

(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2014-13203

(P2014-13203A)

(43) 公開日 平成26年1月23日(2014.1.23)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
GO 1 L 1/25 (2006.01)		GO 1 L 1/25		2 G 0 0 1
GO 1 L 1/00 (2006.01)		GO 1 L 1/00	A	
GO 1 N 23/20 (2006.01)		GO 1 N 23/20		

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2012-150939 (P2012-150939)
 (22) 出願日 平成24年7月4日 (2012.7.4)

(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 100080791
 弁理士 高島 一
 (74) 代理人 100125070
 弁理士 土井 京子
 (74) 代理人 100136629
 弁理士 鎌田 光宜
 (74) 代理人 100121212
 弁理士 田村 弥栄子
 (74) 代理人 100122688
 弁理士 山本 健二
 (74) 代理人 100117743
 弁理士 村田 美由紀

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線応力測定方法

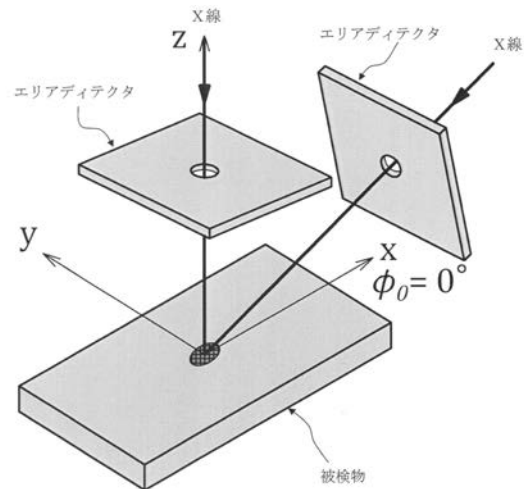
(57) 【要約】

【課題】より精度が高く、かつ、照射方向が限定された用途にも対応可能なX線応力測定方法を提供すること。

【解決手段】被検物にX線を照射して得られる回折環に基づいて被検物内に存在する応力を測定するX線応力測定方法であって、垂直入射方向と1つの斜め入射方向にてX線を照射し、それぞれに回折環を得、垂直入射方向の回折環からは、剪断応力 x_z 、 y_z を得、斜め入射方向の回折環からは、剪断応力 x_y と、応力の関係式 ($x - z$)、($y - z$) を得、以上によって得られた剪断応力および応力の関係式からz軸方向の応力 z を求め

、これらをもって、6個の3軸応力成分 x 、 y 、 z 、 x_y 、 y_z 、 x_z を得る。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検物に X 線を照射して得られる回折環に基いて被検物内に存在する応力を測定する X 線応力測定方法であって、

被検物表面の測定点において直交する x y 座標を被検物表面に規定しかつ該測定点における該被検物表面の法線を z 軸と規定して、該測定点に対して、下記 (I) で規定される垂直入射方向と 1 つの斜め入射方向にて X 線を照射し、それぞれに回折環を得、

垂直入射方向の回折環からは、剪断応力 σ_{xz} 、 σ_{yz} を得、

斜め入射方向の回折環からは、剪断応力 σ_{xy} 、および、〔 x 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_x - \sigma_z$)〕、および、〔 y 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_y - \sigma_z$)〕を得、

以上によって得られた剪断応力および応力の関係式から z 軸方向の応力 σ_z を求め、これらをもって、6 個の 3 軸応力成分 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{xz} を得ることを特徴とする、X 線応力測定方法。

(I) 測定点における被検物表面の法線に沿って測定点へ向かう垂直入射方向と、該法線から所定の入射角度 θ_0 だけ傾いて測定点へ向かう 1 つの斜め入射方向であって、該斜め入射方向は、被検物表面に投影したときに、その投影が x y 座標の x 軸に一致する方向である、前記垂直入射方向と斜め入射方向。

【請求項 2】

z 軸方向の応力 σ_z を、垂直入射方向および斜め入射方向の回折環から複数得られる応力 σ_z の平均値とする、請求項 1 記載の X 線応力測定方法。

【請求項 3】

被検物が溝の底面であって、上記 x y 座標の x 軸の方向を、該溝の長手方向に一致するように規定する、請求項 1 または 2 記載の X 線応力測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、被検物に X 線を照射することで、該被検物内に存在する応力（とりわけ 3 軸応力）を測定する X 線応力測定方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

X 線応力測定法は、材料（特に、金属などの結晶性材料）に X 線を照射したときの回折の情報から、材料中の応力の状態を求める方法である。X 線応力測定法では、応力によって格子面間隔が変化することが利用され、その変化を、回折 X 線の角度と強さの関係を測定することで求め、歪や応力が算出される。

【0003】

X 線応力測定は、軟 X 線による背面反射回折を利用するため吸収の影響を受けやすく、サンプリング領域は深さ数 10 μ m 程度以下の極表面となる。表面の応力測定のため、平面応力状態を仮定した測定原理が用いられている。

一方、X 線回折現象を利用してひずみ測定が行われるため、多相材料においては測定に関与する構成相が 1 つに限定される性質もある。その結果、X 線応力測定には微視的な応力状態（ミクロ応力）の影響が現れることも知られている。研削加工後の鋼材や、鉄道レール等の X 線応力測定においては 3 軸応力が測定され、これらの \sin^2 線図は、いわゆるスプリットと称される楕円状の分布を示す場合がしばしばある。

3 軸応力は、被検物の表面 (x - y 平面) に沿った成分 (x 軸、 y 軸方向の成分) と、該表面の法線に沿った方向 (垂直方向、 z 軸方向) の成分とを持った、3 次元方向の応力を同時に含む応力状態である。

【0004】

変形挙動が異なる微細な第二相が分布する材料においては、単軸応力の負荷においても、微視的スケールでは構成相間に 3 軸応力が発生して平衡しているとの報告もある。この

10

20

30

40

50

ため、様々な外力にさらされる機械部品中の各構成相においては3軸応力状態が出現し、部品の材料強度に大なり小なり関わっていることが想像される。

このようなマイクロレベルの3軸応力状態を解明する上では、結晶格子レベルの現象を利用することと、構成相ごとに回折線が別々に分離する性質を利用できることからX線応力測定技術が最適であり、しかも実用的な利用も期待できるという利点がある。

【0005】

X線照射によって3軸応力を測定する方法(X線3軸応力測定法)の別方式の技術は、デール(Dolle("o"はウムラウト付き))らによって提案されている。しかしながら、デールらの測定法は、合計

6方向の格子ひずみ分布(\sin^2 線図)を用いるために、測定と解析に、複雑な装置と多大な測定時間とを要するという問題がある。このような方法では、実験室での実施では特に問題は生じないが、建設現場、被検物が敷設された現場、生産ラインなど、比較的迅速な測定作業が求められる現場などでは適用が困難である。

【0006】

上記のような従来のX線応力測定方法の問題に対し、本発明者は、X線を照射して得られる回折環の全体の情報を、イメージングプレート(IP)やCCDなどのエリアディテクタによって解析に利用するX線平面応力測定法(特許文献1、2)、X線3軸応力測定法(非特許文献1~3)を提案しており、測定と解析の無駄を軽減している。以下、非特許文献1に記載された基本的なX線3軸応力測定法を、「基本的なエリアディテクタ方式のX線3軸応力測定法」と呼んで説明する。

基本的なエリアディテクタ方式の3軸応力測定法では、例えば、回折環の中心角を1度間隔に解析すると、回折環全体からは合計360個の格子ひずみが得られるので、6個の3軸応力成分の決定に対して十分なデータが得られる。

【0007】

次に、基本的なエリアディテクタ方式のX線3軸応力測定法について、その測定の原理を説明する。

尚、現場での測定や実用性を考慮すると、試料の設定の影響を受けやすくなる回折データの絶対値の使用をなるべく避け、相対的な変化を利用することが望ましい。この点から、以下の説明では、平面応力測定法(\sin^2 法)のような、回折データの相対的な変化を通じた3軸応力測定法について述べる。

【0008】

実使用される金属材料の多くは、微細な結晶粒の集合体であり、X線を照射すると、次式(1)のブラッグの条件に従って回折X線が発生する。

$$\text{〔式(1)〕}$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

ここで、 d は格子面間隔、 θ はブラッグ角、 λ はX線の波長、 n は回折次数である。以下、 $n = 1$ を用いる。

回折X線は、照射点(X線照射の標的となる測定点)を頂点とする円錐の側面を形成するように発生するため、入射X線に対して垂直にエリアディテクタを置くと、ほぼ円形の回折環が測定される。

