

(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
2022年8月11日(11.08.2022)



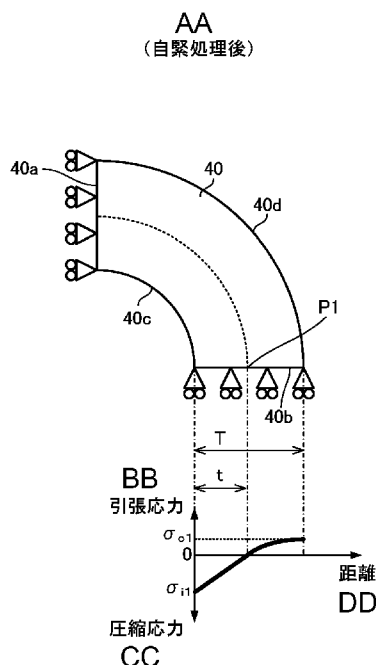
(10) 国際公開番号
WO 2022/168530 A1

- (51) 国際特許分類:
F16L 9/02 (2006.01) *C22C 38/00* (2006.01)
B60R 21/264 (2006.01) *C22C 38/50* (2006.01)
C21D 7/02 (2006.01) *F02M 55/02* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/000422
- (22) 国際出願日: 2022年1月7日(07.01.2022)
- (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 2021-016940 2021年2月4日(04.02.2021) 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: 牧野 泰三(MAKINO, Taizo); 〒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). 山崎 正弘(YAMAZAKI, Masahiro); 〒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: 特許業務法人ブライトス(BRIGHTAS IP ATTORNEYS); 〒5300003 大阪府大阪市北区堂島2-2-2 3 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,

(54) Title: PRESSURE PIPING STEEL PIPE AND STEEL PIPE MATERIAL

(54) 発明の名称: 圧力配管用鋼管および鋼管素材

[図3]



AA (After autofrettage)

BB Tensile stress

CC Compressive stress

DD Distance

(57) Abstract: Provided is a pressure piping steel pipe subjected to autofrettage, wherein the average hardness of an outer surface layer region is at least 1.20 times greater than the average hardness of an inner surface layer region, and, in the case in which it is assumed, regarding the steel pipe, that the outer diameter is D, the inner diameter is d, the actual measured value of the residual stress at the outer surface is σ_{o1} , the actual measured value of the residual stress at the outer surface after being halved is σ_{o2} , and the actual measured value

[続葉有]



WO 2022/168530 A1

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, IT, 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, 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))

of the residual stress at the inner surface after being halved is σ_{i2} , the estimated value σ_{i1} of the residual stress at the inner surface of the steel pipe, determined from $[\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1)]$, $[t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2}]$, $[A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2)]$, and $[C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2)]$, is equal to or less than -150 MPa.

(57) 要約 : 自緊処理が施された圧力配管用の鋼管であって、外表層領域の平均硬さが内表層領域の平均硬さの1.20倍以上であり、鋼管の外径をD、内径をd、外面の残留応力の実測値を σ_{o1} 、半割後の外面の残留応力の実測値を σ_{o2} 、半割後の内面の残留応力の実測値を σ_{i2} とした場合に、 $[\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1)]$ 、 $[t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2}]$ 、 $[A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2)]$ 、 $[C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2)]$ より求められる、鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} が-150MPa以下である、圧力配管用鋼管。

明 細 書

発明の名称：圧力配管用鋼管および鋼管素材

技術分野

[0001] 本発明は、圧力配管用鋼管および鋼管素材に関する。

背景技術

[0002] 油圧シリンダー、エアバッグ鋼管、アキュムレータ、水素用配管等の圧力配管には、高い強度だけでなく、優れた内圧疲労特性が求められている。

[0003] 例えば、特許文献1には、鋼管を引抜きしてシリンダーチューブ用鋼管を製造する際に、引抜き後に300～350℃にて熱処理をすることを特徴とする内圧疲労特性の優れたシリンダーチューブ用鋼管の製造方法が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開平4-183820号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：中山英介、宮原光雄、岡村一男、富士本博紀、福井清之、「超小型試験片による自動車用薄板スポット溶接継手の疲労強度予測」、材料、2004年10月、第53巻、第10号、p. 1136-1142

非特許文献2：社団法人日本材料学会編、「X線応力測定法標準（2002年版）-鉄鋼編」、2002年3月

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 特許文献1によれば、比例限強度を向上させることで内圧疲労特性に優れたシリンダーチューブ用鋼管を得ることができる。しかし、近年、さらなる内圧疲労特性の向上が求められており、改善の余地が残されている。

[0007] ところで、内圧疲労特性を向上する方法として、自緊処理を行う方法が挙げられる。自緊処理とは、過大内圧を作用させることで内表面近傍を部分的

に塑性変形させ、圧縮残留応力を生じさせる処理である。

[0008] 鋼管材料の強度が高くなれば、当然に、鋼管の内側にかかる圧力を高くすることができる。しかし、鋼管の内側に圧力を加えた場合に、鋼管内面に疲労による破壊が発生することのない限界となる内圧（以下、「限界内圧」という。）は、鋼管材料の強度のみには依存しない。自緊処理を行うことによって、鋼管の引張強度を上昇させなくても限界内圧を増加させることが可能となる。

[0009] しかしながら、自緊処理において、鋼管の内表面に付与する圧力が過大であると、バースト（破裂）のリスクが高まるため、安全性の面から低めに設定することが一般的である。その結果、従来の技術では、自緊処理を行ったとしても、十分に限界内圧を高めることができず、改善の余地が残されていた。

[0010] 加えて、薄肉の鋼管の場合、管の内外面の応力差が小さくなり、鋼管全体が降伏してしまうおそれがあり、内表面近傍のみを部分的に塑性変形させるのが困難であるという問題もある。

[0011] 本発明は上記の課題を解決し、高い限界内圧を有する圧力配管用鋼管および鋼管素材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

[0012] 本発明は、上記の課題を解決するためになされたものであり、下記の圧力配管用鋼管および鋼管素材を要旨とする。

[0013] （１）自緊処理が施された圧力配管用の鋼管であって、

前記鋼管は外表面および内表面を有し、

前記外表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの外表層領域における平均硬さが、前記内表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの内表層領域における平均硬さの 1.20 倍以上であり、

前記鋼管の外径を D (mm)、内径を d (mm) とし、

自緊処理後の前記鋼管の外表面の残留応力の実測値を σ_{o1} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の外表面の残留応力の実測値を σ_{o2} (MPa)、

自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の内面の残留応力の実測値を σ_{i2} (MPa) とした場合に、

下記 (i) 式～ (iv) 式によって求められる、自緊処理後の前記鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} (MPa) が -150 MPa 以下である、
圧力配管用鋼管。

$$\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1) \quad \dots (i)$$

$$t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \quad \dots (ii)$$

$$A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2) \quad \dots (iii)$$

$$C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2) \quad \dots (iv)$$

[0014] (2) D/d が 2.0 以下である、

上記 (1) に記載の圧力配管用鋼管。

[0015] (3) 自緊処理が施される用途に用いられる圧力配管用の鋼管素材であつて、

前記鋼管素材は外表面および内表面を有し、

前記外表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの外表層領域における平均硬さが、前記内表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの内表層領域における平均硬さの 1.20 倍以上であり、

自緊処理が施された際に、

自緊処理後の鋼管の外径を D (mm)、内径を d (mm) とし、

自緊処理後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o1} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o2} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の内面の残留応力の実測値を σ_{i2} (MPa) とした場合に、

下記 (i) 式～ (iv) 式によって求められる、自緊処理後の前記鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} (MPa) が -150 MPa 以下となる、

圧力配管用鋼管素材。

$$\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1) \quad \dots (i)$$

$$t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \quad \dots (ii)$$

$$A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2) \quad \dots (iii)$$

$$C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2) \quad \dots (iv)$$

[0016] (4) D/d が2.0以下である、
上記(3)に記載の圧力配管用鋼管素材。

発明の効果

[0017] 本発明によれば、高い限界内圧を有する圧力配管用鋼管を安定的に得ることが可能となる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]推定装置によって残留応力が推定される自緊処理後の鋼管の一例を示す図である。

[図2]多変数関数の導出方法を説明するための図である。

[図3]多変数関数の導出方法を説明するための図である。

[図4]多変数関数の導出方法を説明するための図である。

[図5]外表層領域と内表層領域との硬さ比、および鋼管の外径と内径との比の適正範囲の検討方法を説明するための図である。

[図6]外表層領域と内表層領域との硬さ比、および鋼管の外径と内径との比の適正範囲の検討方法を説明するための図である。

[図7]外表層領域と内表層領域との硬さ比、および鋼管の外径と内径との比の適正範囲の検討方法を説明するための図である。

[図8]外表層領域と内表層領域との硬さ比、および鋼管の外径と内径との比の適正範囲の検討方法を説明するための図である。

[図9]外表層領域と内表層領域との硬さ比、および鋼管の外径と内径との比の

適正範囲の検討方法を説明するための図である。

[図10]内圧疲労試験片の形状を説明するための図である。

[図11]ダンベル形状の小型試験片の採取位置および形状を説明するための図である。

発明を実施するための形態

- [0019] 従来技術において、限界内圧を十分に高めるための自緊処理圧を最適化できない要因として、鋼管の内面の残留応力を求める方法が確立されていなかったことが挙げられる。なお、本願明細書において残留応力とは、鋼管の周方向における残留応力を意味する。
- [0020] 従来、本発明者らは、自緊処理後の鋼管を半割切断して、半割後の鋼管の内面の残留応力を測定することによって、自緊処理後の鋼管の内面の残留応力を相対的に評価していた。なお、半割切断とは、軸方向から見て鋼管が円弧状の2つの部材に2等分されるように該鋼管を切断することを意味する。
- [0021] しかしながら、自緊処理圧を最適化して限界内圧を十分に高めるためには、自緊処理後かつ半割前の鋼管の内面の残留応力を定量的に評価する必要がある。そこで、本発明者らは、鋼管の内面の残留応力を定量的に評価するための方法について研究を進めてきた。その研究の中で、本発明者らは、半割後の鋼管の内面の残留応力に加えて、半割前後の鋼管の外面の残留応力を考慮することによって、自緊処理後かつ半割前の鋼管の内面の残留応力を評価することを検討した。
- [0022] 本発明者らは、まず、評価対象となる鋼管の解析モデルを用いて、種々の条件で数値解析（FEM解析）を行い、自緊処理によって鋼管の各部に発生する残留応力（計算値）を求めた。具体的には、本発明者らは、まず、数値解析によって、自緊処理後かつ半割前の鋼管の外面の残留応力 $\sigma_{o,1}$ 、自緊処理後かつ半割前の鋼管の内面の残留応力 $\sigma_{i,1}$ 、自緊処理後かつ半割後の鋼管の外面の残留応力 $\sigma_{o,2}$ 、および自緊処理後かつ半割後の鋼管の内面の残留応力 $\sigma_{i,2}$ を求めた。
- [0023] 上記のようにして得られた各残留応力について詳細な検討を行った結果、

