

(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
2020年7月30日(30.07.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/153361 A1

(51) 国際特許分類:

C21D 8/06 (2006.01)

C22C 38/00 (2006.01)

C21D 9/32 (2006.01)

C22C 38/60 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2020/001966

(22) 国際出願日: 2020年1月21日(21.01.2020)

(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 2019-007949 2019年1月21日(21.01.2019) 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: 宮西 慶 (**MIYANISHI, Kei**); 〒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). 江頭 誠 (**EGASHIRA, Makoto**); 〒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: アセンド特許業務法人 (**ASCEND IP LAW FIRM**); 〒5300003 大阪府大阪市北区堂島一丁目5番17号 Osaka (JP).

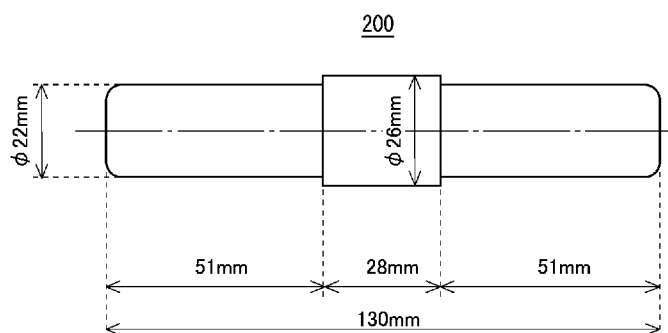
(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,

(54) **Title:** STEEL MATERIAL AND COMPONENT

(54) 発明の名称: 鋼材及び部品

FIG. 1



(57) **Abstract:** Provided is a steel material having excellent machinability and exhibiting, when subjected to induction hardening to form an induction-hardened component, high surface fatigue strength, high-cycle bending fatigue strength, and low-cycle bending fatigue strength. A steel material according to the present disclosure has a chemical composition containing, in terms of mass%, C: 0.40-0.70%, Si: 0.15-2.10%, Mn: 0.30-1.15%, Cr: 0.01 to less than 0.50%, S: 0.005-0.070%, N: 0.0020-0.0200%, Ti: 0.0080-0.2000%, B: 0.0005-0.0050%, Al: 0.005-0.100%, and P: less than 0.050%, with the balance consisting of Fe and impurities. The steel material satisfies formula (1) to formula (5) described in the specification, has a ferrite area ratio of 40% or less, and has a martensite area ratio of 10% or less.

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)）

(57) 要約：被削性に優れ、かつ、高周波焼入れを施して高周波焼入れ部品とした場合に、高い面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度、及び、低サイクル曲げ疲労強度が得られる鋼材を提供する。本開示の鋼材は、化学組成が質量％で、C：0.40～0.70％、Si：0.15～2.10％、Mn：0.30～1.15％、Cr：0.01～0.50％未満、S：0.005～0.070％、N：0.0020～0.0200％、Ti：0.0080～0.2000％、B：0.0005～0.0050％、Al：0.005～0.100％、及び、P：0.050％未満を含み、残部がFe及び不純物からなり、明細書に記載の式（1）～式（5）を満たし、フェライト面積率は40％以下であり、マルテンサイト面積率が10％以下である。

明 細 書

発明の名称： 鋼材及び部品

技術分野

[0001] 本開示は、鋼材及び部品に関し、さらに詳しくは、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材、及び、その鋼材を高周波焼入れした部品に関する。本明細書において、高周波焼入れが施された部品を「高周波焼入れ部品」と称する。なお、高周波焼入れ部品は、必ずしも部品全体が高周波焼入れ処理されている必要はなく、一部のみ高周波焼入れ処理された部品も含む。つまり、本明細書では、高周波焼入れされた部分（以下、焼入れ部という）と、高周波焼入れされていない部分（以下、未焼入れ部という）とを含む部品も、「高周波焼入れ部品」と定義する。なお、部品全体が高周波焼入れされている場合も、当然に高周波焼入れ部品に該当する。

背景技術

[0002] ディファレンシャルギアに代表される動力伝達部品として用いられる部品には、面疲労強度の向上及び曲げ疲労強度の向上が求められる。面疲労強度及び曲げ疲労強度の向上を目的として、表面硬化処理が施された部品が用いられる場合がある。

[0003] 代表的な表面硬化処理として、浸炭処理及び高周波焼入れ処理がある。浸炭処理は、鋼材の表層を高炭素化することにより、鋼材の表面を硬化する。浸炭処理は主として、歯車、ＣＶＴ（無段変速機）部品、及びＣＶＪ（等速ジョイント）部品に適用される。浸炭処理は、ガス雰囲気中でのバッチ処理が主流であり、９３０℃近傍で数時間以上、加熱保持する。そのため、浸炭処理では、多くのエネルギーとコストとが費やされる。また、浸炭処理のインライン化は困難である。浸炭処理ではさらに、大型の部品の浸炭効率が低い。

[0004] 一方、高周波焼入れ処理は、鋼材のうち、必要な部位のみ硬化させることができる。そのため、表面硬化処理時間の短縮及びエネルギーの低減が可能

であり、環境のクリーン化にも非常に有利である。そのため、動力伝達部品に用いられる部品には、高周波焼入れが実施される場合が多い。以下、高周波焼入れされた部品を、高周波焼入れ部品という。

[0005] 高周波焼入れ部品は、高周波焼入れが実施される前に、切削等の機械加工が実施される場合が多い。そのため、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材では、高い被削性が要求される。

[0006] 特許文献1（特開2007-131871号公報）、特許文献2（特開2007-332440号公報）及び特許文献3（特開2004-156071号公報）は、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材、及び、高周波焼入れ部品を開示する。

[0007] 特許文献1に開示された鋼材は、質量%で、C：0.35～0.65%、Si：0.50%以下、Mn：0.65～2.00%、P：0.015%以下、S：0.003～0.080%、Mo：0.05～0.50%、Al：0.10%以下、N：0.0070%以下、及び、O（酸素）：0.0020%以下を含有し、残部はFe及び不純物からなり、さらに、マルテンサイト面積分率が70%以上である。以上の構成を有する鋼材では、高周波焼入れ性が高まり、高周波焼入れ部品の静的強度及び疲労強度を高めることができる、と特許文献1には記載されている。

[0008] 特許文献2に開示された鋼材は、質量%で、C：0.35～0.6%、Si：0.01～1.0%、Mn：0.2～1.8%、S：0.001～0.15%、Al：0.001～0.05%、N：0.002～0.020%、P：0.025%以下、O：0.0025%以下を含有し、さらに、Cr：1.8%以下、Mo：1.5%以下、Ni：3.5%以下、B：0.006%以下、V：0.5%以下、Nb：0.04%以下、Ti：0.2%以下、の1種又は2種以上を含有し、残部が鉄及び不可避免の不純物からなり、高周波焼入れ処理後において硬化層硬さがHV550以上であり、芯部のフェライト面積率が50%以下であり、指標Aが-11以上である。ここで、指標 $A = Mo + 0.227Ni + 190B - 7.18C - 0.087Si - 17$

、 $2P - 2.74V - 0.00955H_s + 0.0344N_\gamma$ 、であり、式中の H_s は表面硬さであり、 N_γ は高周波焼入れ硬化層の旧オーステナイト結晶粒度である。以上の構成を有する鋼材は、指標Aを -11 以上とすることにより、高周波焼入れ硬化層が脆性破壊するのが抑制され、高周波焼入れ部品の低サイクル疲労特性が高まる、と特許文献2には記載されている。

[0009] 特許文献3の高周波焼入れ用成形部品は、質量%で、C：0.5～0.7%、Si：0.1～1.5%、Mn：0.2～1.5%、Cr：0～1.5%、V：0～0.10%、S：0.002～0.05%、Al：0.01～0.04%、N：0.005～0.012%を含有し、残部はFe及び不純物からなり、不純物中のTiが0.003%以下、Oが0.0015%以下、Pが0.020%以下である成形部品であって、表層領域において、初析フェライトの平均短径が $8\mu\text{m}$ 以下である。さらに、 $A = (Mn_{MIN} / Mn_{AVE})$ (Mn_{MIN} ：表層領域におけるMn濃度の下限値(質量%)、 Mn_{AVE} ：Mn濃度の平均値(質量%))で表されるA値が0.80以上である。さらに、アスペクト比が3以下で、かつ短径が $10\mu\text{m}$ 以上であるMnS以外の介在物の個数が2個/ mm^2 以下である。以上の構成を有する成形部品を高周波焼戻しして得られた軸受部品は転動疲労寿命に優れる、と特許文献3には記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：特開2007-131871号公報

特許文献2：特開2007-332440号公報

特許文献3：特開2004-156071号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0011] しかしながら、特許文献1～3に開示された高周波焼入れ部品であっても、十分に高い面疲労強度と十分に高い回転曲げ疲労強度とを両立しにくい場

合がある。

[0012] さらに、曲げ疲労強度は、高サイクル曲げ疲労強度と、低サイクル曲げ疲労強度とがある。本明細書において、高サイクル曲げ疲労強度は、応力負荷繰り返し回数が 1×10^7 回での破断強度を意味する。本明細書において、低サイクル曲げ疲労強度は、応力負荷繰り返し回数が 1×10^4 回での破断強度を意味する。動力伝達部品は、ディファレンシャルギアのうちのピニオンギア等に代表される、衝撃荷重が付加される部品に適用される場合がある。ピニオンギア等の動力伝達部品には、曲げ疲労強度のうち、高サイクル曲げ疲労強度と、低サイクル曲げ疲労強度との両方に優れることが要求される。特許文献1～特許文献3では、高サイクル曲げ疲労強度を想定しているものの、低サイクル曲げ疲労強度について検討していない。

[0013] 本開示の目的は、被削性に優れ、かつ、高周波焼入れを施して高周波焼入れ部品とした場合に、高い面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度、及び、低サイクル曲げ疲労強度が得られる鋼材、及び、高周波焼入れ部品を提供することである。

課題を解決するための手段

[0014] 本開示による鋼材は、
化学組成が、質量％で、
C : 0.40～0.70％、
Si : 0.15～2.10％、
Mn : 0.30～1.15％、
Cr : 0.01～0.50％未満、
S : 0.005～0.070％、
N : 0.0020～0.0200％、
Ti : 0.0080～0.2000％、
B : 0.0005～0.0050％、
Al : 0.005～0.100％、及び、
P : 0.050％未満、を含有し、

残部がF e及び不純物からなり、式（１）～式（５）を満たし、
フェライト面積率が４０％以下であり、マルテンサイト面積率が１０％以下である。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式（１）～式（４）中の各元素記号には、対応する元素の含有量（質量％）が代入され、対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「０」が代入され、式（５）中の Mn_{θ} にはセメンタイト中のMnの濃度（質量％）が代入され、式（５）中の Cr_{θ} にはセメンタイト中のCrの濃度（質量％）が代入される。

- [0015] 本開示による部品は、
焼入れ硬化層と、
前記焼入れ硬化層よりも内部の芯部と、
を備え、
前記焼入れ硬化層は、
マルテンサイト面積率が９０％以上であり、
前記芯部は、
化学組成が、質量％で、
C：０．４０～０．７０％、
Si：０．１５～２．１０％、
Mn：０．３０～１．１５％、
Cr：０．０１～０．５０％未満、

S : 0.005 ~ 0.070 %、

N : 0.0020 ~ 0.0200 %、

Ti : 0.0080 ~ 0.2000 %、

B : 0.0005 ~ 0.0050 %、

Al : 0.005 ~ 0.100 %、及び、

P : 0.050 %未満、を含有し、

残部が Fe 及び不純物からなり、式 (1) ~ 式 (5) を満たし、

フェライト面積率が 40 % 以下であり、マルテンサイト面積率が 10 % 以下である。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \\ \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times \\ (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式 (1) ~ 式 (4) 中の各元素記号には、対応する元素の含有量 (質量%) が代入され、式 (5) 中の Mn_{θ} にはセメンタイト中の Mn の濃度 (質量%) が代入され、式 (5) 中の Cr_{θ} にはセメンタイト中の Cr の濃度 (質量%) が代入される。

発明の効果

[0016] 本開示の鋼材は、被削性に優れ、かつ、高周波焼入れを施して高周波焼入れ部品とした場合に、高い面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度、及び、低サイクル曲げ疲労強度が得られる。本開示の高周波焼入れ部品は、高い面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度、及び、低サイクル曲げ疲労強度を有する。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]図1は、実施例で作製したローラーピッチング疲労試験用試験片の平面図である。

[図2]図2は、ローラーピッチング試験の模式図である。

[図3]図3は、実施例で作製した小野式回転曲げ疲労試験片の平面図である。

発明を実施するための形態

[0018] 高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を高めるためには、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材のC含有量を高めることが有効である。たとえば、C含有量が0.40質量%以上であれば、高い面疲労強度及び曲げ疲労強度が得られる。しかしながら、鋼材のC含有量が高ければ、切削加工前の鋼材の硬さが高くなり、鋼材の被削性が低下する。

[0019] そこで、本発明者らは、鋼材のC含有量を0.40%以上として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を高めつつ、C含有量が0.40%以上であっても被削性を高く維持できる鋼材について、検討を行った。その結果、本発明者らは、化学組成が、質量%で、C：0.40～0.70%、Si：0.15～2.10%、Mn：0.30～1.15%、Cr：0.01～0.50%未満、S：0.005～0.070%、N：0.0020～0.0200%、Ti：0.0080～0.2000%、B：0.0005～0.0050%、Al：0.005～0.100%、及び、P：0.050%未満、Mo：0～1.00%、Ni：0～1.00%、Cu：0～1.00%、Ca：0～0.0050%、Mg：0～0.0050%、Te：0～0.20%、Zr：0～0.0050%、希土類元素（REM）：0～0.0050%、Nb：0～0.20%、V：0～0.35%、Sb：0～0.015%、及び、Pb：0～0.09%を含有し、残部はFe及び不純物、からなる鋼材であれば、十分な被削性が得られ、かつ、その鋼材を素材として製造された高周波焼入れ部品において、優れた面疲労強度及び曲げ疲労強度が得られる可能性があると考えた。

[0020] しかしながら、鋼材を上述の化学組成とするだけでは、十分な被削性、高

周波焼入れ部品とした場合の十分な面疲労強度、及び、十分な曲げ疲労強度が得られない場合があった。そこで、本発明者らは、十分な被削性が得られ、高周波焼入れ部品とした場合において、十分な面疲労強度及び十分な曲げ疲労強度が得られる鋼材についてさらに調査及び検討を行った。その結果、本発明者らは次の知見を得た。

[0021] (A) 高周波焼入れ部品の表面の硬さは、鋼中のC含有量及びS i含有量と相関がある。さらに、高周波焼入れ部品の表面の硬さが高いほど、高周波焼入れ部品の面疲労強度が高まる。そこで、本発明者らは、鋼材中のC含有量及びS i含有量と、その鋼材を素材とした高周波焼入れ部品の面疲労強度との関係について調査及び検討した。その結果、鋼材中のC含有量及びS i含有量が式(1)を満たせば、その鋼材を素材とする高周波焼入れ部品の面疲労強度を高めることができることを見出した。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入される。

