(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
2024年8月22日(22.08.2024)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2024/172000 A1

(51) 国際特許分類:

C22C 38/00 (2006.01)	*G01N 23/2252* (2018.01)
C21D 8/12 (2006.01)	*H01F 1/147* (2006.01)
C21D 9/46 (2006.01)	*H01F 3/02* (2006.01)
C22C 22/00 (2006.01)	*H01F 7/20* (2006.01)
C22C 30/00 (2006.01)	*H01F 38/18* (2006.01)
C22C 38/02 (2006.01)	*H02K 1/02* (2006.01)
C22C 38/58 (2006.01)	*H02K 1/22* (2006.01)
C22C 38/60 (2006.01)	*H02K 1/276* (2022.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2024/004695

(22) 国際出願日： 2024年2月12日(12.02.2024)

(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：

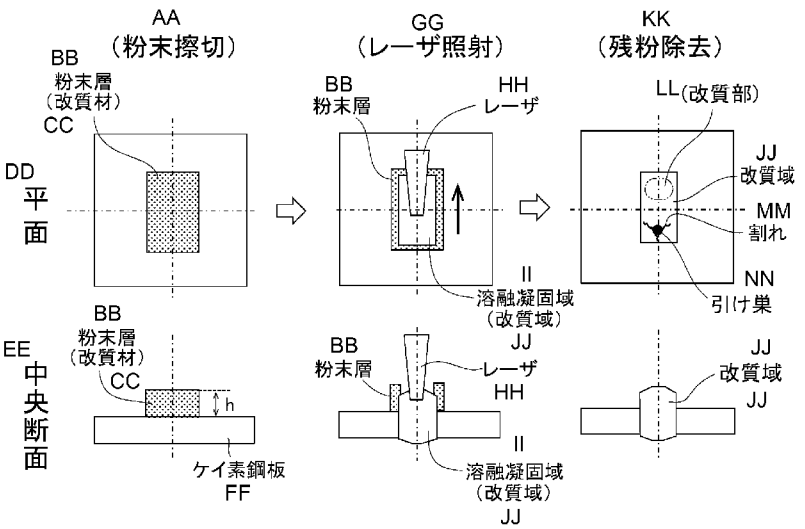
特願 2023-023033 2023年2月17日(17.02.2023) JP
特願 2023-023038 2023年2月17日(17.02.2023) JP
特願 2023-136916 2023年8月25日(25.08.2023) JP
特願 2023-136918 2023年8月25日(25.08.2023) JP

(71) 出願人: 愛知製鋼株式会社 (**AICHI STEEL CORPORATION**) [JP/JP]; 〒4768666 愛知県東海市荒尾町ワノ割１番地 Aichi (JP).

(72) 発明者: 濱田 典彦 (**HAMADA Norihiko**); 〒4768666 愛知県東海市荒尾町ワノ割１番地 愛知製鋼株式会社内 Aichi (JP). 及川勝成 (**OIKAWA Katsunari**); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目１番１号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 杉本諭 (**SUGIMOTO Satoshi**); 〒9808577 宮城県仙台

(54) **Title:** ELECTROMAGNETIC STEEL SHEET AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

(54) 発明の名称： 電磁鋼板およびその製造方法



AA Powder scraping
BB Powder layer
CC Modifier
DD Plane
EE Central cross section
FF Silicon steel sheet
GG Laser irradiation
HH Laser
II Melted and solidified area
JJ Modified area
KK Residual powder removal
LL Modified portion
MM Crack
NN Shrinkage cavity

(57) **Abstract:** Provided is an electromagnetic steel sheet having a modified portion in a part of a silicon steel sheet. The present invention pertains to a silicon steel sheet having, in a part thereof, a modified portion formed by melting and solidifying. The modified portion has a metal structure including an austenite phase and a compound phase. The compound phase may contain a B-based compound having a lower density than the austenite phase. Moreover, the preset invention pertains to a manufacturing method for an electromagnetic steel sheet, the manufacturing method comprising a

WO 2024/172000 A1

［続葉有］

市青葉区片平二丁目１番１号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP).

(74) 代理人：森岡 正往，外(**MORIOKA Masayuki** et al.)；〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅五丁目２３－１７ 名駅フォレストビル６階 ＳＡＮＳＵＩ国際特許事務所 Aichi (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, 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, 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)）

modifying step for irradiating, with high energy beams, a modifier disposed on a specific region of a silicon steel sheet to form a modified portion containing at least an austenite phase in a part of the silicon steel sheet. The modified portion may contain, for example, 0.15-3 mass% or 0.3-1.5 mass% of B.

(57) 要約：ケイ素鋼板の一部に改質部を有する電磁鋼板を提供する。本発明は、溶融凝固してできた改質部を一部に有するケイ素鋼板である。この改質部は、オーステナイト相と化合物相を含む金属組織を有する。その化合物相は、オーステナイト相よりも低密度なＢ系化合物を含むとよい。また本発明は、ケイ素鋼板の特定領域上に配置した改質材へ高エネルギービームを照射して、少なくともオーステナイト相を含む改質部をケイ素鋼板の一部に形成する改質工程を備える電磁鋼板の製造方法である。その改質部にはＢが、例えば、０．１５～３質量％さらには０．３～１．５質量％含まれるとよい。

明　細　書

発明の名称 ： 電磁鋼板およびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、改質部を有する電磁鋼板等に関する。

背景技術

[0002] 交番磁界中で使用される磁性部材の多くは、磁気回路の形成、渦電流損失（鉄損）の抑制、強度の確保等のため、所定形状に成形された電磁鋼板の積層体からなる。磁性部材のさらなる高性能化や低損失化（効率化）等を図るため、積層体の一部が非磁性（弱磁性、低磁性を含む。）にされることも多い。

[0003] 例えば、電動機（モータ、ジェネレータ）のロータやステータは、通常、所望形状に成形（打ち抜き、溶断等のトリミング）されたケイ素鋼板からなるコアシートを積層してなる。起磁源である永久磁石を収容するスロットの外周側にできる狭幅なブリッジ（連結部）は、改質により非磁性化されて、回転トルクに寄与しない無効な磁束の低減が図られる。

[0004] このような改質は、積層前または積層後のケイ素鋼板の金属組織（フェライト相）をオーステナイト相を含む金属組織へ変態させてなされ得る。これに関連する記載が、例えば、下記の特許文献にある。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開平４－２５９３８５　（特許第２６１６５０４号）
特許文献2：特開平６－７４１２４　（特許第２９８９９７７号）
特許文献3：特開２００８－３０８７１２
特許文献4：特開２０１１－６７４１
特許文献5：特開２０１１－１７１６１３（特許第５６２２０７４号）
特許文献6：特開２０１４－２１４３５１（特許第６２１２９２４号）
特許文献7：特開２０１５－２０１９９７（特許第６３５０９６４号）

特許文献8：ＷＯ２０２２／００４６７２

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 特許文献１は、磁気検出に用いるステンレス鋼製リング上に、合金粉末をレーザ光照射により溶融凝固させた肉盛層を形成して、領域毎に磁気特性を変化（改質）させている。改質に際して、３相（フェライト相、オーステナイト相、マルテンサイト相）の存在域を、Ｎｉ当量とＣｒ当量を軸とする座標上に示したシェフラー状態図が参考にされている。

[0007] 特許文献２は、ステンレス鋼からなる電磁アクチュエータ（燃料噴射弁）用固定鉄心にレーザ照射をして、フェライト相や加工誘起マルテンサイト相を非磁性なオーステナイト相へ変態させることを提案している。特許文献１や特許文献２には、ケイ素鋼板の改質に関する記載は一切ない。

[0008] 特許文献３は、Ｍｎ－Ｎｉ－Ｂ合金粉末とメチルセルロース水溶液を混合したペーストを所定域に塗布したケイ素鋼板を加熱炉で加熱（１１２０℃×２０分間）し、ケイ素鋼板の所定域を非磁性化している（特許文献３の実施例４）。緩慢な加熱により合金粉末をケイ素鋼板へ溶け込ませてできる金属組織は、合金粉末とケイ素鋼板を共に溶融させた後に凝固させてできる金属組織とは大きく異なる。

[0009] 特許文献４は、Ｎｉ－Ｃｒ粉末をテトラデカンに分散させたインクを電磁鋼板に印刷した後、乾燥後のインクへ電子ビーム照射する局所加熱（１５２０℃×１秒間）により、溶融合金化された非磁性領域を電磁鋼板上に形成している。特許文献４には、レーザ照射による局所加熱や、Ｂ添加による溶融合金化温度の低減に関する言及もあるが、それらに関する具体的な記載（例えばＢ量）は一切ない。

[0010] 特許文献５は、Ｆｅ－Ｃｒ－Ｃ系合金板（強磁性素材）から切り出して形成されたロータコアシートを外周側から高周波加熱して、外周側にある狭幅な連結部（ブリッジ）だけを非溶融のままオーステナイト主体の金属組織（弱磁性部）へ変態させることを提案している。特許文献５にも、ケイ素鋼板

の改質に関する記載は一切ない。

[0011] 特許文献６は、磁性体を非磁性体へ改質する加熱条件（入熱量）に関する提案をしている。特許文献６にも、ケイ素鋼板の改質に関する具体的な記載は一切ない。

[0012] 特許文献７、８には、ロータコアのブリッジに改質部を設ける旨の記載がある。特許文献７は、レーザ照射（加熱）により電磁鋼板の透磁率を部分的に低下させているに過ぎない。特許文献８は、ケイ素鋼板（母材）と改質材（ニッケル、クロム等）とをレーザ溶融して、オーステナイト相からなる改質部を形成している。しかし、その改質部の組織構造や成分組成等に関する具体的な記載は特許文献８にない。

[0013] 本発明はこのような事情に鑑みて為されたものであり、ケイ素鋼板の一部に改質部を設けた新たな電磁鋼板またはその製造方法等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

[0014] 本発明者は鋭意研究した結果、ケイ素鋼板の一部に設けた改質部が、特定の成分組成（Ｂ量）や金属組織を有するとき、歩留まりよく所望特性の電磁鋼板が得られた。この成果を発展させることにより、以降に述べる本発明を完成するに至った。

[0015] 《電磁鋼板》

本発明は、少なくともオーステナイト相を含む改質部を、一部に有するケイ素鋼板からなり、該改質部全体に対してＢが０．１５～３質量％含まれる電磁鋼板である。

[0016] このような改質部は、例えば、オーステナイト相と化合物相を含む金属組織を有し、該化合物相は、Ｂを含むＢ系化合物を含み、該Ｂ系化合物は、該オーステナイト相よりも低密度となる。

[0017] ケイ素鋼板の一部を溶融凝固させて改質する場合なら、上述した改質部の形成領域（改質域）における割れまたは引け巣等の発生が抑止される。これにより、改質部の形態自由度の拡大、改質域の設定自由度の拡大またはケイ

素鋼板の歩留まり向上等が図られ得る。オーステナイト相に加えて、化合物相も非磁性であるとよい。

[0018] 特に断らない限り、本明細書でいう「ケイ素鋼板」は、素材、基材または母材を意味し、その形態や、処理または加工の有無等を問わない。また「電磁鋼板」は、少なくとも一部が改質（処理）されたケイ素鋼板、または少なくとも一部に改質部を有するケイ素鋼板を意味する。このような電磁鋼板は、成形等の加工前の状態でも、その加工後の状態でもよい。改質と加工の先後は問わない。

[0019] 《電磁鋼板の製造方法》

本発明は、電磁鋼板の製造方法としても把握でき、ケイ素鋼板の特定領域上に配置した改質材へ高エネルギービームを照射して、該ケイ素鋼板の一部に改質部を形成する改質工程を備え、所望の電磁鋼板を得る製造方法でもよい。

[0020] この改質工程により、例えば、少なくともオーステナイト相を含む改質部が該ケイ素鋼板の一部に形成される。改質部の全体に対してＢが０．１５～３質量％含まれる場合、例えば、改質処理する領域（改質域）の縮小化、ケイ素鋼板の歩留まり向上（除去加工域の自由度拡大）、改質部の形態自由度の拡大または電磁鋼板に生じる歪みや凹凸の抑制等を図ることもできる。

