

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6055970号
(P6055970)

(45) 発行日 平成29年1月11日(2017.1.11)

(24) 登録日 平成28年12月16日(2016.12.16)

(51) Int.Cl.

F 1

G O 1 N 23/205 (2006.01)

G O 1 N 23/205

請求項の数 5 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2014-165625 (P2014-165625)	(73) 特許権者	591040236
(22) 出願日	平成26年8月18日 (2014.8.18)		石川県
(65) 公開番号	特開2016-42050 (P2016-42050A)		石川県金沢市鞍月1丁目1番地
(43) 公開日	平成28年3月31日 (2016.3.31)	(73) 特許権者	000112004
審査請求日	平成27年9月17日 (2015.9.17)		パルステック工業株式会社
			静岡県浜松市北区細江町中川7000番地 の35
		(72) 発明者	鷹合 滋樹
			石川県金沢市鞍月2丁目1番地 石川県工 業試験場内
		(72) 発明者	安井 治之
			石川県金沢市鞍月2丁目1番地 石川県工 業試験場内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線回折装置を用いた表面硬さ評価方法およびX線回折測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

対象とする測定対象物に向けてX線を出射するX線出射器と、

前記X線出射器から前記測定対象物に向けてX線を照射して、前記測定対象物にて発生したX線の回折光を、前記X線出射器から出射されるX線の光軸に対して垂直に交差する撮像面にて受光し、前記撮像面に前記X線の回折光の像である回折環を形成する回折環形成手段とを備えたX線回折装置を用いた測定対象物の表面硬さ評価方法において、

前記回折環形成手段により回折環を形成する回折環形成ステップと、

前記回折環形成ステップにより形成された回折環におけるX線の回折光の強度に相当する強度の分布を検出する回折環強度分布検出ステップと、

前記回折環強度分布検出ステップにより検出された強度分布に基づいて、前記回折環の半径方向における強度分布に基づく幅である回折環幅を前記回折環の複数の箇所て算出し、前記回折環幅の前記回折環の円周方向に対する変化曲線を算出する回折環幅変化曲線計算ステップと、

前記回折環幅変化曲線計算ステップにより算出された回折環幅の変化曲線から、前記回折環幅の平均値を算出する回折環幅平均ステップと、

前記回折環幅平均ステップにより得られた回折環幅の平均値と、予め取得されている前記回折環幅と表面硬さの関係とを用いて測定対象物の表面硬さを算出する表面硬さ計算ステップとを行うことを特徴とする測定対象物の表面硬さ評価方法。

【請求項2】

10

20

請求項 1 に記載の測定対象物の表面硬さ評価方法において、

前記回折環幅平均ステップは、算出された変化曲線に対し予め曲線形状が設定されている基準変化曲線が最も一致するときの基準変化曲線におけるパラメータを算出し、前記算出したパラメータから回折環幅の平均値を算出することを特徴とする測定対象物の表面硬さ評価方法。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の測定対象物の表面硬さ評価方法において、

前記回折環幅変化曲線計算ステップは、変化曲線を算出した後、算出された変化曲線の曲線形状の前記基準変化曲線の曲線形状からのずれを算出し、前記算出したずれが予め設定された許容値を超えている箇所を、前記算出された変化曲線から除外することを特徴とする測定対象物の表面硬さ評価方法。

10

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 に記載の測定対象物の表面硬さ評価方法において、

前記回折環形成ステップは、測定対象物に対する前記 X 線出射器からの X 線の入射角度を 10 度以上にした上で行い、

前記回折環強度分布検出ステップにより検出された強度分布に基づいて、前記回折環の形状を検出し、前記検出した回折環の形状から \cos 法を用いて測定対象物の残留応力を算出する残留応力計算ステップを行うことを特徴とする測定対象物の表面硬さ評価方法。

【請求項 5】

対象とする測定対象物に向けて X 線を出射する X 線出射器と、

20

前記 X 線出射器から前記測定対象物に向けて X 線を照射して、前記測定対象物にて発生した X 線の回折光を、前記 X 線出射器から出射される X 線の光軸に対して垂直に交差する撮像面にて受光し、前記撮像面に前記 X 線の回折光の像である回折環を形成する回折環形成手段と、

前記回折環形成手段により形成された回折環における X 線の回折光の強度に相当する強度の分布を検出する回折環強度分布検出手段と、

前記回折環強度分布検出手段により検出された強度分布に基づいて、前記回折環の半径方向における強度分布に基づく幅である回折環幅を前記回折環の複数の箇所で算出し、前記回折環幅の前記回折環の円周方向に対する変化曲線を算出する回折環幅変化曲線計算手段と、

30

前記回折環幅変化曲線計算手段により算出された回折環幅の変化曲線から、前記回折環幅の平均値を算出する回折環幅平均手段と、

前記回折環幅平均手段により得られた回折環幅の平均値と、予め取得されている前記回折環幅と対象物の表面硬さとの関係とを用いて測定対象物の表面硬さを算出する表面硬さ計算手段とを備えたことを特徴とする X 線回折測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、対象物に X 線を照射して対象物で回折した X 線により X 線回折像を形成する X 線回折装置を用いて対象物の表面硬さを評価する方法に関する。および該評価方法を実行する演算装置を装置内に備えた X 線回折測定装置に関する。

40

【背景技術】

【0002】

従来から、所定の処理を行った金属性物体の表面の硬さ、または年月が経過した金属性物体の表面の硬さを評価するため、様々な方法により表面の硬さが測定されている。それらの評価方法の中で、非破壊で表面硬さを評価することができる方法として、例えば特許文献 1 または特許文献 2 に示されるように、X 線回折を用いた方法がある。この方法は、金属性物体の対象物に X 線を照射して、対象物で発生した回折 X 線により X 線回折像を形成し、形成した像の回折 X 線の強度分布に基づく特性値（半価幅、積分幅等）を求めて、

50

予め得られている特性値と表面硬さとの関係を用いて表面硬さを求める方法である。この方法は、対象物を損傷させることなく表面の硬さを評価することができるとともに、短時間で評価を行うことができるという利点がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開平6-347425号公報

【特許文献2】特開2007-271600号公報

【発明の概要】

【0004】

しかしながら、X線回折を用いて対象物の表面硬さを評価する方法には、いくつか問題点がある。第一の問題点は、対象物の結晶粒が大きい等の原因で正常な回折X線の強度分布が得られないことがあり、対象物の表面硬さを精度よく求めることができない場合がある、という問題である。第二の問題点は、回折X線の強度分布に基づく特性値は、X線の強度、X線の照射時間、X線の入射角度及びX線の照射点からX線回折像を形成する箇所までの距離等、該特性値に影響する可能性があるパラメータをすべて同一にして、X線回折像を形成した場合でも、該特性値のばらつきが大きいという問題である。すなわち、数回の測定では精度よく対象物の表面硬さを求めることができず、多数回測定して平均値を求めることで精度をよくしようとする、その分測定に時間がかかる、という問題である。第三の問題点は、対象物の形状がギヤのような複雑な形状をしていると、X線回折像を得るためにX線の入射角度を適切な角度にしなければならないが、X線の入射角度を変化させると回折X線の強度分布及び該分布に基づく特性値も変化してしまい、精度よく対象物の表面硬さを求めることができない、という問題である。

【0005】

本発明はこの問題を解消するためなされたもので、その目的は、対象物にX線を照射して対象物で回折したX線によりX線回折像を形成するX線回折装置を用いた対象物の表面硬さ評価方法において、1回のX線回折像形成で精度よく対象物の表面硬さを求めることができるとともに、X線の入射角度を一定にしないで精度よく対象物の表面硬さを求めることができる表面硬さ評価方法を提供することにある。および、該評価方法を実行する演算装置を装置内に備えたX線回折測定装置を提供することにある。

【0006】

上記目的を達成するために、本発明の特徴は、対象とする測定対象物に向けてX線を出射するX線出射器と、X線出射器から測定対象物に向けてX線を照射して、測定対象物にて発生したX線の回折光を、X線出射器から出射されるX線の光軸に対して垂直に交差する撮像面に受光し、撮像面にX線の回折光の像である回折環を形成する回折環形成手段とを備えたX線回折装置を用いた測定対象物の表面硬さ評価方法において、回折環形成手段により回折環を形成する回折環形成ステップと、回折環形成ステップにより形成された回折環におけるX線の回折光の強度に相当する強度の分布を検出する回折環強度分布検出ステップと、回折環強度分布検出ステップにより検出された強度分布に基づいて、回折環の半径方向における強度分布に基づく幅である回折環幅を回折環の複数の箇所で算出し、回折環幅の回折環の円周方向に対する変化曲線を算出する回折環幅変化曲線計算ステップと、回折環幅変化曲線計算ステップにより算出された回折環幅の変化曲線から、回折環幅の平均値を算出する回折環幅平均ステップと、回折環幅平均ステップにより得られた回折環幅の平均値と、予め取得されている回折環幅と表面硬さの関係とを用いて測定対象物の表面硬さを算出する表面硬さ計算ステップとを行うことにある。

【0007】

これによれば、回折環幅を回折環全周に渡ってあらゆる箇所で算出し平均していることになるので、回折環幅のばらつきを小さくすることができ、精度のよい表面硬さを求めることができる。さらに発明者は、対象物に対するX線の入射角度を変化させて回折環幅を

10

20

30

40

50

測定したところ、X線の入射角度により、回折環の円周方向に対する回折環幅の変化曲線は変化しても、回折環幅の変化曲線から算出した回折環幅の平均値は変化しないことを見出した。また、これは理論的に説明できることも見出した。この理論的な説明については発明を実施するための形態で行う。すなわち、これによればX線の入射角度を一定にしないで精度よく対象物の表面硬さを求めることができる。

【0010】

また、本発明の他の特徴は、回折環幅平均ステップは、算出された変化曲線に対し予め曲線形状が設定されている基準変化曲線が最も一致するときの基準変化曲線におけるパラメータを算出し、算出したパラメータから回折環幅の平均値を算出することにある。

10

【0011】

これによれば、測定対象物が複雑な形状をしている等の原因で回折X線が遮られ、回折環の一部が欠けている場合でも、算出された変化曲線に最も一致する基準変化曲線のパラメータを求めれば、回折環幅の平均値を精度よく求めることができ、精度のよい表面硬さを求めることができる。なお、発明者は、回折環の円周方向に対する回折環幅の変化曲線の形状は正弦曲線になることが理論的に説明できることを見出した。また、複数の対象物に対して回折環の円周方向に対する回折環幅の変化曲線を測定した結果もその通りになっていることを確認した。

【0012】

また、本発明の他の特徴は、回折環幅変化曲線計算ステップは、変化曲線を算出した後、算出された変化曲線の曲線形状の基準変化曲線の曲線形状からのずれを算出し、算出したずれが予め設定された許容値を超えている箇所を、算出された変化曲線から除外することにある。

20

【0013】

これによれば、回折環の円周方向に対する回折環幅の変化曲線に正常でない箇所があっても、その箇所を自動で除外した上で、最も一致する基準変化曲線のパラメータから、回折環幅の平均値を求めることができるので、短時間で回折環幅の平均値を精度よく求めることができ、精度のよい表面硬さを求めることができる。

【0014】

また、本発明の他の特徴は、回折環形成ステップは、測定対象物に対するX線出射器からのX線の入射角度を10度以上にした上で行い、回折環強度分布検出ステップにより検出された強度分布に基づいて、回折環の形状を検出し、検出した回折環の形状からcos法を用いて測定対象物の残留応力を算出する残留応力計算ステップを行うことにある。これによれば、表面硬さ以外に残留応力によっても対象物を評価することができる。

30

【0015】

さらに、本発明の実施にあたっては、X線回折装置を用いた表面硬さ評価方法に限定されるものではなく、上述した表面硬さ評価方法をプログラムにより実行する演算装置を装置内に備えたX線回折測定装置の発明としても実施し得るものである。

