

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-207488

(P2017-207488A)

(43) 公開日 平成29年11月24日(2017.11.24)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
GO 1 N 23/04 (2006.01) GO 1 N 23/04 3 2 0 2 G 0 0 1
GO 1 N 23/18 (2006.01) GO 1 N 23/18

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2017-97425 (P2017-97425) (22) 出願日 平成29年5月16日 (2017. 5. 16) (31) 優先権主張番号 特願2016-99011 (P2016-99011) (32) 優先日 平成28年5月17日 (2016. 5. 17) (33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(71) 出願人 000003458 東芝機械株式会社 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 (74) 代理人 100091982 弁理士 永井 浩之 (74) 代理人 100091487 弁理士 中村 行孝 (74) 代理人 100082991 弁理士 佐藤 泰和 (74) 代理人 100105153 弁理士 朝倉 悟 (74) 代理人 100118843 弁理士 赤岡 明 (74) 代理人 100141830 弁理士 村田 卓久
---	---

最終頁に続く

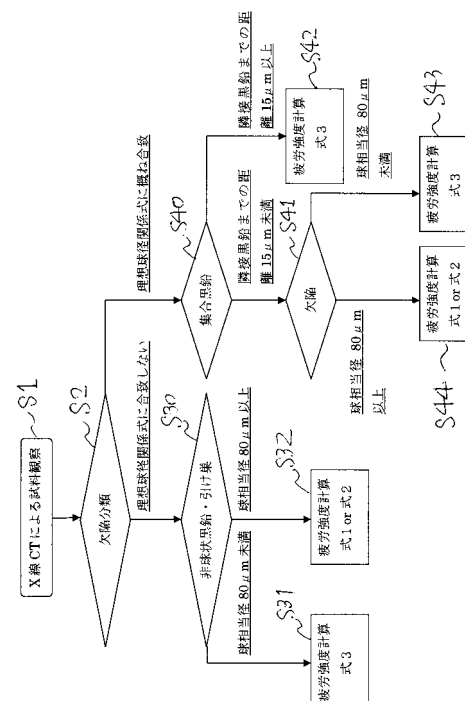
(54) 【発明の名称】 鋳鉄材料の疲労強度を予測する方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 鋳鉄材料の疲労強度を実質的に非破壊で精度良く予測する。

【解決手段】 鋳鉄材料の疲労強度を予測する方法は、前記鋳鉄材料の硬さを測定する工程と、前記鋳鉄材料を X 線 C T (Computed Tomography) により撮像し、前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥の三次元画像を得る工程と、前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥のうちの最大体積を有する欠陥に外接する直方体の体積の三乗根を求める工程と、前記鋳鉄材料の硬さ及び前記直方体の体積の三乗根をパラメータとして含む計算式に基づいて、前記鋳鉄材料の疲労強度を算出する工程と、を備える。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

鋳鉄材料の疲労強度を予測する方法であって、

前記鋳鉄材料を X 線 C T (Computed Tomography) により撮像し、前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥の三次元画像を得る工程と、

前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥のうちの最大体積を有する欠陥に外接する直方体の体積の三乗根を求める工程と、

前記鋳鉄材料の硬さ及び前記直方体の体積の三乗根をパラメータとして含む計算式に基づいて、前記鋳鉄材料の疲労強度を算出する工程と、
を備えた方法。

10

【請求項 2】

前記直方体を構成する互いに対面する一組の面の法線ベクトルが材料に負荷される主応力方向に一致するように前記直方体が設定される、請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

前記欠陥は、非球状黒鉛、引け巣または集合黒鉛である、請求項 1 または 2 記載の方法。

【請求項 4】

曲げ疲労強度を算出する計算式として下式が用いられ、下式において、「 σ 」は前記鋳鉄材料の疲労強度 (単位 MPa)、「HV」は前記鋳鉄材料のビッカース硬さ、「V」は前記直方体の体積 (単位立方マイクロメートル)、「 α 」は前記欠陥の位置に応じて定まる定数であることを特徴とする請求項 1 から 3 のうちのいずれか一項に記載の方法。

