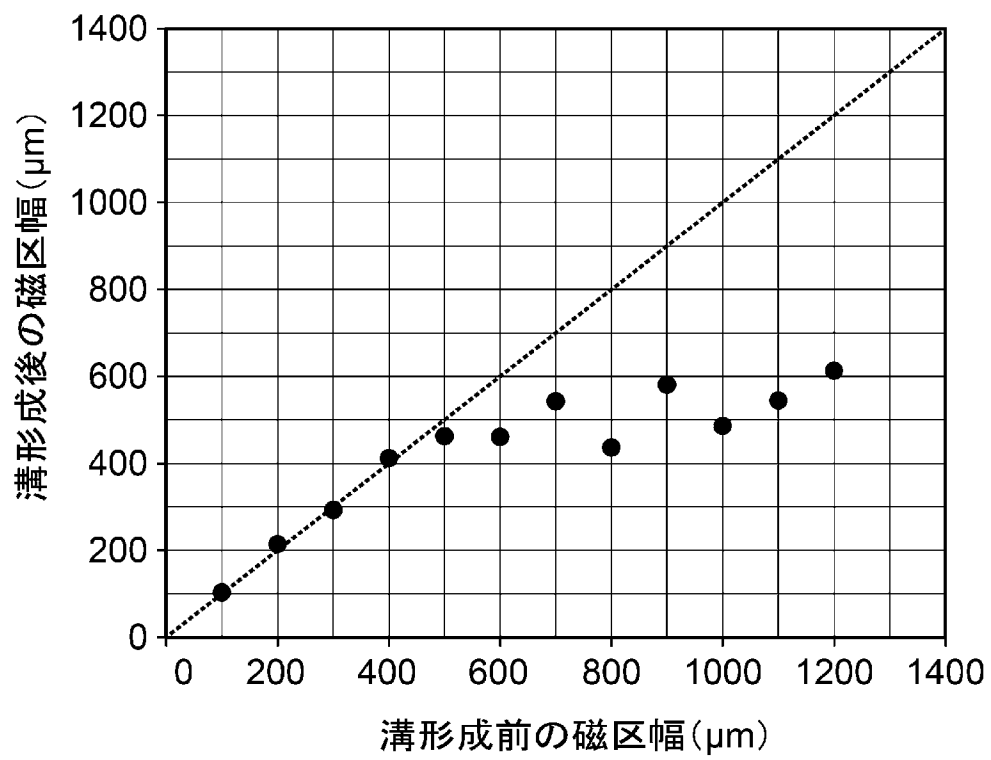
[図1B]



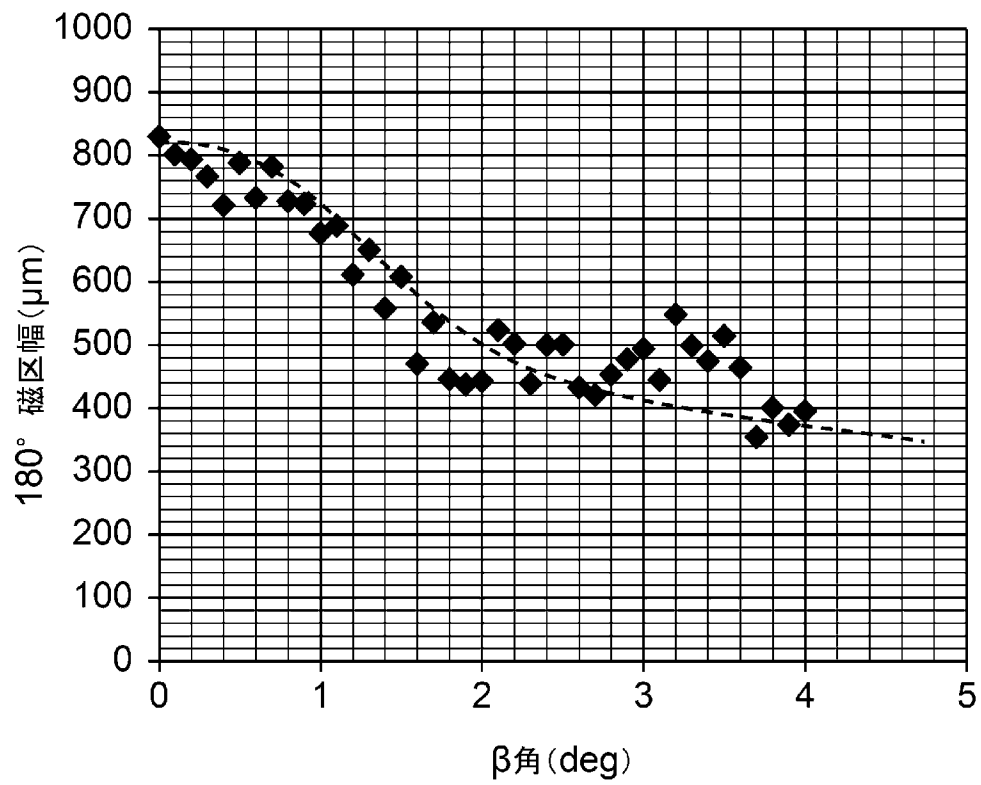
[図1C]