デールらの測定方法では、回折環の一端の回折強度分布測定を通して θ を決定し、応力計算に用いる。

これに対して、基本的なエリアディテクタ方式の3軸応力測定法では、図8のように最初に回折環半径 R が得られ、次いで次式(2)を用いてブラッグ角 θ (単位:ラジアン)を得る。

〔式(2)〕

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{R}{C_L} \right)$$

10

20

30

40

50

ここで、 C_L は、X線照射点と検出器との距離である。

【0009】

上記のようにして得られるブラッグ角 θ の値は、回折に寄与した一群の格子面に対する平均値である。上記式(1)の微分から、格子面の法線方向の縦ひずみ ε とブラッグ角 θ との関係が次式(3)のように導かれる。

〔式(3)〕

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\Delta\theta \cdot \cot\theta = (\theta_0 - \theta) \cot\theta_0$$

10

ここで、 d は、格子面間隔 d の変化量、即ち、無ひずみ時の d の値を d_0 としたときに、 $d = d - d_0$ である。

また、 θ は、ブラッグ角 θ の変化量、即ち、無ひずみ時の θ の値を θ_0 としたときに、 $\theta = \theta - \theta_0$ である。

【0010】

次に、図9に示すように、被検物表面の照射点(測定点)において直交する x y 座標を該表面に規定し、かつ、該表面の法線を z 軸と規定し、原点(=照射点)における3軸方向の各応力(即ち、 x 軸方向の応力 σ_x 、 y 軸方向の応力 σ_y 、 z 軸方向の応力 σ_z)と、各剪断応力(τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz})とを次式(4)のように表記する。尚、 τ_{xy} は、 x y 面のずれを生じさせる応力を表し、同様に、 τ_{xz} は、 x z 面のずれを生じさせる応力を表し、 τ_{yz} は、 y z 面のずれを生じさせる応力を表している。

20

〔式(4)〕

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

【0011】

回折環の中心角が θ の位置から上記式(3)を用いて得られるひずみを ε と書くと、上記式(4)の応力に対して、次式(5)が成立する。

30

〔式(5)〕

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

40

ここで、 E は縦弾性定数、 ν はポアソン比である(いずれも回折弾性定数)。

【0012】

上記式(5)は、基本的なエリアディテクタ方式の3軸応力測定法の基礎式である。該式中の $n_1 \sim n_3$ は、試料座標系に対する θ の方向余弦であり、それぞれ次式(6)で表される。

〔式(6)〕

$$\begin{aligned}
n_1 &= \cos \eta \sin \psi_0 \cos \phi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha \\
&\quad - \sin \eta \sin \phi_0 \sin \alpha \\
n_2 &= \cos \eta \sin \psi_0 \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha \\
&\quad + \sin \eta \cos \phi_0 \sin \alpha \\
n_3 &= \cos \eta \cos \psi_0 + \sin \eta \sin \psi_0 \cos \alpha
\end{aligned}$$

ここで、

は、ブラッグ角 の補角 [(/ 2) -] であり、
 ψ_0 は、測定点における被検物表面に対する法線と入射ビームとのなす角であり、
 ϕ_0 は、被検物表面への入射ビームの投影と x 軸とのなす角である。

【 0 0 1 3 】

図 8 に示すように、任意の ψ_0 に対する回折環において、

：中心角 方向のひずみ、
 \dots : に対して中心角が だけ異なる方向のひずみ、
 \dots : 中心角 - 方向のひずみ、
 \dots : に対して中心角が だけ異なる方向のひずみ

について考え、これらを用いて次式 (7) で表される $a_1 \sim a_3$ を求める。

〔式 (7) 〕

$$a_1(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})]$$

$$a_2(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})]$$

$$a_3(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} + \varepsilon_{\pi-\alpha})]$$

【 0 0 1 4 】

上記式 (7) に上記式 (5) を代入すると、 $\psi_0 = 0^\circ$ のとき、次式 (8) が得られる

〔式 (8) 〕

$$a_1(0) = -\frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\psi_0 + 2\tau_{xz} \cos 2\psi_0] \sin 2\eta \cos \alpha$$

$$a_2(0) = \frac{2(1+\nu)}{E} [\tau_{xy} \sin \psi_0 + \tau_{yz} \cos \psi_0] \sin 2\eta \sin \alpha$$

$$a_3(0) = \Phi \cos^2 \alpha + \Psi$$

ここで、 Φ および Ψ は、それぞれ、次式 (9) のとおりである。

〔式 (9) 〕

$$\Phi = \frac{2(1+\nu)}{E} [(\sigma_x - \sigma_z) \cos^2 \psi_0 - (\sigma_y - \sigma_z) - \tau_{xz} \sin 2\psi_0] \sin^2 \eta$$

$$\Psi = \sigma_x \left(\frac{2}{E} \right) \left[\cos^2 \eta \sin^2 \psi_0 - \nu (\sin^2 \eta + \cos^2 \eta \cos^2 \psi_0) \right]$$

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned}
& +\sigma_y \left(\frac{2}{E} \right) (\sin^2 \eta - \nu \cos^2 \eta) + \tau_{xz} \frac{4(1+\nu)}{E} \cos^2 \eta \sin 2\psi_0 \\
& +\sigma_z \left(\frac{2}{E} \right) \left[\cos^2 \eta \cos^2 \psi_0 - \nu (\sin^2 \eta + \cos^2 \eta \sin^2 \psi_0) \right]
\end{aligned}$$

【 0 0 1 5 】

上記式 (8) より、 a_1 および a_2 は、それぞれ、 \cos 、 \sin に関して直線的であることが判明する。また各直線の傾きは次式 (1 0) で表される。

〔式 (1 0) 〕

10

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

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

【 0 0 1 6 】

次に、上記式 (1 0) のそれぞれについて、 $\psi_0 > 0$ (即ち、 $\psi_0 = 0^\circ$ 側に傾いた方向からの入射) と、 $\psi_0 < 0$ (即ち、前者とは逆方向の、 $\psi_0 = 180^\circ$ 側に傾いた方向からの入射) とに関する平均および偏差を求め、次式 (1 1) のように、 $b_1 \sim b_4$ と表す。

20

〔式 (1 1) 〕

$$b_1(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_1(\phi_0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} + \left(\frac{\partial a_1(\phi_0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 < 0} \right]$$

$$b_2(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_1(\phi_0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left(\frac{\partial a_1(\phi_0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 < 0} \right]$$

$$b_3(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_2(\phi_0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} + \left(\frac{\partial a_2(\phi_0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 < 0} \right]$$

30

$$b_4(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_2(\phi_0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left(\frac{\partial a_2(\phi_0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 < 0} \right]$$

上記式 (1 0) を上記式 (1 1) へ代入して整理すると、 $\psi_0 = 0^\circ$ のとき次式 (1 2) が得られる。

〔式 (1 2) 〕

40

$$\sigma_x - \sigma_z = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} b_2(0)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} b_4(0)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \psi_0} b_3(0)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos 2\psi_0} b_1(0)$$

10

上記式(12)から、全ての剪断応力成分 (τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz}) と、 x 軸 z 軸の応力関係式 ($\sigma_x - \sigma_z$) とが得られる。

【0017】

一方、上記式(8)、上記式(9)の τ_{xz} より、 y 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_y - \sigma_z$) に関する次式(13)の関係が得られる。

〔式(13)〕

$$\sigma_y - \sigma_z = -\Phi \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2 \eta} + (\sigma_x - \sigma_z) \cos^2 \psi_0 - \tau_{xz} \sin 2\psi_0$$

20

ここで、 Φ は、 τ_{xz} によって求められた上記式(7)の a_3 を、 $\cos^2 \psi_0$ に対して直線近似したときの傾きであり、測定により得ることができる。

既に、上記式(12)によって、上記式(13)の右辺の ($\sigma_x - \sigma_z$) と τ_{xz} が判明しているので、上記式(13)と τ_{xz} とから、($\sigma_y - \sigma_z$) が決定できる。

【0018】

垂直応力成分 σ_z を明らかにするためには、上記式(5)から導出される次式(14)の関係を用いる。

〔式(14)〕

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

30

ここで、 X は、次式(15)のように表される。

〔式(15)〕

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

40

上記式(15)のとおり、 X は、ここまでに判明した応力成分と既知数だけからなり、計算により値が確定する。従って、得られた X を上記式(14)に代入すると、 E および ν は既知であるから、 σ_z が判明する。

このような σ_z は、回折環全体から得られる360個のデータの1つ1つから σ_z が得られるが、ばらつきの影響を考慮して、それらの平均値を採用することが好ましい。

