

(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2017-211319

(P2017-211319A)

(43) 公開日 平成29年11月30日(2017.11.30)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)		
GO1L	1/00	(2006.01)	GO1L	1/00	A	2G001		
GO1L	1/25	(2006.01)	GO1L	1/25				
GO1N	23/205	(2006.01)	GO1N	23/205	310			

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2016-105618 (P2016-105618)
 (22) 出願日 平成28年5月26日 (2016.5.26)

特許法第30条第2項適用申請有り (公開者) The International Union of Crystallography (刊行物名) JOURNAL OF APPLIED CRYSTALLOGRAPHY 第49巻、第2号、第426~432頁 (発行日) 平成28年4月1日、において発表 <http://journals.iucr.org/j/issues/2016/02/00/to5125/index.html> に、平成28年4月に掲載

(71) 出願人 504160781
 国立大学法人金沢大学
 石川県金沢市角間町ヌ7番地
 (74) 代理人 100109210
 弁理士 新居 広守
 (72) 発明者 宮崎 利行
 石川県金沢市角間町ヌ7番地 国立大学法人金沢大学内
 (72) 発明者 佐々木 敏彦
 石川県金沢市角間町ヌ7番地 国立大学法人金沢大学内
 Fターム(参考) 2G001 AA01 AA02 AA04 BA18 CA01 CA02 CA04 DA01 KA07

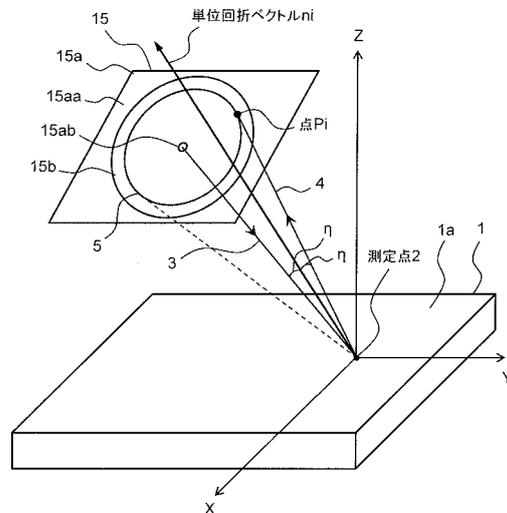
(54) 【発明の名称】 応力測定方法及び応力測定装置

(57) 【要約】

【課題】座標系に依存せずに回折環に基づく応力測定を可能にする応力測定方法及び応力測定装置を提供する。

【解決手段】応力測定方法では、測定対象物1に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つX線ビーム3を測定対象物1の測定点2に照射し、測定点2で反射する回折ビーム4により形成される回折環5のひずみを測定し、測定点2に入射するX線ビーム3と回折ビーム4とから、測定点2でのX線ビーム3の回折を反映する回折ベクトルを決定し、上記測定の測定結果を、回折ベクトルを用いて変換することにより、測定点2における測定対象物1の応力を求める。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

測定対象物に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つビームを前記測定対象物の特定部分に照射し、

前記特定部分で反射する回折ビームにより形成される回折環のひずみを測定し、

前記特定部分に入射する前記ビームと前記回折ビームとから、前記特定部分での前記ビームの回折を反映する回折ベクトルを決定し、

前記測定の測定結果を、前記回折ベクトルを用いて変換することにより、前記特定部分における前記測定対象物の応力を求める

応力測定方法。

10

【請求項 2】

前記回折ベクトルを用いた変換では、

異なる方向からの 2 回以上の前記ビームの照射で得られる 2 つ以上の前記回折環のひずみの測定結果と、

前記 2 つ以上の回折環それぞれを形成する前記回折ビームに基づく 2 つ以上の前記回折ベクトルとを用いる

請求項 1 に記載の応力測定方法。

【請求項 3】

前記ビームの照射では、前記特定部分を中心とする均等な方向角で 3 回以上の前記ビームを照射する

20

請求項 2 に記載の応力測定方法。

【請求項 4】

前記回折環上の 2 つ以上の位置でそれぞれ前記回折環を形成する 2 つ以上の前記回折ビームと前記特定部分に入射する前記ビームとから 2 つ以上の前記回折ベクトルを決定し、

前記回折ベクトルを用いた変換では、前記 2 つ以上の位置での前記回折環のひずみの測定結果と、前記 2 つ以上の位置に対応する前記 2 つ以上の回折ベクトルとを用いる

請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の応力測定方法。

【請求項 5】

前記回折ベクトルは、前記特定部分に入射する前記ビームと前記回折ビームとの中間及び前記特定部分を通る直線を形成するベクトルである

30

請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の応力測定方法。

【請求項 6】

前記回折ベクトルを用いた変換では、前記回折ベクトルの成分 (n_1, n_2, n_3) により形成される成分要素 n_1^2 、 n_2^2 、 n_3^2 、 $2 \times n_1 \times n_2$ 、 $2 \times n_2 \times n_3$ 及び $2 \times n_3 \times n_1$ を用いて、前記回折環のひずみの測定結果と、前記特定部分における前記測定対象物の応力とを関係付ける

請求項 5 に記載の応力測定方法。

【請求項 7】

前記回折ベクトルを用いた変換では、前記 2 つ以上の回折ベクトルそれぞれの前記成分要素を、各要素として含む行列の一般逆行列を使用する

40

請求項 2 または 4 を引用する請求項 6 に記載の応力測定方法。

【請求項 8】

前記成分要素を用いて、求めるべき応力の推定誤差を算出し、

前記推定誤差を低減する前記回折ベクトルを、前記応力を求める際に採用する

請求項 6 または 7 に記載の応力測定方法。

【請求項 9】

測定対象物に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つビームを前記測定対象物の特定部分に照射するビーム照射部と、

前記特定部分で反射する回折ビームを撮像し、前記回折ビームにより形成される回折環の撮像画像を生成する撮像部と、

50

前記撮像画像から得られる測定結果を、特定部分での前記ビームの回折を反映する回折ベクトルを用いて変換することにより、前記特定部分における前記測定対象物の応力を求めるデータ処理部とを備え、

前記データ処理部は、前記特定部分に入射する前記ビームと前記回折ビームとから前記回折ベクトルを決定する

応力測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、回折する性質を持つビームを測定対象物に照射することによって、測定対象物の応力を測定する応力測定方法及び応力測定装置に関する。 10

【背景技術】

【0002】

測定対象物の応力を測定するための様々な技術が提案されている。このような技術の中に、X線又は中性子線等の測定対象物を形成する材料の結晶粒で回折する性質を持つビームを、測定対象物に照射したときのビームの回折の情報から、測定対象物の照射部分の応力を測定する技術がある。測定対象物の材料の結晶粒による結晶格子面の間隔は、結晶粒に作用する応力によって変化する。結晶格子面の間隔の変化は、測定対象物に衝突して反射するビームの回折角度等の回折後のビームの状態に影響を与える。よって、回折後のビームの状態から、測定対象物の応力が算出され得る。また、測定対象物の材料の多数の結晶は、様々な方位に乱雑に配置されているため、測定対象物で反射したビームは、円錐面を形成するように様々な方向に指向される。反射後のビームは、円錐の軸と直交する面上で環状の像を形成し、このような環状の像は、回折環と呼ばれる。例えば、特許文献1には、測定対象物にX線を照射して得られる回折環に基づき、測定対象物内に存在する応力を測定する技術が記載されている。特許文献1では、4つの入射方向から測定対象物の表面の測定点にX線を照射して得られる4つの回折環を用いて、測定点での3軸垂直応力成分及び3軸せん断応力成分が求められる。 20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2011-27550号公報 30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

特許文献1に記載される技術では、回折環に基づく3軸応力の測定法として、 \sin^2 法と呼ばれる平面応力測定法が利用されている。なお、 θ とは、測定対象物の表面の法線と結晶格子面の法線とがなす角度である。 \sin^2 法では、様々な角度 毎のビームの回折角度に基づき、応力が算出される。また、回折環に基づく3軸応力の測定法として、回折環全体のひずみデータから応力を求めるc/s法等が知られている。上述の2つの測定法はいずれも、データ解析を容易にするために各々に特有の座標系を使用する。 40

【0005】

本発明は、座標系に依存せずに回折環に基づく応力測定を可能にする応力測定方法及び応力測定装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記目的を達成するために、本発明に係る応力測定方法は、測定対象物に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つビームを測定対象物の特定部分に照射し、特定部分で反射する回折ビームにより形成される回折環のひずみを測定し、特定部分に入射するビームと回折ビームとから、特定部分でのビームの回折を反映する回折ベクトルを決定し、上記測定の測定結果を、回折ベクトルを用いて変換することにより、特定部分にお 50

ける測定対象物の応力を求める。

【0007】

回折ベクトルを用いた変換では、異なる方向からの2回以上のビームの照射で得られる2つ以上の回折環のひずみの測定結果と、2つ以上の回折環それぞれを形成する回折ビームに基づく2つ以上の回折ベクトルとを用いてもよい。