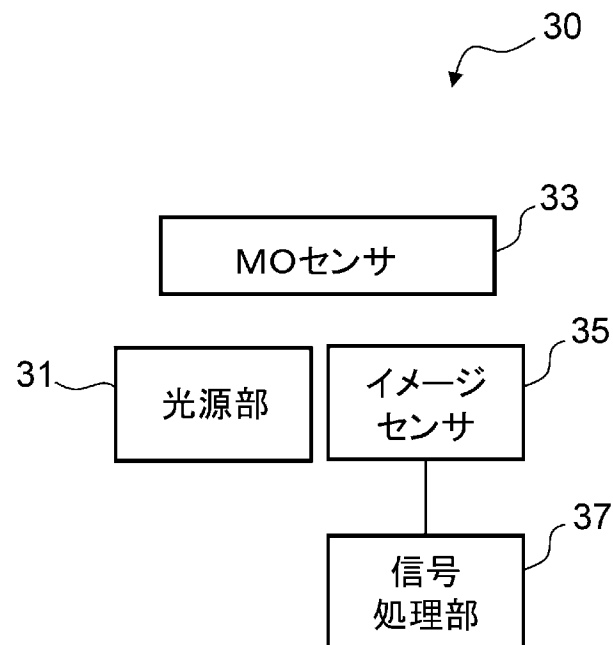
[図2A]



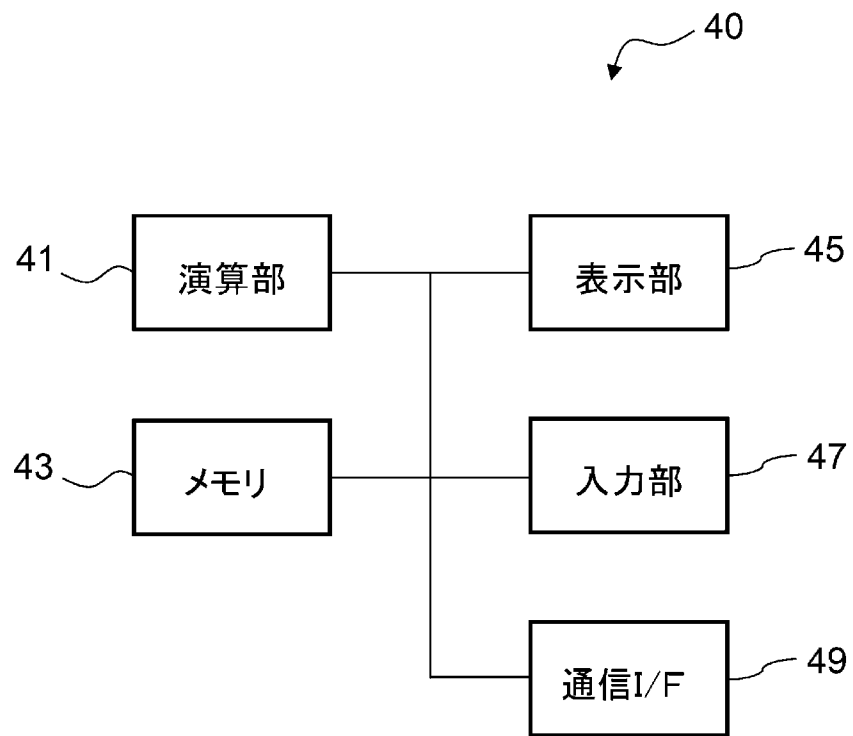
[図2B]