【図面の簡単な説明】

【0016】

40

【図1】本発明の実施形態に用いるX線回折測定装置を含むX線回折測定システムを示す全体概略図である。

【図2】図1のX線回折測定装置の拡大図である。

【図3】図2のX線回折測定装置におけるX線が通過する部分を拡大して示す部分断面図である。

【図4】図3のプレート部分の拡大斜視図である。

【図5】X線回折測定装置のカメラ機能により撮像される画像を、LED光の光軸、結像レンズの光軸とともに示す図である。

【図6】X線回折測定装置を用いて対象物の表面硬さの測定を行うときの工程図である。

【図7】回折環の半径方向の回折X線の強度分布と半価幅を示す図である。

50

【図 8】回折環の周方向に対する半価幅の変化曲線を X 線の入射角度ごとに示す図である。

【図 9】半価幅と対象物の表面硬さとの関係を示す図である。

【図 10】図 8 の関係が生じる理由を説明する図である。

【図 11】図 8 の関係が生じる理由を数式を使用して説明するための図で、X 線照射点を拡大して上方向から見た図である。

【図 12】図 8 の関係が生じる理由を数式を使用して説明するための図で、X 線照射箇所を拡大して横方向から見た図である。

【図 13】図 8 の関係が生じる理由を数式を使用して説明するための図で、出射 X 線の断面径を誇張して回折 X 線の幅を示した図である。

【図 14】図 8 の関係が生じる理由を数式を使用して説明するための図で、X 線入射角度が 0° のときの回折環と X 線照射点を直交座標により示した図である。

【図 15】図 8 の関係が生じる理由を数式を使用して説明するための図で、X 線入射角度を所定の角度にしたときの回折環と X 線照射点を直交座標により示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

本発明の実施形態に用いる X 線回折測定装置を含む X 線回折測定システムの構成について図 1 乃至図 4 を用いて説明する。この X 線回折測定システムは、測定対象物 O B の表面硬さ及び残留応力を測定及び評価するために、X 線を測定対象物 O B に照射して、X 線の照射によって測定対象物 O B から出射される回折 X 線により回折環を形成し、形成した回折環の回折 X 線の強度分布を検出して演算処理を行う。なお、本実施形態では、測定対象物 O B は鉄製の部材である。

【0018】

X 線回折測定装置は、X 線を出射する X 線出射器 10、回折 X 線による回折環が形成されるイメージングプレート 15 を取り付けるためのテーブル 16 と、テーブル 16 を回転及び移動させるテーブル駆動機構 20 と、イメージングプレート 15 に形成された回折環の形状を測定するためのレーザ検出装置 30 と、これらの X 線出射器 10、イメージングプレート 15、テーブル 16、テーブル駆動機構 20 及びレーザ検出装置 30 を収容する筐体 50 とを備えている。そして、X 線回折測定システムは、前記 X 線回折測定装置とともに、測定対象物 O B がセットされる対象物セット装置 60、コンピュータ装置 90 及び高電圧電源 95 を備えている。また、筐体 50 内には、X 線出射器 10、テーブル 16、テーブル駆動機構 20 及びレーザ検出装置 30 に接続されて作動制御したり、検出信号を入力したりするための各種回路も内蔵されており、図 1 において筐体 50 外に示された 2 点鎖線で示された各種回路は、筐体 50 内の 2 点鎖線内に納められている。なお、図 1 及び図 2 においては、回路基板、電線、固定具、空冷ファンなどは省略されている。

【0019】

筐体 50 は、略直方体状に形成されるとともに、底面壁 50 a、前面壁 50 b、後面壁 50 e、上面壁 50 f、側面壁（図示せず）、及び底面壁 50 a と前面壁 50 b の角部を紙面の表側から裏側に向けて切り欠くように設けた切欠き部壁 50 c と繋ぎ壁 50 d を有するように形成されている。切欠き部壁 50 c は底面壁 50 a に垂直な平板と平行な平板とからなり、繋ぎ壁 50 d は側面壁と垂直であり底面壁 50 a と所定の角度を有している。この所定の角度は、例えば $30^\circ \sim 45^\circ$ である。筐体 50 の上面壁 50 f には、筐体 50 を持ち運ぶための取っ手 51 が設けられている。この筐体 50 の図示裏側の側面壁には、支持ロッド 52（図 1 では省略）に固定される固定具が設けられており、筐体 50 は、切欠き部壁 50 c が対象物セット装置 60 の上面に対向するように、図示傾斜状態で支持ロッド 52 に固定される。支持ロッド 52 は、設置面上に載置された平板状に形成された設置プレート 53 上に立設固定されている。

【0020】

対象物セット装置 60 は、いわゆるゴニオメータで構成されており、測定対象物 O B が載置されるステージ 61 を、図示 X、Y、Z 軸方向にそれぞれ移動させるとともに、図示

10

20

30

40

50

X軸及びY軸周りに回動（傾斜）させるものである。設置面上に載置された平板状に形成された設置プレート62上に、高さ調整機構63、第1乃至第5プレート64～68及びステージ61がそれぞれ下から上に順に載置されている。高さ調整機構63は、操作子63aを有し、操作子63aの回動操作により第1プレート64を設置プレート62に対して上下動（すなわちZ軸方向に移動）させて、設置プレート62と第1プレート64間の垂直距離を変更することにより第1プレート64の高さすなわちステージ61の高さを変更する。

【0021】

第2プレート65には操作子65aが組み付けられており、操作子65aの回動操作により、図示しない機構を介して第3プレート66が第2プレート65に対してX軸周りに回動されて、第3プレート66の第2プレート65に対するX軸周りの傾斜角すなわちステージ61のX軸周りの傾斜角が変更される。第3プレート66には操作子66aが組み付けられており、操作子66aの回動操作により、図示しない機構を介して第4プレート67が第3プレート66に対してY軸周りに回動されて、第4プレート67の第3プレート66に対するY軸周りの傾斜角すなわちステージ61のY軸周りの傾斜角が変更される。第4プレート67には操作子67aが組み付けられており、操作子67aの回動操作により、図示しない機構を介して第5プレート68が第4プレート67に対してX軸方向に移動されて、第5プレート68の第4プレート67に対するX軸方向の位置すなわちステージ61のX軸方向の位置が変更される。第5プレート68には操作子68aが組み付けられており、操作子68aの回動操作により、図示しない機構を介してステージ61が第5プレート68に対してY軸方向に移動されて、ステージ61の第5プレート68に対するY軸方向の位置すなわちステージ61のY軸方向の位置が変更される。また、操作子65a、66aは回転角度（傾斜角度）を目盛りにより示すことができ、操作子65aが示す回転角度は図2のX軸方向に向かって左周りに回転したとき増加する。

【0022】

X線制御回路71は、後述するコンピュータ装置90を構成するコントローラ91によって制御され、X線出射器10から一定の強度のX線が出射されるように、X線出射器10に高電圧電源95から供給される駆動電流及び駆動電圧を制御する。また、X線出射器10は、図示しない冷却装置を備えていて、X線制御回路71は、この冷却装置に供給される駆動信号も制御する。これにより、X線出射器10の温度が一定に保たれる。

【0023】

テーブル駆動機構20は、X線出射器10の下方にて、移動ステージ21を備えている。移動ステージ21は、フィードモータ22及びスクリュウロッド23により、X線出射器10から出射されたX線の光軸と測定対象物OBの法線とが成す平面内であって、前記X線の光軸に垂直な方向に移動可能となっている。フィードモータ22は、テーブル駆動機構20内に固定されていて筐体50に対して移動不能となっている。スクリュウロッド23は、X線出射器10から出射されたX線の光軸に垂直な方向に延設されていて、その一端部がフィードモータ22の出力軸に連結されている。スクリュウロッド23の他端部は、テーブル駆動機構20内に設けた軸受部24に回転可能に支持されている。また、移動ステージ21は、それぞれテーブル駆動機構20内にて固定された、対向する1対の板状のガイド25、25により挟まれていて、スクリュウロッド23の軸線方向に沿って移動可能となっている。すなわち、フィードモータ22を正転又は逆転駆動すると、フィードモータ22の回転運動が移動ステージ21の直線運動に変換される。フィードモータ22内には、エンコーダ22aが組み込まれている。エンコーダ22aは、フィードモータ22が所定の微小回転角度だけ回転するたびに、ハイレベルとローレベルとに交互に切り替わるパルス列信号を位置検出回路72及びフィードモータ制御回路73へ出力する。

【0024】

位置検出回路72及びフィードモータ制御回路73は、コントローラ91からの指令により作動開始する。測定開始直後において、フィードモータ制御回路73は、フィードモータ22を駆動して移動ステージ21をフィードモータ22側へ移動させる。位置検出回

10

20

30

40

50

路 7 2 は、エンコーダ 2 2 a から出力されるパルス列信号が入力されなくなると、移動ステージ 2 1 が移動限界位置に達したことを表す信号をフィードモータ制御回路 7 3 に出力し、カウント値を「0」に設定する。フィードモータ制御回路 7 3 は、位置検出回路 7 2 から移動限界位置に達したことを表す信号を入力すると、フィードモータ 2 2 への駆動信号の出力を停止する。上記の移動限界位置を移動ステージ 2 1 の原点位置とする。したがって、位置検出回路 7 2 は、移動ステージ 2 1 が図 1 及び図 2 にて左上方向に移動して移動限界位置に達したとき「0」を表す位置信号を出力し、移動ステージ 2 1 が移動限界位置から右下方向へ移動すると、エンコーダ 2 2 a からのパルス列信号をカウントし、移動限界位置からの移動距離 x を表す信号を位置信号として出力する。

【0025】

10

フィードモータ制御回路 7 3 は、コントローラ 9 1 から移動ステージ 2 1 の移動先の位置を表す設定値を入力すると、その設定値に応じてフィードモータ 2 2 を正転又は逆転駆動する。位置検出回路 7 2 は、エンコーダ 2 2 a が出力するパルス信号のパルス数をカウントする。そして、位置検出回路 7 2 は、カウントしたパルス数を用いて移動ステージ 2 1 の現在の位置（移動限界位置からの移動距離 x ）を計算し、コントローラ 9 1 及びフィードモータ制御回路 7 3 に出力する。フィードモータ制御回路 7 3 は、位置検出回路 7 2 から入力した移動ステージ 2 1 の現在の位置が、コントローラ 9 1 から入力した移動先の位置と一致するまでフィードモータ 2 2 を駆動する。

【0026】

また、フィードモータ制御回路 7 3 は、移動ステージ 2 1 の移動速度を表す設定値をコントローラ 9 1 から入力する。そして、エンコーダ 2 2 a から入力したパルス信号の単位時間当たりのパルス数を用いて、移動ステージ 2 1 の移動速度を計算し、前記計算した移動ステージ 2 1 の移動速度がコントローラ 9 1 から入力した移動速度になるようにフィードモータ 2 2 を駆動する。

20

【0027】

一対のガイド 2 5、2 5 の上端は、板状の上壁 2 6 によって連結されている。上壁 2 6 には、貫通孔 2 6 a が設けられていて、貫通孔 2 6 a の中心位置は X 線出射器 1 0 の出射口 1 1 の中心位置に対向しており、X 線出射器 1 0 から出射された X 線は、出射口 1 1 及び貫通孔 2 6 a を介してテーブル駆動機構 2 0 内に入射する。

【0028】

30

後述するイメージングプレート 1 5 が回折環撮像位置にある状態（図 1 乃至図 3 の状態）において、移動ステージ 2 1 の貫通孔 2 6 a と対向する位置には、図 3 に拡大して示すように、貫通孔 2 1 a が形成されている。移動ステージ 2 1 には、出射口 1 1 及び貫通孔 2 6 a、2 1 a の中心軸線位置を回転中心とする出力軸 2 7 a を有するスピンドルモータ 2 7 が組み付けられている。出力軸 2 7 a は、円筒状に形成され、回転中心を中心軸とする断面円形の貫通孔 2 7 a 1 を有する。スピンドルモータ 2 7 の出力軸 2 7 a と反対側には、貫通孔 2 7 a 1 の中心位置を中心軸線とする貫通孔 2 7 b が設けられている。貫通孔 2 7 b の内周面上には、貫通孔 2 7 b の一部の内径を小さくするための円筒状の通路部材 2 8 が固定されている。

【0029】

40

また、スピンドルモータ 2 7 内には、エンコーダ 2 2 a と同様のエンコーダ 2 7 c が組み込まれている。エンコーダ 2 7 c は、スピンドルモータ 2 7 が所定の微小回転角度だけ回転する度に、ハイレベルとローレベルとに交互に切り替わるパルス列信号を、スピンドルモータ制御回路 7 4 及び回転角度検出回路 7 5 へ出力する。さらに、エンコーダ 2 7 c は、スピンドルモータ 2 7 が 1 回転するごとに、所定の短い期間だけローレベルからハイレベルに切り替わるインデックス信号を、コントローラ 9 1 及び回転角度検出回路 7 5 に出力する。