さらに、ビームの照射では、特定部分を中心とする均等な方向角で3回以上のビームを照射してもよい。

応力測定方法は、回折環上の2つ以上の位置でそれぞれ回折環を形成する2つ以上の回折ビームと特定部分に入射するビームとから2つ以上の回折ベクトルを決定し、回折ベクトルを用いた変換では、2つ以上の位置での回折環のひずみの測定結果と、2つ以上の位置に対応する2つ以上の回折ベクトルとを用いてもよい。

10

【0008】

回折ベクトルは、特定部分に入射するビームと回折ビームとの中間及び特定部分を通る直線を形成するベクトルであってもよい。

さらに、回折ベクトルを用いた変換では、回折ベクトルの成分 (n_1, n_2, n_3) により形成される成分要素 n_1^2 、 n_2^2 、 n_3^2 、 $2 \times n_1 \times n_2$ 、 $2 \times n_2 \times n_3$ 及び $2 \times n_3 \times n_1$ を用いて、回折環のひずみの測定結果と、特定部分における測定対象物の応力とを関係付けてもよい。

さらにまた、回折ベクトルを用いた変換では、2つ以上の回折ベクトルそれぞれの成分要素を、各要素として含む行列の一般逆行列を使用してもよい。

20

応力測定方法は、成分要素を用いて、求めるべき応力の推定誤差を算出し、推定誤差を低減する回折ベクトルを、応力を求める際に採用してもよい。

【0009】

また、本発明に係る応力測定装置は、測定対象物に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つビームを測定対象物の特定部分に照射するビーム照射部と、特定部分で反射する回折ビームを撮像し、回折ビームにより形成される回折環の撮像画像を生成する撮像部と、撮像画像から得られる測定結果を、特定部分でのビームの回折を反映する回折ベクトルを用いて変換することにより、特定部分における測定対象物の応力を求めるデータ処理部とを備え、データ処理部は、特定部分に入射するビームと回折ビームとから回折ベクトルを決定する。

30

【発明の効果】

【0010】

本発明に係る応力測定方法等によれば、座標系に依存せずに回折環に基づく応力測定が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】本発明の実施の形態に係る応力測定装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図2】図1の撮像部15の構成を示す模式的な斜視図である。

【図3】図1の撮像部と測定対象物との配置構成を示す概略図である。

【図4】測定点において測定対象物にひずみが生じている場合の回折環の一例と、測定点において測定対象物が無応力で無ひずみである場合の真円の回折環とを比較して示す図である。

40

【図5】実施の形態に係る応力測定装置による測定対象物の応力測定動作の流れを示すフローチャートである。

【図6】3つの異なる位置でX線照射部から出射されるX線ビームが基台に3つの回折環を形成する状態を示す概略図である。

【図7】実施の形態に係る応力測定装置のデータ処理部の解析動作の流れを示すフローチャートである。

【図8】変形例1に係る応力測定装置のデータ処理部の解析動作の流れを示すフローチャートである。

50

【図 9】変形例 2 に係る応力測定装置のデータ処理部の解析動作の流れを示すフローチャートである。

【図 10】変形例 3 に係る応力測定装置のデータ処理部の解析動作の流れを示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、図面を参照しつつ、本発明の実施の形態について説明する。なお、以下で説明する実施の形態は、いずれも包括的又は具体的な例を示すものである。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置及び接続形態、工程（ステップ）、工程の順序等は、一例であり、本発明を限定する主旨ではない。また、以下の実施の形態における構成要素のうち、最上位概念を示す独立請求項に記載されていない構成要素については、任意の構成要素として説明される。

また、添付の図面における各図は、模式的な図であり、必ずしも厳密に図示されたものでない。さらに、各図において、同一又は同様な構成要素については同じ符号を付している。また、以下の実施の形態の説明において、略平行、略直交のような「略」を伴った表現が、用いられる場合がある。例えば、略平行とは、完全に平行であることを意味するだけでなく、実質的に平行である、すなわち、例えば数%程度の差異を含むことも意味する。他の「略」を伴った表現についても同様である。

【0013】

[実施の形態]

図 1 を参照して、実施の形態に係る応力測定装置 10 の構成を説明する。図 1 は、実施の形態に係る応力測定装置 10 の構成の一例を示すブロック図であるが、応力測定装置 10 の構成は、図 1 の構成に限定されるものでない。応力測定装置 10 は、測定対象物にビームとしての X 線を照射し、X 線が測定対象物で回折を伴って反射した回折ビームが形成する回折環を解析し、測定対象物の応力を求める装置である。なお、測定対象物に照射されるビームは、X 線に限定されるものでなく、測定対象物を形成する材料の結晶粒で回折する性質のあるビームであればよい。具体的には、ビームは、結晶粒で回折する波長を有するビームであってよく、より具体的には、結晶粒間の距離よりも小さい波長を有するビームであってよい。さらに、ビームは、規則的な回折ビームを形成するために一定の波長つまり単一波長を有することが望ましい。例えば、ビームは、X 線及びガンマ線等の電磁波であってもよく、中性子線等の粒子線であってもよく、電子線であってもよい。また、回折環は、デバイ環、デバイ・シェラー環とも呼ばれる。

【0014】

応力測定装置 10 は、高圧電源 11、冷却部 12、制御部 13、X 線照射部 14、撮像部 15、画像処理部 16、データ処理部 17、出力部 18、記憶部 19 及び移動検知部 20 を備える。高圧電源 11 は、X 線を生成するための電子線加速用の高電圧を X 線照射部 14 に供給する。冷却部 12 は、X 線照射部 14 を冷却する。例えば、冷却部 12 は、X 線照射部 14 を空冷及び / 又は液冷する。ここで、X 線照射部 14 は、ビーム照射部の一例である。

【0015】

制御部 13 は、応力測定装置 10 全体の動作を制御する。例えば、制御部 13 は、専用のハードウェアで構成されてもよい。また例えば、制御部 13 は、各構成要素に適したソフトウェアプログラムを実行することによって実現されてもよい。この場合、制御部 13 は、例えば、演算処理部（図示せず）と、制御プログラムを記憶する記憶部（図示せず）とを備えてもよい。演算処理部としては、MPU（Micro Processing Unit）、CPU（Central Processing Unit）などが例示される。記憶部としては、メモリなどが例示される。なお、制御部 13 は、集中制御を行う単独の制御部で構成されていてもよく、互いに協働して分散制御を行う複数の制御部で構成されていてもよい。

記憶部 19 は、種々の情報を記憶するものであればよい。例えば、記憶部 19 は、半導体メモリ等から構成されてもよく、揮発性メモリ又は不揮発性メモリ等から構成されてよ

10

20

30

40

50

い。不揮発性メモリとして、フラッシュメモリ、HDD (Hard Disk Drive) 又はSSD (Solid State Drive) 等が使用され得る。また、記憶部19は、読み取り専用のメモリ、つまり、書き換え不可のメモリでもよい。

【0016】

X線照射部14は、電子線をターゲットに衝突させてX線を発生させる装置と、発生したX線を細束のX線ビームとして測定対象物に照射するX線照射管とを備えている。X線を発生する装置は、例えば、電子線を高電圧で加速して陽極に衝突させて、それによりCuK特性X線を発生させるためのX線管球である。X線管球の内部は、真空である。X線ビームを照射するX線照射管は、例えば、発生したX線を細い平行ビームに絞り照射するピンホールコリメータである。測定対象物の表面とX線ビームとのなす角である照射角は、0°と180°を除く0°~180°の範囲で設定可能である。照射されるX線ビームの直径は、1~2mmよりも小さくてよく、例えば数100μm以下の大きさでもよい。またX線の強度は、4~20keV程度の軟X線でよい。このX線の強度は、撮像部15の感度と、撮像部15の撮像エリア及び測定対象物の間の距離とに依存するが、例えば、4.9~8.1keVでもよい。

10

【0017】

図2を参照すると、撮像部15は、X線ビームが測定対象物で回折を伴って反射することによって形成する回折ビームにより形成される回折環を撮像する、1つ以上の固体撮像素子又はイメージングプレート等の撮像体15bを、例えば基台15aの平坦な表面15aa上に備える。図2は、図1の撮像部15の構成を示す模式的な斜視図である。固体撮像素子には、CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサ、MOS (Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサ等が用いられ得る。撮像体15bが配置される表面15aaでは、X線ビームが通過する貫通孔15abが、撮像体15bの中央部分に形成され、撮像体15bが、回折環全体を撮像する。なお、撮像体15bを構成する1つ以上の固体撮像素子は、回折環の一部、若しくは複数の部分を撮像してもよい。撮像体15bとしてイメージングプレートが用いられる場合、露光された回折環像を読み出すための読み出し装置が設けられ得る。

20

【0018】

図1及び図2を参照すると、X線照射部14及び撮像部15は一体となって、水平方向及び鉛直方向を組み合わせた様々な方向への移動が可能であると共に、撮像部15の基台15aの向きを変えるように、例えばヨーイング、ピッチング及びローリングの3軸周りの回動が可能である。各動作は、モータ、アクチュエータ等の駆動装置によって実施されてよく、制御部13が、各駆動装置を制御してもよい。又は、各動作は、手動で実施されてもよい。上述のようなX線照射部14及び撮像部15は、測定対象物1の特定の部分に対して、撮像部15の基台15aを所定の位置及び向きに配置することができる。また、移動検知部20は、X線照射部14及び撮像部15の移動量及び移動方向を検知して制御部13に送り、制御部13は、移動検知部20の検知結果から撮像部15の基台15aの位置及び向きを算出する。本実施の形態では、移動検知部20は、撮像部15の移動を検知する。