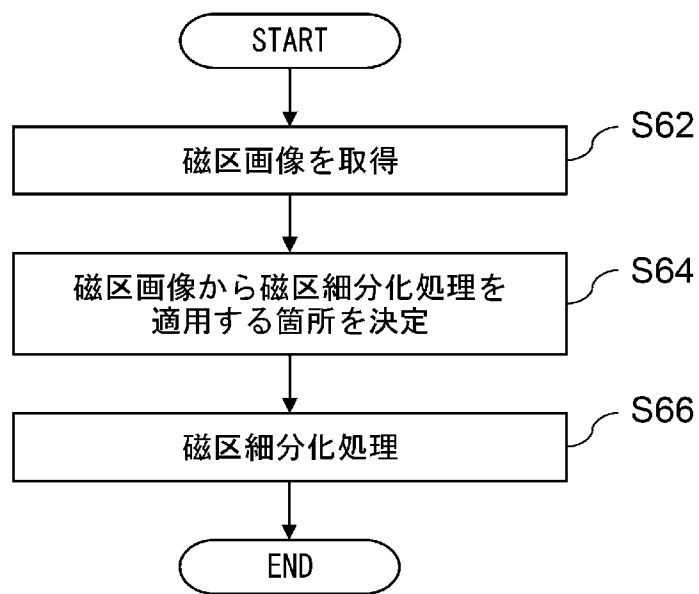
[図3]



