

(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2015-99145

(P2015-99145A)

(43) 公開日 平成27年5月28日(2015.5.28)

(51) Int.Cl.  
G01N 23/205 (2006.01)

F I  
G O I N 23/205

テーマコード (参考)  
2 G O O 1

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願2014-213211 (P2014-213211)  
 (22) 出願日 平成26年10月17日 (2014.10.17)  
 (31) 優先権主張番号 特願2013-216800 (P2013-216800)  
 (32) 優先日 平成25年10月17日 (2013.10.17)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(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 BA18 CA01 DA08 DA09  
 GA01 GA06 GA13 HA07 KA07

(54) 【発明の名称】 回折環分析方法および回折環分析装置

(57) 【要約】

【課題】回折環に欠落がある場合であっても回折環を分析しかつ精度を向上させる回折環分析方法を提供する。

【解決手段】回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射し、この特定部分から反射される回折ビームにより形成される回折環の中心角  $\theta$  をパラメータとするひずみを測定し ( S 2 1 、 S 2 2 )、この測定結果をフーリエ変換し ( S 2 3 )、このフーリエ変換の結果から、前記特定部分の応力又はひずみの少なくとも一方を算出する ( S 2 4 )。

【選択図】 図 2



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射し、  
前記特定部分から反射される回折ビームにより形成される回折環の変形を測定し、  
測定結果を、フーリエ級数又は同等の直交級数に変換するフーリエ変換を行うことにより回折環を分析する  
回折環分析方法。

## 【請求項 2】

前記回折環の分析において、前記フーリエ変換の結果から、前記特定部分の応力およびひずみの少なくとも一方を算出する  
請求項 1 に記載の回折環分析方法。

10

## 【請求項 3】

前記回折環の分析において、前記フーリエ級数の係数の他に、ヤング率、ポアソン比、回折角の余角、および前記計測対象物表面に対する法線と入射ビームとのなす角を用いた演算を施すことにより前記応力または前記ひずみの少なくとも一方を算出する  
請求項 2 に記載の回折環分析方法。

## 【請求項 4】

さらに、前記回折環の一部に欠落部分がある場合、実測された回折環と欠落部分の中心角の情報から数学的性質を用いて欠落のない場合の回折環のフーリエ級数を推定する  
請求項 1 から請求項 3 の何れかに記載の回折環分析方法。

20

## 【請求項 5】

前記回折環の分析において、前記フーリエ変換の結果得られたフーリエ級数のうち少なくとも 1 次の係数および 2 次の係数のいずれか 1 つを利用する  
請求項 1 から請求項 4 の何れかに記載の回折環分析方法。

## 【請求項 6】

前記回折環の分析において、前記フーリエ級数の 1 次および 2 次の係数を  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  とする時、前記計測対象物の応力を平面応力であると仮定して、x 軸、y 軸方向の応力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  をそれぞれ

## 【数 1】

$$\sigma_x = -\frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \cdot a_1$$

$$\sigma_y = \sigma_x \cos^2 \psi_0 - \frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 \eta} \cdot a_2$$
(1)

30

を (1) 式により算出し、剪断応力  $\tau_{xy}$  を

## 【数 2】

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \psi_0} \cdot b_1$$

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 2\eta \cos \psi_0} \cdot b_2$$
(2)

40

の (2) 式の少なくとも一方の式で算出し、

$a_1$  は前記フーリエ級数の 1 次の係数のうち  $\cos$  の係数、 $a_2$  は前記フーリエ級数の 2 次の係数のうち  $\sin 2$  の係数、 $b_1$  は前記フーリエ級数の 1 次の係数のうち  $\sin$  の係数、 $b_2$  は前記フーリエ級数の 2 次の係数のうち  $\cos 2$  の係数、 $\psi_0$  は前記回折環の中心角、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $\eta$  は回折角の余角、 $\eta_0$  は前記計測対象物の表面の法線と入射 X 線ビームとのなす角を表す  
請求項 1 から請求項 5 の何れかに記載の回折環分析方法。

## 【請求項 7】

前記測定において、測定点数を決定し、

50

前記分析において、前記測定点数に見合った項数のフーリエ級数で回折環を近似し、計測対象物の応力、ひずみを求める

請求項 1 に記載の回折環分析方法。

【請求項 8】

前記分析において、回折環の変形をフーリエ級数による行列として表記し、その逆行列を利用してフーリエ級数の係数(以下フーリエ係数とする)、計測対象物の応力、ひずみ状態を分析する

請求項 1 または 7 に記載の回折環分析方法。

【請求項 9】

前記分析において、回折環の一部または複数部分が欠けている場合に、回折環を表現する行列のうち、欠けている部分の角度に対応する行を取り去り、応力・ひずみ測定に影響の小さい列を取り去った行列を作り、その擬似逆行列を利用してフーリエ係数、応力、ひずみを計算する

請求項 8 に記載の回折環分析方法。

【請求項 10】

回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射するビーム照射部と、前記特定部分から反射される回折ビームを撮像し、撮像面に回折環を形成させる撮像部と、

前記撮像部で得られた測定結果をフーリエ変換することにより、前記特定部分の応力又はひずみの少なくとも一方を算出するデータ処理部を備えた

回折環分析装置。

【請求項 11】

前記撮像部が、半導体を利用した固体 X 線撮像素子またはイメージングプレートである請求項 10 に記載の回折環分析装置。

【請求項 12】

前記撮像部は、2枚の固体撮像素子を有し、回折環の上下を前記2枚の固体撮像素子の間の空隙に前記ビームを通すよう配置される

請求項 10 または 11 に記載の回折環分析装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、計測対象物の特定部分に X 線または回折する性質を持つビームを照射し、この回折ビームにより形成される回折環の変形をフーリエ変換して、当該特定部分のひずみ、応力を求める回折環分析方法および回折環分析装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、回折環分析装置に関して、特許文献 1 に開示された X 線回折装置や、特許文献 2 に開示された三軸応力測定方法等がある。

【0003】

非特許文献 1 では、非特許文献 2 に開示された X 線応力測定方法の 1 つである cos 法を発展させて回折環の 2 次元的数据を解析することによって全平面応力成分を単一の X 線照射によって同時一括に計測する手法が開示されている。その手法について図面を用いて説明する。

【0004】

図 30 は、計測対象物表面に X 線を照射した場合の座標系、入射 X 線および回折環を示す図である。同図に示すように、X 線ビーム 1 を計測対象物であるサンプル 2 の特定部分 3 に照射し、その回折ビーム 4 により、回折環 5 (デバイ環) を撮像部 6 に結像させる。同図中、 $\theta$  は、円周角  $\theta$  での回折環の変形を表し、 $d$  は結晶の格子面間隔と X 線の波長で決まっている回折角  $\theta$  の余角である(つまり  $\theta = 90^\circ - \theta$ )。また、 $\phi$  は計測対象物表面の法線と入射ビームとのなす角で、 $\psi$  は X 線ビームの測定対象物表面への投影線と計測

10

20

30

40

50

対象物の x 軸とのなす角である。

【 0 0 0 5 】

回折環 5 を用いた応力測定では、サンプル 2 の特定部分 3 にひずみがある場合、図 3 1 に示すように、ひずみがない時の真円の回折環 8 からずれた位置に、サンプル 2 のひずみに応じて変形した X 線の回折環 9 が生じる。

【 0 0 0 6 】

このサンプル 2 のひずみ(応力状態)を回折環 9 の変形から求めるのが、cos 法である。この方式は中性子線など、結晶で回折する性質のあるビームであれば X 線以外でも利用可能である。

【 0 0 0 7 】

cos 法では回折環 9 上の中心角  $\alpha$  の点での変形の測定値を  $\epsilon_{\alpha}$  で表すと、図 3 2 の様に、回折環 9 から、中心角  $\alpha$ 、 $\alpha + \pi$ 、 $\alpha - \pi$ 、 $\alpha - \pi + \pi$  の 4 方向の変形  $\epsilon_{\alpha}$ 、 $\epsilon_{\alpha + \pi}$ 、 $\epsilon_{\alpha - \pi}$ 、 $\epsilon_{\alpha - \pi + \pi}$  を測定する。そして、この 4 つの測定値から、次の式(1)~(4)で計算される 4 種のパラメーターの値を求める。

【 0 0 0 8 】

【数 1】

$$\bar{\epsilon}_{\alpha} \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\pi + \alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi - \alpha})] \quad (1)$$

$$\epsilon_{\alpha} \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\pi + \alpha}) - (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi - \alpha})] \quad (2)$$

$$E_1 \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} + \epsilon_{\pi + \alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} + \epsilon_{\pi - \alpha})] \quad (3)$$

$$E_2 \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} + \epsilon_{\pi + \alpha}) - (\epsilon_{-\alpha} + \epsilon_{\pi - \alpha})] \quad (4)$$

【 0 0 0 9 】

4 種のパラメーターの実測値を縦軸、 $\cos \alpha$ 、 $\sin \alpha$ 、 $\cos 2\alpha$ 、 $\sin 2\alpha$  の夫々を横軸にしてその関係を示したのが、図 3 3 ~ 図 3 6 である。図 3 3 からわかるように、 $\bar{\epsilon}_{\alpha}$  と  $\cos \alpha$  (上バー付き) との間には明確な直線的な比例関係がみられる。つまり、式(1)のパラメーター  $\bar{\epsilon}_{\alpha}$  (上バー付き) を  $\cos \alpha$  についてプロットすると直線関係が得られ、その直線の傾きに非特許文献 1 の式(9)を適用することで被測定物のひずみ(応力状態)を求めることができる(この例では x 方向の応力  $\sigma_x$ )。

【 0 0 1 0 】

一方、(2)~(4)では直線関係はそれほど明確ではない(図 3 4 ~ 図 3 6)。これは cos 法では  $\epsilon_{\alpha}$  (上バー付き)、 $\epsilon_{\alpha}$  (上チルダ付き)、 $E_1$ 、 $E_2$  と  $\cos \alpha$ 、 $\sin \alpha$ 、 $\cos 2\alpha$ 、 $\sin 2\alpha$  との関係がそれぞれ直線になるとしているが、この仮定が成り立つのは被測定物の応力状態が理想的な場合に限られるからである。実際には被測定物の応力状態は理想的な場合からずれており、それにより図 3 4 ~ 図 3 6 のように直線からのずれが生じる。このずれは被測定物の物理的状態の情報を含んでいるが、直線近似からひずみ(応力状態)を求める cos 法ではその情報の取り扱いが困難である。

【 0 0 1 1 】

また cos 法では常に回折環上の 4 点を一組としてパラメーターの計算を行うので(図 3 2)、図 3 7 のように一部が欠落した回折環では応力の計算が困難になる(図 3 7 の例では  $\bar{\epsilon}_{\alpha}$  (上バー付き)、 $\epsilon_{\alpha}$  (上チルダ付き)、 $E_1$ 、 $E_2$  の各パラメーターの計算は不可能である)。

【 0 0 1 2 】

欠落した回折環の例として、非特許文献 3 ではスポッティ化した(つまり粒状性のある)回折環を示している。非特許文献 3 ではスポッティ化した回折環から精度良く応力を求める画像処理方法としてソフトウェア揺動法を開示しているが、図 3 7 のような回折環で

10

20

30

40

50

はソフトウェア揺動法を利用して  $\cos$  法の適用は困難である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0013】

【特許文献1】特開2005-241308号公報

【特許文献2】特開2011-27550号公報

【非特許文献】

【0014】

【非特許文献1】佐々木俊彦、広瀬幸雄「2次元 X 線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射 X 線応力測定」、材料 Vol.44, No.504, pp.1138-1143, (1995)

【非特許文献2】平修二、田中啓介、山崎利春「細束 X 線 応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用」材料 Vol.27, pp.251-256, (1978)

【非特許文献3】佐々木俊彦、広瀬幸雄、安川昇一「イメージングプレートを用いた粗大結晶粒材料の X 線マクロ応力測定」、日本機械学界論文集 (A 編), 63, pp.533-541, (1997)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

非特許文献1および非特許文献2によれば、 $\cos$  法の数値処理の都合上、次のような問題がある。

【0016】

第1に、回折環に欠落がある場合(例えば図37)に応力の計算精度が劣化するか、あるいは計算できなくなる。

【0017】

第2に、4点のひずみを加減算しているため、抽出するパラメータには常に4点分の測定値誤差を含んでいることになる。これによってS/N比が劣化する。

【0018】

第3に、回折環のひずみ情報には測定対象物の多くの応力状態についての情報を含んでいるが、それを4つのパラメータに集約してしまうため、多くの情報が失われることになる。

【0019】

本発明は、回折環に欠落がある場合であっても回折環を分析し、かつ精度を向上させる回折環分析方法および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】

【0020】

本発明の第1の回折環分析方法は、回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射し、この特定部分から反射される回折ビームにより形成される回折環を測定し、この回折環の変形をフーリエ変換し、その結果から、特定部分の応力又はひずみの少なくとも一方を算出するものである。この構成により、計測対象物の特定部分の応力又はひずみを正確に求めることができ、また、回折環に欠落がある場合であっても計測対象物のひずみ(応力状態)を分析することができる。

【0021】

具体的にフーリエ級数を求めるには、回折環の変形と回折環の中心角の関係のリストを作成し、それに高速フーリエ変換(FFT)などのアルゴリズムを適用することでフーリエ級数の係数を求める。また  $\cos$ 、 $\sin$ 、 $\cos^2$ 、 $\sin^2$  ... との相関を計算することでもフーリエ級数の係数を求めることができる。

【0022】

本発明の第2の回折環分析方法は、第1の回折環分析方法において、前記フーリエ級数の係数の他に、ヤング率、ポアソン比、回折角の余角、および前記計測対象物表面に対す

10

20

30

40

50

る法線と入射ビームとのなす角を用いた演算を、測定結果に対して施してもよい。この構成により、計測対象物の特定部分の応力又はひずみを更に正確に求めることができる。

【0023】

本発明の第3の回折環分析方法は、第1又は第2の回折環分析方法において、回折環の一部に欠落部分がある場合、実測された回折環と欠落部分の中心角の情報から、フーリエ級数の性質を用いて欠落のない場合の回折環のフーリエ級数を推定する方法であってもよい。これにより、回折環に欠落がある場合であっても計測対象物のひずみ(応力状態)を正確に分析することができる。