[0022] $FN1 = 290C + 50Si + 430$ と定義する。FN1は、鋼材を高周波焼入れした後に300℃で焼き戻しして製造される高周波焼入れ部品の表層に形成された焼入れ硬化層のビッカース硬さに相当する。以降の説明では、鋼材を高周波焼入れした後に300℃で焼き戻しして製造される高周波焼入れ部品の表層に形成された焼入れ硬化層のビッカース硬さを、「300℃焼き戻し硬さ」と称する。

[0023] ローラーピッチング疲労試験で得られる高周波焼入れ部品の面疲労強度は、300℃焼き戻し硬さと正の相関があることが一般に知られている。本発明者らは、ローラーピッチング疲労試験で得られた面疲労強度と、300℃焼き戻し硬さとの関係とを調査した。その結果、300℃焼き戻し硬さが631.0HV以上の場合に、高周波焼入れ部品において、十分に高い面疲労強度が得られることが判明した。したがって、FN1は631.0以上とする。この場合、その鋼材を素材とした高周波焼入れ部品において、十分に高い面疲

疲労強度が得られる。なお、FN1が631.0未満である場合、高周波焼入れ部品の面疲労強度が低く、ピッチングが発生する場合がある。

[0024] (B) 高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層において、不完全焼入れ組織が過剰に存在する場合、焼入れ硬化層において局所的に硬さが低い部分が存在してしまう。この場合、焼入れ硬化層が完全な焼入れ組織である状態（つまり、不完全焼入れ組織が存在していない状態）と比較して、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。したがって、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層において、不完全焼入れ組織をなるべく抑制することが望ましい。

[0025] 不完全焼入れ組織を抑制するため、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材の化学組成のうち、焼入れ性の向上に寄与するSi、Mn、Cr、Mo、V、Cu、Ni及びCの含有量を適正な範囲に調整することが有効である。具体的には、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であって、式(1)を満たし、さらに、次の式(3)を満たせば、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層での不完全焼入れ組織を抑制でき、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を高めることができる。

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

ここで、式(3)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入される。対応する元素が含有されていない場合、式中の元素記号には「0」が代入される。

[0026] $FN3 = (1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C)$ と定義する。FN3は、鋼材の焼入れ性の指標である。FN3が大きいほど、鋼材の焼入れ性が高まる。

[0027] 本発明者らは、化学組成の各元素含有量が上述の範囲内であって、式(1

）、式（２）、式（４）及び式（５）を満たす鋼材において、FN3と、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層での不完全焼入れ組織との関係を調査した。その結果、FN3が5.80以上であれば、不完全焼入れ組織の生成を十分に抑制できることが判明した。したがって、つまり、FN3を5.80以上とする。FN3が5.80以上であれば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、かつ、式（１）、式（２）、式（４）及び式（５）を満たすことを前提として、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層での不完全焼入れ組織の生成を十分に抑制できる。その結果、鋼材に対して高周波焼入れを実施して高周波焼入れ部品を製造した場合、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を十分に高めることができる。

[0028] （Ｃ）鋼材の化学組成中の各元素含有量を上述の範囲とし、かつ、式（１）及び式（３）を満たした場合であっても、依然として、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する場合がある。そこで、本発明者らはさらなる検討を行った。具体的には、本発明者らは、十分な面疲労強度及び曲げ疲労強度が得られなかった高周波焼入れ部品を調査した。その結果、十分な面疲労強度及び曲げ疲労強度が得られなかった高周波焼入れ部品では、高周波焼入れ部品の表層に形成された焼入れ硬化層において、硬さのばらつきが生じていることが判明した。つまり、焼入れ硬化層の硬さにばらつきが生じていた。焼入れ硬化層に硬さのばらつきがあれば、硬さが低い部位を起点として割れが発生しやすくなる。この場合、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。

[0029] 以上の知見に基づいて、本発明者らは、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層での硬さのばらつきが生じている部分のミクロ組織観察を実施した。その結果、焼入れ硬化層のうち、硬さが高い部分では、高周波焼入れ時にセメンタイトが十分に溶けておらず、セメンタイトが溶け残っていることが判明した。そこで、本発明者らはさらに、溶け残っているセメンタイトの化学組成を調査した。その結果、焼入れ硬化層で溶け残っているセメンタイトでは、Mn濃度及びCr濃度が高いことが判明した。

[0030] 本発明者らがさらに調査した結果、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内の鋼材において、セメンタイト中のMn濃度及びCr濃度が高い場合、セメンタイトを完全に固溶するのに必要な温度が高まることが判明した。

[0031] 以上の検討結果から、本発明者らは、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の硬さばらつきは、次の要因により引き起こされ则认为した。高周波焼入れではなく浸炭処理の場合、熱処理炉を利用する。熱処理炉で鋼材を加熱する場合、鋼材を高温で長時間加熱する。そのため、鋼材の化学組成は平衡状態となり、セメンタイトを十分に固溶できる。一方、高周波焼入れでは、高周波加熱装置により、短時間で鋼材を加熱する。そのため、高周波加熱装置は、熱処理炉と比較して、鋼材の化学組成が平衡状態になる前に、加熱が終了する。つまり、高周波加熱中の鋼材の化学組成は、非平衡な状態である。そのため、高周波加熱後の鋼材中にセメンタイトが一部溶け残り、その結果、固溶C量がばらつく、その結果、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層において、硬さのばらつきが生じる。

[0032] 高周波加熱中の固溶C量には、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が影響する。セメンタイト中のMn及びCrは、セメンタイトの溶体化温度を高める。セメンタイトがMn及びCrを含有していれば、高周波加熱後にもセメンタイトが溶け残りやすくなる。その結果、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の硬さがばらつきやすくなり、面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。

[0033] 以上の検討結果から、本発明者らは、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内である鋼材において、セメンタイト中のMn濃度及びCr濃度を適切な範囲内に抑えることで、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の硬さばらつきを抑制できると考えた。そこで、本発明者らは、鋼材中のセメンタイト中のMn濃度及びCr濃度と、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度との関係について、調査及び検討を行った。その結果、鋼材中のセメンタイト中のMn濃度及びCr濃度が式(5)を満たせば、鋼材の化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式(1)～式(4)を満たすことを前提として、その鋼材に対して高周波焼入れを実施して高周波焼入れ部品を製造

した場合、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さのばらつきを抑制でき、その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を高めることができることを見出した。

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式(5)中の Mn_{θ} にはセメンタイト中のMnの濃度(質量%)が代入され、式(5)中の Cr_{θ} にはセメンタイト中のCrの濃度(質量%)が代入される。

[0034] $FN5 = 9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta}$ と定義する。FN5は、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度の指標である。FN5が大きいほど、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が高まる。そのため、鋼材に対して高周波焼入れを実施した場合、セメンタイトが溶け残りやすくなり、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつきやすくなる。そこで、本実施形態では、FN5を25.9以下とする。この場合、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が十分に低く、その結果、高周波焼入れにおいて、鋼材中のセメンタイトが十分に固溶する。そのため、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さのばらつきが抑えられ、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が高まる。

[0035] (D) 高周波加熱での鋼材中の固溶C量には、鋼材中のフェライト面積率が影響する。高周波焼入れでは、上述のとおり、熱処理炉を用いた浸炭処理等よりも、加熱時間が短い。そのため、鋼材を加熱中のCの拡散時間も短くなる。この場合、セメンタイト等の炭化物が固溶する時間も短くなる。その結果、鋼材中のフェライト面積率が高くなりやすい。鋼材中のフェライト面積率が高すぎると、高周波焼入れ後の組織にフェライトが過剰に残存してしまう。フェライト面積率が高すぎればさらに、低炭素マルテンサイトが生成する。フェライトが残存したり、低炭素マルテンサイトが生成したりすれば、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面において、硬さがばらつく。

[0036] そこで、本発明者らはさらに、化学組成の各元素含有量が上述の範囲内である鋼材中のフェライト面積率と、その鋼材を高周波焼入れして製造した高

周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度との関係について調査した。その結果、鋼材中のフェライト面積率が40%以下であれば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式(1)～式(5)を満たすことを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造される高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さのばらつきを抑制でき、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が高まることを見出した。

[0037] 化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であって、式(1)～式(5)を満たす鋼材であっても、鋼材中のフェライト面積率が40%を超えれば、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層にフェライトが残存したり、低炭素マルテンサイトが生成したりする。この場合、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつき易くなり、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。

[0038] (E) 鋼材の硬さを高めれば、その鋼材を高周波焼入れして製造される高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度は高まる。しかしながら、鋼材の被削性が低下する。

[0039] 鋼材の硬さにはC、Si、Mn、Cr、V及びMoの含有量が影響する。そして、鋼材の硬さがある程度高くなれば、鋼材の被削性が顕著に低下する。したがって、鋼材の被削性を十分に維持するためには、鋼材の硬さを適正な範囲に調整することが有効である。本実施形態の鋼材では、次の式(2)を満たせば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、かつ、式(1)、式(3)～式(5)を満たし、かつ、フェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10%以下であることを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を十分に高めつつ、鋼材においても、十分な被削性が得られる。

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

ここで、式(2)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入される。対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「0」

が代入される。

[0040] $FN2 = C + (1/7) Si + (1/5) Mn + (1/9) Cr + V + (1/25) Mo$ と定義する。FN2は、鋼材の硬さの指標である。FN2が0.900以下であれば、鋼材の化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式(1)、式(3)～式(5)を満たし、鋼材中のフェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10%以下であることを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を十分に高めつつ、鋼材においても、十分な被削性が得られる。

[0041] (F) 上述のとおり、高周波焼入れ部品のうち、ピニオンギア等の動力伝達部品として利用される高周波焼入れ部品では、曲げ疲労強度のうち、高サイクル曲げ疲労強度と、低サイクル曲げ疲労強度との両方に優れることが望ましい。

[0042] ボロン(B)は上述の化学組成を有する鋼材において、粒界に偏析して粒界強度を高める。高周波焼入れ部品を使用中に高周波焼入れ部品に発生するき裂のほとんどは、粒界から伸展する。したがって、Bにより粒界強度を高めれば、粒界でのき裂の伸展を抑制できる。その結果、高周波焼入れ部品において、特に、低サイクル疲労強度を高めることができる。

[0043] しかしながら、Bは鋼材中の窒素(N)と結合しやすい。鋼材中にNが存在する場合、BはNと結合して、BNを生成する。BNは粒界強化に寄与しない。そこで、鋼材中のBがNと結合するのを抑制できる方が望ましい。そこで、本実施形態の鋼材ではさらに、式(4)を満たす。

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入される。

[0044] $FN4 = Ti - 4 \times N$ と定義する。FN4は、Bによる粒界強化の指標である。FN4が0以上である場合、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式(1)～式(3)及び式(5)を満たし、鋼材中のフェライト

面積率が40%以下であることを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び高サイクル曲げ疲労強度を十分に高めつつ、低サイクルの曲げ疲労強度も十分に高まり、かつ、鋼材において十分な被削性が得られる。

[0045] 以上の知見により完成した本実施形態の鋼材は、次の構成を有する。

[0046] [1]

化学組成が、質量%で、

C : 0.40~0.70%、

Si : 0.15~2.10%、

Mn : 0.30~1.15%、

Cr : 0.01~0.50%未満、

S : 0.005~0.070%、

N : 0.0020~0.0200%、

Ti : 0.0080~0.2000%、

B : 0.0005~0.0050%、

Al : 0.005~0.100%、及び、

P : 0.050%未満、を含有し、

残部がFe及び不純物からなり、式(1)~式(5)を満たし、

フェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10%以下である、

鋼材。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7 \text{ Mn}_\theta + 32.4 \text{ Cr}_\theta \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式（１）～式（４）中の各元素記号には、対応する元素の含有量（質量％）が代入され、対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「０」が代入され、式（５）中の Mn_θ にはセメントナイト中の Mn の濃度（質量％）が代入され、式（５）中の Cr_θ にはセメントナイト中の Cr の濃度（質量％）が代入される。

[0047] [2]

[1] に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、 Fe の一部に代えて、
 Mo ：１．００％以下、
 Ni ：１．００％以下、及び、
 Cu ：１．００％以下、からなる群から選択される１種以上を含有する、
鋼材。

[0048] [3]

[1] 又は [2] に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、 Fe の一部に代えて、
 Ca ：０．００５０％以下、
 Mg ：０．００５０％以下、
 Te ：０．２０％以下、及び、
希土類元素：０．００５０％以下、からなる群から選択される１種以上を
含有する、
鋼材。

[0049] [4]

[1] ～ [3] のいずれか１項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、 Fe の一部に代えて、
 Zr ：０．００５０％以下、
 Nb ：０．２０％以下、及び、
 V ：０．３５％以下、からなる群から選択される１種以上を含有する、

鋼材。

[0050] [5]

[1] ～ [4] のいずれか 1 項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、F e の一部に代えて、
S b : 0. 0 1 5 % 以下、を含有する、
鋼材。

[0051] [6]

[1] ～ [5] のいずれか 1 項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、F e の一部に代えて、
P b : 0. 0 9 % 以下、を含有する、
鋼材。

[0052] [7]

焼入れ硬化層と、
前記焼入れ硬化層よりも内部の芯部と、
を備え、
前記焼入れ硬化層は、
マルテンサイト面積率が 9 0 % 以上であり、
前記芯部は、
化学組成が、質量%で、
C : 0. 4 0 ～ 0. 7 0 %、
S i : 0. 1 5 ～ 2. 1 0 %、
M n : 0. 3 0 ～ 1. 1 5 %、
C r : 0. 0 1 ～ 0. 5 0 % 未満、
S : 0. 0 0 5 ～ 0. 0 7 0 %、
N : 0. 0 0 2 0 ～ 0. 0 2 0 0 %、
T i : 0. 0 0 8 0 ～ 0. 2 0 0 0 %、
B : 0. 0 0 0 5 ～ 0. 0 0 5 0 %、
A l : 0. 0 0 5 ～ 0. 1 0 0 %、及び、

P : 0.050%未満、を含有し、
 残部がFe及び不純物からなり、式(1)～式(5)を満たし、
 フェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10.0%以下である、
 部品。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入され、式(5)中の Mn_{θ} にはセメンタイト中のMnの濃度(質量%)が代入され、式(5)中の Cr_{θ} にはセメンタイト中のCrの濃度(質量%)が代入される。

[0053] [8]

[7]に記載の部品であって、
 前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
 Mo : 1.00%以下、
 Ni : 1.00%以下、及び、
 Cu : 1.00%以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
 部品。

[0054] [9]

[7]又は[8]に記載の部品であって、
 前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
 Ca : 0.0050%以下、

Mg : 0.0050%以下、
Te : 0.20%以下、及び、
希土類元素 : 0.0050%以下、からなる群から選択される1種以上を
含有する、
部品。

[0055] [10]

[7] ~ [9] のいずれか1項に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Zr : 0.0050%以下、
Nb : 0.20%以下、及び、
V : 0.35%以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
部品。

[0056] [11]

[7] ~ [10] のいずれか1項に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Sb : 0.015%以下、を含有する、
部品。

[0057] [12]

[7] ~ [11] のいずれか1項に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Pb : 0.09%以下、を含有する、
部品。