【0030】

スピンドルモータ制御回路 7 4 及び回転角度検出回路 7 5 は、コントローラ 9 1 からの指令により作動開始する。スピンドルモータ制御回路 7 4 は、コントローラ 9 1 から、ス

50

スピンドルモータ 27 の回転速度を表す設定値を入力する。そして、エンコーダ 27 c から入力したパルス信号の単位時間当たりのパルス数を用いてスピンドルモータ 27 の回転速度を計算し、計算した回転速度がコントローラ 91 から入力した回転速度（設定値）になるように、駆動信号をスピンドルモータ 27 に供給する。回転角度検出回路 75 は、エンコーダ 27 c から出力されたパルス列信号のパルス数をカウントし、そのカウント値を用いてスピンドルモータ 27 の回転角度すなわちイメージングプレート 15 の回転角度 θ を計算して、コントローラ 91 に出力する。そして、回転角度検出回路 75 は、エンコーダ 27 c から出力されたインデックス信号を入力すると、カウント値を「0」に設定する。すなわち、インデックス信号を入力した位置が回転角度 0° の位置である。なお、イメージングプレート 15 の回転角度 0° の位置とは、後述するレーザ検出装置 30 からのレーザ照射によりイメージングプレート 15 に形成された回折環を読み取る際、インデックス信号を入力した時点でレーザ光が照射されている位置である。この位置は各半径位置においてあるためラインである。

10

【0031】

テーブル 16 は、円形状に形成され、スピンドルモータ 27 の出力軸 27 a の先端部に固定されている。テーブル 16 の中心軸と、スピンドルモータ 27 の出力軸の中心軸とは一致している。テーブル 16 は、一体的に設けられて下面中央部から下方へ突出した突出部 17 を有していて、突出部 17 の外周面には、ねじ山が形成されている。突出部 17 の中心軸は、スピンドルモータ 27 の出力軸 27 a の中心軸と一致している。テーブル 16 の下面には、イメージングプレート 15 が取付けられる。イメージングプレート 15 は、表面に蛍光体が塗布された円形のプラスチックフィルムである。イメージングプレート 15 の中心部には、貫通孔 15 a が設けられていて、この貫通孔 15 a に突出部 17 を通し、突出部 17 の外周面上にナット状の固定具 18 をねじ込むことにより、イメージングプレート 15 が、固定具 18 とテーブル 16 の間に挟まれて固定される。固定具 18 は、円筒状の部材で、内周面に、突出部 17 のねじ山に対応するねじ山が形成されている。

20

【0032】

テーブル 16、突出部 17 及び固定具 18 にも貫通孔 16 a、17 a、18 a がそれぞれ設けられており、貫通孔 16 a、17 a、18 a の中心軸はテーブル 16 の中心軸と同じであり、貫通孔 18 a の内径は貫通孔 16 a、17 a に比べて小さく、前述した通路部材 28 の内径と同じである。したがって、スピンドルモータ 27 の出力軸 27 a から出射された X 線は、貫通孔 16 a、17 a、18 a を介するとともに、切欠き部壁 50 c に設けた円形孔 50 c 1 を介して外部下方に位置する測定対象物 OB に向かって出射される。この場合、通路部材 28 の内径及び貫通孔 18 a の内径は小さいので、通路部材 28 を介して貫通孔 27 b、27 a 1、16 a、17 a 内に入射した X 線はやや拡散しているが、貫通孔 18 a から出射される X 線は貫通孔 27 a 1 の軸線に平行な平行光となり、円形孔 50 c 1 から出射される。また、この円形孔 50 c 1 の内径は、測定対象物 OB からの回折光をイメージングプレート 15 に導くために大きい。

30

【0033】

イメージングプレート 15 は、フィードモータ 22 によって駆動されて、移動ステージ 21、スピンドルモータ 27 及びテーブル 16 と共に、原点位置から回折環を撮像する回折環撮像位置へ移動する。前述のように、この回折環撮像位置において、X 線出射器 10 から出射された X 線が測定対象物 OB に照射されるようになっている。また、イメージングプレート 15 は、スピンドルモータ 27 によって駆動されて回転しながら、フィードモータ 22 によって駆動されて、移動ステージ 21、スピンドルモータ 27 及びテーブル 16 と共に、撮像した回折環を読み取る回折環読み取り領域内、及び回折環を消去する回折環消去領域内を移動する。なお、この場合のイメージングプレート 15 の移動においては、イメージングプレート 15 の中心軸が、X 線出射器 10 から出射された X 線の光軸とイメージングプレート 15 における回転角度 0° の位置（ライン）とが成す平面内に保たれた状態で、前記 X 線の光軸に垂直な方向に移動する。

40

【0034】

50

レーザ検出装置 30 は、回折環を撮像したイメージングプレート 15 にレーザ光を照射して、イメージングプレート 15 から入射した光の強度を検出する。レーザ検出装置 30 は、測定対象物 OB 及び回折環撮像位置にあるイメージングプレート 15 からフィードモータ 22 側に充分離れている。すなわち、イメージングプレート 15 が回折環撮像位置にあるとき、測定対象物 OB にて回折した X 線がレーザ検出装置 30 によって遮られないようになっている。レーザ検出装置 30 は、レーザ光源 31 と、コリメートレンズ 32、反射鏡 33、ダイクロイックミラー 34、及び対物レンズ 36 を備えている。

【0035】

レーザ光源 31 は、レーザ駆動回路 77 によって制御されて、イメージングプレート 15 に照射するレーザ光を出射する。レーザ駆動回路 77 は、コントローラ 91 によって制御され、レーザ光源 31 から所定の強度のレーザ光が出射されるように、駆動信号を制御して供給する。レーザ駆動回路 77 は、後述するフォトディテクタ 42 から出力された受光信号を入力して、受光信号の強度が所定の強度になるようにレーザ光源 31 に出力する駆動信号を制御する。これにより、イメージングプレート 15 に照射されるレーザ光の強度が一定に維持される。

【0036】

コリメートレンズ 32 は、レーザ光源 31 から出射されたレーザ光を平行光に変換する。反射鏡 33 は、コリメートレンズ 32 にて平行光に変換されたレーザ光を、ダイクロイックミラー 34 に向けて反射する。ダイクロイックミラー 34 は、反射鏡 33 から入射したレーザ光の大半（例えば、95%）をそのまま透過させる。対物レンズ 36 は、ダイクロイックミラー 34 から入射したレーザ光をイメージングプレート 15 の表面に集光させる。この対物レンズ 36 から出射されるレーザ光の光軸は、X 線出射器 10 から出射された X 線の光軸とイメージングプレート 15 における回転角度 0° の位置（ライン）とが成す平面内であって、前記 X 線の光軸に平行な方向、すなわち移動ステージ 21 の移動方向に対して垂直な方向である。

【0037】

対物レンズ 36 には、フォーカスアクチュエータ 37 が組み付けられている。フォーカスアクチュエータ 37 は、対物レンズ 36 をレーザ光の光軸方向に移動させるアクチュエータである。なお、対物レンズ 36 は、フォーカスアクチュエータ 37 が通電されていないときに、その可動範囲の中心に位置する。

【0038】

対物レンズ 36 によって集光されたレーザ光を、イメージングプレート 15 の表面であって、回折環が撮像されている部分に照射すると、輝尽発光（Photo-Stimulated Luminescence）現象が生じる。すなわち、回折環を撮像した後、イメージングプレート 15 にレーザ光を照射すると、イメージングプレート 15 の蛍光体が回折 X 線の強度に応じた光であって、レーザ光の波長よりも波長が短い光を発する。イメージングプレート 15 に照射されて反射したレーザ光の反射光及び蛍光体から発せられた光は、対物レンズ 36 を通過して、ダイクロイックミラー 34 にて蛍光体から発せられた光の大部分は反射し、レーザ光の反射光の大部分は透過する。ダイクロイックミラー 34 の反射方向には、集光レンズ 38、シリンドリカルレンズ 39 及びフォトディテクタ 40 が設けられている。集光レンズ 38 は、ダイクロイックミラー 34 から入射した光を、シリンドリカルレンズ 39 に集光する。シリンドリカルレンズ 39 は、透過した光に非点収差を生じさせる。フォトディテクタ 40 は、分割線で区切られた 4 つの同一正形状の受光素子からなる 4 分割受光素子によって構成されており、時計回りに配置された受光領域 A, B, C, D に入射した光の強度に比例した大きさの検出信号を受光信号（a, b, c, d）として、増幅回路 78 に出力する。

【0039】

増幅回路 78 は、フォトディテクタ 40 から出力された受光信号（a, b, c, d）をそれぞれ同じ増幅率で増幅して受光信号（a', b', c', d'）を生成し、フォーカスエラー信号生成回路 79 及び SUM 信号生成回路 80 へ出力する。本実施形態において

10

20

30

40

50

は、非点収差法によるフォーカスサーボ制御を用いる。フォーカスエラー信号生成回路 79 は、増幅された受光信号 (a' , b' , c' , d') を用いて、演算によりフォーカスエラー信号を生成する。すなわち、フォーカスエラー信号生成回路 79 は、 $(a' + c') - (b' + d')$ の演算を行い、この演算結果をフォーカスエラー信号としてフォーカスサーボ回路 81 へ出力する。フォーカスエラー信号 ($a' + c') - (b' + d')$ は、レーザ光の焦点位置のイメージングプレート 15 の表面からのずれ量を表している。

【0040】

フォーカスサーボ回路 81 は、コントローラ 91 により制御され、フォーカスエラー信号に基づいて、フォーカスサーボ信号を生成してドライブ回路 82 へ出力する。ドライブ回路 82 は、このフォーカスサーボ信号に応じてフォーカスアクチュエータ 37 を駆動して、対物レンズ 36 をレーザ光の光軸方向に変位させる。この場合、フォーカスエラー信号 ($a' + c') - (b' + d')$ の値が常に一定値 (例えば、ゼロ) となるようにフォーカスサーボ信号を生成することにより、イメージングプレート 15 の表面にレーザ光を集光させ続けることができる。

【0041】

SUM 信号生成回路 80 は、受光信号 (a' , b' , c' , d') を合算して SUM 信号 ($a' + b' + c' + d'$) を生成し、A/D 変換回路 83 へ出力する。SUM 信号の強度は、イメージングプレート 15 にて反射し、ダイクロイックミラー 34 で反射した微量のレーザ光の強度と輝尽発光により発生した光の強度を合わせた強度に相当するが、イメージングプレート 15 にて反射したレーザ光の強度はほぼ一定であるので、SUM 信号の強度は、輝尽発光により発生した光の強度に相当する。すなわち、SUM 信号の強度は、イメージングプレート 15 に入射した回折 X 線の強度に相当する。A/D 変換回路 83 は、コントローラ 91 によって制御され、SUM 信号生成回路 80 から SUM 信号を入力し、入力した SUM 信号の瞬時値をデジタルデータに変換してコントローラ 91 へ出力する。

【0042】

また、レーザ検出装置 30 は、集光レンズ 41 及びフォトディテクタ 42 を備えている。集光レンズ 41 は、レーザ光源 31 から出射されたレーザ光の一部であって、ダイクロイックミラー 34 を透過せずに反射したレーザ光をフォトディテクタ 42 の受光面に集光する。フォトディテクタ 42 は、受光面に集光された光の強度に応じた受光信号を出力する受光素子である。従って、フォトディテクタ 42 は、レーザ光源 31 が出射したレーザ光の強度に相当する受光信号をレーザ駆動回路 77 へ出力する。

【0043】

また、対物レンズ 36 に隣接して、LED 光源 43 が設けられている。LED 光源 43 は、LED 駆動回路 84 によって制御されて、可視光を発生して、イメージングプレート 15 に撮像された回折環を消去する。LED 駆動回路 84 は、コントローラ 91 によって制御され、LED 光源 43 に、所定の強度の可視光を発生させるための駆動信号を供給する。