20

【数 1】

$$\sigma = \alpha \cdot (HV + 120) / (\sqrt[3]{V})^{1/6}$$

【請求項 5】

軸荷重疲労強度を算出する計算式として下式が用いられ、下式において、「 σ 」は前記鋳鉄材料の疲労強度 (単位 MPa)、「HV」は前記鋳鉄材料のビッカース硬さ、「V」は前記直方体の体積 (単位立方マイクロメートル)、「 α 」は前記欠陥の位置に応じて定まる定数、「r」は前記鋳鉄材料からなる試験片の半径であることを特徴とする請求項 1 から 3 のうちのいずれか一項に記載の方法。

30

【数 2】

$$\sigma = \alpha \cdot (HV + 120)(r - \sqrt[3]{V}) / (r \times \sqrt[3]{V})^{1/6}$$

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のうちのいずれか一項に記載の方法を実施するための解析ソフトウェア。

【請求項 7】

請求項 6 記載の解析ソフトウェアがインストールされたコンピュータと組み合わされた X 線 C T 装置。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、X 線 C T による欠陥観察と硬さ測定の数値に基づいて、実質的に非破壊でかつ実際に疲労強度試験を行うことなく、鋳鉄材料の疲労強度を予測する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、金属材料の疲労試験方法として、JIS Z 2273 ~ Z 2275 等に記載さ

50

れたものが知られている。疲労強度は、例えば、異なる応力振幅毎に破断までの繰り返し数を求めることにより得た S - N 線図に基づいて評価される。疲労試験のモードとしては、回転曲げ、両振り引張圧縮、ねじり等があるが、いずれのモードでも、S - N 線図を作成するためには長時間（例えば、一般的な疲労限度に対応する 10^7 サイクル、またはそれ以上のサイクルの荷重を負荷するために必要な時間）が必要とされる。金属材料のうち特に鋳鉄材料には、巣穴、異常黒鉛等の疲労強度を低下させうる欠陥が存在する。欠陥に起因するばらつきまで考慮して疲労強度の評価を行うには、より長時間が必要となる。

【0003】

非特許文献 1 には、金属材料の疲労限度が、金属材料のビッカース硬さ HV と、欠陥の面積の平方根（ $(\text{area})^{1/2}$ ）と、欠陥が存在する位置により定まる係数とによって表すことができることが記載されている。但し、非特許文献 1 では、欠陥の面積として、人工的に形成した欠陥の面積又は材料の破断面に現れた欠陥の面積を用いている。このため、非特許文献 1 の技術を用いたとしても、非破壊で疲労強度の予測を行うことはできない。また、非特許文献 1 に記載の技術では、多種多様な欠陥が存在しうる鋳鉄材料の疲労強度の予測はできない。非特許文献 2 には、球状黒鉛鋳鉄材料の疲労強度が、鋳鉄材料のビッカース硬さ HV と、欠陥の面積の平方根（ $(\text{area})^{1/2}$ ）と、欠陥が存在する位置により定まる係数とによって表すことができることが記載されている。非特許文献 2 においても、欠陥の面積として、材料の破断面に現れた欠陥の面積を用いているので、非特許文献 2 の技術を用いたとしても、非破壊で疲労強度の予測を行うことはできない。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献 1】疲労強度に及ぼす微小欠陥や非金属介在物の影響とその定量的評価法，村上敬宜：鉄と鋼 Vol.75(1989)，No.8，p1267～p1277

【非特許文献 2】球状黒鉛鋳鉄の疲労限度とその評価法，杉山好弘、浅見克敏、若狭裕信：鋳物 Vol.66(1994)，No.9，p666～p671

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明は、鋳鉄材料の疲労強度を実質的に非破壊で精度良く予測する技術を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一実施形態によれば、鋳鉄材料の疲労強度を予測する方法であって、前記鋳鉄材料を X 線 CT（Computed Tomography）により撮像し、前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥の三次元画像を得る工程と、前記鋳鉄材料中に含まれる欠陥のうちの最大体積を有する欠陥に外接する直方体の体積の三乗根を求める工程と、前記鋳鉄材料の硬さ及び前記直方体の体積の三乗根をパラメータとして含む計算式に基づいて、前記鋳鉄材料の疲労強度を算出する工程と、を備えた方法が提供される。

【発明の効果】

【0007】

上記本発明の実施形態によれば、鋳鉄材料の疲労強度を実質的に非破壊で精度良く予測することができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図 1】本発明の一実施形態に係る疲労強度予測方法の手順を示すフローチャートである。