30

【0019】

画像処理部16は、撮像部15により撮像された回折環を表す回折環画像を生成する。画像処理部16は、制御部13と同様に、専用のハードウェアで構成されてもよく、各構成要素に適したソフトウェアプログラムを実行することによって実現されてもよい。例えば、画像処理部16は、撮像体15bを構成する1つ以上の固体撮像素子による1つ以上の撮像画像を合成して、回折環全体を含む1つの画像を生成する。

40

【0020】

データ処理部17は、画像処理部16により生成された回折環画像を解析する。データ処理部17は、制御部13と同様に、専用のハードウェアで構成されてもよく、各構成要素に適したソフトウェアプログラムを実行することによって実現されてもよい。具体的には、データ処理部17は、真円回折環に対する回折環の変形等のひずみに基づき、後述す

50

る方法を用いて、測定対象物におけるビームを照射した部分の応力を求める。なお、真円回折環は、測定対象物におけるビームが照射される部分が無応力で無ひずみである場合の回折環である。

出力部 18 は、表示装置を備える。出力部 18 は、データ処理部 17 による解析結果を表示し、解析結果を示すデータを記憶部 19 に電子データとして記録する。また、撮像部 15 により撮像された撮像画像、及び画像処理部 16 により生成された回折環画像等も、記憶部 19 に記憶されてもよい。

【0021】

さらに、図 3 を参照して、撮像部 15 と測定対象物の配置構成を説明する。図 3 は、図 1 の撮像部 15 と測定対象物 1 との配置構成を示す概略図である。上述したように、撮像部 15 は、平坦な板状の基台 15 a の一方の平坦な表面 15 a a 上に、撮像体 15 b を有する。図示しない X 線照射部 14 は、基台 15 a の表面 15 a a と反対側の表面に対向する位置、つまり表面 15 a a の背面側に配置されている。基台 15 a は、X 線照射部 14 からの X 線ビーム 3 を通過させる貫通孔 15 a b を、撮像体 15 b が配置される領域の中央に有する。貫通孔 15 a b は、貫通孔 15 a b を通過する X 線ビーム 3 と干渉しないような直径で形成される。基台 15 a の表面 15 a a は、X 線照射部 14 からの X 線ビーム 3 と略垂直に交差する。

【0022】

撮像体 15 b は、貫通孔 15 a b を囲むように配置されている。さらに、X 線照射部 14 からの X 線ビーム 3 が形成する回折ビーム 4 によって形成される回折環 5 が、基台 15 a の表面 15 a a 上に形成されるときに、回折環 5 の形成領域全体にわたるように、撮像体 15 b は配置されている。撮像体 15 b は、回折環 5 の形成領域全体を埋めるように配置されてもよく、回折環 5 の形成領域全体を埋めなくてもよい。例えば、複数の撮像体 15 b が、回折環 5 の形成領域全体にわたるように、貫通孔 15 a b から径方向外側に向かって放射状に延在してもよい。又は、複数の環状の撮像体 15 b が、回折環 5 の形成領域全体にわたるように、貫通孔 15 a b から径方向外側に向かって同心円状に配置されてもよい。

【0023】

撮像部 15 は、基台 15 a の表面 15 a a を測定対象物 1 に対向させるように配置される。ここで、測定対象物 1 は、例えば多結晶性材料等の結晶性の材料から形成される。X 線照射部 14 から出射される直線状の X 線ビーム 3 は、基台 15 a の貫通孔 15 a b を通過した後、測定対象物 1 の表面 1 a 上の特定部分である測定点 2 に到達するように、X 線照射部 14 及び撮像部 15 は配置される。これにより、X 線照射部 14 から出射される X 線ビーム 3 は、測定点 2 において、測定対象物 1 を形成する材料の結晶粒による回折を伴って反射して、多数の回折ビーム 4 を形成する。多数の回折ビーム 4 は、測定点 2 から円錐状に延び、基台 15 a の表面 15 a a 上、つまり撮像体 15 b 上で、回折環 5 を形成する。よって、撮像体 15 b は、回折環 5 の全体を撮像することができる。

【0024】

また、測定点 2 において測定対象物 1 に応力が存在する場合、測定点 2 での測定対象物 1 の結晶構造にひずみが生じている。このような測定点 2 に入射した X 線ビーム 3 から形成される回折環 5 は、測定点 2 での結晶構造にひずみがない場合の回折環に対して、ひずみを有する。例えば、図 4 に示すように、測定点 2 での結晶構造にひずみがない場合の回折環 6 は真円である。測定点 2 での結晶構造にひずみを含む場合の回折環 5 は、ひずみに応じて、真円の回折環 6 つまり真円回折環 6 から位置がずれる、及び / 又は真円回折環 6 から変形する等のひずみを含む。ここで、本実施の形態で記載する回折環 5 の「ひずみ」は、回折環 5 における真円回折環 6 からの位置ずれ、及び / 又は真円回折環 6 からの変形を含み得る。なお、図 4 は、測定点 2 において測定対象物 1 にひずみが生じている場合の回折環 5 の一例と、測定点 2 において測定対象物 1 が無応力で無ひずみである場合の真円回折環 6 とを比較して示す図である。

【0025】

次に、応力測定装置 10 を用いた測定対象物 1 の応力測定動作を説明する。図 1、図 3 及び図 5 を参照すると、応力測定装置 10 は、測定対象物 1 の測定点 2 へ撮像部 15 をセットする。具体的には、応力測定装置 10 は、X 線照射部 14 及び撮像部 15 を共に移動し、測定対象物 1 の表面 1 a 上の測定点 2 及び表面 1 a に対して、撮像部 15 の基台 15 a 及び表面 15 a a が予め設定された位置及び向きとなるように、基台 15 a を配置する（ステップ S 1）。このとき、X 線照射部 14 から出射される X 線ビームが 3 測定点 2 に到達するように、X 線照射部 14 は配置される。基台 15 a の配置完了後における測定点 2 及び表面 1 a に対する撮像部 15 の基台 15 a 及び表面 15 a a の位置及び向きは、応力測定装置 10 の制御部 13 によって、記憶部 19 に記憶されてもよい。なお、図 5 は、実施の形態に係る応力測定装置 10 による測定対象物 1 の応力測定動作の流れを示すフローチャートである。

10

【0026】

次いで、応力測定装置 10 の制御部 13 は、X 線照射部 14 に X 線ビーム 3 を出射させる（ステップ S 2）。出射された X 線ビーム 3 は、撮像部 15 の基台 15 a の貫通孔 15 a b を通過した後、測定点 2 に到達し、測定点 2 において回折を伴って反射し、測定点 2 から円錐状に広がる回折ビーム 4 を形成する。回折ビーム 4 は、基台 15 a の表面 15 a a 上に到達し、表面 15 a a 上で回折環 5 を形成する。回折環 5 は、貫通孔 15 a b を略中心とする。

【0027】

さらに、制御部 13 は、撮像部 15 の撮像体 15 b に、回折ビーム 4 が撮像体 15 b 上に形成する回折環 5 を撮像させ、撮像した画像データを画像処理部 16 に送らせる（ステップ S 3）。制御部 13 は、画像処理部 16 に、受け取った画像データから回折環 5 全体を含む 1 つの画像データを生成させ、生成した画像データをデータ処理部 17 に送らせる及び / 又は記憶部 19 に記憶させる。（ステップ S 4）。制御部 13 は、データ処理部 17 に、画像処理部 16 又は記憶部 19 からの回折環 5 の画像データと、ステップ S 1 での撮像部 15 の基台 15 a の配置完了後における測定対象物 1 の表面 1 a 及び測定点 2 に対する基台 15 a 及び表面 15 a a の位置及び向きとを取得させ、回折環 5 の画像データを解析させる（ステップ S 5）。この解析では、データ処理部 17 は、測定点 2 での測定対象物 1 の結晶構造にひずみがない場合に回折ビーム 4 が表面 15 a a 上に形成し得る真円回折環 6（図 4 参照）の像に対する、回折環 5 の像のひずみ等に基づき、測定点 2 において測定対象物 1 に存在する応力を求める。

20

30

【0028】

回折環 5 の画像データの解析後、制御部 13 は、出力部 18 に、測定点 2 において測定対象物 1 に存在する応力を含む解析結果を表示させ、解析結果を示すデータを記憶部 19 に記憶させる（ステップ S 6）。