【0024】

本発明の第4の回折環分析方法は、第1、第2又は第3の回折環分析方法において、フーリエ変換の結果得られたフーリエ級数のうち少なくとも0次から2次までの係数を利用してもよい。ここで、少なくとも1次の係数および2次の係数のいずれか一つを利用してよい。この構成により、高次の係数を利用しなくても、従来のcos法に比べて、正確に回折環の分析することができる。

10

【0025】

本発明の第5の回折環分析方法は、第1、第2、第3又は第4の回折環分析方法において、1次および2次のフーリエ級数の係数を $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ とする時、計測対象物の応力を平面応力であると仮定してx軸、y軸方向の垂直応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ をそれぞれ

【数2】

$$\sigma_x = -\frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \cdot a_1 \quad (5)$$

20

$$\sigma_y = \sigma_x \cos^2 \psi_0 - \frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 \eta} \cdot a_2$$

とし、剪断応力 $\tau_{xy}$ を

【数3】

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \psi_0} \cdot b_1 \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 2\eta \cos \psi_0} \cdot b_2$$

30

の両式の少なくとも一方の式で算出してもよい。ここで、Eはヤング率、 $\nu$ はポアソン比、 $\eta$ は回折角の余角、 $\psi_0$ は前記計測対象物の表面の法線と入射X線ビームとのなす角を表す。

【0026】

この構成により、垂直応力および剪断応力を正確に求めることができる。

【0027】

本発明の第1の回折環分析装置は、回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射するビーム照射部と、この特定部分から反射される回折ビームを撮像し、撮像面に回折環を形成させる撮像部と、この撮像部で得られた測定結果をフーリエ変換し、前記特定部分の応力又はひずみの少なくとも一方を算出するデータ処理部を備えるものである。この構成により、計測対象物の特定部分の応力又はひずみを正確に求めることができ、また、回折環に欠落がある場合であっても回折環を分析する装置を提供できる。

40

【0028】

本発明の第2の回折環分析装置は、第1の回折環分析装置において、撮像部が、半導体を利用した固体X線撮像素子またはイメージングプレーであってもよい。この構成により、正確に回折環の測定が可能になる。

【発明の効果】

【0029】

本発明の回折環分析方法および装置によれば、回折環に欠落がある場合であっても回折

50

環を分析し、かつ精度を向上させることができる。

【0030】

言い換えれば、第1に、回折環に欠落がある場合（例えば図37）でもフーリエ級数への展開が可能なので、計算精度を劣化させることなく応力計算を可能にする。

【0031】

第2に、4点のひずみを加減算する従来法とは異なり、回折環の存在する部分全てを用いてフーリエ級数に展開することにより4点分の測定値誤差を含まないのでS/N比を向上させることができる。

【0032】

第3に、フーリエ級数の2次までの係数は従来法と等価な分析を可能にし、さらに、3次以上の係数は、従来法と比べて、回折環のひずみ情報に含まれるより多くの応力状態について分析することが可能にする。

10

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図1】図1は、実施の形態1における回折環分析装置の構成例を示すブロック図である。

【図2】図2は、実施の形態1を示す回折環分析方法を示すフローチャートである。

【図3】図3は、回折環の変形の実測値と2次以下の係数によって求めた変形の近似値の関係をしめしたグラフ（上図）と、その残差（下図）を示す図である。

【図4】図4は、回折環の変形データ例（一部）とそれから求めたフーリエ級数の係数を示す図である。

20

【図5】図5は、機械的に測定した負荷と実施の形態1のフーリエ方式で求めた応力 $\sigma_x$ の比較を示す図である。

【図6】図6は、実施の形態1における回折環計測装置の変形例における構成を示すブロック図である。

【図7】図7は、回折環計測装置の動作を示すフローチャートである。

【図8】図8は、第1の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図9】図9は、図6の固体撮像素子の構成例を示すブロック図である。

【図10】図10は、第2の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

30

【図11】図11は、図10の固体撮像素子の画素配置例を示す図である。

【図12】図12は、第3の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図13】図13は、第4の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図14】図14は、第5の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図15】図15は、第6の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

40

【図16A】図16Aは、第7の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図16B】図16Bは、図16Aの変形例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図17】図17は、第8の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図18】図18は、第9の構成例における撮像部の（a）側面図および（b）下面図である。

【図19】図19は、第10の構成例における撮像部の（a）断面図および（b）下面図である。

50

【図 2 0】図 2 0 は、第 1 1 の構成例における撮像部の ( a ) 断面図および ( b ) 下面図である。

【図 2 1】図 2 1 は、実施の形態 2 における式 (2.5) の行列 M を表す図である。

【図 2 2】図 2 2 は、実施の形態 2 における実験に用いた資料の特性を示す図である。

【図 2 3】図 2 3 は、実施の形態 2 における一部が欠けた回折環を作るためのマスク例を示す図である。

【図 2 4】図 2 4 は、実施の形態 2 におけるマスクなしの場合とマスクにより回折光を遮った場合の回折環像を示す図である。

【図 2 5】図 2 5 は、実施の形態 2 における各マスクについてデータ解析に用いた円周角の範囲を示す図である。

10

【図 2 6】図 2 6 は、実施の形態 2 における一部が欠けた回折環像から式 (2.8) の方式で求めた  $x$  の  $m$  依存性と、完全な回折環から求めた  $x$  (破線) とを示す図である。

【図 2 7】図 2 7 は、従来の  $\cos$  法により求めた  $x$  と本実施の形態の方式により求めた  $x$  とを示す図である。

【図 2 8】図 2 8 は、回折環を 8 点で測定する場合の説明図である。

【図 2 9】図 2 9 は、 $x_1 \sim x_5$  からの  $x_1 \sim x_5$  の推定値を示す図である。

【図 3 0】図 3 0 は、計測対象物表面に X 線を照射した場合の座標系、入射 X 線および回折環を示す図である。

【図 3 1】図 3 1 は、計測対象物にひずみが生じている回折環の一例と無応力で無ひずみの回折環 (真円) とを示す図である。

20

【図 3 2】図 3 2 は、従来の  $\cos$  法の 4 分割の説明図である。

【図 3 3】図 3 3 は、従来の  $\cos$  法により求めた  $\cos^2$  (上バー付き) を縦軸に、 $\cos$  を横軸にとったグラフを示す図である。

【図 3 4】図 3 4 は、従来の  $\cos$  法により求めた  $E_2$  を縦軸に、 $\sin^2$  を横軸にとったグラフを示す図である。

【図 3 5】図 3 5 は、従来の  $\cos$  法により求めた  $E_1$  を縦軸に、 $\cos^2$  を横軸にとったグラフを示す図である。

【図 3 6】図 3 6 は、従来の  $\cos$  法により求めた  $\cos^2$  (上チルダ付き) を縦軸に、 $\sin^2$  を横軸にとったグラフを示す図である。

【図 3 7】図 3 7 は、回折環に欠落部分がある場合の状態を有する図である。

30

【発明を実施するための形態】

【0034】

以下で説明する実施の形態は、いずれも本発明の好ましい一具体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、ステップ、ステップの順序などは、一例であり、本発明を限定する趣旨ではない。

【0035】

(実施の形態 1)

< 回折環分析装置の構成 >

図 1 は本実施の形態における回折環分析装置の構成例を示すブロック図である。この装置は、X 線回折により発生する回折環を解析するものである。同図において、11 は高圧電源、12 は X 線照射部を冷却する冷却部、13 は回折環分析装置全体の動作を制御する制御部、14 は測定対象物であるサンプルの特定部分に X 線を照射する X 線照射部、15 はサンプルから反射される回折光により形成される回折環 (デバイ環、デバイ=シェラー環とも呼ばれる。) を撮像する撮像部 (たとえば、半導体などの固体撮像素子)、17 は撮像部 15 により撮像された回折環画像を解析するデータ処理部、18 は出力部である。

40

【0036】

ここで、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 線ビームとして計測対象物に照射する X 線光学系とを備えている。X 線発生装置として、たとえば、電子線を高電圧で加速して陽極に衝突させ Cr-K 特性 X 線を発生させるための X 線管球 (真空管) であり、また、X 線光学系は、たとえば、発

50

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。

【 0 0 3 7 】

計測対象物表面と X 線ビームとのなす角は自由に設定してよい。照射される X 線ビームの直径は、たとえば数 1 0 0  $\mu\text{m}$  以下の細さでもよい。また照射する X 線のエネルギーは 4 ~ 20 keV 程度の軟 X 線でも良い。

【 0 0 3 8 】

撮像部 1 5 は、計測対象物からの回折ビームにより形成される回折環を撮像する。そのため、CCD イメージセンサ、MOS (Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサ等の固体撮像素子、あるいはイメージングプレートからなる。固体撮像素子の場合は (a) X 線ビームが通過する貫通孔を中央部に有し、回折環全体を撮像する、または、(b) 回折環の一部、または複数の部分を撮像する 1 個または複数の固体撮像素子を備える。撮像にイメージングプレートを用いる場合は露光された回折環像を読み出すための読み出し装置を備える。

10

【 0 0 3 9 】

データ処理部 1 7 は撮像部 1 5 により撮像された回折環像を解析する。具体的には撮像された画像から回折環を判別し、判別された回折環と真円との半径方向のずれを、回折環の中心角 をパラメータとする変形 として算出し、それをフーリエ級数で表現する。中心角 は、回折環の中心を通る基準となる線と、回折環の円周上の点とのなす中心角であり、円周角 とも呼ぶ。なおフーリエ級数の係数をフーリエ係数または単に係数と呼ぶ。そのフーリエ級数から上述の理論 (平面応力状態の場合は後述する式 (21) ~ (24)) に従って試験対象物の応力を求める。

20

【 0 0 4 0 】

出力部 1 8 は、表示装置および記憶部を備え、データ処理部 1 7 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にファイルとして記録する。

【 0 0 4 1 】

なお、X 線照射部 1 4、撮像部 1 5 及びサンプルの測定状態は図 3 0 に示す通りである。

【 0 0 4 2 】

< データ処理部の詳細 >

図 2 は本実施の形態である回折環分析方法に係るフローチャートを示すものである。

【 0 0 4 3 】

同図に示すように、本回折環分析方法はフーリエ級数による回折環分析方法であって、データ処理部 1 7 は、まず撮像部 1 5 により撮像された回折環画像から回折環を判別する (S 2 1)。

30

【 0 0 4 4 】

そして、判別された回折環と真円との半径方向のずれを判別された回折環と真円との半径方向のずれを、回折環の中心角 をパラメータとする変形 として算出する (S 2 2)。

【 0 0 4 5 】

次に、回折環の中心角 をパラメータとする変形を フーリエ変換し、このフーリエ級数の係数を算出する (S 2 3)。

40

【 0 0 4 6 】

なお、判別された回折環に欠落がある場合には、測定された回折環と欠落部分の中心角から欠落が無かったであろう場合のフーリエ級数を求める。この計算はフーリエ級数の性質を利用するものであり、欠落が無かったであろう場合のフーリエ級数を推定していることになる。

【 0 0 4 7 】

この後、この算出結果を用いて、サンプルの特定部分の応力又はひずみの少なくとも一方を算出する (S 2 4)。

【 0 0 4 8 】

なお、図 2 において、回折環の真円とのずれをフーリエ級数に展開しているが、その代

50

わりに、あるいは、それと併せて、回折環の幅、回折環の強度の変化をフーリエ級数に展開してもよい。これにより、回折環に含まれる情報に対してより多角的な分析を可能にする。

【0049】

本形態の特徴としては第1に、回折環に欠落がある場合でもフーリエ級数への展開が可能なので、計算精度を劣化させることなく応力計算を可能にする。

【0050】

第2に、4点のひずみを加減算する従来法とはことなり、回折環の存在する部分全てを用いてフーリエ級数に展開することにより4点分の測定値誤差を含まないのでS/N比を向上させることができる。

10

【0051】

第3に、フーリエ級数の2次までの係数は従来法と等価な分析を可能にし、さらに、3次以上の係数は、従来法と比べて、回折環のひずみ情報に含まれるより多くの応力状態について分析することが可能にする。

【0052】

フーリエ級数については、データ処理部17は、フーリエ級数の係数のうち少なくとも0次から2次までの係数を算出する。ここで、少なくとも1次の係数および2次の係数のいずれか一つを算出してもよい。例えば、0次から2次までの係数を算出してもよいし、3次以上の係数を算出してもよい。

【0053】

20

なお、フーリエ級数による回折環の分析を行うデータ処理部17は、メモリとプロセッサを備えるマイクロコンピュータで構成してもよいし、汎用のパソコン(Personal computer)により構成してもよい。その場合、図2に示す処理は、プロセッサがメモリ中のソフトウェアを実行することによって実行される。すなわち、プロセッサがソフトウェアを実行することによって、データ処理部17の機能を実現するようにしてもよい。

【0054】

また、本実施の形態におけるフーリエ級数は同等の直交級数であってもよく、フーリエ級数又は同等の直交級数に変換することをフーリエ変換と呼ぶ。

【0055】

<回折環のフーリエ級数展開>

30

次に、回折環のフーリエ級数展開の内容を説明する。

【0056】

入射ビームと試験対象物、撮像素子と回折環の位置関係は図30に示す通りである。は結晶の格子面間隔とX線の波長で決まっている回折角の余角である(つまりは $90^\circ$  - )。また $\theta_0$ は計測対象物表面の法線と入射ビームとのなす角で、 $\phi_0$ はX線ビームの測定対象物表面への投影線と計測対象物のx軸とのなす角である。

【0057】

一般に、試験対象物のx、y、z軸方向の垂直ひずみをそれぞれ $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 、剪断ひずみを $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ 、 $\gamma_{zx}$ とすると、円周角 $\alpha$ での回折環の変形は

【数4】

40

$$\varepsilon_a = n_1^2 \varepsilon_x + n_2^2 \varepsilon_y + n_3^2 \varepsilon_z + n_1 n_2 \gamma_{xy} + n_2 n_3 \gamma_{yz} + n_3 n_1 \gamma_{zx} \quad (7)$$