[0021] 《磁性部材と電磁機器》

（１）本発明は、電磁鋼板を用いた磁性部材や電磁機器としても把握される。例えば、本発明は、上述した改質部を一部に有するケイ素鋼板からなるコアシートでもよい。コアシートは、その形態を問わず、改質部が形成されたケイ素鋼板であれば、トリミング（例えば打抜き）等の加工前でも、その加工後（積層可能な形態）でもよい。

[0022] （２）本発明は、電磁鋼板（コアシート等）を積層した部材や、それを用いた装置としても把握される。例えば、本発明は、複数の電磁鋼板を積層したコア（磁心）でもよい。コアは、例えば、電動機を構成するロータコアおよび／またはステータコアである。また本発明は、そのようなロータコアやス

テータコアと、永久磁石や電磁コイル（アーマチャ）とを組み合わせたロータやステータでもよい。このような一例として、ロータコアの磁石孔に永久磁石が埋め込まれた磁石内包型ロータ（例えばＩＰＭ用ロータ）がある。

[0023] さらに本発明は、上述した電磁鋼板（コアシート）からなるロータおよび／またはステータを備えた電動機（発電機を含む）でもよい。

[0024] 《その他》

（１）本明細書でいう「非磁性」は、母材であるケイ素鋼板よりも磁化され難いこと（磁束を通し難いこと）を意味する。その具体的な程度は問わず、「弱磁性」または「低磁性」も含めて「非磁性」という。このような非磁性な領域（非磁性域）をケイ素鋼板の一部に形成することを、本明細書では「改質」または「非磁性化」という。

[0025] 非磁性に改質された領域（改質域）は、母材であるケイ素鋼板に対して、（初）透磁率の低下、飽和磁束密度の低下、磁気抵抗の増大等により判断される。改質域の一部または全部である改質部には、通常、ケイ素鋼板のフェライト相が変態してできたオーステナイト相が含まれる。改質部の全体がオーステナイト相でもよいし、改質部の一部にそれ以外の他相（フェライト相、マルテンサイト相、化合物相等）が含まれてもよい。

[0026] （２）特に断らない限り本明細書でいう「ｘ～ｙ」は下限値ｘおよび上限値ｙを含む。本明細書に記載した種々の数値または数値範囲に含まれる任意の数値を新たな下限値または上限値として「ａ～ｂ」のような範囲を新設し得る。また、特に断らない限り、本明細書でいう「ｘ～ｙμｍ」はｘμｍ～ｙμｍを意味する。他の単位系（ｍｍ等）についても同様である。

図面の簡単な説明

[0027] [図1A]ロータコアシートとステータコアシートをケイ素鋼板から分取する一例を示す想定図である。

[図1B]そのケイ素鋼板に施す改質工程例を示す模式図である。

[図1C]他の改質域（改質部）を示す模式図である。

[図2]実施例に係る改質工程を示す模式図である。

[図3]その改質工程で得られた試料の表面観察写真である。

[図4A]試料１のＢ系化合物を観察したＴＥＭ像とＸＲＤの回折パターンである。

[図4B]試料２のＢ系化合物を観察したＴＥＭ像とＸＲＤの回折パターンである。

[図4C]試料３のＢ系化合物を観察したＴＥＭ像とＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭ像である。

[図5]シェフラーの状態図（組織図）である。

[図6A]その改質工程で得られた試料の表面観察写真である。

[図6B]その改質工程で得られた他の試料の表面観察写真である。

[図7]改質域に形成した圧痕を顕微鏡で観察した写真である。

発明を実施するための形態

[0028] 本明細書中に記載した事項から任意に選択した一つまたは二つ以上の構成要素を上述した本発明の構成に付加し得る。方法に関する構成要素も物（電磁鋼板、コアシート等）に関する構成要素となり得る。いずれの実施形態が最良であるか否かは、対象、要求性能等によって異なる。

[0029] 《本発明の経緯と機序》

本発明の完成に至った経緯と、特定の成分組成（Ｂ量）や金属組織を有する電磁鋼板が優れた効果を発現する機序は次のように考えられる。

[0030] （１）経緯

ケイ素鋼板は、通常、所望形状に成形（打ち抜き等のトリミング）されるため、多かれ少なかれ除去される部分（除去域）が生じる。改質により欠陥（引け巣、割れ等）が生じても、その欠陥を包括する領域（欠陥域）が除去域内にある限り、基本的に電磁鋼板自体の不良とはならず、その品質は確保され得る。

[0031] もっとも、欠陥域が拡大すると、所望の改質部の確保が困難になったり、健全な改質部を確保するために処理域（改質域）の余計な拡張が必要になる。その結果、改質部や除去域の形状制限やケイ素鋼板の歩留まり悪化等が生

じ得る。また、改質域の拡張は、ケイ素鋼板への入熱量の増加となり、電磁鋼板の歪み等の拡大、エネルギー消費量や加工時間の増加等が生じ得る。

[0032] （２）機序

改質域に所定量のＢが含まれるとき、改質に伴い生じ得る引け巣や割れ等の欠陥域が大幅に縮小されるが、現状、その理由は定かではない。一般的な鋳物に関していえば、引け巣（収縮空孔、収縮管、外ひけ等）は、液相が固相へ変化するとき（特に最終段階）の収縮（凝固収縮）に対する液相の補給不足に起因して生じる。（高温）割れは、引け巣と同様に液相の補給不足に起因して生じ、凝固した固相の固体収縮により発生する引張応力により成長する。しかし、このような一般論が、高エネルギービームの照射によりできた液相（湯溜り）が、その直後に急速凝固し得る本発明のような場合にまで、単純に当てはまる訳ではない。

[0033] ケイ素鋼板と改質材は、高エネルギービームの照射により瞬時に溶融して液相（溶湯）となり、その液相は周囲への抜熱により急冷凝固した固相となる。所定量のＢが、そのような凝固過程、ひいては凝固組織に及ぼす影響が非常に大きいと考えられる。つまりＢは、凝固過程で生じる凝固収縮域への液相（溶湯）の補充性の改善、凝固後の固体収縮に耐え得る高強度な金属組織の出現等に、大きく寄与していると考えられる。

[0034] 《金属組織》

（１）改質部は、溶融後に凝固してできた金属組織からなる。この金属組織は、オーステナイト相と化合物相を含む。オーステナイト相は、例えば、初晶でもよいし、共晶の一部でもよい。化合物相は、例えば、共晶の一部でもよいし、そうでなくてもよい。

[0035] 晶出または析出する化合物相は、溶融時の鉄合金組成や改質工程等に応じて、種類や量が変化し得る。溶融凝固時の引け巣を抑止する観点からいうなら、オーステナイト相よりも低密度であるとよい。低密度な化合物相は、オーステナイト相が晶出するときに生じる凝固収縮量を補って、引け巣の発生またはその粗大化を抑止し得る。

[0036] （２）このような化合物相として、例えば、Ｂ系化合物がある。Ｂ系化合物には、（Ｆｅ、Ｃｒ）$_2$Ｂ、Ｆｅ$_2$Ｂ、Ｃｒ$_5$Ｂ$_3$、Ｃｒ$_2$Ｂ、ＣｒＢ等がある。ちなみに、Ｂ系化合物中におけるＦｅとＣｒの峻別は容易ではない。Ｆｅ－Ｂ化合物とＣｒ－Ｂ系化合物が個別に形成されている場合もあれば、ＦｅとＣｒが混在または複合化してＢ化合物（（Ｆｅ、Ｃｒ）－Ｂ化合物）を形成している場合もあり得る。さらには、別な元素が取り込まれている場合もあり得る。

[0037] 化合物相は、そのようなＢ系化合物の一種以上を含めばよい。Ｂ系化合物の密度（比重）は、例えば、Ｆｅ$_2$Ｂ：７．３３ｇ／ｃｍ^3、Ｃｒ$_5$Ｂ$_3$：６．４６ｇ／ｃｍ^3、Ｃｒ$_2$Ｂ：６．５８ｇ／ｃｍ^3、ＣｒＢ：６．０７ｇ／ｃｍ^{3}である。なお、オーステナイト相の密度は、その成分組成により異なるが、７．８～７．９ｇ／ｃｍ^{3}程度である。

[0038] Ｂ系化合物は、金属組織全体に対する体積割合で、例えば、１～４５体積％（単に「％」という。）、２～４０％、６～３０％または１５～２５％含まれる。Ｂ系化合物が過少では、改質域に引け巣が生じ易くなる。Ｂ系化合物が過多になると、改質部の脆化や硬質化により、電磁鋼板の加工性や積層性等が低下し得る。

[0039] Ｂ系化合物の体積割合は、例えば、次のようにして求められる。改質部から採取した試料の体積と質量を測定し、その密度（ρ）を求める。Ｘ線回折分析（ＸＲＤ）、電子プローブマイクロアナライザー（ＥＰＭＡ）、エネルギー分散型線分光分析（ＥＤＳ、ＥＤＸ）等により、試料に含まれるＢ系化合物の種類やオーステナイト相（母相）の種類を特定する。これにより、オーステナイト相の密度（ρａ）とＢ系化合物の密度（ρｂ）が、既知のデータベースから求まる。あるＢ系化合物の体積割合をｘ（０＜ｘ＜１）とすると、ρ＝（１－ｘ）ρａ＋ｘρｂを解いて、そのＢ系化合物の体積割合（１００ｘ（％））が求まる。

[0040] 金属組織中に複数種の化合物が含まれる場合は次のように考えるとよい。例えば、上記のＢ系化合物に加えて２種目の化合物（別なＢ系化合物等）が

含まれるときなら、その密度：ρｃ、その体積割合：ｙ（０＜ｙ＜１）として、ρ＝（１－ｘ－ｙ）ρａ＋ｘρｂ＋ｙρｃと表現される。但し、変数の増加に伴い、別な測定が必要になる。

[0041] 例えば、観察した断面組織に基づいて、初晶となるオーステナイト相と共晶の割合を測定する。断面組織は、金属顕微鏡やＳＥＭにより観察される。さらに、ＳＥＭ、ＥＤＳ、ＥＰＭＡ、ＴＥＭ、ＳＴＥＭなどの観察結果から、共晶中におけるオーステナイト相と複数種の化合物相との面積割合を測定する。各相の面積割合を体積割合へ換算すれば、実質的にｘ、ｙを求めることができる。その他、共晶組織にある複数種の化合物は、ＸＲＤ、ＳＡＤ分析、ＳＴＥＭ像解析などで同定すれば、それらの密度も既知のデータベースから求まる。このような密度の特定により、一部の化合物相の面積割合の測定を回避（代替）することもできる。

[0042] （３）改質部に含まれるＢ系化合物の具体的な態様（種類数、成分組成、形状等）は問わない。一例として、Ｂ系化合物は、例えば、少なくとも二種以上の化合物が交互に形成された複化合物でもよい。複化合物を構成する化合物（「構成化合物」という。）は、例えば、Fe_2B、Cr_2B、ＦｅＣｒＢ、Cr_5B_3、ＣｒＢ等の二種以上である。交互に現れる各化合物の形態は粒状でも層状でもよい。層状な構成化合物が交互に出現する場合、複化合物は積層状となる。その具体例として、例えば、Fe_2B層とCr_2B層が交互に積層された複化合物がある。顕微鏡写真から観察される各層の厚さは、例えば、１～２０ｎｍ、２～１０ｎｍまたは３～５ｎｍである。

[0043] 《ケイ素鋼板》

ケイ素鋼板は、ケイ素鋼からなる（薄）板材である。ケイ素鋼は、その全体に対してＳｉを１～７％、２～４％または２．５～３．５％を含む鉄合金である。本明細書でいう化学成分は、特に断らない限り、その対象全体に対する質量割合（質量％）であり、単に「％」で示す。