[0058] 以下、本実施形態の鋼材、及び、その鋼材を高周波焼入れして製造される、高周波焼入れ部品について詳述する。以降の説明において、元素に関する「%」は、特に断りが無い限り、質量%を意味する。

[0059] 本実施形態の鋼材は、高周波焼入れ部品の素材となる。本実施形態の鋼材を高周波焼入れして製造される部品を、本明細書では、「高周波焼入れ部品」という。高周波焼入れ部品は、高い面疲労強度や高い曲げ疲労強度が要求

される部品に好適である。

[0060] [鋼材について]

 [鋼材の化学組成]

本実施形態の鋼材は、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材である。本実施形態の鋼材の化学組成は、次の元素を含有する。

[0061] C : 0.40～0.70%

炭素 (C) は、鋼材を高周波焼入れして製造される高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を高める。C はさらに、鋼材中のフェライト面積率を低減する。この場合、高周波焼入れにおける焼入れ性を高め、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層深さを深くできる。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が高まる。C 含有量が 0.40% 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、C 含有量が 0.70% を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、被削性が低下する。したがって、C 含有量が 0.40～0.70% である。C 含有量の好ましい下限は 0.42% であり、さらに好ましくは 0.45% であり、さらに好ましくは 0.48% であり、さらに好ましくは 0.50% であり、さらに好ましくは 0.55% である。C 含有量の好ましい上限は 0.68% であり、さらに好ましくは 0.66% である。

[0062] Si : 0.15～2.10%

シリコン (Si) は、鋼材を高周波焼入れして製造される高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の焼戻し軟化抵抗を高める。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度を高める。Si 含有量が 0.15% 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、Si 含有量が 2.10% を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れ時において脱炭しやすくなる。この場合、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。したがって、Si 含有量は 0.15～2.10% である。Si 含有量の好ましい下限は 0.2

5%であり、さらに好ましくは0.35%であり、さらに好ましくは0.40%であり、さらに好ましくは0.45%であり、さらに好ましくは0.50%であり、さらに好ましくは0.51%であり、さらに好ましくは0.60%であり、さらに好ましくは0.65%であり、さらに好ましくは0.71%である。Si含有量の好ましい上限は2.00%であり、さらに好ましくは1.95%であり、さらに好ましくは1.86%であり、さらに好ましくは1.80%である。

[0063] Mn : 0.30~1.15%

マンガン(Mn)は、鋼の焼入れ性を高める。Mnはさらに、鋼材中の硫黄(S)と結合してMnSを形成し、鋼材の被削性を高める。さらに、Sを固定してSを無害化して、鋼材の熱間加工性を高める。Mn含有量が0.30%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、Mn含有量が1.15%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の硬さが高くなりすぎる。この場合、鋼材の被削性が低下する。Mn含有量が1.15%を超えればさらに、鋼材中のセメンタイトのMnが固溶して、セメンタイトの溶体化温度が高まる。この場合、高周波焼入れ工程において、鋼材中のセメンタイトが十分に固溶せず、セメンタイトの一部が溶け残る。その結果、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつき、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。したがって、Mn含有量は0.30~1.15%である。Mn含有量の好ましい下限は0.35%であり、さらに好ましくは0.38%であり、さらに好ましくは0.40%であり、さらに好ましくは0.45%であり、さらに好ましくは0.50%であり、さらに好ましくは0.55%であり、さらに好ましくは0.60%であり、さらに好ましくは0.65%である。Mn含有量の好ましい上限は1.10%以下であり、さらに好ましくは1.05%であり、さらに好ましくは1.00%以下であり、さらに好ましくは0.95%である。

[0064] Cr : 0.01~0.50%未満

クロム（C r）は、鋼の焼入れ性を高める。C rはさらに、鋼の熱間加工性を高める。C r含有量が0.01%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、C r含有量が0.50%以上であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、C rが鋼材中のセメンタイトに過剰に固溶して、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が高まる。この場合、高周波焼入れ工程において、鋼材中のセメンタイトが十分に固溶せず、セメンタイトの一部が溶け残る。その結果、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつき、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。C r含有量が0.01%未満であれば、上記効果が十分に得られない。一方、C r含有量が0.50%以上であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の硬さが高くなりすぎる。この場合、鋼材の被削性が低下する。したがって、C r含有量は0.01～0.50%未満である。C r含有量の好ましい下限は0.02%であり、さらに好ましくは0.03%であり、さらに好ましくは0.05%であり、さらに好ましくは0.07%であり、さらに好ましくは0.10%である。C r含有量の好ましい上限は0.45%であり、さらに好ましくは0.40%であり、さらに好ましくは0.35%であり、さらに好ましくは0.32%であり、さらに好ましくは0.30%である。

[0065] S : 0.005～0.070%

硫黄（S）は鋼材中のM nと結合してM n Sを形成し、鋼材の被削性を高める。S含有量が0.005%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、S含有量が0.070%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が低下する。S含有量が0.070%を超えればさらに、高周波焼入れ部品に対して磁粉探傷試験を実施する場合、高周波焼入れ部品の表面に擬似模様が発生しやすくなり、探傷精度が低下する。したがって、S含有量は、0.005%～0.070%である。S含有量の好ましい下限は0.007%であり、さらに好ましくは0.010%であり

、さらに好ましくは0.012%であり、さらに好ましくは0.014%である。S含有量の好ましい上限は0.065%であり、さらに好ましくは0.060%であり、さらに好ましくは0.055%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.045%であり、さらに好ましくは0.040%であり、さらに好ましくは0.035%であり、さらに好ましくは0.030%である。

[0066] N : 0.0020~0.0200%

窒素(N)は、鋼材中のAl等の窒化物生成元素と結合して窒化物を形成する。窒化物は、高周波焼入れ工程において、オーステナイトを細粒化する。その結果、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。N含有量が0.0020%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、N含有量が0.0200%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の熱間加工性が低下する。したがって、N含有量は0.0020~0.0200%である。N含有量の好ましい下限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0033%であり、さらに好ましくは0.0035%であり、さらに好ましくは0.0038%である。N含有量の好ましい上限は0.0195%であり、さらに好ましくは0.0150%であり、さらに好ましくは0.0130%であり、さらに好ましくは0.0100%である。

[0067] Ti : 0.0080~0.2000%

チタン(Ti)は、Nと結合して窒化物を形成する。これにより、BがNと結合してB窒化物が形成されるのを抑制する。この場合、Bが粒界に偏析して粒界強度を高める。その結果、高周波焼入れ部品の特に低サイクル曲げ疲労強度を高める。Ti含有量が0.008%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、Ti含有量が0.2000%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材が脆化して、熱間加工性が低下する。したがって、T

i 含有量は、0.0080～0.2000%である。Ti 含有量の好ましい下限は0.0085%であり、さらに好ましくは0.0090%であり、さらに好ましくは0.0095%であり、さらに好ましくは0.0100%であり、さらに好ましくは0.0150%であり、さらに好ましくは0.0200%である。Ti 含有量の好ましい上限は0.1900%であり、さらに好ましくは0.1850%であり、さらに好ましくは0.1800%であり、さらに好ましくは0.1700%であり、さらに好ましくは0.1500%であり、さらに好ましくは0.1000%であり、さらに好ましくは0.0600%である。

[0068] B : 0.0005～0.0050%

ボロン (B) は、固溶Bとして鋼材中の粒界に偏析して、粒界強度を高める。この場合、高周波焼入れ部品の特に、低サイクル曲げ疲労強度が高まる。B含有量が0.0005%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、B含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材が脆化する。この場合、熱間加工性が低下する。したがって、B含有量は、0.0005～0.0050%である。B含有量の好ましい下限は0.0007%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0012%であり、さらに好ましくは0.0014%である。B含有量の好ましい上限は0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0035%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0028%である。

[0069] Al : 0.005～0.100%

アルミニウム (Al) は、Nと結合して窒化物を形成する。窒化物は、高周波焼入れ工程において、オーステナイトを細粒化する。その結果、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。Alはさらに、鋼材の焼入れ性を高める。そのため、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の硬化層深さを深くする。Alはさらに、鋼材の被削性を高める。Al含有量が0.005%未満であ

れば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。一方、Al含有量が0.100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れ工程において、高周波加熱時にオーステナイト変態が完了しにくくなる。この場合、鋼材の焼入れ性が低下する。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。したがって、Al含有量は0.005~0.100%である。Al含有量の好ましい下限は0.010%であり、さらに好ましくは0.012%であり、さらに好ましくは0.015%であり、さらに好ましくは0.018%であり、さらに好ましくは、0.020%である。Al含有量の好ましい上限は0.090%であり、さらに好ましくは0.080%であり、さらに好ましくは0.070%であり、さらに好ましくは0.060%であり、さらに好ましくは0.050%である。

[0070] P: 0.050%未満

燐(P)は不可避に含有される不純物である。つまり、P含有量は0%超である。Pは、鋼材の靱性を低下する。P含有量が0.050%以上であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の靱性が顕著に低下する。P含有量が0.050%以上であればさらに、高周波焼入れ部品の使用中に、高周波焼入れ部品に発生したき裂の伝播を促進する。この場合、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が低下する。したがって、P含有量は0.050%未満である。P含有量の好ましい上限は0.045%であり、さらに好ましくは0.040%であり、さらに好ましくは0.035%である。P含有量はなるべく低い方が好ましい。ただし、脱燐処理は時間とコストが掛かる。したがって、工業生産性を考慮すれば、P含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.002%であり、さらに好ましくは0.005%である。

[0071] 本実施の形態による鋼材の化学組成の残部は、Fe及び不純物からなる。ここで、不純物とは、鋼材を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップ、又は製造環境などから混入されるものであって、本実施形態の鋼

材に悪影響を与えない範囲で許容されるものを意味する。

[0072] [任意元素 (optional elements) について]

本実施形態の鋼材はさらに、Feの一部に代えて、Mo、Ni、及び、Cuからなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素はいずれも、鋼材の焼入れ性を高める。

[0073] Mo : 1.00%以下

モリブデン (Mo) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Mo含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Mo含有量が0%超である場合、Moは鋼材の焼入れ性を高める。Moはさらに、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の焼戻し軟化抵抗を高め、高周波焼入れ部品の面疲労強度を高める。Moが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Mo含有量が1.00%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、その効果が飽和する。したがって、Mo含有量は1.00%以下である。つまり、Mo含有量は0~1.00%である。Mo含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.05%であり、さらに好ましくは0.10%である。Mo含有量の好ましい上限は0.60%であり、さらに好ましくは0.40%であり、さらに好ましくは0.30%である。

[0074] Ni : 1.00%以下

ニッケル (Ni) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ni含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Ni含有量が0%超である場合、Niは鋼材の焼入れ性を高める。Niはさらに、酸化するときに鋼材の表面に濃化して、鋼材の酸化反応を抑制する。Niが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Ni含有量が1.00%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の被削性が低下する。したがって、Ni含有量は1.00%以下である。つまり、Ni含有量は0~1.00%である。Ni含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.05%であり、さらに好ましく

は0.10%である。Ni含有量の好ましい上限は0.80%であり、さらに好ましくは0.60%である。

[0075] Cu: 1.00%以下

銅(Cu)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Cu含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Cu含有量が0%超である場合、Cuは、酸化するときに鋼材の表面に濃化して、鋼材の酸化反応を抑制する。Cuが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Cu含有量が1.00%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼材の熱間加工性が低下する。したがって、Cu含有量は、1.00%以下である。つまり、Cu含有量は0~1.00%である。Cu含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.05%であり、さらに好ましくは0.10%である。Cu含有量の好ましい上限は0.80%であり、さらに好ましくは0.60%である。

[0076] 本実施形態の鋼材はさらに、Feの一部に代えて、Ca、Mg、Te、及び、希土類元素(REM)からなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素はいずれも、高サイクルの曲げ疲労強度を高める。

[0077] Ca: 0.0050%以下

カルシウム(Ca)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ca含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Ca含有量が0%超である場合、Caは、MnSに固溶してMnSを微細化し、又は、MnSの延伸化を抑制する。そのため、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。Caが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Ca含有量が0.0050%を超えれば、鋼材の熱間加工性が低下する。したがって、Ca含有量は0.0050%以下である。つまり、Ca含有量は、0~0.0050%である。Ca含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。Ca含有量の好ましい上限は0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.003

0%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0078] Mg : 0.0050%以下

マグネシウム(Mg)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Mg含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Mg含有量が0%超である場合、MgはMnSに固溶してMnSを微細化し、又は、MnSの延伸化を抑制する。そのため、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。Mgが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Mg含有量が0.0050%を超えれば、鋼材の熱間加工性が低下する。したがって、Mg含有量は0.0050%以下である。つまり、Mg含有量は、0~0.0050%である。Mg含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。Mg含有量の好ましい上限は、0.00048%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0079] Te : 0.20%以下

テルル(Te)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Te含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Te含有量が0%超である場合、TeはMnSに固溶してMnSを微細化し、又は、MnSの延伸化を抑制する。そのため、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。Teが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Te含有量が0.20%を超えれば、鋼材の熱間加工性が低下する。したがってTe含有量は0.20%以下である。つまり、Te含有量は、0~0.20%である。Te含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.05%である。Te含有量の好ましい上限は0.18%であり、さらに好ましくは0.15%であり、さらに好ましくは0.10%である。

[0080] 希土類元素(REM) : 0.0050%以下

希土類元素(REM)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり

、REM含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、REM含有量が0%超である場合、REMは、MnSに固溶してMnSを微細化し、又は、MnSの延伸化を抑制する。そのため、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が高まる。REMが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、REM含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、酸化物及び硫化物からなる複合酸化物の生成が促進され、複合酸化物が粗大化する。この場合、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度が低下する。したがって、REM含有量は0.0050%以下である。つまり、REM含有量は、0~0.0050%である。REM含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。REM含有量の好ましい上限は0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%である。

[0081] なお、本明細書におけるREMとは、原子番号21番のスカンジウム（Sc）、原子番号39番のイットリウム（Y）、及び、ランタノイドである原子番号57番のランタン（La）～原子番号71番のルテチウム（Lu）からなる群から選択される1種以上の元素である。また、本明細書におけるREM含有量とは、これら元素の合計含有量である。

[0082] 本実施形態の高周波焼入れ用鋼はさらに、Feの一部に代えて、Zr、Nb及びVからなる群から選択される1種以上を含有してもよい。

[0083] Zr：0.0050%以下

ジルコニウム（Zr）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Zr含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Zr含有量が0%超である場合、Zrは、Nと結合して窒化物を形成する。この窒化物は、高周波焼入れ工程において、オーステナイトを細粒化する。その結果、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度を高める。Zr含有量が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Zr含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、粗大

な析出物を生成して、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度がかえって低下する。Zr含有量が0.0050%を超えればさらに、鋼材が脆化する。したがって、Zr含有量は0.0050%以下である。つまり、Zr含有量は、0~0.0050%である。Zr含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。Zr含有量の好ましい上限は0.0048%であり、さらに好ましくは0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%である。