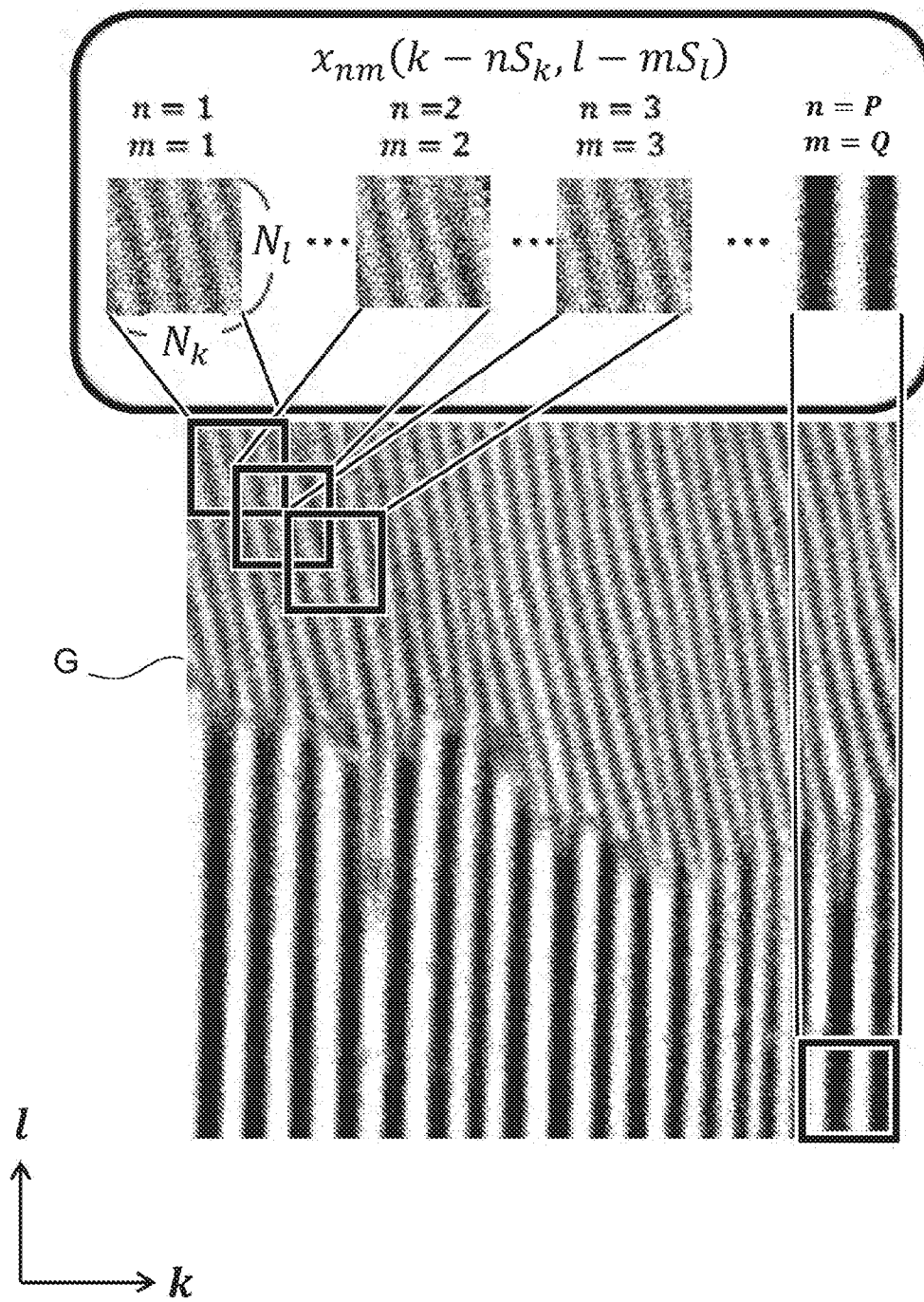
[図4]



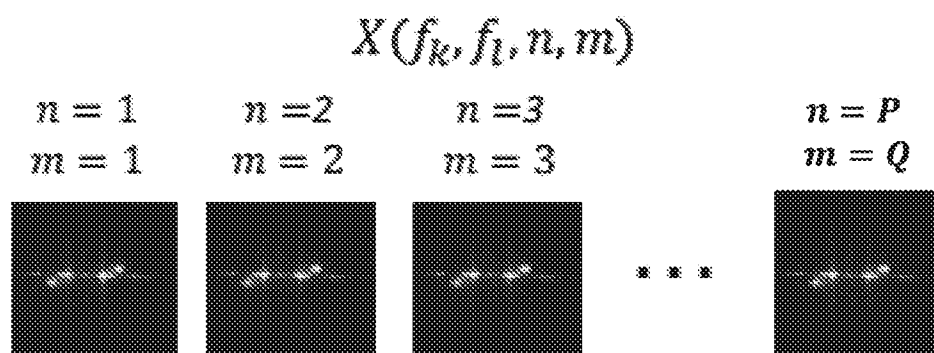
[図6]