[0044] 軟磁性であるケイ素鋼は、通常、Ｓｉと残部であるＦｅおよび（不可避）不純物とからなるが、Ｃ、Ｍｎ、Ｐ、Ｓ、Ｎｉ、Ａｌ、Ｃｒ、Ｃａ、Ｍｇ等

の合金元素が含まれてもよい。それらの合計は、例えば、６％以下さらには３％以下である。なお、本明細書では、Ｃの有無を問わず、Ｓｉを含む鉄合金も「鋼」という。

[0045] ケイ素鋼板の具体的な磁気特性（透磁率、飽和磁化等）、組織、厚さ等は、適宜選択され得る。代表的なケイ素鋼板は、例えば、ｂｃｃ結晶構造（フェライト相）からなり、その厚さは、例えば、０．１～１．０ｍｍさらには０．１５～０．７ｍｍである。薄過ぎると、積層数の増加（コスト増加）、改質部の強度低下、ビームの照射条件の狭小化等が生じ得る。厚過ぎると、鉄損の増加、改質工程による歪みの増加等が生じ得る。

[0046] ケイ素鋼板は、無方向性でも方向性でもよい。電動機（発電機を含む／単に「モータ」という。）には、例えば、無方向性ケイ素鋼板が用いられる。変圧器（トランス）等には、例えば、方向性ケイ素鋼板が用いられる。ケイ素鋼板は、少なくとも一方の表面が絶縁被覆されていてもよい。改質工程後に絶縁被覆（絶縁膜形成）を行なうなら、改質工程前のケイ素鋼板における絶縁被覆は無くてもよい。

[0047] 《改質部》

（１）改質部は、ケイ素鋼を基材（母材、原料）とする鉄合金（適宜「改質合金」という。）からなる。その合金元素として、Ｓｉの他、Ｂ、Ａｌ等がある。その他、非磁性相となるオーステナイト相を安定的に生成させる合金元素が適量含まれてもよい。

[0048] （２）合金元素の成分組成は、例えば、シェフラーの状態図（組織図）上でオーステナイト相を形成する領域に基づいて特定または調整され得る。シェフラーの状態図は、下記に示すＣｒ当量（横軸）とＮｉ当量（縦軸）を基軸として、鉄合金に現れる金属組織（Ｆ：フェライト相、Ａ：オーステナイト相、Ｍ：マルテンサイト）を示している（図５参照）。

Ｎｉ当量（Ｎｉｅｑ）＝［Ｎｉ］＋３０［Ｃ］＋０．５［Ｍｎ］

Ｃｒ当量（Ｃｒｅｑ）＝［Ｃｒ］＋［Ｍｏ］＋１．５［Ｓｉ］＋０．５［Ｎｂ］

（［Ｘ］は、鉄合金中に含まれる合金元素Ｘの含有量（質量％）を示す。）

[0049] シェフラーの状態図に基づけば、下式（１）、（２）を共に満たす領域内（図５のハッチング域）にある成分組成の鉄合金は、主にオーステナイト相からなり、非磁性（弱磁性）を発現し得る。

０．７８Ｃｒｅｑ＋Ｎｉｅｑ≧２５．５０　　（１）

１．２０Ｃｒｅｑ－Ｎｉｅｑ≦８．４３　　（２）

[0050] シェフラーの状態図からもわかるように、オーステナイト相の形成または安定化に寄与する合金元素として、例えば、Ｎｉ、Ｃｒ、Ｓｉ、Ｍｎ、Ｃ、Ｍｏ、Ｎｂ等がある。ここでは、代表的なＮｉ、Ｃｒ、Ｓｉ、Ｍｎについて、それらの組成範囲を例示する。各元素の化学成分は、改質合金全体に対する質量割合であり単に「％」で表記する。

[0051] Ｎｉは、例えば、１０～３０％、１３～２７％、１５～２５％または１７～２３％含まれる。Ｃｒは、例えば、８～２８％、１３～２４％、１５～２２％または１７～２０％含まれる。ＮｉやＣｒが過少ではオーステナイト相が減少し、それらが過多では原料コストが増加する。

[0052] Ｓｉは、例えば、１～５％、１．３～４％または１．５～３％含まれる。Ｓｉは、Ｃｒ当量式からわかるように、Ｃｒの代替となる。過多なＳｉは改質部を硬質化または脆化させる。Ｓｉの下限値は母材であるケイ素鋼板の化学組成に依存する。

[0053] Ｍｎは、例えば、２０～６０％、２６～５４％、３０～５０％または３４～４６％含まれる。Ｍｎは、Ｎｉ当量式からわかるように、Ｎｉの代替となる。Ｍｎは改質域の割れを抑制し得るが、過少ではその効果が乏しい。Ｍｎは液相で蒸発しやすいため、過多なＭｎは改質部の成分が変動し易くなる。

[0054] （３）Ｂは、引け巣や高温割れ（クラック）等が改質域で発生することを抑止し得る。Ｂは、改質合金全体に対して、例えば、０．１～３％、０．１５～２．５％、０．２～２％、０．３～１．５％、０．４～１．３％または０．５～１．１％含まれる。Ｂが過少では上述した効果が乏しく、Ｂが過多で

は脆化、硬質化、原料コスト増加等を招く。Ｂが過多になると、加圧時（例えば電磁鋼板の積層時）や高荷重作用時などに、脆化に依るクラックが改質部に生じ易くなる。

[0055] 改質合金は、さらにＡｌを適量含んでもよい。これにより改質域における欠陥（特に割れ）の発生をさらに抑止し得る。Ａｌは、改質合金全体に対して、例えば、０．５～５％、１～４％、１．５～３．５％または２～３％含まれる。Ａｌは過少では、その効果が乏しく、Ａｌが過多では硬質化や非磁性の低下を招く。

[0056] （４）改質合金の化学成分は、例えば、欠陥域を除いた改質域（改質部）の略中央付近から採取したサンプルを分析して特定される。Ｂは、例えば、電子プローブマイクロアナライザー（ＥＰＭＡ）により分析される。その他の元素は、例えば、エネルギー分散型分光装置（ＥＤＳ）により分析される。改質部に含まれるオーステナイト相の有無または割合は、Ｘ線回折装置（ＸＲＤ）または電子後方散乱回折装置（ＥＢＳＤ）により分析される。

[0057] 《改質工程》

改質工程は、例えば、ケイ素鋼板の特定領域上に配置した改質材へ高エネルギービーム（単に「ビーム」ともいう。）を照射してなされる。改質工程により、ケイ素鋼板の一部に、少なくともオーステナイト相を含む改質部が形成され得る。

[0058] （１）改質材

改質材と母材であるケイ素鋼板とが溶融混合後に冷却凝固されて、上述した化学成分の改質合金ができる。改質材は、例えば、粉末、インク（ペースト、スラリー）、シート（フィルム）等として、ケイ素鋼板の特定領域に供給される。

[0059] 粉末は、例えば、擦切り等によりケイ素鋼板上に供給される。粉末の擦切りは、ケイ素鋼板上に載置した型枠やケイ素鋼板上に形成した窪み（凹部）等を利用してなされる。インク（スラリー）は、例えば、スクリーン印刷、インクジェット印刷等によりケイ素鋼板上に塗布される。シート（フィルム

）は、例えば、予め所望形状に成形（型抜き等）された状態でケイ素鋼板上に貼着される。

[0060] 粉末のみからなる改質材（「改質粉末」という。）は、溶媒、分散媒、結合剤等を含まず、改質合金の成分組成を調整し易い。改質粉末は、単種でも複数種（混合粉末）でもよい。改質粉末を構成する原料粉末は、単元素粉末（Ｎｉ粉末、Ｃｒ粉末、Ｂ粉末、ＡｌＩ粉末、Ｍｎ粉末等）、合金粉末（ＮｉＣｒ系粉末、ＦｅＢ系粉末、ＦｅＡｌＩ系粉末、ＦｅＭｎ系粉末等）、化合物（金属間化合物を含む）の粉末（Fe_2B粉末、$FeAlI_3$粉末等）等のいずれでもよい。

[0061] 改質材の成分組成や改質材のケイ素鋼板上への供給量は、改質合金の所望組成およびケイ素鋼板（母材）の化学組成と板厚を考慮して調整される。なお、ケイ素鋼板上に改質粉末を層状に形成する場合、その厚さ（高さ）は、例えば、０．１～１．４ｍｍ、０．２～１．０ｍｍまたは０．３～０．８ｍｍ程度とするとよい。その厚さが過小でも過大でも、改質合金の非磁性化が低下し得る。ちなみに、ケイ素鋼板の板厚は、通常、０．１５～０．７ｍｍ程度である。

[0062] （２）高エネルギービーム

高エネルギービームは、例えば、エネルギー密度（フルエンス）が大きいレーザや電子ビームである。レーザは、種類（増幅媒質、励起源、光共振器等）、出力、エネルギー密度、照射エリア、オーバーラップ率等が適宜、選択・調整される。レーザは、連続波レーザでもパルスレーザでもよい。レーザの一例として、増幅媒質に光ファイバー（例えば、コアに希土類元素をドープしたダブルクラッドファイバー）を用いたファイバーレーザ（固体レーザの一種）がある。ファイバーレーザは、例えば、半導体レーザ（ＬＤ）を励起源として、入射側の光反射ミラーと出力側の低反射ミラーとを光共振器として備える。

[0063] ビームの照射範囲や照射軌跡は、所望する改質部の形態に応じて調整され得る。必ずしも、ケイ素鋼板上に配置した改質材全体を溶融させなくてもよ

い。残存した改質材は、ビーム照射後に除去されてもよい。ビームを照射する軌跡の端点（始点や終点）は、ケイ素鋼板の除去域に設定（配置）されるとよい。その端点付近では、ケイ素鋼板と改質材の溶融混合が不安定となり、欠陥ができ易い。

[0064] 《他工程》

（１）ビームの照射痕（適宜「ビード」という。）が、ケイ素鋼板の基面（非改質表面）から盛り上がっているとき、それを基面以下（平坦状態でも、さらに窪んだ状態でもよい。）にする整形工程を行なってもよい。整形工程は、改質工程の直後になされてもよいし、後述する積層工程の際に併せてなされてもよい。整形工程は、ビーム照射により生じたケイ素鋼板の熱歪み等の除去を兼ねてもよい。

[0065] （２）ビーム照射された表面付近は絶縁処理がなされてもよい。絶縁処理は、例えば、絶縁樹脂塗布、化成処理（例えばリン酸塩処理）等である。絶縁処理工程は、積層時の対面間に絶縁空間を形成する加工工程でもよい。加工工程は、上述した整形工程を兼ねてもよい。

[0066] （３）ケイ素鋼板から所望形状の電磁鋼板（シート）を得る成形工程と改質工程の前後関係は問わない。改質工程後に、成形工程がなされると効率的である。成形工程は、例えば、プレスによる打抜き加工、レーザ等による切断（分割、分断等）加工などの分離工程（トリミング）である。成形工程と上述した整形工程および／または絶縁処理工程との前後関係も問わない。成形工程後に仕上処理等がなされてもよい。

[0067] （４）改質部を有し所望形状に成形されたケイ素鋼板（電磁鋼板）は、積み重ねられて積層体となる（積層工程）。複数の電磁鋼板の固定は、プレス加工等によるかしめ、溶接、接着等によりなされる。積層体は、寸法精度を確保するために、仕上加工等が別途なされてもよい。

[0068] 《具体例》

（１）電磁鋼板の用途例としてコアシートがある。コアシートは、例えば、電動機（発電機を含む。）のロータコアシートやステータコアシートである

。ロータコアシートの積層体がロータコアとなり、ステータコアシートの積層体がステータコアとなる。

[0069] （２）一枚のケイ素鋼板または電磁鋼板から、ロータコアシートとステータコアシートを分取すると、ケイ素鋼板の歩留まり向上が図れる。このような具体例について以下説明する。