【図 2】疲労強度予測方法の実証試験に用いた試験片を半径方向外側（第 1 方向）から見た側面図である。

【図 3】図 2 と同じ方向から見た試験片の CT 画像である。

【図 4】図 3 において四角の枠で囲まれた領域を試験片の軸線方向（第 2 方向）から見た C T 画像である。

【図 5】図 3 において四角の枠で囲まれた領域を拡大して示す拡大 C T 画像である。

【図 6】図 4 において四角の枠で囲まれた領域を拡大して示す拡大 C T 画像である。

【図 7】欠陥に外接して欠陥を内包する六面体を画定する方法を説明する図である。

【図 8】簡略化された他の疲労強度予測方法の手順を示すフローチャートである。

【図 9】黒鉛が理想球形（真球形）を有している場合の、黒鉛の体積（Volume）と表面積（Surface）との関係を示す理想球形関係曲線 A と、実際の球状黒鉛鑄鉄における黒鉛の体積（Volume）と表面積（Surface）との関係を示す実際関係曲線 B を記したグラフである。

10

【発明を実施するための形態】

【0009】

本発明の一実施形態に係る疲労強度予測方法につき、図 1 のフローチャートを参照して説明する。ここでは、疲労強度予測対象は球状黒鉛鑄鉄品とする。

【0010】

[X 線 C T による試料観察（ステップ S 1 ）]

まず、X 線 C T（Computed Tomography）装置を用いて疲労強度評価対象部位の観察を行う。X 線 C T 装置としては、例えば、東芝 I T コントロールシステム株式会社製、T O S C A N E R - 3 2 3 0 0 μ F D を用いることができる。この装置により得られた画像は縦、横、高さの三方向に関して全て 5 μ m の分解能を有する。

20

【0011】

次に、画像処理装置を用いて、X 線 C T 装置により撮像された多数の二次元 C T 画像の積層処理を行い、白黒の三次元デジタル画像を構築する。これにより、欠陥の座標、体積を視覚的かつ定量的に把握することができる。三次元デジタル画像では鑄鉄材料に存在する欠陥は濃い黒色として表される。このような機能を有する画像処理装置は、例えば、米国 F E I 社 Avizo（登録商標）、または日本ビジュアルサイエンス株式会社の ExFact（登録商標）V R から提供されるソフトウェアをインストールした汎用コンピュータにより実現することができる。得られた三次元デジタル画像において、グレースケールで光の強さが所定値より低い部分（黒色部分）を欠陥と認識する。

30

【0012】

[欠陥の分類（ステップ S 2 ）]

ステップ S 1 により確認された欠陥を分類する。球状黒鉛鑄鉄品に生じる欠陥には、引け巣、非球状黒鉛、集合黒鉛が含まれる。ここで、まず、黒鉛について考える。黒鉛の表面積を y （単位立方マイクロン）、黒鉛の体積を x （単位平方マイクロン）としたときに、式 $[y = 4.8352 x^{0.6667}]$ で表される x y 平面上の曲線を設定する。以下、本明細書において、上記式 $[y = 4.8352 x^{0.6667}]$ を「理想球形関係式」と呼び、上記曲線を「理想球形関係曲線」と呼ぶこととする。

【0013】

図 9 のグラフには、黒鉛が理想球形（真球形）を有している場合の、黒鉛の体積（Volume）と表面積（Surface）との関係を示す理想球形関係曲線 A と、実際の球状黒鉛鑄鉄における黒鉛の体積（Volume）と表面積（Surface）との関係を示す実際関係曲線 B を記されている。なお、通常は、実際関係曲線 B で示すように、黒鉛の体積（Volume）がある値を超えると、黒鉛の形が崩れて理想球形関係式から外れる。

40

【0014】

ある黒鉛において $(x, y) = (x_1, y_1)$ であったときに、点 (x_1, y_1) が理想球形関係曲線上にあるいはその近傍にある場合には、その黒鉛を球状の黒鉛と見なし、フローはステップ S 4 0（詳細後述）に進む。点 (x_1, y_1) が理想球形関係曲線から乖離している場合には、その黒鉛を非球状の黒鉛と見なし、フローはステップ S 3 0 に進む。