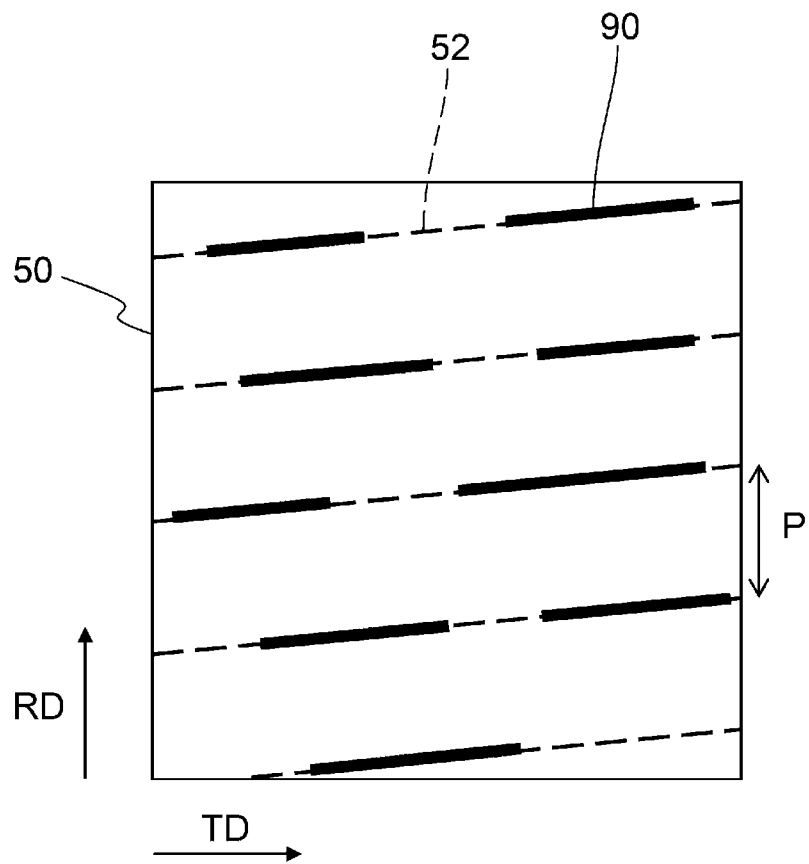
[図7]



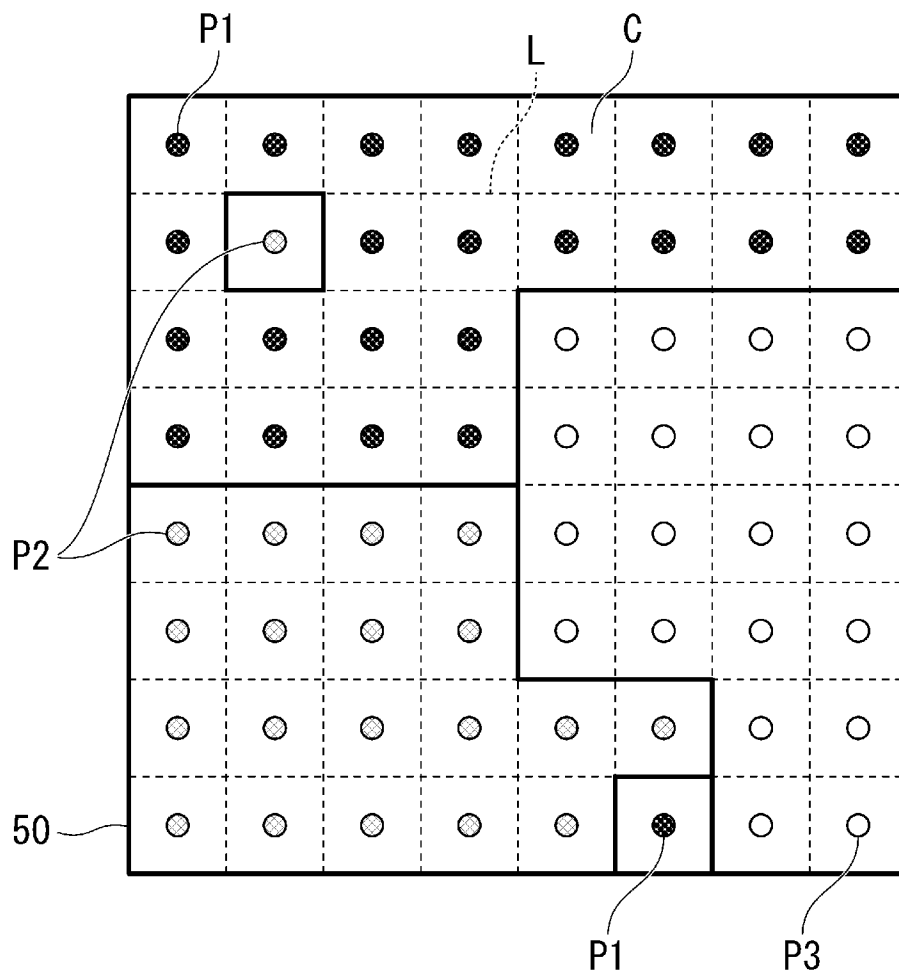
[図8]