【0029】

また、図 6 に示すように、ステップ S 5 での解析結果の精度を向上するために、複数の異なる位置で X 線照射部 14 から出射される X 線ビーム 3 によって形成される複数の回折環 5 が、データ処理部 17 での解析に用いられることが、望ましい。なお、図 6 は、3 つの異なる位置で X 線照射部 14 から出射される X 線ビーム 3 が基台 15 a に 3 つの回折環 5 を形成する状態を示す概略図である。さらに解析結果の精度を向上するために、測定点 2 から撮像部 15 までの距離、具体的には測定点 2 から基台 15 a の表面 15 a a までの距離 D が、複数の異なる基台 15 a の位置の間で同一であることが、望ましい。これにより、複数の回折環 5 が均一化される。さらに解析結果の精度を向上するために、複数の異なる基台 15 a の位置は、測定点 2 を中心として等間隔に配置されることが、望ましい。具体的には、複数の異なる基台 15 a の位置で X 線照射部 14 から測定点 2 にまで延びる複数の X 線ビーム 3 が、測定点 2 を起点とする X 線ビーム 3 の方向角 θ を等間隔に割り振るつまり均等にするように、配置されることが、望ましい。これにより、複数の回折環 5 が均一化される。なお、X 線ビーム 3 の方向角 θ は、測定点 2 を中心とし且つ測定対象物 1 の表面 1 a に沿う方向の方向角である。上述のように複数の X 線ビーム 3 の対称性を高

40

50

めることによって、解析結果の精度が向上する。

【 0 0 3 0 】

さらに、ステップ S 5 におけるデータ処理部 17 の解析動作の詳細を説明する。まず、図 5 のステップ S 1 ~ S 4 を繰り返すことによって、応力測定装置 10 は、複数 k 箇所の異なる位置で X 線照射部 14 から出射される X 線ビーム 3 によって形成される k 個の回折環 5 の画像データを生成する。なお、図 6 に示す例では、k = 3 である。

【 0 0 3 1 】

図 3、図 4 及び図 7 を参照すると、データ処理部 17 は、各回折環 5 について、回折環 5 上に、回折環 5 と真円回折環 6 とのひずみを測定する点であるひずみ抽出点 P_i を設定する（ステップ S 11）。ここで、図 7 は、実施の形態に係る応力測定装置 10 のデータ処理部 17 の解析動作の流れを示すフローチャートである。また、i は、1 ~ k の整数値であり、複数 k 個の回折環 5 のうちから 1 つを特定する要素である。各回折環 5 のひずみ抽出点 P_i の位置は、互いに相関する関係を有しても有さなくてもよい。データ処理部 17 は、各回折環 5 の各ひずみ抽出点 P_i について単位回折ベクトル n_i を、算出する（ステップ S 12）。但し、単位回折ベクトル n_i は、i 番目の回折環 5 のひずみ抽出点 P_i に関する単位回折ベクトルである。

10

【 0 0 3 2 】

単位回折ベクトル n_i は、測定点 2 を起点とする単位ベクトルであり、ひずみ抽出点 P_i 及び測定点 2 を結ぶ直線状の回折ビーム 4 と基台 15 a の貫通孔 15 a b 及び測定点 2 を結ぶ直線状の X 線ビーム 3 とが測定点 2 で形成する挟角の二等分線を形成する。つまり、単位回折ベクトル n_i は、回折ビーム 4 と X 線ビーム 3 との中間及び測定点 2 を通る線分を形成する。単位回折ベクトル n_i と X 線ビーム 3 とがなす角 θ_1 は、単位回折ベクトル n_i と回折ビーム 4 とがなす角 θ_2 と、同一の角度を有する。単位回折ベクトル n_i は、回折環 5 が形成される基台 15 a に向かって延びる。本実施の形態では、回折ベクトルは、1 の長さを有する単位ベクトルであるが、1 以外の長さを有するベクトルであってもよい。

20

【 0 0 3 3 】

単位回折ベクトル n_i は、ひずみ抽出点 P_i の位置、測定点 2 の位置、並びに、測定対象物 1 の表面 1 a 及び測定点 2 に対する撮像部 15 の基台 15 a 及び表面 15 a a の位置及び向きに基づき、算出され得る。単位回折ベクトル n_i は、下記の式 1 のように表わされる。なお、式 1 の要素 n_{i1} 、 n_{i2} 及び n_{i3} は、単位回折ベクトル n_i の X 座標成分、Y 座標成分及び Z 座標成分である。X 軸及び Y 軸は、測定点 2 を通り且つ測定対象物 1 の表面 1 a に沿う平面上に位置すると共に互いに直交し、Z 軸は、上記平面の法線であり X 軸及び Y 軸と直交する。

30

【 数 1 】

$$n_i \equiv (n_{i1}, n_{i2}, n_{i3})^T$$

[式 1]

【 0 0 3 4 】

ここで、真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみから測定点 2 での測定対象物 1 の応力を算出する方法について、本願発明者が見出した知見を説明する。図 4 を参照すると、i 番目の回折環 5 について、ひずみ抽出点 P_i での真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみ量を示すひずみ ϵ_{n_i} は、単位回折ベクトル n_i の成分を使用して下記の式 2 の基礎方程式で表わすことができることを、本願発明者が見出した。なお、ひずみ ϵ_{n_i} は、回折環 5 が存在する基台 15 a の表面 15 a a に沿う方向のひずみ量を示し、例えば、基台 15 a の貫通孔 15 a b の中心位置から半径方向へのひずみ量を示す。式 2 の要素 ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 及び ϵ_{33} はそれぞれ、ひずみ ϵ_{n_i} における X 軸、Y 軸及び Z 軸方向の垂直ひずみ成分を示す。要素 ϵ_{12} 、 ϵ_{23} 及び ϵ_{13} はそれぞれ、ひずみ ϵ_{n_i} における X Y 平面、Y Z 平面及び Z X 平面に沿う方向のせん断ひずみ成分を示す。

40

【数 2】

$$\varepsilon_{n_i} = n_{i1}^2 \varepsilon_{11} + n_{i2}^2 \varepsilon_{22} + n_{i3}^2 \varepsilon_{33} + 2n_{i1}n_{i2} \varepsilon_{12} + 2n_{i1}n_{i3} \varepsilon_{13} + 2n_{i2}n_{i3} \varepsilon_{23}$$

[式 2]

【 0 0 3 5 】

また、ひずみ n_i と測定点 2 での測定対象物 1 の応力 σ との関係が、測定対象物 1 の X 線のヤング率 E 及びポアソン比 ν を用いて下記の式 3 で表わされる。なお、応力 σ の要素 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} はそれぞれ、応力 σ の X 軸、Y 軸及び Z 軸方向の垂直応力成分を示し、 σ_{12} 、 σ_{23} 、 σ_{13} はそれぞれ、応力 σ の XY 平面、YZ 平面及び XZ 平面に沿う方向のせん断応力成分を示す。

10

【数 3】

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \equiv S \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix}$$

[式 3]

【 0 0 3 6 】

20

また、 $i = 1 \sim k$ の全ての回折環 5 におけるひずみ n_i を成分として含むひずみ ε は、 $(n_{11}, n_{12}, n_{13}, \dots, n_{i1}, \dots, n_{k-1,1}, n_{k-1,2}, \dots, n_{k-1,3}, \dots, n_{k-1,k-1}, n_{k-1,k})^T$ で表わされる。これにより、ひずみ ε は、式 2 におけるひずみ成分の係数によって構成される $k \times 6$ 行列である行列 F を用いて、下記の式 4 で表わされる。

【数 4】

$$\varepsilon \equiv \begin{pmatrix} n_{11}^2 & n_{12}^2 & n_{13}^2 & 2n_{11}n_{12} & 2n_{11}n_{13} & 2n_{12}n_{13} \\ n_{21}^2 & n_{22}^2 & n_{23}^2 & 2n_{21}n_{22} & 2n_{21}n_{23} & 2n_{22}n_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{k1}^2 & n_{k2}^2 & n_{k3}^2 & 2n_{k1}n_{k2} & 2n_{k1}n_{k3} & 2n_{k2}n_{k3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{pmatrix}$$

30

[式 4]

【 0 0 3 7 】

なお、式 4 における $k \times 6$ の行列 F は、下記の式 5 のように表わされる。

【数 5】

$$F \equiv \begin{pmatrix} n_{11}^2 & n_{12}^2 & n_{13}^2 & 2n_{11}n_{12} & 2n_{11}n_{13} & 2n_{12}n_{13} \\ n_{21}^2 & n_{22}^2 & n_{23}^2 & 2n_{21}n_{22} & 2n_{21}n_{23} & 2n_{22}n_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{k1}^2 & n_{k2}^2 & n_{k3}^2 & 2n_{k1}n_{k2} & 2n_{k1}n_{k3} & 2n_{k2}n_{k3} \end{pmatrix}$$

40

[式 5]

【 0 0 3 8 】

さらに、式 4 は、式 3 を用いて下記の式 6 のようにも表わされる。

【数 6】

$$\boldsymbol{\varepsilon} \equiv \begin{pmatrix} \varepsilon_{n_1} \\ \varepsilon_{n_2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{n_k} \end{pmatrix} = \mathbf{F} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{pmatrix} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{S} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix}$$

[式 6] 10

【0039】

式 6 は、応力値の最小二乗解 $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23})^T$ を記載する方程式である。そして、式 6 の解は、 $\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{S}$ で求められる行列 \mathbf{M} のムーア-ペンローズ一般逆行列 \mathbf{M}^+ を用いて、下記の式 7 のように求められる。

【数 7】

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{M}^{\dagger} \boldsymbol{\varepsilon}$$

[式 7]