【0015】

50

欠陥が引け巣である場合には、当該引け巣が存在する位置に、当該引け巣と同一の形状寸法を有する黒鉛が存在するものの見なして、理想球形関係式に基づく判定基準と同様の判定基準を適用する。黒鉛は、基地組織に比べると大幅に強度が低い（例えば黒鉛は 20 MPa、最も強度が低いフェライト基地で 200 MPa）ため、疲労強度を予測する上で、黒鉛と引け巣とを区別する必要はない。一般的に引け巣の形状は非球径であるため、最大の欠陥が引け巣である場合には、フローはステップ S 30 に進む。

【0016】

なお、欠陥を構成するものが黒鉛であるか引け巣であるかに関わらず、上述した画像処理により欠陥の三次元形状は正確に把握されているため、上記の表面積 y 及び体積 x は、把握されている三次元形状に基づいて算出することが可能である。

10

【0017】

[欠陥サイズの判定(ステップ S 30)]

ステップ S 30 では、ステップ S 2 において非球形と判定された欠陥（非球状黒鉛または引け巣）の球相当径が 80 μm 未満であるか否かが判定される。80 μm 未満である場合にはフローはステップ S 31 に進み、80 μm 以上である場合にはフローはステップ S 32 に進む。ここで、黒鉛の「球相当径」とは、当該黒鉛の体積 x と同じ体積を有する球の直径を意味する。

【0018】

なお、ステップ S 30 の判定を行うにあたり、判定対象となっている黒鉛（欠陥）の近傍に別の黒鉛があり、かつ、判定対象の黒鉛と別の黒鉛との間の距離が 15 μm 未満の場合には、ステップ S 30 における判定基準を修正する。すなわちこの場合、判定対象の黒鉛と別の黒鉛とを内包する包含球を設定し、この包含球の直径を上述した「球相当径」とみなして、上記と同様の判断を行う。つまり上記の包含球の直径が 80 μm 未満である場合にはフローはステップ S 31 に進み、80 μm 以上である場合にはフローはステップ S 32 に進む。上記の「包含球」とは、判定対象の黒鉛と別の黒鉛を同時に内包することができる最小径の球を意味する。ところで、この修正操作を行うと、単体で見ても最大の非球径黒鉛の（修正後の）球相当径と、単体で見ても最大の非球径黒鉛よりも小さい黒鉛の（修正後の）球相当径が、隣接黒鉛の分布状況次第では逆転する可能性がある。従って、ステップ 30 以降の操作は、単体で見ても最大の非球径黒鉛だけでなく、単体で見ても比較的大きな複数の非球径黒鉛に対して行い、（修正後の）球相当径が最大になるものに対して後述のステップ 31 または 32 の操作を行うことが好ましい。

20

30

【0019】

ステップ S 32 では、次の疲労強度計算式 1、2 のいずれかに従い疲労強度 σ [MPa] を算出することができる。

【0020】

・曲げ疲労の場合に適用される疲労強度計算式 1

【数 1】

$$\sigma = \alpha \cdot (HV + 120) / (\sqrt[3]{V})^{1/6}$$

40

【0021】

・軸荷重疲労（引張圧縮疲労）の場合に適用される疲労強度計算式 2

【数 2】

$$\sigma = \alpha \cdot (HV + 120)(r - \sqrt[3]{V}) / (r \times \sqrt[3]{V})^{1/6}$$

【0022】

上記の疲労強度計算式 1、2 において、「 V 」は選択された欠陥に外接する直方体の体積である（直方体の設定方法については後述する）。また、上記の疲労強度計算式 2 において、「 r 」は軸荷重疲労試験片の半径（単位 μm ）である。

50

【 0 0 2 3 】

上記の疲労強度計算式 1、2 において、H V は材料のビッカース硬さである。ビッカース硬さは、圧痕が疲労破壊挙動に影響を及ぼさない部位で測定すればよい。そのような部位とは、例えば、試験片の場合は掴み部、製品の場合は評価対象部位近傍の低応力部位であってかつ圧痕跡が製品外観に問題となる影響を与えない部位である。

【 0 0 2 4 】

上記の疲労強度計算式 1、2 において、 α は定数（係数）であり、欠陥が試験片の表面にある場合は $\alpha = 1.43$ 、欠陥が試験片の内部にある場合は $\alpha = 1.56$ とすることができる。