で表される。ただし $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ は、ひずみ $\alpha$ 方向の方向余弦で、図30で $\theta_0 = 0$ に設定するとき(以下の考察では妥当な設定である)

【数5】

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \psi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \cos \alpha \\ n_2 &= \sin \eta \sin \alpha \\ n_3 &= \cos \eta \cos \psi_0 + \sin \eta \sin \psi_0 \cos \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

で表される。一方、変形 $\varepsilon_a$ をフーリエ級数の形に表すと

50

【数 6】

$$\begin{aligned}\varepsilon_\alpha &= a_0 + a_1 \cos \alpha + b_1 \sin \alpha + a_2 \cos 2\alpha + b_2 \sin 2\alpha + \dots \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha)\end{aligned}\quad (9)$$

である。式(8)を式(7)に代入したものと式(9)とを比較することで計測対象物のひずみと回折環の歪のフーリエ級数を関連付けることができる。具体的には

【数 7】

10

$$\begin{aligned}a_0 &= \left( \cos^2 \eta \sin^2 \psi_0 + \frac{1}{2} \sin^2 \eta \cos^2 \psi_0 \right) \varepsilon_x + \frac{1}{2} \sin^2 \eta \varepsilon_y \\ &\quad + \left( \cos^2 \eta \cos^2 \psi_0 + \frac{1}{2} \sin^2 \eta \sin^2 \psi_0 \right) \varepsilon_z + \frac{1}{8} \cos 2\psi_0 (3 \cos 2\eta + 1) \gamma_{zx}\end{aligned}\quad (10)$$

$$a_1 = -\frac{1}{2} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 (\varepsilon_x - \varepsilon_z) - \frac{1}{2} \sin 2\eta \cos 2\psi_0 \gamma_{zx}\quad (11)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \sin 2\eta (\sin \psi_0 \gamma_{xy} + \cos \psi_0 \gamma_{yz})\quad (12)$$

20

$$a_2 = \frac{1}{4} \sin^2 \eta (2 \cos^2 \psi_0 \varepsilon_x - 2 \varepsilon_y + 2 \sin^2 \psi_0 \varepsilon_z - \sin 2\psi_0 \gamma_{zx})\quad (13)$$

$$b_2 = -\frac{1}{2} \sin^2 \eta (\cos \psi_0 \gamma_{xy} - \sin \psi_0 \gamma_{yz})\quad (14)$$

のようになる。k>=3の係数は全て0になるが、試験対象物のひずみがビームの照射領域内で一様でない場合には  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 、 $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ のいずれかまたは全てが  $\alpha$  の関数となり k>=3成分が観測される。

【0058】

以上の様に、回折環の円周角  $\alpha$  と変形  $\varepsilon$  を求め、それを用いて、フーリエ変換し、そのフーリエ級数の係数を関連付けることにより、試験対象物の応力、ひずみを正確に求めることができる。

30

【0059】

&lt;平面応力状態&gt;

式(10)~(14)では変数が6個あるのに対し、方程式は5個なのでこのままでは解くことができない。そこで通常は試験対象物の応力状態に仮定を置いて測定を行う。比較的単純な例として平面応力状態を考える。これは試験対象物の深さ方向に対して応力が変化しないという仮定で、近似的に多くの場合で成り立っており、工業的に重要である。具体的にはヤング率 E とポアソン比  $\nu$ 、応力成分  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  および  $\sigma_{xy}$  を用いて

【数 8】

40

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned}\quad (15)$$

および

50

【数 9】

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= 0 \\ \gamma_{zx} &= 0\end{aligned}\quad (16)$$

のように表される。

【0060】

式(11)～(14)に式(15)および式(16)を代入すると

10

【数 10】

$$a_1 = -\frac{1+\nu}{2E} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cdot \sigma_x \quad (17)$$

$$b_1 = \frac{1+\nu}{E} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cdot \tau_{xy} \quad (18)$$

$$a_2 = \frac{1+\nu}{2E} \sin^2 \eta (\cos^2 \psi_0 \cdot \sigma_x - \sigma_y) \quad (19)$$

$$b_2 = \frac{-1+\nu}{2E} \sin^2 \eta \cos \psi_0 \cdot \tau_{xy} \quad (20)$$

20

のようにフーリエ級数の係数と応力の関係式が得られる。ただし  $a_0$  は応力の決定には利用しないので省略した。

【0061】

式(17)より  $\sigma_x$  が

【数 11】

$$\sigma_x = -\frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \cdot a_1 \quad (21)$$

のように計算される。この  $\sigma_x$  と式(19)を利用すると  $\sigma_y$  が

30

【数 12】

$$\sigma_y = \sigma_x \cos^2 \psi_0 - \frac{2E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 \eta} \cdot a_2 \quad (22)$$

のように求められる。同様に式(18)、式(20)からそれぞれ

【数 13】

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \psi_0} \cdot b_1 \quad (23)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 2\eta \cos \psi_0} \cdot b_2 \quad (24)$$

40

のように  $\tau_{xy}$  が独立に計算される。

【0062】

< 応力の測定例 >

本発明のフーリエ方式を検証するためJIS-SS400C材に機械的負荷(四点曲げ)を与え、裏面に貼ったひずみゲージによる機械的応力と本フーリエ方式による測定値を比較した。回折用のビームにはX線(Cr-K線)を、回折画像の取得にはイメージングプレート(IP)を利用した。回折角が78.44度なので、 $\psi_0$  は11.56度であった。また試験対象物とIPとの距離は39mm、 $\eta_0 = 35$ 度であった。

50

## 【0063】

## &lt; フーリエ係数の抽出 &gt;

図3は回折環の円周角と変形との関係を示す図である。具体的には、10 MPaの負荷をかけたときに得られた回折環の変形  $\varepsilon_a$  の例を示す図である。同図の横軸は回折環の円周角、縦軸は変形  $\varepsilon_a$  を表している。  $\varepsilon_a$  の実測値(図3の上図の実線で示す)を  $\varepsilon_a$  についてフーリエ級数に展開し、各項の係数の2次以下の係数によってひずみを近似して求めると、図3の上図の破線のようになる。なお、ここでは高速フーリエ変換(FFT)によって係数を求めており、同図では4次までの係数を示している(実際にはさらに高次の係数も求まる)。

## 【0064】

図3の下図は上図の実線(実測値)と破線(近似計算値)との間の残差である。2次以下の近似とは図3の  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  だけを式(7)に代入した近似で、残差とは実測値と近似値との間の差である。

## 【0065】

同図から明らかなように、実測値と計算値の誤差は僅かであり、本回折環分析方法および同装置の効果を実証するものである。なお、同図の下図に示される残差は、これは式(13)および(14)の平面応力状態という近似が完全には成り立っていないことや、ひずみを求める際の回折ピークの位置決定の誤差が原因であると考えられる。

## 【0066】

## &lt; 応力の決定 &gt;

図4は、試験対象物に機械的負荷を10 MPaかけた状態で回折環の変形  $\varepsilon_a$  を測定し、フーリエ級数の係数を求めた結果を示す図である。同図で、係数  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  はそれぞれ、式(1)~(4)に対応するものである。図4から明らかな様に、本実施形態の回折環分析方法および同装置では、従来の  $\cos^2$  法では求めることができなかった高次の係数  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $a_4$ 、 $b_4$  まで求めることが可能になっている。これは、本実施形態では、上記の様に、実測値との関係が明確に理論づけされているからに他ならない。

## 【0067】

図5は、試験対象物に10、43、73、106、140、174、209 MPaの各負荷を機械的にかけながら本実施形態のフーリエ方式で求めた応力  $\sigma_x$  である。図の横軸は機械的な負荷による応力で、縦軸が本発明のフーリエ方式で求めた応力  $\sigma_x$  である。それぞれの負荷でフーリエ係数から応力の平均と標準偏差を求め、式(21)から負荷方向の応力  $\sigma_x$  を決定した。この図では機械的な負荷による応力と本発明のフーリエ方式で求めた応力  $\sigma_x$  の比例係数がほぼ1になっており、本実施形態のフーリエ方式で応力を正確に測定できることがわかる。

## 【0068】

< 結晶面間隔  $d_0$  の影響 >

本発明の応力測定方式(フーリエ方式)の誤差要因について検討する。最初の要因は結晶面間隔  $d_0$  の誤差の影響である。結晶の回折現象は結晶面間隔  $d_0$  の値に依存するが、その値は試験対象物の測定だけからは求まらないため、別に求める必要がある。その決定の誤差は応力測定値の誤差になるため、影響を評価する必要がある。

## 【0069】

回折環の変形  $\varepsilon_a$  は、非特許文献2の式(14)より

## 【数14】

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta d_0}{d_0} \quad (25)$$

と表される。これを結晶面間隔  $d_0$  で偏微分すると

10

20

30

40

【数 1 5】

$$\frac{\partial \varepsilon_a}{\partial d_0} = -\frac{\Delta d_0}{d_0^2} = -\frac{\varepsilon_a}{d_0} \quad (26)$$

従って  $d_0$  の誤差  $d_0$  による への影響誤差 は

【数 1 6】

$$\delta \varepsilon_a = -\varepsilon_a \frac{\delta d_0}{d_0} \quad (27)$$

となる。 $d_0 / d_0$  は定数とみなせるから、フーリエ級数の性質より(7)の各係数への影響は 10

【数 1 7】

$$\delta a_k = -a_k \frac{\delta d_0}{d_0} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (28)$$

および

【数 1 8】

$$\delta b_k = -b_k \frac{\delta d_0}{d_0} \quad (k=1,2,\dots) \quad (29)$$

となる。通常の測定ではその影響は十分小さい。 20

【0 0 7 0】

< 回折角 の変化による影響 >

ここまでは回折角 の余角である ( $= 90^\circ -$ ) が によって変化せず一定であると仮定した。しかし実際にはひずみによって結晶面間隔  $d$  が変化を受け、 もその影響を受ける。それに伴って式(8)の方向余弦も変化する。以下では検証実験の結果の範囲で影響を考察する。

【0 0 7 1】

非特許文献 2 の式(14)によれば、無ひずみ状態での回折角 がひずみのため + に なったとすると回折環の変形 は 30

【数 1 9】

$$\varepsilon_a = -\cot \theta \Delta \theta \quad (30)$$

と表される。これより は

【数 2 0】

$$\Delta \eta = -\Delta \theta = \varepsilon_a \tan \theta \quad (31)$$

だけ変化することがわかる。

【0 0 7 2】

一方、図4より検証実験ではフーリエ級数(9)の係数のうち  $a_1$ 、 $a_2$  以外は小さいので 40

【数 2 1】

$$\varepsilon_a \sim a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha \quad (32)$$

と近似する。これと式(31)から

【数 2 2】

$$\cos(\eta + \Delta \eta) \sim \cos \eta - \tan \theta \sin \eta (a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha) \quad (33)$$

および

【数 2 3】

$$\sin(\eta + \Delta\eta) \sim \sin\eta + \tan\theta \cos\eta (a_1 \cos\alpha + a_2 \cos 2\alpha) \quad (34)$$

が得られる。式(31)および(32)を式(5)、(6)に適用し、 $a_1$ 、 $a_2$ の高次の項を(微小なので)無視すると

【数 2 4】

$$\begin{aligned} \Delta a_1 \sim & \frac{1+\nu}{8E} \tan\theta \sigma_x \times \{a_1(7\cos 2\psi_0 - 1)\sin 2\eta - 4a_2 \sin 2\psi_0 \cos 2\eta\} \\ & + \frac{1+\nu}{4E} a_1 \sin 2\eta \tan\theta \sigma_y \end{aligned} \quad (35)$$

10

のように  $a_1$  への影響を見積ることができる。

【0073】

検証実験では式(22)より  $\sigma_y \sim 150\text{MPa}$ と見積られたので、回折角  $\theta$  の変化によるフーリエ級数の係数への影響は

【数 2 5】

$$\left| \frac{\Delta a_1}{a_1} \right| < 1.0 \times 10^{-3} \quad (36)$$

となる。これによる応力測定値への影響は無視できる。

20

【0074】

<フーリエ方式とcos 法との比較 (1)>

本発明の応力決定方式(フーリエ)を従来法(cos 法)と比較する。試験対象物のひずみがX線(ビーム)の照射領域で一様であるとする、 $\theta$  を

【数 2 6】

$$\varepsilon_a = a_0 + a_1 \cos\alpha + b_1 \sin\alpha + a_2 \cos 2\alpha + b_2 \sin 2\alpha \quad (37)$$

のように表すことができる。これを従来法のcos 法の基礎式(式(1)~(4)の再掲)

【数 2 7】

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_a & \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_a - \varepsilon_{\pi+a}) + (\varepsilon_{-a} - \varepsilon_{\pi-a})] \\ \varepsilon_a & \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_a - \varepsilon_{\pi+a}) - (\varepsilon_{-a} - \varepsilon_{\pi-a})] \\ E_1 & \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_a + \varepsilon_{\pi+a}) + (\varepsilon_{-a} + \varepsilon_{\pi-a})] \\ E_2 & \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_a + \varepsilon_{\pi+a}) - (\varepsilon_{-a} + \varepsilon_{\pi-a})] \end{aligned} \quad (38)$$

30

に代入すると

【数 2 8】

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_a & = 2a_1 \cos\alpha \\ \varepsilon_a & = 2b_1 \sin\alpha \\ E_1 & = 2a_0 + 2a_2 \cos 2\alpha \\ E_2 & = 2b_2 \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (39)$$

40

が得られる。式(39)から明らかなように、従来法のcos 法ではフーリエ級数の係数を簡易的に計算している。従ってひずみ  $\varepsilon_a$  が式(37)で記述される場合には本発明のフーリエ方式と従来法のcos 法は等価であると言える。

【0075】

50

< フーリエ方式とcos 法との比較 (2) >

次にcos 法と本発明のフーリエ方式が等価にならない場合を考える。実際の試験対象物ではひずみが完全に一樣ではないため、式(9)の回折環の変形 が  $k \geq 3$  の項を含むようになる。ここでは簡単のために