[0084] Nb : 0.20%以下

ニオブ(Nb)は、任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Nb含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Nb含有量が0%超である場合、Nbは、Nと結合して窒化物を形成する。この窒化物は、高周波焼入れ工程において、オーステナイトを細粒化する。その結果、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度を高める。Nb含有量が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Nb含有量が0.20%を超えれば、その効果は飽和する。したがって、Nb含有量は0.20%以下である。つまり、Nb含有量は、0~0.20%である。Nb含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.05%である。Nb含有量の好ましい上限は0.19%であり、さらに好ましくは0.18%であり、さらに好ましくは0.15%である。

[0085] V : 0.35%以下

バナジウム(V)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、V含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、V含有量が0%超である場合、つまり、V含有量が0%超である場合、Vは、Nと結合して窒化物を形成する。この窒化物は、高周波焼入れ工程において、オーステナイトを細粒化する。その結果、高周波焼入れ部品の曲げ疲労強度を高める。Zr含有量が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしな

がら、V含有量が0.35%を超えれば、その効果は飽和する。したがって、V含有量は0.35%以下である。つまり、V含有量は、0~0.35%である。V含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.05%である。V含有量の好ましい上限は0.30%であり、さらに好ましくは0.25%である。

[0086] 本実施形態の高周波焼入れ用鋼はさらに、Feの一部に代えて、Sbを含有してもよい。

[0087] Sb : 0.015%以下

アンチモン (Sb) は、任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Sb含有量は0%であってもよい。含有される場合、つまり、Sb含有量が0%超である場合、Sbは、鋼材の表面に偏析して、鋼材の酸化を抑制する。Sbが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Sb含有量が0.015%を超えれば、鋼材の靱性及び熱間加工性が低下する。したがって、Sb含有量は0.015%以下である。つまり、Sb含有量は、0~0.015%である。Sb含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.003%であり、さらに好ましくは0.005%である。Sb含有量の好ましい上限は0.014%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.008%である。

[0088] 本実施形態の高周波焼入れ用鋼はさらに、Feの一部に代えて、Pbを含有してもよい。

[0089] Pb : 0.09%以下

鉛 (Pb) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Pb含有量は0%であってもよい。含有される場合、Pbは鋼材の被削性を高める。Pbが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Pb含有量が0.09%を超えれば、鋼材の靱性及び熱間加工性が低下する。したがって、Pb含有量は0.09%以下である。つまり、Pb含有量は0~0.09%である。Pb含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%である。Pb含有量の好ましい上限は0.08

%であり、さらに好ましくは0.07%である。

[0090] [式(1)～式(5)について]

本実施形態の鋼材は、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、かつ、次の式(1)～式(5)を満たす。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入され、対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「0」が代入され、式(5)中の Mn_{θ} にはセメンタイト中のMnの濃度(質量%)が代入され、式(5)中の Cr_{θ} にはセメンタイト中のCrの濃度(質量%)が代入される。

以下、式(1)～式(5)について説明する。

[0091] [式(1)について]

本実施形態の鋼材は、式(1)を満たす。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入される。

[0092] $FN1 = 290C + 50Si + 430$ と定義する。FN1は、鋼表面の硬さの指標である。FN1は、高周波焼入れ後300℃で焼戻した高周波焼入れ部品の表面のビッカース硬さ(300℃焼戻し硬さ)にほぼ相当する。高周波焼入れ部品の面疲労強度は、300℃焼戻し硬さと正の相関がある。したがって、300℃焼戻し硬さが十分に高めれば、高周波焼入れ部品が優れ

た面疲労強度を示す。F N 1 が 6 3 1 . 0 以上であれば、鋼材の化学組成中の各元素含有量が本実施形態の範囲内であり、かつ、式 (2) ~ 式 (5) を満たし、かつ、フェライト面積率が 4 0 % 以下であることを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品において、十分な面疲労強度が得られる。一方、F N 1 が 6 3 1 . 0 未満であれば、高周波焼入れ部品の面疲労強度が低下し、ピッチングが生じる場合がある。したがって、F N 1 は 6 3 1 . 0 以上である。F N 1 の好ましい下限は 6 3 5 . 0 であり、さらに好ましくは 6 3 8 . 0 であり、さらに好ましくは 6 4 0 . 0 であり、さらに好ましくは 6 4 2 . 0 であり、さらに好ましくは 6 4 4 . 0 である。F N 1 N 上限は特に限定されない。しかしながら、上述の化学組成の場合、F N 1 の好ましい上限は 7 3 8 . 0 であり、さらに好ましくは 7 0 0 . 0 であり、さらに好ましくは 6 8 0 . 0 であり、さらに好ましくは 6 6 5 . 0 である。

[0093] [式 (2) について]

本実施形態の鋼材はさらに、式 (2) を満たす。

$$C + (1/7) Si + (1/5) Mn + (1/9) Cr + V + (1/25) Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

ここで、式 (2) 中の各元素記号には、対応する元素の含有量 (質量 %) が代入される。対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「 0 」が代入される。

[0094] $F N 2 = C + (1/7) Si + (1/5) Mn + (1/9) Cr + V + (1/25) Mo$ と定義する。F N 2 は、鋼材の硬さの指標である。F N 2 が 0 . 9 0 0 を超えれば、鋼材の被削性が低下する。F N 2 が 0 . 9 0 0 以下であれば、鋼材の化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式 (1) 、式 (3) ~ 式 (5) を満たし、鋼材中のフェライト面積率が 4 0 % 以下であることを前提として、鋼材の被削性が十分に高くなる。したがって、F N 2 は 0 . 9 0 0 以下である。F N 2 の好ましい上限は 0 . 8 9 5 であり、さらに好ましくは 0 . 8 9 0 であり、さらに好ましくは 0 . 8 8 5 である。

F N 2 の好ましい下限は 0.483 であり、さらに好ましくは 0.600 であり、さらに好ましくは 0.700 であり、さらに好ましくは 0.750 であり、さらに好ましくは 0.800 である。

[0095] [式 (3) について]

本実施形態の鋼材はさらに、式 (3) を満たす。

$$(1 + 0.7 Si) \times (1 + 3.3333 Mn) \times (1 + 2.16 Cr) \\ \times (1 + 3.00 Mo) \times (1 + 1.73 V) \times (1 + 0.365 Cu) \times \\ (1 + 0.363 Ni) \times (2.616 - 1.6 C) \geq 5.80 \quad (3)$$

ここで、式 (3) 中の各元素記号には、対応する元素の含有量 (質量%) が代入される。対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「0」が代入される。

[0096] $F N 3 = (1 + 0.7 Si) \times (1 + 3.3333 Mn) \times (1 + 2.16 Cr) \times (1 + 3.00 Mo) \times (1 + 1.73 V) \times (1 + 0.365 Cu) \times (1 + 0.363 Ni) \times (2.616 - 1.6 C)$ と定義する。
F N 3 は、鋼材の焼入れ性の指標である。F N 3 が 5.80 未満である場合、鋼材の焼入れ性が十分ではない。この場合、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層での不完全焼入れ組織が生成する。そのため、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度を低下する。F N 3 が 5.80 以上であれば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、かつ、式 (1)、式 (2)、式 (4) 及び式 (5) を満たし、フェライト面席率が 40% 以下であることを前提として、高周波焼入れ部品において、十分な面疲労強度及び十分な曲げ疲労強度が得られる。F N 3 の好ましい下限は 5.85 であり、さらに好ましくは 5.90 であり、さらに好ましくは 5.95 であり、さらに好ましくは 6.00 であり、さらに好ましくは 6.05 である。F N 3 の好ましい上限は、70.00 であり、さらに好ましくは 60.00 であり、さらに好ましくは 50.00 であり、さらに好ましくは 45.00 であり、さらに好ましくは 40.00 であり、さらに好ましくは 35.00 である。

[0097] [式 (4) について]

本実施形態の鋼材はさらに、式（４）を満たす。

$$T i - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

ここで、式（４）中の各元素記号には、対応する元素の含有量（質量％）が代入される。

[0098] $FN4 = Ti - 4 \times N$ と定義する。 $FN4$ は、 B による粒界強化の指標である。 $FN4$ が０未満であれば、 N を固定する Ti 量が十分でない。この場合、 N が B と結合して、 BN が生成し、固溶 B 量が低下する。そのため、固溶 B による粒界強化が十分でなく、高周波焼入れ部品の、特に低サイクルの曲げ疲労強度が低下する。一方、 $FN4$ が０以上であれば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式（１）～式（３）及び式（５）を満たし、鋼材中のフェライト面積率が４０％以下であることを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び高サイクル曲げ疲労強度を十分に高めつつ、低サイクルの曲げ疲労強度も十分に高まる。 $FN4$ の好ましい下限は０．００１であり、さらに好ましくは０．００２であり、さらに好ましくは０．００３である。

[0099] [式（５）について]

本実施形態の鋼材はさらに、式（５）を満たす。

$$9.7 Mn_{\theta} + 32.4 Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式（５）中の Mn_{θ} は、セメンタイト中の Mn 濃度（質量％）が代入される。式（５）中の Cr_{θ} は、セメンタイト中の Cr 濃度（質量％）が代入される。

[0100] $FN5 = 9.7 Mn_{\theta} + 32.4 Cr_{\theta}$ と定義する。 $FN5$ は、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度の指標である。 $FN5$ が大きいほど、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が高まる。そのため、鋼材に対して高周波焼入れを実施した場合、セメンタイトが溶け残りやすくなり、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつきやすくなる。 $FN5$ が２５．９を超えれば、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が過剰に高くなる。そのため、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さがばらつきやすくなる。その結果、

高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が十分に得られない。一方、 $FN5$ が25.9以下であれば、鋼材中のセメンタイトの溶体化温度が十分に低く、その結果、高周波焼入れにおいて、鋼材中のセメンタイトが十分に固溶する。そのため、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さのばらつきが抑えられ、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が十分に高まる。したがって、 $FN5$ は25.9以下である。

[0101] $FN5$ の好ましい上限は22.0であり、さらに好ましくは21.0であり、さらに好ましくは20.0である。 $FN5$ の好ましい下限は1.0であり、さらに好ましくは1.5であり、さらに好ましくは2.0であり、さらに好ましくは2.5である。

[0102] [セメンタイト中のMn濃度及びCr濃度の測定方法]

鋼材中のセメンタイト中のMn濃度（質量％）及びCr濃度（質量％）は電解抽出残渣により測定する。具体的には、次の方法で測定する。鋼材の任意の位置から、試験片を採取する。試験片に対して、10％AA系電解液を用いて、定電流電気分解を実施する。10％AA系電解液とテトラメチルアンモニウムクロライド、アセチルアセトン、メタノールを体積分率で1：10：100で混合した液体を意味する。

[0103] 定電流電解後、メッシュサイズ0.2 μm のフィルターで吸引ろ過して残渣を採取する。採取された残渣に対して、酸分解処理を実施する。酸分解処理後、ICP-AES（高周波誘導結合プラズマ原子分光分析）を行って、残渣中のFe、Cr、Mnの質量を測定する。残渣中の金属炭化物は無視できるほど少ない。したがって、残渣は全て M_3C 型の炭化物、つまり、セメンタイトであると仮定する。得られた残渣中のFe質量、Cr質量、及びMn質量に基づいて、セメンタイトを100質量％とした場合の、セメンタイト中に固溶しているMn濃度 Mn_0 （質量％）、及び、Cr濃度 Cr_0 （質量％）を算出する。

[0104] [鋼材中のミクロ組織について]

本実施形態の鋼材ではさらに、ミクロ組織において、フェライト面積率が

40%以下であり、かつ、マルテンサイト面積率が10%以下である。高周波加熱での鋼材中の固溶C量には、鋼材中のフェライト面積率が影響する。高周波焼入れでは、熱処理炉を用いた浸炭処理等よりも、加熱時間が短い。そのため、鋼材を加熱中のCの拡散時間も短くなる。この場合、セメンタイト等の炭化物が固溶する時間も短くなる。その結果、鋼材中のフェライト面積率が高くなりやすい。鋼材中のフェライト面積率が高すぎると、高周波焼入れ後の組織にフェライトが過剰に残存してしまう。フェライト面積率が高すぎればさらに、高周波焼入れ後の組織において、低炭素マルテンサイトが生成する。フェライトが残存したり、低炭素マルテンサイトが生成したりすれば、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面において、硬さがばらつく。鋼材中のフェライト面積率が40%を超えれば、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面において、硬さがばらつく。その結果、高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の面疲労強度及び曲げ疲労強度が低下する。一方、フェライト面積率が40%以下であれば、化学組成中の各元素含有量が上述の範囲内であり、式(1)～式(5)を満たすことを前提として、その鋼材を高周波焼入れして製造される高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層の表面の硬さのばらつきを十分に抑制できる。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び曲げ疲労強度が十分に高まる。

[0105] なお、上述のフェライト面積率(%)はポリゴナルフェライトの面積率(%)を意味する。本実施形態において、ミクロ組織のうち、フェライト以外の残部は、マルテンサイト及び／又はパーライトである。マルテンサイト面積率は10%以下である。マルテンサイトの面積率が10%以下であれば、鋼材が過剰に硬くなるのを抑制できる。そのため、鋼材の被削性が低下するのを抑制できる。なお、本明細書において「マルテンサイト」とは、マルテンサイトだけでなく、ベイナイトも含む。マルテンサイト及びベイナイトは、ミクロ組織観察において区別が極めて困難である。したがって、本明細書においては、マルテンサイト及びベイナイトを「マルテンサイト」を称する。マルテンサイト面積率の好ましい上限は7%であり、さらに好ましくは5

%であり、さらに好ましくは4%である。

[0106] [フェライト面積率及びマルテンサイト面積率の測定方法]

鋼材中のフェライト面積率(%)は次の方法で求めることができる。鋼材の任意の位置からミクロ組織観察用の試験片を採取する。試験片の表面のうち、鋼材の長手方向(軸方向)に垂直な断面(以下、観察面という)を研磨する。ナイトール腐食液を用いて、研磨後の観察面をエッチングする。エッチングされた観察面を400倍の光学顕微鏡で観察して、写真画像を生成する。写真画像において、フェライトを特定する。具体的には、ラメラ構造を有する相をパーライトと特定できる。パーライトよりも明度が高い領域(白い領域)をフェライトと特定できる。フェライト及びパーライトよりも明度が低い領域(濃い領域)をマルテンサイトと特定できる。特定されたフェライトの面積率を、JIS G 0555(2003)に準拠した点算法で測定する。測定された面積率を鋼材中のフェライト面積率(%)と定義する。さらに、特定されたマルテンサイトの面積率を、上述の点算法で測定する。測定された面積率を鋼材中のマルテンサイトの面積率(%)と定義する。

[0107] 本実施形態の鋼材は、化学組成中の各元素含有量が本実施形態の範囲内であり、かつ、式(1)～式(5)を満たし、かつ、鋼材中のフェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10%以下である。そのため、その鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品の面疲労強度及び高サイクル曲げ疲労強度を十分に高めつつ、低サイクルの曲げ疲労強度も十分に高まり、かつ、鋼材において十分な被削性が得られる。

[0108] [高周波焼入れ部品について]

本実施形態の高周波焼入れ部品は、本実施形態の鋼材を素材とする。具体的には、本実施形態の高周波焼入れ部品は、本実施形態の鋼材を高周波焼入れして製造される。高周波焼入れ部品はたとえば、ディファレンシャルギアに代表される動力伝達部品として用いられる。

