

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6762818号
(P6762818)

(45) 発行日 令和2年9月30日(2020.9.30)

(24) 登録日 令和2年9月11日(2020.9.11)

(51) Int.Cl.

F 1

G O 1 M 13/04 (2019.01)

G O 1 M 13/04

G O 1 N 23/2055 (2018.01)

G O 1 N 23/2055 310

G O 1 N 23/203 (2006.01)

G O 1 N 23/203

請求項の数 15 (全 26 頁)

(21) 出願番号

特願2016-176955 (P2016-176955)

(22) 出願日

平成28年9月9日(2016.9.9)

(65) 公開番号

特開2018-40771 (P2018-40771A)

(43) 公開日

平成30年3月15日(2018.3.15)

審査請求日

令和1年8月27日(2019.8.27)

(73) 特許権者 000102692

N T N 株式会社

大阪府大阪市西区京町堀1丁目3番17号

(74) 代理人 110001195

特許業務法人深見特許事務所

(72) 発明者 嘉村 直哉

三重県桑名市陽だまりの丘5丁目105番

N T N 株式会社内

(72) 発明者 藤田 工

三重県桑名市陽だまりの丘5丁目105番

N T N 株式会社内

審査官 山口 剛

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】軸受部品の寿命診断方法、軸受部品の寿命診断装置、および軸受部品の寿命診断プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

軸受部品の寿命診断方法であって、

複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なうステップと、

前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である前記試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップと、

前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求めるステップと、

前記複数個の試験用の軸受部品についての、前記複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、前記故障破壊が発生したときの前記試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいてS-N曲線を求めるステップと、

前記S-N曲線に基づいて、前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求めるステップと、

前記試験用の軸受部品のX線分析データと、前記累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成するステップと、

診断用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求めるステップと、

10

20

前記診断用の軸受部品のX線分析データと前記対応テーブルに基づいて、前記診断用の軸受部品の累積疲労度を求めるステップとを備えた、軸受部品の寿命診断方法。

【請求項2】

前記試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップは、

前記試験用の軸受部品の表面形状の測定結果から前記試験用の軸受部品のミクロ応力を求めるステップを含む、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項3】

前記試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップは、

前記試験用の軸受部品のX線回折結果から前記試験用の軸受部品の残留応力を求めるステップを含む、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。 10

【請求項4】

前記S-N曲線は、複数個の第1種定数と、故障破壊までの負荷回数Nと、前記合成応力Sを含む式で表され、かつ前記合成応力Sを表す式は、複数個の第2種定数を含み、

前記S-N曲線を求めるステップは、

各試験用の軸受部品について、前記故障破壊するまでの前記複数回の転動疲労試験の負荷回数の合計をNとし、前記故障破壊したときの合成応力をSとした1つのサンプルを得るステップと、

前記複数個の試験用の軸受部品についての前記サンプルを用いて、前記複数個の第1種定数および前記複数個の第2種定数の値を推定するステップとを含む、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。 20

【請求項5】

前記式は、式(1)で表され、A、B、S_fは定数である、

【数1】

【数1】

$$\log N = A + B(S - S_f) \quad \dots(1)$$

請求項4記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項6】

前記累積疲労度を求めるステップは、

前記S-N曲線に基づいて、前記複数回の転動疲労試験の各々における前記合成応力での故障破壊までの負荷回数を求めるステップと、

前記複数回の転動疲労試験の各々における、実際の負荷回数と、前記故障破壊までの負荷回数の比で表される疲労度を求めるステップと、

前記複数回の転動疲労試験の各々における、前記転動疲労試験の疲労度と前記転動疲労試験よりも過去のすべての転動疲労試験の疲労度との合計を前記累積疲労度として算出するステップとを含む、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。 30

【請求項7】

前記X線分析データは、環状の回折X線の中心角と強度との関係を表わすデータである、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。 40

【請求項8】

前記X線分析データは、前記軸受部品に作用する6成分の残留応力である、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項9】

前記X線分析データは、環状の回折X線の中心角に対応して得られるピークの半価幅である、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項10】

前記X線分析データは、前記軸受部品の残留オーステナイトである、請求項1記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項11】

10

20

30

40

50

前記 X 線分析データは、環状の回折 X 線の中心角と強度との関係を表わすデータ、前記軸受部品に作用する 6 成分の残留応力、環状の回折 X 線の中心角に対応して得られるピークの半価幅、および前記軸受部品の残留オーステナイトのうちの 2 つ以上の組合せで表現された値である、請求項 1 記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項 1 2】

前記試験用の軸受部品の表面に存在する油膜の厚さと前記表面の形状の測定結果から得られる油膜パラメータが所定値以下のときに、前記試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップが実行される、請求項 1 記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項 1 3】

前記軸受部品の寿命診断方法は、

10

前記累積疲労度に基づいて、前記診断用の軸受部品が交換を要するか否か、または交換時期を通知するステップをさらに備える、請求項 1 記載の軸受部品の寿命診断方法。

【請求項 1 4】

軸受部品の寿命診断装置であって、

複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なったときに、前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である前記試験用の軸受部品の合成応力を求める合成応力算出部と、

前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求め、診断用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求める X 線分析データ算出部と、

20

前記複数個の試験用の軸受部品についての、前記複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、前記故障破壊が発生したときの前記試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいて S - N 曲線を求める S - N 曲線算出部と、

前記 S - N 曲線に基づいて、前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求める累積疲労度算出部と、

前記試験用の軸受部品の X 線分析データと、前記累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成する対応テーブル作成部と、

前記診断用の軸受部品の X 線分析データと前記対応テーブルに基づいて、前記診断用の軸受部品の累積疲労度を求める診断部とを備えた、軸受部品の寿命診断装置。

30

【請求項 1 5】

軸受部品の寿命診断プログラムであって、

コンピュータに、

複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なったときに、前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である前記試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップと、

前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々において、前記試験用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求めるステップと、

40

前記複数個の試験用の軸受部品についての、前記複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、前記故障破壊が発生したときの前記試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいて S - N 曲線を求めるステップと、

前記 S - N 曲線に基づいて、前記複数個の試験用の軸受部品についての前記複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求めるステップと、

前記 X 線分析データと、前記累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成するステップと、

診断用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求めるステップと、

50

前記診断用の軸受部品のX線分析データと前記対応テーブルに基づいて、前記診断用の軸受部品の累積疲労度を求めるステップと実行させる、軸受部品の寿命診断プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、軸受部品の寿命診断方法、軸受部品の寿命診断装置、および軸受部品の寿命診断プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

転がり軸受(以下、軸受)の寿命は、荷重や潤滑条件等の運転条件、硬度・組織・残留応力等の材料特性に依存することが知られている。従来より、軸受の寿命は、運転条件や材料特性から計算できる寿命計算式を使って推定されている。この計算式は、軸受をある条件で使用する際にどのくらいの期間使用できるか、あるいは、要求される使用期間で軸受が破損しないためにどのような条件で軸受を使用すればよいかを見積るために使用されている。一般に、軸受は、その寿命計算式に基づいて設定した使用条件で使用される。したがって、想定した条件で軸受が使用されている場合は、寿命が問題になることはないはずである。しかしながら、市場では軸受の寿命がしばしば問題となる。これは、実際の軸受では使用環境等の外乱によって想定外の短寿命が発生することがあるためと考えられる。そのため、転がり軸受では、実際の軸受の疲労度を何らかの分析結果に基づいて推定し、疲労度から軸受の破損のリスクを管理しようとする試みがある。

【0003】

特許文献1(特開2014-167421号公報)では、軸受の接触圧力と表面粗さの突起形状から求められる塑性指数から損傷形態(ピーリング、フレーキング、摩耗、スミアリング)を推定する方法が記載されている。さらに、接触圧力、塑性指数、すべり率等の条件から表面起点型損傷の1種であるピーリング損傷の寿命を推定する方法が記載されている。

【0004】

特許文献2(特開2014-13188号公報)の方法では、軸受部品の転動部にX線を照射したときに発生する環状の回折X線から求められる各種X線分析値(応力、残留オーステナイト量、環状の回折X線の中心角に対する回折強度、中心角に対する半価幅)と転動部品の各種使用条件(負荷回数、荷重、潤滑条件等)をデータベース化し、そのデータベースに基づいて軸受の使用条件を推定し、その使用条件から軸受の寿命を推定する方法が示されている。

【0005】

軸受の破損のリスクは余寿命として表現されることが多いが、余寿命は現時点で軸受がどのくらい疲労しているか(疲労度)と、今後どの程度の推定寿命になる条件で運転されるかによって決まる。したがって、破損のリスクについて検討するためには、少なくとも疲労度か推定寿命のいずれかの情報が必要になる。