【数 2 9】

$$\begin{aligned} \varepsilon_a = & a_0 + a_1 \cos \alpha + b_1 \sin \alpha + a_2 \cos 2\alpha + b_2 \sin 2\alpha \\ & + a_3 \cos 3\alpha + b_3 \sin 3\alpha + a_4 \cos 4\alpha + b_4 \sin 4\alpha \end{aligned} \quad (40)$$

とする。これを式(38)に代入すると

【数 3 0】

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon_a} &= 2a_1 \cos \alpha + 2a_3 \cos 3\alpha \\ \varepsilon_a &= 2b_1 \sin \alpha + 2b_3 \sin 3\alpha \\ E_1 &= 2a_0 + 2a_2 \cos 2\alpha + 2a_4 \cos 4\alpha \\ E_2 &= 2b_2 \sin 2\alpha + 2b_4 \sin 4\alpha \end{aligned} \quad (41)$$

が得られる。これらの式は式(39)と比較して高次の項が加わっている。実際には5次以上のさらに高次の項が含まれることになる。従来法では式(41)の各式を直線で近似しているため、高次の項の影響を取り除くのは難しい。一方、本発明のフーリエ方式では高次の項の影響を分離することができるため、これまでよりも高い精度で応力を測定できることが期待できる。

【0076】

以上、本発明の回折環分析方法としてフーリエ方式について説明した。

【0077】

< 回折環分析装置の変形例 >

続いて、本発明のフーリエ方式を有効に適用可能な回折環分析装置の変形例について説明する。

【0078】

図6は、本実施の形態における回折環分析装置の変形例における構成を示すブロック図である。同図の回折環分析装置は、図1に示した回折環分析装置と比べて、画像処理部16が追加されている点と、撮像部15が(a) X線ビームが通過する貫通孔を中央部に有し、回折環全体を撮像する1個の固体撮像装置、または、(b) 回折環の一部、または複数の部分を撮像する複数の固体撮像素子を備えており、イメージングプレートではない点とが異なっている。これは、上記(b)の回折環の一部、または複数の部分を撮像する場合であっても、本発明のフーリエ方式では精度良く分析できる点で、本発明のフーリエ方式を有効に適用できるからである。以下、図6に示す変形例の構成について、図1に示した構成と異なる点を中心に説明する。

【0079】

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。回折環画像を生成する処理は、撮像部15が(a) X線が通過する貫通孔を中央部に有し、回折環を撮像する第1の固体撮像素子、および、(b) 回折環の互いに異なる部分を撮像する複数の第2の固体撮像素子の何れを有しているかによって異なる。

【0080】

画像処理部16は、(b)の場合、複数の第2の固体撮像素子から得られる画素信号列から画像を形成し、さらにそれらの画像を1枚の回折環画像に合成する処理を行う。合成された回折環画像では、回折環の一部が欠落することになる。また、画像処理部16は、撮像部15から得られる画像の座標系が直交座標ある場合は極座標に変換する処理をしてもよい。また、画像処理部16は、(a)の場合、第1の固体撮像素子から得られる画素信号列から回折環画像を生成する。この回折環画像は欠落のない回折環を表すことになる。この場合、画像処理部16は、複数の画像を1枚の回折環画像に合成する処理からは解

10

20

30

40

50

放される。

【0081】

図7は、本実施の形態における回折環計測装置に動作を示すフローチャートである。

【0082】

回折環計測装置10は、まずX線照射部14から計測対象物にX線ビームを照射し、同時に撮像部15により回折環を撮像する(ステップS10)。次に、画像処理部16は、撮像部15からの画素信号列から1枚の回折環画像を生成する(ステップS20)。さらに、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(ステップS30)。この解析ステップでは、図2に示したデータ処理すなわちフーリエ方式による回折環の分析を行う。出力部18は、データ処理部17による解析結果を出力する(ステップS40)。

10

【0083】

4つのステップS10～S40は、シリーズに処理してもよいし、より高速化(高フレームレート化)するためにはパイプライン処理により並列化してもよい。

【0084】

続いて、撮像部15のより具体的な構成について第1～第11の構成例について説明する。

【0085】

<撮像部の第1の構成例>

第1の構成例では、撮像部15は、1チップの第1の固体撮像素子を有している。この第1の固体撮像素子は、X線が通過する貫通孔と、円形の撮像エリアを有している。

20

【0086】

図8は、撮像部15の第1構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子200(第1の固体撮像素子)とを有する。

【0087】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子200が配置される。貫通孔152の直径は、計測対象物の結晶状態や測定面積に応じて選択すればよく、X線ビームの直径が1～2mm程度である場合、それよりも大きければよい。図9では、貫通孔152を明確にするために大きく描いている。

30

【0088】

固体撮像素子200は、円形の撮像エリア201と、中央部にX線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔202とを有し、計測対象物で回折したX線により形成される回折環を撮像するイメージセンサである。撮像エリア201は、撮像する回折環の直径以上のサイズを有する。たとえば、撮像部15の画素サイズが10 $\mu$ 位の場合は、計測対象物と撮像部15との距離は10mm程度でよい。この場合、回折環のサイズは計測対象物に依存するがおおよそ半径4～9mm程度が多いので、撮像エリア201のサイズ(短辺または内径)は10～20mm程度でよい。

【0089】

貫通孔202の直径は、貫通孔152の直径と同じでよい。

40

【0090】

また、計測対象物と撮像部15との距離を小さくすれば、撮像エリア201のサイズもX線の強度もより小さくすることができる。この点で、計測対象物と撮像部15との距離は、撮像部15の画素サイズや回折角の大きさ等に依存するが約30mm以下とすることが望ましい。

【0091】

図10は、図9の固体撮像素子200の構成例を示すブロック図である。同図では固体撮像素子200の撮像エリア201の構成を示している。撮像エリア201は、半径R方向に電荷を転送する複数のR転送部101と、複数の光電変換部102と、円周方向に電

50

荷を転送する 1 個の 転送部 1 0 3 とを含む。

【 0 0 9 2 】

複数の光電変換部 1 0 2 は、貫通孔を中央とする極座標に沿って配置され、例えば P N 接合を含むフォトダイオードより構成される。複数の光電変換部 1 0 2 のそれぞれの受光面積は、極座標の内側の光電変換部 1 0 2 の受光面積よりも大きい。たとえば光電変換部 1 0 2 の受光面積が半径に比例する大きさとしてもよい。

【 0 0 9 3 】

複数の R 転送部 1 0 1 は、貫通孔を中心に放射状に形成されている。複数の R 転送部 1 0 1 のそれぞれは、半径方向に並ぶ光電変換部 1 0 2 から信号電荷を一斉に受けて、半径方向の中心側に向けて信号電荷を順次転送する C C D である。

10

【 0 0 9 4 】

転送部 1 0 3 は、複数の R 転送部 1 0 1 から信号電荷を一斉に受けて、方向（つまり 転送部 1 0 3 の円周方向）に信号電荷を転送する C C D である。 転送部 1 0 3 の最終段にはアンプが形成されており、このアンプは 転送部 1 0 3 により 方向に転送される最終段の信号電荷を電圧に変換して出力する。

【 0 0 9 5 】

固体撮像素子 2 0 0 と、二次元状に直交配置されたフォトダイオードを備える直交 C C D イメージセンサとを比較すると、複数の R 転送部 1 0 1 は直交 C C D イメージセンサの複数の垂直 C C D に対応し、 転送部 1 0 3 は直交 C C D イメージセンサの水平 C C D に対応する。

20

【 0 0 9 6 】

1 つの固体撮像素子 2 0 0 により回折環の全周（つまり欠落のない完全な回折環）を撮像することができる。

【 0 0 9 7 】

第 1 の構成例における画像処理部 1 6 は、撮像部 1 5 から回折環の全周を表す回折環画像が得られることから、複数枚の画像を結合する処理から解放される。

【 0 0 9 8 】

第 1 の構成例におけるデータ処理部 1 7 は、光電変換部 1 0 2 が極座標に沿って配置されているため、回折環の半径を求める際に、直交座標から極座標に変換する処理が不要になり、解析処理が簡単で精度を向上させることができる。また、光電変換部 1 0 2 が半径に比例した受光面積を有することにより、計測対象物との距離や回折角に対する輝度の補正が容易あるいは不要になる。このように、データ処理部 1 7 の処理負荷が小さくかつ良好な精度を得ることができる。

30

【 0 0 9 9 】

なお、図 9 の光電変換部 1 0 2 は矩形状であるが、扇形または円弧状としてもよい。

【 0 1 0 0 】

なお、固体撮像素子 2 0 0 は、M O S 型の固体撮像素子であってもよい。

【 0 1 0 1 】

< 撮像部の第 2 の構成例 >

第 1 の構成例では、第 1 の固体撮像素子の撮像エリアが円形である例を説明したが、第 2 の構成例では第 1 の固体撮像素子の撮像エリアが矩形である例について説明する。

40

【 0 1 0 2 】

図 1 0 は、第 2 の構成例における撮像部の ( a ) 側面図および ( b ) 下面図である。同図のように撮像部 1 5 は、基台 1 5 1 と固体撮像素子 3 0 0 ( 第 1 の固体撮像素子 ) とを有する。

【 0 1 0 3 】

基台 1 5 1 は、X 線照射部 1 4 からの X 線ビームを通過させる貫通孔 1 5 2 を中央部に有し、下面に固体撮像素子 3 0 0 が配置される。

【 0 1 0 4 】

固体撮像素子 3 0 0 は、矩形状の撮像エリア 3 0 1 と、中央部に X 線照射部 1 4 からの

50

X線ビームを通過させる貫通孔302とを有し、計測対象物で回折したX線により形成される回折環を撮像するイメージセンサである。

【0105】

図11は、図10の固体撮像素子300の画素配置例を示す図である。固体撮像素子300は、二次元状に直交配置された複数の画素111を有する。ただし、画素111は、貫通孔302の近くには配置されない。

【0106】

固体撮像素子300は、たとえば、1つの半導体基板上に上半分（一点鎖線の上側）の画素111を有するCCDイメージセンサと、下半分（一点鎖線の下側）の画素111を有するCCDイメージセンサとを備える。上下2つのCCDイメージセンサの回路を対称に構成することにより、垂直転送パルス、水平転送パルス等の駆動信号を共通化することができる。上下2つのCCDイメージセンサの画素からの信号電荷の同時に読み出し可能なことから実質2倍速で読み出すことができる。

10

【0107】

この場合、画像処理部16は、上下2つのCCDイメージセンサからの得られる2つの画像を合成することにより回折環画像を生成する。この回折環画像では欠落のない回折環の全周が表現される。

【0108】

なお、図11では、1つの半導体基板上に上下2つのCCDイメージセンサを形成する構成について説明したが、左右に2つ、斜め方向に2つのCCDイメージセンサを構成してもよいし、全光電変換部をもれなく分担する複数のCCDイメージセンサを構成してもよい。また、固体撮像素子300は、CCDイメージセンサではなくMOSイメージセンサにより構成してもよい。

20

【0109】

<撮像部の第3の構成例>

第3の構成例では、撮像部15は、複数の第2の固体撮像素子を有している。複数の第2の固体撮像素子は、X線照射部から照射されるX線を中心として、X線と直交する平面に配置される。ここでは、複数の第2の固体撮像素子が2つである例を説明する。

【0110】

図12は、第3構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子400a、400b(2つの第2の固体撮像素子)とを有する。

30

【0111】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子400a、400bが配置される。

【0112】

固体撮像素子400aは、撮像エリア401aを有する。固体撮像素子400bは、撮像エリア401bを有する。

【0113】

第3の構成例では、固体撮像素子400a、400bはいずれも貫通孔を有しないので、貫通孔を有する第1の固体撮像素子よりも製造コストを低減することができる。

40

【0114】

また、第3の構成例における画像処理部16は、2つの第2の固体撮像素子により撮像された画像を合成することにより回折環画像を生成する。この回折環画像には回折環に欠落が生じるが、データ処理部17の解析手法によっては欠落を十分に許容できる。

【0115】

<撮像部の第4の構成例>

第3の構成例では、複数の第2の固体撮像素子が2つの例を説明したが、4つの例を説明する。

【0116】

50

図13は、第4の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子500a~500d(4つの第2の固体撮像素子)とを有する。

【0117】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子500a~500dが配置される。

【0118】

固体撮像素子500aは、撮像エリア501aを有する。固体撮像素子500b~500dも、同様に撮像エリア501b~501dをそれぞれ有する。

【0119】

第4の構成例では、固体撮像素子500a~500dはいずれも貫通孔を有しないので、貫通孔を有する第1の固体撮像素子よりも製造コストを低減することができる。

【0120】

また、第4の構成例における画像処理部16は、4つの第2の固体撮像素子により撮像された画像を合成することにより回折環画像を生成する。この回折環画像には回折環に欠落が生じるが、データ処理部17の解析手法によっては欠落を十分に許容できる。

【0121】

<撮像部の第5の構成例>

第4の構成例では、複数の第2の固体撮像素子が4つの例を説明したが、第5の構成例では10個の例を説明する。

【0122】

図14は、第5の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子600a~600j(10個の第2の固体撮像素子)とを有する。

【0123】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子600a~600jが配置される。

【0124】

固体撮像素子600aは、撮像エリア601aを有する。固体撮像素子600b~600jも、同様に撮像エリア601b~601jをそれぞれ有する。

【0125】

また、第5の構成例における画像処理部16は、10個の第2の固体撮像素子により撮像された画像を合成することにより回折環画像を生成する。

【0126】

<撮像部の第6の構成例>

第5の構成例では、複数の第2の固体撮像素子が10の例を説明したが、第6の構成例では12個の例を説明する。

【0127】

図15は、第6の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子700a~700l(12個の第2の固体撮像素子)とを有する。

【0128】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子700a~700lが配置される。

【0129】

固体撮像素子700aは、撮像エリア701aを有する。固体撮像素子700b~700lも、同様に撮像エリア701b~701lをそれぞれ有する。

【0130】

また、第6の構成例における画像処理部16は、12個の第2の固体撮像素子により撮像された画像を合成することにより回折環画像を生成する。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 3 1 】