さらに、逆行列 \mathbf{M}^+ の i 行 j 列目の要素を m^+_{ij} と表わすと、応力 σ_{ij} の各要素は、 m^+_{ij} と ε_{ni} との線形結合で表わされる。例えば、応力 σ_{11} の要素 σ_{11} は、下記の式 8 のように表わされる。

20

【数 8】

$$\sigma_{11} = \sum_{i=1}^k m^+_{1i} \varepsilon_{n_i}$$

[式 8]

【0040】

よって、本願発明者は、複数 k 箇所の異なる位置での X 線照射部 14 の照射により得られる k 個の回折環 5 に対応する k 個の単位回折ベクトル \mathbf{n}_i を用いて逆行列 \mathbf{M}^+ を算出し、さらに、算出した逆行列 \mathbf{M}^+ と、 k 個の回折環 5 それぞれの真円回折環 6 に対するひずみ ε_{ni} とを用いて、応力 σ_{ij} の各成分を算出できることを見出した。

30

【0041】

また、本願発明者は、式 8 に示されるような関係を用いることによって、応力 σ_{ij} の各成分に生じる得る誤差を推定算出ができることも見出した。回折環 5 上に設定するひずみ抽出点 P_i の位置に応じて、ひずみ抽出点 P_i における真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみ量が変わる場合がある。これにより、単位回折ベクトル \mathbf{n}_i も変化するため、算出される応力も、実際に存在する応力に対して誤差を有する可能性がある。このような応力 σ_{ij} の各成分に生じる得る誤差について、例えば、応力 σ_{11} の成分 σ_{11} での誤差は、下記の式 9 のように表わされる。なお、下記の式 9 では、ひずみ ε_{ni} の測定誤差を一律であるとしている。式 9 に示されるように、成分 σ_{11} の推定誤差 $\Delta\sigma_{11}$ は、逆行列 \mathbf{M}^+ の要素の値によって定まり、逆行列 \mathbf{M}^+ の要素の値は、単位回折ベクトル \mathbf{n}_i の成分の値によって定まる。よって、回折環 5 上で選定されるひずみ抽出点 P_i の位置に応じて、推定誤差 $\Delta\sigma_{11}$ が変動する。応力 σ_{ij} における成分 σ_{11} 以外の成分の誤差も同様である。

40

【数 9】

$$\delta\sigma_{11} = \delta\varepsilon \sqrt{\sum_{i=1}^k (m_{1i}^\dagger)^2}$$

[式 9]

【0042】

図 3、図 4 及び図 7 を参照してデータ処理部 17 の解析動作を再び説明すると、データ処理部 17 は、ステップ S 12 に続くステップ S 13 において、k 個の回折環 5 それぞれに対応する単位回折ベクトル n_i を用いて、式 2 に示されるひずみ n_i の基礎方程式に基づき、式 5 の $k \times 6$ の行列 F を算出する。次いで、データ処理部 17 は、式 3 に示される関係に基づき、測定対象物 1 の X 線のヤング率 E 及びポアソン比 ν を用いて応力成分とひずみ成分とを関係付ける行列 S を取得する（ステップ S 14）。なお、データ処理部 17 は、記憶部 19 に予め記憶されている行列 S を取得してもよく、応力測定装置 10 の図示しない入力部を介して与えられる測定対象物 1 の X 線のヤング率 E 及びポアソン比 ν を用いて行列 S を算出してもよい。

【0043】

その後、データ処理部 17 は、式 6 に示される関係に基づき、行列 F 及び行列 S の積を算出することによって行列 M を算出する（ステップ S 15）。さらに、データ処理部 17 は、行列 M のムーア - ペンローズ一般逆行列 M^+ を算出する（ステップ S 16）。次いで、データ処理部 17 は、k 個の回折環 5 それぞれについて、ひずみ抽出点 P_i における真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみ量を算出する（ステップ S 17）。ひずみ量は、例えば、基台 15 a の貫通孔 15 a b の中心位置からの放射方向である半径方向でのずれ量としてもよい。ひずみ量の算出は、ステップ S 11 の後のいずれの時期に実施されてもよい。

【0044】

データ処理部 17 は、ステップ S 16 で算出した逆行列 M^+ と、ステップ S 17 で算出した回折環 5 のひずみとを使用して、式 7 及び式 8 に示される関係に基づき、応力 σ の各成分を算出する（ステップ S 18）。具体的には、応力 σ の X 軸、Y 軸及び Z 軸方向それぞれの垂直応力成分 σ_{11} 、 σ_{22} 及び σ_{33} 並びに XY 平面、YZ 平面及び XZ 平面それぞれに沿う方向のせん断応力 σ_{12} 、 σ_{23} 及び σ_{13} が、算出される。つまり、応力 σ の 3 軸応力成分が、算出される。これにより、図 5 に示されるステップ S 5 におけるデータ処理部 17 の解析動作が、完了する。

【0045】

上述したデータ処理部 17 の解析動作では、測定対象物 1 の測定点 2 の位置、撮像部 15 の基台 15 a の表面 15 a a の位置等を示すために設定された座標系は、図 7 に示されるステップ S 11 ~ S 18 にわたる応力の算出過程の終始にわたって、変換を受けることなく、そのまま使用される。このような座標系は、例えば、測定対象物 1 と撮像部 15 との位置関係を示すのに適した座標系とすることできるため、座標系の設定が容易になる。例えば、本実施の形態では、X 軸及び Y 軸は、測定点 2 を通り且つ測定対象物 1 の表面 1 a に沿う平面上に位置し、Z 軸は、上記平面の法線である。

【0046】

上述したように、実施の形態に係る応力測定装置 10 は、測定対象物 1 に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つ X 線ビーム 3 を測定対象物 1 の特定部分である測定点 2 に照射する X 線照射部 14 と、測定点 2 で反射する回折ビーム 4 を撮像し且つ回折ビーム 4 により形成される回折環 5 の撮像画像を生成する撮像部 15 と、撮像画像から得られる測定結果を、測定点 2 での X 線ビーム 3 の回折を反映する回折ベクトルを用いて変換することにより、測定点 2 における測定対象物 1 の応力を求めるデータ処理部 17 とを備える。データ処理部 17 は、測定点 2 に入射する X 線ビーム 3 と回折ビーム 4 とか

ら回折ベクトルを決定する。

【 0 0 4 7 】

上述の構成において、データ処理部 17 は、回折環 5 の撮像画像から得られる測定結果を、X 線ビーム 3 と回折ビーム 4 とから決定する回折ベクトルを用いて変換することにより、測定点 2 における測定対象物 1 の応力を求める。このような処理により応力を求めるデータ処理部 17 は、測定結果に設定された座標系を変換等の変更をすることなく、回折ベクトルを決定し、回折ベクトルを用いた測定結果の変換を実施することができる。さらに、回折ベクトルを用いた測定結果の変換により求められる応力の算出は、簡易である。

【 0 0 4 8 】

実施の形態に係る応力測定装置 10 において、データ処理部 17 は、回折ベクトルを用いた測定結果の変換では、異なる方向からの 2 回以上の X 線ビーム 3 の照射で得られる 2 つ以上の回折環 5 のひずみの測定結果と、2 つ以上の回折環 5 それぞれを形成する回折ビーム 4 に基づく 2 つ以上の回折ベクトルとを用いる。上述の構成において、データ処理部 17 は、複数の回折環 5 それぞれに対応する複数の回折ベクトルを、回折ベクトルを用いた測定結果の変換に用いる。回折環 5 は、測定点 2 への X 線ビーム 3 の入射方向によっては、連続した環を形成する場合もあれば、一部が欠落した不連続な環を形成する場合もある。このため、同一の測定点 2 への複数回の X 線ビーム 3 の照射で得られる複数の回折環 5 を使用することによって、回折環 5 同士が、互いの欠落した環の一部を補うようにすることが、可能になる。特に、測定点 2 への複数回の X 線ビーム 3 の照射方向を互いに異ならせることは、欠落した環の一部の補充に効果的である。さらに、複数の回折環 5 のひずみの測定結果を用いることによって、1 つの回折環 5 のひずみの測定結果が有する特有の特徴による影響が低減されるため、測定結果の誤差低減が可能なる。

【 0 0 4 9 】

さらに、実施の形態に係る応力測定装置 10 は、X 線照射部 14 によって、測定点 2 を中心とする均等な方向角で 3 回以上の X 線ビーム 3 を照射する。上述の構成において、X 線ビーム 3 の照射によって形成される複数の回折環 5 は、測定点 2 の全周囲にわたる入射方向からの X 線ビーム 3 の照射による回折環の特徴を含み得る。このため、回折環 5 が欠落部分を含む不連続な環を形成する場合でも、回折環 5 同士が、互いの欠落部分を補うことができる。

【 0 0 5 0 】

実施の形態に係る応力測定装置 10 において、回折ベクトルは、測定点 2 に入射する X 線ビーム 3 と回折ビーム 4 との中間及び測定点 2 を通る直線を形成するベクトルである。上述の構成において、上記回折ベクトルは、測定点 2 における測定対象物 1 の結晶粒の結晶格子面、つまり回折格子面の法線に平行となる。よって、回折ベクトルは、測定点 2 における X 線ビーム 3 の回折、つまり回折現象を適切に反映したベクトルである。