[0109] 高周波焼入れ部品は、部品全体が高周波焼入れ処理されている部品だけでなく、一部のみ高周波焼入れ処理された部品も含む。つまり、本明細書では

、高周波焼入れ部品は、高周波焼入れされた部分である焼入れ部と、高周波焼入れされていない部分である未焼入れ部とを含んでもよい。なお、部品全体が高周波焼入れ処理されている場合、部品全体が焼入れ部に相当する。

[0110] 本実施形態の高周波焼入れ部品は、焼入れ硬化層と、芯部とを備える。焼入れ硬化層は、高周波焼入れ部品の（焼入れ部の）表層に形成されている。焼入れ硬化層は高周波焼入れを実施して形成される。芯部は、高周波焼入れ部品のうち、焼入れ硬化層よりも内部の部分であり、高周波焼入れの影響を受けていない部分である。

[0111] [焼入れ硬化層について]

焼入れ硬化層のミクロ組織では、マルテンサイト面積率が90%以上である。ミクロ組織の残部はフェライトである。なお、本明細書において、マルテンサイトは、焼戻しマルテンサイトも含み、さらに、ベイナイトも含む。マルテンサイトはラス内の炭化物がほぼ存在しない。一方で、焼戻しマルテンサイト及びベイナイトは、ラス内及びラス界面に多数の析出物が存在する。しかしながら、本明細書において、両者を厳密に区分せず、全て、「マルテンサイト」とみなす。焼入れ硬化層のミクロ組織の残部は、フェライトである。

[0112] 焼入れ硬化層のミクロ組織は、次の方法で求めることができる。高周波焼入れ部品において、JIS G 0559（2008）で定義される有効硬化層中からサンプルを採取する。サンプルの表面（観察面という）を鏡面に研磨した後、ナイトール腐食液に浸漬して、エッチングによる組織現出を行う。エッチングした観察面を400倍の光学顕微鏡で観察して、写真画像を生成する。観察面のうち、任意の3視野を観察する。各視野の面積は $130\mu\text{m} \times 260\mu\text{m}$ とする。各視野において、マルテンサイト、フェライト、パーライト等の各相は、コントラストから区別できる。具体的には、ナイトール腐食液で観察面を腐食した場合、ラメラ構造を有する相をパーライトと特定できる。パーライトよりも明度が高い領域（白い領域）をフェライトと特定できる。フェライト及びパーライトよりも明度が低い領域（濃い領域）

をマルテンサイトと特定できる。各視野のマルテンサイトの面積を求める。
3つの視野のマルテンサイトの総面積と、各視野の総面積とに基づいて、マルテンサイト面積率（％）を定義する。

[0113] なお、焼入れ硬化層の化学組成は、本実施形態の鋼材と同じである。つまり、焼入れ硬化層の化学組成中の各元素含有量は本実施形態の範囲内であり、式（１）～式（４）を満たす。

[0114] [芯部について]

芯部は、高周波焼入れ部品のうち、焼入れ硬化層よりも内部の部分であって、高周波焼入れの影響を受けていない部分である。芯部の化学組成及びミクロ組織は、本実施形態の鋼材の化学組成及びミクロ組織と同じである。つまり、芯部は、化学組成中の各元素含有量が本実施形態の範囲内であり、式（１）～式（５）を満たし、ミクロ組織におけるフェライト面積率が４０％以下であり、ミクロ組織の残部がパーライト及び／又はマルテンサイトである。マルテンサイト面積率は１０％以下である。

[0115] なお、芯部の化学組成、ミクロ組織中のフェライト面積率、セメンタイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} は、次の方法で求める。JIS G 0559（2008）で定義される有効硬化層よりも内部の部分を、芯部と定義する。高周波焼入れ部品の芯部からサンプルを採取する。採取されたサンプルを用いて、周知の成分分析法を実施する。具体的には、ドリルを用いて、サンプルから切粉を生成し、その切粉を採取する。採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得る。溶液に対して、ICP-AES（Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry）を実施して、化学組成の元素分析を実施する。C含有量及びS含有量については、周知の高周波燃焼法（燃焼－赤外線吸収法）により求める。N含有量については、周知の不活性ガス溶融－熱伝導度法を用いて求める。さらに、サンプルを用いて、本実施形態の鋼材と同じ方法で、ミクロ組織中のフェライト面積率、及び、セメンタイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} を求める。

[0116] なお、上述のとおり、本実施形態の高周波焼入れ部品は、部品全体が高周波焼入れされていてもよいし、一部が高周波焼入れされており、他の部分が高周波焼入れされていなくてもよい。要するに、高周波焼入れ部品は、高周波焼入れされた部分が含まれていればよい。高周波焼入れ部品のうち、高周波焼入れされた部分を「焼入れ部」と称し、高周波焼入れされていない部分を「未焼入れ部」と称する。後述のとおり、高周波焼入れ部品の素材となる鋼材は、焼準処理を実施して製造される。焼準処理されて製造された鋼材は、その後、表面を機械加工（切削加工等）される。そのため、機械加工後の鋼材の表面は金属光沢を有する。機械加工された鋼材の一部に対して高周波焼入れを実施して、高周波焼入れ部品を製造する。したがって、高周波焼入れ部品の焼入れ部の表面は、高周波焼入れ時の加熱により変色している（色が付いている）。一方、高周波焼入れ部品の未焼入れ部の表面は、金属光沢を維持している。したがって、当業者であれば、高周波焼入れ部品の外観を観察すれば、焼入れ部と未焼入れ部とを容易に区別可能である。なお、焼入れ部は、上述の焼入れ硬化層と、芯部とを含む。

[0117] 本実施形態の高周波焼入れ部品は、本実施形態の鋼材を高周波焼入れして製造される。そのため、面疲労強度、及び、高サイクルの曲げ疲労強度に優れる。さらに、低サイクルの曲げ疲労強度にも優れる。

[0118] [製造方法]

以下、本実施形態の鋼材の製造方法の一例を説明する。なお、本実施形態の鋼材が上述の構成を有すれば、以下に説明する製造方法に限定されない。ただし、以下に説明する製造方法は、本実施形態の鋼材を製造する好適な一例である。

[0119] 本実施形態の鋼材の製造方法は、素材準備工程と、熱間加工工程と、焼準処理工程とを実施する。以下、各工程について詳述する。

[0120] [素材準備工程]

素材準備工程では、化学組成中の各元素含有量が本実施形態の範囲内であり、かつ、式（１）～式（４）を満たす素材を準備する。具体的には、化学

組成中の各元素含有量が本実施形態の範囲内であり、かつ、式（１）～式（４）を満たす溶鋼を製造する。製造された溶鋼を用いて、周知の鑄造方法により鑄片（スラブ又はブルーム）又は鋼塊（インゴット）を製造する。以上の工程により、素材（鑄片又はインゴット）を製造する。

[0121] 〔熱間加工工程〕

熱間加工工程では、素材（鑄片又は鋼塊）に対して、熱間加工を実施して、中間鋼材を製造する。中間鋼材はたとえば、棒鋼及び線材である。

[0122] 熱間加工は、粗圧延工程と、仕上げ圧延工程とを含む。粗圧延工程では、素材を熱間加工してビレットを製造する。粗圧延工程はたとえば、分塊圧延機を用いる。分塊圧延機により素材に対して分塊圧延を実施して、ビレットを製造する。分塊圧延機の下流に連続圧延機が設置されている場合、分塊圧延後のビレットに対してさらに、連続圧延機を用いて熱間圧延を実施して、さらにサイズの小さいビレットを製造してもよい。連続圧延機では、一對の水平ロールを有する水平スタンドと、一對の垂直ロールを有する垂直スタンドとが交互に一行に配列される。以上の工程により、粗圧延工程では、素材をビレットに製造する。粗圧延工程での加熱温度は特に限定されないが、たとえば、 $1100\sim1300^{\circ}\text{C}$ である。

[0123] 仕上げ圧延工程では、加熱炉又は均熱炉を用いてビレットを加熱する。加熱後のビレットに対して、連続圧延機を用いて熱間圧延を実施して鋼材（棒鋼）を製造する。仕上げ圧延温度での加熱温度は特に限定されないが、たとえば、 $1000\sim1300^{\circ}\text{C}$ である。また、仕上げ圧延温度は特に限定されないが、たとえば、 $900\sim1100^{\circ}\text{C}$ である。仕上げ圧延後、冷却して中間鋼材を製造する。

[0124] なお、上述の熱間加工工程の説明では、熱間圧延工程を例として説明した。しかしながら、本実施形態の鋼材は、熱間加工工程として、熱間圧延工程に代えて、熱間鍛造工程を実施してもよい。さらに、熱間加工工程として、熱間圧延工程と、熱間圧延工程後に熱間鍛造工程とを実施してもよい。本実施形態の鋼材の形状は、棒鋼や線材であってもよいし、熱間鍛造により形成

された所定の形状を有していてもよい。

[0125] [焼準処理工程]

焼準処理工程では、熱間加工工程で製造された中間鋼材に対して焼準処理を実施して、式（５）を満たす鋼材を製造する。

[0126] 具体的には、中間鋼材を熱処理炉（焼準炉）に装入する。そして、中間鋼材を $800\sim 950^{\circ}\text{C}$ の焼準温度で $30\text{分}\sim 2\text{時間}$ 保持する。保持後の中間鋼材を熱処理炉から抽出し、冷却する。このとき、セメンタイトの生成温度域である $700\sim 300^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における平均冷却速度 CR を $0.10\sim 1.00^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ とする。平均冷却速度 CR が $0.10^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 未満である場合、セメンタイト中の Mn 濃度 Mn_{θ} 及び Cr 濃度 Cr_{θ} が増加して、 $FN5$ が式（５）を満たさなくなる。一方、平均冷却速度 CR が $1.00^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ を超えれば、鋼材中のミクロ組織において、マルテンサイトの面積率が増大して、被削性が低下する。 $700\sim 300^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における平均冷却速度 CR を $0.10\sim 1.00^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ であれば、セメンタイト中の Mn 濃度 Mn_{θ} 及び Cr 濃度 Cr_{θ} 抑えられ、その結果、 $FN5$ が式（５）を満たす。

[0127] 以上の製造工程により、本実施形態の鋼材が製造される。つまり、本実施形態の鋼材は、平均冷却速度 CR が $0.10\sim 1.00^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ となる焼準処理を実施して製造される。

[0128] [高周波焼入れ部品の製造方法]

本実施形態の高周波焼入れ部品の製造方法の一例は次のとおりである。

[0129] 本実施形態の高周波焼入れ部品の製造方法は、必要に応じて実施する鍛造工程と、機械加工工程と、高周波焼入れ工程と、焼戻し工程とを含む。

[0130] [機械加工工程]

機械加工工程では、中間部材に対して、切削加工又は穿孔加工を実施して形状を付与する。機械加工を実施することにより、精密形状を鋼材に付与することができる。

[0131] [高周波焼入れ工程]

高周波焼入れ工程では、機械加工工程後の鋼材に対して、高周波焼入れを

実施し、高周波焼入れ部品を製造する。

[0132] 高周波焼入れは周知の方法を実施すればよい。たとえば、高周波焼入れでは、焼入れ温度（最高加熱温度）を850～1100℃とする。焼入れ温度が850℃以上であれば、鋼材に対して十分な焼入れを実施することができる。この場合、焼入れ硬化層が形成される。焼入れ温度での保持時間は特に限定されないが、たとえば、0.5～60秒が好ましい。

[0133] [焼戻し工程]

高周波焼入れ工程後の鋼材に対して、周知の焼戻し工程を実施する。焼戻し温度はたとえば、100～200℃である。焼戻し温度での保持時間はたとえば、90～150分である。

[0134] 以上の工程により、上述の構成を有する高周波焼入れ部品が製造される。

実施例

[0135] 以下に実施例によって具体的に説明する。実施例での条件は、本実施形態の鋼材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である。したがって、本実施形態の鋼材は、この一条件例のみに限定されるものではない。

[0136] [実験方法]

表1及び表2に示す化学組成を有する溶鋼を用いて、150kgのインゴットを製造した。

[0137]

[0138] [表2]

試験 番号	化学組成(単位は質量%, 残部はFe及び不純物)																								
	C	Si	Mn	Cr	S	N	Ti	B	Al	P	Mo	Ni	Cu	Ca	Mg	Te	REM	Zr	Nb	V	Sb	Pb			
33	0.61	0.79	0.43	0.25	0.023	0.0041	0.0320	0.0018	0.031	0.049												646.4	0.837	9.54	0.016
34	0.56	1.18	0.53	0.17	0.022	0.0041	0.0240	0.0016	0.024	0.013												651.4	0.853	11.88	0.008
35	0.62	0.72	0.66	0.15	0.016	0.0039	0.0310	0.0017	0.019	0.020												645.8	0.872	10.35	0.015
36	0.62	0.61	0.56	0.16	0.019	0.0044	0.0240	0.0023	0.025	0.017												640.3	0.837	8.94	0.006
37	0.52	1.01	0.99	0.12	0.027	0.0056	0.0340	0.0022	0.022	0.011												631.3	0.876	16.49	0.012
38	0.54	0.84	0.81	0.22	0.032	0.0051	0.0250	0.0017	0.029	0.022												628.6	0.846	15.19	0.005
39	0.58	0.89	0.78	0.29	0.033	0.0045	0.0320	0.0022	0.026	0.025												642.7	0.885	16.04	0.014
40	0.61	0.86	0.73	0.19	0.035	0.0042	0.0230	0.0017	0.022	0.017												649.9	0.900	12.72	0.006
41	0.62	1.26	0.50	0.17	0.014	0.0045	0.0340	0.0014	0.028	0.013												672.6	0.919	11.14	0.016
42	0.68	0.45	0.47	0.11	0.033	0.0049	0.0290	0.0018	0.023	0.018												649.7	0.851	6.38	0.009
43	0.69	0.39	0.44	0.11	0.032	0.0042	0.0310	0.0024	0.028	0.015												649.6	0.846	5.88	0.014
44	0.67	0.60	0.31	0.11	0.022	0.0054	0.0320	0.0017	0.020	0.022												654.3	0.830	5.52	0.010
45	0.62	0.55	0.66	0.33	0.026	0.0041	0.0250	0.0018	0.023	0.016												637.3	0.867	12.33	0.009
46	0.63	0.38	0.75	0.46	0.026	0.0046	0.0340	0.0016	0.022	0.016												631.7	0.885	14.20	0.016
47	0.66	0.30	0.81	0.15	0.022	0.0044	0.0330	0.0018	0.023	0.016												636.4	0.882	9.25	0.015
48	0.58	0.84	0.53	0.19	0.024	0.0044	0.0210	0.0020	0.023	0.022	0.99											640.2	0.867	41.53	0.003
49	0.64	0.63	0.54	0.20	0.022	0.0046	0.0340	0.0022	0.022	0.012	0.23											647.1	0.869	15.55	0.016
50	0.65	0.60	0.55	0.21	0.019	0.0048	0.0310	0.0019	0.021	0.011		0.88										648.5	0.889	12.50	0.012
51	0.66	0.57	0.56	0.19	0.017	0.0047	0.0290	0.0016	0.020	0.017			0.99									649.9	0.875	12.01	0.010
52	0.65	0.59	0.51	0.18	0.022	0.0044	0.0250	0.0015	0.026	0.016				0.0040								648.0	0.856	8.35	0.007
53	0.64	0.61	0.54	0.16	0.023	0.0048	0.0350	0.0019	0.022	0.015					0.0048							646.1	0.853	8.56	0.016
54	0.66	0.62	0.52	0.32	0.020	0.0051	0.0280	0.0018	0.025	0.014						0.18						652.4	0.888	10.34	0.008
55	0.65	0.63	0.52	0.24	0.017	0.0045	0.0360	0.0018	0.033	0.016							0.0045					650.0	0.871	9.43	0.018
56	0.66	0.58	0.50	0.24	0.018	0.0039	0.0320	0.0015	0.023	0.019							0.0043					660.4	0.870	8.88	0.016
57	0.65	0.52	0.52	0.19	0.018	0.0042	0.0440	0.0023	0.013	0.021									0.18			644.5	0.849	8.29	0.027
58	0.64	0.42	0.32	0.11	0.031	0.0045	0.0350	0.0024	0.032	0.011										0.12		636.6	0.896	6.36	0.017
59	0.66	0.54	0.59	0.23	0.017	0.0051	0.0280	0.0022	0.027	0.032											0.014	648.4	0.881	9.55	0.008
60	0.65	0.53	0.36	0.14	0.015	0.0060	0.0220	0.0018	0.029	0.023												645.0	0.813	6.19	-0.002
61	0.59	0.60	1.10	0.01	0.042	0.0042	0.0230	0.0015	0.021	0.015												631.1	0.897	11.32	0.006
62	0.56	1.19	0.55	0.42	0.024	0.0048	0.0260	0.0022	0.025	0.014												651.9	0.887	17.04	0.007
63	0.65	0.30	0.82	0.15	0.023	0.0044	0.0320	0.0019	0.024	0.018												633.5	0.874	9.43	0.014
64	0.55	1.32	0.65	0.14	0.022	0.0048	0.0300	0.0021	0.027	0.015												658.4	0.894	13.65	0.011
65	0.59	1.45	0.37	0.13	0.023	0.0061	0.0420	0.0018	0.024	0.014												673.6	0.886	9.64	0.018
66	0.58	1.39	0.38	0.12	0.024	0.0055	0.0360	0.0015	0.025	0.013												667.7	0.868	9.51	0.014