【 0 0 2 5 】

10

曲げ疲労に関する上記の疲労強度計算式 1 の原形は、例えば背景技術の項で参照した非特許文献 1 などにより公知である。上記の疲労強度計算式 1 は、非特許文献 1 に記載された疲労強度予測式中の " $\sqrt{\text{area}}$ " の項を、本件発明者の研究成果に基づいて " $(\sqrt[3]{V})$ " に置換することにより得ることができる。なお、非特許文献 1 における " $\sqrt{\text{area}}$ " とは、例えば、疲労試験後の試験片の破断面に存在する欠陥、あるいは試験片の表面に人工的に形成した欠陥の面積の平方根である。本件発明者の研究により、項 " $(\sqrt[3]{V})$ " が欠陥の三次元的な形状寸法が疲労強度に与える影響を良く表すことが見いだされた。この知見により、X 線 CT 装置を用いた非破壊による疲労強度予測が可能となった。

【 0 0 2 6 】

20

軸荷重疲労に関する疲労強度計算式 2 の原形は、例えば背景技術の項で参照した非特許文献 2 により公知である。この疲労強度計算式 2 も、非特許文献 2 に記載された疲労強度予測式中の " $\sqrt{\text{area}}$ " の項（非特許文献 2 における " $\sqrt{\text{area}}$ " は、疲労試験後の試験片の破断面に存在する欠陥面積の平方根である。）を、本件発明者の研究成果に基づいて " $(\sqrt[3]{V})$ " に置換したものである。この場合も、項 " $(\sqrt[3]{V})$ " が欠陥の三次元的な形状寸法が疲労強度に与える影響を良く表すことがわかっている。

【 0 0 2 7 】

欠陥が比較的小さい場合には、ステップ S 3 1 において、次式に従い疲労強度 σ を算出することができる。

$$\sigma = 0.5 \times \sigma_B \cdots (\text{疲労強度計算式 3})$$

但し、 σ_B は材料の引張強さである。

30

上記の疲労強度計算式 3 は、一般的な鋼材の疲労強度で良く知られた計算式であり、欠陥（黒鉛）サイズが小さい球状黒鉛鑄鉄の場合にも適用することが可能である。

【 0 0 2 8 】

なお、上記疲労強度計算式 3 により材料の疲労強度を求める場合、実際に引張試験を行わなくてもよい。球状黒鉛鑄鉄における硬さと引張強さとの関係は様々な文献（例えば、鑄鉄における硬さと各種機械的性質の関係、菅野利猛、丸山義久：鑄造工学 Vol. 77 (2005) , No. 12, P833 ~ 840）により知られているので、材料の硬さ試験結果に基づいて σ_B を求めてもよい。

【 0 0 2 9 】

40

また、上記疲労強度計算式 1 ~ 3 により材料の疲労強度を求めるにあたり、場合によっては、実際に硬さ試験を行わなくても、硬さを推定することも可能である。具体的に例えば、J I S 規定のグレード F C D 4 0 0 ~ F C D 8 0 0 の鑄造品について鑄造シミュレーションを実施した冷却挙動から硬さを推定することができると考えられる（冷却速度とパーライト面積率と硬さには高い相関性が有るため）。この場合には、材料に全く傷を付けずに疲労強度を推定することも可能となる。

【 0 0 3 0 】

[集合黒鉛か否かの判定（ステップ S 4 0）]

ステップ S 4 0 では、ステップ S 2 において球形と判定された黒鉛（欠陥）が集合黒鉛を構成するものか否かが判定される。つまり、ステップ S 2 における判定対象の黒鉛（第 1 黒鉛）から最も近い黒鉛（第 2 黒鉛）までの距離（三次元的な距離）が $15 \mu\text{m}$ 未満で

50

ある場合には、第 1 黒鉛及び第 2 黒鉛のセットは集合黒鉛と見なされ、フローはステップ S 4 1 に進む。なお、集合黒鉛は上記第 1 及び第 2 黒鉛の 2 つから構成されるとは限らず、第 1 黒鉛から $15\ \mu\text{m}$ 未満の距離だけ離れた位置にある第 2 黒鉛とは別の第 3 の黒鉛、あるいは、第 2 黒鉛から $15\ \mu\text{m}$ 未満の距離だけ離れた位置にある第 4 の黒鉛なども、1 セットの集合黒鉛を構成する。つまり、上記条件を満たす複数の黒鉛のうちのいずれか一つから $15\ \mu\text{m}$ 未満の距離だけ離れた位置に別の黒鉛があった場合には、前記複数の黒鉛及び別の黒鉛は 1 セットの集合黒鉛を構成する。