【 0 0 5 1 】

実施の形態に係る応力測定装置 10 において、データ処理部 17 は、回折ベクトルを用いた測定結果の変換では、回折ベクトル n_i の成分 (n_1, n_2, n_3) により形成される成分要素 n_1^2 、 n_2^2 、 n_3^2 、 $2 \times n_1 \times n_2$ 、 $2 \times n_2 \times n_3$ 及び $2 \times n_3 \times n_1$ を用いて、回折環 5 のひずみの測定結果と、測定点 2 における測定対象物 1 の応力とを関係付ける。上述の構成において、回折ベクトル n_i の成分による成分要素 n_1^2 、 n_2^2 、 n_3^2 、 $2 \times n_1 \times n_2$ 、 $2 \times n_2 \times n_3$ 及び $2 \times n_3 \times n_1$ は、上記の式 2 と同様の下記の式 10 に示すような回折環 5 のひずみに関する基礎方程式における、ひずみ成分の係数に対応する。よって、回折ベクトル及び基礎方程式を利用して、回折環 5 から得られるひずみの測定結果から、測定点 2 における測定対象物 1 の応力を求めることができる。

【 数 1 0 】

$$\varepsilon = n_1^2 \varepsilon_{11} + n_2^2 \varepsilon_{22} + n_3^2 \varepsilon_{33} + 2n_1 n_2 \varepsilon_{12} + 2n_3 n_1 \varepsilon_{13} + 2n_2 n_3 \varepsilon_{23}$$

【 0 0 5 2 】

実施の形態に係る応力測定装置 10 において、データ処理部 17 は、回折ベクトルを用いた測定結果の変換では、2 つ以上の回折ベクトルそれぞれの成分要素を、各要素として含む行列の一般逆行列を使用する。上述の構成において、2 つ以上の回折ベクトルそれぞれの成分要素を各要素として含む行列が算出され、さらに、この行列の一般逆行列が算出される。そして、データ処理部 17 は、一般逆行列を使用して測定結果を変換することによって、測定点 2 における測定対象物 1 の応力を求めることができる。よって、応力の算出が簡易である。

【 0 0 5 3 】

また、実施の形態に係る応力測定方法では、測定対象物 1 に照射されることによって回折を伴って反射する性質を持つ X 線ビーム 3 を測定対象物 1 の測定点 2 に照射し、測定点 2 で反射する回折ビーム 4 により形成される回折環 5 のひずみを測定し、測定点 2 に入射する X 線ビーム 3 と回折ビーム 4 とから、測定点 2 での X 線ビーム 3 の回折を反映する回折ベクトルを決定し、上記測定の測定結果を、回折ベクトルを用いて変換することにより、測定点 2 における測定対象物 1 の応力を求める。

10

【 0 0 5 4 】

なお、上述の構成の包括的又は具体的な態様は、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム又はコンピュータ読み取り可能な CD - ROM などの非一時的な記録媒体で実現されてもよく、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム及び記録媒体の任意な組み合わせで実現されてもよい。

20

例えば、上記応力測定方法の各処理又は動作を実施させる各構成要素は、専用のハードウェアで構成されるか、各構成要素に適したソフトウェアプログラムを実行することによって実現されてもよい。各構成要素は、CPU 又はプロセッサなどのプログラム実行器が、ハードディスク又は半導体メモリなどの記録媒体に記録されたソフトウェアプログラムを読み出して実行することによって実現されてもよい。ソフトウェアプログラムは、コンピュータに、上述の処理又は動作を実行させる。

上記応力測定方法の各処理又は動作を実施させる各構成要素は、回路でもよい。複数の構成要素が、全体として 1 つの回路を構成してもよく、それぞれ別々の回路を構成してもよい。また、回路は、それぞれ、汎用的な回路でもよいし、専用の回路でもよい。

30

【 0 0 5 5 】

[変形例 1]

実施の形態の変形例 1 について説明する。本変形例では、応力測定装置 10 のデータ処理部 17 が、式 9 に示されるような推定誤差の算出方法を用いて、算出する応力の最適化を実施する。以下に、本変形例について、データ処理部 17 の解析動作における実施の形態と異なる点を中心に、図 8 を主に参照して説明する。なお、図 8 は、変形例 1 に係る応力測定装置のデータ処理部 17 の解析動作の流れを示すフローチャートである。

【 0 0 5 6 】

図 8 を参照すると、データ処理部 17 は、図 5 に示されるステップ S 1 ~ S 4 によって生成された k 個の回折環 5 の画像データを取得し、各回折環 5 上に予め設定された複数 K 個のひずみ抽出点 P_{ij} を設定する (ステップ S 2 1)。ここで、点 P_{ij} の i は、1 ~ k の整数値であり、k 個の回折環 5 のうちから 1 つを特定する要素である。点 P_{ij} の j は、1 ~ K の整数値であり、回折環 5 に設定される K 個のひずみ抽出点のうちから 1 つを特定する要素である。各回折環 5 に配置される複数のひずみ抽出点 P_{ij} は、回折環 5 の周方向に沿って、等間隔又は等中心角を形成するように均等に配置されてもよく、不均等に配置されてもよい。

40

【 0 0 5 7 】

さらに、データ処理部 17 は、各回折環 5 上で、複数のひずみ抽出点 P_{ij} から 1 つのひずみ抽出点を選定する (ステップ S 2 2)。次いで、データ処理部 17 は、ステップ S 1 2 において、k 個の回折環 5 に対して選定されたひずみ抽出点についての単位回折ベクトル n_i を算出し、さらにステップ S 1 3 ~ S 1 6 を実施して、一般逆行列 M^+ を算出す

50

る。ステップ S 1 2 ~ S 1 6 におけるデータ処理部 1 7 の動作は、図 7 に示される実施の形態におけるステップ S 1 2 ~ S 1 6 での動作と同様である。

【 0 0 5 8 】

さらに、データ処理部 1 7 は、ステップ S 1 6 の完了後、算出した逆行列 M^+ と、式 9 に示されるような推定誤差の算出方法とを用いて、応力 σ の成分の推定誤差を算出する (ステップ S 2 3)。このとき、成分 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 σ_{12} 、 σ_{23} 及び σ_{13} の全ての推定誤差が算出されてもよく、一部が算出されてもよい。式 9 に示されるように、応力 σ の各成分の推定誤差は、逆行列 M^+ の要素の数値に応じて変動する。逆行列 M^+ の要素の数値は、単位回折ベクトル n_i の成分の値によって定まる。

【 0 0 5 9 】

次いで、データ処理部 1 7 は、ステップ S 2 1 で設定された k 個の回折環のひずみ抽出点の組み合わせに、逆行列 M^+ の算出及び応力 σ の成分の推定誤差の算出に使用されていないものがある場合 (ステップ S 2 4 で y_{es})、ステップ S 2 2 に戻る。データ処理部 1 7 は、k 個の回折環 5 のひずみ抽出点 P_{ij} のうちの少なくとも 1 つの位置を、ステップ S 2 1 で設定した他のひずみ抽出点に変更し、それにより、ひずみ抽出点を再選定する。この場合、k 個の回折環 5 のうちの 1 つの回折環 5 のひずみ抽出点 P_{ij} の位置が変更されてもよく、k 個の回折環 5 のうちの 2 つ以上の回折環 5 のひずみ抽出点 P_{ij} の位置が変更されてもよい。さらに、データ処理部 1 7 は、再選定したひずみ抽出点 P_{ij} を用いて、ステップ S 1 2 ~ S 1 6 及び S 2 3 を実施して、応力 σ の成分の推定誤差を算出する。

【 0 0 6 0 】

上述のように、ステップ S 2 2、S 1 2 ~ S 1 6 及び S 2 3 を繰り返し実施することによって、ステップ S 2 1 で設定された k 個の回折環のひずみ抽出点の組み合わせの全てが、逆行列 M^+ の算出及び応力 σ の成分の推定誤差の算出に使用されると (ステップ S 2 4 で n)、データ処理部 1 7 は、ステップ S 2 5 に進み、算出した応力 σ の成分の推定誤差の中から最小の推定誤差を選出する。この場合、応力 σ の成分 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 σ_{12} 、 σ_{23} 及び σ_{13} 全ての推定誤差の中から最小推定誤差が選出されてもよく、同一の成分の推定誤差の中から最小推定誤差が選出されてもよい。

【 0 0 6 1 】

その後、データ処理部 1 7 は、最小推定誤差の算出に使用された、つまり最小推定誤差に対応する逆行列 M^+ と、この逆行列 M^+ の算出に使用された、つまり逆行列 M^+ に対応する単位回折ベクトル n_i とを特定する (ステップ S 2 6)。さらに、データ処理部 1 7 は、特定した単位回折ベクトル n_i に対応する k 個の回折環 5 上のひずみ抽出点 P_{ij} を特定し、ひずみ抽出点 P_{ij} における真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみを求める (ステップ S 1 7)。データ処理部 1 7 は、ステップ S 1 7 に続くステップ S 1 8 で、回折環 5 のひずみと逆行列 M^+ とを用いて、応力 σ の各成分を算出する。これにより、推定誤差を最小化することによって最適化された応力 σ が得られる。なお、ステップ S 1 7 及び S 1 8 におけるデータ処理部 1 7 の動作は、図 7 に示される実施の形態におけるステップ S 1 7 及び S 1 8 での動作と同様である。