50

z と、既に得られている応力関係式 ($\sigma_x - \sigma_z$) と ($\sigma_y - \sigma_z$) とから、 σ_x と σ_y が判明し、その結果、6個の3軸応力成分 (σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{xz}) がすべて判明する。

【0019】

以上が、基本的なエリアディテクタ方式の3軸応力測定法における3軸応力成分決定の原理である。しかし、このような基本的な方法では、ポアソン効果のために、 $\theta_0 = 0^\circ$ および 180° 方向だけから測定した回折環の半径変化に σ_y の作用が反映され難く、結果、 σ_y 成分についての測定精度が低くなる。

一方、上記したドール(Dolle)らの方法は、X線3軸応力測定法の標準法とも言えるものであるが、上記したとおり6方向に対する [2θ と $\sin^2 \psi$ との関係] を必要とするため、計測時間を要するという問題があり、また、スラストベアリングなどの溝部や狭いスペースを有する機械部品等においては必要な [2θ と $\sin^2 \psi$ との関係] についての計測データが得られないケースも起こり得る。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0020】

【特許文献1】特開2005-241308号公報

【特許文献2】特開2011-027550号公報

【非特許文献】

【0021】

【非特許文献1】"Sasaki, T. and Hirose, Y., X-Ray Triaxial Stress Analysis Using Whole Diffraction Ring Detected with Imaging Plate, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 61, No.590 (1995), pp. 2288-2295."

【非特許文献2】佐々木敏彦、高橋俊一、佐々木勝成、小林祐一、「エリアディテクタ方式のX線三軸応力測定法の改良に関する研究」、日本機械学会論文集(A)、第75巻、第750号(219~227頁)、(2009)

【非特許文献3】佐々木敏彦、広瀬幸雄、「イメージングプレートによる二次元検出回折像を用いたX線三軸応力解析」、日本機械学会論文集(A)、第61巻、第594号(2288~2295頁)、(1995)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0022】

本発明の課題は、上記した従来の方々の種々の3軸応力測定法の問題点を解決し、高い精度の測定を可能にしながらも、照射方向が限定された用途にも対応可能なX線応力測定方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0023】

本発明は、次の構成を有することを特徴とする。

(1) 被検物にX線を照射して得られる回折環に基いて被検物内に存在する応力を測定するX線応力測定方法であって、

被検物表面の測定点において直交する x y 座標を被検物表面に規定しかつ該測定点における該被検物表面の法線を z 軸と規定して、該測定点に対して、下記(I)で規定される垂直入射方向と1つの斜め入射方向にてX線を照射し、それぞれに回折環を得、

垂直入射方向の回折環からは、剪断応力 σ_{xz} 、 σ_{yz} を得、

斜め入射方向の回折環からは、剪断応力 σ_{xy} 、および、[x 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_x - \sigma_z$)]、および、[y 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_y - \sigma_z$)] を得、

以上によって得られた剪断応力および応力の関係式から z 軸方向の応力 σ_z を求め、これらをもって、6個の3軸応力成分 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{xz} を得ることを特徴とする、X線応力測定方法。

10

20

30

40

50

(I) 測定点における被検物表面の法線に沿って測定点へ向かう垂直入射方向と、該法線から所定の入射角度 θ_0 だけ傾いて測定点へ向かう 1 つの斜め入射方向であって、該斜め入射方向は、被検物表面に投影したときに、その投影が $x-y$ 座標の x 軸に一致する方向である、前記垂直入射方向と斜め入射方向。

(2) z 軸方向の応力 σ_z を、垂直入射方向および斜め入射方向の回折環から複数得られる応力 σ_z の平均値とする、上記 (1) 記載の X 線応力測定方法。

(3) 被検物が溝の底面であって、上記 $x-y$ 座標の x 軸の方向を、該溝の長手方向に一致するように規定する、上記 (1) または (2) 記載の X 線応力測定方法。

【発明の効果】

【 0 0 2 4 】

10

回折環を二次元計測して得られる個々のひずみ ϵ と、回折環中心角 θ の関係は、Doyleらの方法における (2ϵ と $\sin^2 \theta$ の関係) に代替可能であり、また、豊富な二次元情報によって大幅な測定時間短縮効果が可能である。

上記した基本的なエリアディテクタ方式による 3 軸応力測定法では、測定点における被検物表面の法線について対称な一対の入射方向だけを用いている。この一対の入射方向は、図 9 に示すように、これらを被検物表面に投影したとき、測定点において被検物表面上に規定した $x-y$ 直交座標の x 軸に一致し (その投影方向を x 軸とすると考えることもできる)、互いに対向する方向である。即ち、一対の入射方向の投影の一方を規準方向として $\theta_0 = 0^\circ$ の方向としたとき、他方は $\theta_0 = 180^\circ$ の方向である。

【 0 0 2 5 】

20

これに対して、本発明の測定方法では、2 方向からの X 線照射だけによって 3 軸応力を測定することが可能である。この 2 方向は、被検物表面の測定点に、直交する $x-y$ 座標を該表面に規定し、かつ、該測定点における該表面の法線を z 軸として、 $x-y-z$ 座標を規定したとき、 z 軸に沿って測定点へ向かう垂直入射方向と、該法線から所定の入射角度 θ_0 だけ傾いて測定点へ向かう 1 つの斜め入射方向である。

本発明の方法によって、高い精度の測定を可能としながらも、例えば幅が狭く深い溝の底面など、X 線照射の方向が限定されるような場合でも、X 線 3 軸応力の測定が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 6 】

30

【図 1】図 1 は、本発明による X 線応力測定方法の構成を説明する図である。図 9 における θ_0 、 θ 、 θ' の取り方自体は、図 1 でも同様である。

【図 2】図 2 は、本発明の実施例 1 における、角度 θ (単位 : 度) に応じたひずみ ϵ を示すグラフ図である。

【図 3】図 3 は、本発明の実施例 1 における、 a_1 と $\cos \theta$ との関係、および、 a_2 と $\sin \theta$ との関係をそれぞれ示すグラフ図である。

【図 4】図 4 は、本発明の実施例 1 における、 a_1 と $\cos \theta$ との関係、 a_2 と $\sin \theta$ との関係、および、 a_3 と $\cos^2 \theta$ との関係をそれぞれ示すグラフ図である。

【図 5】図 5 は、本発明の実施例 2 において、イメージングプレートを用いて測定して得られた回折環の画像である。

40

【図 6】図 6 は、図 5 の各回折環を画像解析し、各回折環全周から半径を求め、それを回折角 2θ に変換してグラフ化したグラフ図である。

【図 7】図 7 は、本発明の実施例 2 において、応力計算に必要な ($a_1 - \cos \theta$) 線図を示すグラフ図である。

【図 8】図 8 は、従来のエリアディテクタ法における、エリアディテクタと被検物の配置関係、および、回折環 (Debye-Scherrer ring) と、応力計算に用いるための 4 つの歪の定義を説明する図である。

【図 9】図 9 は、従来の基本的なエリアディテクタ方式の X 線 3 軸応力測定法を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

50

【 0 0 2 7 】

本発明の X 線応力測定方法は、エリアディテクタを用いる X 線 3 軸応力測定法であって、被検物に X 線を照射して得られる回折環に基いて被検物内に存在する応力を測定する方法である。

本発明では、図 1 に示すように、被検物表面の測定点に上記したように x y z 座標を規定し、該測定点に対して 2 つの入射方向（垂直入射方向、斜め入射方向）にて X 線を照射し、それぞれに回折環を得る。

斜め入射方向は、それを被検物表面に投影したときに、その投影が x y 座標の x 軸に一致する方向である（斜め入射方向を被検物表面に投影したときの方向を x 軸として定めてもよい）。被検物表面に対して x y 座標は任意の向きに設定してよい。

前記の 2 つの入射方向での X 線の照射において、垂直入射方向の回折環からは、剪断応力 τ_{xz} 、 τ_{yz} を得る。

また、斜め入射方向の回折環からは、剪断応力 τ_{xy} 、および、〔 x 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式（ $\sigma_x - \sigma_z$ ）〕、および、〔 y 軸方向、 z 軸方向の応力の関係式（ $\sigma_y - \sigma_z$ ）〕を得る。

以上によって得られた剪断応力 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、および、応力の関係式（ $\sigma_x - \sigma_z$ ）、（ $\sigma_y - \sigma_z$ ）から z 軸方向の応力 σ_z を求め、これらから、6 個の 3 軸応力成分 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} を得る。

【 0 0 2 8 】

本発明では、垂直入射方向（ $\psi_0 = 0^\circ$ の法線方向）に X 線ビームを入射させて得られる回折環を使用し、それによって、必要な回折環の測定数を減らしている。