【0044】

また、X 線回折測定装置は、LED 光源 44 を有する。LED 光源 44 は、図 2 乃至図 4 に示すように、X 線出射器 10 とテーブル駆動機構 20 の上壁 26 との間に配置されたプレート 45 の一端部下面に固定されている。プレート 45 は、その他端部上面にて、筐体 50 内に固定されたモータ 46 の出力軸 46a に固着されており、モータ 46 の回転により、テーブル駆動機構 20 の上壁 26 に平行な面内を回転する。テーブル駆動機構 20 の上壁 26 にはストッパ部材 47a, 47b が設けられており、ストッパ部材 47a は、プレート 45 を図 4 の D1 方向に回転させたとき、LED 光源 44 が X 線出射器 10 の出射口 11 及びテーブル駆動機構 20 の上壁 26 の貫通孔 26a に対向する位置 (A 位置) に静止するように、プレート 45 の回転を規制する。一方、ストッパ部材 47b は、プレート 45 を図 4 の D2 方向に回転させたとき、プレート 45 が X 線出射器 10 の出射口 11 とテーブル駆動機構 20 の上壁 26 の貫通孔 26a との間を遮断しない位置 (B 位置)

に静止するように、プレート45の回転を規制する。言い換えれば、A位置は、プレート45が図2及び図3に示す状態にある位置であり、LED光源44から出射されるLED光がスピンドルモータ27の貫通孔27a1に設けた通路部材28の通路に入射する位置である。B位置は、X線出射器10から出射されるX線がプレート45によって遮られない位置である。

【0045】

LED光源44は、コントローラ91によって作動制御されるLED駆動回路85からの駆動信号によりLED光を出射する。LED光は拡散する可視光であり、プレート45がA位置にあるとき、その一部は、貫通孔26a, 21a、通路部材28の通路及び貫通孔27bを介して、スピンドルモータ27の出力軸27aの貫通孔27a1に入射し、貫通孔16a, 17a, 18a及び切欠き部壁50cの円形孔50c1から出射される。このLED光の場合も、通路部材28の内径及び貫通孔18aの内径は小さいので、通路部材28を介して貫通孔27b, 27a1, 16a, 17a内に入射したX線はやや拡散しているが、貫通孔18aから出射されるLED光は貫通孔27a1の軸線に平行な平行光となり、円形孔50c1から出射される。したがって、LED光源44、通路部材28、貫通孔18aなどが、可視光である平行光を測定対象物OBに出射する本発明の可視光出射器を構成する。

【0046】

モータ46はエンコーダ22a, 27aと同様なエンコーダ46bを備えており、エンコーダ46bはモータ46が所定の微小回転角度だけ回転する度に、ハイレベルとローレベルとに交互に切り替わるパルス列信号を回転制御回路86に出力する。回転制御回路86は、コントローラ91から回転方向と回転開始の指示が入力されると、モータ46に駆動信号を出力して、モータ46を指示方向に回転させる。そして、エンコーダ46bからのパルス列信号の入力が停止すると、駆動信号の出力を停止する。これにより、プレート45を、上述したA位置及びB位置までそれぞれ回転させることができる。

【0047】

筐体50の切欠き部壁50cには結像レンズ48が設けられているとともに、筐体50内部には撮像器49が設けられている。撮像器49は、多数の撮像素子をマトリクス状に配置したCCD受光器又はCMOS受光器で構成され、各撮像素子で受光した光の強度に応じた大きさの受光信号（撮像信号）を撮像素子ごとにセンサ信号取出回路87にそれぞれ出力する。これらの結像レンズ48及び撮像器49は、イメージングプレート15に対して設定された位置にある測定対象物OBにおけるLED光の出射点を中心とした領域の画像を撮像する。すなわち、結像レンズ48及び撮像器49は、測定対象物OBを撮像するデジタルカメラとして機能する。このイメージングプレート15に対して設定された位置とは、前記測定対象物OBにおけるX線及びLED光の出射点（照射点）からイメージングプレート15までの垂直距離Lが、予め決められた所定距離となる位置である。なお、この場合の結像レンズ48及び撮像器49による被写界深度は、前記出射点を中心とした前後の範囲で設定されている。センサ信号取出回路87は、撮像器49の各撮像素子からの受光信号（撮像信号）の強度データを、各撮像素子の位置（すなわち画素位置）が分かるデータと共にコントローラ91に出力する。したがって、図5に示すように、コントローラ91には、測定対象物OBにおけるLED光の照射点P1を含む、照射点P1近傍の画像を表す画像データが出力され後述する表示装置93に画像が表示されることになる。

【0048】

また、結像レンズ48の光軸は、X線出射器10から出射されるX線の光軸とイメージングプレート15の回転角度0°のラインを含む平面に含まれるように調整されている。そして、この平面は、対象物セット装置60の傾斜角0°のときのステージ61の表面に垂直になっている。また、結像レンズ48の光軸と、測定対象物OBに照射されるX線及びLED光の光軸が交わる点は、イメージングプレート15に対して設定された位置にある測定対象物OBにおけるX線及びLED光の出射点（照射点）である。さらに、設定され

た位置にある測定対象物 O B における X 線及び L E D 光の出射点を通る、対象物セット装置 6 0 の傾斜角 0 のときのステージ 6 1 の表面の法線に対して、結像レンズ 4 8 の光軸となす角度は、X 線出射器 1 0 から出射される X 線及び L E D 光源 4 4 から出射される L E D 光の光軸が前記法線に対してなす角度 (X 線及び L E D 光の入射角度) に等しい。

【 0 0 4 9 】

したがって、測定対象物 O B 上の X 線及び L E D 光の照射点がイメージングプレート 1 5 に対して設定された位置にあり、該照射点の表面が傾斜角 0 のステージ 6 1 の上面と平行である状態で、L E D 光源 4 4 からの L E D 光を測定対象物 O B に照射した場合には、照射点 P 1 を含む測定対象物 O B の画像が撮像器 4 9 で撮像されることに加えて、測定対象物 O B にて反射した L E D 光の受光点 P 2 も撮像器 4 9 で照射点 P 1 と同じ位置に撮像されることになる。すなわち、測定対象物 O B に照射される L E D 光は平行光であり、測定対象物 O B における L E D 光の照射点において、L E D 光は散乱光と、略平行光のまま反射する反射光を発生させる。そして、図 5 に示すように、散乱光のうち結像レンズ 4 8 に入射した光は撮像器 4 9 の位置で結像して照射点 P 1 の画像となり、結像レンズ 4 8 に入射した反射光は結像レンズ 4 8 により集光されて撮像器 4 9 で受光され、受光点 P 2 の画像となる。このとき、X 線及び L E D 光の照射点が設定された位置にあり、該照射点の表面が傾斜角 0 のステージ 6 1 の上面と平行であれば、結像レンズ 4 8 に入射する散乱光の光軸と反射光の光軸は、いずれも結像レンズ 4 8 の光軸と一致するため、照射点 P 1 と受光点 P 2 は同じ位置になる。なお、撮像器 4 9 は測定対象物 O B を撮像するもので、撮像器 4 9 は結像レンズ 4 8 の焦点位置よりも若干量だけ後方に位置するので、厳密には、撮像器 4 9 によって受光される反射光は集光した後にやや拡散したものである。

【 0 0 5 0 】

コンピュータ装置 9 0 は、コントローラ 9 1、入力装置 9 2 及び表示装置 9 3 からなる。コントローラ 9 1 は、C P U、R O M、R A M、大容量記憶装置などを備えたマイクロコンピュータを主要部とした電子制御装置であり、大容量記憶装置に記憶された各種プログラムを実行して X 線回折測定装置の作動を制御する。入力装置 9 2 は、コントローラ 9 1 に接続されて、作業員により、各種パラメータ、作業指示などの入力のために利用される。表示装置 9 3 は図 5 に示すように、表示画面上に撮像器 4 9 によって撮像された画像に加えて、X 線及び L E D 光の照射点が設定された位置にあり、該照射点の表面が傾斜角 0 のステージ 6 1 の上面と平行であるときに、照射点 P 1 と受光点 P 2 が表示される位置に十字マークを表示する。この十字マークは撮像画像とは独立して表示される。よって、照射点 P 1 と受光点 P 2 が十字マークと一致するように、対象物セット装置 6 0 のステージ 6 1 (測定対象物 O B) の位置と姿勢を調整すれば、X 線の照射点からイメージングプレート 1 5 までの距離 L が所定距離になり、X 線の測定対象物 O B に対する入射角度が所定角度 (X 線の光軸と傾斜角 0 のステージ 6 1 の上面の法線とが成す角度) になる。さらに、表示装置 9 3 は、作業員に対して各種の設定状況、作動状況、測定結果なども視覚的に知らせる。また、高電圧電源 9 5 は、X 線出射器 1 0 に X 線出射のための高電圧及び電流を供給する。

【 0 0 5 1 】

なお、測定対象物 O B がギヤのように複雑な形状をしている場合は、回折 X 線が遮られない方向から X 線を照射しなければならない場合があり、この場合は X 線の測定対象物 O B に対する入射角度を所定角度にすることが困難である。このような場合は、照射点 P 1 のみが十字マークと一致するように位置と姿勢を調整すればよい。X 線の入射角度を所定角度にしなくても測定対象物 O B の表面硬さを求めることは可能であり、形成された回折環から X 線の入射角度を算出して残留応力を求めることも可能である。これについては後述する。

【 0 0 5 2 】

このように構成した X 線回折測定装置を含む X 線回折測定システムを用いて、測定対象物 O B の表面硬さと残留応力を測定するときは、図 6 に示す工程を行う。作業員はまずステージ調整工程 S 1 で X 線回折測定装置から L E D 光を照射して対象物セット装置 6 0 の

ステージ 6 1 (測定対象物 O B) の位置と姿勢を調整する。次に、回折環撮像工程 S 2 で、X 線を照射してイメージングプレート 1 5 に回折環を形成する。次に、回折環読取り工程 S 3 で、テーブル 1 6 を回転させながらレーザ検出装置 3 0 からレーザ光を照射して回折 X 線の強度分布を測定する。次に、回折環消去工程 S 4 でイメージングプレート 1 5 に形成された回折環を消去する。そして、計算工程 S 5 で、回折環の半径方向の強度分布における半価幅を複数の箇所て算出して平均し、半価幅の平均値を予め得られている半価幅と表面硬さとの関係曲線に当てはめ、表面硬さを算出する。また、回折 X 線の強度分布から回折環の形状を検出して残留応力を計算する。

【 0 0 5 3 】

以下、工程 S 1 ~ S 5 について説明する。なお工程 S 1 ~ S 4 については、特開 2 0 1 4 - 9 8 6 7 7 号公報に詳細に説明されているので、簡潔に説明するととどめる。ステージ調整工程 S 1 において、作業者はステージ 6 1 に測定対象物 O B を残留応力の測定方向と Y 軸方向とが合うように置き、入力装置 9 2 からステージ調整の開始を入力する。これにより、コントローラ 9 1 は各回路に指令を出力し、イメージングプレート 1 5 が回折環撮像位置 (図 1 及び図 2 の状態) になり、プレート 4 5 が A 位置になり、LED 光源 4 4 が点灯して LED 光が出射して測定対象物 O B に照射される。さらに、撮像器 4 9 から撮像信号が入力して表示装置 9 3 に撮像画像が表示される。図 5 に示すように、撮像画像には LED 光の照射点 P 1 と反射光の受光点 P 2 が表示されるので、作業者は撮像画像を見ながらステージ 6 1 を X 軸、Y 軸、Z 軸方向に移動させ、照射点 P 1 が測定箇所と十字マークに合致するように調整する。そして、ステージ 6 1 を X 軸周り、Y 軸周りに回転 (傾斜) させ、受光点 P 2 が十字マークに合致するように調整し、これにより照射点 P 1 が測定箇所と十字マークからややずれるので、X 軸、Y 軸、Z 軸方向の微量移動と X 軸、Y 軸周りの微小回転とを繰り返して照射点 P 1 と受光点 P 2 が十字マークに合致するようにする。

【 0 0 5 4 】

これにより、測定対象物 O B に照射される X 線は測定箇所になり、Y 軸方向が残留応力の測定方向になり、X 線の照射点からイメージングプレート 1 5 までの距離 L が所定距離になり、測定対象物 O B に対する X 線の入射角度が所定角度になる。なお、上述したように、測定対象物 O B が複雑な形状をしていて X 線の入射角度を所定角度にすることが困難な場合は、照射点 P 1 のみが十字マークと合致するように調整を行えばよい。