【0006】

特許文献1では、接触圧力、塑性指数、すべり率等の条件から表面起点型損傷の1種であるピーリング損傷の寿命を推定する方法が記載されている。

【0007】

特許文献2は、従来装置よりも転動疲労に関する情報が豊富に得られるX線回折環分析装置を用いて、各種X線分析結果と各種転動条件(使用面圧、潤滑条件、すべり条件、負荷回数)とのデータベースを構築し、そのデータベースから軸受の使用条件を推定し、その使用条件から求めることができる推定寿命と負荷回数から疲労度を推定し、最終的に余寿命を推定するという方法である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

10

20

30

40

50

【特許文献 1】特開 2014 - 167421 号公報

【特許文献 2】特開 2014 - 13188 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

ピーリングの寿命を決める表面に作用する繰返し応力は、接触圧力、塑性指数、すべり率だけでなく、残留応力を考慮する必要がある。しかしながら、特許文献 1 に記載の方法では残留応力が考慮されておらず、その推定精度は悪いと考えられる。

【0010】

特許文献 2 に記載の方法は、複雑な転動部品の使用条件（負荷回数、荷重、潤滑条件、すべり等）を X 線分析値から統計的に推定するため、膨大な数の実験によるデータを取得しなければ、使用条件の推定精度が低くなり、結果として累積疲労度の推定精度が悪くなる。

10

【0011】

それゆえに、本発明の目的は、少ないデータから累積疲労度を高精度に推定することができる軸受部品の寿命診断方法、軸受部品の寿命診断装置、および軸受部品の寿命診断プログラムを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題を解決するために、本発明の軸受部品の寿命診断方法は、複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なうステップと、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップと、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求めるステップと、複数個の試験用の軸受部品についての、複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、故障破壊が発生したときの試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいて S - N 曲線を求めるステップと、S - N 曲線に基づいて、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求めるステップと、試験用の軸受部品の X 線分析データと、累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成するステップと、診断用の軸受部品に X 線を照射することによって検出される X 線回折環から X 線分析データを求めるステップと、診断用の軸受部品の X 線分析データと対応テーブルに基づいて、診断用の軸受部品の累積疲労度を求めるステップとを備える。

20

【0013】

好ましくは、試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップは、試験用の軸受部品の表面形状の測定結果から試験用の軸受部品のミクロ応力を求めるステップを含む。

【0014】

好ましくは、試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップは、試験用の軸受部品の X 線回折結果から試験用の軸受部品の残留応力を求めるステップを含む。

【0015】

30

好ましくは、S - N 曲線は、複数個の第 1 種定数と、故障破壊までの負荷回数 N と、合成応力 S を含む式で表される。合成応力 S を表す式は、複数個の第 2 種定数を含む。S - N 曲線を求めるステップは、各試験用の軸受部品について、故障破壊するまでの複数回の転動疲労試験の負荷回数の合計を N とし、故障破壊したときの合成応力を S とした 1 つのサンプルを得るステップと、複数個の試験用の軸受部品についてのサンプルを用いて、複数個の第 1 種定数および複数個の第 2 種定数を推定するステップとを含む。

【0016】

好ましくは、式は、式(1)で表される。A、B、S_f は定数である。

【0017】

40

【数1】

$$\log N = A + B(S - Sf) \quad \cdots(1)$$

【0018】

好ましくは、累積疲労度を求めるステップは、S-N曲線に基づいて、複数回の転動疲労試験の各々における合成応力での故障破壊までの負荷回数を求めるステップと、複数回の転動疲労試験の各々における、実際の負荷回数と、故障破壊までの負荷回数の比で表される疲労度を求めるステップと、複数回の転動疲労試験の各々における、転動疲労試験の疲労度と転動疲労試験よりも過去のすべての転動疲労試験の疲労度との合計を累積疲労度として算出するステップとを含む。

10

【0019】

好ましくは、X線分析データは、環状の回折X線の中心角と強度との関係を表わすデータである。

【0020】

好ましくは、X線分析データは、軸受部品に作用する6成分の残留応力である。

好ましくは、X線分析データは、環状の回折X線の中心角に対応して得られるピークの半価幅である。

【0021】

好ましくは、X線分析データは、軸受部品の残留オーステナイトである。

好ましくは、X線分析データは、環状の回折X線の中心角と強度との関係を表わすデータ、軸受部品に作用する6成分の残留応力、環状の回折X線の中心角に対応して得られるピークの半価幅、および軸受部品の残留オーステナイトのうちの2つ以上の組合せで表現された値である。

20

【0022】

好ましくは、試験用の軸受部品の表面に存在する油膜の厚さと表面の形状の測定結果から得られる油膜パラメータが所定値以下のときに、試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップが実行される。

【0023】

好ましくは、軸受部品の寿命診断方法は、累積疲労度に基づいて、診断用の軸受部品が交換を要するか否か、または交換時期を通知するステップをさらに備える。

30

【0024】

本発明の軸受部品の寿命診断装置は、複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なったときに、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である試験用の軸受部品の合成応力を求める合成応力算出部と、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求め、診断用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求めるX線分析データ算出部と、複数個の試験用の軸受部品についての、複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、故障破壊が発生したときの試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいてS-N曲線を求めるS-N曲線算出部と、S-N曲線に基づいて、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求める累積疲労度算出部と、試験用の軸受部品のX線分析データと、累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成する対応テーブル作成部と、診断用の軸受部品のX線分析データと対応テーブルに基づいて、診断用の軸受部品の累積疲労度を求める診断部とを備える。

40

【0025】

本発明の軸受部品の寿命診断プログラムは、コンピュータに、複数個の試験用の軸受部品の各々について、故障破壊するまで複数回の転動疲労試験を行なったときに、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品の残留応力とミクロ応力との和である試験用の軸受部品の合成応力を求めるステップと、複

50

数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々において、試験用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求めるステップと、複数個の試験用の軸受部品についての、複数回の転動疲労試験における総負荷回数と、故障破壊が発生したときの試験用の軸受部品の合成応力との関係に基づいてS-N曲線を求めるステップと、S-N曲線に基づいて、複数個の試験用の軸受部品についての複数回の転動疲労試験の各々における累積疲労度を求めるステップと、X線分析データと、累積疲労度との関係を表わす対応テーブルを作成するステップと、診断用の軸受部品にX線を照射することによって検出されるX線回折環からX線分析データを求めるステップと、診断用の軸受部品のX線分析データと対応テーブルに基づいて、診断用の軸受部品の累積疲労度を求めるステップと実行させる。

10

【発明の効果】

【0026】

本発明によれば、転動疲労のメカニズムに基づいたより理論的に累積疲労度を推定するので、少ないデータから累積疲労度を高精度に推定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】本発明の実施形態の寿命診断システムの構成を表わす図である。

【図2】寿命診断装置14のハードウェア構成を表わす図である。

【図3】寿命診断装置14の機能構成を表わす図である。

【図4】油膜パラメータの算出処理の手順を表わすフローチャートである。

20

【図5】研削面の表面粗さを表わす図である。

【図6】3軸の残留応力を計算する方法を説明するための図である。

【図7】S-N曲線が作成される手順を説明するための図である。

【図8】累積疲労度Dの算出処理を説明するための図である。

【図9】対応テーブルAの例を表わす図である。

【図10】転動疲労試験において累積疲労度を求める手順を表わすフローチャートである。

【図11】診断用の軸受部品の寿命診断の手順を表わすフローチャートである。

【図12】負荷回数Nに対する二乗平均平方根傾斜R_{dq}の変化を表わす図である。

【図13】負荷回数Nに対する残留応力S(r_s)の変化を表わす図である。

30

【図14】条件Aにおける負荷回数Nに対する累積疲労度Dを表わす図である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて説明する。

図1は、本発明の実施形態の寿命診断システムの構成を表わす図である。

【0029】

図1を参照して、この寿命診断システムは、寿命診断装置14と、照射部11と、X線検出器12と、表面形状測定器13とを備える。

【0030】

照射部11は、被検査軸受部品90に対向させることができるように設置されたX線管球を含んでいる。照射部11は、被検査軸受部品90に対してX線を照射する。照射されたX線は、被検査軸受部品90に対して所定の入射角で入射するように、矢印に沿って照射される。被検査軸受部品90は、転がり軸受の転動体と、診断用または試験用の軸受部品である転がり軸受の軌道輪の一部または全部とを含む。X線は、たとえば、転がり軸受の軌道輪の一部に照射されることとしてもよい。

40

【0031】

X線検出器12は、被検査軸受部品90において回折した環状のX線(X線回折環)を検出する。具体的には、X線検出器12は、照射部11から照射したX線を通過させる中心部に形成された孔12Bと、被検査軸受部品90に対向させることができ可能な平面状の検出部12Aを含む。検出部12Aとして、たとえばX線CCD(Charge Coupled Device