本発明における、2 つの入射方向の X 線照射の回折環から応力を求める計算手法は次のとおりである。

【 0 0 2 9 】

〔垂直入射方向での X 線照射による回折環〕

垂直入射方向（ $\psi_0 = 0^\circ$ の法線方向）からの X 線ビーム照射による回折環を使用する場合、上記式（10）は次式のようになる。

〔式（16）〕

$$\left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0=0} = -\frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz} \sin 2\eta$$

$$\left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0=0} = -\frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz} \sin 2\eta$$

上記式（16）から、剪断応力 τ_{xz} 、 τ_{yz} が次式のように得られる。

〔式（17）〕

$$\tau_{xz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0=0}$$

$$\tau_{yz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0=0}$$

【 0 0 3 0 】

回折環の形状に対する τ_{xz} 、 τ_{yz} の影響は垂直入射方向（ $\psi_0 = 0$ ）のときが最も大きく、従って、垂直入射方向は、これらの剪断応力の測定には最適な条件を与える。

以上のように、垂直入射方向の X 線照射によって、剪断応力 τ_{xz} 、 τ_{yz} が得られる。

【 0 0 3 1 】

〔斜め入射方向での X 線照射による回折環〕

上記式 (17) のとおり σ_{xz} が得られると、上記式 (10) の第一式から ($\sigma_x - \sigma_z$) が、次式のように得られる。

〔式 (18)〕

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

10

同様に、上記式 (17) の第二式から得られる σ_{yz} を用いると、上記式 (7) の a_3 を利用して、($\sigma_y - \sigma_z$) に関する次の関係式が導出される。

〔式 (19)〕

$$\sigma_y - \sigma_z = -\Phi \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2 \eta} + (\sigma_x - \sigma_z) \cos^2 \psi_0 - \tau_{xz} \sin 2\psi_0$$

上記式 (19) の右辺には ($\sigma_x - \sigma_z$) と τ_{xz} とが含まれているが、これらは既に決定済みの応力成分である。その結果、上式によって ($\sigma_y - \sigma_z$) を決定することができる。

【0032】

20

また、斜め入射方向での X 線照射による回折環からは、x 軸方向に ψ_0 傾斜した場合 ($\alpha_0 = 0^\circ$) についての上記式 (8) の第二式の $a_2(0)$ の関係を用い σ_{xy} が求められる。

即ち、同式中の σ_{yz} は、既に上記式 (17) から得られているので、上記式 (10) の第二式より次式の関係が得られる。

〔式 (20)〕

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

【0033】

30

以上において決定された垂直応力成分差 (σ_x 軸方向、 σ_z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_x - \sigma_z$)、および、 σ_y 軸方向、 σ_z 軸方向の応力の関係式 ($\sigma_y - \sigma_z$)) から、さらに各垂直応力成分を明らかにするためには、上記式 (5) から導かれる次の関係を用いる。

〔式 (21)〕

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

ここで、上記式中の X は次式のように表される。

〔式 (22)〕

40

$$X = \frac{2(1+\nu)}{E} (\tau_{xy} n_1 n_2 + \tau_{yz} n_2 n_3 + \tau_{xz} n_3 n_1) + \frac{1}{E} (\sigma_x - \sigma_z) [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \frac{1}{E} (\sigma_y - \sigma_z) [n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)]$$

【0034】

上記式 (22) のとおり、X は、既に求められている応力成分と既知数のみからなるの

50

で、計算により求めることができる。

こうして得られた X を上記式(21)に代入すると z が決定できる。このとき、 z は、回折環全体から複数得られるのでその平均値を取ることが好ましい。

z と、すでに得られている($x - z$)、($y - z$)とから、 x と y が判明する。その結果、6個の3軸応力成分(x 、 y 、 z 、 xy 、 yz 、 xz)が、全て判明する。

【0035】

本発明の測定方法を適用すべき被検物は、多結晶性の材料(例えば、金属、セラミックス、特定のプラスチックなど)からなるものであればよく、特に限定はされないが、鉄道などの車輪やコロ(特にその外周面)、レール、ベアリングなどといった、転動接触を繰り返すような物品に対して、また、研削加工された部品、析出相が存在する材料などに対して、3軸応力を測定する本発明の有用性は顕著になる。

とりわけ、本願発明では、X線の斜め入射方向が1つだけであるから、幅が狭く深い溝における溝内の底面など、X線を照射する方向が限定される用途に対して特に有用となる。例えば、溝の底面を3軸応力の測定対象とする場合には、X線の斜め入射方向を測定面に投影したときの方向を x 軸として、それが該溝の長手方向に一致するように、該X線を入射させればよい。

尚、本発明の応力測定方法は、3軸応力を求めるステップを有するので、X線3軸応力測定方法と呼ぶことができるが、当然に、1軸、2軸の応力測定に利用してもよい。

【0036】

本発明によるX線3軸応力測定方法を実施するための測定装置の態様は、特に限定は、されず、当該測定方法に必要な方向からのX線照射とそれによって生じる回折環を解析しえる手段とを有して構成すればよい。

照射に用いられるX線は、従来公知のX線応力測定法に用いられる特性X線であってよく、例えば、Crターゲットを有するX線管球によるCrK特性X線などが好ましいものとして挙げられる。

【0037】

回折環を解析するための手段は特に限定はされないが、例えば、イメージングプレートや、CCD(Charge Coupled Device)、半導体検出器、C-Mosイメージセンサー等のエリアディテクタによって回折環を全体的に検出し解析する装置が好ましいものとして挙げられる。

イメージングプレートは、上記特許文献1に記載されたとおり、X線エネルギーをいったん蓄積した後に、光による励起によって蛍光を発生する光輝尽性発光現象を利用して回折環の全体画像を撮像する放射線画像センサであって、例えば、BaFBr:Eu²⁺などの輝尽性蛍光体の微結晶を、プラスチックフィルムの表面に塗布して形成され、X線が入射すると輝尽性蛍光体中にこのX線エネルギーが蓄積される。

イメージングプレートの中心部には、図1に示すように、通常、X線照射管が貫通する貫通孔が形成されており、そこから測定点に向かって特性X線を照射し、回折環となって戻ってきた反射X線を、その周囲で受光する構成となっている。

【0038】

CCD、半導体検出器、C-Mosイメージセンサーなどは、それ自体から、コンピュータによる画像処理や演算処理が可能な回折環の画像データについての出力信号を得ることが可能である。一方、イメージングプレートなどの記録媒体は、該プレートに記録された回折環画像を読み取るための読取装置(イメージングプレート・リーダー)と共に用いられる。該読取装置は、He-Neレーザなどの励起光をイメージングプレート上に走査して照射し、このイメージングプレート内のX線エネルギーの蓄積部分から発生する蛍光を光電子増倍管によって増幅し、X線の強度を測定して回折環画像を読み出すように構成され、該読取装置を通じて、回折環の画像データについての出力信号が得られる。

【0039】

10

20

30

40

50

図 8 に示す回折環上のひずみを解析するに際しては、回折環全周を細かく分解しより多くのデータを得ることが好ましく、例えば、角度 の間隔（インターバル）を 1° とし、回折環全周にわたって計 360 個のデータを得ることが好ましい態様である。

【0040】

イメージングプレートや CCD 等を被検物の表面に対して所定の角度にて保持するための装置構成は、本発明の第一、第二の態様において必要な入射方向を達成し得るものを、適宜製作すればよい。

イメージングプレートとその中央に位置するコリメーターとの組は、1組だけを用意し、必要な入射方向へと配置位置を変えて、即ち、1組で多方向の測定を兼用して、測定を行うように構成してもよいし、必要な全ての照射方向の分だけの組を用意してもよい。

10

【0041】

被検物表面の測定点への斜め入射方向の角度（即ち、測定点における法線からの傾きの角度 θ_0 ）は、上記した従来の基本的なエリアディテクタ方式による 3 軸応力測定法における照射角度を参照してよい。

θ_0 は、 45° が最も好ましく、他の θ_0 の場合には、 $\theta_0 = 45^\circ$ の場合に対して $(\sin 2\theta_0)$ 倍の測定感度（精度）となる。 $\theta_0 < 45^\circ$ では、 θ_0 が 0° に近いほど、X 線吸収の影響が少なく、良好な回折環が得られる。 $45^\circ < \theta_0$ では、 θ_0 が 90° に近づくと、X 線浸入深さを浅くできるため、表面部の測定に適する。

【実施例】

【0042】

20

実施例 1

本実施例では、本発明による応力測定法の検証のため、シミュレーションを行った結果を示す。当該シミュレーションは、実際の被検物と X 線とを用いたものではないが、充分に一実施例として示すことができるものである。