【 0 0 5 5 】

次に作業者は、入力装置 9 2 からステージ調整終了を入力する。これにより、コントローラ 9 1 は、各回路に指令を出力し、LED 光の発光が停止し、撮像器 4 9 からの信号入力を停止し、プレート 4 5 を B 位置まで回転させる。これで、ステージ調整工程 S 1 は終了する。

【 0 0 5 6 】

次の回折環撮像工程 S 2 において、作業者は入力装置 9 2 から測定対象物 O B の材質 (本実施例では、鉄)、及び X 線入射角度 が所定角度であるか否かを入力する。また、後述するが、X 線入射角度 を 0° (垂直入射) にして測定を行うときは、垂直入射であることを入力する。そして、表面硬さ及び残留応力の測定開始を入力する。これにより、コントローラ 9 1 は、各回路に指令を出力し、イメージングプレート 1 5 を低速回転させ、エンコーダ 2 7 c からインデックス信号が入力する角度である回転角度 0° に設定した後、X 線出射器 1 0 から X 線を出射させ、所定時間の経過後に出射を停止させる。これにより、イメージングプレート 1 5 には所定時間で所定強度の X 線により発生した回折 X 線により回折環が撮像される。

【 0 0 5 7 】

回折環撮像工程 S 2 の後、コントローラ 9 1 は自動で回折環読取り工程 S 3 を実行する。コントローラ 9 1 は、各回路に指令を出力し、イメージングプレート 1 5 を回折環読取り開始位置へ移動させた後、テーブル 1 6 を所定の一定回転速度で回転させ、レーザ検出装置 3 0 からレーザ光をイメージングプレート 1 5 に照射させる。そして、レーザ光の焦

点がイメージングプレート15の表面に合わせるフォーカスサーボ制御を開始させ、イメージングプレート15の図1及び図2の右下方向への移動を開始させる。この状態で、回転角度検出回路75、位置検出回路72及びA/D変換器83の作動を開始させ、イメージングプレート15の回転角度 p が所定の小さな角度だけ回転するごとに、回転角度 p 、レーザ光照射位置の径方向距離 r (半径値 r)、及びA/D変換器83からの信号の瞬時値 I (回折X線の強度)を入力して記憶することを開始する。これにより、螺旋状に回転するレーザ光の照射位置ごとに、回転角度 p 、半径値 r 及び瞬時値 I のデータが記憶されていく。

【0058】

コントローラ91は、記憶動作と並行して、設定されている複数の回転角度ごとに半径値 r に対する瞬時値 I の変化曲線を作成し、すべての回転角度において該変化曲線が左右対称で得られた時点で、瞬時値 I 、回転角度 p 及び半径値 r の記憶動作を終了する。その後、コントローラ91は、各回路に指令を出力し、フォーカスサーボ制御の停止、レーザ光照射の停止、イメージングプレート15の移動の停止、及び回転角度検出回路75とA/D変換器83の作動の停止を行う。これにより、回折環読取り工程S3が終了する。この時点で、回折環における回折X線の強度分布が回転角度 p 、半径値 r 及び瞬時値 I のデータとして得られている。

【0059】

回折環読取り工程S3の後、コントローラ91は自動で回折環消去工程S4を実行する。コントローラ91は、各回路に指令を出力し、イメージングプレート15を回折環消去開始位置へ移動させた後、LED光源43からLED光を発光させてイメージングプレート15へ照射させ、イメージングプレート15を図1及び図2の右下方向に一定速度で移動させる。なお、イメージングプレート15の回転と位置検出回路72の作動は、回折環読取り工程S3から継続して行われている。これにより、LED光源43による可視光が、イメージングプレート15上に螺旋状に照射され、前記回折X線によって形成された回折環が消去されていく。コントローラ91は、回折環消去終了位置になると、各回路に指令を出力し、イメージングプレート15の移動停止、LED光源43の発光停止、イメージングプレート15の回転停止、及び位置検出回路72の作動停止を行う。これにより、回折環消去工程S4が終了する。

【0060】

このような回折環消去工程S4の後、コントローラ91は、自動的に又は作業者による入力装置92からの指令により、計算工程S5を行う。なお、この計算工程S5は回折環消去工程S4と並行して行ってもよい。計算工程S5においてコントローラ91は、インストールされている演算プログラムを実行させ、回転角度 p 、半径値 r 及び瞬時値 I のデータと予め記憶されている半価幅と表面硬さとの関係曲線を用いて測定対象物OBの表面硬さを計算する。及び、回転角度 p 、半径値 r 及び瞬時値 I のデータと予め記憶されているX線照射点からイメージングプレート15までの距離 L 、X線の入射角度 及び格子面間隔等のパラメータを用いて残留応力を計算する。

【0061】

まず表面硬さの計算方法から説明する。コントローラ91は、以下に示す(1)~(7)の順に計算を行い、表面硬さを計算する

(1) 回折環の半径方向における回折X線の強度分布曲線作成

コントローラ91は、回転角度 p ごとに瞬時値 I と半径値 r のデータを用いて、図7に示すように半径値 r に対する瞬時値 I の変化曲線(以下、 $r-I$ 変化曲線という)を作成する。これが、回折環の半径方向における回折X線の強度分布曲線である。データ処理上は、回転角度 p ごとに半径値 r の数値順に半径値 r と瞬時値 I のデータ群をまとめる処理である。なお、記憶されている半価幅と表面硬さとの関係曲線において半価幅が角度の単位になっているときは、半径値 r は \tan^{-1} (半径値 r / 距離 L) の計算により角度の単位にする。

【0062】

(2) 正常な強度分布曲線の抽出

関係曲線は左右対称で尖った形状であるのが理想であるが、測定対象物OBの結晶粒が大きい、測定対象物OBが複雑な形状をしているため回折X線の一部が遮断される等の理由で、 $r-I$ 変化曲線の形状が悪い箇所があるので、次に、形状が悪い $r-I$ 変化曲線を除外する処理を行う。具体的には、 $r-I$ 変化曲線の歪度と尖度を計算し、予め記憶されている許容値より歪度が大きい場合と、予め記憶されている許容値より尖度が小さい場合を除外する処理を行う。歪度と尖度は、 $r-I$ 変化曲線のピーク値を平均値として統計学で使用されている通常の歪度と尖度の計算式を用いて計算すればよい。歪度は変化曲線の左右対称性を評価する値であり、尖度は変化曲線の尖りの程度を評価する値である。これにより、正常な形状の $r-I$ 変化曲線が抽出される。なお、このとき抽出される $r-I$ 変化曲線の数

10

【0063】

(3) 半価幅計算

次に抽出された $r-I$ 変化曲線すべてにおいて、 $r-I$ 変化曲線のピーク値とグランドレベル値の差を2で除算し、その値にグランドレベル値を加算したレベルで変化曲線をスライスしたときの、変化曲線の幅を半値幅 W として求める。これは、図7に W で示される幅である。

20

【0064】

(4) 円周方向位置(回転角度)に対する半価幅の変化曲線作成

得られた複数の半価幅 W を平均して、半価幅と表面硬さとの関係曲線に当てはめれば測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。しかし、本実施形態のようにX線を測定対象物OBに対し所定の入射角度で入射させて回折環を作成した場合は、 $r-I$ 変化曲線で除外したものが無い限り、すなわち、すべての回転角度 ϕ で半価幅 W が得られていない限り、通常の前記の計算では精度のよい平均値を求めることはできない。その理由は、円周方向位置(回転角度) ϕ に対する半価幅 W の変化曲線は、常に回転角度 0° をピーク点とする正弦曲線になり、 $r-I$ 変化曲線で除外したものがあ

30

【0065】

なお、(2)の処理で抽出される $r-I$ 変化曲線の数

40

【0066】

本願発明者は、多数の測定対象物OBを複数回測定することにより、測定対象物OBに対するX線の入射角度を 0° にすると、 $\phi-W$ 変化曲線は直線になり、入射角度を 0° から大きくしていくと、 $\phi-W$ 変化曲線は回転角度 0° をピーク点とする正弦曲線で、その振幅値が大きくなっていくことを見出した。これを、示したものが図8である。また、X線の入射角度を変化させると振幅値は変化するが、平均値すなわち $\phi-W$ 変化曲線

50

の中心線の値は変化しないことも見出した。そして、これらのことは理論的に説明できることも見出した。よって、X線の入射角度を 0° にしても、また設定値以外の値にしても、半価幅Wの平均値は変化せず、半価幅Wから計算される表面硬さも変化しない。よって、上述したように p - W変化曲線において欠けている部分が多い場合は、X線の入射角度を 0° にして測定をやり直すことができ、また、測定対象物OBが複雑な形状をしている場合は、X線の入射角度を所定角度にせず測定を行うこともできる。p - W変化曲線の上記特徴が理論的に説明できることは重要であるので後で詳細に説明する。

【0067】

(5) 半価幅の変化曲線の異常箇所除外

作成された p - W' 変化曲線は正常であれば正弦曲線になるが、(2)の処理後でも正常でない r - I 変化曲線が残存している等の理由で、正弦曲線からずれている箇所がある可能性がある。よって、p - W' 変化曲線から異常箇所を除外する処理を行う。この処理は、まず、p - W' 変化曲線のピーク値とボトム値の箇所を検出し、回転角度 p が 180° 異なっていることを確認したうえで、全ての半価幅W'のデータからピーク値とボトム値の中間値を減算し、ピーク値と中間値との差(中間値とボトム値の差)で除算した半価幅W''を作成する。これは、規格化した曲線(ボトム値を-1、ピーク値を1にした曲線)を作成する処理である。このとき、ピーク値とボトム値のいずれか1つが(2)の処理の結果得られていないときは、ピーク値またはボトム値から 90° の位置にある点2つの半価幅W'のデータを平均した値を中間値にし、同様の処理を行う。また、ピーク値とボトム値の双方が得られていない場合は、(2)の処理で抽出される r - I 変化曲線の数 が許容値より少ないときと同様、表示装置93に表面硬さの測定不可とX線を測定対象物OBに入射角度 0° で入射させて測定を行う指示を表示し、表面硬さの計算は終了する。

【0068】

半価幅W''を作成した後、p - W'' 変化曲線と $\sin(p + 90^\circ + \quad)$ の曲線を比較し、 $\sin(p + 90^\circ + \quad)$ からのずれが大きい箇所を除外する処理を行う。データ処理上は、 $\sin(p + 90^\circ + \quad)$ の を微少量ずつ変化させ、それぞれの半価幅W''と $\sin(p + 90^\circ + \quad)$ の値との差の2乗を加算してデータ数で除算した値が最小となるときの を d として求める。次に半価幅W''と $\sin(p + 90^\circ + d)$ の値との差の絶対値が許容値より大きい半価幅W''に対応する半価幅W'を p - W' 変化曲線から除外する。これにより p - W' 変化曲線から異常箇所が除外される。

【0069】

ここで の最小値 d を求める理由を説明する。p - W'' 変化曲線は、出射されるX線の光軸とX線照射点部分の表面の法線とを含む平面がイメージングプレート15と交差するラインXIが回転角度 0° のラインになっていれば、 $\sin(p + 90^\circ)$ の曲線になる。しかし、ステージ調整工程S1において、測定対象物OBが複雑な形状をしているため、照射点P1のみを十字マークと合致するよう調整を行い、受光点P2の調整を行わなかった場合は、前記ラインXIは回転角度 0° のラインからずれる可能性がある。この場合は、p - W'' 変化曲線のピーク点、ボトム点は回転角度 p が 0° の点からずれた点になる。よって、 $\sin(p + 90^\circ + \quad)$ とし、 の最小値 d を求める処理を行う。そして、d は、前記ラインXIと回転角度 0° のラインとのずれの角度である。