50

) を用いることができる。矢印 に沿って被検査軸受部品 90 に入射した X 線が、円錐面を構成するように回折し、検出部 12A に到達する。そして、検出部 12A においては、それぞれの画素が出力する X 線の強度に相当する強度の信号により X 線回折環が検出される。

【 0 0 3 2 】

表面形状測定器 13 は、被検査軸受部品 90 の表面形状を測定する。表面形状測定器 13 として、たとえばレーザ顕微鏡を用いることができる。測定する表面は、たとえば、転がり軸受の軌道輪の一部の表面、および転動体の全表面としてもよい。

【 0 0 3 3 】

寿命診断装置 14 は、X 線検出器 12 において検出された X 線回折環、および表面形状測定器 13 で検出された表面形状に基づいて被検査軸受部品 90 の寿命を診断する。寿命診断装置 14 は、たとえば、小型のコンピュータ装置（パーソナルコンピュータ等）としてもよい。

【 0 0 3 4 】

図 2 は、寿命診断装置 14 のハードウェア構成を表わす図である。

この寿命診断装置 14 は、入力部 17 と、CPU (Central Processing Unit) 15 と、メモリ 16 と、表示部 18 とを備える。

【 0 0 3 5 】

入力部 17 には、表面形状測定器 13 の測定結果、および X 線検出器 12 の検出結果が入力される。

【 0 0 3 6 】

メモリ 16 は、寿命診断プログラムなどを記憶することができる。

CPU 15 は、入力部 17 に入力されたデータを用いて、メモリ 16 に記憶された寿命診断プログラムを実行する。

【 0 0 3 7 】

表示部 18 は、CPU 15 による寿命診断結果を表示する。

図 3 は、寿命診断装置 14 の機能構成を表わす図である。

【 0 0 3 8 】

この寿命診断装置 14 は、入力部 17 と、油膜パラメータ算出部 31 と、ミクロ応力算出部 32 と、残留応力算出部 33 と、合成応力算出部 34 と、S - N 曲線算出部 35 と、S - N 曲線記憶部 36 と、X 線分析データ算出部 45 と、対応テーブル作成部 41 と、対応テーブル記憶部 43 と、累積疲労度算出部 42 と、診断部 37 と、制御部 50 と、表示部 18 とを備える。

【 0 0 3 9 】

S - N 曲線記憶部 36 と対応テーブル作成部 41 とは、メモリ 16 によって実現される。油膜パラメータ算出部 31 と、ミクロ応力算出部 32 と、残留応力算出部 33 と、合成応力算出部 34 と、S - N 曲線算出部 35 と、X 線分析データ算出部 45 と、対応テーブル作成部 41 と、累積疲労度算出部 42 と、診断部 37 と、制御部 50 は、CPU 15 がメモリ 16 に記憶された寿命診断プログラムを実行することによって実現される。

【 0 0 4 0 】

油膜パラメータ算出部 31 は、油膜パラメータ OP を算出する。

図 4 は、油膜パラメータの算出処理の手順を表わすフローチャートである。

【 0 0 4 1 】

ステップ S 201 において、油膜パラメータ算出部 31 は、軌道輪の軌道面の一部の粗さ (Z1) を測定する。油膜パラメータ算出部 31 は、レーザ顕微鏡などの表面形状測定器 13 から得られた検査結果に基づいて、粗さ Z1 (n) を測定する。n = 1 ~ N である。

【 0 0 4 2 】

ステップ S 202 において、油膜パラメータ算出部 31 は、転動体の転動面の全ての粗さ (Z2) を測定する。油膜パラメータ算出部 31 は、レーザ顕微鏡などの表面形状測定

10

20

30

40

50

器 1 3 から得られた検査結果に基づいて、粗さ $Z_2(n)$ を測定する。 $n = 1 \sim N$ である。

【 0 0 4 3 】

ステップ S 2 0 3において、油膜パラメータ算出部 3 1 は、試験用の軸受部品の基本的な使用条件（転動体の回転数、使用温度、荷重、油種）に基づいて、油膜の厚さ（d）を算出する。

【 0 0 4 4 】

ステップ S 2 0 4において、油膜パラメータ算出部 3 1 は、式（A 1）に従って、軌道面の二乗平均粗さ（Rq1）を算出する。ここで、L は、基準長さを表す。

【 0 0 4 5 】

【 数 2 】

$$Rq1 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z1(n)^2 dn} \quad \cdots(A1)$$

【 0 0 4 6 】

ステップ S 2 0 5において、油膜パラメータ算出部 3 1 は、式（A 2）に従って、転動面の二乗平均粗さ（Rq2）を算出する。ここで、L は、基準長さを表す。

【 0 0 4 7 】

【 数 3 】

$$Rq2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z2(n)^2 dn} \quad \cdots(A2)$$

【 0 0 4 8 】

ステップ S 2 0 6において、油膜パラメータ算出部 3 1 は、式（A 3）に従って、合成二乗平均粗さ（Rq）を算出する。

【 0 0 4 9 】

【 数 4 】

$$Rq = \sqrt{Rq1^2 + Rq2^2} \quad \cdots(A3)$$

【 0 0 5 0 】

ステップ S 2 0 7において、油膜パラメータ算出部 3 1 は、式（A 4）に従って、油膜パラメータ（OP）を算出する。

【 0 0 5 1 】

【 数 5 】

$$OP = \frac{d}{R_q} \quad \cdots(A4)$$

【 0 0 5 2 】

油膜パラメータ OP が 3 以下になると、軸受（軌道輪）の軌道面と転動体の転動面の表面突起が直接接触する可能性があり、表面粗さのミクロな凹凸による応力集中（以下、ミクロ応力）が発生することが知られている。表面起点型の損傷はこのミクロ応力に起因しており、使用中の軸受部品（軌道面）が表面起点型はく離を起こすかどうかは、表面形状の状態によって決まる。よって、本実施の形態では、油膜パラメータ OP が 3 以下の場合に、ミクロ応力算出部 3 2 が、二乗平均平方根傾斜 $R_d q$ に基づいて、ミクロな接触部直下の 3 軸のミクロ応力を算出する。

【 0 0 5 3 】

二乗平均平方根傾斜 $R_d q$ は、軌道面の二乗平均粗さ（Rq1） 転動面の二乗平均粗さ（Rq2）のときには、以下の式で表される。ここで、L は、基準長さを表す。

【 0 0 5 4 】

10

20

30

40

50

【数6】

$$Rdq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{d}{dn} (Z1(n)) \right)^2 dn} \quad \cdots(A5)$$

【0055】

二乗平均平方根傾斜 R_{dq} は、軌道面の二乗平均粗さ (R_{q1}) < 転動面の二乗平均粗さ (R_{q2}) のときには、以下の式で表される。ここで、 L は、基準長さを表す。

【0056】

【数7】

10

$$Rdq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{d}{dn} (Z2(n)) \right)^2 dn} \quad \cdots(A6)$$

【0057】

二乗平均平方根傾斜 R_{dq} がミクロな最大接触応力 P_{max} に比例するという以下の式 (B1) の関係を用いる。

【0058】

【数8】

$$P_{max} = a \cdot R_{dq} \quad \cdots(B1) \quad 20$$

【0059】

研削で作られる粗さには方向性がある。研削面には研削方向に沿って図5のように長細い突起が存在している。物体の断面形状が一様であり、十分な長さがあればその両端部を除けば平面ひずみ状態であるとみなせるので、微小突起の接触部は、平面ひずみ応力状態を仮定できる。そこで、ミクロ応力算出部32は、式 (B2) ~ (B12) に従って、表面のミクロな接触部下の内部応力を算出することができる。式 (B6)、(B7)において、 $x \times y$ (mc) と $z \times (mc)$ が 0 となるのは、ミクロな接触部において平面ひずみ応力状態を仮定しているためである。ここで、 E_1 は軌道面のヤング率、 E_2 は転動面のヤング率、 α_1 は軌道面のポアソン比、 α_2 は転動面のポアソン比を表わす。式 (B12) の b は定数である。なお、摩擦係数 μ は境界潤滑条件でのおよその値、たとえば 0.1 などの適当な値を代入すればよい。 R_1 、 R_2 は接触する2物体(転動体、軌道輪)の半径であり、 $R_1 = 0.02\text{mm}$ 、 $R_2 = \dots$ (円柱と平面の接触)とした。