[0070] 図１Ａに示すように、１枚のケイ素鋼板Ｍから、ロータコアシート１とステータコアシート２を打抜く場合を考える。ロータコアシート１とステータコアシート２は、磁石埋込型同期機（「ＩＰＭモータ」という。）のロータコア（積層体／図略）とステータコア（積層体／図略）の製造に用いられる。説明の便宜上、適宜、ケイ素鋼板Ｍの打抜き前の各部（二点鎖線で示す仮想部分）とケイ素鋼板Ｍの打抜き後の各部（実線で示す実部分）には、各図において同符号を付した。なお、図１Ａの全体図は、表示の都合上、仮想部分も実線になっている。

[0071] ロータコアシート１は８磁極用である。Ａ部拡大図に示すように、その１磁極あたり、ボンド磁石を一体成形する略Ｕ文字状のスロット１０１、１０２と、それらの外周端側にブリッジ１１１、１１２（連結部）との形成が予定されている。スロット１０１、１０２（スロット域）と軸穴１０は打抜き（トリミング）により除去され得る領域（除去予定域）であり、ブリッジ１１１、１１２（ブリッジ域）は打抜き（トリミング）後も残存し得る領域（残存予定域）である。改質工程は打抜き前のブリッジ域を含む領域（改質域）に施される。打抜き後にできる各ブリッジ（１１１、１１２等）の全域またはその一部が改質部とされる。打抜き後にできる改質部は、通常、改質域の一部である。

[0072] ステータコアシート２は４８極用である。その１極あたり、櫛歯状のティース２１１、２１２と、それらの両側にあるスロット２０１、２０２、２０３との形成が予定されている。打抜き前のスロット２０１、２０２、２０３（スロット域）は除去予定域、ティース２１１、２１２（ティース域）とヨーク２１は残存予定域となる。便宜上、ロータコアシート１やステータコア

シート２の各部に関する説明は、適宜抽出した一部のみについて行い、周方向に繰返し現れる他部の説明は省略した。

[0073] （３）打抜き前のケイ素鋼板Ｍに対して、ブリッジ１１１、１１２となる予定域の一部を非磁性化する改質工程の概要を図１Ｂに示した。先ず、その予定域およびその周辺に改質材３１１、３１２を設ける（工程Ｉ）。改質材３１１、３１２は、例えば、ＣｒＮｉ合金粉とＦｅＢ粉末の混合粉末を擦切りして形成した粉末層である。

[0074] 改質材３１１、３１２上からビーム照射する。ビーム照射は、ロータ側のスロット１０１、１０２となる予定域にある始点ｐ０から、ステータ側のスロット２０１、２０２、２０３となる予定域付近にある終点ｐ１まで、ブリッジ１１１、１１２となる予定域を通過する軌跡ｔ（特定軌跡）に沿って、ビーム中心を走査させる（工程II）。これにより、ビーム照射域には、ケイ素鋼板Ｍと改質材３１１、３１２が溶融混合および冷却凝固してできたビードｂ（ビーム照射痕／改質域）が形成される。

[0075] ここで、ビーム照射の軌跡ｔは、ブリッジ１１１、１１２を略半径方向に貫くビードｂが少なくとも一つできるように設定した。また、ブリッジ１１１、１１２にできるビードｂが、打抜き時の隙間ｃを越えてステータコアシート２側に及ばないように、その軌跡ｔを設定した。なお、ビーム照射は、ケイ素鋼板Ｍの両面側（表面側と裏面側）から行ってもよい。もっとも、ケイ素鋼板Ｍの一面側からビーム照射を行うだけでも、ケイ素鋼板Ｍの一面側から他面側に到るビード（厚さ方向に貫通したビード）が形成され得る。

[0076] その後、余分な改質材３１１、３１２を除去したケイ素鋼板Ｍ（電磁鋼板）を、所定形状の金型で打抜き加工する（工程III）。これにより、ブリッジ１１１、１１２の一部に非磁性な改質部１２１、１２２を有するロータコアシート１が、ステータコアシート２と共に得られる。打抜き加工時、ビーム照射の始点ｐ０や終点ｐ１の付近にできた欠陥部（引け巣、割れ、未溶解部等）は、スロット１０１、１０２等の形成と共に除去され得る。引け巣や割れ等を抑止して欠陥部を小さくできる程、改質部の形態自由度や改質域の設

定自由度を拡大でき、またケイ素鋼板の歩留まりの向上等を図れる。

[0077] （４）ロータコアシート１のスロット１０１が、左右に２分割されたスロット１０１１、１０１２からなる場合を図１Ｃに拡大して示した。このとき、スロット１０１１、１０１２の外周端域にあるブリッジ１１１１、１１１２には、上述したように、改質工程によって非磁性な改質部１２１１、１２１２が形成される。この他、スロット１０１１とスロット１０１２の間（非外周端域）にできるブリッジ１１１３にも改質部１２１３が形成されてもよい。

[0078] ちなみに、ビーム照射の軌跡は、例えば、マクロ的に観て直線状の経路でも、ミクロ的に観ればジグザグ状の経路であってもよい。

実施例

[0079] ［第１実施例］

ケイ素鋼板上に配置した改質材（粉末層）へレーザ照射を行なった。得られた試料の改質域を観察および分析した。このような具体例を示しつつ本発明をさらに詳しく説明する。

[0080] 《試料の製作》

（１）母材

母材にはケイ素鋼板（Ｆｅ－３．１％Ｓｉ－２．５％Ｎｉ／厚さ：０．５ｍｍ／日本製鉄株式会社製）を用いた。

[0081] （２）改質材

原料粉末として、Ｃｒ－５０％Ｎｉ合金粉（日本ウェルデング・ロッド株式会社製ウェルパウダー）、Ｆｅ－１６％Ｂ粉末（株式会社高純度化学研究所製）を用意した。これら原料粉末を改質域の所望組成に応じて配合・混合した粉末（「改質粉末」という。）を改質材に供した。

[0082] （３）改質材の配置

図２に示すように、長方形状の貫通孔（幅３ｍｍ×長さ１０ｍｍ）を有する平板状の枠板（厚さ：０．４～０．８ｍｍ）をケイ素鋼板上に載置した。その貫通孔へ改質粉末を充填し、余分な粉末を擦切った。こうしてケイ素鋼

板上に粉末層（改質材）を形成した。なお、改質部の所望組成に応じて、枠板の厚さを適宜変更し、粉末層の厚さ（ｈ）を調整した。

[0083] （４）レーザ照射

図２に示すように、枠板を除いた粉末層（改質材）上へレーザを照射した。レーザには、シングルタイプのファイバーレーザ（レーザ発信機：株式会社ＩＰＧ製ＹＬＳ－２０００－ＳＭ、ファイバーコア径：２４μｍ、光学系：株式会社安川電機製３Ｄガルバノスキャナ、集光径：３６μｍ）を用いた。

[0084] レーザの照射軌跡は、ジグザグ状に左右へミクロ的に振幅させつつ、マクロ的に観れば矢印方向へ直線状に移動させた。その左右への振幅幅は±１．５ｍｍ、直線状の移動速度（照射速度）は１１ｍｍ／ｓとした。レーザ出力は３４０Ｗとし、Ａｒフロー条件下でレーザ照射を行った。改質域の冷却を待ってから、ケイ素鋼板上に残存した粉末を除去した。こうして表１に示す各試料を得た。

[0085] 《観察と分析》

（１）表面観察

試料の改質域を表面観察した写真を図３にまとめて示した。

[0086] 改質域に現れた引け巣のサイズ（単に「引け巣径」という。）は、ワンショット３Ｄ形状測定機（株式会社キーエンス製ＶＲ－５０００）の円測定ソフトウェアを用いて測定した。

[0087] （２）金属組織

試料の改質域から欠陥（引け巣、割れ等）がない部分（改質部）を選択して、その略中央付近の金属組織を観察した。

[0088] 試料１と試料２を透過型電子顕微鏡（ＴＥＭ／日本電子株式会社製ＪＥＭ－ＡＲＭ２００Ｆ）で観察して得られた明視野像をそれぞれ図４Ａと図４Ｂに示した。各ＴＥＭ像に現れた化合物相の結晶構造を、ＴＥＭに付帯している制限視野回折装置（ＳＡＤ）で分析した。試料１と試料２に係るＳＡＤ回折パターンをそれぞれ図４Ａと図４Ｂに併せて示した。

[0089] 試料１と試料２を金属顕微鏡で観察したミクロ組織から、初晶オーステナイト相と共晶が確認された。初晶オーステナイト相はデンドライト状であり、共晶はオーステナイト相と化合物相で構成されていた。上述したＴＥＭ像は、共晶中の化合物相を示している。

[0090] 試料３も、試料１および試料２と同様な共晶組織であった。試料３の共晶中のＢ系化合物相の一部（ＴＥＭ像に示す矢印の先端部）をさらに、走査透過電子顕微鏡（ＳＴＥＭ／日本電子株式会社製ＪＥＭ－ＡＥＭ２００Ｆ）で観察して得られた高角度散乱暗視野（ＨＡＡＤＦ：high angle annular dark field）像を図４Ｃに示した。そのＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭ像からわかるように、複数種のＢ系化合物（Fe_2BとCr_2B）が層状に交互配置された積層構造を有する複化合物の存在が明らかになった。

[0091]（３）成分分析

試料の改質域から欠陥（引け巣、割れ等）がない部分（改質部）を選択して、その略中央付近の化学成分を分析した。その結果を表１に併せて示した。元素記号の前に付した数値が、分析部分（改質部）の全体に対する質量％を示す。

[0092] 成分分析は次のように行なった。ＢはＥＰＭＡ（株式会社島津製作所製ＥＰＭＡ－８０５０Ｇ）により分析した。その他の元素は、ＥＤＳ（Oxford Instruments社製Ｘ－ＭＡＸＮ）により分析される。それぞれの具体的な分析条件は次の通りである。欠陥がない改質域から切り出した分析部分（改質部）を樹脂埋め後に断面を研磨した分析用の試料（φ２５ｍｍ）を製作した。Ｂは、その試料中央面（１００μｍ×１００μｍ）でＥＰＭＡによりマップ分析を行った。他の成分は、その試料中央面（１０００μｍ×３００μｍ）で、ＥＤＳ（電圧：１５ｋＶ、電流：１２Ａ）によりマップ分析を行った。その試料中にオーステナイト相が含まれることはＸＲＤにより確認した。

[0093]《解析》

上述した成分分析により、オーステナイト相と化合物相の各組成を特定した。この結果に基づいて、オーステナイト相の密度（ρａ）と化合物相の密

度（ρｂ、ρｃ）を、既存の結晶構造データベースから引用して確定した。また、改質域から採取した試料（改質部）の密度（ρ）は、予めアルキメデス法により求めておいた。これらから、化合物相の含有量（体積%）を算出した。化合物相の種類（組成）とその含有量を表１に併せて示した。なお、試料４は、全体がオーステナイト相となっており、化合物相（共晶）は観られなかった。

[0094] 《評価》

表１、図４Ａ～図４Ｃから明らかなように、オーステナイト相中にＢ系化合物からなる化合物相が分散している金属組織が形成される場合、改質域に引け巣が殆ど観られなかった。オーステナイト相の晶出時に生じる凝固収縮が、それよりも低密度なＢ系化合物により補われたためと考えられる。また、そのＢ系化合物は、単種に限らず、複数種（複化合物）になり得ることもわかった。さらに複化合物は、層状となり得ることもわかった。

[0095] 以上から、本発明によれば、改質域に現れる欠陥を縮小さらには消失させれることが確認された。これにより、改質部の形成自由度の拡大、ケイ素鋼板の有効活用または改質工程の効率化等を図りつつ、改質部を有する電磁鋼板を製造できることが明らかとなった。

[0096] なお、通常、本発明に係る構成の特定（有無）は、一般的な分析対象である微小領域（μｍ単位で規定される領域）において、改質部を分析や解析して判断されれば足り得る。超極小領域（ｎｍ単位で規定される領域／例えば１０ｎｍ×１０ｎｍまたは５ｎｍ×５ｎｍ）における改質部の観察や分析等は、適宜、必要な範囲でなされれば足る。