【0070】

(6) 半価幅の平均値算出

次に、p - W' 変化曲線から半価幅Wの平均値を計算する。この処理は、(2)の処理と(5)の処理で除外した r - I 変化曲線の数と半価幅W'の数の総計により計算方法が異なる。まず、1つも除外されなかった場合は、全ての半価幅Wを加算してデータ数で除算する通常の平均の計算を行う。これは、p - W' 変化曲線を積分して横軸の大きさ 360° で除算する計算である。次に除外数が許容値以下であった場合は、p - W' 変化曲線の欠けているデータW'を両側のデータにより補間演算で作成し、全ての半価幅W'を加算してデータ数で除算する計算を行う。これは、p - W' 変化曲線の欠けている

箇所を作成したうえで積分して横軸の大きさ 360° で除算する計算である。次に除外数が許容値より多かった場合は、 $p - W'$ 変化曲線に最も一致する $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線の A と B を求める計算を行う。この計算は以下のように行う。 $p - W'$ 変化曲線にピーク点とボトム点がある場合は、まず、 $(\text{ピーク値} - \text{ボトム値}) / 2$ を A にし、 $(\text{ピーク値} + \text{ボトム値}) / 2$ を B にする。次に A を微小量変化させるごとに B を所定範囲で変化させ、それぞれの半価幅 W' と $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の値と差の 2 乗を加算してデータ数で除算した値が最小となるとき A 、 B を求める。 $p - W'$ 変化曲線にピーク点、ボトム点のいずれか一方しかない場合は、ピーク値又はボトム値から 90° の回転角度 p の箇所の半価幅 W' 2 つを平均した値 C を計算し、 $(\text{ピーク値} - C)$ または $(C - \text{ボトム値})$ を A にし、 C を B にする。次に同様に、 A を微小量変化させるごとに B を所定範囲で変化させ、それぞれの半価幅 W' と $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の値と差の 2 乗を加算してデータ数で除算した値が最小となるとき A 、 B を求める。計算の結果得られた B が半価幅 W の平均値である。これは、 $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線を積分して横軸の大きさ 360° で除算すると B になるためである。なお、 A は半価幅 W の平均値には関係しない値であるが、上述したように X 線の入射角度を大きくしていくと $p - W$ 変化曲線の振幅値は大きくなっていくので、後述するように、測定対象物 OB に対する X 線の入射角度を計算する際に使用することができる。

【0071】

(7) 測定対象物 OB の表面硬さ計算

次に半価幅 W の平均値を、予め記憶されている半価幅と表面硬さとの関係曲線に当てはめて測定対象物 OB の表面硬さを計算する。半価幅と表面硬さとの関係曲線は図 9 に示すものであるが、この関係曲線は、表面硬さを变化させた試料を用意し、上述した X 線回折測定システムを用いて上述した測定方法と演算方法で半価幅 W の平均値を求め、公知技術である破壊検査の手法により試料の表面硬さを測定すれば、得ることができる。半価幅と表面硬さに相関関係があることは、先行技術文献にも書かれているが、本願発明のように回折環を撮像し半価幅の平均値を求めれば、相関係数の高い半価幅と表面硬さの相関関係を得ることができる。

【0072】

次に、コントローラ 91 は、測定対象物 OB の残留応力を計算する。この計算は、測定対象物 OB の表面硬さ計算の (2) で算出した $r - I$ 変化曲線のピーク点における半径値 r_p を計算した後、回転角度 p と半径値 r_p で表される回折環の形状と、 X 線照射点からイメージングプレート 15 までの距離 L 、 X 線の入射角度 及び格子面間隔等のパラメータ等を用いて行う計算である。この計算方法は公知技術であり、特開 2005 - 241308 号公報の [0026] ~ [0044] 及び特開 2011 - 27550 号公報の [0007] ~ [0017] 等で詳細に説明されているので本願では省略する。また、 $r - I$ 変化曲線が正常でないためピーク点における半径値 r_p が得られない箇所があり、回折環全体の形状が得られない場合は、別の方法により残留応力を計算する必要があるが、この方法は特許第 5408234 号公報で詳細に説明されているので本願では省略する。

【0073】

なお、上述したステージ調整工程 $S1$ において、測定対象物 OB が複雑な形状をしているため、照射点 $P1$ のみを十字マークと合致するよう調整を行い、受光点 $P2$ の調整を行わなかった場合は、残留応力の計算の前に行う演算処理がある。これは、 X 線の入射角度は設定値になっておらず、出射される X 線の光軸と X 線照射点部分の表面の法線とを含む平面がイメージングプレート 15 と交差するライン XI が回転角度 0° のラインと一致していないために行う演算処理であり、具体的には、 X 線の入射角度 を求める処理と回転角度 p のデータを補正する処理である。これについて、以下に説明する。

【0074】

上述したように X 線の入射角度 が大きくなるほど、正弦曲線である $p - W$ 変化曲線の振幅値は大きくなる。よって、予め $p - W$ 変化曲線をスムージング処理した $p - W$

10

20

30

40

50

、変化曲線の振幅値とX線の入射角度との関係曲線を求め、記憶しておけば、測定対象物OBの表面硬さ計算の(6)で算出した $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線のAの値をこの関係曲線に当てはめることで、X線の入射角度を求めることができる。測定対象物OBの表面硬さ計算の(6)で除外した数が許容値以下である場合は、この段階で上述した方法により $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線のAの値を算出する。 $p - W$ 変化曲線の振幅値とX線の入射角度との関係曲線は、表面がステージ61と平行である測定対象物OBを用意し、上述したX線回折測定システムを用いて上述した測定方法と演算方法で $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線のAの値を求め、以後、対象物セット装置60の操作子65aを回動操作することでX線の入射角度を変化させるごとに、同様の方法で $[A \cdot \sin(p + 90^\circ + d) + B]$ の曲線のAの値を求めればよい。初回のX線の入射角度は設定値になり、2回目以降のX線の入射角度は、回動操作後に操作子65aが示す回転角度から初回の操作子65aが示す回転角度を減算した角度を、入射角度の設定値に加算した角度になる。

【0075】

回転角度 p のデータの補正は、出射されるX線の光軸とX線照射点部分の表面の法線とを含む平面がイメージングプレート15と交差するラインXIを回転角度 0° にする補正である。具体的には、それぞれの回転角度 p から、測定対象物OBの表面硬さ計算の(6)で算出したラインXIと回転角度 0° のラインとのずれの角度である d を減算する補正である。

【0076】

コントローラ91は、測定対象物OBの表面硬さと残留応力の計算が終了すると、表示装置93に表面硬さと残留応力の計算結果を表示する。なお、これ以外に、回折環の強度分布画像(瞬時値Iを明度にして瞬時値I、回転角度 p 及び半径値 r のデータ群から得られる画像)及びX線入射角度、X線照射点からイメージングプレート15までの距離L等の測定条件を表示するようにしてもよい。作業者は結果を見ることで、表面硬さの値から測定対象物OBの表面硬さの評価をし、残留応力の値から測定対象物OBの疲労度等 evaluates。

【0077】

ここで、表示装置93に表面硬さの測定不可とX線を測定対象物OBに垂直に(入射角度 0° で)入射させて測定を行う指示が表示された場合、X線を測定対象物OBに垂直に入射させる方法について説明する。ステージ調整工程S1において、照射点P1と受光点P2とを十字マークに合致するよう調整を行った場合は、X線を測定対象物OBに対する入射角度は設定値である。よって、この場合は、対象物セット装置60の操作子65aを回動操作し、回動操作後に操作子65aが示す回転角度から回動操作前の操作子65aが示す回転角度を減算した角度が、入射角度の設定値にマイナスを付けた値になるようにステージ61の傾斜状態を調整すればよい。また、測定対象物OBが複雑な形状をしているため、照射点P1のみを十字マークと合致するよう調整を行い、受光点P2の調整を行わなかった場合は、切欠き部壁50cに設けた円形孔50c1の箇所に切欠き部壁50cと平行に黒色のフィルムを設ける。そして、黒色のフィルム上に形成される2つのLED光の照射点である、LED光源44からの出射光の照射点と、測定対象物OBからの反射光の照射点が、一致するよう、対象物セット装置60の操作子65aと操作子66aを回動操作すればよい。

【0078】

次に、上述したように回折環の円周方向に対する半価幅Wの変化曲線である $p - W$ 変化曲線が、以下の特徴を有することを、理論的に説明する。

- ・回転角度 0° (X線の光軸と測定箇所の平面の法線を含む平面がイメージングプレートと交差するラインの箇所)をピーク点とする正弦曲線である。
- ・X線の入射角度が大きくなるほど振幅値は大きくなり、X線の入射角度が 0° であるときは振幅値は0、すなわち直線になる。
- ・X線の入射角度を変化させると振幅値は大きくなるが、平均値($p - W$ 変化曲線の中

10

20

30

40

50

心線の値)は変化しない。

【0079】

測定対象物OBに入射するX線はある程度の断面径を有し、X線照射点はある程度の面積を有する。よって、以後この説明ではX線照射点をX線照射円と呼ぶ。図10は、測定対象物OBにおけるX線の回折を入射X線の断面径を誇張して示したものであるが、X線照射円内の各点から回折X線が発生するとした場合、回転角度 p における半価幅は、入射X線の光軸とイメージングプレート15の回転角度 p のラインとを含む平面が、X線照射円内の外周と交差する2点から発生する回折X線が、イメージングプレート15に入射したときの幅(以下、撮像幅という)に比例すると見なすことができる。図10(a)に示されるように、回転角度 0° の位置において撮像幅は広くなるが、回転角度 180° の位置において撮像幅は狭くなる。そして、図10(a)~(c)に示されるように、X線の入射角度が小さくなるほど、回転角度 0° と回転角度 180° における回折X線の撮像幅の差は小さくなる。これにより、回転角度 0° がピーク点となること、およびX線の入射角度が大きくなるほど p -W変化曲線の振幅値は大きくなり、入射角度が 0° であるときは振幅値は0になる(直線になる)ことが説明できる。ただし、この説明のみでは p -W変化曲線が正弦曲線になること、及びX線の入射角度により平均値(中心線の値)は変化しないことは、説明できないので、さらに数式を使った説明を行う。

【0080】

測定対象物OBにある入射角度で入射したX線の照射円を拡大して示すと図11のようになるが、上述したように、また、図13に示すように、回転角度 p における半価幅Wは、入射X線の光軸とイメージングプレート15の回転角度 p のラインとを含む平面が、X線の照射円の外周と交差する2点から発生する回折X線が、イメージングプレート15に入射したときの撮像幅 W_i に比例すると見なすことができる。ここでの回折X線は、X線の光軸と成す角度が所定角度である回折X線のみとする。すなわち、回折X線は頂点を回折X線の発生点としたときの円錐の側面に沿った直線であるとする。円錐の側面に沿った直線と円錐の底面とが成す角度はどの箇所でも一定であるように、回転角度 p によらず回折X線がイメージングプレート15に対する入射角度は一定である。従って、図13に示すように、撮像幅 W_i は、X線照射円の外周の2点から発生する回折X線の幅 W_d に定数を乗算したものである。また、X線照射円の外周の2点から発生する回折X線の幅 W_d は、X線照射円の中心から発生する回折X線と、X線の照射円の外周点から発生する回折X線の幅 W_r を2倍した値である。従って、半価幅Wは回折X線の幅 W_r に比例すると見なすことができ、 p -W変化曲線は、回転角度 p に対する回折X線の幅 W_r の変化曲線に曲線形状が等しいと見なすことができる。

【0081】

次に、回転角度 p におけるX線照射円の中心からX線照射円の外周点までの距離 X_c において成り立つ式を考える。断面が円であるX線がある入射角度で入射した場合、X線照射円は楕円となるので、楕円における中心から外周までの距離の式が成り立つ。すなわち、図11に示すように、楕円における短軸半径を a 、長軸半径を b とすると、次の数1の式が成り立つ。

【数1】

$$X_{cr} = \sqrt{a^2 \cdot \cos^2 \theta p + b^2 \cdot \sin^2 \theta p}$$

X線照射円の平面で見ると、X線照射円の外周点と回転角度 p のラインとは一致しないが、これはX線照射円の平面とイメージングプレート15の平面は、X線入射角度分の角度がある関係であるためであり、入射X線の光軸とイメージングプレート15の回転角度 p のラインとを含む平面が、X線の照射円の外周と交差する2点は図11で示す点になる。なお、これ以降の説明では計算式を分かりやすくするため、X軸、Y軸の方向は図2と合わせているが、回転角度 p はX軸方向を 0° とし、反時計回りに値が増大するとする。すなわち、X軸方向は図11下方向、Y軸方向は図11右方向とし、回転角度 p