30

【0060】

【数9】

$$\begin{aligned}\sigma_x(mc) = & -\frac{2\nu}{\pi} P_{\max} \left[\left\{ (c^2 + y^2 + z^2) \frac{z}{c} \bar{\Psi} - \frac{\pi z}{c} 2yz \Psi \right\} \right. \\ & \left. + \mu \left\{ (y^2 - c^2 - z^2) \Psi + \frac{\pi y}{c} + (c^2 - y^2 - z^2) \frac{y}{c} \bar{\Psi} \right\} \right] \cdots(B2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_y(mc) = & -\frac{1}{\pi} P_{\max} \left[\left\{ (c^2 + 2y^2 + 2z^2) \frac{z}{c} \bar{\Psi} - \frac{2\pi z}{c} - 3yz \Psi \right\} \right. \\ & \left. + \mu \left\{ (2y^2 - 2c^2 - 3z^2) \Psi + \frac{2\pi y}{c} + 2(c^2 - y^2 - z^2) \frac{y}{c} \bar{\Psi} \right\} \right] \cdots(B3)\end{aligned}$$

$$\sigma_z(mc) = -\frac{1}{\pi} P_{\max} z (c \bar{\Psi} + y \Psi + \mu z \Psi) \cdots(B4)$$

$$\tau_{yz}(mc) = -\frac{1}{\pi} P_{\max} \left[z^2 \bar{\Psi} + \mu \left\{ (c^2 + 2y^2 - 2z^2) \frac{z}{c} \bar{\Psi} - \frac{2\pi z}{c} - 3yz \Psi \right\} \right] \cdots(B5)$$

$$\tau_{xy}(mc) = 0 \cdots(B6)$$

$$\tau_{zx}(mc) = 0 \cdots(B7)$$

$$\Psi = \frac{\pi}{K_1} \frac{1 - \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \sqrt{2 \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \left(\frac{K_1 + K_2 - 4c^2}{K_1} \right)}} \cdots(B8)$$

$$\bar{\Psi} = \frac{\pi}{K_1} \frac{1 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \sqrt{2 \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \left(\frac{K_1 + K_2 - 4c^2}{K_1} \right)}} \cdots(B9)$$

$$K_1 = (c + y)^2 + z^2 \cdots(B10)$$

$$K_2 = (c - y)^2 + z^2 \cdots(B11)$$

$$c = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{P_{\max}}{b} \frac{\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}}} \cdots(B12)$$

【0061】

ミクロ応力算出部32は、上述の6成分の応力を用いて、式(B13)で示される相当応力をミクロ応力S(m c)として算出する。

【0062】

【数10】

$$S(mc) = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x(mc) - \sigma_y(mc))^2 + (\sigma_y(mc) - \sigma_z(mc))^2 + (\sigma_z(mc) - \sigma_x(mc))^2 + 6(\tau_{xy}^2(mc) + \tau_{yz}^2(mc) + \tau_{zx}^2(mc)) \right\} \quad \cdots(B13)$$

【0063】

以上より、二乗平均平方根傾斜 $R_d q$ を測定すれば、ミクロな接触部直下のミクロ応力 $S(m c)$ を算出することができるが、表面に高い応力が発生する場合、軌道面には繰返しの塑性変形によって高い残留応力が徐々に生成するため、軌道面には、ミクロ応力に加えて、残留応力が加わる。 10

【0064】

残留応力算出部 33 は、X線検出器 12 によって検出された環状の回折 X 線に基づいて、残留応力を算出する。

【0065】

本実施の形態では、3 方向入射による佐々木 - 広瀬法を使って 3 軸の残留応力を計算する方法について説明する。図 6 に示すようにデバイリングの中心角 θ_0 に対する歪み ϵ_α はデバイリングの半径から以下の式 (C1) を使って得られる。ここで、 θ_0 は、無ひずみ状態でのブレッギング角、 R_d は回折環中心角 θ_0 におけるデバイリングの半径、 C_L は X 線の照射位置から X 線検出器 12 までの距離を表わす。 20

【0066】

【数11】

$$\epsilon_\alpha = \frac{1}{2} \left[2\theta_0 - \pi + \tan^{-1} \left(\frac{R_d}{C_L} \right) \right] \cot \theta_0 \quad \cdots(C1)$$

【0067】

式 (C1) に示す座標系において、 ϵ_α と応力の関係は次式 (C2) で表される。ここで、 E は X 線的ヤング率、 ν は X 線的ポアソン比を表わす。

【0068】

【数12】

$$\begin{aligned} \epsilon_\alpha &= \sigma_x(rs) \frac{1}{E} \left[n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2) \right] \\ &+ \sigma_y(rs) \frac{1}{E} \left[n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2) \right] \\ &+ \sigma_z(rs) \frac{1}{E} \left[n_3^2 - \nu(n_1^2 + n_2^2) \right] \\ &+ \tau_{xy}(rs) \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2 + \tau_{yz}(rs) \frac{2(1+\nu)}{E} n_2 n_3 \\ &+ \tau_{xz}(rs) \frac{2(1+\nu)}{E} n_3 n_1 \end{aligned} \quad \cdots(C2) \quad 40$$

【0069】

また、 $n_1 \sim n_3$ は θ_0 の方向余弦であり、次式 (C3) ~ (C5) で表される。ここで、 β はブレッギング角 θ_0 の補角 ($\beta = \pi/2 - \theta_0$)、 θ_0 は X 線入射角、 θ_0 は入射 X 線の投影が X 軸となす角を表わす。

【0070】

【数13】

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \psi_0 \cos \phi_0 \\ &\quad - \sin \eta \sin \psi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha \\ &\quad + \sin \eta \sin \phi_0 \sin \alpha \end{aligned} \quad \cdots(C3)$$

$$\begin{aligned} n_2 &= \cos \eta \sin \psi_0 \sin \phi_0 \\ &\quad - \sin \eta \cos \psi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha \\ &\quad + \sin \eta \cos \phi_0 \sin \alpha \end{aligned} \quad \cdots(C4) \quad 10$$

$$n_3 = \cos \eta \cos \psi_0 + \sin \eta \sin \psi_0 \cos \alpha \quad \cdots(C5)$$

【0071】

次に、式(C2)から各応力成分を得るために、デバイリングの中心角 +、-、-におけるひずみをそれぞれ +、-、-、-と表し、式(C6)、(C7)で表されるパラメータを定義する。

【0072】

【数14】

$$a_{1(\phi_0)} = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad \cdots(C6) \quad 20$$

$$a_{2(\phi_0)} = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad \cdots(C7)$$

【0073】

式(C2)～(C7)から、 $\theta = 0$ における a_1 と a_2 は、以下の式(C8)、(C9)で表される。

【0074】

【数15】

$$a_{1(0)} = -\frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\psi_0 + 2\tau_{xz} \cos 2\psi_0] \times \sin 2\eta \cos \alpha \quad \cdots(C8)$$

$$a_{2(0)} = \frac{2(1+\nu)}{E} [\tau_{xy} \sin \psi_0 + \tau_{yz} \cos \psi_0] \times \sin 2\eta \sin \alpha \quad \cdots(C9)$$

【0075】

式(C8)と(C9)において、 $\theta = 0$ のとき、すなわちX線を試料面に垂直な方向から入射(垂直入射)するとき、せん断応力xz、yzについて次式(C10)、(C11)の関係が得られる。

【0076】

【数16】

$$\tau_{xz}(rs) = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin \eta} \frac{\partial a_{1(0)}}{\partial \cos \alpha} \quad \cdots(C10)$$

$$\tau_{yz}(rs) = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin \eta} \frac{\partial a_{2(0)}}{\partial \cos \alpha} \quad \cdots(C11)$$

【0077】

10

30

40

50

また、式(C8)と(C9)は a_1 と a_2 がそれぞれ \cos 、 \sin に対して線形であることを示しており、その傾きは次式(C12)、(C13)で表される。

【0078】

【数17】

$$\left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha}\right) = -\frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x(rs) - \sigma_z(rs)) \sin 2\psi_0 + 2\tau_{xz}(rs) \cos 2\psi_0] \times \sin 2\eta \quad \cdots(C12)$$

$$\left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha}\right) = \frac{2(1+\nu)}{E} [\tau_{xy}(rs) \sin \psi_0 + \tau_{yz}(rs) \cos \psi_0] \sin 2\eta \quad \cdots(C13)$$

10

【0079】

式(C12)と(C13)において、xz、yzはすでに式(C10)と(C11)で得られているため、0 0 のとき x - z、xyは次式(C14)、(C15)で得られる。

【0080】

【数18】

$$\sigma_x(rs) - \sigma_z(rs) = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha}\right) - 2\tau_{xz}(rs) \cot 2\psi_0 \quad \cdots(C14)$$

20

$$\tau_{xy}(rs) = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \psi_0} \left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha}\right) - \tau_{yz}(rs) \cot \psi_0 \quad \cdots(C15)$$

【0081】

y - zは 0 = / 2 rad (= 90°) における式(C14)の関係を用いれば計算できる。zは次式(C16)から求める。ここで、Xは次式(C17)で表される。