[0139] 表 1 及び表 2 中の空白部分は、対応する元素の含有量が検出限界未満であったことを意味する。つまり、空白部分は、対応する元素含有量の最小桁において、検出限界未満であったことを意味する。たとえば、表 1 中の Cu 含有量の場合、最小桁は小数第 2 位である。したがって、試験番号 1 の Mo 含有量は、小数第 2 位までの桁数において、検出されなかった（有効数字が小数第 2 位までの含有量において、0%であった）ことを意味する。

[0140] 製造されたインゴットに対して、熱間圧延（粗圧延工程及び仕上げ圧延工程）を実施して、中間鋼材（棒鋼）を製造した。粗圧延鋼材での加熱温度はいずれも 1100～1300℃の範囲内であった。また、仕上げ圧延工程での加熱温度はいずれも 1200～1250℃の範囲内であった。さらに、仕上げ圧延温度は 900～1100℃の範囲内であった。さらに、試験番号 64 及び 65 においては、熱間圧延後の中間鋼材に対してさらに、熱間鍛造（熱間鍛伸）を実施し、熱間鍛造後の中間鋼材を放冷した（表 3 及び表 4 中の「熱間鍛造」欄において「実施」と記載）。なお、試験番号 1～63 では、熱間圧延後に熱間鍛造を実施することなく放冷した。以上の工程により、直径が 30～100 mm の棒鋼（中間鋼材）を製造した。

[0141] 試験番号 1～61、64 及び 65 の中間鋼材に対して、焼準処理を実施した。具体的には、これらの試験番号の中間鋼材を熱処理炉（焼準炉）に装入して、850℃で 1 時間保持した。保持後の中間鋼材に対して、空冷、油冷又は水冷を実施した。700～300℃での平均冷却速度 CR は表 3 及び表 4 に示すとおりであった（表 3 及び表 4 中の「平均冷却速度 CR（℃/秒）」欄に記載）。なお、試験番号 62 及び 63 では、焼準処理を実施しなかった。

[0142]

[表3]

TABLE 3				鋼材				焼入れ硬化層				芯部				高周波焼入れ部品		面疲労強度	高サイクル 曲げ疲労強度	低サイクル 曲げ疲労強度
試験 番号	熱間 鍛造	焼 練 処理	平均 冷却速度 CR (°C/秒)	Mn ₀ (質量%)	Cr ₀ (質量%)	FN5	フェライト 面積率(%)	マルテンサイト 面積率(%)	硬 質 性	Mn ₀ (質量%)	Cr ₀ (質量%)	FN5	フェライト 面積率(%)	マルテンサイト 面積率(%)						
				1	不実施	実施	0.50	0.45	0.13	8.6	2	1	X	—	0.45	0.13	8.6	2	1	—
2	不実施	実施	0.50	0.49	0.13	9.0	5	0	C	100	0.49	0.13	9.0	5	0	A	A	A	A	
3	不実施	実施	0.50	0.88	0.32	18.9	30	0	B	100	0.88	0.32	18.9	30	0	C	C	C	C	
4	不実施	実施	0.50	0.77	0.34	18.5	38	2	A	100	0.77	0.34	18.5	38	2	X	X	X	X	
5	不実施	実施	0.50	0.95	0.04	10.5	38	4	B	92	0.95	0.04	10.5	38	4	X	X	X	X	
6	不実施	実施	0.45	0.86	0.06	10.5	39	3	B	100	0.86	0.06	10.5	39	3	C	C	C	C	
7	不実施	実施	0.45	0.39	0.28	12.8	5	0	A	100	0.39	0.28	12.8	5	0	C	A	A	A	
8	不実施	実施	0.43	0.32	0.45	17.6	15	1	A	100	0.32	0.45	17.6	15	1	B	B	B	B	
9	不実施	実施	0.50	0.26	0.44	16.8	4	0	—	100	0.26	0.44	16.8	4	0	—	—	—	—	
10	不実施	実施	0.50	0.70	0.02	7.4	25	0	C	100	0.70	0.02	7.4	25	0	A	B	B	B	
11	不実施	実施	0.36	0.31	0.00	3.0	34	0	—	—	0.31	0.00	3.0	34	0	—	—	—	—	
12	不実施	実施	0.44	0.65	0.33	17.1	18	0	A	100	0.65	0.33	17.1	18	0	B	X	X	X	
13	不実施	実施	0.49	0.44	0.24	12.2	32	0	A	100	0.44	0.24	12.2	32	0	B	C	C	C	
14	不実施	実施	0.50	0.40	0.18	9.7	34	2	B	100	0.40	0.18	9.7	34	2	A	B	B	B	
15	不実施	実施	0.49	0.36	0.27	12.4	25	0	X	100	0.36	0.27	12.4	25	0	A	B	B	B	
16	不実施	実施	0.49	0.56	0.30	15.0	36	2	A	100	0.56	0.30	15.0	36	2	A	C	C	X	
17	不実施	実施	0.49	0.55	0.26	13.9	28	1	A	100	0.55	0.26	13.9	28	1	B	B	B	B	
18	不実施	実施	0.49	0.57	0.18	11.5	25	1	A	100	0.57	0.18	11.5	25	1	A	B	B	B	
19	不実施	実施	0.49	0.51	0.16	10.2	18	0	A	—	0.51	0.16	10.2	18	0	—	—	—	—	
20	不実施	実施	0.48	0.41	0.26	12.3	29	0	—	—	0.41	0.26	12.3	29	0	—	—	—	—	
21	不実施	実施	0.46	0.45	0.31	14.5	26	1	A	100	0.45	0.31	14.5	26	1	A	B	X	X	
22	不実施	実施	0.42	0.38	0.28	12.7	19	0	A	100	0.38	0.28	12.7	19	0	B	B	B	B	
23	不実施	実施	0.46	0.33	0.30	12.8	21	0	B	100	0.33	0.30	12.8	21	0	A	X	X	X	
24	不実施	実施	0.46	0.43	0.23	11.7	22	1	—	—	0.43	0.23	11.7	22	1	—	—	—	—	
25	不実施	実施	0.46	0.44	0.22	11.4	20	0	A	100	0.44	0.22	11.4	20	0	B	B	B	B	
26	不実施	実施	0.46	0.44	0.20	10.7	20	2	A	100	0.44	0.20	10.7	20	2	B	B	B	B	
27	不実施	実施	0.46	0.44	0.29	13.5	27	0	B	100	0.44	0.29	13.5	27	0	A	B	X	X	
28	不実施	実施	0.46	0.41	0.33	14.6	2	0	B	90	0.41	0.33	14.6	2	0	X	X	X	X	
29	不実施	実施	0.45	0.47	0.30	14.2	16	3	B	100	0.47	0.30	14.2	16	3	A	B	B	B	
30	不実施	実施	0.48	0.39	0.33	14.4	19	0	A	100	0.39	0.33	14.4	19	0	A	B	B	B	
31	不実施	実施	0.48	0.72	0.25	14.9	15	1	B	100	0.72	0.25	14.9	15	1	B	X	X	X	
32	不実施	実施	0.39	0.41	0.22	11.1	22	0	A	100	0.41	0.22	11.1	22	0	B	X	X	X	

[0143] [表4]

TABLE 4

試験 番号	熱間 鍛造	焼 準 処理	平均 冷却速度 CR (℃/秒)	鋼材					高周波焼入れ部品									
				Mn ₀ (質量%)	Cr ₀ (質量%)	FN5	フェライト 面積率(%)	マルテンサイト 面積率(%)	被割性	焼入れ硬化層 マルテンサイト 面積率(%)	Mn ₀ (質量%)	Cr ₀ (質量%)	FN5	フェライト 面積率(%)	マルテンサイト 面積率(%)	面疲労強度	高サイクル 曲げ疲労強度	低サイクル 曲げ疲労強度
33	不実施	実施	0.45	0.44	0.27	12.9	18	0	A	100	0.44	0.27	12.9	18	0	B	C	C
34	不実施	実施	0.50	0.53	0.17	10.7	26	0	A	100	0.53	0.17	10.7	26	0	A	B	B
35	不実施	実施	0.50	0.66	0.15	11.3	12	0	C	100	0.66	0.15	11.3	12	0	B	B	B
36	不実施	実施	1.00	0.51	0.11	8.5	15	5	B	100	0.51	0.11	8.5	15	5	C	B	B
37	不実施	実施	0.43	1.01	0.13	14.1	17	3	B	100	1.01	0.13	14.1	17	3	D	B	B
38	不実施	実施	0.44	0.82	0.24	18.0	17	3	A	100	0.82	0.24	18.0	17	3	X	B	B
39	不実施	実施	0.50	0.78	0.29	17.0	8	2	B	100	0.78	0.29	17.0	8	2	B	B	B
40	不実施	実施	0.50	0.73	0.19	13.2	8	1	C	100	0.73	0.19	13.2	8	1	B	B	B
41	不実施	実施	0.40	0.52	0.20	11.3	15	35	X	100	0.52	0.20	11.3	15	35	B	B	B
42	不実施	実施	0.50	0.47	0.11	10	10	2	A	100	0.47	0.11	8.1	10	2	B	A	A
43	不実施	実施	0.50	0.44	0.11	7.8	9	0	A	95	0.44	0.11	7.8	9	0	B	A	A
44	不実施	実施	0.41	0.32	0.12	7.1	19	1	A	50	0.32	0.12	7.1	19	1	X	X	X
45	不実施	実施	0.35	0.69	0.41	19.9	5	3	A	100	0.69	0.41	19.9	5	3	D	B	B
46	不実施	実施	0.36	0.79	0.56	25.9	0	1	B	100	0.79	0.56	25.9	0	1	B	B	B
47	不実施	実施	0.09	1.03	0.50	26.2	0	0	B	80	1.03	0.50	26.2	0	0	X	X	X
48	不実施	実施	0.44	0.54	0.20	11.9	11	1	A	100	0.54	0.20	11.9	11	1	B	B	B
49	不実施	実施	0.49	0.54	0.20	11.9	11	1	A	100	0.54	0.20	11.9	11	1	B	B	B
50	不実施	実施	0.47	0.56	0.22	12.5	8	1	B	100	0.56	0.22	12.5	8	1	B	B	B
51	不実施	実施	0.15	0.66	0.39	19.2	7	5	B	100	0.66	0.39	19.2	7	5	B	B	B
52	不実施	実施	0.10	0.64	0.48	21.9	11	2	A	100	0.64	0.48	21.9	11	2	B	B	B
53	不実施	実施	0.49	0.54	0.16	10.5	12	2	A	100	0.54	0.16	10.5	12	2	B	B	B
54	不実施	実施	0.48	0.52	0.33	15.7	3	2	B	100	0.52	0.33	15.7	3	2	A	B	B
55	不実施	実施	0.12	0.64	0.57	24.8	8	1	C	100	0.64	0.57	24.8	8	1	A	B	B
56	不実施	実施	0.15	0.59	0.50	21.9	7	2	B	100	0.59	0.50	21.9	7	2	A	B	B
57	不実施	実施	0.50	0.52	0.19	11.2	11	0	B	100	0.52	0.19	11.2	11	0	B	B	B
58	不実施	実施	0.45	0.33	0.12	7.0	24	4	B	100	0.33	0.12	7.0	24	4	D	B	B
59	不実施	実施	0.50	0.59	0.23	13.2	4	1	C	100	0.59	0.23	13.2	4	1	B	B	B
60	不実施	実施	0.24	0.44	0.34	15.1	19	0	A	100	0.40	0.33	14.6	11	0	B	A	B
61	不実施	実施	0.50	1.10	0.01	11.0	5	0	B	100	1.10	0.01	11.0	5	0	D	B	B
62	不実施	不実施	-	0.69	1.13	43.3	15	0	B	85	0.69	1.13	43.3	24	0	X	X	X
63	不実施	不実施	-	1.17	0.73	35.1	1	0	B	80	1.17	0.73	35.1	0	0	X	X	X
64	実施	実施	0.49	0.65	0.1	10.9	18	5	B	100	0.65	0.1	10.9	18	5	A	B	B
65	実施	実施	0.44	0.38	0.1	8.2	20	2	B	100	0.38	0.1	8.2	20	2	A	B	B
66	不実施	実施	1.20	0.38	0.12	7.6	18	79	X	100	0.38	0.12	7.6	18	79	A	B	B

[0144] 以上の製造工程により、各試験番号の鋼材（棒鋼）を製造した。

[0145] [評価試験]

[鋼材の評価試験について]

[セメントイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} 測定試験]