本発明者らは、半割前の鋼管の内面の残留応力 σ_{i1} は、半割前の鋼管の外面の残留応力 σ_{o1} 、半割後の鋼管の外面の残留応力 σ_{o2} 、および半割後の鋼管の内面の残留応力 σ_{i2} を用いて高精度で推定できることを見出した。

[0024] そして、半割前の鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} が所定の条件を満足するよう自緊処理条件を調整することで、高い限界内圧を有する鋼管を安定して得られるとの知見を得るに至った。

[0025] 加えて、上述のように、薄肉の鋼管の場合、内表面近傍のみを部分的に塑性変形させるのが困難であるという問題もある。本発明者らは、この問題を解決するためにさらに検討を行った結果、鋼管の外表面側の硬さを内表面側の硬さに対して、予め高めておくことにより、薄肉の鋼管であっても、内表面近傍のみを降伏させ、残留応力を付与できることを見出した。

[0026] 本発明は上記知見に基づいてなされたものである。以下、本発明の各要件について詳しく説明する。

[0027] 1. 圧力配管用鋼管および鋼管素材

本発明の一実施形態に係る鋼管は、自緊処理が施された圧力配管用の鋼管である。圧力配管には、油圧シリンダー、エアバッグ鋼管、アキュムレータ、水素用配管、燃料噴射管等が含まれる。また、本発明の他の実施形態に係る鋼管素材は、上記の圧力配管用鋼管の素材となるものであり、自緊処理を施される用途に用いられるものである。すなわち、鋼管素材に対して、自緊処理を施すことにより圧力配管用鋼管が得られる。

[0028] そして、鋼管素材の外表面層領域における平均硬さが、内表面層領域における平均硬さの1.20倍以上である。このように規定する理由については後述する。ここで、外表面層領域とは、鋼管素材の外表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの領域を指し、内表面層領域とは、鋼管素材の内表面から肉厚の $1/4$ の深さ位置までの領域を指す。

[0029] 鋼管素材の外表面層領域における平均硬さを、内表面層領域における平均硬さの1.20倍以上とすることにより、鋼管素材に対して自緊処理を施した際に、外表面層領域を降伏させることなく、内表面層領域のみ塑性変形させ、圧縮

残留応力を付与することが可能となる。鋼管素材の外表面層領域における平均硬さは、内表面層領域における平均硬さの1.50倍以上であるのが好ましく、2.00倍以上であるのがより好ましい。

[0030] ここで、自緊処理によって硬さは大きく変化しないため、自緊処理後の鋼管についても、鋼管素材と同様の関係が成立する。すなわち、鋼管の外表面層領域における平均硬さが、内表面層領域における平均硬さの1.2倍以上であり、1.5倍以上であるのが好ましく、2.0倍以上であるのがより好ましい。ここで、外表面層領域とは、鋼管の外表面から肉厚の1/4の深さ位置までの領域を指し、内表面層領域とは、鋼管の内表面から肉厚の1/4の深さ位置までの領域を指す。

[0031] なお、鋼管素材または鋼管における、内表面層領域および外表面層領域における平均硬さは以下のように測定する。まず、JIS Z 2244:2009（ビッカース硬さ試験－試験方法）に準拠して、鋼管素材または鋼管の断面におけるビッカース硬さ分布を測定する。上記の断面は、鋼管素材または鋼管の軸方向に垂直な断面でもよいし、軸方向に平行かつ中心軸を通る断面でもよい。

[0032] 硬さ試験機には汎用のマイクロビッカース硬さ計を用い、試験力は鋼管の寸法に応じて1～10Nとする。測定箇所は、鏡面研磨した観察面において、内表面から外表面にかけて肉厚の1/10～1/20の距離を径方向間隔として空ける。圧痕同士が近接する場合は、径方向に垂直な方向に測定位置をずらし、千鳥状の位置について測定してもよい。こうして得られた硬さ分布より、内表面層領域および外表面層領域にそれぞれ含まれる硬さの値を平均化することで、内表面層領域および外表面層領域における平均硬さが得られる。

[0033] また、鋼管素材の外表面層領域における平均硬さを高める方法（以下、「硬化処理」ともいう。）については特に制限はない。例えば、鋼管素材の外表面側から、高周波焼入れを行う方法が挙げられる。具体的には、高周波加熱によって外表面の温度が900℃以上となるまで瞬間的に加熱し、直ちに水冷することにより、外表面層領域の硬さのみを増加させることが可能である。

高周波焼入れを行った後の鋼管素材に対して、必要に応じて、100～300℃で30分以上保持した後に空冷する焼戻し処理を施してもよい。

[0034] その他にも、鋼管素材の外表面に対してショットピーニング処理またはロール加工を施すことにより、外表層領域のみを加工硬化させる方法、外表面に浸炭処理、窒化処理もしくは浸炭窒化処理を施す方法等を採用してもよい。

[0035] 本発明において、鋼管の寸法については特に制限はない。一般的には、高い内圧に耐えるためには、鋼管の内径が大きいほどそれに応じて肉厚を大きくすることが望ましい。鋼管の内径が一定であれば、肉厚が大きくなるに従い、鋼管の外径も大きくなる。すなわち、高い内圧に耐えるためには、鋼管の内径が大きいほど鋼管の外径も大きくすることが望ましい。しかしながら、上述のように、本発明の効果は、薄肉の鋼管においてより顕著に発揮される。そのため、本発明においては、鋼管の外径を D (mm)、内径を d (mm)とした場合に、 D/d は2.0以下、1.9以下、または1.8以下であってもよい。

[0036] その他の寸法については、用途に応じて選択すればよく、特に制限を設ける必要はない。例えば、鋼管を油圧シリンダーとして用いる場合には、ピストンの出力（荷重）を確保するために、使用圧力（内圧）に応じた内径が一般に15～580mmの範囲から選定することが好ましい。また、内圧の繰り返しに耐えられるように、肉厚は5～60mmの範囲から、外径は30～700mmの範囲から選定することが好ましい。内圧疲労強度が高いほど、肉厚を薄くすることができ、これに応じて外径も決まる。

[0037] 鋼管をエアバッグインフレーターとして用いる場合には、鋼管の外径は20～100mmであることが望ましく、20～60mmであることがより望ましい。鋼管の肉厚は1～5mmであることが望ましく、1～4mmであることがより望ましい。

[0038] 鋼管をアキュムレータとして用いる場合には、鋼管の外径は25～500mmであることが望ましく、50～400mmであることがより望ましい。

鋼管の肉厚は2～40 mmであることが望ましく、4～30 mmであることがより望ましい。

[0039] また、鋼管を水素ガス配管または燃料噴射管として用いる場合には、使用時における内部の圧力変動を少なくするために、ある程度の容量が必要となる。そのため、鋼管の内径は2.5 mm以上であることが望ましく、3.0 mm以上であることがより望ましい。また、高い内圧に耐える必要があるため、鋼管の肉厚は1.5 mm以上であることが望ましく、2.0 mm以上であることがより望ましい。一方、鋼管の外径は20 mm以下であることが望ましく、15 mm以下であることがより望ましく、10 mm以下であることがさらに望ましい。

[0040] 機械特性についても、用途に応じて選択すればよく、特に制限を設ける必要はない。しかしながら、圧力配管として用いるためには、硬化処理前の鋼管素材の引張強さ、または硬化処理およびその後の自緊処理後の鋼管の内表層領域における引張強さは、500 MPa以上であるのが好ましく、600 MPa以上であるのがより好ましく、700 MPa以上であるのがさらに好ましい。降伏応力は、300 MPa以上であるのが好ましく、360 MPa以上であるのがより好ましく、420 MPa以上であるのがさらに好ましい。

[0041] また、硬化処理前の鋼管素材の硬さ、または硬化処理およびその後の自緊処理後の鋼管の内表層領域における硬さは、ビッカース硬さで、150 HV以上であるのが好ましく、180 HV以上であるのがより好ましく、220 HV以上であるのがさらに好ましい。なお、上記硬さに上限を設ける必要はないが、特に内表層領域における硬さが過剰であると、自緊処理によって圧縮残留応力を導入することが困難になるため、ビッカース硬さで、500 HV未満であるのが好ましい。

[0042] 降伏比は、0.50～0.95が好ましく、より高い圧力で自緊処理を行い、大きな圧縮残留応力を得るためには、降伏比は0.60以上であるのがより好ましく、0.70以上であるのがさらに好ましい。また、低い圧力に