【0082】

【数19】

$$\sigma_z(rs) = \frac{E}{1-2\nu} (\varepsilon_\alpha - X) \quad \cdots(C16)$$

30

$$\begin{aligned} X &= \frac{2(1+\nu)}{E} (\tau_{xy}(rs) n_1 n_2 + \tau_{yz}(rs) n_2 n_3 + \tau_{xz}(rs) n_3 n_1) \\ &\quad + \frac{1}{E} (\sigma_x(rs) - \sigma_z(rs)) [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] \\ &\quad + \frac{1}{E} (\sigma_y(rs) - \sigma_z(rs)) [n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)] \end{aligned} \quad \cdots(C17)$$

40

【0083】

式(C17)における各応力成分と方向余弦は既知であるので、zの値が求められる。なお、式(C16)には の項が含まれており、デバイリングの中心角ごとにzが得られるので、zはその平均値とする。以上のように、3回のX線照射で応力の6成分が得られる。

【0084】

【数20】

$$S(rs) = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x(rs) - \sigma_y(rs))^2 + (\sigma_y(rs) - \sigma_z(rs))^2 + (\sigma_z(rs) - \sigma_x(rs))^2 + 6(\tau_{xy}^2(rs) + \tau_{yz}^2(rs) + \tau_{zx}^2(rs)) \right\} \quad \cdots(C18)$$

【0085】

残留応力算出部33は、これらの6成分の応力を用いて、式(C18)で示される相当応力を残留応力S(rs)として算出する。

【0086】

凹凸によるミクロ応力S(mc)と残留応力(rs)の両方が、軌道輪の表面起点型は離による寿命に影響を与えることを考慮して、合成応力算出部34は、以下の式(D1)のように、ミクロ応力S(mc)と、残留応力S(rs)とを加算して、合成応力Sを算出する。 10

【0087】

【数21】

$$S = S(mc) + S(rs) \quad \cdots(D1)$$

【0088】

S-N曲線算出部35は、複数個の試験用の軸受部品iに対して、故障破壊が発生するまでに、複数回の転動疲労試験が行われたときに、試験用の軸受部品iについて、j回目の転動疲労試験の負荷回数Nijと合成応力Si,jとに基づいて、S-N曲線を求める。ここで、iは1からMAX_i(試験用の軸受部品の個数)までである、jは1からX(故障破壊が発生するまでの転動疲労試験の回数)である。 20

【0089】

S-N曲線は、試験用の軸受部品または診断用の軸受部品が故障破壊するまでに与えられる負荷回数Nと、合成応力Sとの関係を表わす式である。ここで、負荷回数は転動体が、軌道輪の一部に接触する回数、すなわち転動体の回転数を表わす。試験用の軸受部品または診断用の軸受部品が故障破壊するまでに与えられる負荷回数Nは、その試験用の軸受部品または診断用の軸受部品の寿命を表わす。

【0090】

図7を参照して、S-N曲線が作成される手順について説明する。 30

まず、試験用の軸受部品1に対して、第1回目の転動疲労試験において、相当応力S1でN11回の負荷が加えられたとする。初期位置P11(0, S11)からN軸方向にN11回移動した点P12(N11, S11)をプロットする。

【0091】

第2回目の転動疲労試験において、相当応力S12でN12回の負荷が加えられたとする。ここで、S12 < S11である、なぜなら、転がり接触では、負荷回数の増加に伴って、軌道面の表面粗さが低下し、突起接触部の応力集中が軽減されるからである。P12(N11, S11)のS軸の値をS12とした点P13(N11, S12)をプロットする。P13(N11, S12)からN軸方向にN12回移動した点P14(N11+N12, S12)をプロットする。 40

【0092】

第3回目の転動疲労試験において、相当応力S13でN13回の負荷が加えられたとする。P14(N11+N12, S12)のS軸の値をS13とした点P15(N11+N12, S13)をプロットする。P15(N11+N12, S13)からN軸方向にN13回移動した点P16(N11+N12+N13, S13)をプロットする。

【0093】

第4回目の転動疲労試験において、相当応力S14でN14回の負荷が加えられたときに故障破壊が発生したとする。P16(N11+N12+N13, S13)のS軸の値をS14とした点P17(N11+N12+N13, S14)をプロットする。P17(N 50

$N_{11} + N_{12} + N_{13}, S_{14}$) から N 軸方向に N_{14} 回移動した点 P_{18} ($N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14}, S_{14}$) をプロットする。このようにして得られた点 P_{18} を試験用の軸受部品 1 の合成応力と寿命の関係を表わす第 1 サンプルとする。

【0094】

なお、上述のように、複数個の点をプロットするのではなく、故障破壊が発生したときの合成応力 S_{14} 、故障破壊が発生するまでの総負荷回数 ($N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14}$) によって第 1 サンプルを求めるものとしてもよい。

【0095】

次に、試験用の軸受部品 2 に対して、第 1 回目の転動疲労試験において、相当応力 S_2 1 で N_{21} 回の負荷が加えられたとする。初期位置 P_{21} ($0, S_{21}$) から N 軸方向に N_{21} 回移動した点 P_{22} (N_{21}, S_{21}) をプロットする。10

【0096】

第 2 回目の転動疲労試験において、相当応力 S_{22} で N_{22} 回の負荷が加えられたとする。 P_{22} (N_{21}, S_{21}) の S 軸の値を S_{22} とした点 P_{23} (N_{21}, S_{22}) をプロットする。 P_{23} (N_{21}, S_{22}) から N 軸方向に N_{22} 回移動した点 P_{24} ($N_{21} + N_{22}, S_{22}$) をプロットする。

【0097】

第 3 回目の転動疲労試験において、相当応力 S_{23} で N_{23} 回の負荷が加えられたとする。 P_{24} ($N_{21} + N_{22}, S_{22}$) の S 軸の値を S_{23} とした点 P_{25} ($N_{21} + N_{22}, S_{23}$) をプロットする。 P_{25} ($N_{21} + N_{22}, S_{23}$) から N 軸方向に N_{23} 回移動した点 P_{26} ($N_{21} + N_{22} + N_{23}, S_{23}$) をプロットする。20

【0098】

第 4 回目の転動疲労試験において、相当応力 S_{24} で N_{24} 回の負荷が加えられたときに故障破壊が発生したとする。 P_{26} ($N_{21} + N_{22} + N_{23}, S_{23}$) の S 軸の値を S_{24} とした点 P_{27} ($N_{21} + N_{22} + N_{23}, S_{24}$) をプロットする。 P_{27} ($N_{21} + N_{22} + N_{23}, S_{24}$) から N 軸方向に N_{24} 回移動した点 P_{28} ($N_{21} + N_{22} + N_{23} + N_{24}, S_{24}$) をプロットする。このようにして得られた点 P_{28} を試験用の軸受部品 2 の合成応力と寿命の関係を表わす第 2 サンプルとする。

【0099】

なお、上述のように、複数個の点をプロットするのではなく、故障破壊が発生したときの合成応力 S_{24} 、故障破壊が発生するまでの総負荷回数 ($N_{21} + N_{22} + N_{23} + N_{24}$) によって第 2 サンプルを求めるものとしてもよい。30

【0100】

以上のようにして、複数個の試験用の軸受部品に対して故障破壊するまで転動疲労試験を行うことによって、複数個のサンプルが得られる。

【0101】

S - N 曲線は、以下の式 (D2) で表される。

【0102】

【数 22】

$$\log N = A + B(S - S_f) \quad \dots(D2)$$

40

【0103】

5 個以上のサンプルを用いることによって、式 (B1) 中の未知数 a 、式 (B12) 中の未知数 b 、式 (D2) の 3 個の未知数 A 、 B 、 S_f を求めることができる。より正確な S - N 曲線を作成するためには、できるだけ多くのサンプルを用いるのが望ましい。式 (D2) の 3 個の未知数 A 、 B 、 S_f を第 1 種定数と呼ぶ。式 (B1) 中の未知数 a 、式 (B12) 中の未知数 b を第 2 種定数と呼ぶ。

【0104】

なお、5 個の未知数のうち、 a 、 b 、 S_f については、予め定めることができる場合がある。そのような場合には、第 1 サンプル P_{18} と、第 2 サンプル P_{28} とを用いて、式50

(D2) の未知数 A、B を求めることもできる。

【0105】

S-N 曲線記憶部 36 は、算出された S-N 曲線の式を記憶する。

X 線分析データ算出部 45 は、試験用の軸受部品 i ($i = 1 \sim$ 試験用の軸受部品の個数) について、転動疲労試験 j ($j = 1 \sim$ 故障破壊が発生するまでの回数) ごとの環状の回折 X 線から得られる X 線分析データ $P_{i,j}$ を算出する。たとえば、X 線分析データ $P_{i,j}$ は、環状の回折 X 線の中心角と強度との関係を表すデータ (たとえば、環状の回折 X 線の中心角に対する回折強度のばらつきを表わす値) とすることができる。ここで、環状の回折 X 線の中心角に対する回折強度のばらつきを表わす値 S とは、環状の回折 X 線の中心角における回折強度と各回折強度の偏差の平均であり、以下の式で表される。