先ず、次式（23）のような単純な応力成分を仮定した。

〔式（23）〕

$$\sigma_{initial} = \begin{pmatrix} 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 \end{pmatrix} \quad (MPa)$$

30

そして、標準的な特性 X 線である Cr K 線の照射による鋼（フェライト）の 211 回折の測定を想定して、以下に示す計算条件を設定した。

材料	: 鋼（フェライト）
ヤング率	: 206.0 (GPa)
ポアソン比	: 0.28
回折面のミラー指数 (hkl)	: 211
応力の無い状態での回折角度	: 156.4 (度)
X 線入射角度（法線との間の角度） θ_0	: 30.0 (度)、0.0 (度)
材料とディテクタとの間の距離	: 100.0 (mm)
計算に用いたひずみ の数	: 360
角度 の間隔（インターバル）	: 1.0 (度)

40

【0043】

上記のような場合について、回折環上のひずみ を に関して 1° ずつ 1° から 360° まで求めた。

この を仮想的に測定データと見なして本願発明の各応力計算法を適用し、応力値が正しく逆解析できるかを検証した。

図 2 は、角度（単位：度）とひずみ の関係を示すグラフ図であって、図 2 (a) は順解析計算によって得られた（斜め入射： $\theta_0 = 0^\circ$ および $\theta_0 = 30^\circ$ ）に対する分布を示し、図 2 (b) は、（垂直入射： $\theta_0 = 0^\circ$ および $\theta_0 = 0^\circ$ ）に対する 分

50

布を示すグラフ図である。

【 0 0 4 4 】

〔 検証結果 〕

図 2 (a)、(b) にそれぞれ示した 分布から、上記式 (7) の第一式の a_1 を求め、該 a_1 と \cos との関係として図示した結果を、図 3 (a) にグラフ図として示す。

また、同様に、上記式 (7) の第二式の a_2 を求め、該 a_2 と \sin との関係を図 3 (b) にグラフ図として示す。

図 3 (a)、(b) のグラフ図から明らかなどおり、両グラフ図ともプロット点は直線分布を示している。前者の直線の勾配からは剪断応力 τ_{xz} が得られ、後者の直線の勾配からは τ_{yz} が得られる。

【 0 0 4 5 】

次に、 $\theta_0 = 0$ および $\theta_0 = 30^\circ$ に対する 分布から、 a_1 と \cos との関係、および、 a_2 と \sin との関係、さらに、上記式 (7) の第三式の a_3 と \cos^2 との関係を求めた。これらの関係を、それぞれ図 4 (a) ~ (c) に示す。

図 4 (a) ~ (c) のグラフ図から明らかなどおり、いずれのグラフにおいても直線関係が認められる。

a_1 と \cos との関係の傾きと、既に得られている τ_{xz} を上記式 (1 8) に代入すると、垂直応力成分の差 ($\sigma_x - \sigma_z$) が得られる。

また、 a_2 と \sin との関係の傾きと、既に得られている τ_{yz} を上記式 (2 0) に代入すると剪断応力 τ_{xy} が得られる。

さらに、 a_3 と \cos^2 との関係の傾きと、既に得られている ($\sigma_x - \sigma_z$) と τ_{xz} とを上記式 (1 9) に代入すると垂直応力成分の差 ($\sigma_y - \sigma_z$) が得られる。

【 0 0 4 6 】

こうして得られた 2 種類の垂直応力成分の差 ($\sigma_x - \sigma_z$)、($\sigma_y - \sigma_z$)、および、3 種類の剪断応力 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} を、それぞれ上記式 (2 2) に代入すると、上記式 (2 1) から垂直応力 σ_z が決定できる。

その結果、 σ_z 、($\sigma_x - \sigma_z$)、($\sigma_y - \sigma_z$) が判明するので、3 種類の垂直応力成分 σ_x 、 σ_y 、 σ_z が決定できる。

こうして 3 軸応力成分 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} のすべてが確定する。

【 0 0 4 7 】

以上のようにして、図 2 ~ 図 4 のシミュレーション結果から 3 軸応力成分の計算を行った結果を次式 (2 4) に示す。

〔 式 (2 4) 〕

$$\sigma_{initial} = \begin{pmatrix} 100.00 & 100.00 & 100.00 \\ 100.00 & 100.00 & 100.00 \\ 100.00 & 100.00 & 100.00 \end{pmatrix} \quad (MPa)$$

【 0 0 4 8 】

上記式 (2 3) と上記式 (2 4) とが一致していることから明らかのように、上記式 (1 7) ~ (2 2) から全ての応力成分が完全に再現できていることが判明した。この結果より、本発明の X 線応力測定法の妥当性を確認することができた。

【 0 0 4 9 】

実施例 2

本実施例では、具体的な適用例として、平面研削加工 (grinding) した鋼材 (S 5 0 C) について本発明の方法を適用し、表面の残留応力を調べた。

試験片は、素材を長さ 6 0 mm、幅 9 mm、厚さ 4 mm の短冊状に切り出した後、表面を研削加工して残留応力を付与したものである。

X 線測定にはイメージングプレートを二次元検出器として用い、C r K 線による F e - 2 1 1 回折環を 2 方向について計測した。

主な X 線条件は、次のとおりである。

10

20

30

40

50

特性 X 線 : Cr K
 回折面のミラー指数 (h k l) : Fe - 2 1 1
 X 線管の電圧 : 2 0 (k V)
 X 線管の電流 : 1 (m A)
 コリメーターの直径 : 1 (m m)
 試料に対する X 線の入射角度 θ_0 : 0 (度)、3 0 (度)

【 0 0 5 0 】

回折環は、垂直入射方向 ($\theta_0 = 0^\circ$ 、 $\phi_0 = 0^\circ$) の X 線照射の場合、および、斜め入射方向 (z 軸から x 軸方向に $\theta_0 = 30^\circ$ 傾斜し、 $\phi_0 = 0^\circ$ の方向) の X 線照射の場合について計測した。

10

図 5 は、イメージングプレートを用いて測定して得られた回折環の画像であって、図 5 (a) は垂直入射方向の場合、図 5 (b) は斜め入射方向の場合を示している。

次に、図 5 (a)、(b) の各回折環を画像解析し、各回折環全周から半径を求め、それを回折角 2θ に変換してグラフ化した。図 6 (a)、(b) はそれぞれのグラフを示したものである。

図 6 (a)、(b) の各グラフ図から明らかとなり、 2θ は、回折環上において一定ではなく、試験片の残留応力により中央部 ($2\theta = 180^\circ$) 付近にピークを取るような分布を示していることが判明した。

【 0 0 5 1 】

次に、応力計算に必要な ($a_1 - \cos 2\theta$) 線図を求めた結果、図 7 のグラフ図が得られた。図 7 (a) は (垂直入射 : $\theta_0 = 0^\circ$ 、 $\phi_0 = 0^\circ$) の場合の ($a_1 - \cos 2\theta$) 線図を示し、図 7 (b) は (斜め入射 : $\theta_0 = 30^\circ$ 、 $\phi_0 = 0^\circ$) の場合の ($a_1 - \cos 2\theta$) 線図を示している。

20

垂直入射の場合 (図 7 (a))、および、斜め入射の場合 (図 7 (b)) とともに、実験誤差範囲で直線的な分布傾向が得られており、本発明の応力測定理論の予想と一致していることが分かる。

そこで、これら図 7 (a)、(b) の線図を用いて本発明の応力計算法により求めた残留応力値を下記表 1 にまとめて示す。表中の各応力の値の単位は M P a である。また、比較のため、Dölle-Hauk 法による応力測定結果を併記した。

30

【 0 0 5 2 】

【 表 1 】

残留応力	本発明の方法	Dölle-Hauk 法
$\sigma_x - \sigma_z$	-200	-244
$\sigma_y - \sigma_z$	-440	-432
τ_{xy}	4	10
τ_{xz}	50	45
τ_{yz}	3	1

40

【 0 0 5 3 】

上記表 1 から明らかとなり、剪断応力成分 (τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz}) に関しては本発明の方法による値と Dölle-Hauk 法による値とは、概ねよく一致していることが確認できた。また、垂直応力成分に関しても、それぞれの応力成分差 ($\sigma_x - \sigma_z$)、($\sigma_y - \sigma_z$) に関しては剪断応力と同様に良好な対応関係が得られていることがわかった。

なお、垂直応力成分の個々の値については、本発明の方法、Dölle-Hauk 法ともに、応力計算に使用する $2\theta_0$ 値の精度の影響を強く受け、さらに、装置ごとの機差も重畳すると考えられるので、適宜の補正を加えることが好ましい。