よる自緊処理で、より効率的に圧縮残留応力を導入するためには、降伏比が 0.90 以下であるのがより好ましく、0.85 以下であるのがさらに好ましい。

[0043] 本発明において、鋼管の内表層領域の機械的特性は、非特許文献 1 に示されるような、厚さ 0.2 mm 程度のダンベル形状の小型試験片を、鋼管の内表面に接するように放電加工によって切り出して、引張試験を行うことで測定できる。引張試験でのひずみ測定については、非特許文献 1 に示された方法に従い、引張試験機アクチュエータ変位（ストローク）および試験片の平行部長さより換算して求める。

[0044] なお、硬化処理前の鋼管素材があれば、その機械的特性は、鋼管の直管部を切り出し、その両端面から一定長さの領域（以下、「つかみ部」という。）をチャッキングし、つかみ部間の平行部に伸び計を取り付けた上で、引張試験を行うことによって求める。チャッキングは、鋼管外半径よりも浅い V 溝または R 溝を設けた接触片を、油圧、ボルト締め、または、くさび治具の使用により、つかみ部を押圧することによって行う。つかみ部の長さは試験鋼管が試験中にすべらないように、押し付け圧力と試験荷重とを考慮して決めればよい。また、平行部の長さは、伸び計を取り付けられ、かつ、破断直前のくびれ変形がチャックによって影響されない程度に確保されればよい。なお、鋼管に十分な長さの直管部がない場合についても、非特許文献 1 に示されるような薄肉ダンベル形状の小型試験片を切り出して引張試験を行ってもよい。

[0045] また、本発明に係る圧力配管用鋼管は、下記（I）式を満足する限界内圧を有することが好ましい。

$$I P \geq 0.44 \times T S \times \alpha \quad \dots (I)$$

$$\alpha = [(D/d)^2 - 1] / [0.776 \times (D/d)^2] \quad \dots (II)$$

I)

但し、上記（I）式中の I P は鋼管の限界内圧（MP a）、T S は鋼管の内表層領域、または鋼管素材の引張強さ（MP a）を意味し、 α は上記（II

)式で表される値である。また、上記(II)式中のDは鋼管の外径(mm)、dは内径(mm)である。 α は管の外径と内径との比によって内圧と管内面の発生応力との関係が変化することを補正する係数である。

[0046] なお、本発明において、限界内圧とは、内圧疲労試験において最低内圧を18MPaとして、時間に対して正弦波をとる繰返し内圧変動を与え、繰返し数が 10^7 回になっても破損(リーク)が生じない最高内圧(MPa)を意味する。具体的には、縦軸を最大内圧とし、横軸を破損繰返し数としたS-N線図上で、破損が生じた最大内圧の最小値と、 10^7 回になっても破損しなかった最大値の中間値を限界内圧とする。

[0047] 2. 残留応力推定モデル

半割前の鋼管の内面の残留応力 σ_{i1} を推定するためのモデルについて、詳しく説明する。図1は、本モデルによって残留応力が推定される自緊処理後の鋼管の一例を示す図である。図1において、(a)は、自緊処理が施された鋼管20の左側面図であり、(b)は、(a)に示す鋼管20の正面図であり、(c)は、(a)に示す鋼管20を半割切断して得られる半割試料22の左側面図であり、(d)は、(c)に示す半割試料22の正面図である。なお、本明細書において半割後の鋼管とは、自緊処理後の鋼管を半割切断して得られる半割試料を意味する。

[0048] 本モデルでは、自緊処理後の鋼管20の外面20aの残留応力 σ_{o1} 、半割試料22の外面22aの残留応力 σ_{o2} 、および半割試料22の内面22bの残留応力 σ_{i2} の実測値を用いる。なお、上述のように残留応力とは、鋼管20の周方向における残留応力を意味する。

[0049] 図1を参照して、残留応力を測定する際の鋼管20の長さLは、鋼管20の外径Dの3倍以上とすることが好ましく、例えば30mm程度とすることができ、鋼管20を半割切断する際に切断に伴う発熱が過剰になると、内面における残留応力に影響を与える。このため、発熱が極力ない切断方法を採用する必要がある。ワイヤーカット放電加工により半割切断することが好ましい。この際、半割試料22の側面視において、半割試料22の切断面2

2 c と外面 2 2 a の中心との距離 X (切断面 2 2 c に垂直な方向における距離) は、鋼管 2 0 の半径 r の ± 5 % 以内の範囲になるよう制御する。

[0050] 残留応力の測定は、電解研磨によって鋼管 2 0 の外面 2 0 a および半割試料 2 2 の内面 2 2 b の表層を 1 0 μ m 以下の範囲で除去した後に行う。測定方法としては、X線回折による $\sin^2 \psi$ 法を用いることができ、非特許文献 2 に準拠して行うことができる。

[0051] 以上の方法によって実測された残留応力 $\sigma_{o,1}$, $\sigma_{o,2}$, $\sigma_{i,2}$ 、ならびに外径 D および内径 d を変数とする多変数関数によって、残留応力 $\sigma_{i,1}$ の推定値を算出する。

[0052] 具体的には、図 2 (a) に示すように、二次元平面ひずみ要素によって、鋼管 2 0 の横断面 (管軸方向に垂直な断面) をモデル化した円弧状の解析モデル 4 0 (1 / 4 モデル) を作成する。図示は省略するが、解析モデル 4 0 は、複数の要素 (メッシュ) に分割されている。解析モデル 4 0 の物性値は、弾性体とする。

[0053] まず、鋼管 2 0 を模擬するために、図 2 (b) に示すように、解析モデル 4 0 の周方向における両端部 4 0 a, 4 0 b の周方向への移動を規制するように、拘束条件を設定する。その後、初期状態として、自緊処理時の鋼管 2 0 の状態を模擬した体積力を設定する。具体的には、初期状態では、解析モデル 4 0 の内面 4 0 c に周方向の圧縮残留応力 (− 1 0 0 MP a) を与える。

[0054] また、初期状態では、内面 4 0 c から解析モデル 4 0 の径方向に離れた位置 P (円弧状の破線で示す位置) と外面 4 0 d との間の領域には、応力が生じていないものとする。さらに、初期状態では、内面 4 0 c と位置 P との間の領域の応力分布は、内面 4 0 c から位置 P に向かって圧縮応力が漸次低下するように、線形分布とした。なお、図 2 (b) ならびに後述の図 3 および図 4 には、端部 4 0 b における応力状態が示されている。以下においては、端部 4 0 b 上において圧縮応力が 0 になる点 P 1 と内面 4 0 c との径方向における距離を、距離 t と記載し、解析モデル 4 0 の厚みを、厚み T と記載す

る。なお、端部40b上において圧縮応力が0になる点が複数ある場合は、内面40cに近い方の一点をP1とする。

[0055] 上記のように体積力を設置した後、弾性解析を実施して、応力を再配分する。これにより、例えば、図3に示すように、解析モデル40の応力状態が変化する。なお、図3においては、応力が0になっている位置を破線で示している。破線よりも内側の領域では、周方向の圧縮応力が発生し、破線よりも外側の領域では、周方向の引張応力が発生している。図3に示す状態では、解析モデル40の全体の応力分布の積分値は0になる。図3に示す応力状態が、自緊処理後の鋼管20の応力状態に対応する。そして、図3に示す状態において、内面40cと端部40bとの交点の応力を、自緊処理後の鋼管20の内面20bの残留応力 $\sigma_{i,1}$ として取得し、外面40dと端部40bとの交点の応力を、自緊処理後の鋼管20の外面20aの残留応力 $\sigma_{o,1}$ として取得する。

[0056] 次に、半割試料22（半割後の鋼管20）を模擬するために、図4に示すように、端部40aの拘束を解除して、弾性解析を実施する。これにより、解析モデル40の応力状態がさらに変化する。なお、図4においては、応力が0になっている位置を破線で示している。図4に示す例では、解析モデル40において、径方向における中央部には、周方向の引張応力が発生し、内面40cに沿う円弧状の領域および外面40dに沿う円弧状の領域には、周方向の圧縮応力が発生している。

[0057] また、図4に示す解析モデル40では、端部40aが半割試料22の切断面22c（図1参照）に対応し、端部40bが半割試料22の周方向における中心部22d（図1参照）に対応する。そして、図4に示す状態において、内面40cと端部40bとの交点の応力を、半割試料22の内面22bの残留応力 $\sigma_{i,2}$ として取得し、外面40dと端部40bとの交点の応力を、半割試料22の外面22aの残留応力 $\sigma_{o,2}$ として取得する。

[0058] 任意の寸法の鋼管20について、図2（b）、図3および図4で説明した上記の解析を、初期状態における距離tを種々変化させて（すなわち、図2

(b)において圧縮応力が0になる点P1の位置を変化させて)行う。

[0059] 本発明者らの種々の検討の結果、鋼管20の厚みT、ならびに上記のようにして求められる自緊処理後の鋼管20における距離t(図3参照)、鋼管20の外面20aの残留応力 σ_{o1} (図3参照)、鋼管20の内面20bの残留応力 σ_{i1} (図3参照)、半割試料22の外面22aの残留応力 σ_{o2} (図4参照)、および半割試料22の内面22bの残留応力 σ_{i2} (図4参照)の間には、一定の関係があることが分かった。