10

【0106】

【数 23】

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\alpha} - I_{ave})^2} \quad \cdots(D3)$$

【0107】

ここで、 I_{α} は、回折環の中心角 α における回折強度、 I_{ave} : 回折強度の回折環全周における平均値、 n : 回折環の分割数を表わす。 $n=500$ とすれば、 $\alpha = 0.72\text{deg}$ ずつ回折強度を取得して解析するものとする。

【0108】

20

軸受の余寿命は、現時点での軸受がどのくらい疲労しているか (累積疲労度) と、その後の使用条件によって決まる。式 (D4) は、線形累積損傷則 (以下、マイナー則) を表わす式である。

【0109】

【数 24】

$$\frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_k}{L_k} + \dots + \frac{N_n}{L_n} = 1 \quad \cdots(D4)$$

【0110】

式 (D3) は、合成応力 $F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_n$ での寿命が $L_1, L_2, \dots, L_k, \dots, L_n$ としたときに、合成応力 $F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_n$ で $N_1, N_2, \dots, N_k, \dots, N_n$ 回の負荷を順次受けた際に、それぞれの寿命に対する負荷の比の線形和が 1 に達した時に寿命を迎えるとする経験式である。

30

【0111】

現時点までに合成応力 F_1, F_2, \dots, F_k で N_1, N_2, \dots, N_k 回の負荷を順次受けたとすると、累積疲労度 D は、式 (D5) で表される。

【0112】

【数 25】

$$D = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_k}{L_k} \quad \cdots(D5)$$

40

【0113】

この累積疲労度 D が 1 に近いほど、余寿命が少ないとなる。

累積疲労度算出部 42 は、試験用の軸受部品 i ($i = 1 \sim$ 試験用の軸受部品の個数) について、転動疲労試験 j ($j = 1 \sim$ 故障破壊が発生するまでの回数) ごとの累積疲労度 $D_{i,j}$ を算出する。

【0114】

図 8 は、累積疲労度 D の算出処理を説明するための図である。

累積疲労度算出部 42 は、図 8 の S-N 曲線を用いて、試験用の軸受部品 1 について、

50

転動疲労試験 j ごとの累積疲労度 D_{1j} を順次求める。

【0115】

合成応力 S_{11} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{11} である。合成応力 S_{11} で N_{11} 回の負荷が加えられたときの疲労度は、 N_{11}/L_{11} で表される。このとき、累積疲労度 D_{11} は、 N_{11}/L_{11} である。

【0116】

次に、合成応力 S_{12} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{12} である。合成応力 S_{12} で N_{12} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{12}/L_{12} で表される。このとき、累積疲労度 D_{12} は、 $N_{11}/L_{11} + N_{12}/L_{12}$ である。
10

【0117】

次に、合成応力 S_{13} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{13} である。合成応力 S_{13} で N_{13} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{13}/L_{13} で表される。このとき、累積疲労度 D_{13} は、 $N_{11}/L_{11} + N_{12}/L_{12} + N_{13}/L_{13}$ である。

【0118】

次に、合成応力 S_{14} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{14} である。合成応力 S_{14} で N_{14} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{14}/L_{14} で表される。このとき、累積疲労度 D_{14} は、 $N_{11}/L_{11} + N_{12}/L_{12} + N_{13}/L_{13} + N_{14}/L_{14}$ である。
20

【0119】

同様に、累積疲労度算出部 42 は、図 8 の S-N 曲線を用いて、試験用の軸受部品 2 について、転動疲労試験 j ごとの累積疲労度 D_{2j} を順次求める。

【0120】

合成応力 S_{21} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{21} である。合成応力 S_{21} で N_{21} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{21}/L_{21} で表される。このとき、累積疲労度 D_{21} は、 N_{21}/L_{21} である。

【0121】

次に、合成応力 S_{22} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線「によれば L_{22} である。合成応力 S_{22} で N_{22} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{22}/L_{22} で表される。このとき、累積疲労度 D_{22} は、 $N_{21}/L_{21} + N_{22}/L_{22}$ である。
30

【0122】

次に、合成応力 S_{23} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{23} である。合成応力 S_{23} で N_{23} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{23}/L_{23} で表される。このとき、累積疲労度 D_{23} は、 $N_{21}/L_{21} + N_{22}/L_{22} + N_{23}/L_{23}$ である。

【0123】

次に、合成応力 S_{24} が作用する転がり条件の場合の寿命は、S-N曲線によれば L_{24} である。合成応力 S_{24} で N_{24} 回の負荷が加えられたときに、疲労度は、 N_{24}/L_{24} で表される。このとき、累積疲労度 D_{24} は、 $N_{21}/L_{21} + N_{22}/L_{22} + N_{23}/L_{23} + N_{24}/L_{24}$ である。
40

【0124】

対応テーブル作成部 41 は、図 9 に示すような X 線分析データ P_{ij} と、累積疲労度 D_{ij} の対応を定めた対応テーブル A を作成する。

【0125】

対応テーブル記憶部 43 は、作成された対応テーブル A を記憶する。

診断部 37 は、対応テーブル A を用いて、診断用の軸受部品の軸受について検出された X 線分析データ P_X に対応する累積疲労度 D_X を特定する。診断部 37 は、X 線分析データ P_X が、対応テーブル A 中にない場合には、対応テーブル中の P_X に近い X 線分析データ
50

タに対応する累積疲労度を用いて線形補間によって、累積疲労度 D_X を特定する。

【0126】

図10は、転動疲労試験において累積疲労度を求める手順を表わすフローチャートである。

【0127】

ステップS101において、制御部50は、制御変数*i*を1に設定する。

ステップS102において、制御部50は、制御変数*j*を1に設定する。

【0128】

ステップS103において、制御部50は、試験用の軸受部品*i*を稼働する。

ステップS104において、試験用の軸受部品*i*が稼働されてから所定時間が経過したときには、処理がステップS105に進む。 10

【0129】

ステップS105において、制御部50は、試験用の軸受部品*i*を停止する。

ステップS106において、油膜パラメータ算出部31は、試験用の軸受部品*i*である軌道輪の軌道面と、試験用の軸受部品*i*と接触する転動体の軌道面との間の油膜の油膜パラメータOPを算出する。

【0130】

ステップS107において、油膜パラメータOPが3以下の場合に、処理がステップS108に進み、油膜パラメータOPが3を超える場合に、処理がステップS103に戻る。 20

【0131】

ステップS108において、ミクロ応力算出部32は、試験用の軸受部品*i*である軌道輪の軌道面に作用するミクロ応力S(mc)を算出する。

【0132】

ステップS109において、X線分析データ算出部45は、試験用の軸受部品*i*である軌道輪の軌道面に照射されることにより検出される回折X線環からX線分析データPi,jを算出する。X線分析データPi,jは、たとえば、環状の回折X線の中心角と強度との関係を表わすデータである。

【0133】

ステップS110において、残留応力算出部33は、試験用の軸受部品*i*である軌道輪の軌道面に作用する残留応力S(rs)を算出する。 30

【0134】

ステップS111において、合成応力算出部34は、ミクロ応力S(mc)と残留応力S(rs)とを加算して、合成応力Sを算出する。

【0135】

ステップS112において、制御部50は、現在の制御変数*i*、*j*の下で試験用の軸受部品*i*が動作したときの転動体の回転数を負荷回数をNi,jとして取得する。

【0136】

ステップS113において、試験用の軸受部品*i*に故障破壊が発生したときには、処理がステップS115に進み、試験用の軸受部品*i*に故障破壊が発生していないときには、処理がステップS114に進む。 40

【0137】

ステップS114において、制御変数*j*がインクリメントされ、その後、処理がステップS103に戻る。

【0138】

ステップS115において、制御部50は、試験用の軸受部品*i*が故障破壊したときに算出された合成応力Sを制御変数*i*における合成応力Siとし、 $N_{i1} + N_{i2} + \dots + N_{ij}$ 制御変数*i*における負荷回数Niとする。制御部50は、(Si, Ni)を第*i*サンプルとする。

【0139】

ステップ S 116において、 i が所定値 MAX_i のときには、処理がステップ S 118に進み、 i が所定値 MAX_i でないときには、処理がステップ S 117に進む。

【0140】

ステップ S 117において、制御変数 i がインクリメントされ、その後、処理がステップ S 102に戻る。

【0141】

ステップ S 118において、S-N 曲線算出部 35 は、第 i サンプル (S_i, N_i) を用いて、S-N 曲線を算出する。ただし、 $i = 1 \sim \text{MAX}_i$ である。