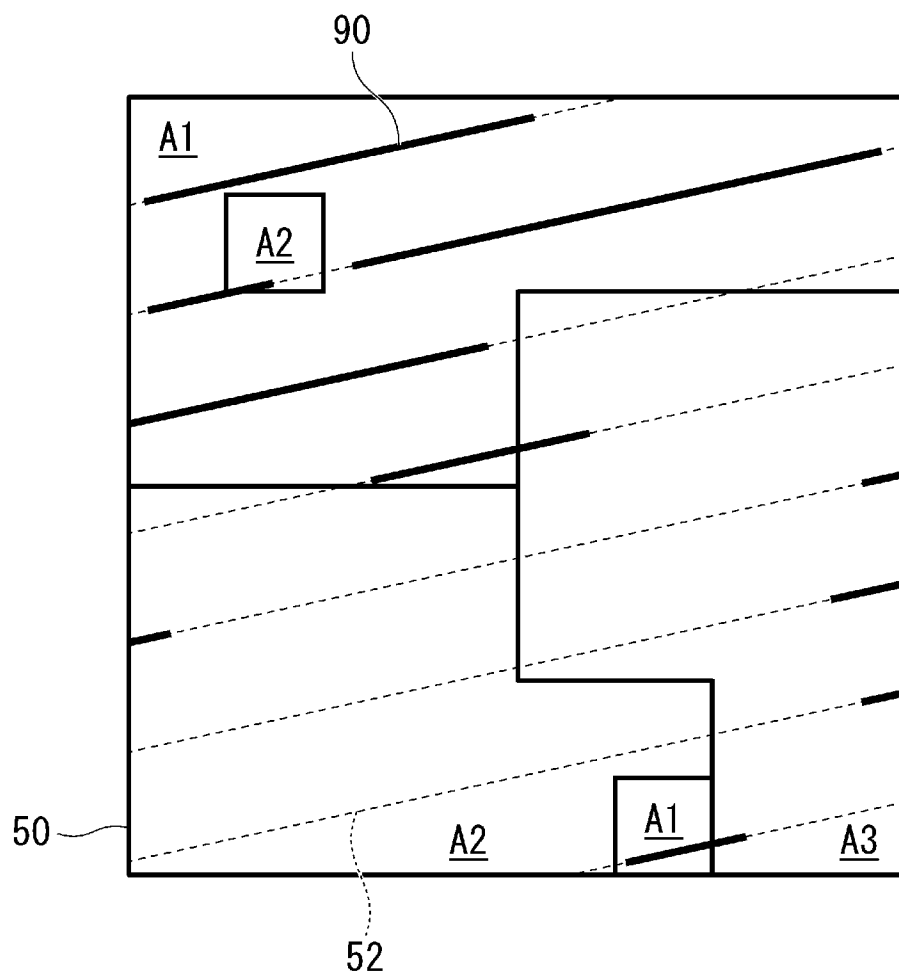
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/012183

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**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

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.
X	JP 11-293340 A (KAWASAKI STEEL CORP) 26 October 1999 (1999-10-26) claims, paragraphs [0004], [0007]-[0012], [0014], fig. 1	1-3
Y		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

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

12 June 2023

Date of mailing of the international search report

20 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/JP2023/012183

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	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 日本国公開実用新案公報 日本国実用新案登録公報 日本国登録実用新案公報 1922 - 1996年 1971 - 2023年 1996 - 2023年 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
X	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	1-3
Y		4-6
Y	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
A		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
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般の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 12.06.2023	国際調査報告の発送日 20.06.2023	
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
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/012183

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	11-293340	A	26.10.1999	(ファミリーなし)	
JP	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)	