[0060] 具体的には、本発明者らは、自緊処理後の鋼管20における $(t/T)^2$ の値と、 $(\sigma_{i2}/-\sigma_{i1})$ の値との間に、一定の相関があることを見出した。そして、 $(t/T)^2$ の値と、 $(\sigma_{i2}/-\sigma_{i1})$ の値との関係を最小二乗法で線形近似することによって、下記(1)式を求めた。なお、下記(1)式において、AおよびBは係数である。

$$\sigma_{i2}/(-\sigma_{i1}) = A \times (t/T)^2 - B \quad \dots (1)$$

[0061] 上記(1)式を σ_{i1} について整理し、下記(i)式が得られる。なお、本発明においては、Aは下記(iii)式で表される値とし、Bは1とした。

$$\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1) \quad \dots (i)$$

$$A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2) \quad \dots (iii)$$

[0062] また、本発明者らは、自緊処理後の鋼管20における $(t/T)^2$ の値と、 $(\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (-\sigma_{i1})$ の値との間にも、一定の相関があることを見出した。そして、 $(t/T)^2$ の値と、 $(\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (-\sigma_{i1})$ の値との関係を最小二乗法で線形近似することによって、下記(2)式を求めた。なお、下記(2)式において、CおよびEは係数である。

$$(\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (-\sigma_{i1}) = -C \times (t/T)^2 - E \quad \dots (2)$$

[0063] 上記(1)式および(2)式から、 (t/T) は、下記(3)式で表すことができる。

$$t/T = ((B \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - E \times \sigma_{i2}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \quad \dots (3)$$

[0064] さらに、本発明においては、Bは1とし、Eは0とし、下記(ii)式が得られる。また、Cは下記(iv)式で表される値とした。

$$t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \dots (ii)$$

$$C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2) \dots (iv)$$

[0065] 以上の推定モデルから得られる(i)式～(iv)式によって、自緊処理後の鋼管20の内面20bの残留応力の推定値 σ_{i1} を算出することができる。

[0066] そして、本発明に係る鋼管は、 σ_{i1} の値が -150MPa 以下である。圧縮残留応力が -150MPa を超える、すなわち、残留応力の絶対値が 150MPa 未満であると、後述の実施例に示すとおり、限界内圧を向上させる効果が得られない。自緊処理によって、 σ_{i1} を -150MPa 以下とすることによって、高い限界内圧が得られるようになる。

[0067] 3. 外表層領域／内表層領域の硬さ比、鋼管の外径／内径比の適正範囲の検討

上述のように、本発明では、鋼管素材の外表層領域における平均硬さ Hv_o と、内表層領域における平均硬さ Hv_i の比 Hv_o/Hv_i を1.20以上とすること、鋼管素材の外径 D と内径 d の比 D/d が2.0以下であることを適正範囲とした。その根拠は、以下に示すFEM解析に基づく数値計算に基づくものである。

[0068] 解析対象は図1に示す鋼管形状であり、図5(a)に示した三次元六面体二次要素による1/4円筒形状の解析モデルをFEM解析に用いた。解析モデルには、 D/d を1.2、1.5、1.8および2.0とした4種類の形状を用いた。

[0069] モデルの物性値は、弾塑性体とした。弾性領域のヤング率は 205.8GPa 、ポアソン比は0.3とし、弾塑性領域においては、図6に一例を示す真応力と真塑性ひずみとによる応力-ひずみ曲線を用いた。図中の応力-ひずみ曲線はピッカース硬さに応じて複数ある。これは硬さレベルを変えた炭

素鋼による予備試験を行った結果に基づき、応力-ひずみ曲線の硬さ依存性を近似したものである。弾塑性領域の硬化則には移動硬化則を用いた。解析モデル内には、図7に示すように、半径方向位置によって、硬さ分布に応じた異なる応力-ひずみ曲線を設定した。 H_{v0}/H_{vi} としては、1.00、1.20および1.75の3種類がある。

[0070] 内圧を作用させた状態を解析するには、図5(b)に示すようにモデルの内面に内圧Pに相当する半径方向応力 σ_r を与え、同時にモデル横断面に軸方向応力 σ_{ax} を与える。 σ_r および σ_{ax} は、内径dを用いて次式で与えられる。

$$\sigma_r = -P \quad \dots (4)$$

$$\sigma_{ax} = P \times d^2 / (D^2 - d^2) \quad \dots (5)$$

ここで、上記(5)式は、円筒容器に関する基礎式であり、以下の考え方に基づいている。解析対象を閉断面部材と仮定すると、モデルの内断面に内圧が作用することによって軸方向荷重 $P \times \pi d^2 / 4$ が発生する。この軸方向荷重がモデル横断面に作用するため、軸方向応力 σ_{ax} は、上記軸方向荷重をモデル横断面の断面積 $\pi (D^2 - d^2) / 4$ で除すことによって得られる。

[0071] 最初に、バースト試験を再現する解析を行った。まず、モデルに上記(4)および(5)式の σ_r および σ_{ax} を、ゼロから線形的に徐々に増加させながら与える。そして、モデル全体が塑性変形し、解析が収束しない限界に達したら解析を終える。この限界の内圧を、解析で得られるバースト強度とする。予備試験で実験によるバースト強度と解析によるバースト強度とが対応することを確認している。

[0072] 次に、自緊処理を再現するため、バースト強度の0.60倍、0.70倍、および0.85倍の内圧に対応した σ_r および σ_{ax} をモデルに作用させ、除荷した。除荷後の内面の周方向残留応力を出力し、その最小値（基本的に、圧縮残留応力であるため、絶対値は最大値）を、自緊処理によって導入された残留応力の代表値とした。

[0073] こうして得られた自緊処理による残留応力について、 H_{v0}/H_{vi} との

関係を図8に、 D/d との関係を図9に示す。図8において、 D/d が1.2の場合に、 H_{vo}/H_{vi} が1.20以上で内面の圧縮残留応力が -150MPa 以上となっている。また、 D/d が1.8の場合に、 H_{vo}/H_{vi} が1.20以上では圧縮残留応力は変化しないことが分かる。

[0074] 図9において、 H_{vo}/H_{vi} が1.20の場合に、 D/d が1.2以上で内面の圧縮残留応力が -150MPa 以上となっている。 D/d の増大とともに圧縮残留応力が増大しているが、 H_{vo}/H_{vi} が1.75の場合には D/d が1.5以上では増大せず、一定値に飽和している。 H_{vo}/H_{vi} が1.20の場合には、 D/d が1.8以上になると、 H_{vo}/H_{vi} が1.75の圧縮残留応力の飽和値と同等になっている。 D/d が1.8からさらに大きくなると、 H_{vo}/H_{vi} が1.00の圧縮残留応力と H_{vo}/H_{vi} が1.20以上のそれとの差が小さくなっている。そして、 D/d が2.0では、 H_{vo}/H_{vi} が1.00の圧縮残留応力と H_{vo}/H_{vi} が1.20以上のそれとの差がわずかとなり、 D/d が2.0を超える領域では硬化処理による自緊処理後の圧縮残留応力低減効果が小さいといえる。

[0075] 以上より、硬化処理鋼管素材の外表層領域における平均硬さ H_{vo} と、内表層領域における平均硬さ H_{vi} の比 H_{vo}/H_{vi} を1.20倍以上とすること、鋼管素材の外径 D と内径 d の比 D/d が2.0以下であることを適正範囲とした。

[0076] 3. 製造方法

本発明に係る圧力配管用鋼管の製造方法について特に制限はないが、例えば、外表層領域における平均硬さが内表層領域における平均硬さの1.20倍以上である複数の鋼管素材に対して、種々の条件で自緊処理を行い、得られた各鋼管について、上述の方法により σ_{i1} を求め、 -150MPa 以下となる鋼管を選別する工程を行うことで製造することができる。

[0077] なお、自緊処理条件については、例えば、自緊処理圧および/または自緊処理時間を制御することによって、 σ_{i1} が -150MPa 以下となるよう調整することが可能である。上述のように、自緊処理後かつ半割前の鋼管の内

面の残留応力を正確に推定することによって、自緊処理条件を最適化でき、高い限界内圧を有する鋼管を安定して得ることが可能となる。

[0078] 以下、実施例によって本発明をより具体的に説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

実施例

[0079] 表1に示す化学組成を有する鋼を溶製した後、熱間鍛造を行い、直径50mmの丸棒を得た。さらに、当該丸棒を880℃に加熱する焼準処理を行い、試験片の素材とした。試験片素材の降伏応力は382MPa、引張強さは621MPaであった。

[0080] [表1]

表1

化学組成 (質量%, 残部: Feおよび不純物)											
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	Sol.Al	N
0.32	0.38	0.92	0.010	0.040	0.03	0.25	0.06	0.02	0.007	0.035	0.0033

[0081] そして、上記の試験片素材に対して、粗機械加工、熱処理、仕上げ加工を行い、図10に示す形状の内圧疲労試験片を複数本採取した。ここで、粗機械加工後の形状は、図10の仕上げ加工後の形状に対し、外径が1mm大きく、内径が1mm小さい形状とした。なお、図10に記載の長さの単位はmmである。

[0082] 得られた内圧疲労試験片（試験No. 1～7）のうち、試験No. 1～3についてはそのまま用い（焼準品）、試験No. 4～7については、さらに高周波加熱によって外表面を1000℃まで瞬間的に加熱してから直ちに急冷し、続いて150℃に加熱して1時間保持後空冷する高周波焼入焼戻し処理を行った（焼入れ品）。そして、最終仕上げ加工を行い、試験部の内外面においては研磨仕上げを行った。なお、図10の試験片形状において、試験No. 1、2、および4～6の外径は9.0mm（D/d：1.5）、試験No. 3および7の外径は13.2mm（D/d：2.2）である。

[0083] さらに、試験No. 2、3、および5～7の試験片に対して、表2に示す

圧力で自緊処理を施した。自緊処理は、図10の内圧疲労試験片の片側端面をシールし、もう片側端面より試験片内部に圧力媒体として作動油を封入し、封入部の内圧を制御して行った。自緊処理は、封入部の内圧を自緊処理圧まで上昇させ、除荷することによって行うものである。