なお、本変形例のステップ S 2 4 では、k 個の回折環のひずみ抽出点の全ての組み合わせを、推定誤差の算出に使用されているか否かを判定対象としていたが、組み合わせの一部のみを判定対象としてもよい。

【 0 0 6 2 】

上述したように、変形例 1 に係る応力測定装置 1 0 において、データ処理部 1 7 は、回折ベクトルの成分 (n_1, n_2, n_3) により形成される成分要素 n_1^2 、 n_2^2 、 n_3^2 、 $2 \times n_1 \times n_2$ 、 $2 \times n_2 \times n_3$ 及び $2 \times n_3 \times n_1$ を用いて、測定対象物 1 の求めるべき応力の推定誤差を算出し、推定誤差を低減する回折ベクトルを、測定対象物 1 の応力を求める際に採用する。上述の構成において、回折環 5 上で選択されるひずみの測定位置であるひずみ抽出点の位置に応じて、ひずみ抽出点での回折環 5 のひずみが異なる場合がある。これにより、ひずみ抽出点の位置に応じて、回折ベクトルも変化し、回折ベクトル

10

20

30

40

50

ルから求められる測定対象物 1 の応力も変化する、つまり、求められる応力が実際に存在する応力に対して有する誤差が変化する。この誤差を低減するように回折ベクトルを選定する、つまりひずみ抽出点の位置を選定することによって、求められる応力の精度の向上が可能となる。

【 0 0 6 3 】

[変形例 2]

実施の形態の変形例 2 について説明する。本変形例では、応力測定装置 10 のデータ処理部 17 が、各回折環 5 上に複数のひずみ抽出点を設定し、応力 を算出する。以下に、本変形例について、データ処理部 17 の解析動作における実施の形態及び変形例 1 と異なる点を中心に、図 9 を主に参照して説明する。なお、図 9 は、変形例 2 に係る応力測定装置のデータ処理部 17 の解析動作の流れを示すフローチャートである。

10

【 0 0 6 4 】

図 9 を参照すると、データ処理部 17 は、図 5 に示されるステップ S 1 ~ S 4 によって生成された k 個の回折環 5 の画像データを取得し、各回折環 5 上に予め設定された複数 K 個のひずみ抽出点 P_{i j} を設定する (ステップ S 3 1)。ここで、点 P_{i j} の i は、1 ~ k の整数値であり、k 個の回折環 5 のうちから 1 つを特定する要素である。点 P_{i j} の j は、1 ~ K の整数値であり、回折環 5 に設定される K 個のひずみ抽出点のうちから 1 つを特定する要素である。各回折環 5 に配置される複数のひずみ抽出点 P_{i j} は、回折環 5 の周方向に沿って、等間隔又は等中心角を形成するように均等に配置されてもよく、不均等に配置されてもよい。しかしながら、複数のひずみ抽出点 P_{i j} が均等に配置されること

20

【 0 0 6 5 】

さらに、データ処理部 17 は、各回折環 5 の各ひずみ抽出点 P_{i j} について単位回折ベクトル n_{i j} を、算出する (ステップ S 1 2)。単位回折ベクトル n_{i j} は、i 番目の回折環 5 の j 番目のひずみ抽出点 P_{i j} に関する単位回折ベクトルである。

【 0 0 6 6 】

次いで、データ処理部 17 は、全ての単位回折ベクトル n_{i j} を用いて、下記の式 1 1 に示される (k x K) x 6 の行列 F を算出する (ステップ S 1 3)。

30

【 数 1 1 】

$$F \equiv \begin{pmatrix} n_{111}^2 & n_{112}^2 & n_{113}^2 & 2n_{111}n_{112} & 2n_{111}n_{113} & 2n_{112}n_{113} \\ n_{211}^2 & n_{212}^2 & n_{213}^2 & 2n_{211}n_{212} & 2n_{211}n_{213} & 2n_{212}n_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{k11}^2 & n_{k12}^2 & n_{k13}^2 & 2n_{k11}n_{k12} & 2n_{k11}n_{k13} & 2n_{k12}n_{k13} \\ n_{121}^2 & n_{122}^2 & n_{123}^2 & 2n_{121}n_{122} & 2n_{121}n_{123} & 2n_{122}n_{123} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{k21}^2 & n_{k22}^2 & n_{k23}^2 & 2n_{k21}n_{k22} & 2n_{k21}n_{k23} & 2n_{k22}n_{k23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{ij1}^2 & n_{ij2}^2 & n_{ij3}^2 & 2n_{ij1}n_{ij2} & 2n_{ij1}n_{ij3} & 2n_{ij2}n_{ij3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{kK1}^2 & n_{kK2}^2 & n_{kK3}^2 & 2n_{kK1}n_{kK2} & 2n_{kK1}n_{kK3} & 2n_{kK2}n_{kK3} \end{pmatrix}$$

40

[式 1 1]

【 0 0 6 7 】

その後、データ処理部 17 は、図 7 に示される実施の形態のステップ S 1 4 ~ S 1 8 と同様のステップ S 1 4 ~ S 1 8 を実施し、応力 の各成分を算出する。なお、ステップ S 1 7 では、k 個の回折環 5 それぞれについて、ひずみ抽出点 P_{i j} における真円回折環 6

50

に対する回折環 5 のひずみが、算出される。

【0068】

上述したように、変形例 2 に係る応力測定装置 10 において、データ処理部 17 は、回折環 5 上の 2 つ以上の位置であるひずみ抽出点でそれぞれ回折環 5 を形成する 2 つ以上の回折ビーム 4 と測定点 2 に入射する X 線ビーム 3 とから、2 つ以上の回折ベクトルを決定し、回折ベクトルを用いた測定結果の変換では、2 つ以上のひずみ抽出点での回折環 5 のひずみの測定結果と、2 つ以上のひずみ抽出点に対応する 2 つ以上の回折ベクトルとを用いる。上述の構成において、1 つの回折環 5 上におけるひずみ抽出点の位置の違いに起因して、回折環 5 のひずみ及び回折ベクトルが変化する場合がある。複数のひずみ抽出点での回折環 5 のひずみの測定結果及び回折ベクトルを用いることによって、上記変化を平滑化することができる。つまり、回折環 5 の全体のひずみを反映した応力の算出が可能になる。

10

【0069】

[変形例 3]

実施の形態の変形例 3 について説明する。本変形例では、応力測定装置 10 のデータ処理部 17 が、複数のひずみ抽出点を設定した 1 つの回折環 5 に基づき、応力を算出する。以下に、本変形例について、データ処理部 17 の解析動作における実施の形態並びに変形例 1 及び 2 と異なる点を中心に、図 10 を主に参照して説明する。なお、図 10 は、変形例 3 に係る応力測定装置のデータ処理部 17 の解析動作の流れを示すフローチャートである。

20

【0070】

図 10 を参照すると、データ処理部 17 は、図 5 に示されるステップ S 1 ~ S 4 によって生成された 1 つの回折環 5 の画像データを取得し、この回折環 5 上に予め設定された複数 K 個のひずみ抽出点 P_j を設定する (ステップ S 4 1)。ここで、点 P_j の j は、1 ~ K の整数値であり、回折環 5 に設定される K 個のひずみ抽出点のうちから 1 つを特定する要素である。回折環 5 に配置される複数のひずみ抽出点 P_j は、回折環 5 の周方向に沿って、等間隔又は等中心角を形成するように均等に配置されてもよく、不均等に配置されてもよい。しかしながら、複数のひずみ抽出点 P_j が均等に配置されることによって、ひずみ抽出点 P_j での回折環 5 のひずみ及び単位回折ベクトルも回折環 5 の偏った領域のひずみ及び単位回折ベクトルに限定されないため、これらを用いて後述のようにして得られる応力における誤差も低減する。

30

【0071】

さらに、データ処理部 17 は、回折環 5 の各ひずみ抽出点 P_j について単位回折ベクトル n_j を、算出する (ステップ S 1 2)。単位回折ベクトル n_j は、 j 番目のひずみ抽出点 P_j に関する単位回折ベクトルである。

次いで、データ処理部 17 は、全ての単位回折ベクトル n_j を用いて、 $K \times 6$ の行列 F を算出する (ステップ S 1 3)。この $K \times 6$ の行列 F は、式 5 の行列 F の k を K に置き換えたものと同様である。

その後、データ処理部 17 は、図 7 に示される実施の形態のステップ S 1 4 ~ S 1 8 と同様のステップ S 1 4 ~ S 1 8 を実施し、応力の各成分を算出する。なお、ステップ S 1 7 では、1 つの回折環 5 に関して、ひずみ抽出点 P_j での真円回折環 6 に対する回折環 5 のひずみが、算出される。