は図 1 1 下方向が 0° で反時計回りに値が増大するとする。よって、これ以降の説明における回転角度 p は、上述した X 線回折システムによる半価幅 W の説明のときの回転角度 p から 90° を減算した値である。

【 0 0 8 2 】

X 線の入射角度を ψ とすると、図 1 2 に示すように、楕円の短軸半径 a は照射される X 線の断面径 Xr に等しく、長軸半径 b は $Xr / \cos \psi$ になる。よって数 1 は次の数 2 に書き換えることができる。

【 数 2 】

$$Xcr = \sqrt{Xr^2 \cdot \cos^2 \theta p + (Xr / \cos \psi)^2 \cdot \sin^2 \theta p}$$

10

【 0 0 8 3 】

次に、回転角度 p における回折 X 線の幅 Wr を考える。図 1 3 に示すように、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 1 5 の回転角度 p のラインとを含む平面において、回折 X 線が X 線照射円の平面となす角度を k (以下、回折 X 線が平面となす角度 k という) とすると、回折 X 線の幅 Wr は $Xcr \cdot \sin k$ となる。この Xcr に、数 2 の式を代入すると、回折 X 線の幅 Wr は次の数 3 で表される。

【 数 3 】

$$Wr = \sin \theta k \cdot (\sqrt{Xr^2 \cdot \cos^2 \theta p + (Xr / \cos \psi)^2 \cdot \sin^2 \theta p})$$

20

回折 X 線が平面と成す角度 k は回転角度 p により異なる。入射 X 線の光軸と回折 X 線がなす角度を r とすると、回折 X 線が平面と成す角度 k は、回転角度 p が 90° のときは、 $90^\circ - (r)$ になり、回転角度 p が 270° のときは $90^\circ - (-r)$ になる。そして、回転角度 p が 90° と 270° の間にあるときは、回折 X 線が平面と成す角度 k は、これら 2 つの値の中間の値になる。

【 0 0 8 4 】

次に回折 X 線が平面と成す角度 k を求める式を考える。まず、図 1 4 に示すように、照射される X 線が測定対象物の平面に垂直に照射される場合を考え、X 線照射円の中心座標を $(0, 0, 0)$ とし、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 1 5 の平面が交差する点の座標を $(0, 0, L)$ とする。入射 X 線の光軸と回折 X 線がなす角度 r は一定であるので、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 1 5 の回転角度 p のラインとを含む平面において、X 線照射円の中心から発生した回折 X 線がイメージングプレート 1 5 と交差する点までの距離は $L \cdot \tan r$ である。よって、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 1 5 の回転角度 p のラインとを含む平面において、X 線照射円の中心から発生した回折 X 線がイメージングプレート 1 5 と交差する点の座標は $(L \cdot \tan r \cdot \cos p, L \cdot \tan r \cdot \sin p, L)$ である。

30

【 0 0 8 5 】

次にこの状態から、図 1 5 に示すように、入射 X 線を ψ の角度だけ傾けた状態 (X 線入射角度を ψ にした状態) を考える。これは、X 軸を回転軸とし X 軸方向に向かって左周りに座標群を回転させた状態と考えることができるので、回転前の座標 (x, y, z) と回転後の座標 (x', y', z') には次の数 4 の式が成り立つ。

40

【 数 4 】

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

この (x, y, z) に座標 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, 0, L)$ 及び $(L \cdot \tan r \cdot \cos p, L \cdot \tan r \cdot \sin p, L)$ を代入したとき、対応する (x', y', z') の座標は、 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, L \cdot \sin \psi, L \cdot \cos \psi)$ 及び $(L \cdot \tan r \cdot \cos p \cdot \cos \psi, L \cdot \tan r \cdot \sin p \cdot \cos \psi, L \cdot \cos \psi)$ となる。

50

$n \cdot r \cdot \cos \psi, L \cdot \tan \theta_r \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta_p + L \cdot \sin \theta_p, -L \cdot \tan \theta_r \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta_p + L \cdot \cos \psi$)になる。この座標を座標 O、座標 I c、座標 Rとする。

【 0 0 8 6 】

次に、座標 O から座標 I c に向かうベクトル V と座標 O から座標 R に向かうベクトル D とを外積したベクトル S を考える。このベクトル S は、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 15 の回転角度 ψ のラインとを含む平面の法線ベクトルである。次にこのベクトル S と $(0, 0, 1)$ の単位ベクトルとを外積したベクトル F を求める。このベクトル F は、入射 X 線の光軸とイメージングプレート 15 の回転角度 ψ のラインとを含む平面が X 線照射円の平面 (図 15 の X Y 平面) と交差するラインに平行なベクトルである。図 15 に示すように、回転角度 ψ の箇所の回折 X 線が平面と成す角度 k は、ベクトル F とベクトル D が成す角度であり、ベクトル F およびベクトル D の大きさを $|F|$ および $|D|$ とすると、以下のベクトルの内積の式で求めることができる。

10

【数 5】

$$\theta k = \cos^{-1}(F \cdot D / |F| \cdot |D|)$$

ベクトル F とベクトル D の成分を座標 O、座標 I c、座標 R の座標値と外積の計算により求め、数 5 に代入し、式を整理すると、以下の数 6 の式が成り立つ。

【数 6】

$$\theta k = \cos^{-1} \left\{ \frac{(-\tan \theta_r \cdot \cos \psi - \sin \theta_p \cdot \sin \psi)}{\sqrt{\tan^2 \theta_r + 1} \cdot \sqrt{\cos^2 \theta_p \cdot \cos^2 \psi + \sin^2 \theta_p}} \right\}$$

20

【 0 0 8 7 】

これで回折 X 線が平面と成す角度 k を求める式ができたので、数 6 の式を数 3 の k に代入して式を整理すると、次の数 7 ができる。

【数 7】

$$W_r = -X_r \cdot \sqrt{1/(\tan^2 \theta_r + 1)} \cdot (\tan^2 \psi \cdot \tan^2 \theta_r \cdot \sin \theta_p - 1)$$

数 7 において、変数は回転角度 ψ と回折 X 線の幅 W_r であり、X 線の入射角度 θ_p を設定すれば、後はすべて定数である。よって、回転角度 ψ に対する回折 X 線の幅 W_r の変化曲線は、振幅値 A が次の数 8 であり、中心線の値 (平均値) B が次の数 9 の正弦曲線になる。

30

【数 8】

$$A = X_r \cdot \sqrt{1/(\tan^2 \theta_r + 1)} \cdot \tan^2 \psi \cdot \tan^2 \theta_r$$

【数 9】

$$B = X_r \cdot \sqrt{1/(\tan^2 \theta_r + 1)}$$

【 0 0 8 8 】

40

数 8 において、振幅値 A において変化するのは X 線の入射角度 θ_p であり、それ以外は定数である。よって、数 8 から、X 線の入射角度 θ_p が大きくなるほど正弦曲線の振幅値 A は大きくなり、X 線の入射角度 θ_p が 0° のとき、振幅値 A は 0 になることがわかる。また、数 9 においては全てが定数である。よって、数 9 から、X 線の入射角度 θ_p によらず正弦曲線の中心線の値 (平均値) B は変化しないことがわかる。上述したように、 ψ - W 変化曲線は、回転角度 ψ に対する回折 X 線の幅 W_r の変化曲線に曲線形状が等しいと見なすことができるので、 ψ - W 変化曲線にも同様の特徴があるといえる。これにより、 ψ - W 変化曲線の特徴を理論的に説明することができた。

【 0 0 8 9 】

上記説明からも理解できるように、上記実施形態においては、測定対象物 O B に向けて

50

X線を出射し、測定対象物OBにて発生した回折X線を、出射X線の光軸に対して垂直に交差する撮像面を有するイメージングプレート15にて受光し、イメージングプレート15に回折環を形成するX線回折システムを用いて測定対象物OBの表面硬さを評価する際、イメージングプレート15に回折環を形成し、形成した回折環における回折X線の強度分布を検出した後、X線回折システムのコントローラ91が実行する演算プログラムにより、回折環の半径方向における回折X線の強度分布を用いて半価幅Wを回折環の複数の箇所から算出して平均し、得られた半価幅Wの平均値と、予め記憶されている半価幅と表面硬さの関係曲線とを用いて測定対象物OBの表面硬さを算出している。

【0090】

これによれば、回折環の半径方向における回折X線の強度分布に正常でない箇所があっても、回折X線の強度分布が正常である箇所を抽出して回折環幅を算出することができるので、精度のよい測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。また、複数の箇所から回折環幅を算出して平均しているため回折環幅のばらつきを小さくすることができ、1回のX線回折像形成で精度のよい測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。

【0091】

また、上記実施形態においては、コントローラ91が実行する演算プログラムは、検出された回折環における回折X線の強度分布に基づいて、半価幅Wの回折環の円周方向に対する変化曲線である $p - W$ 変化曲線を算出し、算出された $p - W$ 変化曲線から半価幅Wの平均値を算出している。

【0092】

これによれば、半価幅Wを回折環全周に渡ってあらゆる箇所から算出し平均していることになるので、半価幅Wのばらつきをさらに小さくすることができ、精度のよい測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。また、上述したように、測定対象物OBへのX線の入射角度によって、 $p - W$ 変化曲線の振幅は変化するが、 $p - W$ 変化曲線の中心線、すなわち半価幅Wの平均値は変化しないので、X線の入射角度を一定にしなくても精度よく測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。

【0093】

また、上記実施形態においては、コントローラ91が実行する演算プログラムは、算出された $p - W$ 変化曲線に正弦曲線が最も一致するときの正弦曲線の中心線値を算出し、算出した中心線値を半価幅Wの平均値にしている。

【0094】

これによれば、測定対象物OBが複雑な形状をしている等の原因で回折X線が遮られ、回折環の一部が欠けている場合でも、算出された $p - W$ 変化曲線に最も一致する正弦曲線の中心線値を求めれば、半価幅Wの平均値を精度よく求めることができ、精度よく測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。

【0095】

また、上記実施形態においては、コントローラ91が実行する演算プログラムは、 $p - W$ 変化曲線を算出した後、算出された $p - W$ 変化曲線を規格化し、規格化した $p - W$ 変化曲線の正弦曲線からのずれを算出し、算出したずれが予め設定された許容値を超えている箇所を、 $p - W$ 変化曲線から除外している。

【0096】

これによれば、 $p - W$ 変化曲線に正常でない箇所があっても、その箇所を自動で除外した上で、最も一致する正弦曲線の中心線値から、半価幅Wの平均値を求めることができるので、短時間で半価幅Wの平均値を精度よく求めることができ、精度よく測定対象物OBの表面硬さを求めることができる。

【0097】

また、上記実施形態においては、コントローラ91が実行する演算プログラムは、検出された回折環における回折X線の強度分布に基づいて、回折環の形状を検出し、検出した回折環の形状から \cos 法を用いて測定対象物OBの残留応力を算出している。これによれば、表面硬さ以外に残留応力によっても対象物を評価することができる。

【 0 0 9 8 】

さらに、本発明の実施にあたっては、上記実施形態に限定されるものではなく、本発明の目的を逸脱しない限りにおいて種々の変更が可能である。

【 0 0 9 9 】

上記実施形態においては、測定対象物 O B に対する X 線の入射角度 を所定の角度にし、測定対象物 O B の表面硬さに加えて測定対象物 O B の残留応力を測定することができるようにした。そして、 $p - W$ 変化曲線の正常部分が少ない場合は、測定対象物 O B に対する X 線の入射角度 を 0° にして測定を行うようにした。しかし、測定対象物 O B の表面硬さのみを測定したい場合は、最初から測定対象物 O B に対する X 線の入射角度 を 0° にして測定を行えばよい。この場合は、 $p - W$ 変化曲線は直線になるので、 $r - I$ 変化曲線が正常な箇所を抽出して、通常の平均の計算で半価幅を求めることができる。また、この場合は、作業者が $r - I$ 変化曲線を表示装置 9 3 に表示し、適切と判断した箇所を抽出してもよい。さらに、X 線回折測定装置を測定対象物 O B の表面硬さの測定のみを使用する場合は、X 線回折測定装置の筐体 5 0 をステージ 6 1 に対して X 線が垂直に入射する姿勢で支持ロッド 5 2 に固定するようにしてもよい。