[0084]

[表2]

表2

試験 No.	区分	D/d	引張強さ* (MPa)	降伏応力* (MPa)	降伏比*	自緊処理圧 (MPa)	平均硬さ (HV)		硬さ比 Hvo/Hvi	残留応力実測値 (MPa)			残留応力推定値 (MPa)	限界内圧 (MPa)	(I)式 [†] 右辺値
							外表面領域Hvo	内表面領域Hvi		σ_{o1}	σ_{o2}	σ_{i2}			
1	焼準品	1.5	621	382	0.62	-	205	196	1.05	-	-	-	170	196	比較例
2	焼準品	1.5	628	391	0.62	265	196	204	0.96	115	-6	28	170	198	
3	焼準品	2.2	625	388	0.62	350	201	197	1.02	94	-66	-73	290	281	参考例
4	焼入れ品	1.5	631	386	0.61	-	433	199	2.18	-	-	-	190	199	
5	焼入れ品	1.5	628	388	0.62	265	440	203	2.17	408	-11	255	210	198	本発明例
6	焼入れ品	1.5	625	390	0.62	350	445	199	2.24	488	-4	321	230	197	
7	焼入れ品	2.2	632	385	0.61	350	438	202	2.17	65	-73	-114	290	284	

[†] IP≥0.44×TS×α ... (I)

* 内圧疲労試験片試験部内表面領域から切り出した小型試験片の引張試験結果

- [0085] 各試験N o. について6本ずつ試験片を作製し、そのうち1本の試験片を用いて、外表層領域および内表層領域の平均硬さの測定と内表層領域の引張試験を行った。硬さの測定においては試験片の軸方向に対し、中心軸を通る平行な断面を試験片試験部より切り出し、この断面が観察面になるよう樹脂に埋め込み、エメリーペーパーさらにバフによる鏡面研磨を行った。硬さ試験機には汎用のマイクロビッカース硬さ計を用い、試験力は3 Nとした。測定は上記観察面において内表面から外表面にかけて半径方向に0.1 mmピッチで行った。すなわち、測定箇所は、試験N o. 1、2、および4～6では計14点、試験N o. 3および7では計35点として、当該位置にビッカース圧痕を導入した。こうして得られた硬さ分布より、内表層領域の3点および外表層領域の3点の硬さのデータを平均化することで、内表層領域および外表層領域における平均硬さとした。
- [0086] 表2に示すように、試験N o. 1～3の外表層および内表層領域の硬さ、ならびに試験N o. 4～7の内表層領域の硬さは、196～205 HVの範囲内にあり、硬化処理の有無、自緊処理の有無による変化は認められなかった。試験N o. 4～7の外表層領域の硬さは、433～445 HVであり、 Hv_o/Hv_i は2.17～2.24であった。
- [0087] 引張試験については、図11に示すように、内圧疲労試験片試験部の内表層領域より、0.2 mm程度の厚さのダンベル形状の小型試験片を、内圧疲労試験片試験部の内表面に接するように放電加工によって2本切り出し、それを用いて行った。引張試験機には、MTS社製Tyttron 250を用いた。ひずみ測定については、非特許文献1に示された方法に従い、引張試験機アクチュエータ変位（ストローク）および試験片平行部長さより換算して求めた。こうして得られた応力-ひずみ曲線において、0.2%耐力を降伏応力とし、最大応力を引張強さとして、小型試験片2本の平均値を測定値とした。
- [0088] 表2に示すように、試験N o. 1～7の内表層領域において、引張強さは621～632 MPa、降伏応力は382～391 MPa、降伏比は0.6

1～0.62であり、硬化処理および自緊処理による変化は認められなかった。

[0089] また、もう1本の試験片については、残留応力測定に供した。まず、電解研磨によって試験片の長手方向中央位置外面の表層を $10\mu\text{m}$ 以下の範囲で除去した後、周方向残留応力 σ_{o1} を測定する。測定方法としては、X線回折による $\sin^2\phi$ 法を用い、非特許文献2に準拠して行った。詳細な測定条件は以下に示すとおりである。

[0090] ・ 走査法：側傾法、 η 一定法（PSPC法）
・ X線応力測定装置：株式会社リガク製PSPC-RSF
・ 特性X線：Cr $\text{K}\alpha$
・ 測定回折面： $\alpha\text{-Fe}211$
・ 入射スリット：シングルコリメータ、直径 0.3mm
・ 入射角（ ϕ ）： 0° 、 12.9° 、 18.5° 、 22.8° 、 26.6° 、 30.0° 、 33.3° 、 36.3° 、 39.3°
・ 入射角（ ϕ ）： ϕ_P 軸揺動 $\pm 3^\circ$
・ 回折角決定法：半価幅法
・ 応力定数（K）： $-318\text{MPa}/^\circ$

[0091] なお、以下に示す残留応力測定条件についても、全て上記したとおりとした。

[0092] 次に、外面の残留応力を測定した試験片を、ワイヤーカット放電加工により管軸方向に半割切断した。切断位置は上記外面残留応力測定位置を周方向 0° とした場合に $\pm 90^\circ$ 近傍とした。半割後の各試料の切断面と長手方向中央位置の外面との厚さ t は、 $D/2 \pm 0.2\text{mm}$ の範囲であった。

[0093] そして、半割後の試料において上記した半割前外面残留応力測定位置にて周方向残留応力 σ_{o2} を再度測定した。さらに、半割後の電解研磨によって試験片長手方向中央位置内面の表層を $10\mu\text{m}$ 以下の範囲で除去した後、管内面の中央位置における周方向残留応力 σ_{i2} を測定した。

[0094] こうして得られた残留応力測定値 σ_{o1} 、 σ_{o2} 、 σ_{i2} を表2に示す。これら

を (i) 式～ (iv) 式に代入して自緊処理後半割前の内面残留応力の推定値 σ_{i1} が得られた。

[0095] さらに、残りの試験片について内圧疲労試験を行い、限界内圧を明らかにした。内圧疲労試験は、最大内圧から最小 18 MPa の範囲で、時間に対して正弦波をとるように繰り返し変動させるものである。内圧変動の周波数は 8 Hz とした。内圧疲労試験の結果として繰返し数が 10^7 回になっても破損（リーク）が起こらない最大内圧を限界内圧として評価した。その結果を表 2 に併せて示す。

[0096] 表 2 の結果から明らかのように、焼準品の試験 No. 1 と試験 No. 2 とを比較すると、試験 No. 2 において、硬化処理をせずに硬さ比を 1.20 以上としなかったため、自緊処理を施したにもかかわらず、十分な圧縮応力が付与されず、自緊処理を施していない試験 No. 1 に対して、限界内圧を向上させることができなかった。

[0097] これに対して、焼入れ品の試験 No. 4 と試験 No. 5 および 6 とを比較すると、外表層領域の硬さを高めていたため、自緊処理によって残留応力が十分に付与されており、限界内圧が向上する結果となった。

[0098] なお、試験 No. 3 は、硬さ比が本発明の規定を満足していない比較例であるが、 D/d が 2.2 と高いため、自緊処理によって残留応力が十分に付与されて、限界内圧が向上する結果となった。また、試験 No. 7 では、試験 No. 3 と D/d が同じであり、外表層領域の硬さを高めており、自緊処理によって残留応力が十分に付与されたが、その値は試験 No. 3 のそれと同等であった。このため、限界内圧についても試験 No. 7 と試験 No. 3 とで同等であった。

産業上の利用可能性

[0099] 本発明によれば、高い限界内圧を有する圧力配管用鋼管を安定的に得ることが可能となる。したがって、本発明に係る圧力配管用鋼管は、特に油圧シリンダー、エアバッグ鋼管、アキュムレータ、水素用配管、燃料噴射管等として好適に用いることができる。

符号の説明

- [0100] 20 鋼管
- 20a 外面
- 20b 内面
- 22 半割試料
- 22a 外面
- 22b 内面
- 22c 切断面
- 22d 中心部
- 40 解析モデル
- 40a, 40b 端部
- 40c 内面
- 40d 外面

請求の範囲

[請求項1]

自緊処理が施された圧力配管用の鋼管であって、
 前記鋼管は外表面および内表面を有し、
 前記外表面から肉厚の1/4の深さ位置までの外表層領域における平均硬さが、前記内表面から肉厚の1/4の深さ位置までの内表層領域における平均硬さの1.20倍以上であり、
 前記鋼管の外径をD (mm)、内径をd (mm)とし、
 自緊処理後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o1} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o2} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の内面の残留応力の実測値を σ_{i2} (MPa)とした場合に、
 下記(i)式～(iv)式によって求められる、自緊処理後の前記鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} (MPa)が-150MPa以下である、

圧力配管用鋼管。

$$\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1) \quad \dots (i)$$

$$t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \quad \dots (ii)$$

$$A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2) \quad \dots (iii)$$

$$C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2) \quad \dots (iv)$$

[請求項2]

D/dが2.0以下である、

請求項1に記載の圧力配管用鋼管。

[請求項3]

自緊処理が施される用途に用いられる圧力配管用の鋼管素材であって、

前記鋼管素材は外表面および内表面を有し、

前記外表面から肉厚の1/4の深さ位置までの外表層領域における

平均硬さが、前記内表面から肉厚の1/4の深さ位置までの内表層領域における平均硬さの1.20倍以上であり、

自緊処理が施された際に、

自緊処理後の鋼管の外径をD (mm)、内径をd (mm)とし、

自緊処理後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o1} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の外面の残留応力の実測値を σ_{o2} (MPa)、自緊処理後かつ半割後の前記鋼管の内面の残留応力の実測値を σ_{i2} (MPa)とした場合に、