【0142】

ステップ S 119において、累積疲労度算出部 42 は、S-N 曲線を用いて、累積疲労度 $D_{i,j}$ を算出する。ただし、 $i = 1 \sim \text{MAX}_i, j = 1 \sim$ 破壊故障が発生するまでの回数である。
10

【0143】

ステップ S 120において、X 線分析データ $P_{i,j}$ と、累積疲労度 $D_{i,j}$ の対応テーブルの対応を定めた対応テーブル A を作成する。 $i = 1 \sim \text{MAX}_i, j = 1 \sim$ 破壊故障が発生するまでの回数である。

【0144】

図 11 は、診断用の軸受部品の寿命診断の手順を表わすフローチャートである。

ステップ S 301において、制御部 50 は、診断用の軸受部品を停止する。

【0145】

ステップ S 302において、油膜パラメータ算出部 31 は、診断用の軸受部品である軌道輪の軌道面と、診断用の軸受部品と接触する転動体の転動面の間の油膜の油膜パラメータ O_P を算出する。
20

【0146】

ステップ S 303において、油膜パラメータ O_P が 3 以下の場合に、処理がステップ S 305 に進み、油膜パラメータ O_P が 3 を超える場合に、処理がステップ S 304 に戻る。
。

【0147】

ステップ S 305において、X 線分析データ算出部 45 は、診断用の軸受部品である軌道輪の軌道面に照射されることにより検出される回折 X 線環から X 線分析データ P_X を算出する。X 線分析データ P_X は、たとえば、たとえば、環状の回折 X 線の中心角と強度との関係を表わすデータである。
30

【0148】

ステップ S 306において、診断部 37 は、対応テーブル A を用いて、診断用の軸受部品について検出された X 線分析データ P_X に対応する累積疲労度 D_X を特定する。

【0149】

ステップ S 307において、診断部 37 は、疲労度 D_X を表示部 18 に表示する。

ステップ S 308において、疲労度 D_X が閾値 TH_2 以上の場合に、処理がステップ S 309 に進む。疲労度 D_X が閾値 TH_2 未満の場合に、処理がステップ S 304 に進む。
40

【0150】

ステップ S 304において、診断部 37 は、診断用の軸受部品の交換が必要である旨のメッセージを表示部 18 に表示する。

【0151】

ステップ S 309において、診断部 37 は、診断用の軸受部品の交換が必要である旨のメッセージを表示部 18 に表示する。

【0152】

次に、本実施の形態の寿命診断方法に基づく実験結果の概要を説明する。

条件 A と条件 B の 2 つの条件で図 10 に示すフローチャートに従って、試験片を用いて転動疲労試験を行った。条件 A と条件 B では、転動疲労試験前の試験片の二乗平均平方根傾斜 R_dq が相違する。
50

【 0 1 5 3 】

図12は、負荷回数Nに対する二乗平均平方根傾斜R_{dq}の変化を表わす図である。

条件Aおよび条件Bの両方で、負荷回数Nの増加に伴って、二乗平均平方根傾斜R_{dq}が減少している。

【 0 1 5 4 】

図13は、負荷回数Nに対する残留応力S(rs)の変化を表わす図である。

残留応力(rs)はピーリングの増加にともなって減少する(はく離の発生による応力解放)ことが知られている。条件Aの試験では、負荷回数 3×10^5 回でピーリング発生による応力解放が起こり、条件Bの試験では、負荷回数 1.5×10^5 回で応力解放が発生した。すなわち、これらの試験ではピーリング寿命がそれぞれ 3×10^5 回、 1.5×10^5 回となる。 10

【 0 1 5 5 】

次に、条件Aと条件Bの2つの転動疲労試験の結果から、S-N曲線を算出した。次に、条件Aについて、S-N曲線に基づいて、負荷回数Nに対する累積疲労度Dを算出した。

【 0 1 5 6 】

図14は、条件Aにおける負荷回数Nに対する累積疲労度Dを表わす図である。

また、累積疲労度Dと、環状の回折X線の中心角に対する回折強度のばらつきを表わす値Iの間には、以下の関係が成り立つことがわかった。e、f、gは定数である。

【 0 1 5 7 】

$$D = (I - e) / f^{1/g} \quad \dots (E1) \quad 20$$

複数のサンプルデータを用いて、定数e、f、gを特定することによって、X線回折環の測定結果から累積疲労度Dを求めることができる。

【 0 1 5 8 】

以上のように、本実施形態の寿命診断装置によれば、転動試験における負荷回数と合成応力とからS-N曲線を求め、そのS-N曲線を用いて、累積疲労度とX線分析データの対応テーブルAを作成する。これによって、診断対象の軸受のX線分析データと対応テーブルAを用いて、診断対象の軸受の累積疲労度を推定することができる。

【 0 1 5 9 】

(変形例)

(1) 残留応力

X線回折環を用いた残留応力の測定方法として、佐々木・広瀬法に代えて、例えば「H. Dolle and V. Hauk, "The Influence of Stress States, Stress Gradients and Elastic Anisotropy on the Evaluation of (Residual) Stresses by X-rays", J. Appl. Cryst., 12 (1979) 489-501」に記載されている方法を用いてもよい。

【 0 1 6 0 】

また、回折環を測定できないX線応力測定装置(例えば一次元PSPC、シンチレーションカウンタ等でX線を検出する装置)を用いる場合でも、試料を回転させて複数方向から回折X線の測定を行うことによって、3軸の残留応力を測定することができる。

【 0 1 6 1 】**(2) X線分析データ**

X線分析データは、環状の回折X線の中心角と強度との関係を表わすデータに限定するものではない。たとえば、軸受部品に作用する6成分の残留応力{ x(rs)、y(rs)、z(rs)、xy(rs)、yz(rs)、xz(rs) }、軸受部品の残留オーステナイト、または環状の回折X線の中心角に対応して得られるピークの半価幅であってもよい。また、X線分析データは、回折強度の平均値、回折強度の最小値と最大値の差、または回折強度の積分幅(ある位置での半価幅と回折強度の積)などであってもよい。また、X線分析データは、環状の回折X線の中心角と強度との関係、6成分の残留応力、残留オーステナイト、環状の回折X線の中心角に対応して得られるピークの半価幅、回折強度の平均値、回折強度の最小値と最大値の差、または回折強度の積分幅(ある位置での半価幅と回折強度の積)のうちの2つ以上の組合せで表現された値であってもよい。

(3) 交換時期の通知

診断部37は、診断用の軸受部品の交換が必要か否かのメッセージに替えて、診断用の軸受部品の交換時期を表示部18に表示するものとしてもよい。たとえば、診断部37は、累積疲労度が「1」にどれだけ近いかに基づいて交換時期を判定することできる。

【0162】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内のすべての変更が含まれることが意図される。

【符号の説明】

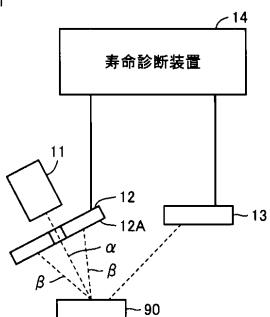
10

【0163】

11 照射部、12 X線検出器、13 表面形状測定器、14 寿命診断装置、15 CPU、16 メモリ、17 入力部、18 表示部、31 油膜パラメータ算出部、32 ミクロ応力算出部、33 残留応力算出部、34 合成応力算出部、35 S-N曲線算出部、36 S-N曲線記憶部、37 診断部、41 対応テーブル作成部、42 累積疲労度算出部、43 対応テーブル記憶部、45 X線分析データ算出部。