[0097] ［第２実施例］

第１実施例と同様に製作した試料の改質域を観察および分析した。但し、第１実施例では改質域の組織に主眼をおいたが、第２実施例では改質域の成分に主眼をおいた。このような具体例を示しつつ本発明をさらに詳しく説明する。

[0098] 《試料の製作》

（１）母材には、上述したケイ素鋼板（Ｆｅ－３．１％Ｓｉ－２．５％Ｎｉ／厚さ：０．５ｍｍ）を用いた。

[0099] （２）改質材の原料粉末として、上述したＣｒ－５０％Ｎｉ合金粉、Ｆｅ－１６％Ｂ粉末に加えて、ＡｌＩ粉末（株式会社高純度化学研究所製）、Ｍｎ－３５％Ｃｒ粉末（株式会社高純度化学研究所製）も用意した。

[0100] （３）改質材の配置とレーザ照射は、第１実施例と同様に行なった。こうして表２に示す各試料を得た。

[0101] 《観察と分析》

（１）観察

各試料の改質域を表面観察した写真を図６Ａおよび図６Ｂ（両者を併せて「図６」という。）にまとめて示した。

[0102] （２）分析

各試料の改質域から欠陥（引け巣、割れ等）がない部分（改質部）を選択して、その略中央付近の化学成分を分析した。その結果を表２に併せて示した。元素記号の前に付した数値が、分析部分（改質部）の全体に対する質量％を示す。

[0103] 成分分析は次のように行なった。ＢはＥＰＭＡ（株式会社島津製作所製ＥＰＭＡ－８０５０Ｇ）により分析した。その他の元素は、ＥＤＳ（Oxford Instruments社製Ｘ－ＭＡＸＮ）により分析される。それぞれの具体的な分析条件は次の通りである。欠陥がない改質域から切り出した分析部分（改質部）を樹脂埋め後に断面を研磨した分析用の試料（φ２５ｍｍ）を製作した。Ｂは、その試料中央面（１００μｍ×１００μｍ）でＥＰＭＡによりマップ分析を行った。他の成分は、その試料中央面（１０００μｍ×３００μｍ）で、ＥＤＳ（電圧：１５ｋＶ、電流：１２Ａ）によりマップ分析を行った。また、その試料中にオーステナイト相が含まれることはＸＲＤにより確認した。

[0104] 《圧痕試験》

各試料の改質域の脆性を圧痕試験により評価した。圧痕試験は、ビッカー

ス硬さ試験（ＪＩＳ　Ｚ２２４４）を参考にしつつ、ダイヤモンド製の四角錐（圧子）を改質域へ押し付けて行なった。このときの試験荷重は１００ｇｆとした。

[0105] 一部の試料について、改質域にできた圧痕を光学顕微鏡で観察した写真を図７に例示した。図７からもわかるように、クラックは、圧痕の角を起点にして、略直線状に短く延びていた。各試料の改質域毎に、異なる三箇所でクラックの長さ（クラックが複数あるときは合計値）を直線近似して測定した。それらの平均値（Ｎ＝３）を、改質域一つあたりのクラック長とした。こうして求めた各試料のクラック長を表２に併せて示した。

[0106] 《評価》

（１）図６から明らかなように、改質部（改質材、改質域）に適量のＢが含まれるとき、引け巣やクラックが縮小さらには出現しない（消失する）ことがわかった。この傾向は、Ｂと共にＡｌを含むときに顕著であった。また、ＮｉがＭｎで置換されても、引け巣やクラックの発生が十分に抑止されることもわかった。

[0107] （２）表２からわかるように、改質部に含まれるＢが過多（例えば１．５％超）になると、圧痕周りにクラックが発生した。また、そのＢ量の増加と共にクラックも増大することもわかった。

[0108] 以上から、本発明によれば、改質域に現れる欠陥を縮小さらには消失させれることが確認された。これにより、改質部の形成自由度の拡大、ケイ素鋼板の有効活用または改質工程の効率化等を図りつつ、改質部を有する電磁鋼板を製造できることが明らかとなった。また改質域に含まれるＢ量の調整により、改質部付近の割れ抑止や強度確保または電磁鋼板の積層性や歩留りの向上等を図れることもわかった。

[0109]

[表1]

試料No.	改質部の化学成分（質量%）	改質部中の化合物		評価
		構造	含有量（vol%）	引け巣径（mm）
1	Fe-15.6Ni-15.2Cr-2.7Si-0.4B	Cr_5B_3	2.6	0.1
2	Fe-14.6Ni-14.6Cr-2.6Si-1.0B	Fe_2B	18.5	0
3	Fe-17.4Ni-17.2Cr-2.6Si-0.9B	Cr_2B／Fe_2B	9.4／3.7	0
4	Fe-16.1Ni-15.8Cr-2.7Si	—		0.5

[0110]

[表2]

試料 No.	改質部の化学成分 （質量%）	圧痕付近のクラック長 （μm）
B1	Fe-15.8Ni-15.2Cr-2.8Si-0.1B	0
B2	Fe-16.7Ni-16.9Cr-2.7Si-0.2B	0
B3	Fe-16.3Ni-16.7Cr-2.7Si-0.4B	0
B4	Fe-14.6Ni-14.6Cr-2.6Si-1.0B	0
B5	Fe-14.0Ni- 15.3Cr-1.7Si-1.6B	10
B6	Fe-17.9Ni- 18.2Cr-1.8Si-2.7B	37
AB	Fe-15.2Ni-16.5Cr-1.7Si-3.1Al-1.0B	―
MB	Fe-1.8Ni-11.4Cr-1.6Si-17.5Mn-0.4B	―
C0	Fe-16.1Ni-14.4Cr-2.2Si	0

符号の説明

[0111] M ケイ素鋼板

1 ロータコアシート

2 ステータコアシート

１０１ スロット

１１１ ブリッジ

１２１ 改質部

３１１ 改質材

請求の範囲

[請求項1] 少なくともオーステナイト相を含む改質部を、一部に有するケイ素鋼板からなり、

該改質部全体に対してＢが０．１５～３質量％含まれる電磁鋼板。

[請求項2] 前記改質部は、少なくともＮｉ、Ｃｒ、Ｓｉをさらに含む鉄合金からなる請求項１に記載の電磁鋼板。

[請求項3] 前記鉄合金は、さらにＡｌおよび／またはＭｎを含む請求項２に記載の電磁鋼板。

[請求項4] 前記改質部は、前記オーステナイト相と化合物相を含む金属組織を有し、

該化合物相は、Ｂを含むＢ系化合物を含み、

該Ｂ系化合物は、該オーステナイト相よりも低密度である請求項１に記載の電磁鋼板。

[請求項5] 前記金属組織は、初晶オーステナイト相と共晶を含み、

前記Ｂ系化合物は、該共晶に含まれる請求項４に記載の電磁鋼板。

[請求項6] 前記Ｂ系化合物は、前記金属組織全体に対する体積割合で１～４５％含まれる請求項４に記載の電磁鋼板。

[請求項7] 前記Ｂ系化合物は、$(Fe、Cr)_2B$、Fe_2B、Cr_2B、Cr_5B_3 およびＣｒＢの一種以上を含む請求項４に記載の電磁鋼板。

[請求項8] 前記Ｂ系化合物は、少なくとも二種以上の化合物が交互に形成された複化合物を含む請求項４に記載の電磁鋼板。

[請求項9] 前記複化合物は、積層状である請求項８に記載の電磁鋼板。

[請求項10] 前記複化合物は、Fe_2B層とCr_2B層が交互に積層されてなる請求項９に記載の電磁鋼板。

[請求項11] 前記オーステナイト相は、Ｎｉおよび／またはＣｒを含む請求項１または４に記載の電磁鋼板。

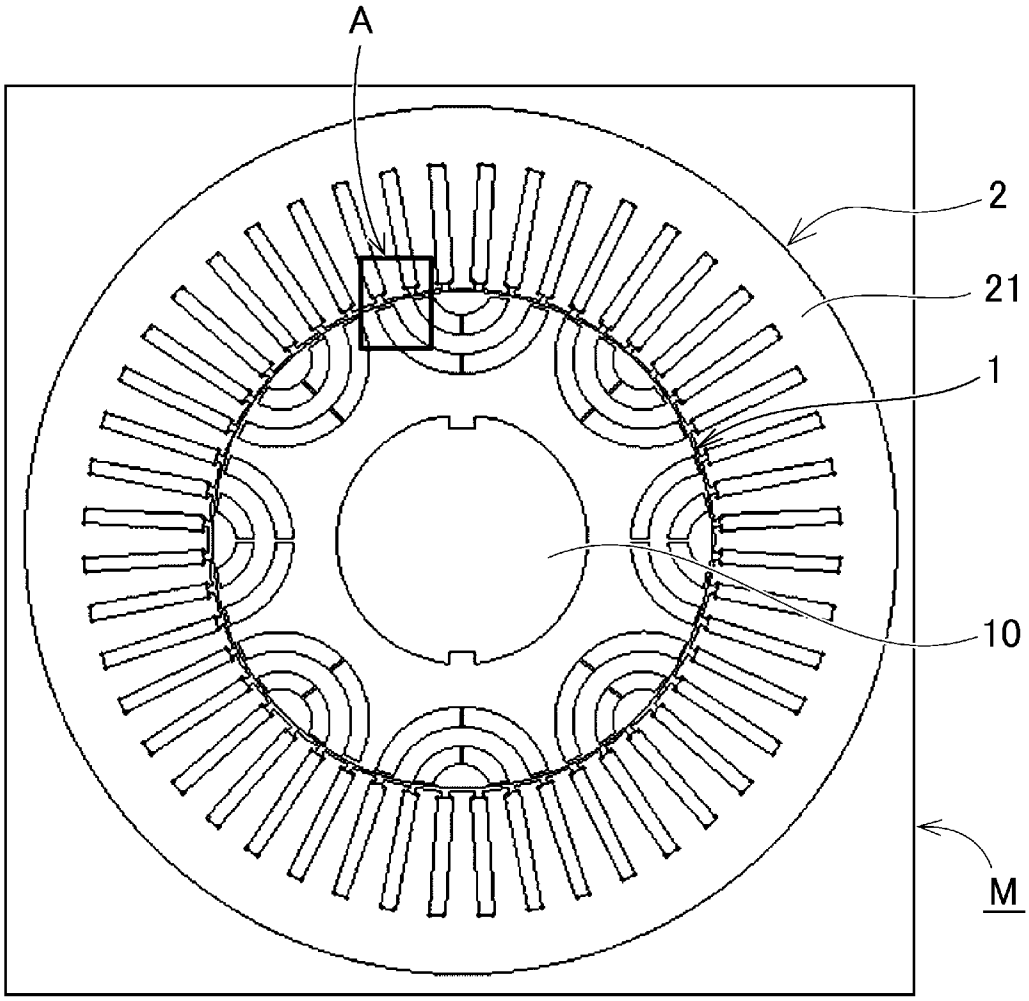
[請求項12] 前記改質部がロータコアのブリッジとなる領域の少なくとも一部に形成されるコアシートに用いられる請求項１に記載の電磁鋼板。

[請求項13] ケイ素鋼板の特定領域上に配置した改質材へ高エネルギービームを照射して、少なくともオーステナイト相を含む改質部を該ケイ素鋼板の一部に形成する改質工程を備え、