下記(i)式～(iv)式によって求められる、自緊処理後の前記鋼管の内面の残留応力の推定値 σ_{i1} (MPa)が -150 MPa以下となる、

圧力配管用鋼管素材。

$$\sigma_{i1} = (-\sigma_{i2}) / (A \times (t/T)^2 - 1) \quad \dots (i)$$

$$t/T = ((\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) / (A \times (\sigma_{o2} - \sigma_{o1}) - C \times \sigma_{i2}))^{1/2} \quad \dots (ii)$$

$$A = 3.9829 \times \exp(0.1071 \times (D/d)^2) \quad \dots (iii)$$

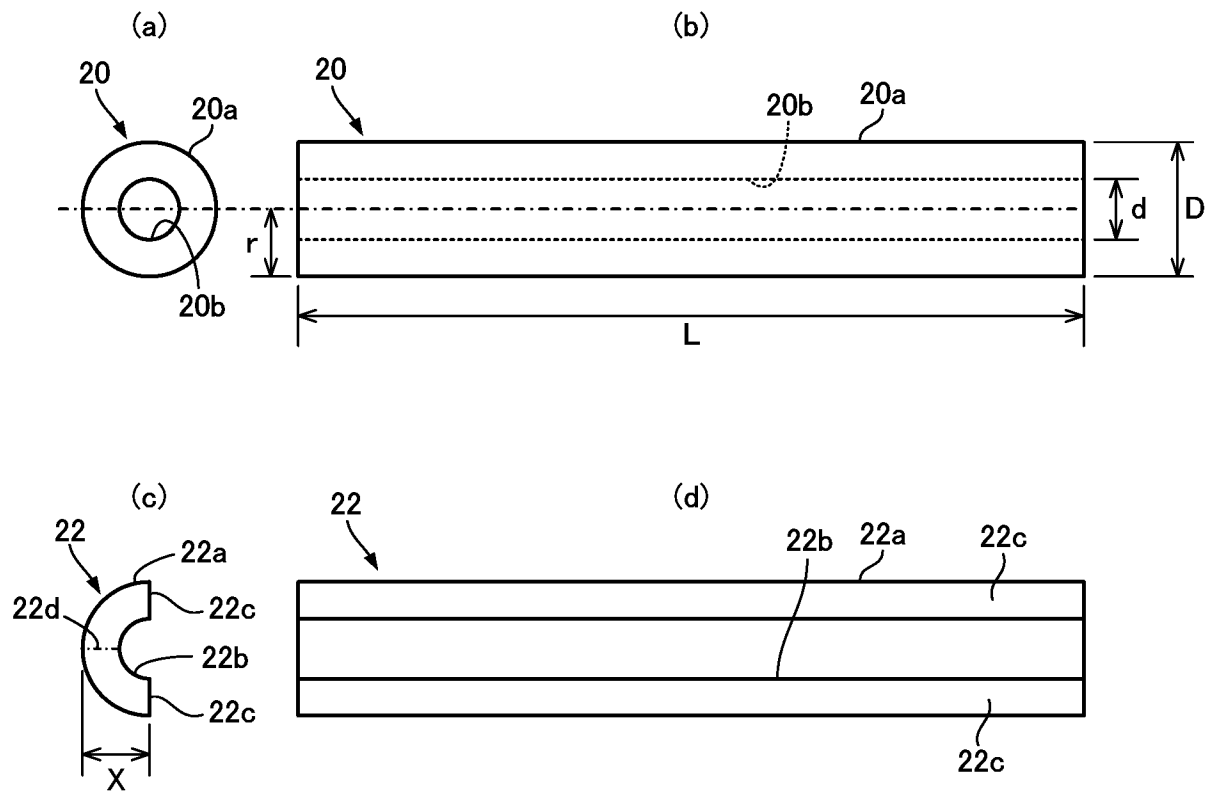
$$C = -3.3966 \times \exp(0.0452 \times (D/d)^2) \quad \dots (iv)$$

[請求項4]

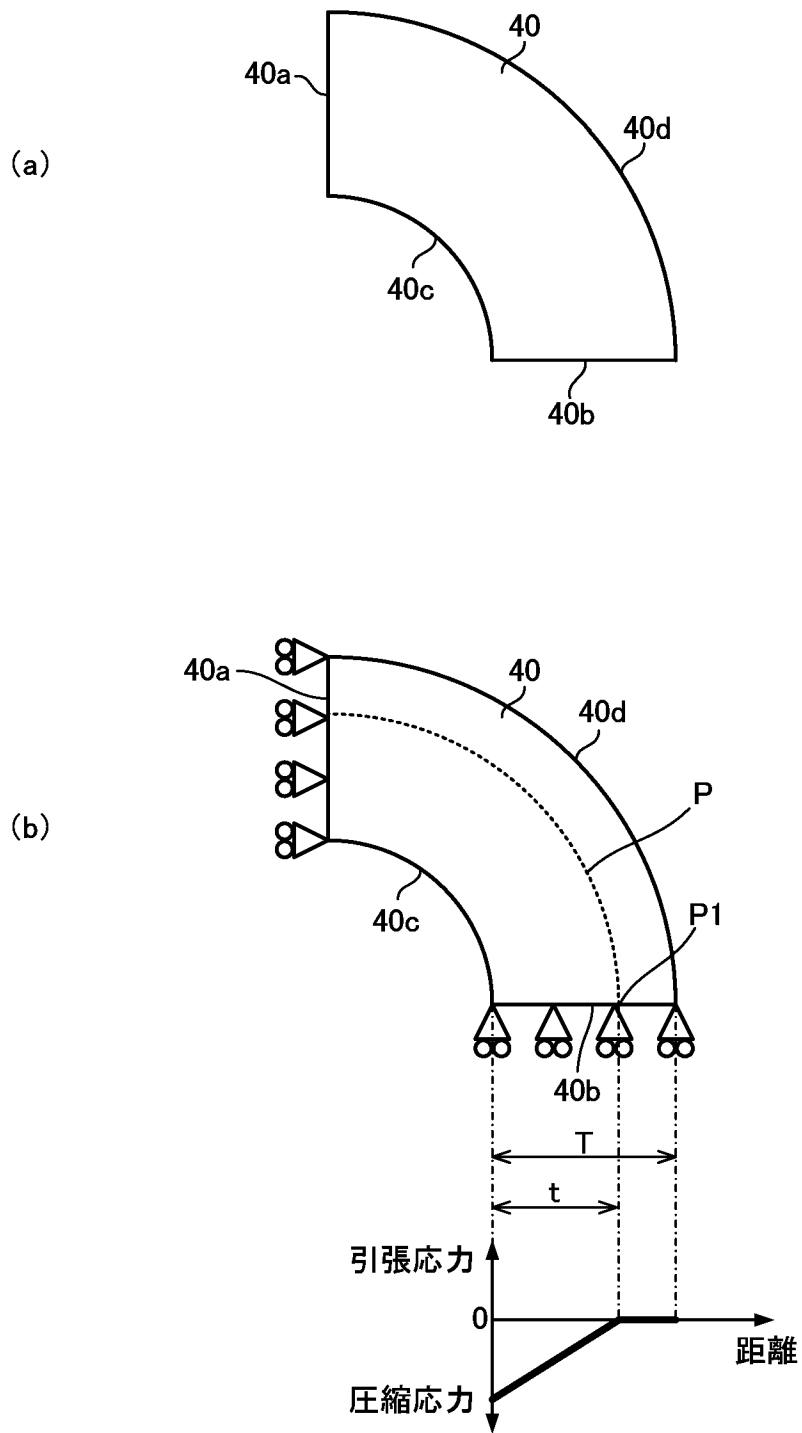
D/dが2.0以下である、

請求項3に記載の圧力配管用鋼管素材。

[図1]

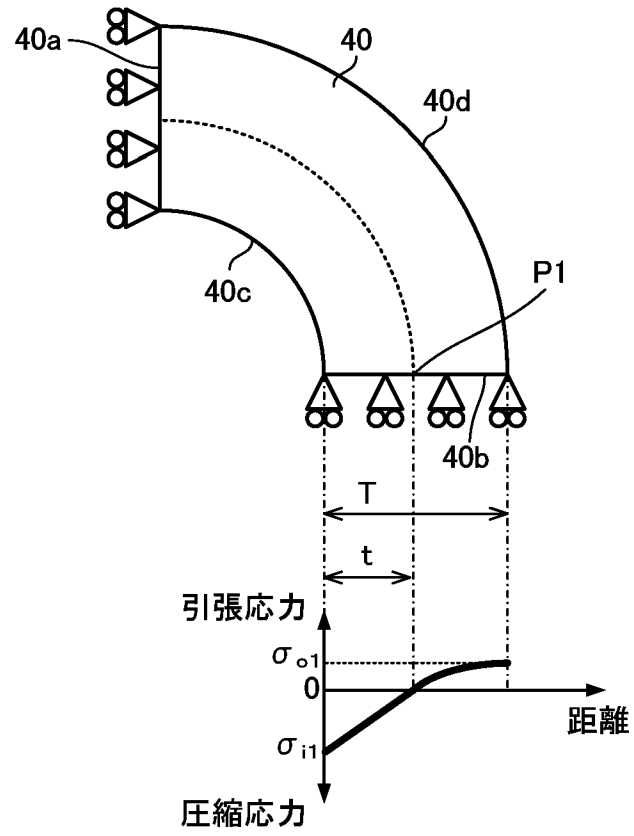


[図2]