【0031】

ステップ S 2 における判定対象の黒鉛（第 1 黒鉛）から最も近い黒鉛（第 2 黒鉛）までの距離（三次元的な距離）が $15\ \mu\text{m}$ 以上である場合には、第 1 黒鉛及び第 2 黒鉛のセットは集合黒鉛とはみなされず、フローはステップ S 4 2 に進む。ステップ S 4 2 では前述した疲労強度計算式 3 に基づいて、疲労強度が算出される。球形の黒鉛（この場合、第 1 の黒鉛）は、疲労強度に悪影響を及ぼすことはない。

【0032】

[集合黒鉛を欠陥として扱うか否かの判定（ステップ S 4 1）]

まず、ステップ S 4 0 の説明に記載した考え方に基いて 1 セットの集合黒鉛を構成する黒鉛が決定されたら、この集合黒鉛を構成する全ての黒鉛を内包する包含球を設定し、この包含球の半径が $80\ \mu\text{m}$ 未満である場合にはフローはステップ S 4 3 に進み、 $80\ \mu\text{m}$ 以上である場合にはフローはステップ S 4 4 に進む。上記の包含球とは、集合黒鉛を構成する全ての黒鉛を同時に内包することができる最小径の球を意味する。なお、集合黒鉛の包含球の大きさは、集合黒鉛の分布により決定されるので、単体で見ても最大の黒鉛を含む集合黒鉛の包含球の大きさが最大とは限らない。従って、ステップ 4 0 以降の操作は、単体で見ても最大の黒鉛だけでなく、包含球の大きさが最大となりうる集合黒鉛を構成する複数の黒鉛に対して行うことが好ましい。

【0033】

ステップ S 4 3 では先に説明した疲労強度計算式 3 を用いて疲労強度が推定され、ステップ S 4 4 では先に説明した疲労強度計算式 1 または 2 を用いて疲労強度が推定される。

【0034】

最終ステップとして、フローチャートには記載していないが、ステップ S 3 1, S 3 2, S 4 2, S 4 3, S 4 4 で求められた疲労強度予測計算値の最小値（通常はステップ S 3 1、S 4 4 のうちの小さい方の値）が、材料の疲労強度予測値として決定される。

【0035】

次に、疲労強度計算式 1、2 におけるパラメータ「V」の算出の基礎となる直方体の設定方法について説明する。

【0036】

画像処理装置により得た三次元デジタル画像中の欠陥を、以下の条件を満たすように直方体で囲む。

（条件 1）直方体の 6 つの面が欠陥に接していること。

（条件 2）直方体は互いに対面する互いに平行な 2 つの面からなる組を 3 組有するが、そのうちの 1 組の面の法線ベクトルが材料に負荷される主応力方向に一致していること。

（条件 3）上記の条件 1 及び条件 2 を満足しつつ、直方体の体積が最小となること。

上記の条件 1 ~ 3 を満たす直方体の体積が疲労強度計算式 1、2 における「V」である。

【0037】

具体例について説明する。図 2 は、軸方向（引張圧縮）疲労試験片である。この試験片に対して X 線 CT 撮影を行い、画像処理を行った。試験片の軸方向（長手方向）断面が図 3 に示され、横断方向断面が図 4 に示されている。図 5 は、図 3 中の黒枠で囲んだ部分を拡大して示す。図 6 は、図 4 中の黒枠で囲んだ部分を拡大して示す。図 5 では欠陥が黒枠 7 で囲まれている。図 6 では、図 5 と同じ欠陥が黒枠 7 で囲まれている。

【0038】

図 7 は、欠陥 3 に外接する直方体 5 を示す。この直方体 5 の体積が前述した体積「V」である。直方体 5 は互いに平行な一組の面の法線ベクトルが、ベクトルが材料に負荷される主応力方向（つまり試験片の軸方向）に一致している。図 7 における矢印 A 方向から欠陥 3 を見ると、図 5 に示したように見える。図 7 における矢印 B 方向から欠陥 3 を見ると、図 6 に示したように見える。

【 0 0 3 9 】

集合黒鉛の場合のように包含球を設定した場合には、包含球を一つの欠陥とみなして上述した条件 1 ～ 3 を満足する直方体を設定し、この直方体の体積を疲労強度計算式 1、2 における「V」として扱う。