各試験番号の鋼材中のセメントイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} を次の方法で求めた。各試験番号の鋼材の任意の位置から、試験片を採取した。試験片に対して、10%AA系電解液を用いて、定電流電気分解を実施した。定電流電解後、メッシュサイズ0.2 μ mのフィルターで吸引ろ過して残渣を採取した。採取した残渣に対して、酸分解処理を実施した。酸分解処理後、ICP-AES（高周波誘導結合プラズマ原子分光分析）を実施して、残渣中のFe、Cr、Mnの質量を測定した。このとき、残渣は全て M_3C 型の炭化物、つまり、セメントイトであると仮定した。得られた残渣中のFe質量、Cr質量、及びMn質量に基づいて、セメントイトを100質量%とした場合の、セメントイト中に固溶しているMn濃度 Mn_{θ} （質量%）、及び、Cr濃度 Cr_{θ} （質量%）を算出した。得られたMn濃度 Mn_{θ} を表3及び表4中の「鋼材」欄の「 Mn_{θ} （質量%）」欄に示す。得られたCr濃度 Cr_{θ} を表3及び表4中の「鋼材」欄の「 Cr_{θ} （質量%）」欄に示す。

[0146] [鋼材のフェライト面積率及びマルテンサイト面積率の測定試験]

各試験番号の鋼材中のフェライト面積率（%）を次の方法で求めた。鋼材の任意の位置からミクロ組織観察用の試験片を採取した。試験片の表面のうち、鋼材の長手方向（軸方向）に垂直な断面（観察面）を研磨した。ナイトール腐食液を用いて、研磨後の観察面をエッチングした。エッチングされた観察面を400倍の光学顕微鏡で観察して、写真画像を生成した。写真画像において、上述の方法により、フェライト及びマルテンサイトを特定した。特定されたフェライトの面積率を、JIS G 0555（2003）に準拠した点算法で測定した。測定された面積率を鋼材中のフェライト面積率と定義した。得られたフェライト面積率を表3及び表4中の「鋼材」欄の「フェライト面積率（%）」欄に示す。さらに、特定されたマルテンサイトの面

積率を、J I S G 0 5 5 5 (2 0 0 3) に準拠した点算法で測定した。測定された面積率を鋼材中のマルテンサイト面積率と定義した。得られたマルテンサイト面積率を表 3 及び表 4 中の「鋼材」欄の「マルテンサイト面積率 (%) 」欄に示す。

[0147] [被削性評価試験]

各試験番号の鋼材を用いて、被削性を評価した。まず、ドリル被削性評価のために、直径 3 0 ~ 1 0 0 m m の棒鋼の中心から試験片を作製した。試験片は円柱状であり、長さは 2 1 m m であった。試験片の長手方向は、棒鋼の長手方向と平行であった。

[0148] 株式会社不二越製の型番 S D 3 . 0 のドリルを用いて、ドリル穿孔試験を実施した。1 回転当たりの送り量を 0 . 2 5 m m とし、1 穴の穿孔深さを 9 m m とした。潤滑剤として、水溶性の切削油を用いた。評価指標として、累積穴深さ 1 0 0 0 m m まで切削可能な最大切削速度 V L 1 0 0 0 を求めた。

[0149] 求めた最大切削速度 V L 1 0 0 0 に応じて、次のとおり評価した。

評価 A : 最大切削速度 V L 1 0 0 0 が 5 0 m / 分以上

評価 B : 最大切削速度 V L 1 0 0 0 が 4 5 m / 分以上 5 0 m / 分未満

評価 C : 最大切削速度 V L 1 0 0 0 が 4 0 m / 分以上 4 5 m / 分未満

評価 X : 最大切削速度 V L 1 0 0 0 が 4 0 m / 分未満

評価 A ~ C の場合、被削性に優れると判断した。評価 X の場合、被削性が低いと判断した。表 3 及び表 4 中の「鋼材」欄の「被削性」欄に評価結果を示す。

[0150] [高周波焼入れ部品の評価試験]

[ローラーピッチング疲労試験 (面疲労強度評価試験)]

高周波焼入れ部品の面疲労強度を、次の方法で評価した。各試験番号の鋼材に対して機械加工 (切削加工) を実施して、図 1 に示す小ローラー試験片 2 0 0 (以下、単に試験片 2 0 0 という) を作製した。鋼材の直径が 8 0 m m 未満である場合、試験片 2 0 0 の長手方向に垂直な断面の中心位置が、鋼材の長手方向に垂直な断面の中心位置となるように、試験片 2 0 0 を採取し

た。試験片 200 の長手方向は、鋼材の長手方向と平行であった。鋼材の直径が 80 mm 以上である場合、試験片 200 の長手方向に垂直な断面の中心位置が、鋼材の長手方向に垂直な断面のうち、半径 R の中心位置（つまり、 $2/R$ 位置）となるように、試験片 200 を採取した。試験片 200 の長手方向は、鋼材の長手方向と平行であった。

[0151] 図 1 中の数値は寸法を示す。図 1 中の「 ϕ 」は直径を意味する。つまり、「 $\phi 22$ 」は直径が 22 mm であることを意味する。試験片 200 は円柱状であり、試験片 200 の長手方向の中央位置に、直径 26 mm の平行部を有した。試験片 200 の平行部以外の円柱部の直径は 22 mm であった。

[0152] 試験片 200 に対して、高周波焼入れを実施した。具体的には、加熱温度 1000℃とし、加熱時間を 20 秒とした。加熱後の試験片 200 を水冷した。高周波焼入れ後の試験片 200 に対して、150℃の焼戻し温度で 1 時間保持する焼戻しを実施した。以上の工程により、高周波焼入れ部品である試験片 200 を製造した。各試験番号ごとに、複数の高周波焼入れ部品（試験片 200）を製造した。

[0153] 試験片 200 を用いて、図 2 に示すローラーピッチング試験を実施して、高周波焼入れ部品の面疲労強度を評価した。具体的には、図 2 を参照して、試験片 200 に大ローラー試験片 100 を押し当てながら、試験片 200 を回転させた。大ローラー試験片 100 は JIS G 4053 (2016) に規定の SCM722 に相当する化学組成を有する鋼材を浸炭処理した後、表面研磨したものを使用した。大ローラー試験片 100 の半径は 130 mm であった。

[0154] ローラーピッチング疲労試験では、試験片 200 に種々のヘルツ応力の面圧で大ローラー試験片 100 を押し付けた。接触部での両ローラー試験片（試験片 200、大ローラー試験片 100）の周速方向を同一方向とし、滑り率を -40%（試験片 200 よりも大ローラー試験片 100 の方が接触部の周速が 40% 大きい）として回転させた。接触部に潤滑油として供給する ATF（AT 用潤滑油）の油温は 80℃とした。大ローラー試験片 100 と試

試験片200との接触応力を3000～3300MPaとした。試験打ち切り回数を1000万回（ 10^7 回）とした。試験片200にピッチングが発生せずに1000万回の回転数に達した場合、高周波焼入れ部品（試験片100）が面疲労強度に優れると評価した。具体的には、次のとおり評価した。

評価A：3300MPaの接触応力で 10^7 回の回転数に達した

評価B：3200MPaの接触応力で 10^7 回の回転数に達したが、3300MPaの接触応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価C：3100MPaの接触応力で 10^7 回の回転数に達したが、3200MPaの接触応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価D：3000MPaの接触応力で 10^7 回の回転数に達したが、3100MPaの接触応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価X：3000MPaの接触応力で 10^7 回の回転数に達しなかった

評価A～Dの場合、高周波焼入れ部品が面疲労強度に優れると判断した。評価Xの場合、高周波焼入れ部品の面疲労強度が低いと判断した。表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「面疲労強度」欄に評価結果を示す。また、ピッチング発生の検出は試験機に備え付けてある振動計によって行い、振動検出後に両ローラー試験片の回転を停止させてピッチングの発生と回転数とを確認した。

[0155] [高周波焼入れ部品の焼入れ硬化層のマルテンサイト面積率測定試験]

各試験番号の試験片200の焼入れ硬化層のマルテンサイト面積率を、次の方法で求めた。試験片200の平行部の表面から深さ0.2mm位置から、サンプルを採取した。サンプルの表面（観察面という）を鏡面に研磨した後、ナイトール腐食液に浸漬して、エッチングによる組織現出を行った。エッチングした観察面を400倍の光学顕微鏡で観察して、写真画像を生成した。観察面のうち、任意の3視野を観察した。各視野の面積は $130\mu\text{m} \times 260\mu\text{m}$ とした。各視野において、マルテンサイト、フェライト、パーライト等の各相は、コントラストから区別できる。具体的には、ナイトール腐食液で観察面を腐食した場合、ラメラ構造を有する相をパーライトと特定で

きる。パーライトよりも明度が高い領域（白い領域）をフェライトと特定できる。フェライト及びパーライトよりも明度が低い領域（濃い領域）をマルテンサイトと特定できる。そこで、各視野のマルテンサイトの面積を求めた。3つの視野のマルテンサイトの総面積と、各視野の総面積とに基づいて、マルテンサイト面積率（％）を定義した。求めたマルテンサイト面積率を表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「焼入れ硬化層」欄の「マルテンサイト面積率（％）」に示す。

[0156] [高周波焼入れ部品の芯部の化学組成、フェライト面積率、セメンタイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} の測定試験]

各試験番号の試験片200の芯部の化学組成、ミクロ組織中のフェライト面積率、セメンタイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} は、次の方法で求めた。高周波焼入れ部品の芯部からサンプルを採取した。採取されたサンプルを用いて、周知の成分分析法を実施する。具体的には、ドリルを用いて、サンプルから切粉を生成し、その切粉を採取した。採取した切粉を酸に溶解させて溶液を得た。溶液に対して、ICP-AESを実施して、化学組成の元素分析を実施した。C含有量及びS含有量については、周知の高周波燃焼法（燃焼－赤外線吸収法）により求めた。N含有量については、周知の不活性ガス溶融－熱伝導度法を用いて求めた。測定の結果、いずれの試験番号の芯部の化学組成も、対応する試験番号の鋼材の化学組成と同じであった。

[0157] さらに、芯部のサンプルを用いて、上述の鋼材（棒鋼）の場合と同じ方法で、ミクロ組織中のフェライト面積率、及び、セメンタイト中のMn濃度 Mn_{θ} 及びCr濃度 Cr_{θ} を求めた。得られたMn濃度 Mn_{θ} を表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「芯部」欄の「 Mn_{θ} （質量％）」欄に示す。得られたCr濃度 Cr_{θ} を表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「芯部」欄の「 Cr_{θ} （質量％）」欄に示す。得られたフェライト面積率を表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「芯部」欄の「フェライト面積率（％）」欄に示す。

[0158] [高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度評価試験]

高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度、及び、低サイクル曲げ疲労強度を、次の方法で評価した。各試験番号の鋼材に対して機械加工（切削加工）を実施して、図3に示す小野式回転曲げ試験片（以下、単に試験片という）を作製した。鋼材の直径が80mm未満である場合、試験片の長手方向に垂直な断面の中心位置が、鋼材の長手方向に垂直な断面の中心位置となるように、試験片を採取した。試験片の長手方向は、鋼材の長手方向と平行であった。鋼材の直径が80mm以上である場合、試験片の長手方向に垂直な断面の中心位置が、鋼材の長手方向に垂直な断面のうち、半径Rの中心位置（つまり、 $2/R$ 位置）となるように、試験片を採取した。試験片の長手方向は、鋼材の長手方向と平行であった。

[0159] 図3中の数値は、寸法（mm）を意味する。なお、試験片の長手方向における中央位置に、切欠きを形成した。切欠き底での試験片の直径は9mmであった。切欠き部分の曲率半径Rは1.14mmであった。

[0160] 試験片に対して、高周波焼入れを実施した。具体的には、加熱温度1000℃とし、加熱時間を5秒とした。加熱後の試験片を水冷した。高周波焼入れ後の試験片200に対して、150℃の焼戻し温度で1時間保持する焼戻しを実施した。以上の工程により、高周波焼入れ部品である試験片を製造した。各試験番号ごとに複数の試験片を製造した。

[0161] [高サイクル曲げ疲労強度評価試験]

試験片（高周波焼入れ部品）を用いて、小野式回転曲げ疲労試験（高サイクル曲げ疲労試験）を行った。具体的には、小野式回転曲げ疲労試験では、所定の曲げ応力となるよう負荷荷重を調整し、試験打ち切り回数を1000万回（ 1×10^7 回）とした。疲労試験片が破断せずに1000万回の回転数に達した場合、高サイクル曲げ疲労強度に優れると判断した。具体的には、次のとおり評価した。

評価A：680MPaの曲げ応力で 10^7 回の回転数に達した

評価B：665MPaの曲げ応力で 10^7 回の回転数に達したが、680MPaの曲げ応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価C：650MPaの曲げ応力で 10^7 回の回転数に達したが、665MPaの曲げ応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価X：650MPaの曲げ応力で 10^7 回の回転数に達しなかった

評価A～Cの場合、高周波焼入れ部品が高サイクル曲げ疲労強度に優れると判断した。評価Xの場合、高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度が低いと判断した。表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「高サイクル曲げ疲労強度」欄に評価結果を示す。

[0162] [低サイクル曲げ疲労強度評価試験]

高サイクル曲げ疲労強度評価試験と同様に、試験片（高周波焼入れ部品）を用いて、小野式回転曲げ疲労試験（低サイクル曲げ疲労試験）を行った。具体的には、小野式回転曲げ疲労試験では、所定の曲げ応力となるよう負荷荷重を調整し、試験打ち切り回数を1万回（ 1×10^4 回）とした。疲労試験片が破断せずに1万回の回転数に達した場合、高サイクル曲げ疲労強度に優れると判断した。具体的には、次のとおり評価した。

評価A：850MPaの曲げ応力で 10^4 回の回転数に達した

評価B：825MPaの曲げ応力で 10^4 回の回転数に達したが、850MPaの曲げ応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価C：800MPaの曲げ応力で 10^4 回の回転数に達したが、825MPaの曲げ応力では、 10^7 回の回転数に達しなかった

評価X：800MPaの曲げ応力で 10^4 回の回転数に達しなかった

評価A～Cの場合、高周波焼入れ部品が低サイクル曲げ疲労強度に優れると判断した。評価Xの場合、高周波焼入れ部品の低サイクル曲げ疲労強度が低いと判断した。表3及び表4中の「高周波焼入れ部品」欄の「低サイクル曲げ疲労強度」欄に評価結果を示す。

[0163] [試験結果]

試験結果を表3及び表4に示す。

[0164] 表1～表4を参照して、試験番号2、3、6～8、10、13、14、17、18、22、25、26、29、30、33～37、39、40、42

、43、45、46、48～61では、化学組成が適切であり、FN1～FN4は式(1)～式(4)を満たした。そのため、各試験番号の鋼材の被削性は高かった。さらに、製造条件が適切であったため、鋼材のFN5が式(5)を満たし、フェライト面積率が40%以下であった。そのため、鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品では、面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度に優れた。なお、これらの試験番号の鋼材を高周波焼入れして製造された高周波焼入れ部品において、焼入れ硬化層のマルテンサイト面積率は90%以上であった。さらに、芯部のFN5は式(5)を満たし、フェライト面積率は40%以下であった。