50

【 0 0 5 4 】

以上、実施例 1 のとおり、本発明の検証として、数値的なシミュレーションを行い、正しい値が得られることを確認した。また、実施例 2 のとおり、鋼材に研削加工を行った面の 3 軸残留応力を本方法を用いて求め、Dolle-Hauk 法と比較し、剪断応力および垂直応力成分差において両者の結果が良い相関性を示すことが確認できた。

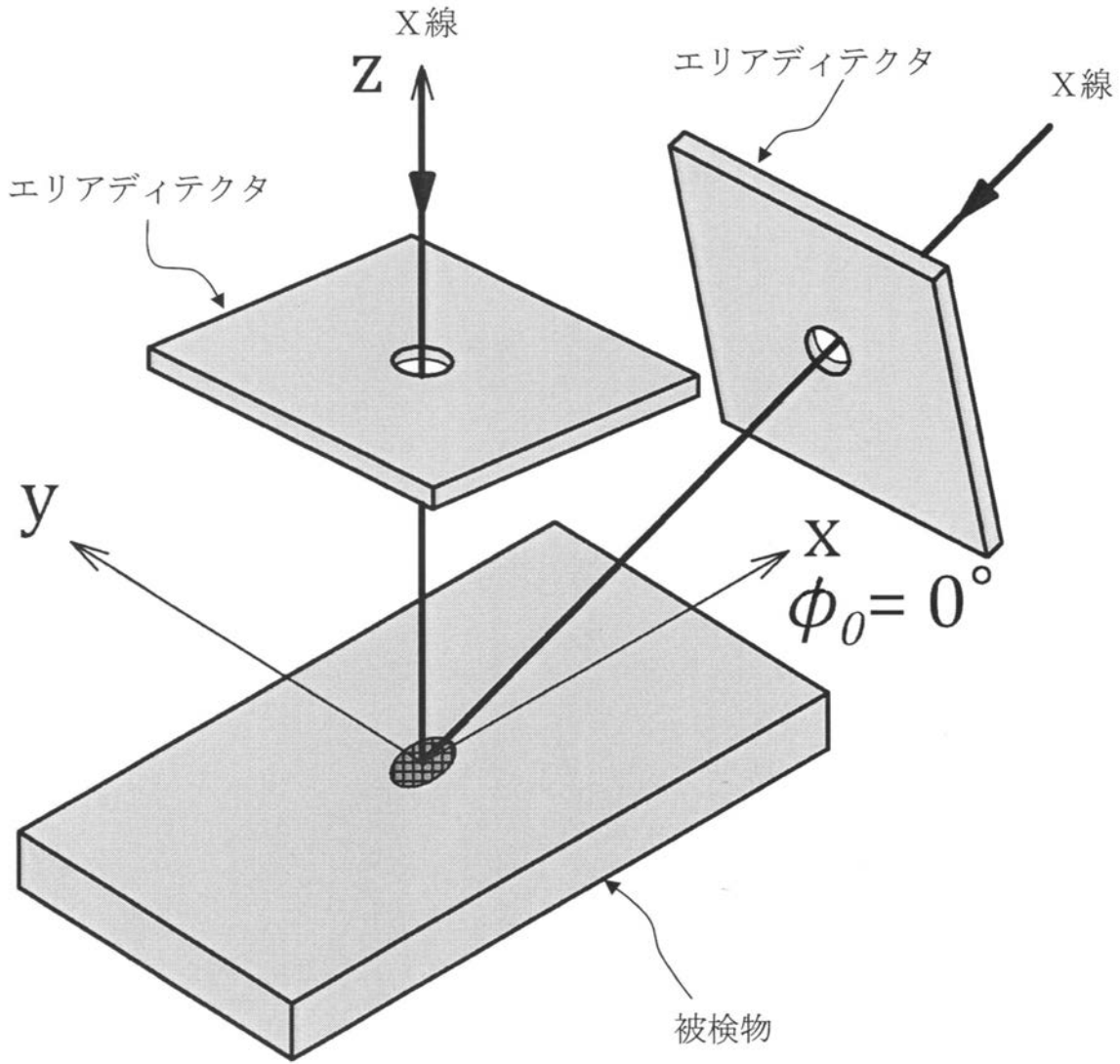
【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 5 5 】

本発明によって、従来の基本的なエリアディテクタ方式の 3 軸応力測定法における y 成分についての測定精度が改善され、X 線 3 軸応力測定法の有用性がより高くなった。

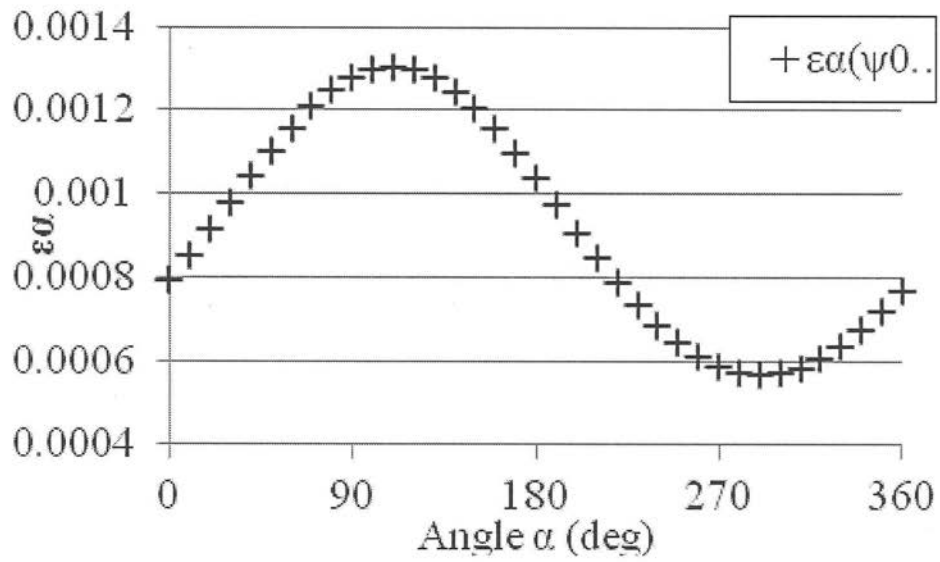
また、軸受部品は、転がり疲労を受けるため微視的な 3 軸残留応力状態の出現が予想される部品の一つと考えられ、玉が転がる溝内が最重要部分となるが、X 線応力測定においては測定スペース（とりわけ照射方向）の制限の問題がある。よって、形状面から X 線照射方向が制限されるような被験体特有の条件に対応した X 線 3 軸応力測定法が必要となる。これに対して、本発明では、照射面の法線の方向（垂直入射方向）と、溝と平行に傾斜させた一方向（斜め入射方向）からの X 線照射との計 2 方向からの照射によって X 線 3 軸応力測定できるので、照射方向が限定された用途に対応することが可能である。

【図1】

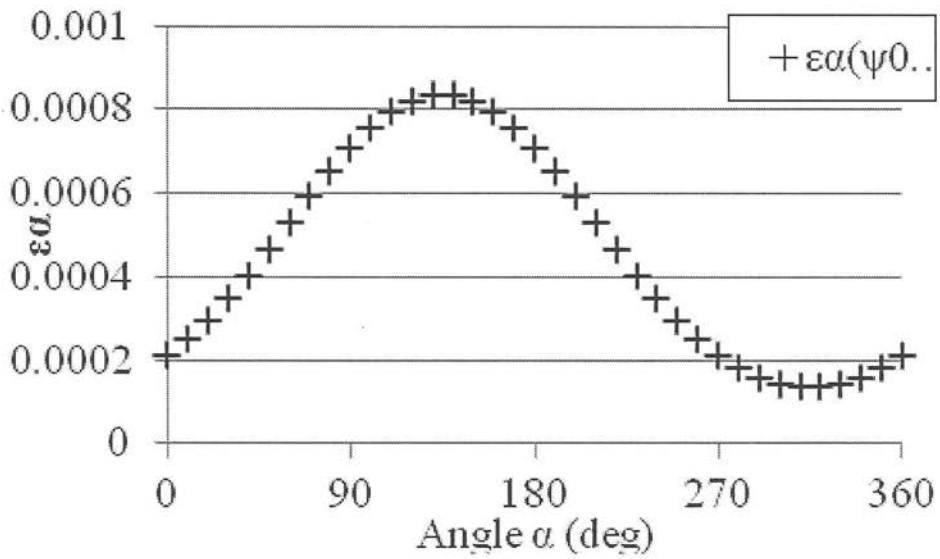


【 図 2 】

(a)