40

よって、本変形例においても、変形例 2 と同様の効果が得られる。

【0072】

以上のように、本発明における技術の例示として、実施の形態及び変形例を説明した。そのために、添付図面及び詳細な説明を提供した。

したがって、添付図面及び詳細な説明に記載された構成要素の中には、課題解決のために必要な構成要素だけでなく、上記技術を例示するために、課題解決のためには必須でない構成要素も含まれ得る。そのため、それらの必須ではない構成要素が添付図面や詳細な説明に記載されていることをもって、直ちに、それらの必須ではない構成要素が必須であ

50

るとの認定をするべきではない。

その他、実施の形態及び変形例に対して当業者が思いつく各種変形を施して得られる形態や、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で各実施の形態における構成要素及び機能を任意に組み合わせることによって実現される形態も本発明に含まれる。

【産業上の利用可能性】

【0073】

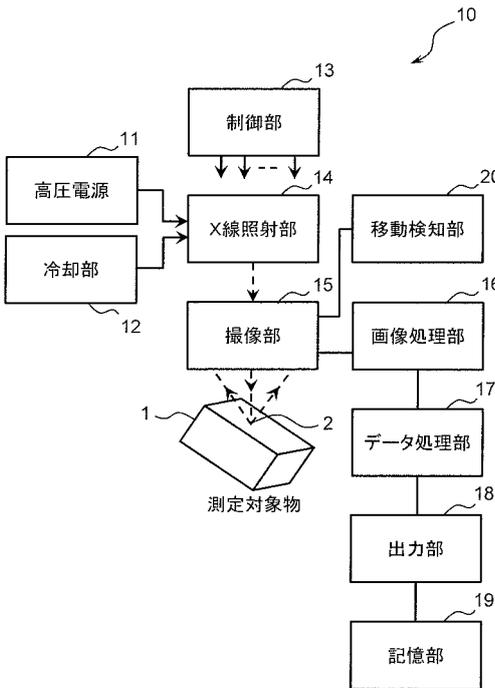
本発明は、非破壊検査全般に有用である。

【符号の説明】

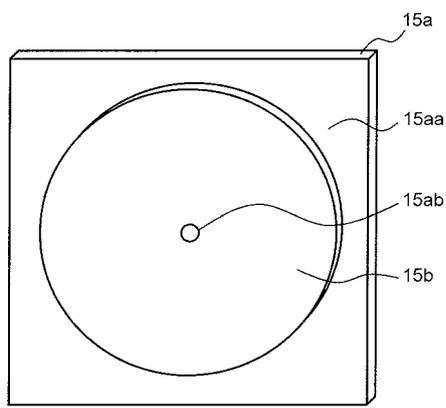
【0074】

- 1 測定対象物
- 2 測定点（特定部分）
- 3 X線ビーム
- 4 回折ビーム
- 5 回折環
- 10 応力測定装置
- 14 X線照射部（ビーム照射部）
- 15 撮像部
- 17 データ処理部

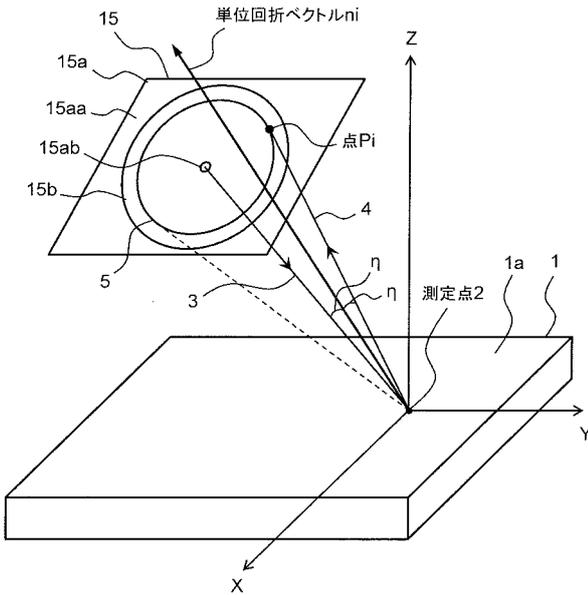
【図1】



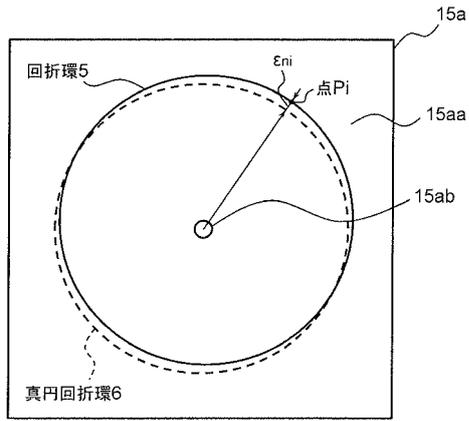
【図2】



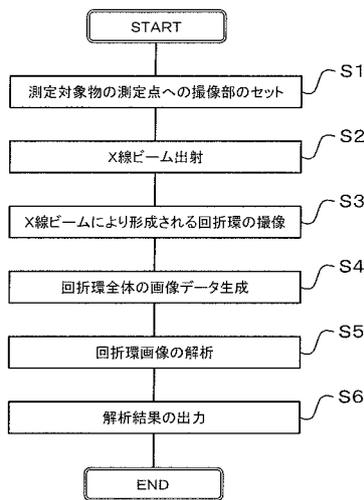
【図3】



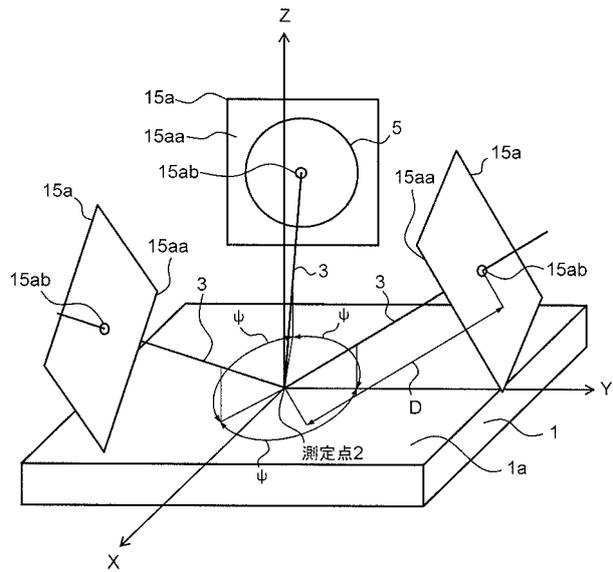
【図4】



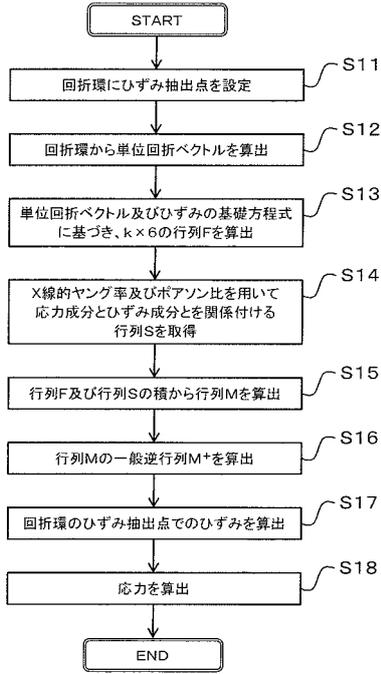
【図5】



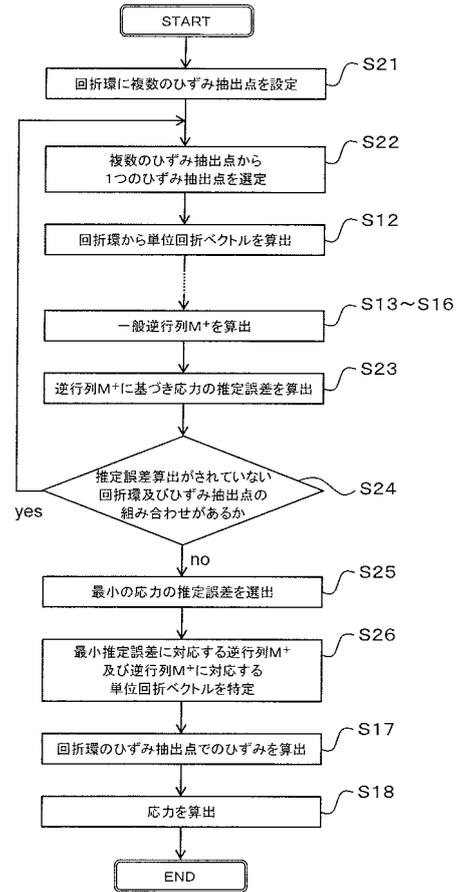
【図6】



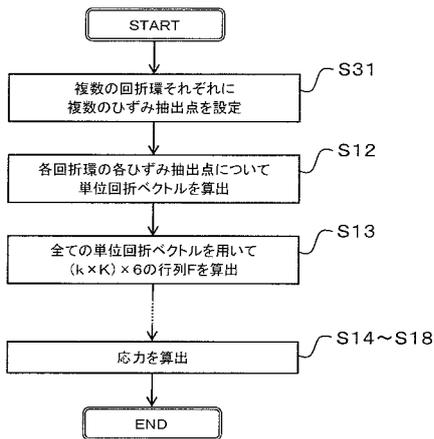
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】