[0165] 一方、試験番号1では、C含有量が高すぎた。そのため、被削性が低かった。さらに、高周波焼入れを実施したとき、焼割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度の評価試験を実施しなかった(表3及び表4の該当する試験項目欄において「-」と表記。)。

[0166] 試験番号4では、C含有量が低すぎた。そのため、鋼材を高周波焼入れして製造した高周波焼入れ部品において、面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0167] 試験番号5では、Si含有量が高すぎた。そのため、鋼材を高周波焼入れして製造した高周波焼入れ部品において、面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度が低かった。

[0168] 試験番号9では、Mn含有量が低すぎた。そのため、熱間加工時に割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度の評価試験を実施しなかった(表3及び表4の該当する試験項目欄において「-」と表記。)。

[0169] 試験番号11では、Cr含有量を含有しなかった。そのため、熱間加工時に割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労

強度の評価試験を実施しなかった（表 3 及び表 4 の該当する試験項目欄において「－」と表記。）。

[0170] 試験番号 12 では、S 含有量が高すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0171] 試験番号 15 では、S 含有量が低すぎた。そのため、鋼材の被削性が低かった。

[0172] 試験番号 16 では、B 含有量が低すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0173] 試験番号 19 では、B 含有量が高すぎた。そのため、熱間加工時に割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度の評価試験を実施しなかった（表 3 及び表 4 の該当する試験項目欄において「－」と表記。）。

[0174] 試験番号 20 では、N 含有量が高すぎた。そのため、熱間加工時に割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度の評価試験を実施しなかった（表 3 及び表 4 の該当する試験項目欄において「－」と表記。）。

[0175] 試験番号 21 では、FN4 が式（4）を満たさなかった。そのため、高周波焼入れ部品の低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0176] 試験番号 23 では、N 含有量が低すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0177] 試験番号 24 では、Ti 含有量が高すぎた。そのため、熱間加工時に割れが発生した。そのため、鋼材の被削性の評価試験、及び、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル及び曲げ疲労強度の評価試験を実施しなかった（表 3 の該当する試験項目欄において「－」と表記。）。

[0178] 試験番号 27 では、Ti 含有量が低すぎた。そのため、式（4）を満たさ

なかった。そのため、高周波焼入れ部品の低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0179] 試験番号 28 では、A I 含有量が高すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0180] 試験番号 31 では、A I 含有量が低すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0181] 試験番号 32 では、P 含有量が高すぎた。そのため、高周波焼入れ部品の高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0182] 試験番号 38 では、F N 1 が式 (1) の下限未満であった。そのため、高周波焼入れ部品の面疲労強度が低かった。

[0183] 試験番号 41 では、F N 2 が式 (2) の上限を超えた。そのため、鋼材中のマルテンサイト面積率が 10% を超えた。そのため、鋼材の被削性が低かった。

[0184] 試験番号 44 では、F N 3 が式 (3) の下限未満であった。そのため、高周波焼入れ部品の面疲労強度及び高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0185] 試験番号 47 では、焼準処理での平均冷却速度 C R が遅すぎた。そのため、鋼材において、F N 5 が式 (5) を満たさなかった。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0186] 試験番号 62 及び 63 では、焼準処理を実施しなかった。そのため、鋼材において、F N 5 が式 (5) を満たさなかった。その結果、高周波焼入れ部品の面疲労強度、高サイクル曲げ疲労強度及び低サイクル曲げ疲労強度が低かった。

[0187] 試験番号 66 では、焼準処理での平均冷却速度 C R が速すぎた。そのため、鋼材中のマルテンサイト面積率が 10% を超えた。そのため、鋼材の被削性が低かった。

[0188] 以上、本発明の実施形態を説明した。しかしながら、上記した実施形態は本発明を実施するための例示に過ぎない。したがって、本発明は上記した実施形態に限定されることなく、その趣旨を逸脱しない範囲内で上記した実施形態を適宜変更して実施することができる。

符号の説明

[0189] 1 0 0 大ローラー試験片
 2 0 0 試験片

請求の範囲

[請求項1]

化学組成が、質量%で、

C : 0.40 ~ 0.70 %、

Si : 0.15 ~ 2.10 %、

Mn : 0.30 ~ 1.15 %、

Cr : 0.01 ~ 0.50 %未満、

S : 0.005 ~ 0.070 %、

N : 0.0020 ~ 0.0200 %、

Ti : 0.0080 ~ 0.2000 %、

B : 0.0005 ~ 0.0050 %、

Al : 0.005 ~ 0.100 %、及び、

P : 0.050 %未満、を含有し、

残部がFe及び不純物からなり、式(1)~式(5)を満たし、

フェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が10%以下である、

鋼材。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7Si) \times (1 + 3.3333Mn) \times (1 + 2.16Cr) \times (1 + 3.00Mo) \times (1 + 1.73V) \times (1 + 0.365Cu) \times (1 + 0.363Ni) \times (2.616 - 1.6C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7Mn_{\theta} + 32.4Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式(1)~式(4)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入され、対応する元素が含有されていない場合、元素記号には「0」が代入され、式(5)中の Mn_{θ} にはセメンタ

イト中のMnの濃度（質量％）が代入され、式（5）中の $C_{r\theta}$ にはセメントタイト中のCrの濃度（質量％）が代入される。

[請求項2]

請求項1に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Mo：1.00％以下、
Ni：1.00％以下、及び、
Cu：1.00％以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
鋼材。

[請求項3]

請求項1又は請求項2に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Ca：0.0050％以下、
Mg：0.0050％以下、
Te：0.20％以下、及び、
希土類元素：0.0050％以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
鋼材。

[請求項4]

請求項1～請求項3のいずれか1項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Zr：0.0050％以下、
Nb：0.20％以下、及び、
V：0.35％以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
鋼材。

[請求項5]

請求項1～請求項4のいずれか1項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Sb：0.015％以下、を含有する、
鋼材。

[請求項6] 請求項1～請求項5のいずれか1項に記載の鋼材であって、
前記化学組成はさらに、F eの一部に代えて、
P b : 0.09%以下、を含有する、
鋼材。

[請求項7] 焼入れ硬化層と、
前記焼入れ硬化層よりも内部の芯部と、
を備え、
前記焼入れ硬化層は、
マルテンサイト面積率が90%以上であり、
前記芯部は、
化学組成が、質量%で、
C : 0.40～0.70%、
S i : 0.15～2.10%、
M n : 0.30～1.15%、
C r : 0.01～0.50%未満、
S : 0.005～0.070%、
N : 0.0020～0.0200%、
T i : 0.0080～0.2000%、
B : 0.0005～0.0050%、
A l : 0.005～0.100%、及び、
P : 0.050%未満、を含有し、
残部がF e及び不純物からなり、式(1)～式(5)を満たし、
フェライト面積率が40%以下であり、マルテンサイト面積率が1
0%以下である、
部品。

$$290C + 50Si + 430 \geq 631.0 \quad (1)$$

$$C + (1/7)Si + (1/5)Mn + (1/9)Cr + V + (1/25)Mo \leq 0.900 \quad (2)$$

$$(1 + 0.7 Si) \times (1 + 3.3333 Mn) \times (1 + 2.16 Cr) \times (1 + 3.00 Mo) \times (1 + 1.73 V) \times (1 + 0.365 Cu) \times (1 + 0.363 Ni) \times (2.616 - 1.6 C) \geq 5.80 \quad (3)$$

$$Ti - 4 \times N \geq 0 \quad (4)$$

$$9.7 Mn_{\theta} + 32.4 Cr_{\theta} \leq 25.9 \quad (5)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の含有量(質量%)が代入され、式(5)中の Mn_{θ} にはセメンタイト中のMnの濃度(質量%)が代入され、式(5)中の Cr_{θ} にはセメンタイト中のCrの濃度(質量%)が代入される。

[請求項8]

請求項7に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Mo : 1.00%以下、
Ni : 1.00%以下、及び、
Cu : 1.00%以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
部品。

[請求項9]

請求項7又は請求項8に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Ca : 0.0050%以下、
Mg : 0.0050%以下、
Te : 0.20%以下、及び、
希土類元素 : 0.0050%以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
部品。

[請求項10]

請求項7～請求項9のいずれか1項に記載の高周波焼入れ部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、

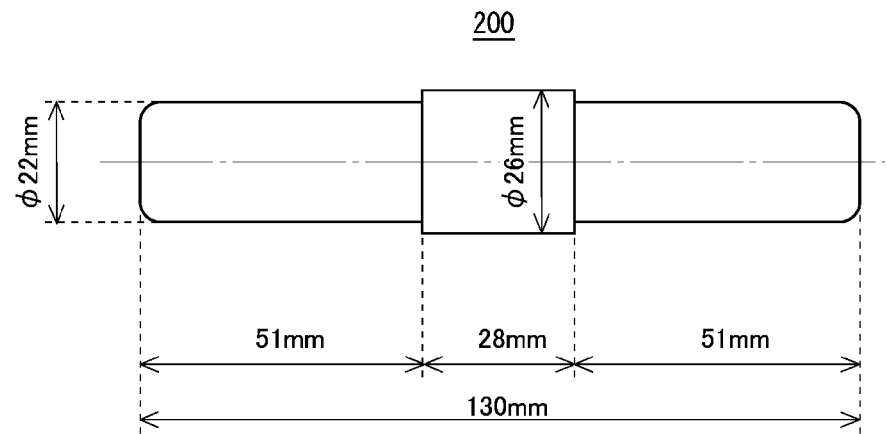
Zr : 0.0050%以下、
Nb : 0.20%以下、及び、
V : 0.35%以下、からなる群から選択される1種以上を含有する、
部品。

[請求項11] 請求項7～請求項10のいずれか1項に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Sb : 0.015%以下、を含有する、
部品。

[請求項12] 請求項7～請求項11のいずれか1項に記載の部品であって、
前記化学組成はさらに、Feの一部に代えて、
Pb : 0.09%以下、を含有する、
部品。

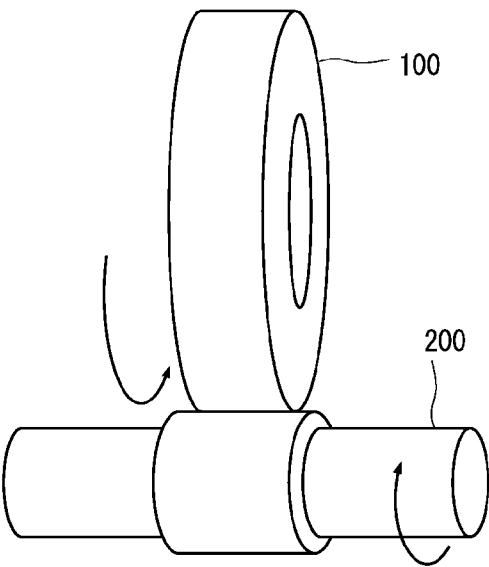
[図1]

FIG. 1



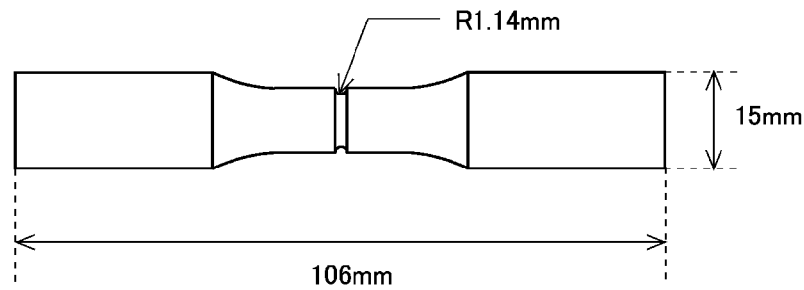
[図2]

FIG. 2



[図3]

FIG. 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/001966

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C21D 8/06(2006.01)i; C21D 9/32(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; C22C 38/60(2006.01)i

FI: C22C38/00 301Z; C22C38/60; C21D9/32 A; C21D8/06 A

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)

C21D8/06; C21D9/32; C22C38/00; C22C38/60

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	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001-181791 A (NIPPON STEEL CORP.) 03.07.2001 (2001-07-03) claim 1, paragraphs [0039]-[0048], [0060], tables 1, 3, fig. 4	1-12
A	JP 2017-48440 A (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 09.03.2017 (2017-03-09) claim 1, paragraph [0092], table 1 (steel L, M, Q, R, T), table 3 (no. 13, 14, 18, 19, 21)	1-12
A	WO 2013/183648 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 12.12.2013 (2013-12-12) claim 1, paragraph [0060], table 1 (no. 13)	1-12
A	WO 2015/076384 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 28.05.2015 (2015-05-28) claim 1, paragraphs [0033], [0034]	1-12

☐ 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

01 April 2020 (01.04.2020)

Date of mailing of the international search report

14 April 2020 (14.04.2020)

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office
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/JP2020/001966

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2001-181791 A	03 Jul. 2001	(Family: none)	
JP 2017-48440 A	09 Mar. 2017	(Family: none)	
WO 2013/183648 A1	12 Dec. 2013	CN 104350167 A claim 1, paragraph [0129], table 1 (no. 13)	
WO 2015/076384 A1	28 May 2015	KR 10-2015-0013246 A US 2016/0289787 A1 claim 1, paragraphs [0128]-[0130] EP 3072987 A1 CN 105745348 A TW 201525157 A KR 10-2016-0072233 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） C21D 8/06(2006.01)i; C21D 9/32(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; C22C 38/60(2006.01)i FI: C22C38/00 301Z; C22C38/60; C21D9/32 A; C21D8/06 A										
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）） C21D8/06; C21D9/32; C22C38/00; C22C38/60 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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2020年</td> </tr> </table> 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）			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2020年	日本国実用新案登録公報	1996-2020年	日本国登録実用新案公報	1994-2020年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2020年									
日本国実用新案登録公報	1996-2020年									
日本国登録実用新案公報	1994-2020年									
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 2001-181791 A（新日本製鐵株式会社）03.07.2001（2001-07-03） 請求項1, [0039]～[0048], [0060], 表1, 表3, 図4	1-12								
A	JP 2017-48440 A（新日鐵住金株式会社）09.03.2017（2017-03-09） 請求項1, [0092], 表1(鋼L, M, Q, R, T), 表3(No. 13, 14, 18, 19, 21)	1-12								
A	WO 2013/183648 A1（新日鐵住金株式会社）12.12.2013（2013-12-12） 請求項1, [0060], 表1(No. 13)	1-12								
A	WO 2015/076384 A1（新日鐵住金株式会社）28.05.2015（2015-05-28） 請求項1, [0033], [0034]	1-12								
☐ 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 “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 01.04.2020		国際調査報告の発送日 14.04.2020								
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） 守安 太郎 4K 9347 電話番号 03-3581-1101 内線 3477								

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/JP2020/001966

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2001-181791	A	03.07.2001	(ファミリーなし)	
JP	2017-48440	A	09.03.2017	(ファミリーなし)	
WO	2013/183648	A1	12.12.2013	CN 104350167 A	
				請求項1, [0129], 表1(No. 13)	
				KR 10-2015-0013246	A
WO	2015/076384	A1	28.05.2015	US 2016/0289787 A1	
				Claim 1, [0128] to [0130]	
				EP 3072987 A1	
				CN 105745348 A	
				TW 201525157 A	
				KR 10-2016-0072233	A