< 撮像部の第7の構成例 >

第7の構成例では、撮像部15が複数の第2の固体撮像素子を有し、かつ、複数の第2の固体撮像素子のそれぞれが、貫通孔を中心とする扇形から扇央を含む扇形部分を除外した形状をもつ撮像エリアを有している。また、複数の第2の固体撮像素子は、貫通孔を中央とする極座標に沿って配置された複数の光電変換部を有する。さらに、複数の光電変換部のそれぞれの受光面積は、極座標の内側の光電変換部の受光面積よりも大きくなっている。

## 【 0 1 3 2 】

図16Aは、第7の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と固体撮像素子800a~800d(4つ第2の固体撮像素子)とを有する。

10

## 【 0 1 3 3 】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に固体撮像素子800a~800dが配置される。

## 【 0 1 3 4 】

固体撮像素子800aは、撮像エリア801aを有する。固体撮像素子800b~800dも、同様に撮像エリア801b~801dをそれぞれ有する。

## 【 0 1 3 5 】

撮像エリア801aは、貫通孔を中心とする扇形から扇央を含む扇形部分を除外した形状を有し、貫通孔を中央とする極座標に沿って配置された複数の光電変換部を有する。撮像エリア801aは、図9に示した極座標のCCDイメージセンサのうちほぼ1/4(ほぼ90度)に相当する部分と同じ回路構成を有する。撮像エリア801b~801dも同様である。たとえば、固体撮像素子800a~800dの配置には隙間があるので、撮像エリア801aは図9に示したCCDイメージセンサの1/4(90度)よりも少し小さくなる。

20

## 【 0 1 3 6 】

画像処理部16は、複数の第2の固体撮像素子により撮像された画像から回折環画像を生成する。

## 【 0 1 3 7 】

第7の構成例では、回折環画像には回折環に欠落が生じるものの、極座標なので第1の構成例と同様の効果が得られ、しかも、第1の構成例よりもコストを低減することができる。

30

## 【 0 1 3 8 】

なお、図16Aに示した固体撮像素子800a~800dの外形は矩形であるが、図16Bのような形状および配置にしてもよい。図16Bでは、固体撮像素子810a~810dの扇央部分に該当する一部分を扇状に切り欠いた外形になっている。こうすれば、固体撮像素子810a~810d間の配置の隙間を0にすることが、または小さくすることができる。図16Bの撮像エリア811a~811dにより撮像される回折環の欠落は、図16Aと比べてより少なくすることができる。

40

## 【 0 1 3 9 】

なお図16Bの切欠きは、扇状でなくてもよく、斜め45度でもよい。

## 【 0 1 4 0 】

< 撮像部の第8の構成例 >

第8の構成例では、複数の第2の固体撮像素子は5つ以上のラインセンサである例を説明する。5つ以上のラインセンサは貫通孔を中心に放射状に配置される。また、画像処理部は、5つ以上のラインセンサにより撮像された画像から回折環画像を形成する。

## 【 0 1 4 1 】

図17は、第8の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と16本のラインセンサ900a~900pとを有

50

する。

【0142】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に16本のラインセンサ900a～900pが放射状に配置される。

【0143】

ラインセンサ900aは、直線状に並ぶ複数の光電変換部（フォトダイオード）を有する。複数の光電変換部のそれぞれの受光面積は、放射状の内側の光電変換部の受光面積よりも大きく形成されている。たとえば光電変換部の受光面積が半径に比例する大きさとしてもよい。ラインセンサ900b～900pも同様である。

【0144】

第7の構成例では、回折環画像には回折環に欠落が生じるものの、第1の構成例と同様の効果が得られ、しかも、第1の構成例よりもコストを低減することができる。

【0145】

<撮像部の第9の構成例>

第8の構成例では、複数の第2の固体撮像素子が16本のラインセンサである例を説明したが、第9の構成例では、複数の第2の固体撮像素子が32本のラインセンサである例を説明する。

【0146】

図18は、第8の構成例における撮像部の(a)側面図および(b)下面図である。同図のように撮像部15は、基台151と16本のラインセンサ901～932とを有する。

【0147】

基台151は、X線照射部14からのX線ビームを通過させる貫通孔152を中央部に有し、下面に32本のラインセンサ901～932が放射状に配置される。

【0148】

ラインセンサ901は、例えば、直線状に並ぶ複数の光電変換部（フォトダイオード）と、それと並列に配置されたCCDとを有するCCDリニアイメージセンサである。

【0149】

複数の光電変換部のそれぞれの受光面積は、放射状の内側の光電変換部の受光面積よりも大きく形成されている。たとえば光電変換部の受光面積が半径に比例する大きさとしてもよい。ラインセンサ902～932も同様である。

【0150】

なお、ラインセンサ901～932は、CCDリニアイメージセンサに限らずMOSリニアイメージセンサで構成してもよい。

【0151】

第9の構成例では、回折環画像には回折環に欠落が生じるものの、第1の構成例と同様の効果が得られ、しかも、第1の構成例よりもコストを低減することができる。

【0152】

<撮像部の第10の構成例>

第10の構成例では、第8の構成例におけるラインセンサの基台への取り付け角度に傾きを持たせる例について説明する。

【0153】

図19は、第10の構成例における撮像部の(a)断面図および(b)下面図である。同図の(a)は、同図の(b)のA-A線で垂直に切った断面図である。同図のように基台152は、円錐状の内面形状を下面にもち、X線照射部から照射されるX線を通過させる貫通孔を円錐形状の頂点部分に有している。

【0154】

第10の構成例は、第8の構成例と比較して、計測対象物からの回折X線と、ラインセンサとの角度を90度に近づけるので、回折環画像の精度を向上させることができる。

【0155】

10

20

30

40

50

< 撮像部の第 11 の構成例 >

第 10 の構成例では 16 本のラインセンサを有する例を説明したが、第 11 の構成例では 32 本のラインセンサを有する例について説明する。

【0156】

図 20 は、第 11 の構成例における撮像部の (a) 断面図および (b) 下面図である。同図の (a) は、同図の (b) の A - A 線で垂直に切った断面図である。同図のように基台 152 は、円錐状の内面形状を下面にもち、X 線照射部から照射される X 線を通過させる貫通孔を円錐形状の頂点部分に有している。

【0157】

第 11 の構成例は、第 10 の構成例と比較して、回折環画像の精度をより向上させることができる。

10

【0158】

なお、第 10 および第 11 の構成例においてラインセンサの傾き (円錐形状の下面の傾き) は、回折環が出現する方向、計測対象物の種類等に応じて設定すればよい。また、基台 152 は、下面の傾きを任意に設定可能な機構を備えてもよい。たとえば、X 線照射管を軸としてラインセンサを骨に対応させた傘のような構成としてもよい。この場合の傘の骨およびラインセンサは直線状であってもよいし、球の内面に沿う曲線状であってもよい。また、図 8 ~ 図 20 に示した第 1 または第 2 の固体撮像素子の形状は、円錐形状の内面あるいは球の内面に沿う形状としてもよい。

【0159】

20

なお、図 19 または図 20 においてラインセンサの本数は、2 本以上であればよく、回折環として取り扱うためにより望ましくは 5 本以上であればよい。

【0160】

また、撮像部 15 は取り外し可能な構成としてもよい。例えば (a) X 線ビームが通過する貫通孔を中央部に有し、回折環を撮像する第 1 の固体撮像素子、および、(b) 回折環の互いに異なる部分を撮像する複数の第 2 の固体撮像素子の何れか一方ではなく、両方を備え、選択あるいは交換可能な構成としてもよい。また、上記の第 1 ~ 第 11 の構成例の 2 つ以上の撮像部を備え、選択あるいは交換可能な構成としてもよい。

【0161】

以上説明してきた回折環分析装置の変形例によれば、貫通孔をもつ第 1 の固体撮像素子、または、複数の第 2 の固体撮像素子により回折環を撮像するので、回折環の撮像から解析までをリアルタイムに行うことができる。さらに、回折環の一部が欠落している場合であっても、本発明のフーリエ方式により正確に分析することができる。

30

【0162】

(実施の形態 2)

次に、実施の形態 2 における X 線回折分析法および装置について説明する。

【0163】

まず、従来技術および実施の形態 1 における望ましい改善点について説明する。

【0164】

実施の形態 1 における X 線回折分析法 (回折環分析方法) は、円環状の回折環 (デバイ環) の情報を全周分活用して被測定物のひずみ、応力を求める方法を開示している。また従来は X 線回折によるデバイ環の取得は非特許文献 2 で開示され、非特許文献 1 で発展されたイメージングプレート (IP) による方法が一般的であったが、実施の形態 1 における固体撮像素子 (CCD、MOS センサーなど) を利用した方法では分析装置 (回折環計測装置) の構成が簡便になり、かつ測定が高速に行えることが期待される。

40

【0165】

しかし X 線回折環を利用した応力、ひずみの測定を精度良く行うには X 線の照射方向から回折像を撮影する必要があり (図 30)、どうしても回折像の撮像素子の中心に穴を開ける必要がある。これは写真フィルムや IP のような撮像素子では問題にならなかったが、固体撮像素子で実現するには新規に固体撮像素子を設計したり、製作した固体撮像素子

50

の中央に穴を開けたりするなどの特殊な作業が必要となり、開発・製作コストの増大を招く。一方、一般的な矩形の固体撮像素子をX線ビームを中心として並べる方式（例えば図12、図13等）ではどうしても固体撮像素子同士の間隙に隙間ができてしまうが、その状態で取得したデータにそのまま非特許文献1、非特許文献2や特許文献1の解析方法を適用したのでは得られる応力値に誤差が生じる。

【0166】

以上のことから、固体撮像素子を利用してより低コストのX線ひずみ、応力分析装置を実現するためには隙間の空いた固体撮像素子から得られた、一部の欠けている回折環から正確に応力を分析する方法が必要である。

【0167】

実施の形態1における回折環分析装置および方法に対して本実施の形態では、以下の点の改善を図っている。

【0168】

この点で、実施の形態1では回折環を利用した従来方式の応力・ひずみ解析方法（cos法）では回折環の一部または複数部分が欠けていると応力・ひずみの計算が全くできないか、計算できても誤差が大きくなることを指摘した。また実施の形態1の解析方法を利用すればそのような場合でも応力・ひずみを精度良く計算できる可能性を示唆した。

【0169】

回折環の一部、または複数部分が欠けてしまう場合として第一に被測定物そのものの性質が原因の場合が考えられる。その例としては非特許文献3のように結晶粒が粗大である場合があげられる。非特許文献3ではそのような場合の対策として、被測定物を少しずつ平行移動しながら測定を行う、試料平面揺動法を提案しているが、この方法では機械的に試料を移動させる機構が必要となり、測定装置が大掛かりになってしまう。また通常のX線単一照射の場合と比較して測定時間が長くなってしまふ。

【0170】

回折環の一部、または複数部分が欠けてしまう第二の場合として、図12、図13等のように、固体撮像素子（CCD、MOSセンサーなど）で回折環を撮像する場合がある。従来はイメージングプレート（IP）による撮像が一般的であったが、IPの場合には撮像の後でレーザー光を照射して読み取る必要が有るため、そのための光学系とIPを回転させる機構が必要であり、コストと測定時間の両面で不利である。一方固体撮像素子を利用すると読み取り時間の短縮と読み取り機構の簡略化が可能である。しかしX線による応力・ひずみの測定では固体撮像素子の中央に穴を開ける必要があり（図30）、コスト的に不利である。そこで一般的な矩形の固体撮像素子を何枚か並べて回折環の読み取りをする方式（例えば、図12、図13等）が考えられるが、その場合、どうしても固体撮像素子同士の間隙に撮像できない部分ができてしまい、回折環が不完全になる。

【0171】

以上説明した改善すべき点について、実施の形態2では、回折環の一部または複数部分が欠けている場合でも正確に応力・ひずみを計算する方法を説明する。

【0172】

（実施の形態2の概要）

次に、実施の形態2の概要について説明する。

【0173】

実施の形態1は回折環の変形を中心角の関数として（ ）とする場合、（ ）のフーリエ級数の係数（以下フーリエ係数）と応力・ひずみに対応関係があることを開示した。従って回折環の一部または複数部分が欠けている場合でもフーリエ係数が精度良く推定できれば応力・ひずみを精度良く求めることができる。

【0174】

また一般に（ ）をフーリエ級数に展開した場合には の係数が小さい項、特にcos、sin、cos<sup>2</sup>、sin<sup>2</sup>の4項に応力・ひずみの情報が集中して含まれていて、 の係数が大きい項は係数が0とみなせる場合が多い。従って観測点の数に合わせてフーリエ

10

20

30

40

50

級数を適当な項で打ち切ることにより精度の良い近似が可能になる。

【0175】

具体的には ( ) を回折環上の  $2k$  点または  $2k + 1$  点で測定した場合、フーリエ級数展開で

【数31】

$$\varepsilon(\alpha) = a_1 + a_2 \cos \alpha + a_3 \sin \alpha + a_4 \cos 2\alpha + a_5 \sin 2\alpha + \dots + a_{2k} \cos k\alpha \quad (2.1)$$

または

$$\varepsilon(\alpha) = a_1 + a_2 \cos \alpha + a_3 \sin \alpha + a_4 \cos 2\alpha + a_5 \sin 2\alpha + \dots + a_{2k+1} \sin k\alpha \quad (2.2)$$

の  $2k$  個または  $2k + 1$  個の係数を決定可能である。一方、被測定物で平面応力状態が成り立っている場合、実施の形態1から  $\sin 2$  の項の係数 ( $a_4$ ) までフーリエ係数が決定すれば応力を完全に決定することができる。従って一部または複数部分が欠けている回折環でも最低5点で ( ) を測定すれば応力を決定することができる。

10

【0176】

すなわち、本実施の形態における回折環分析方法は、回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射し、特定部分から反射される回折ビームにより形成される回折環の変形を測定し、測定結果を、フーリエ級数又は同等の直交級数に変換するフーリエ変換を行うことにより回折環を分析する。ここで、上記の測定において、測定点数を決定し、上記の分析において、測定点数に見合った項数のフーリエ級数で回折環を近似し、計測対象物の応力、ひずみを求めるようにしてもよい。

20

【0177】

また、上記の分析において、回折環の変形をフーリエ級数による行列として表記し、その逆行列を利用してフーリエ級数の係数(以下フーリエ係数とする)、計測対象物の応力、ひずみ状態を分析してもよい。