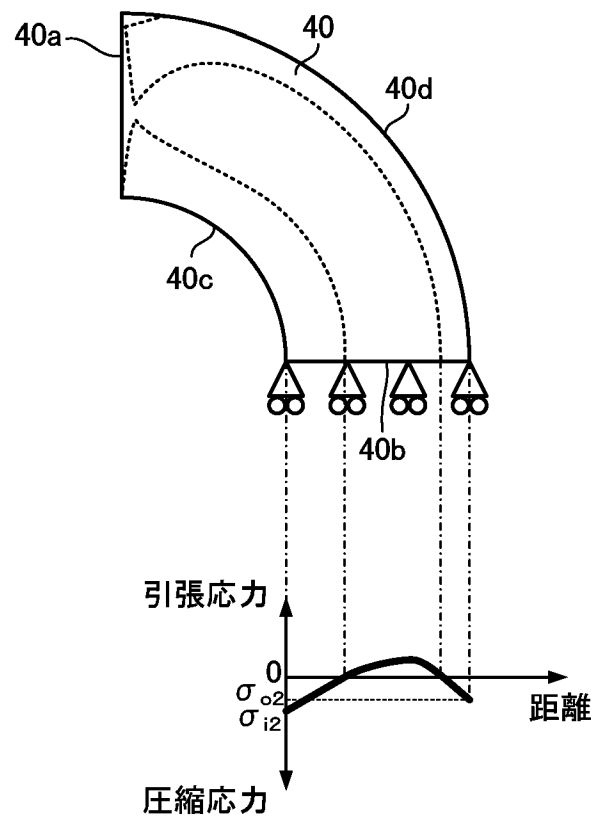
[図3]

(自緊処理後)

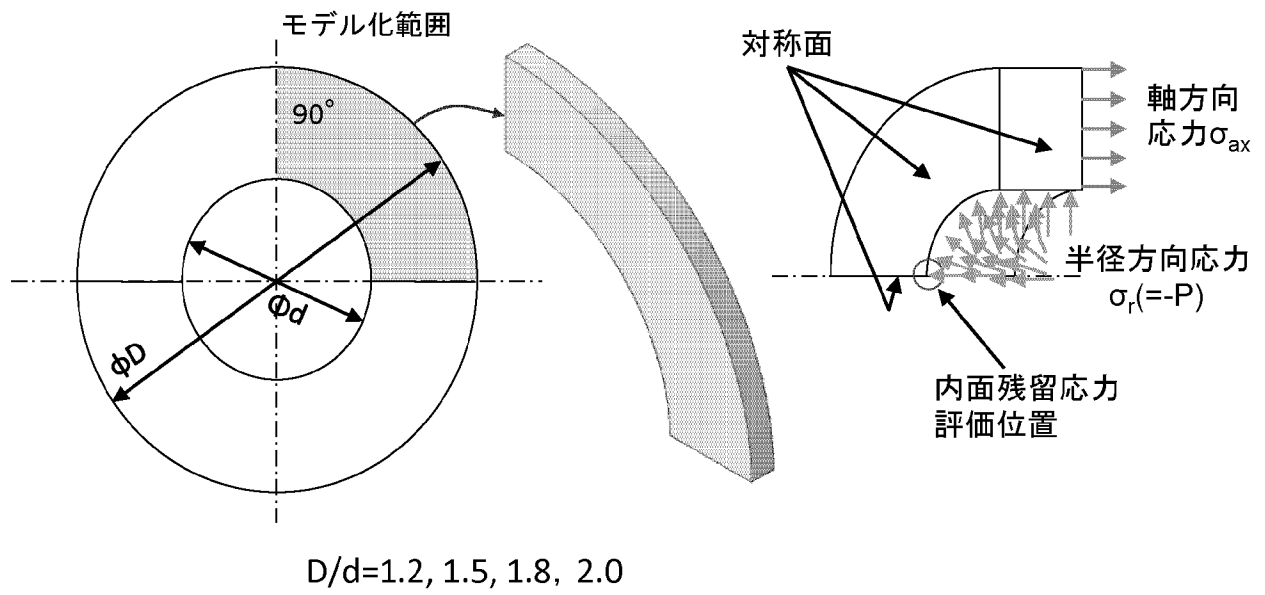


[図4]

(半割後)



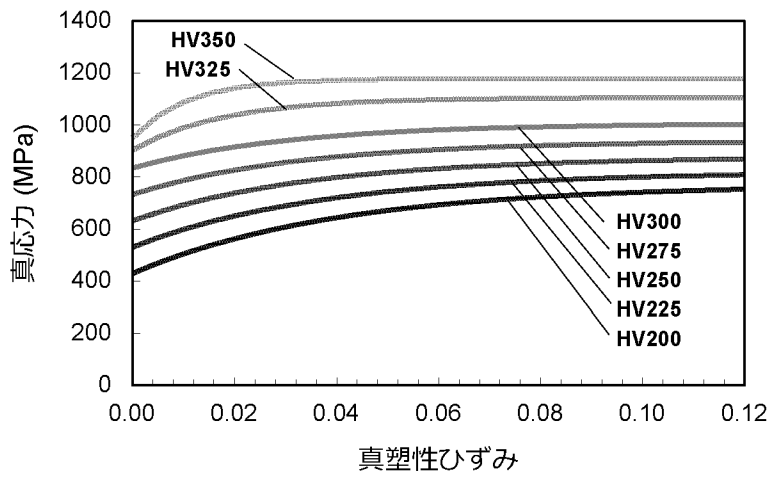
[図5]



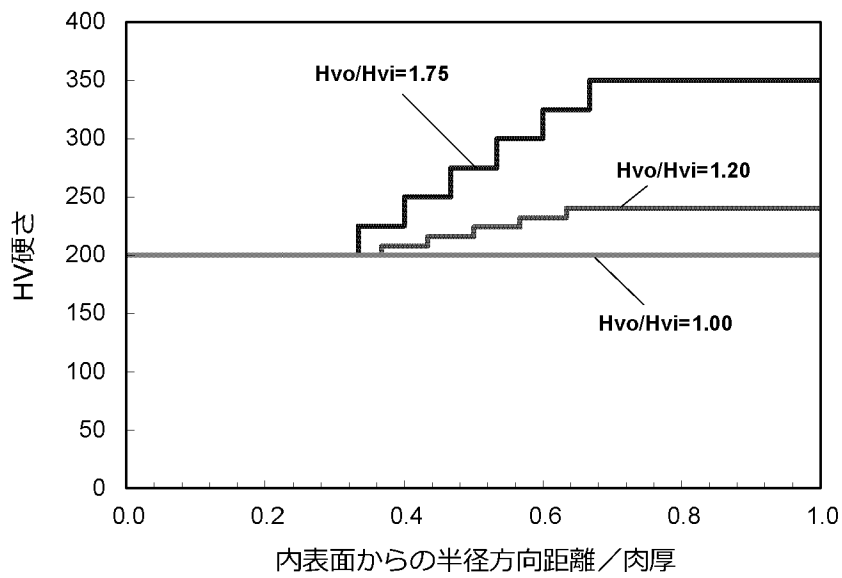
(a)

(b)

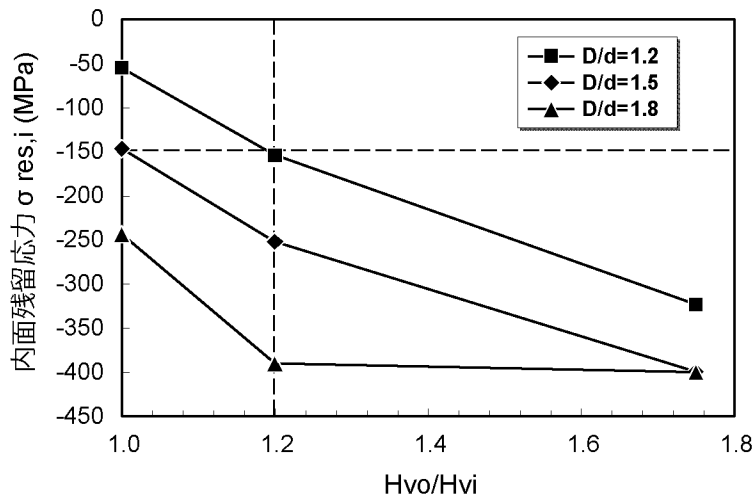
[図6]



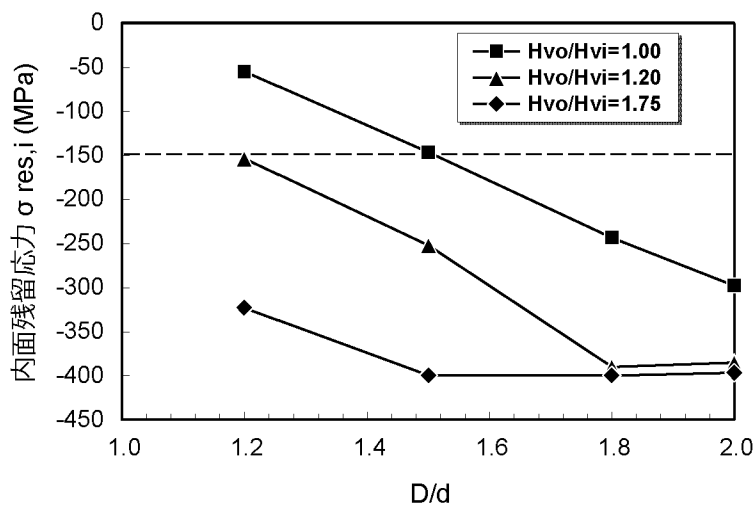
[図7]