【 0 0 4 0 】

表 1 には、上述した方法により求めた曲げ疲労試験における疲労強度予測値と、曲げ疲労試験を行うことにより得た疲労強度の実測値との関係を示した。予測値と実測値とはよく一致していることがわかる。なお、表 1 中の欠陥寸法とは、前述した直方体の体積 V の三乗根である。

【 0 0 4 1 】

【表 1】

No.	HV硬さ	欠陥寸法(μm)	予測値(MPa)	実測値(MPa)
1	171	420	152	153
2	173	672	142	140
3	175	531	148	142
4	172	864	135	138
5	185	503	155	154

【 0 0 4 2 】

図 1 のフローチャートに示す手順に代えて、図 8 のフローチャートに示す簡素化された手順を用いてもよい。図 8 のフローチャートにおいて、図 1 のフローチャートに示したステップと同じ動作については、同じステップ番号を付して重複説明は省略する。

【 0 0 4 3 】

図 8 の手順を採用する場合には、図 9 のグラフに示す傾向を考慮して、球相当径が 80 μm 以上の場合には（ステップ S 2'）、上述した理想球形関係式に基づく判定を行うことなく、当該欠陥が非球状の欠陥すなわち非球状黒鉛または引け巣であるとみなし（ステップ S 3 0'）、前述した疲労強度計算式 1 または 2 を用いて疲労強度を計算する（ステップ S 3 2'）。

【 0 0 4 4 】

一方、球相当径が 80 μm 未満の場合には、当該欠陥が球状の欠陥であると見なし、図 1 のフローチャートにおけるステップ S 4 1 と同じ判断を行い、球相当径に応じて、図 1 のフローチャートにおけるステップ S 4 3 または S 4 4 を実行する。そして最終的に、フローチャートには記載していないが、ステップ S 3 2、S 4 3、S 4 4 で求められた疲労強度予測計算値の最小値が、材料の疲労強度予測値として決定される。

【 0 0 4 5 】

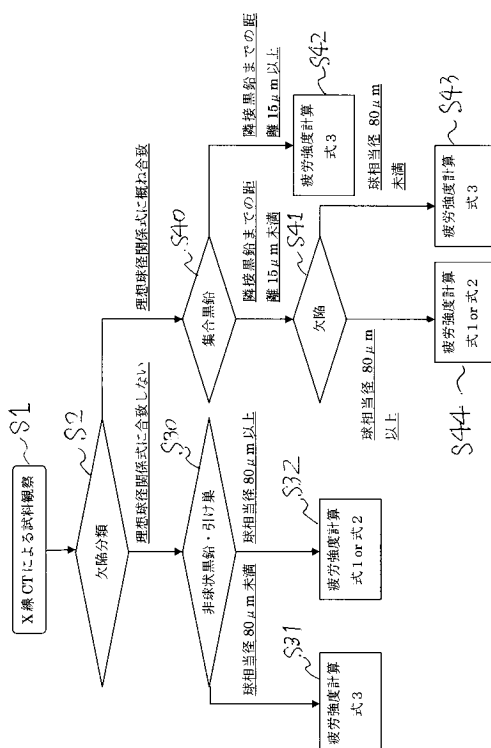
上記の各実施形態によれば、鋳鉄材料の疲労強度を実質的に非破壊（硬さ試験を非破壊試験と見なした場合）で精度良く予測することができる。また、実際に疲労試験を行う場合と比較して、疲労強度を求めるために必要とされる時間を大幅に短縮することができる。一例としては、X 線 CT 撮像、画像処理、計算を含めて 3 日程度で疲労強度を算出することができ、これは実際に疲労試験を行った場合に必要とされる時間の 1 / 10 程度である。

【 0 0 4 6 】

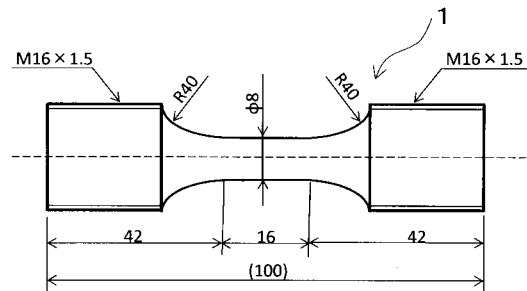
上記の図 1 及び図 8 に示した手順をプログラム化し、このプログラムをコンピュータ読み取り可能な記憶媒体に格納してもよい。プログラム（解析ソフトウェア）をコンピュータ（汎用コンピュータでよい）で実行することにより、X 線 CT 画像情報を受け取ったコ