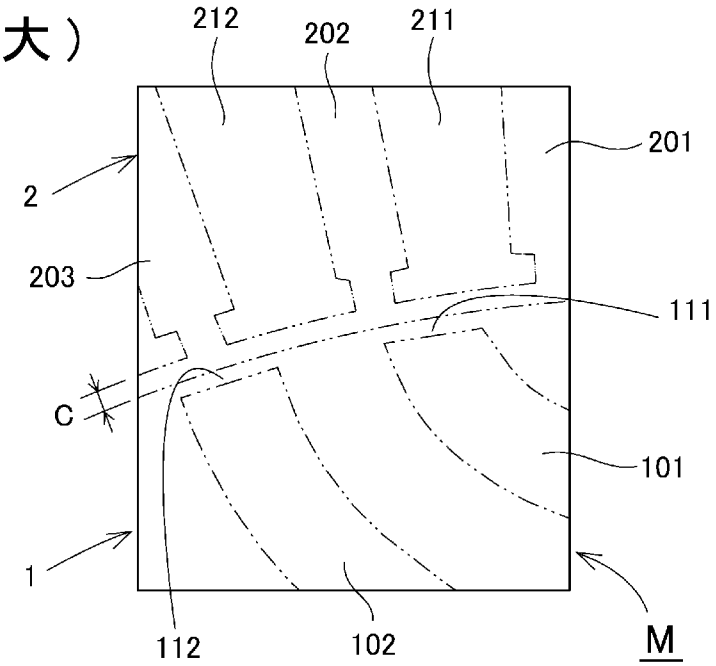
該改質部全体に対してＢが０．１５～３質量％含まれる電磁鋼板の製造方法。

[請求項14] 前記改質部全体に対してＢが０．３～１．５質量％含まれる請求項１３に記載の電磁鋼板の製造方法。

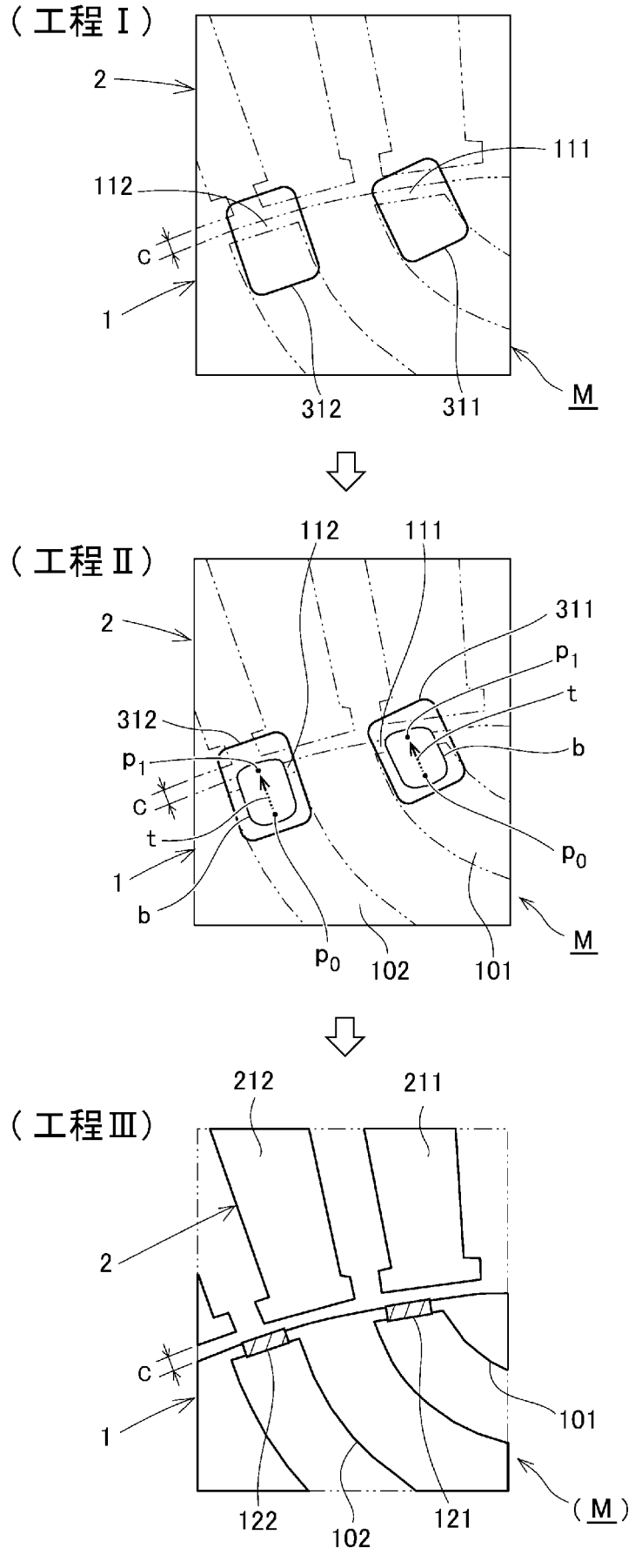
[図1A]



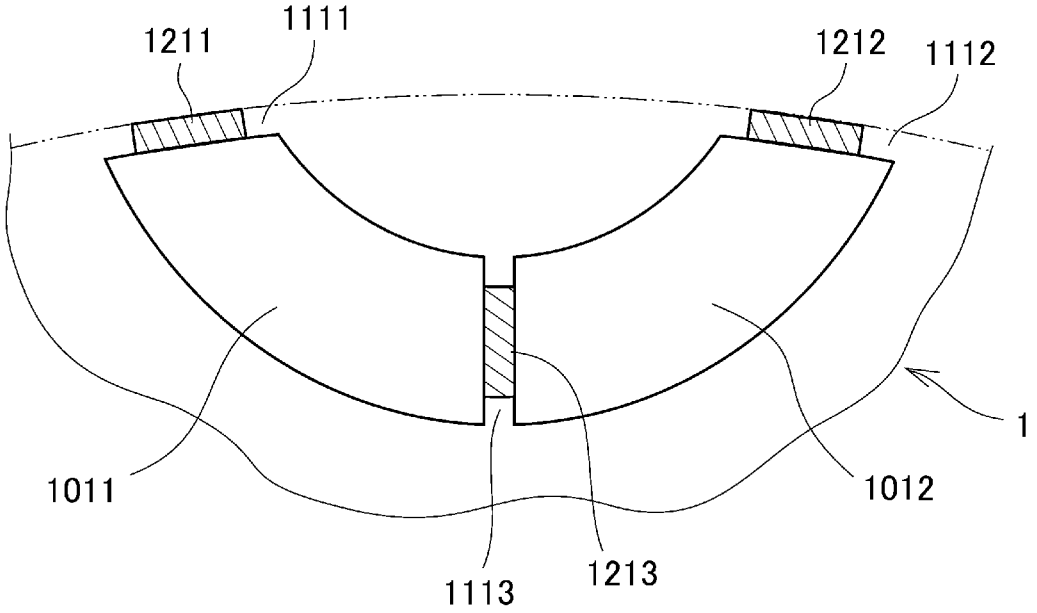
（A部拡大）



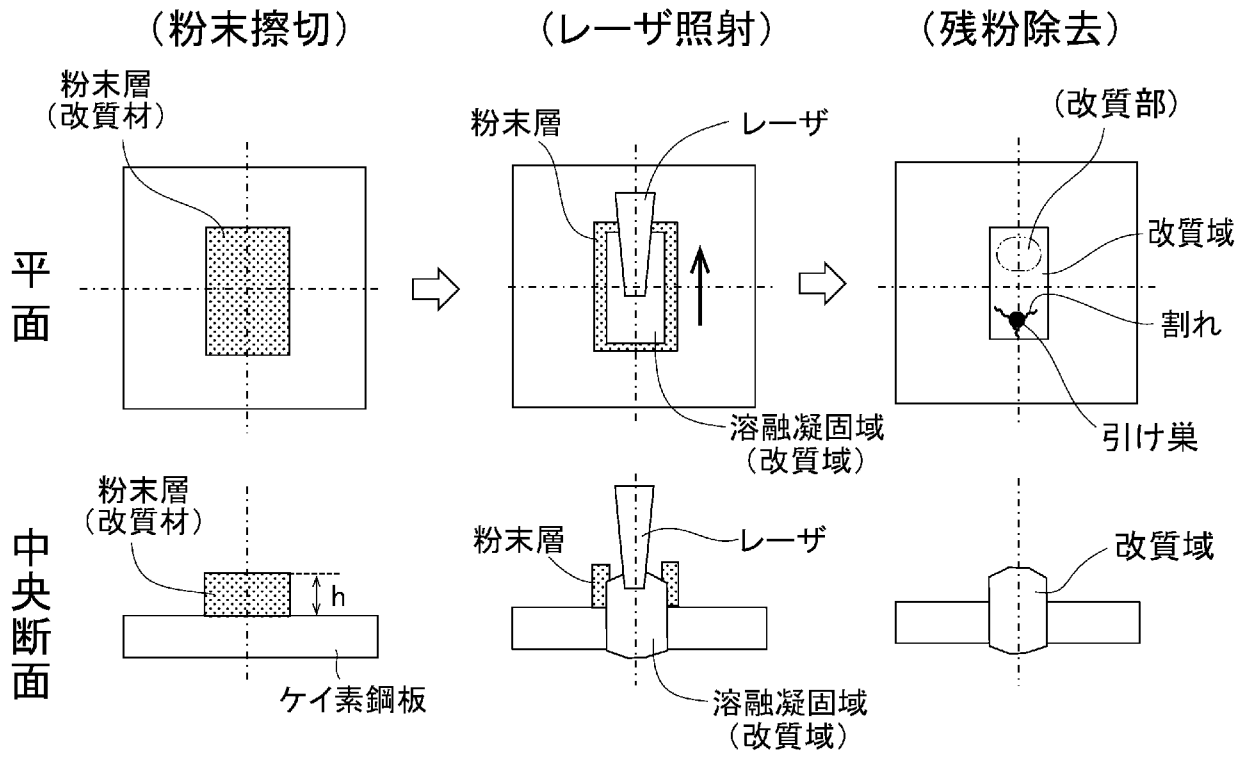
[図1B]


（工程Ⅰ）
2
111
112
c
1
312
311
M
（工程Ⅱ）
112
111
2
311
p_1
t
312
b
p_1
c
t
1
p_0
b
p_0
102
101
M
（工程Ⅲ）
212
211
2
c
1
101
122
102
121
（M）

[図1C]

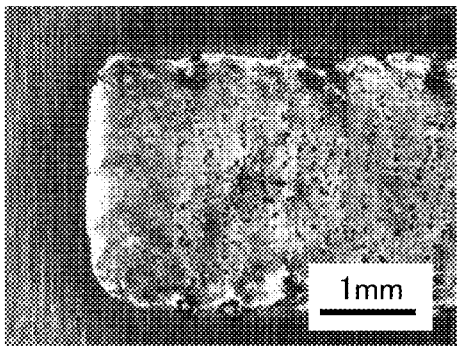

1211
1111
1212
1112
1
1011
1012
1113
1213

[図2]

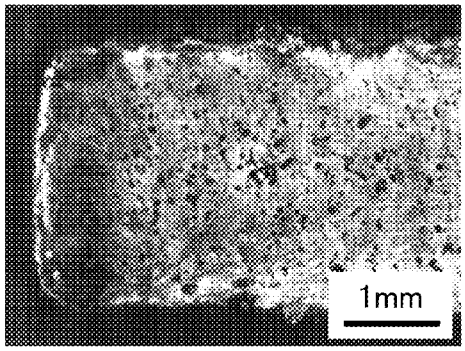

（粉末擦切）
（レーザ照射）
（残粉除去）
平面
中央断面
粉末層
（改質材）
粉末層
レーザ
（改質部）
改質域
割れ
溶融凝固域
（改質域）
引け巣
h
ケイ素鋼板

[図3]