10

【 0 1 0 0 】

また、上記実施形態においては、測定対象物 O B に対する X 線の入射角度 を所定の角度にするよう調整し、測定対象物 O B の形状が複雑等の理由で調整が困難であるときは、調整を行わず、残留応力の計算において、X 線の入射角度 を $p - W$ 変化曲線の振幅値から求めるようにしたが、残留応力の計算の精度を少々落としてもよければ、測定対象物 O B に対する X 線の入射角度 の調整は行わないようにしてもよい。これによれば、測定対象物 O B の表面硬さの測定精度を変化させず、調整の要する時間を短縮することができる。

20

【 0 1 0 1 】

また、上記実施形態においては、イメージングプレート 1 5 に回折環を形成し、回折 X 線の強度分布を検出した後、コントローラ 9 1 の演算プログラムの実行により、測定対象物 O B の表面硬さと残留応力を計算するようにした。しかし、測定に時間がかかってもらければ、回折 X 線の強度分布データを用いての計算は別の装置で行ってもよいし、計算の一部または全部を人為的に行ってもよい。また、X 線回折測定装置は回折環の形成のみを行う装置にし、回折環が形成されたイメージングプレート 1 5 をテーブル 1 6 から取り外して別の装置にセットし、回折 X 線の強度分布検出、回折環の消去を別の装置で行うようにしてもよい。

30

【 0 1 0 2 】

また、上記実施形態においては、回折環の半径方向における強度分布に基づく幅として半価幅を用いたが、回折環の半径方向における強度分布に基づく幅であれば、これ以外の値を用いてもよい。例えば積分幅でもよいし、ピーク値の $1 /$ のレベルでスライスしたときの幅で を適切な値に定めた幅でもよい。

【 0 1 0 3 】

また、上記実施形態では、対象物セット装置 6 0 の移動機構、回転機構を用いて、測定対象物 O B の位置、姿勢を調整できる構成にしたが、測定対象物 O B は固定させ、X 線回折測定装置の筐体 5 0 をアーム式移動装置等に連結させて、測定対象物 O B に対して筐体 5 0 の位置、姿勢を調整するようにしてもよい。この場合は、測定対象物 O B が重量物であるか、固定されていて運搬が困難な場合に有効である。

40

【 0 1 0 4 】

また、上記実施形態および変形例では、イメージングプレート 1 5 に回折環を形成し、レーザ照射装置 3 0 からのレーザ照射と光の強度検出により、回折環における回折 X 線の強度に相当する強度の分布を検出し、LED 光の照射により回折環の消去を行ったが、回折環を形成してその強度分布を検出することができるならば、回折環の形成と強度分布の検出はどのような方法を用いてもよい。例えば、イメージングプレート 1 5 の代わりにイメージングプレート 1 5 と同じ広さの平面を有する X 線 CCD を備え、X 線出射器 1 0 か

50

らのX線照射の際、X線CCDの各画素が出力する電気信号により回折環における強度分布を検出するようにしてもよい。また、イメージングプレート15と同じ広さの平面を有するX線CCDの代わりに微小サイズのX線CCDを位置を検出しながら走査し、X線CCDの各画素が出力する電気信号とX線CCDの走査位置から回折環における強度分布を検出するようにしてもよい。

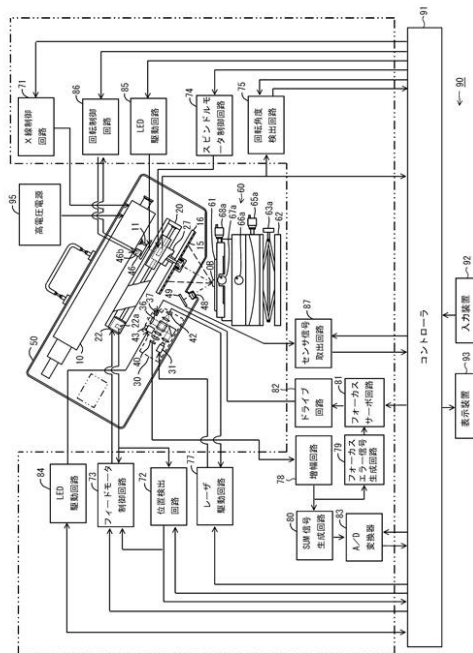
【符号の説明】

【0105】

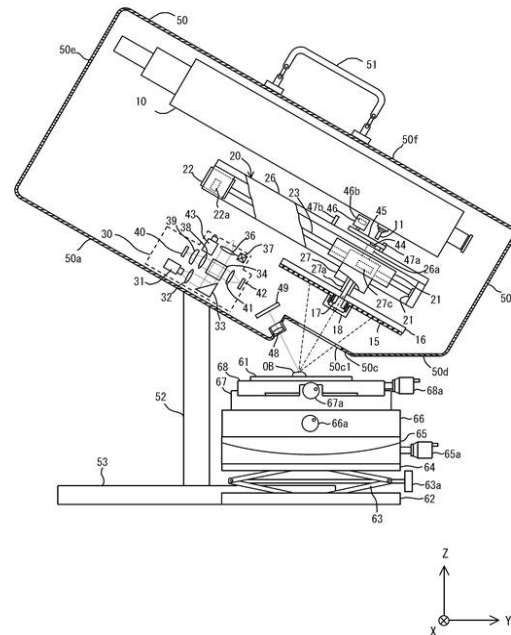
10...X線射出器、15...イメージングプレート、15a, 16a, 17a, 18a, 21a, 26a, 27a1, 27b...貫通孔、16...テーブル、18...固定具、20...テーブル駆動機構、21...移動ステージ、22...フィードモータ、23...スクリーロッド、27...スピンドルモータ、28...通路部材、30...レーザ検出装置、31...レーザ光源、36...対物レンズ、44...LED光源、45...プレート、46...モータ、47a, 47b...ストッパ部材、48...結像レンズ、49...撮像器、50...筐体、50a...底面壁、50c...切欠き部壁、50d...繋ぎ壁、52...支持ロッド、60...対象物セット装置、61...ステージ、63a, 65a, 66a, 67a, 68a...操作子、90...コンピュータ装置、91...コントローラ、92...入力装置、93...表示装置、95...高電圧電源、OB...測定対象物

10

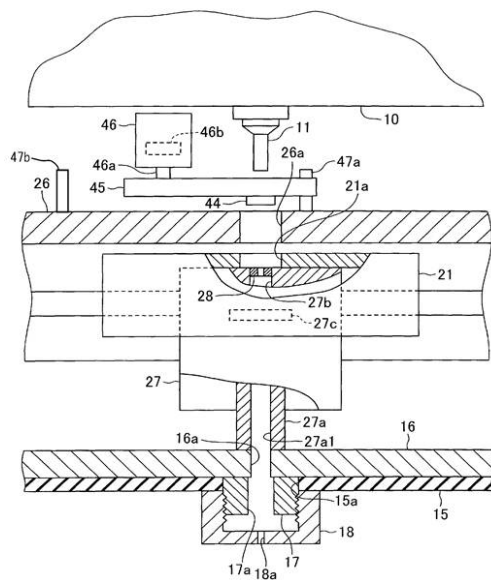
【図1】



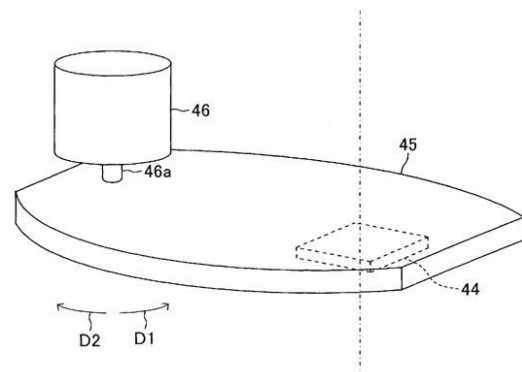
【図2】



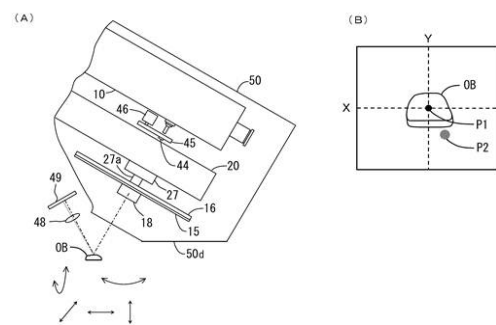
【図 3】



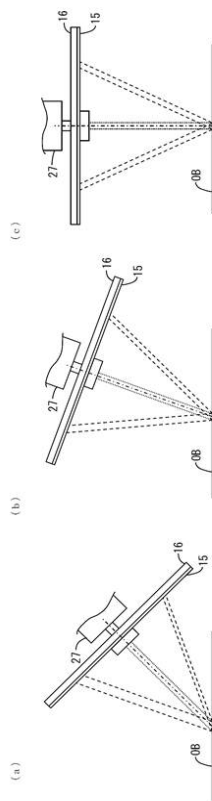
【図 4】



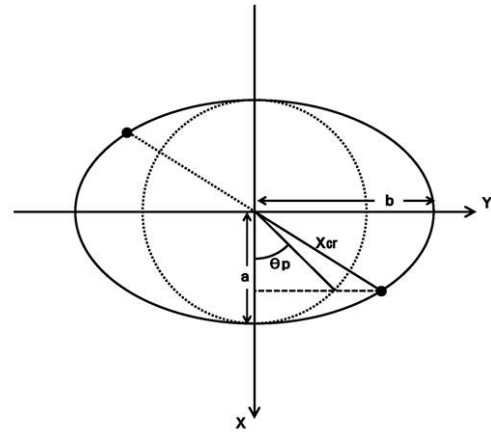
【図 5】



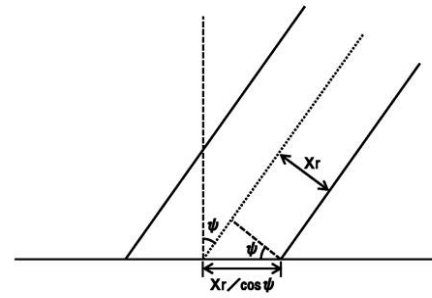
【図 10】



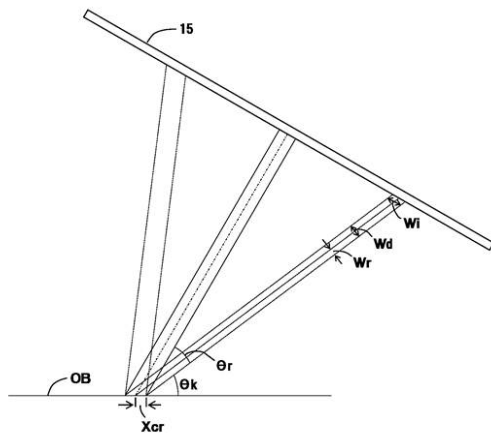
【図 11】



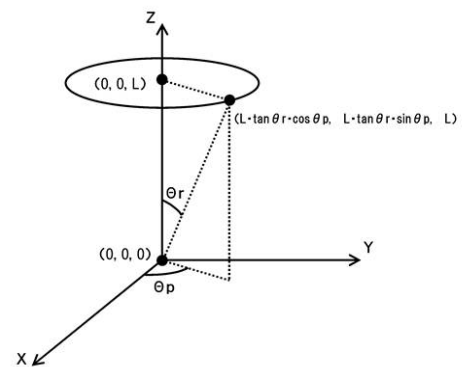
【図 12】



【図 13】



【図 14】



フロントページの続き

- (72)発明者 坂谷 勝明
石川県金沢市鞍月2丁目1番地 石川県工業試験場内
- (72)発明者 佐々木 敏彦
石川県金沢市角間町又7番地 国立大学法人金沢大学内
- (72)発明者 内山 宗久
静岡県浜松市北区細江町中川7000番地の35 パルステック工業株式会社内
- (72)発明者 丸山 洋一
静岡県浜松市北区細江町中川7000番地の35 パルステック工業株式会社内

審査官 越柴 洋哉

- (56)参考文献 国際公開第2014/102919(WO, A1)
特開2005-241308(JP, A)
特開2013-083574(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N 23/00 - 23/227