【0178】

ここで、上記の分析において、回折環の一部または複数部分が欠けている場合に、回折環を表現する行列のうち、欠けている部分の角度に対応する行を取り去り、同じ数だけ応力・ひずみ測定に影響の小さい列を取り去った行列を作り、その逆行列を利用してフーリエ係数、応力、ひずみを計算するようにしてもよい。影響の小さい列というのは、取り去らない他の列よりも影響の小さい列をいう。また、取り去る列の数は取り去った行の数と同じでなくてもよい。

30

【0179】

以上のフーリエ級数決定法を一般化して、回折環上の任意の点数の測定データから ( ) の係数を決定する具体的な計算方法を開示し、合わせてその場合の計算精度の見積もり方法も開示する。

【0180】

実施の形態2の回折環分析方法によれば、次のような効果がある。すなわち、被測定物の性質で回折環に欠落がある場合でも応力・ひずみを分析し、かつ精度を向上させることができる。また汎用の固体撮像素子などを隙間のある状態で配置して撮像した回折環からも応力・ひずみを精度良く求めることが可能になる。これによってX線回折による応力・ひずみの分析装置を現在よりも柔軟に構成することが可能になり、低価格化、測定時間の短縮が実現できる。

40

【0181】

また本実施の形態で開示する計算方法によれば、回折環が欠けた状態から計算したフーリエ係数の誤差を、完全な回折環の場合と比較して計算することができるため、最終的に求めた応力・ひずみの信頼性を評価することが可能になる。

【0182】

(実施の形態2の詳細)

本実施の形態における回折環分析装置の構成は、実施の形態1と同様であり、また、第1～第11の構成例のそれぞれに対して適用可能である。よって、回折環分析装置の構成

50

については繰り返しの説明を避けて、主に回折環分析方法について詳細に説明する。

【0183】

< デバイ環の行列表示 >

本実施の形態では、まず実施の形態1で開示されたデバイ環のフーリエ級数展開の派生として行列表示を導入する。この表示自体、デバイ環からの応力計算方法として利用可能である。

【0184】

いまデバイ環の変形 ( ) のフーリエ級数が

【数32】

$$\varepsilon(\alpha) = a_1 + a_2 \cos \alpha + a_3 \sin \alpha + a_4 \cos 2\alpha + a_5 \sin 2\alpha + \dots \quad (2.3)$$

10

で表わされるものとする。この ( ) を中心角  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  の n 個の測定点で測定する場合

【数33】

$$\begin{aligned} \varepsilon(\alpha_1) &= a_1 + a_2 \cos \alpha_1 + a_3 \sin \alpha_1 + a_4 \cos 2\alpha_1 + a_5 \sin 2\alpha_1 + \dots \\ \varepsilon(\alpha_2) &= a_1 + a_2 \cos \alpha_2 + a_3 \sin \alpha_2 + a_4 \cos 2\alpha_2 + a_5 \sin 2\alpha_2 + \dots \\ \varepsilon(\alpha_3) &= a_1 + a_2 \cos \alpha_3 + a_3 \sin \alpha_3 + a_4 \cos 2\alpha_3 + a_5 \sin 2\alpha_3 + \dots \\ &\vdots \\ \varepsilon(\alpha_n) &= a_1 + a_2 \cos \alpha_n + a_3 \sin \alpha_n + a_4 \cos 2\alpha_n + a_5 \sin 2\alpha_n + \dots \end{aligned} \quad (2.4)$$

20

である。ただし円周を等間隔に分割する場合、 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 2\pi/n, \dots, \alpha_n = 2\pi(n-1)/n$  (単位はラジアン) である。式(2.4)は図2-1のような  $n \times n$  行列 M を用いて

【数34】

$$\varepsilon = Mx \quad (2.5)$$

と表すことができる。ただし  $x$  および  $x$  は

【数35】

$$\varepsilon \equiv \begin{pmatrix} \varepsilon(\alpha_1) \\ \varepsilon(\alpha_2) \\ \vdots \\ \varepsilon(\alpha_n) \end{pmatrix}, \quad x \equiv \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

30

で表わされる n 次元のベクトルである。式(2.5)が本実施の形態で導入するデバイ環の行列表示である。フーリエ級数が直交基底であることから M には逆行列が存在し、 $x$  を

【数36】

$$x = M^{-1}\varepsilon \quad (2.6)$$

のように求めることができるが通常はより高速に計算できる高速フーリエ変換(FFT)を用いる。これにより式(2.3)の最初の n 個の係数を決定し、被測定物の応力・ひずみを求めることができる。

40

【0185】

< 欠けているデバイ環の再現 >

次に回折環が欠けている場合を説明する。回折環の k 箇所 {  $i_1, i_2, \dots, i_k$  } ( $k < n$ ) の測定値が得られなかったものとする。このとき  $i_1, i_2, \dots, i_k$  から {  $i_1, i_2, \dots, i_k$  } を取り除いた  $n - k$  次元のベクトル  $\varepsilon'$ 、行列 M の {  $i_1, i_2, \dots, i_k$  } 行を取り除いた ( $n - k$ ) 行 n 列の行列  $M_1$  を考えると

【数37】

$$M_1 x = \varepsilon' \quad (2.7)$$

50

である。行列  $M_1$  の逆行列は存在しないので式(2.7) を逆行列で解くことはできない。

【0186】

式(2.7) を解くために  $x$  について仮定を置く。理想的な平面応力状態の試料の回折環では  $x_k = 0$  ( $k > 5$ ) であり、多くの場合に  $k$  は 5 より十分大きくて  $x_k$  は 0 とみなせるはずである。

【0187】

したがって  $m$  次元のベクトル

【数38】

$$x' = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \quad (m \leq n - k)$$

10

を導入すると

【数39】

$$M_3 x' = \varepsilon'$$

と表すことができる。ただし、行列  $M_3$  は行列  $M_1$  の  $m + 1$  列目以降を取り除いた ( $n - k$ ) 行  $m$  列の行列 ( $m \times (n - k)$ ) である。行列  $M_3$  の逆行列は存在しないが擬似逆行列 (つまり一般逆行列)  $M_3^-$  を用いると

【数40】

$$x' = M_3^- \varepsilon' \quad (2.8)$$

20

から  $x$  が得られ、試料の応力を推定することができる。例えば  $x_2 = a_1$  であることを用いると、式(21)から

【数41】

$$\sigma_x = -\frac{2E}{1 + \nu \sin 2\eta \sin 2\psi_0} \cdot x_2 \quad (2.9)$$

のように試料長手方向の応力  $\sigma_x$  を求めることができる。ここで  $E$  は X 線のヤング率、ポアソン比で、 $\eta$  および  $\psi_0$  は測定系により定まる角度である。

【0188】

<実験>

30

本実施の形態における回折環分析方法を検証するために回折環像を撮影するイメージングプレート (IP) の前に置いて回折環を欠けさせるマスクを作成し、応力の測定実験を行った。使用した試料は Proto 社の  $\alpha$ -Fe の応力試験片で、詳細は図 2.2 の通りである。なお同図中の X-ray elastic constant は X 線のヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  を用いて

【数42】

$$\frac{1}{2} S_2 \equiv \frac{1 + \nu}{E}$$

で表わされる。試料の応力  $\sigma_x$  の定格値は

【数43】

$$\sigma_x = -443 \pm 35 \text{ (MPa)} \quad (2.10)$$

40

で、Rigaku MSF-3 と Cr-K を用いた測定で同様の値が得られた。

【0189】

次に図 2.2 で用いた試料の応力を実施の形態 1 の方式で測定した。測定に使用した装置はパルステック社の  $\mu$ -X360 で、測定に使用した特性 X 線は Cr-K である。回折環像の解像度は円周方向が  $0.72^\circ$  で、動径方向が  $50 \mu\text{m}$  である。この回折環像より ( ) を  $10^{-4}$  程度の精度で決定している。また  $\psi_0$  (図 3.0 を参照) については、 $\psi_0 = 45^\circ$  とした。また一部が欠けた回折環を作るため、厚紙でマスクを作り IP の直前に置いた。0.35 mm 厚の厚紙を 2 枚重ねたところ回折 X 線を完全に遮断するこ

50

とができた。実際に使用したマスクを図 2 3 に示す。例えば、M a s k B は図 1 2 に対応する。何れのマスクも実施の形態 1 における、複数の固体撮像素子を備える回折環分析装置の構成等による測定を模写するために使用される。各マスクを用いた測定で 1 5 0 秒の露光を 1 0 回ずつ行ない、平均値と標準偏差を求めた。マスク無しの場合と、マスクで回折を遮った場合の回折環像を図 2 4 に示す。またそれぞれのマスクについて、データ解析に利用した の範囲は図 2 5 の通りである。

【 0 1 9 0 】

最初に完全な回折環像から図 2 2 の値を用い、実施の形態 1 の回折環分析方法に従って  $x$  を求めたところ

【数 4 4】

$$\sigma_x = -418 \pm 3 \quad (\text{MPa}) \quad (2.11)$$

であった。この結果は式(2.10) の定格値と同等である。

【 0 1 9 1 】

次にこの完全な回折環像から m a s k A の回折環像と同じ形になるよう、データを取り除いて を模擬し、m の値を変えながら式(2.8) より  $x$  を求めた。それより得られた  $x$  と完全な回折環から求めた  $x$  との比較例を図 2 6 に示す。この例では  $m = 5$  のときに両者の差が最も小さくなる。

【 0 1 9 2 】

他の測定データについても傾向は同じで、 $m = 5$  の時に完全な回折環像から求めた値に最も近い応力値が得られた。他のマスク形状についても同じ傾向が見られたので、以下では特に断らない限り  $m = 5$  として求めた応力値で議論を進める。なお、図 2 6 では 1 回の測定による  $x$  を見ているため、式(2.11) の平均値とは違う値を取る。

【 0 1 9 3 】

以上の処理をそれぞれのマスクの測定データに対してほどこした結果を図 2 7 に示す。同図中の  $\mu - X 3 6 0$  の列は、 $\mu - X 3 6 0$  付属ソフトウェアの表示値で、これは cos 法で応力値を計算しているが、回折環の一部が欠けている場合には一般的な補完法でデータを補っている。本実施の形態の方式 (Proposed technique の列) の応力値は  $m = 5$  として式(2.2) および(2.9) から計算した。また同図中の “Specification” は応力標準の公称値を、“N o M a s k ” は回折環が完全だった場合の解析値を示している。

【 0 1 9 4 】

$\mu - X 3 6 0$  付属のソフトウェアによる応力値は回折環の一部が欠けている場合には誤差を考慮しても公称値、あるいは “N o m a s k ” の値と一致しない。一方、提案方式では “M a s k A ” の値がわずかに公称値より小さいが、それ以外では公称値あるいは回折環が完全な場合と同等である。 $\mu - X 3 6 0$  付属のソフトウェアによる応力と提案方式を比較すると、いずれの場合でも本実施の形態の方式の方がより公称値に近い値が得られた。

【 0 1 9 5 】

< まとめ >

本実施の形態では、回折環のひずみのフーリエ級数展開を利用して、回折環の一部が欠けている場合の応力の推定方法を開示した。すなわち、本実施の形態における回折環分析方法は、回折する性質をもつビームを計測対象物の特定部分に照射し、特定部分から反射される回折ビームにより形成される回折環の変形を測定し、測定結果を、フーリエ級数又は同等の直交級数に変換するフーリエ変換を行うことにより回折環を分析する。このとき、上記の測定において、測定点数を決定し、上記の分析において、測定点数に見合った項数のフーリエ級数で回折環を近似し、計測対象物の応力、ひずみを求める。上記の分析において、回折環の一部または複数部分が欠けている場合に、回折環を表現する行列のうち、欠けている部分の角度に対応する行を取り去り、同じ数だけ応力・ひずみ測定に影響の小さい列を取り去った行列を作り、その擬似逆行列 (つまり一般化逆行列) を利用してフーリエ係数、応力、ひずみを計算する。なお、取り去る列の数は、取り去った行の数と同

10

20

30

40

50

じ数でなくてもよい。同じ数であればこの擬似行列は正方行列になり、同じ数でなければ正方行列にならない。つまり、この擬似逆行列は正方行列でなくてもよい。

【 0 1 9 6 】

また応力試験片で実際に一部が欠けている回折環像を撮像し、実施の形態 2 の回折環分析方法を適用して長手方向の応力  $x$  を求めた。その結果多くの場合で適正な応力値を推定することができ、単純な補間法と  $\cos$  法の組み合わせによる推定より良好な結果を得ることができた。

【 0 1 9 7 】

< 単純な例 >

本実施の形態における回折環分析方法の理解を容易にするため、単純な例で計算方法を説明する。まず、回折環の測定における測定点数の例を図 2 8 に示す。図 2 8 は回折環を  $=0$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 、 $\pi$ 、 $5\pi/4$ 、 $3\pi/2$ 、 $7\pi/4$  の 8 点で測定する場合の説明図である。同図は、回折環を  $n = 8$  に分割して ( ) を測定する場合を示している。

10

【 0 1 9 8 】

つぎに、測定点数  $n = 16$  とし、回折環を 16 に分割して ( ) を測定する場合を考える。測定点を等間隔にとると

【 数 4 5 】

$$\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{16}, \quad \alpha_3 = \frac{\pi}{8}, \quad \dots, \quad \alpha_{16} = \frac{31\pi}{16}$$

20

である。ただし単位はラジアンである。これより式(2.4) の行列 M は

【 数 4 6 】

$$\begin{aligned}
 M &= \begin{pmatrix} 1 & \cos 0 & \sin 0 & \cos 0 & \sin 0 & \dots & \sin 0 \\ 1 & \cos \frac{\pi}{16} & \sin \frac{\pi}{16} & \cos \frac{\pi}{8} & \sin \frac{\pi}{8} & \dots & \sin \frac{7\pi}{16} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos \frac{31\pi}{16} & \sin \frac{31\pi}{16} & \cos \frac{31\pi}{8} & \sin \frac{31\pi}{8} & \dots & \sin \frac{217\pi}{16} \end{pmatrix} \\
 &\equiv \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} & m_{1,5} & \dots & m_{1,16} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & m_{2,4} & m_{2,5} & \dots & m_{2,16} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{16,1} & m_{16,2} & m_{16,3} & m_{16,4} & m_{16,5} & \dots & m_{16,16} \end{pmatrix} \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