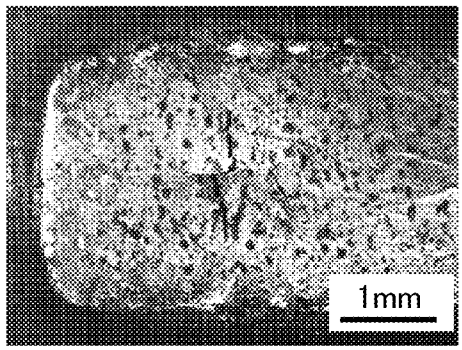
試料1



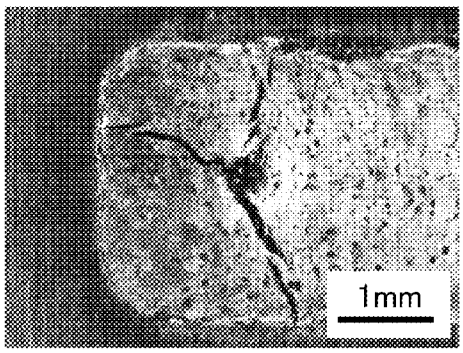
試料2



試料3

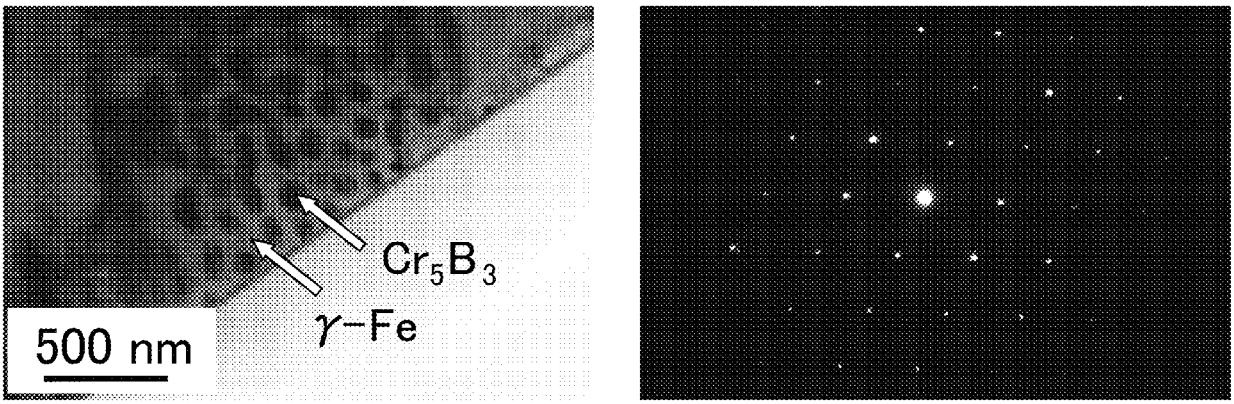


試料4



[図4A]

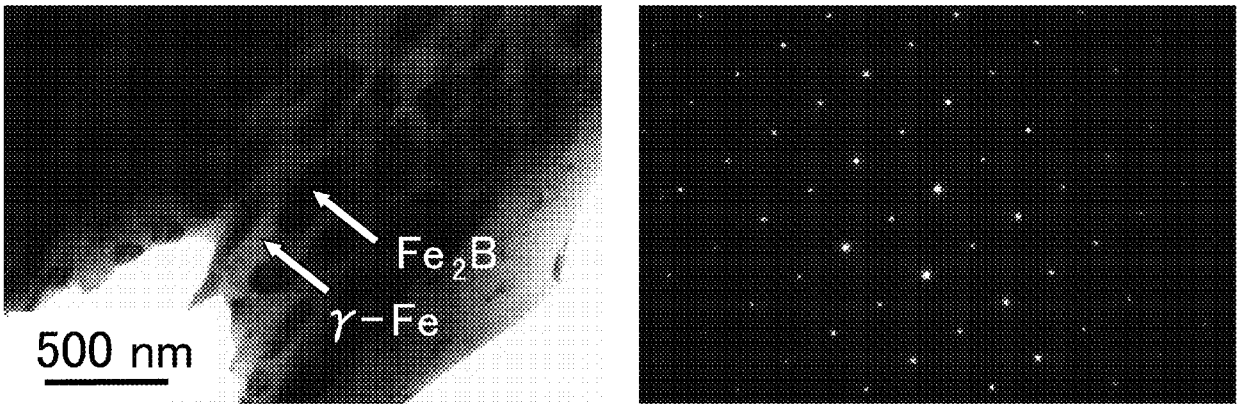
試料1（Cr_5B_3）



TEM 像　　回折パターン

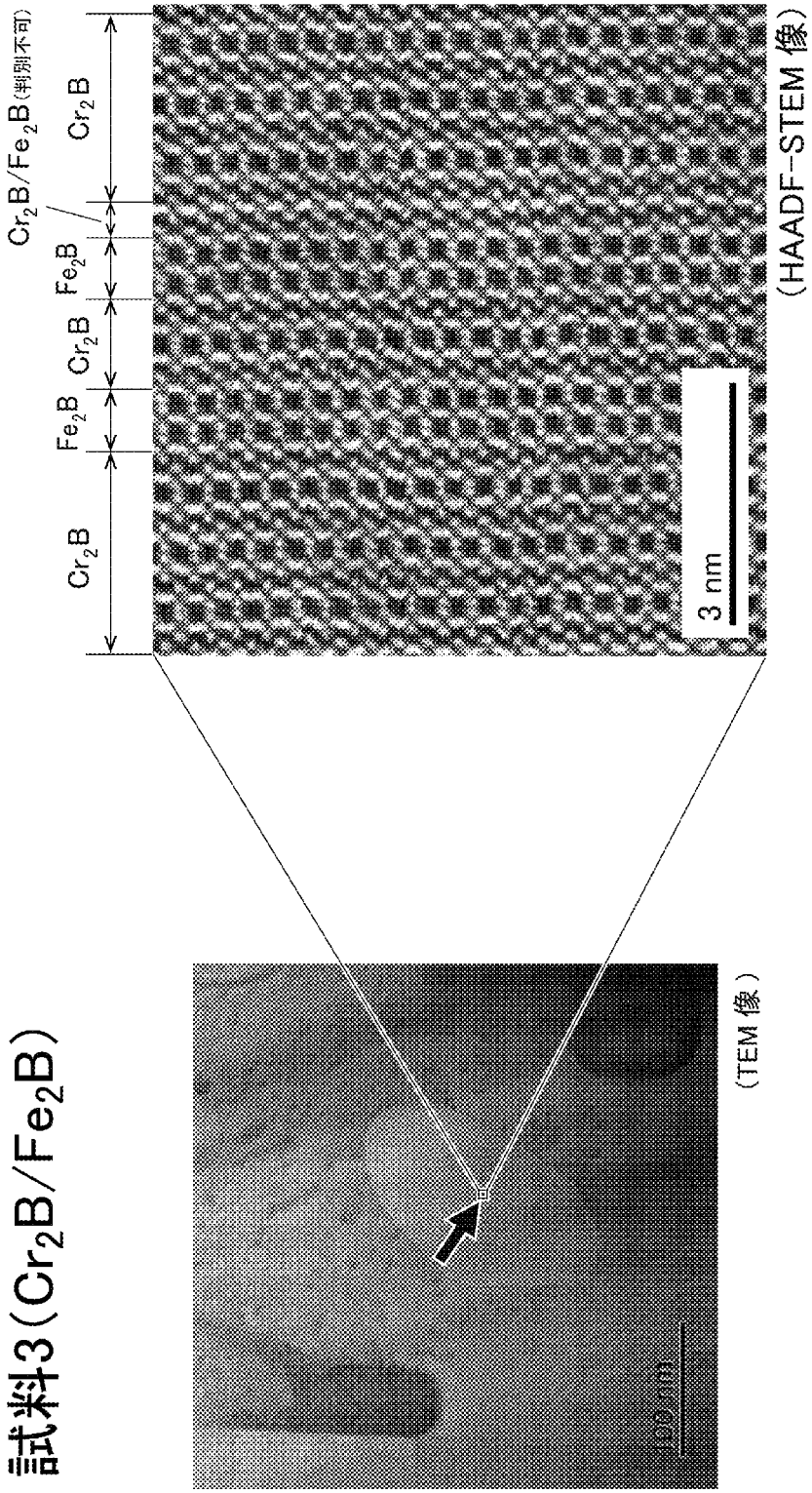
[図4B]

試料2（Fe_2B）

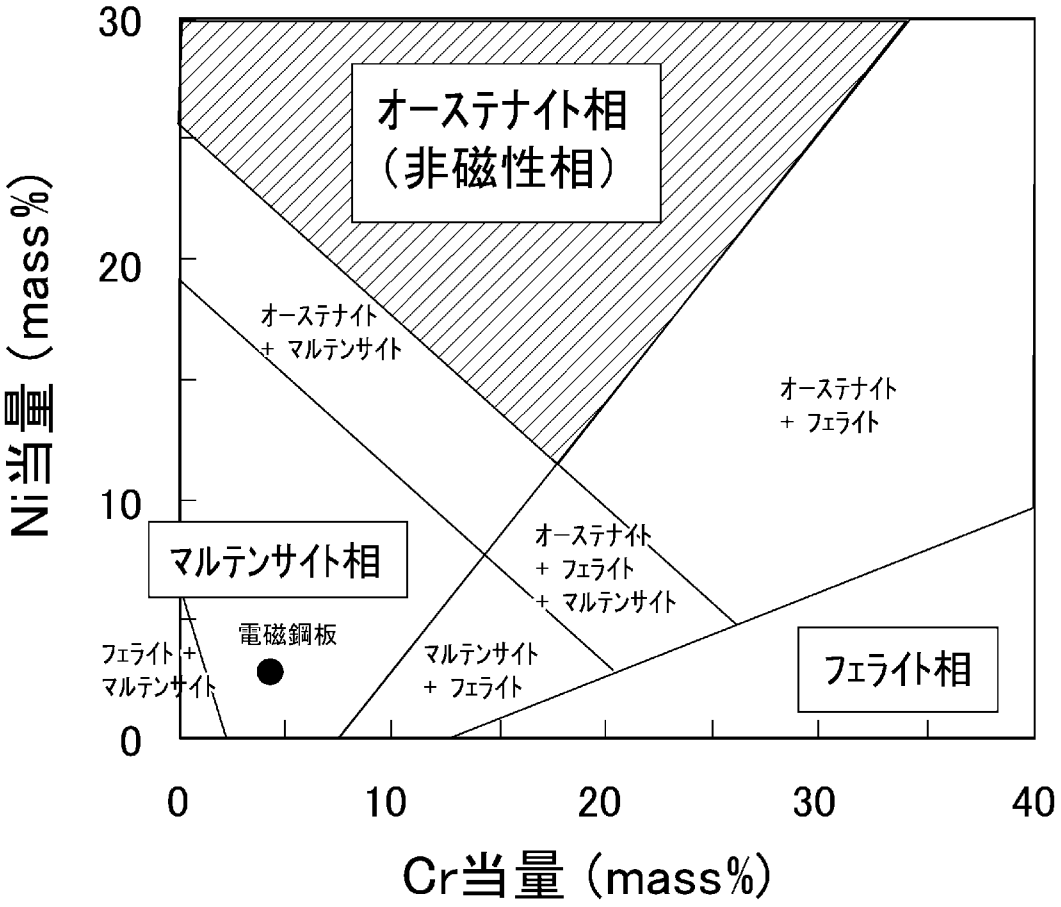


TEM 像　　回折パターン

[図4C]

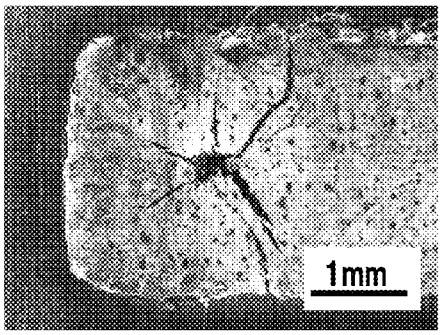

試料3（Cr_2B/Fe_2B）
100 nm
（TEM 像）
Cr_2B
Fe_2B
Cr_2B
Fe_2B
Cr_2B/Fe_2B（判別不可）
Cr_2B
3 nm
（HAADF-STEM 像）

[図5]