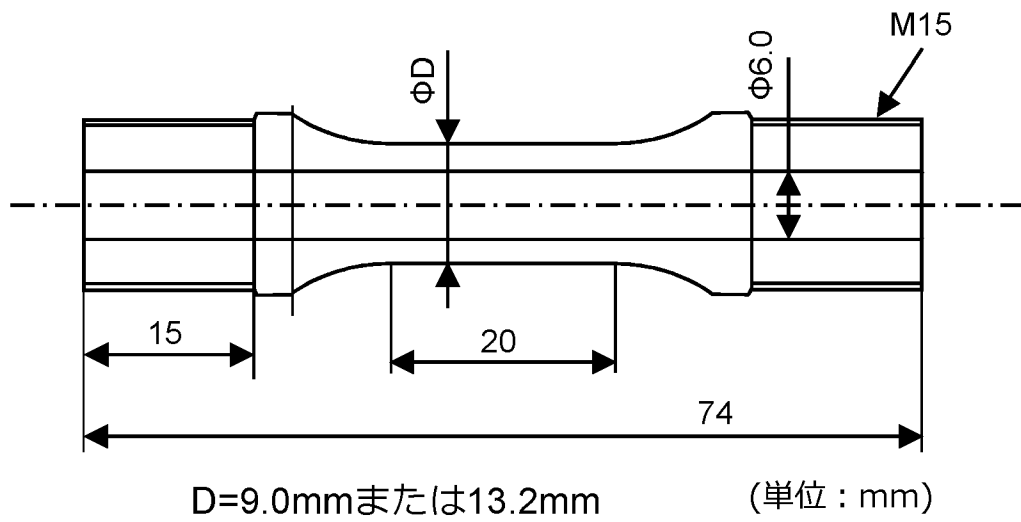
[図8]



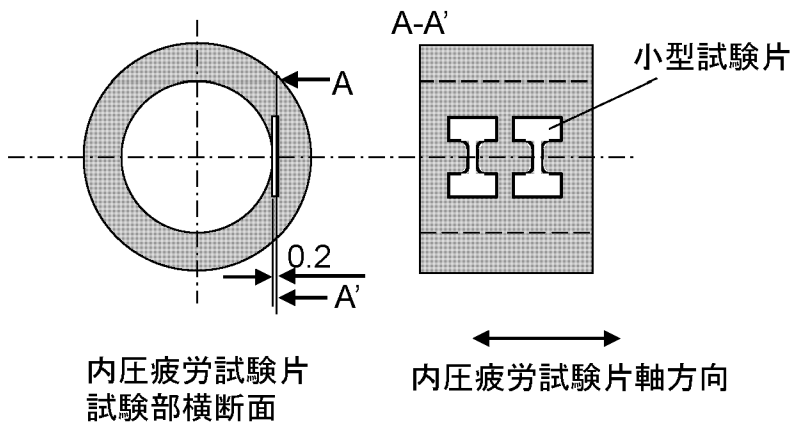
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/000422

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>F16L 9/02</i> (2006.01)i; <i>B60R 21/264</i> (2006.01)i; <i>C21D 7/02</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/00</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/50</i> (2006.01)i; <i>F02M 55/02</i> (2006.01)i FI: F16L9/02; B60R21/264; C21D7/02 C; C22C38/00 301Y; C22C38/00 301Z; C22C38/50; F02M55/02 320P		
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) F16L9/02; B60R21/264; C21D7/02; C22C38/00; C22C38/50; F02M55/02		
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 1971-2022 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022		
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	US 2015/0183015 A1 (ATI PROPERTIES, INC.) 02 July 2015 (2015-07-02) paragraphs [0004], [0040], [0043]-[0044], fig. 11-13B	1-4
A	JP 2004-92551 A (USUI KOKUSAI SANGYO KAISHA, LTD.) 25 March 2004 (2004-03-25) entire text, all drawings	1-4
A	WO 2016/203924 A1 (USUI KOKUSAI SANGYO KAISHA, LTD.) 22 December 2016 (2016-12-22) entire text, all drawings	1-4
A	JP 2005-201254 A (USUI KOKUSAI SANGYO KAISHA, LTD.) 28 July 2005 (2005-07-28) entire text, all drawings	1-4
A	JP 61-283415 A (KAWASAKI HEAVY IND., LTD.) 13 December 1986 (1986-12-13) entire text, all drawings	1-4
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 07 February 2022		Date of mailing of the international search report 01 March 2022
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/000422

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US	2015/0183015	A1	02 July 2015	US 8479549 B1 WO 2015/006089 A1 TW 201521898 A	
JP	2004-92551	A	25 March 2004	US 2004/0080156 A1 entire text, all drawings US 2006/0260124 A1 DE 10340070 A1 FR 2844011 A1 KR 10-2004-0020843 A CN 1490515 A	
WO	2016/203924	A1	22 December 2016	US 2018/0171426 A1 entire text, all drawings EP 3312298 A1 CN 107735506 A KR 10-2018-0018742 A	
JP	2005-201254	A	28 July 2005	US 2005/0127665 A1 entire text, all drawings DE 102004061175 A1 FR 2863668 A1 KR 10-2005-0061374 A CN 1637273 A	
JP	61-283415	A	13 December 1986	(Family: none)	

<p>A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））</p> <p>F16L 9/02(2006.01)i; B60R 21/264(2006.01)i; C21D 7/02(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; C22C 38/50(2006.01)i; F02M 55/02(2006.01)i FI: F16L9/02; B60R21/264; C21D7/02 C; C22C38/00 301Y; C22C38/00 301Z; C22C38/50; F02M55/02 320P</p>																																
<p>B. 調査を行った分野</p> <p>調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））</p> <p>F16L9/02; B60R21/264; C21D7/02; C22C38/00; C22C38/50; F02M55/02</p> <p>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</p> <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 - 2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2022年</td> </tr> </table> <p>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）</p>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2022年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2022年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2022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 - 2022年																															
日本国実用新案登録公報	1996 - 2022年																															
日本国登録実用新案公報	1994 - 2022年																															
<p>C. 関連すると認められる文献</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>引用文献の カテゴリー*</th> <th>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</th> <th>関連する 請求項の番号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 2015/0183015 A1 (ATI PROPERTIES, INC.) 02.07.2015 (2015 - 07 - 02) 段落 0004, 0040, 0043 - 0044, 図 11 - 13 B</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2004-92551 A (白井国際産業株式会社) 25.03.2004 (2004 - 03 - 25) 全文, 全図</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2016/203924 A1 (白井国際産業株式会社) 22.12.2016 (2016 - 12 - 22) 全文, 全図</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2005-201254 A (白井国際産業株式会社) 28.07.2005 (2005 - 07 - 28) 全文, 全図</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 61-283415 A (川崎重工工業株式会社) 13.12.1986 (1986 - 12 - 13) 全文, 全図</td> <td>1-4</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。</p> <table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td></td> </tr> </table>			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	US 2015/0183015 A1 (ATI PROPERTIES, INC.) 02.07.2015 (2015 - 07 - 02) 段落 0004, 0040, 0043 - 0044, 図 11 - 13 B	1-4	A	JP 2004-92551 A (白井国際産業株式会社) 25.03.2004 (2004 - 03 - 25) 全文, 全図	1-4	A	WO 2016/203924 A1 (白井国際産業株式会社) 22.12.2016 (2016 - 12 - 22) 全文, 全図	1-4	A	JP 2005-201254 A (白井国際産業株式会社) 28.07.2005 (2005 - 07 - 28) 全文, 全図	1-4	A	JP 61-283415 A (川崎重工工業株式会社) 13.12.1986 (1986 - 12 - 13) 全文, 全図	1-4	* 引用文献のカテゴリー	“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	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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	“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	“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	“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）	“&” 同一パテントファミリー文献	“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	
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	US 2015/0183015 A1 (ATI PROPERTIES, INC.) 02.07.2015 (2015 - 07 - 02) 段落 0004, 0040, 0043 - 0044, 図 11 - 13 B	1-4																														
A	JP 2004-92551 A (白井国際産業株式会社) 25.03.2004 (2004 - 03 - 25) 全文, 全図	1-4																														
A	WO 2016/203924 A1 (白井国際産業株式会社) 22.12.2016 (2016 - 12 - 22) 全文, 全図	1-4																														
A	JP 2005-201254 A (白井国際産業株式会社) 28.07.2005 (2005 - 07 - 28) 全文, 全図	1-4																														
A	JP 61-283415 A (川崎重工工業株式会社) 13.12.1986 (1986 - 12 - 13) 全文, 全図	1-4																														
* 引用文献のカテゴリー	“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																															
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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																															
“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	“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																															
“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）	“&” 同一パテントファミリー文献																															
“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																																
<p>国際調査を完了した日</p> <p>07.02.2022</p>	<p>国際調査報告の発送日</p> <p>01.03.2022</p>																															
<p>名称及びあて先</p> <p>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</p>	<p>権限のある職員（特許庁審査官）</p> <p>▲高▼藤 啓 3L 4473</p> <p>電話番号 03-3581-1101 内線 3337</p>																															

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/JP2022/000422

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
US	2015/0183015	A1	02.07.2015	US	8479549	B1	
				WO	2015/006089	A1	
				TW	201521898	A	
JP	2004-92551	A	25.03.2004	US	2004/0080156	A1	
				全文, 全図			
				US	2006/0260124	A1	
				DE	10340070	A1	
				FR	2844011	A1	
				KR	10-2004-0020843	A	
				CN	1490515	A	
WO	2016/203924	A1	22.12.2016	US	2018/0171426	A1	
				全文, 全図			
				EP	3312298	A1	
				CN	107735506	A	
				KR	10-2018-0018742	A	
JP	2005-201254	A	28.07.2005	US	2005/0127665	A1	
				全文, 全図			
				DE	102004061175	A1	
				FR	2863668	A1	
				KR	10-2005-0061374	A	
				CN	1637273	A	
JP	61-283415	A	13.12.1986	(ファミリーなし)			