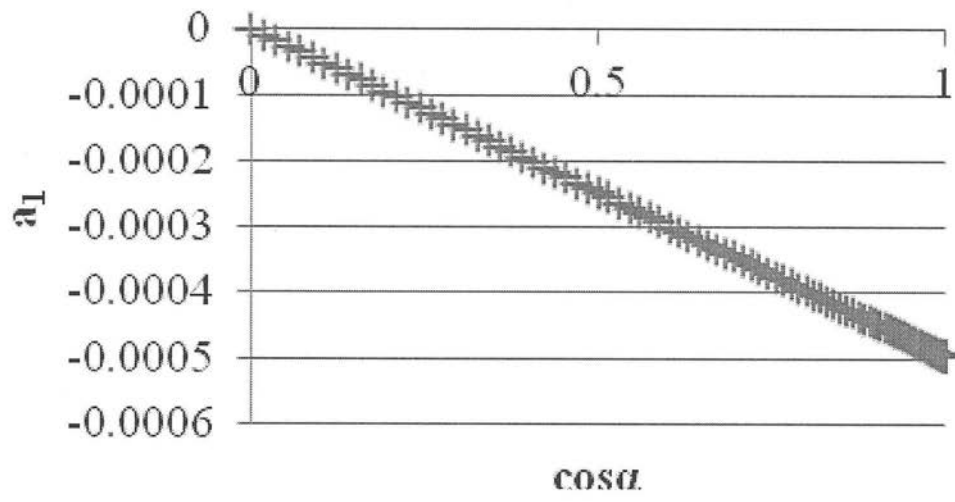


(b)

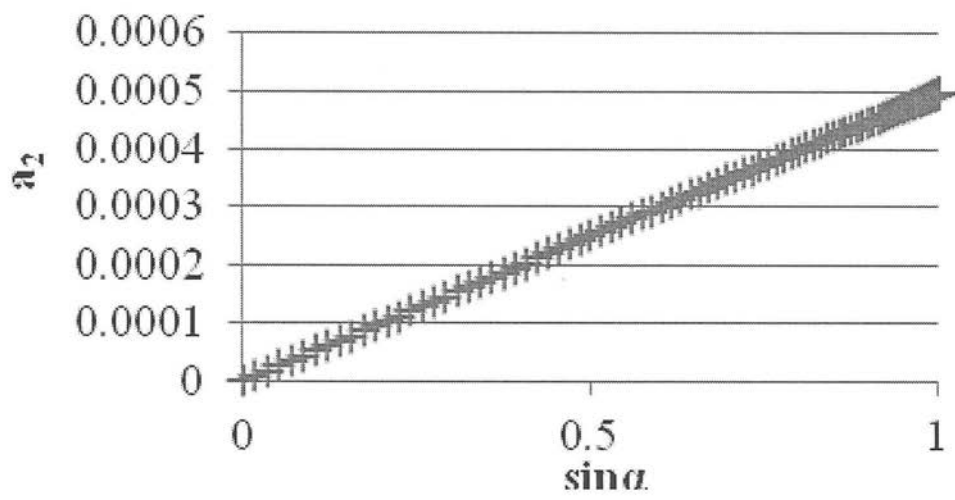


【 図 3 】

(a)

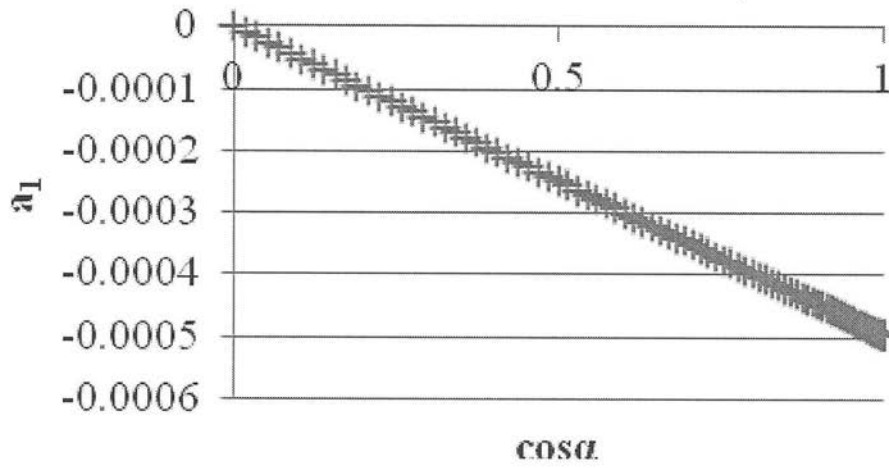


(b)

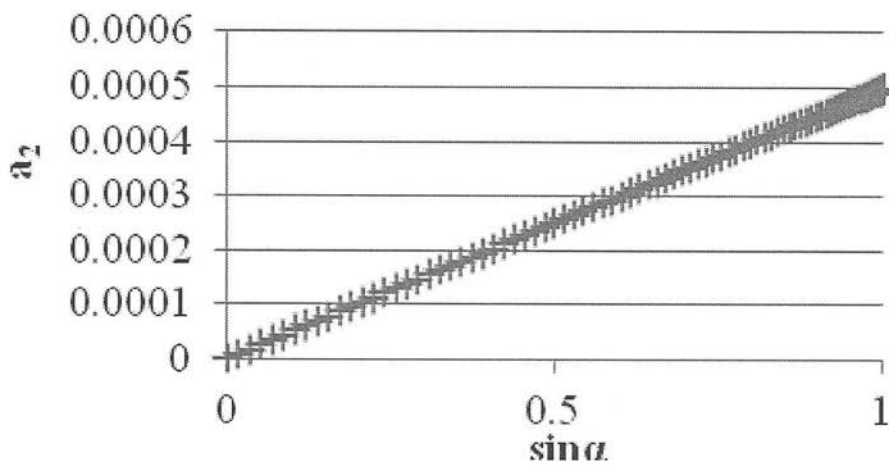


【 図 4 】

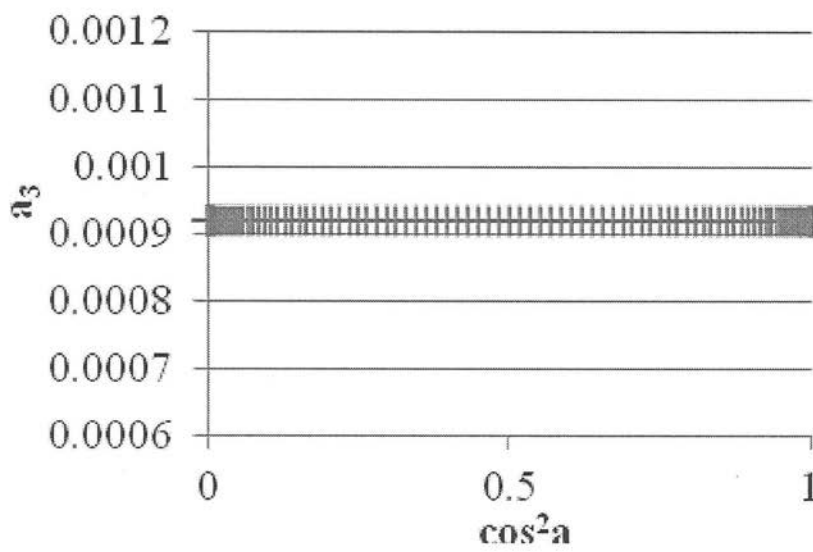
(a)



(b)

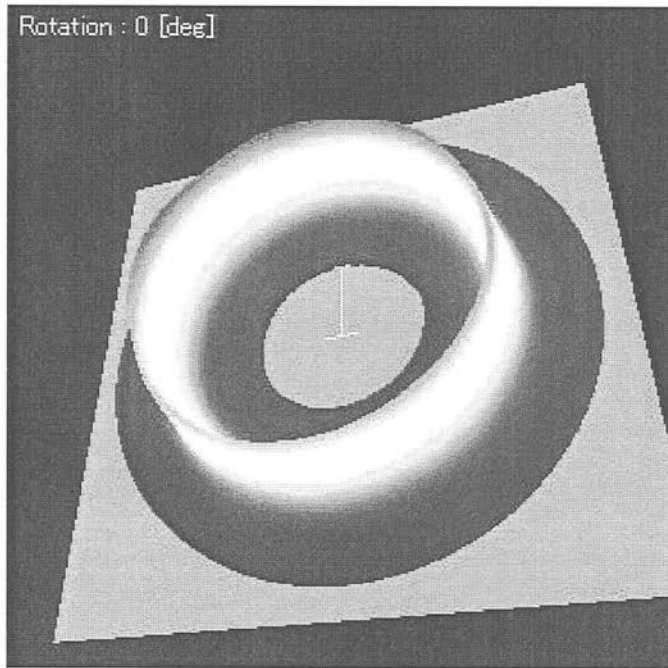


(c)