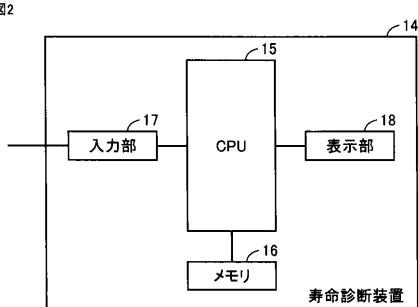
【図1】

図1



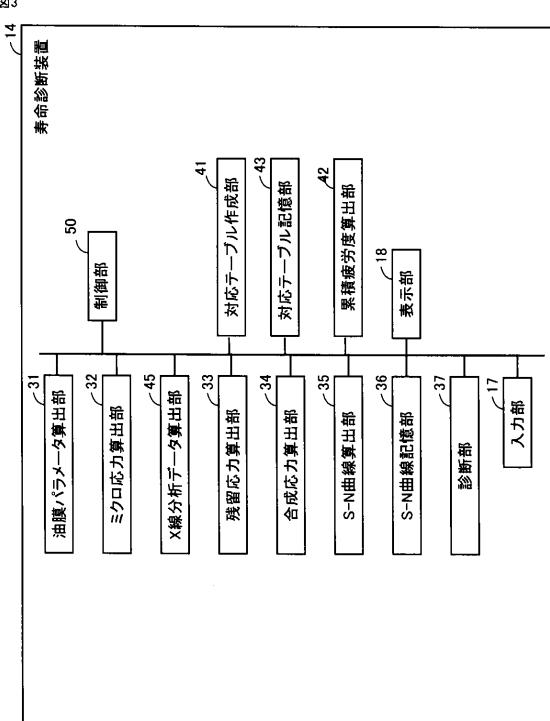
【図2】

図2

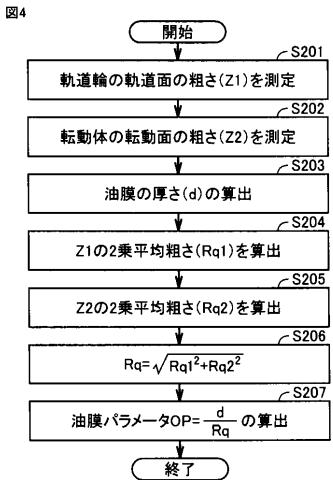


【図3】

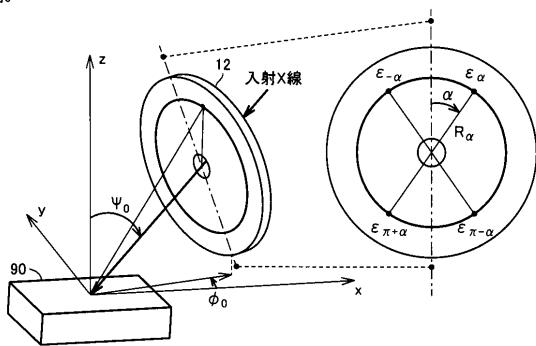
図3



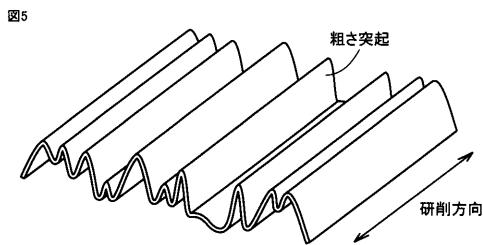
【図4】



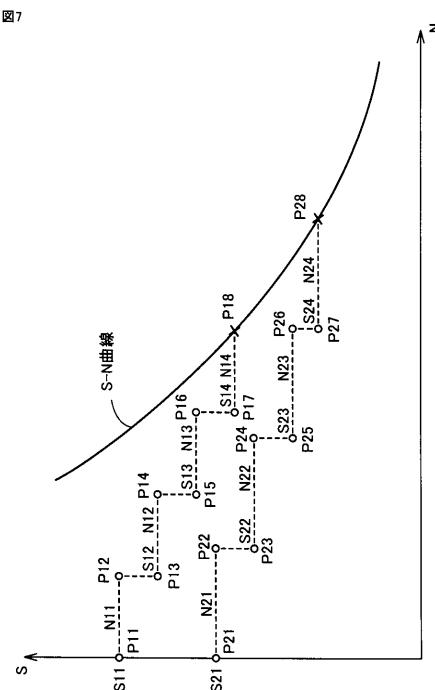
【図6】



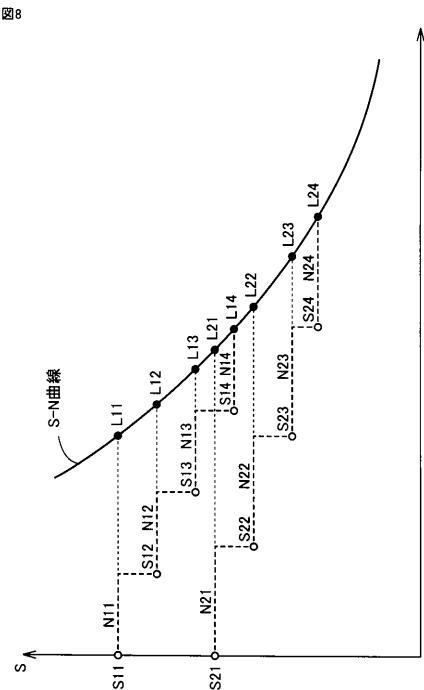
【図5】



【図7】



【図8】



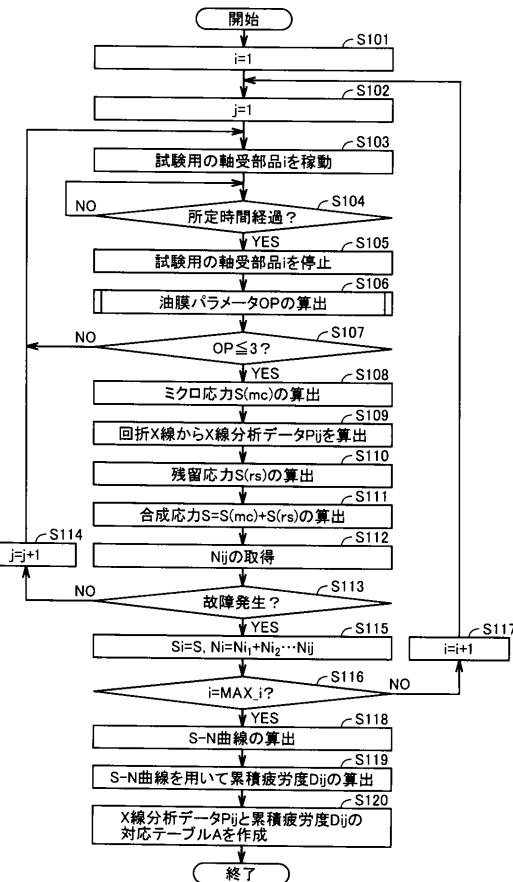
【図9】

図9

X線分析データ	累積疲労度
P11	D11
P12	D12
P13	D13
P21	D21
P22	D22
P23	D23
⋮	⋮
⋮	⋮

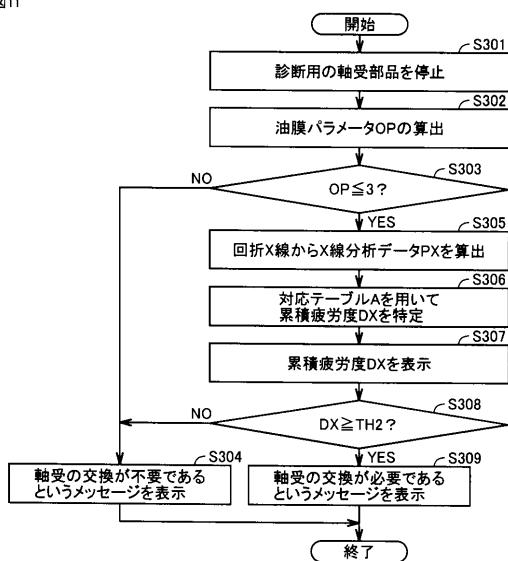
【図10】

図10



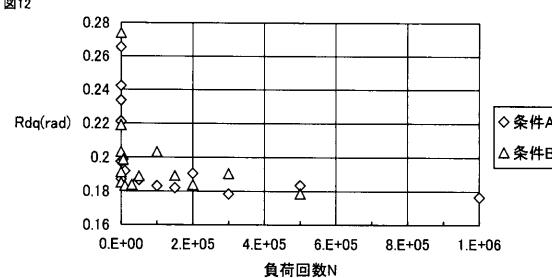
【図11】

図11



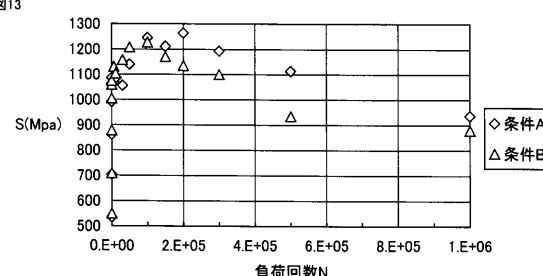
【図12】

図12



【図13】

図13



【図14】

図14

負荷回数N(回)	寿命L	累積疲労度D
0	2.17.E+04	0
1	3.40.E+04	4.61.E-05
10	2.60.E+04	3.11.E-04
100	3.63.E+04	3.77.E-03
500	1.17.E+05	0.015
1000	7.74.E+04	0.019
5000	7.82.E+04	0.071
1.00E+04	1.01.E+05	0.135
5.00E+04	1.02.E+05	0.530
1.00E+05	8.35.E+04	1.019

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2014-013188(JP,A)
特開2000-304710(JP,A)
特開2002-214224(JP,A)
特開2004-245635(JP,A)
特開2015-017661(JP,A)
特開2011-027550(JP,A)
米国特許出願公開第2006/0207306(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 01 M 13 / 04
G 01 N 23 / 2055
F 16 C 19 / 00
F 16 C 21 / 00