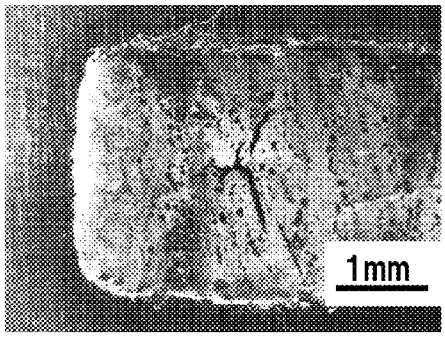

30
20
10
0
Ni当量（mass%）
オーステナイト相
（非磁性相）
オーステナイト
＋ マルテンサイト
オーステナイト
＋ フェライト
マルテンサイト相
オーステナイト
＋ フェライト
＋ マルテンサイト
電磁鋼板
フェライト＋
マルテンサイト
マルテンサイト
＋ フェライト
フェライト相
0
10
20
30
40
Cr当量（mass%）

[図6A]

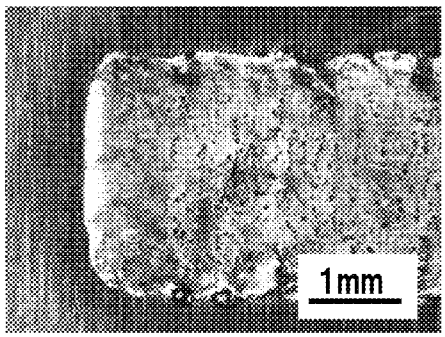
試料B1



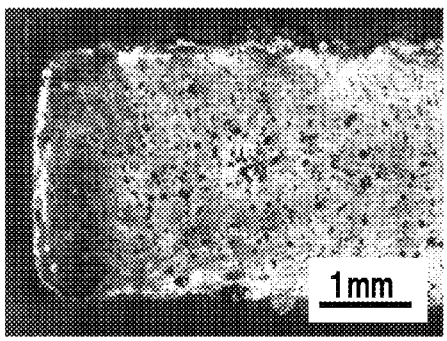
試料B2



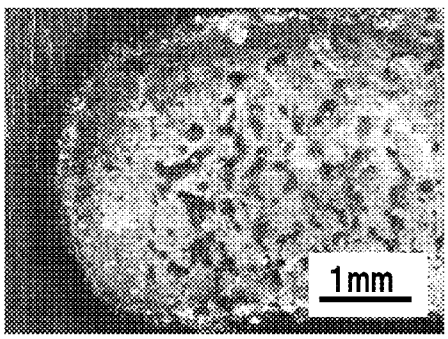
試料B3



試料B4

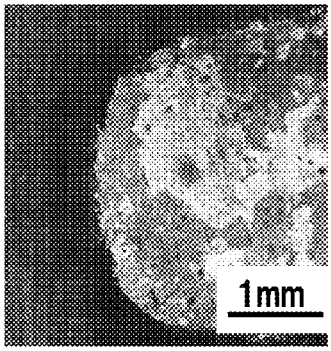


試料B5

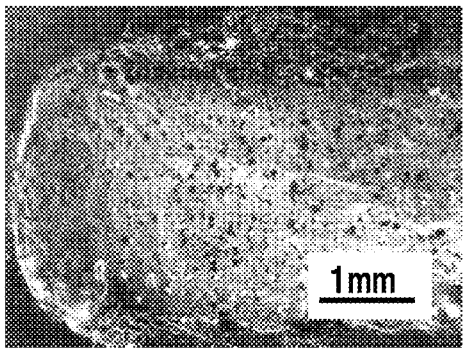


[図6B]

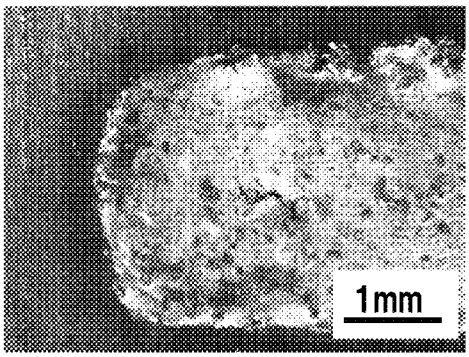
試料B6



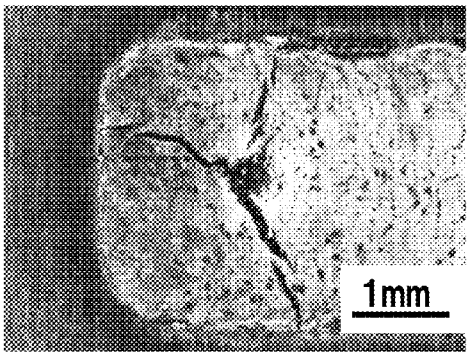
試料AB



試料MB

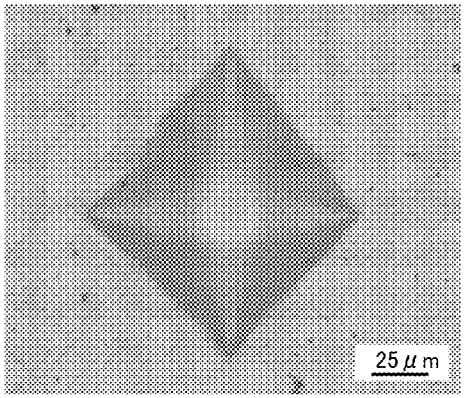


試料C0

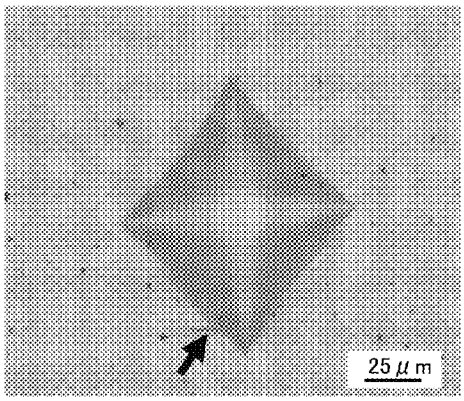


[図7]

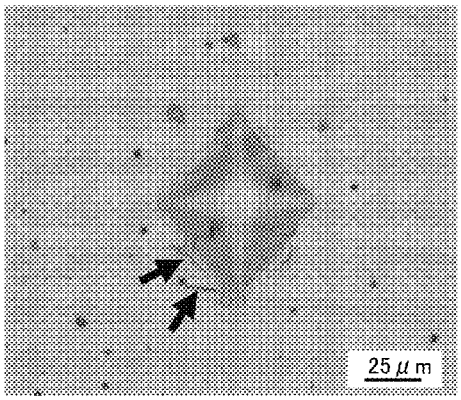
試料B4



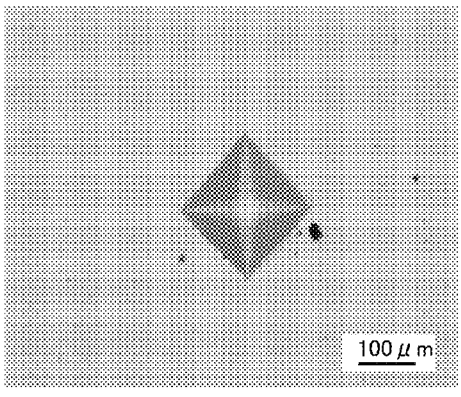
試料B5



試料B6



試料C0



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/004695

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C22C 38/00(2006.01)i; ***C21D 8/12***(2006.01)i; ***C21D 9/46***(2006.01)i; ***C22C 22/00***(2006.01)i; ***C22C 30/00***(2006.01)i; ***C22C 38/02***(2006.01)i; ***C22C 38/58***(2006.01)i; ***C22C 38/60***(2006.01)i; ***G01N 23/2252***(2018.01)i; ***H01F 1/147***(2006.01)i; ***H01F 3/02***(2006.01)i; ***H01F 7/20***(2006.01)i; ***H01F 38/18***(2006.01)i; ***H02K 1/02***(2006.01)i; ***H02K 1/22***(2006.01)i; ***H02K 1/276***(2022.01)i

FI: C22C38/00 303U; C21D9/46 501Z; H02K1/22 A; C22C38/02; C22C38/60; C22C30/00; C22C22/00; H01F1/147 175; H01F3/02; H02K1/22 Z; C22C38/00 302X; C21D8/12 D; C22C38/58; H02K1/02 Z; C22C38/00 302Z; H01F7/20 D; H02K1/276; C21D8/12 A; H01F38/18 M; G01N23/2252

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C22C38/00; C21D8/12; C21D9/46; C22C22/00; C22C30/00; C22C38/02; C22C38/58; C22C38/60; G01N23/2252; H01F1/147; H01F3/02; H01F7/20; H01F38/18; H02K1/02; H02K1/22; H02K1/276

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.
X	JP 2008-308712 A (TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA) 25 December 2008 (2008-12-25) claims, paragraphs [0002]-[0008], [0029]-[0030], [0036]-[0038], [0046]-[0052], [0080]-[0082], fig. 19	1, 3-4, 11, 13-14
Y		12
A		2, 5-10
Y	US 2018/0278100 A1 (FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC) 27 September 2018 (2018-09-27) claims, paragraphs [0024]-[0064], fig. 5, 7	12
A		1-11, 13-14

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

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
30 April 2024	**14 May 2024**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/004695

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-99360 A (TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA) 24 April 2008 (2008-04-24) entire text, all drawings	1-14
A	JP 2011-6741 A (DENSO CORPORATION) 13 January 2011 (2011-01-13) entire text, all drawings	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2024/004695

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2008-308712 A	25 December 2008	(Family: none)	
US 2018/0278100 A1	27 September 2018	DE 102018106815 A1	
		CN 108667163 A	
JP 2008-99360 A	24 April 2008	(Family: none)	
JP 2011-6741 A	13 January 2011	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/004695

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 22/00(2006.01)i; C22C 30/00(2006.01)i; C22C 38/02(2006.01)i; C22C 38/58(2006.01)i; C22C 38/60(2006.01)i; G01N 23/2252(2018.01)i; H01F 1/147(2006.01)i; H01F 3/02(2006.01)i; H01F 7/20(2006.01)i; H01F 38/18(2006.01)i; H02K 1/02(2006.01)i; H02K 1/22(2006.01)i; H02K 1/276(2022.01)i

FI: C22C38/00 303U; C21D9/46 501Z; H02K1/22 A; C22C38/02; C22C38/60; C22C30/00; C22C22/00; H01F1/147 175; H01F3/02; H02K1/22 Z; C22C38/00 302X; C21D8/12 D; C22C38/58; H02K1/02 Z; C22C38/00 302Z; H01F7/20 D; H02K1/276; C21D8/12 A; H01F38/18 M; G01N23/2252

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

C22C38/00; C21D8/12; C21D9/46; C22C22/00; C22C30/00; C22C38/02; C22C38/58; C22C38/60; G01N23/2252; H01F1/147; H01F3/02; H01F7/20; H01F38/18; H02K1/02; H02K1/22; H02K1/276

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
X	JP 2008-308712 A（トヨタ自動車株式会社）25.12.2008（2008－12－25） 特許請求の範囲,0002-0008,0029-0030,0036-0038,0046-0052,0080-0082,図19	1,3-4,11,13-14
Y		12
A		2,5-10
Y	US 2018/0278100 A1 (FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC) 27.09.2018 (2018－09－27) 請求の範囲,0024-0064,図5,図7	12
A		1-11,13-14
A	JP 2008-99360 A（トヨタ自動車株式会社）24.04.2008（2008－04－24） 全文,全図	1-14

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
30.04.2024	14.05.2024

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
鈴木　葉子 4K 3557
電話番号 03-3581-1101 内線 3435

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/004695

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 2011-6741 A (株式会社デンソー) 13.01.2011 (2011-01-13) 全文,全図	1-14

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2024/004695

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2008-308712 A	25.12.2008	（ファミリーなし）	
US 2018/0278100 A1	27.09.2018	DE 102018106815 A1	
		CN 108667163 A	
JP 2008-99360 A	24.04.2008	（ファミリーなし）	
JP 2011-6741 A	13.01.2011	（ファミリーなし）	