30

の  $16 \times 16$  行列になる。また

【 数 4 7 】

$$\varepsilon(\alpha) = 1 + 0.1 \cos \alpha + 0.02 \sin \alpha - 0.01 \cos 2\alpha - 0.001 \sin 2\alpha$$

とすると

【 数 4 8 】

$$x = (1, 0.1, 0.02, -0.01, -0.001)^T \quad (2.16)$$

40

である。同様に  $\beta$  は

【 数 4 9 】

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= (1.090, 1.092, 1.084, 1.063, 1.030, 0.988, 0.944, 0.909, \\
 &\quad 0.890, 0.892, 0.914, 0.950, 0.990, 1.028, 1.058, 1.078)^T \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

である。ただし測定の丸め誤差を模擬するために  $\varepsilon$  の値は小数点以下 3 桁に丸めた。

【 0 1 9 9 】

式(2.15)、(2.16)、(2.17) の M、 $x$ 、 $\varepsilon$  は式(2.5) を満たすから、式(2.6) より

50

【数 5 0】

$$x = M^{-1}\varepsilon$$

$$= (1.000, 0.100, 0.020, -0.010, -0.001 \dots)^T \quad (2.18)$$

のように  $x$  を推定することができる。この結果は式(2.16)の初期設定をよく再現している。

【0 2 0 0】

次に回折環の一部が欠けている場合を考える。

【0 2 0 1】

回折環のひずみは円周角の関数として ( ) と表されるが、いま回折環の一部が欠けている場合を窓関数  $h( )$  を用いて、

【数 5 1】

$$\varepsilon'(\alpha) \equiv h(\alpha)\varepsilon(\alpha)$$

のように表す。ただし、 $h( )$  は、

【数 5 2】

$$h(\alpha) \equiv \begin{cases} 1 & \text{回折環が測定できた場合} \\ 0 & \text{回折環が測定できなかった場合} \end{cases}$$

で定義し、回折環が測定できなかった場合は  $h( ) = 0$  であるものとする。

【0 2 0 2】

いま窓関数を

【数 5 3】

$$h(\alpha) = \begin{cases} 1 & \left( 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \leq \alpha < 2\pi \right) \\ 0 & \left( \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (2.19)$$

とすると のうち(1,2,3,4,5,13,14,15,16)番目の要素が欠けることになる。これより  $\varepsilon'$  は

【数 5 4】

$$\varepsilon' = (0.988, 0.944, 0.909, 0.890, 0.892, 0.914, 0.950)^T \quad (2.20)$$

であり式(2.7)の  $M^{-1}$  は

【数 5 5】

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} m_{6,1} & m_{6,2} & m_{6,3} & m_{6,4} & m_{6,5} & \dots & m_{6,16} \\ m_{7,1} & m_{7,2} & m_{7,3} & m_{7,4} & m_{7,5} & \dots & m_{7,16} \\ m_{8,1} & m_{8,2} & m_{8,3} & m_{8,4} & m_{8,5} & \dots & m_{8,16} \\ m_{9,1} & m_{9,2} & m_{9,3} & m_{9,4} & m_{9,5} & \dots & m_{9,16} \\ m_{10,1} & m_{10,2} & m_{10,3} & m_{10,4} & m_{10,5} & \dots & m_{10,16} \\ m_{11,1} & m_{11,2} & m_{11,3} & m_{11,4} & m_{11,5} & \dots & m_{11,16} \\ m_{12,1} & m_{12,2} & m_{12,3} & m_{12,4} & m_{12,5} & \dots & m_{12,16} \end{pmatrix}$$

の  $7 \times 16$  行列になる。ただし  $M^{-1}$  の要素  $m_{i,j}$  の値は式(2.15)で定義されているとおりである。 $M^{-1}$  の逆行列は存在しないが、8列目以降を取り除いた  $7 \times 7$  の対称行列  $M^{-2}$

【数 5 6】

$$M_2 = \begin{pmatrix} m_{6,1} & m_{6,2} & m_{6,3} & m_{6,4} & m_{6,5} & m_{6,6} & m_{6,7} \\ m_{7,1} & m_{7,2} & m_{7,3} & m_{7,4} & m_{7,5} & m_{7,6} & m_{7,7} \\ m_{8,1} & m_{8,2} & m_{8,3} & m_{8,4} & m_{8,5} & m_{8,6} & m_{8,7} \\ m_{9,1} & m_{9,2} & m_{9,3} & m_{9,4} & m_{9,5} & m_{9,6} & m_{9,7} \\ m_{10,1} & m_{10,2} & m_{10,3} & m_{10,4} & m_{10,5} & m_{10,6} & m_{10,7} \\ m_{11,1} & m_{11,2} & m_{11,3} & m_{11,4} & m_{11,5} & m_{11,6} & m_{11,7} \\ m_{12,1} & m_{12,2} & m_{12,3} & m_{12,4} & m_{12,5} & m_{12,6} & m_{12,7} \end{pmatrix}$$

10

には逆行列が存在し、これから  $x$  の最初の 7 要素  $x$  を求めると

【数 5 7】

$$\begin{aligned} x' &= M_2^{-1} \varepsilon' \\ &= (1.019, 0.130, 0.022, 0.004, 0.002, 0.003, 0.001)^T \end{aligned} \quad (2.21)$$

となる。式(2.21) と(2.16) および(2.18) を比較すると、(2.21) の精度が悪化している ( $x_2$  で約 30%) ことがわかる。これは  $M$  の最小の固有値の絶対値が約 3 であるのに対し、 $M_2$  の最小の固有値の絶対値が 0.01 と非常に小さいことから計算誤差が大きくなったためである。

20

【0 2 0 3】

精度が悪化した原因の一つに、式(2.21) では  $x$  を 7 項まで評価していることがあげられる。すなわち

【数 5 8】

$$\varepsilon(\alpha) = x_1 + x_2 \cos \alpha + x_3 \sin \alpha + x_4 \cos 2\alpha + x_5 \sin 2\alpha + x_6 \cos 3\alpha + x_7 \sin 3\alpha$$

で回折環を近似していることになる。一方、実施の形態 1 によれば  $x$  の最初の 5 項が評価できれば平面応力状態を再現できるので  $M_2$  の最初の 5 列を取り出した  $7 \times 5$  行列

【数 5 9】

$$M_3 = \begin{pmatrix} m_{6,1} & m_{6,2} & m_{6,3} & m_{6,4} & m_{6,5} \\ m_{7,1} & m_{7,2} & m_{7,3} & m_{7,4} & m_{7,5} \\ m_{8,1} & m_{8,2} & m_{8,3} & m_{8,4} & m_{8,5} \\ m_{9,1} & m_{9,2} & m_{9,3} & m_{9,4} & m_{9,5} \\ m_{10,1} & m_{10,2} & m_{10,3} & m_{10,4} & m_{10,5} \\ m_{11,1} & m_{11,2} & m_{11,3} & m_{11,4} & m_{11,5} \\ m_{12,1} & m_{12,2} & m_{12,3} & m_{12,4} & m_{12,5} \end{pmatrix}$$

30

を用いれば良い。

【0 2 0 4】

40

$M_3$  の逆行列は存在しないが擬似逆行列 (一般逆行列) を用いれば式(2.8) から  $x$  を推定することができる。以下ではその方法を説明する。 $M_3$  は

【数 6 0】

$$M_3 = W S V^T$$

のように特異値分解することができる。 $W$ 、 $V^T$  はそれぞれ  $7 \times 7$ 、 $5 \times 5$  の対称行列で  $W^T = W^{-1}$ 、 $V^T = V^{-1}$  を満たす。また  $S$  は  $M_3$  の特異値 ( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ ) ( $k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5$ ) を用いて

【数 6 1】

$$S \equiv \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

で表わされる  $7 \times 5$  行列である。以上の  $W$ 、 $V$  および  $S$  を用いると  $M_3$  の擬似逆行列（一般逆行列）は

【数 6 2】

$$M_3^- = VS^{-1}W^T \quad (2.22)$$

で求められる。ただし  $S^{-1}$  は

【数 6 3】

$$S^{-1} \equiv \begin{pmatrix} 1/K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/K_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/K_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/K_5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

で表わされる  $5 \times 7$  行列である。式(2.22)に従って実際に擬似逆行列を求め、式(2.8)に代入すると

【数 6 4】

$$\begin{aligned} x' &= M_3^- \varepsilon' \\ &= (1.004, 0.106, 0.020, -0.008, -0.001)^T \end{aligned} \quad (2.23)$$

のように  $x$  の最初の 5 項を推定することができる。この推定値は明らかに式(2.21)よりも初期設定値式(2.16)に近い。

【0 2 0 5】

以上の結果をまとめた図 2 9 である。これは式(2.17)、(2.20)の、からの  $x_1 \sim x_5$  の推定値を示している。一段目が完全な回折環からの推定値で、式(2.16)の初期設定値を再現している。一方、二段目以降は一部が欠けた回折環からの推定値で、二段目は  $M_2$  の逆行列を用いた推定値を、三段目は  $x$  に厳しい仮定を置いた  $M_3$  の一般逆行列（つまり擬似逆行列）からの推定値である。同図から明らかのように一般逆行列による推定の方がより良い結果が得られている。

【0 2 0 6】

以上説明してきたように、実施の形態 2 の回折環分析方法によれば、被測定物の性質で回折環に欠落がある場合でも応力・ひずみを分析し、かつ精度を向上させることができる。また汎用の固体撮像素子などを隙間のある状態で配置して撮像した回折環からも応力・ひずみを精度良く求めることが可能になる。これによって X 線回折による応力・ひずみの分析装置を現在よりも柔軟に構成することが可能になり、低価格化、測定時間の短縮が実現できる。

【0 2 0 7】

また本実施の形態で開示する回折環分析方法によれば、回折環が欠けた状態から計算したフーリエ係数の誤差を、完全な回折環の場合と比較して計算することができるため、最終的に求めた応力・ひずみの信頼性を評価することが可能になる。

【産業上の利用可能性】

【0 2 0 8】

10

20

30

40

50

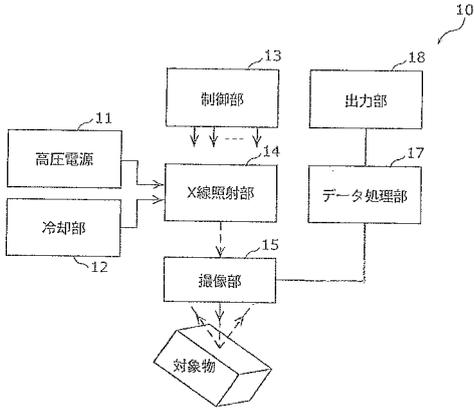
本発明は、金属、セラミック等の工業材料の残留応力等の非破壊検査全般に有用である。また X 線等を利用した非破壊検査装置や金属等の薄膜の応力分析にも有用である。

【符号の説明】

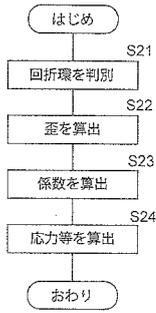
【0209】

2	サンプル（計測対象物）	
5、8、9	回折環	
10	回折環分析装置	
11	高圧電源	
12	冷却部	
13	制御部	10
14	X線照射部	
15	撮像部	
16	画像処理部	
19	測定対象物	
101	R 転送部	
102	光電変換部	
111	画素	
151、155	基台	
152	貫通孔	
200、300	固体撮像素子	20
201	撮像エリア	
202	貫通孔	
302	貫通孔	
303	転送部	
300、400a、400b、500a~500d、600a~600j	固体撮像素子	
700a~700l、800a~800d、810a~810d	固体撮像素子	
301、401a、401b、501a~501d、601a~601j	撮像エリア	
701a~701l、801a~801d、811a~811d	撮像エリア	
900a~900p、901~932	ラインセンサ	30

【図1】



【図2】



【図4】

フーリエ級数の係数(例)

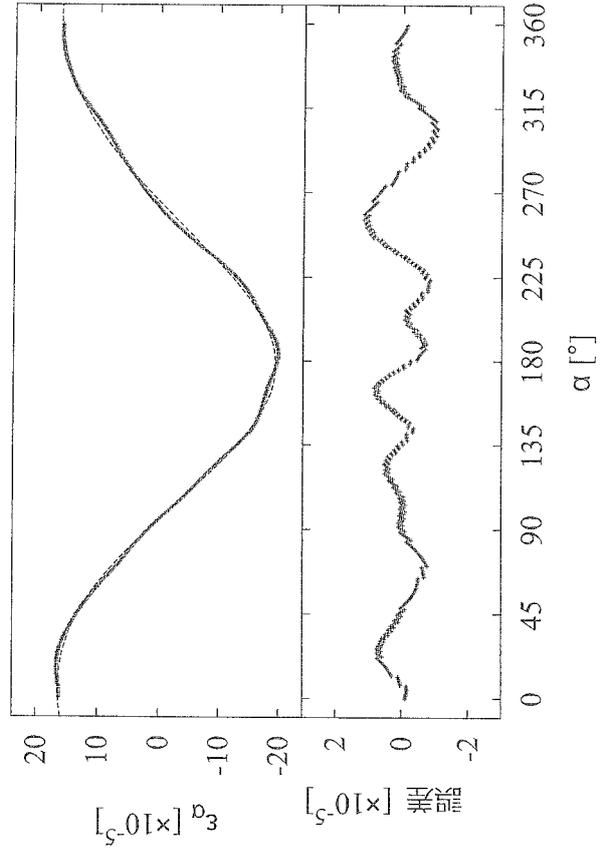
$a_1$	$1.787 \times 10^{-4}$	$b_1$	$8.193 \times 10^{-8}$
$a_2$	$-1.571 \times 10^{-5}$	$b_2$	$5.045 \times 10^{-6}$
$a_3$	$3.095 \times 10^{-6}$	$b_3$	$3.725 \times 10^{-6}$
$a_4$	$1.821 \times 10^{-6}$	$b_4$	$-1.437 \times 10^{-6}$

フーリエ変換  
(FFTなど)