ンピュータが自動的に疲労強度を算出するようになっていてもよい。上記プログラムがインストールされたコンピュータとX線CT装置とを組み合わせたシステムを構築してもよい。

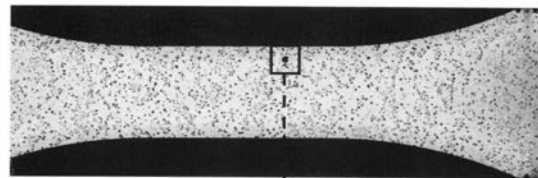
【図1】



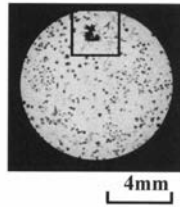
【図2】



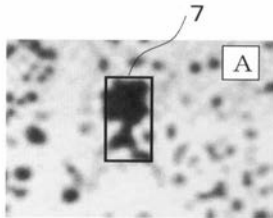
【図3】



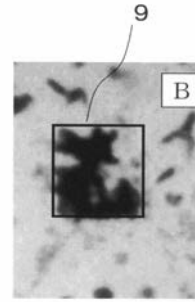
【図 4】



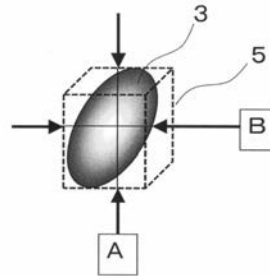
【図 5】



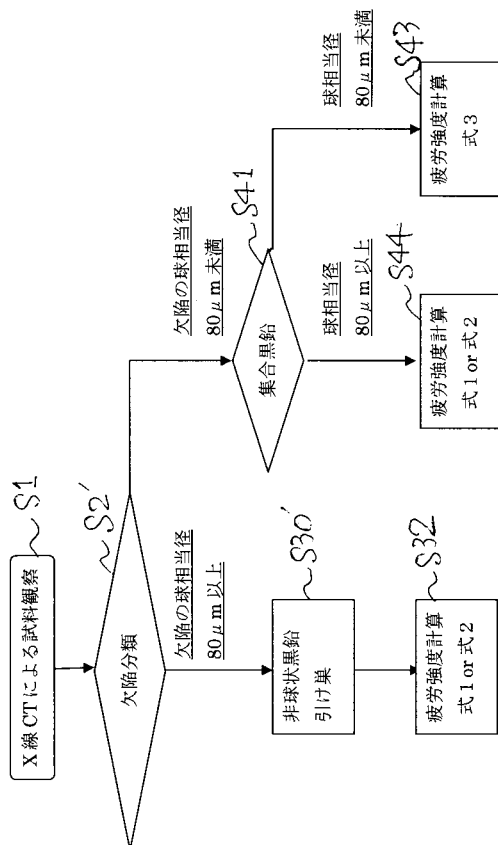
【図 6】



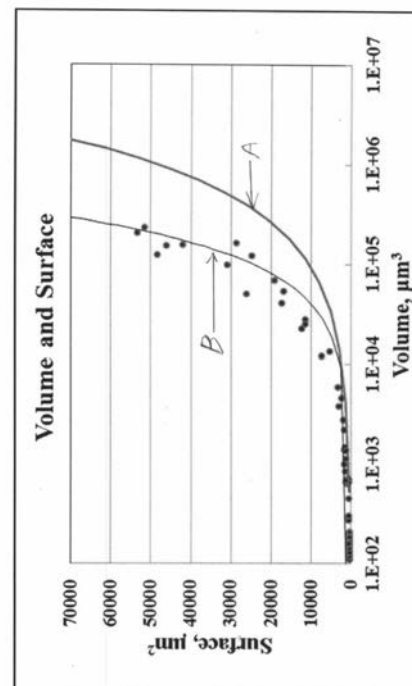
【図 7】



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

(74)代理人 100106655

弁理士 森 秀行

(72)発明者 藤 本 亮 輔

静岡県沼津市大岡 2 0 6 8 - 3 東芝機械株式会社内

(72)発明者 白 木 尚 人

東京都世田谷区玉堤 1 丁目 2 8 番 1 号 東京都市大学内

Fターム(参考) 2G001 AA01 BA11 CA01 HA14 KA03 KA07 LA02 NA11 NA17