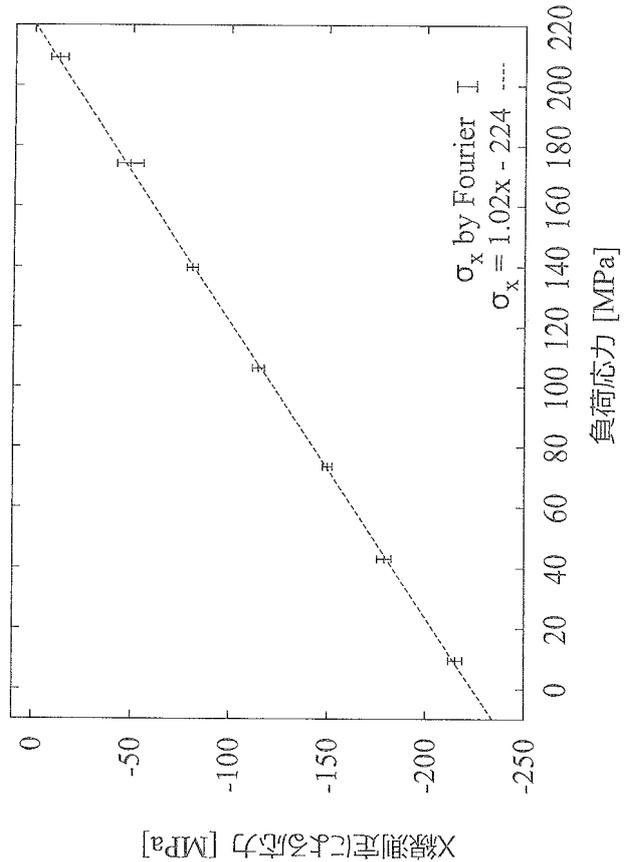
回折環の変形データ(例)

$\alpha$ [度]	$\varepsilon_\alpha$
0.00	$1.618 \times 10^{-4}$
0.72	$1.618 \times 10^{-4}$
...	...
90.0	$1.544 \times 10^{-5}$
90.72	$1.366 \times 10^{-5}$
91.44	$1.366 \times 10^{-5}$
...	...
358.56	$1.618 \times 10^{-4}$
359.28	$1.618 \times 10^{-4}$

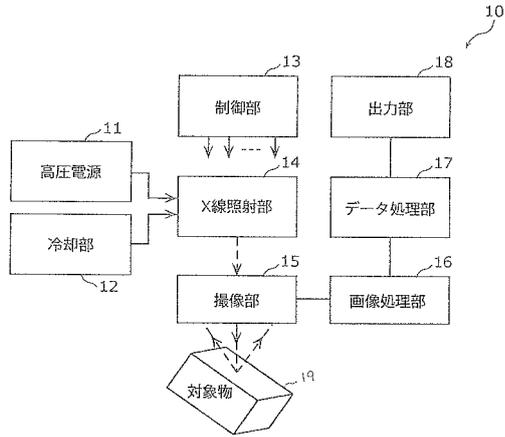
【図3】



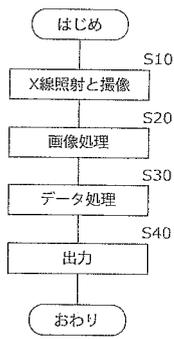
【図5】



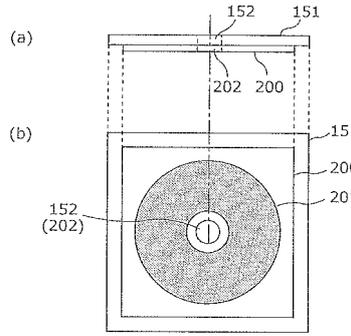
【図6】



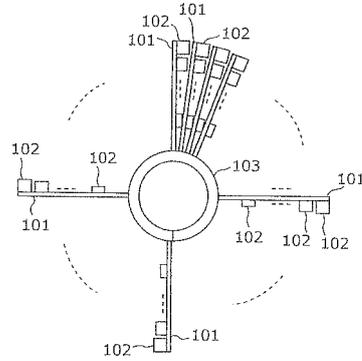
【図7】



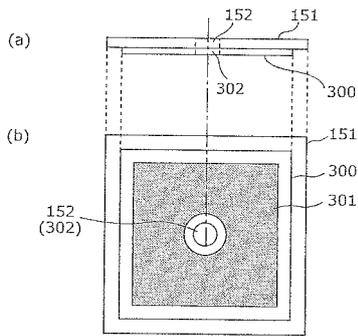
【図8】



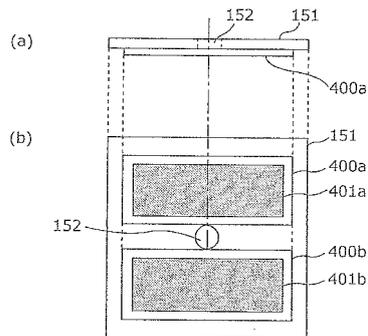
【図9】



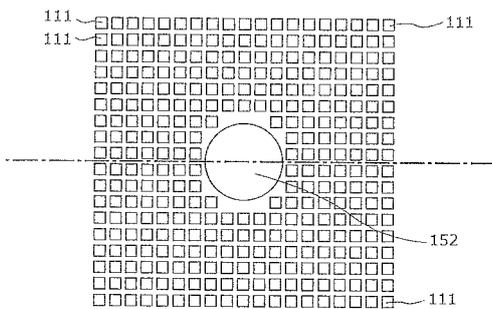
【図10】



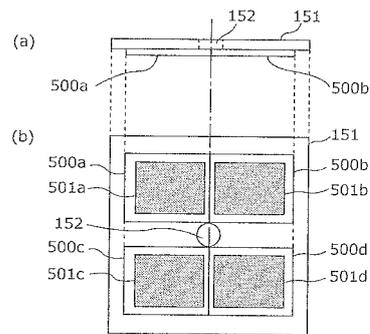
【図12】



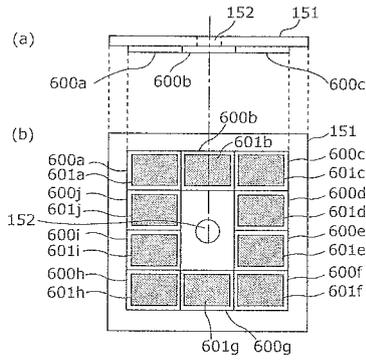
【図11】



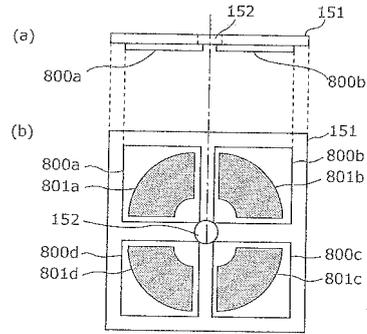
【図13】



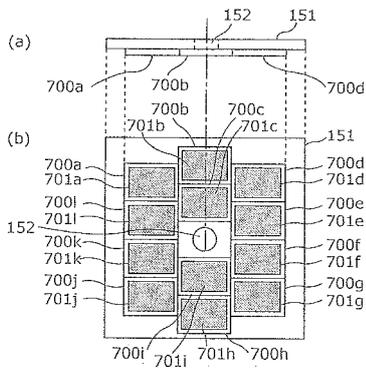
【図14】



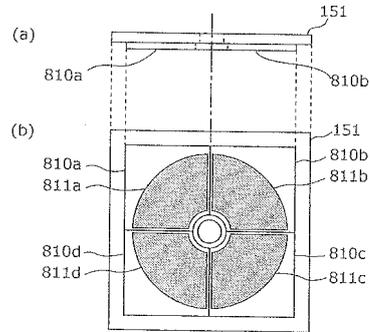
【図16A】



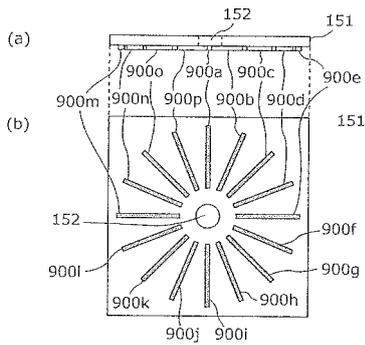
【図15】



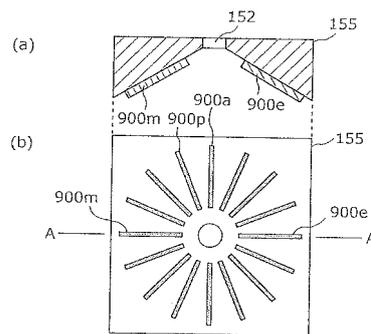
【図16B】



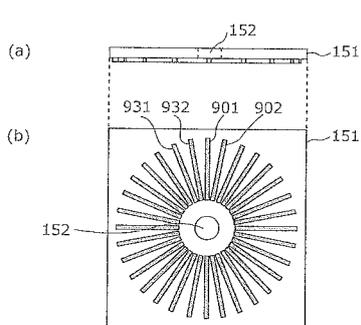
【図17】



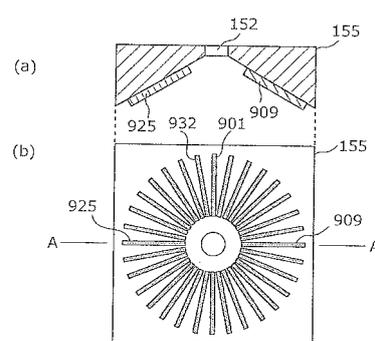
【図19】



【図18】

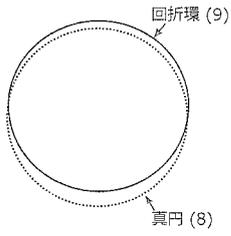


【図20】

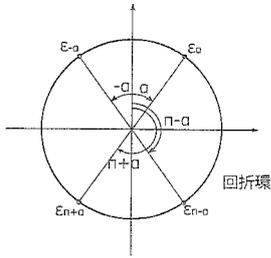




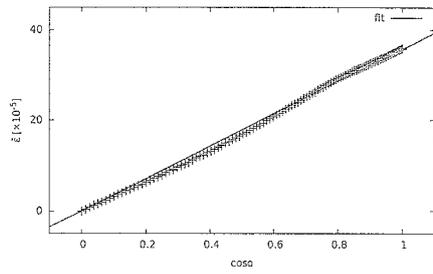
【 図 3 1 】



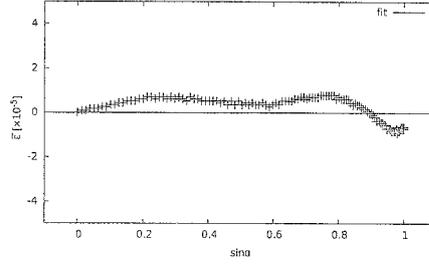
【 図 3 2 】



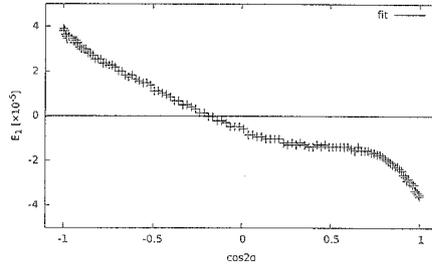
【 図 3 3 】



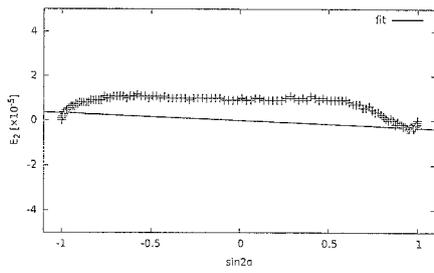
【 図 3 4 】



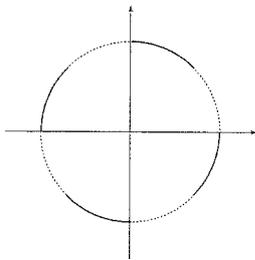
【 図 3 5 】



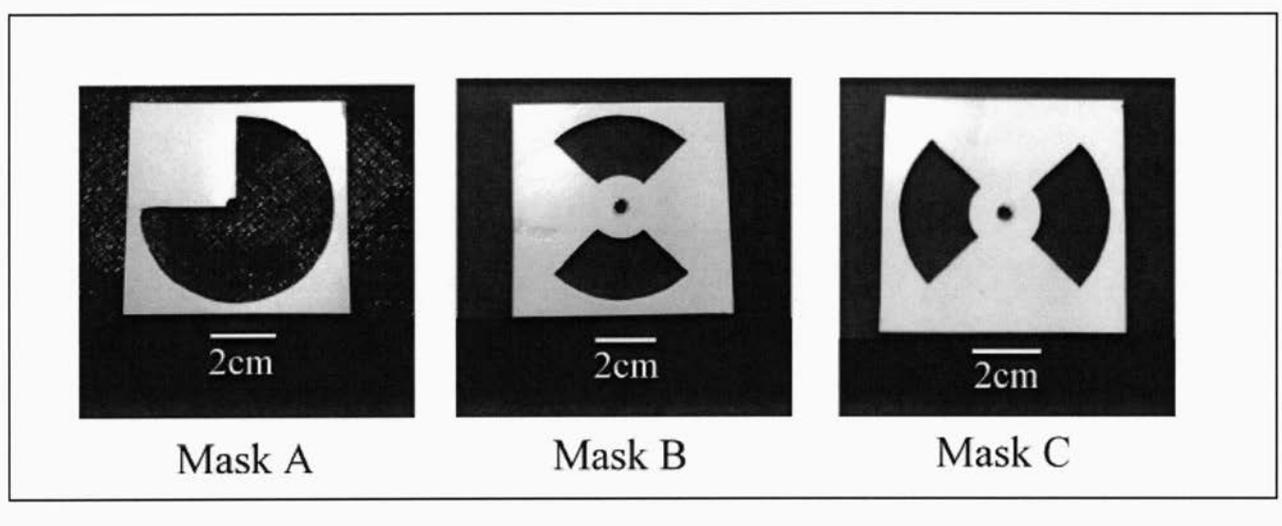
【 図 3 6 】



【 図 3 7 】



【 図 2 3 】



【 図 2 4 】