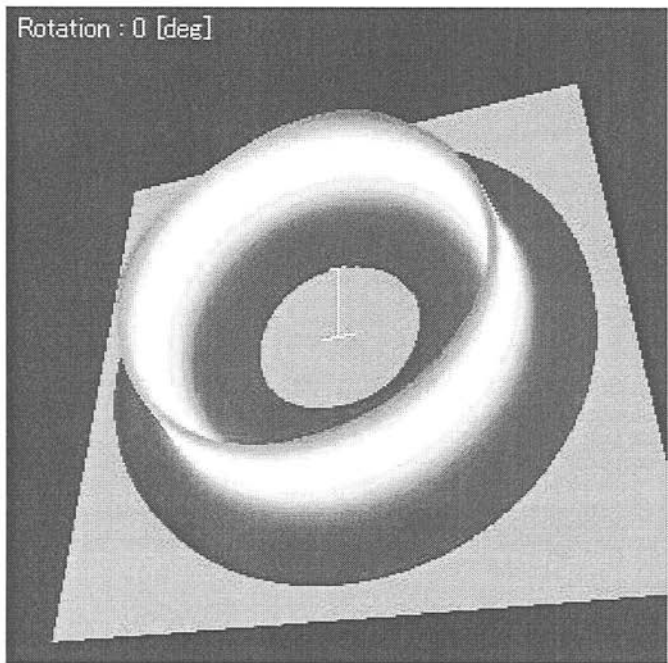


【 図 5 】

(a)

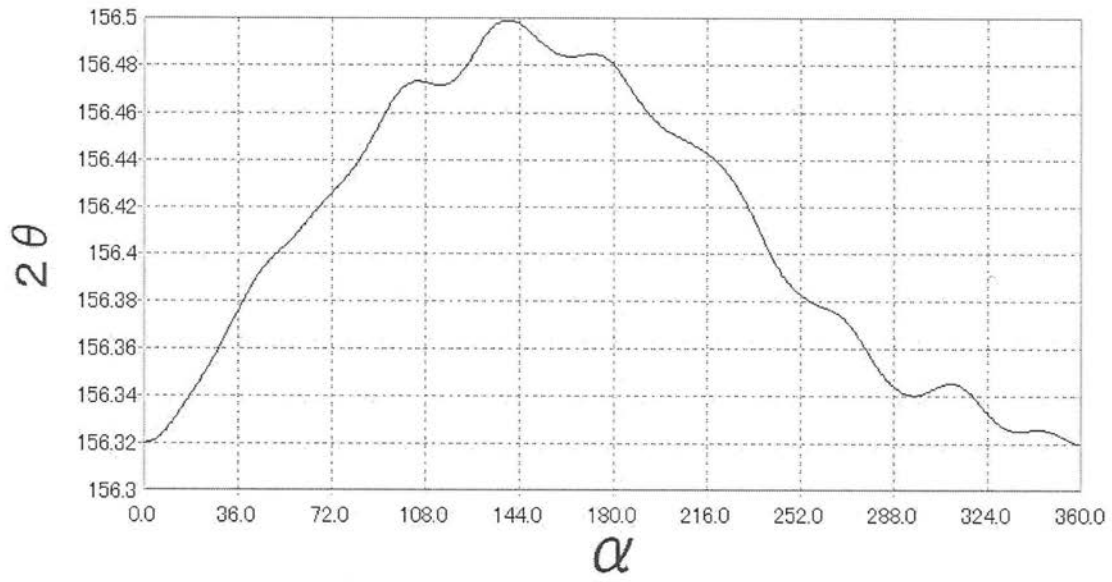


(b)

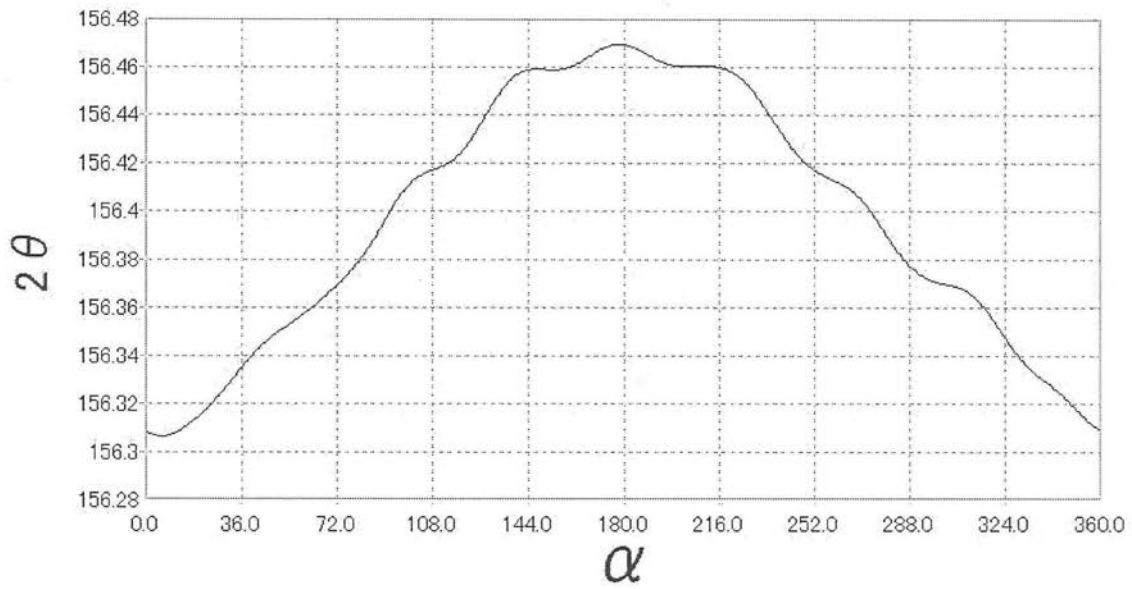


【 図 6 】

(a)

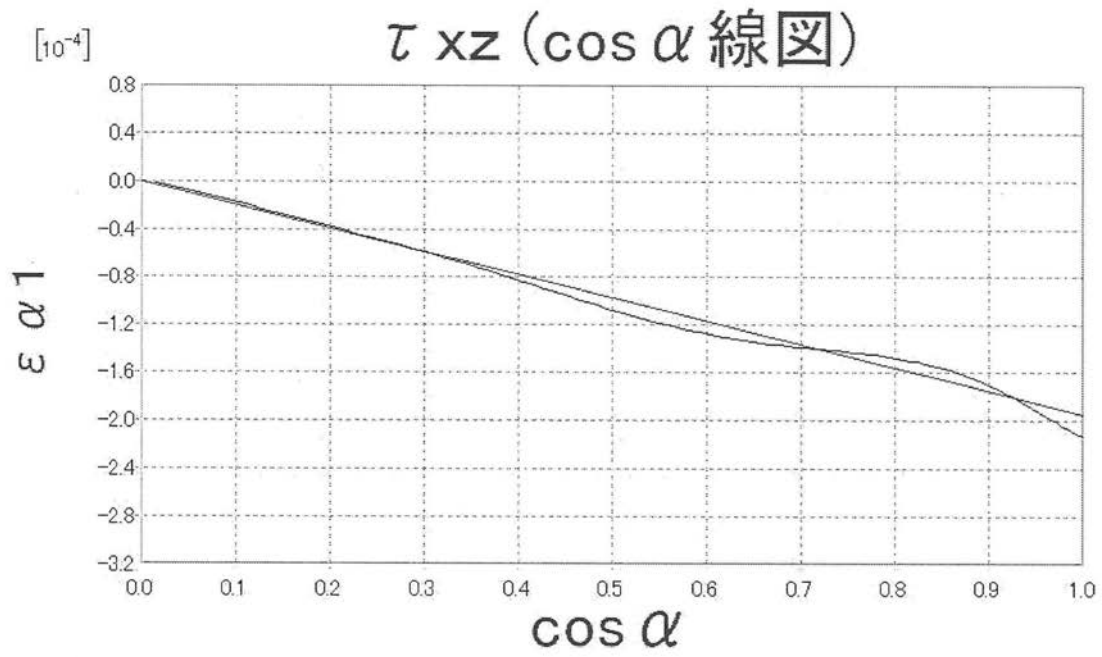


(b)

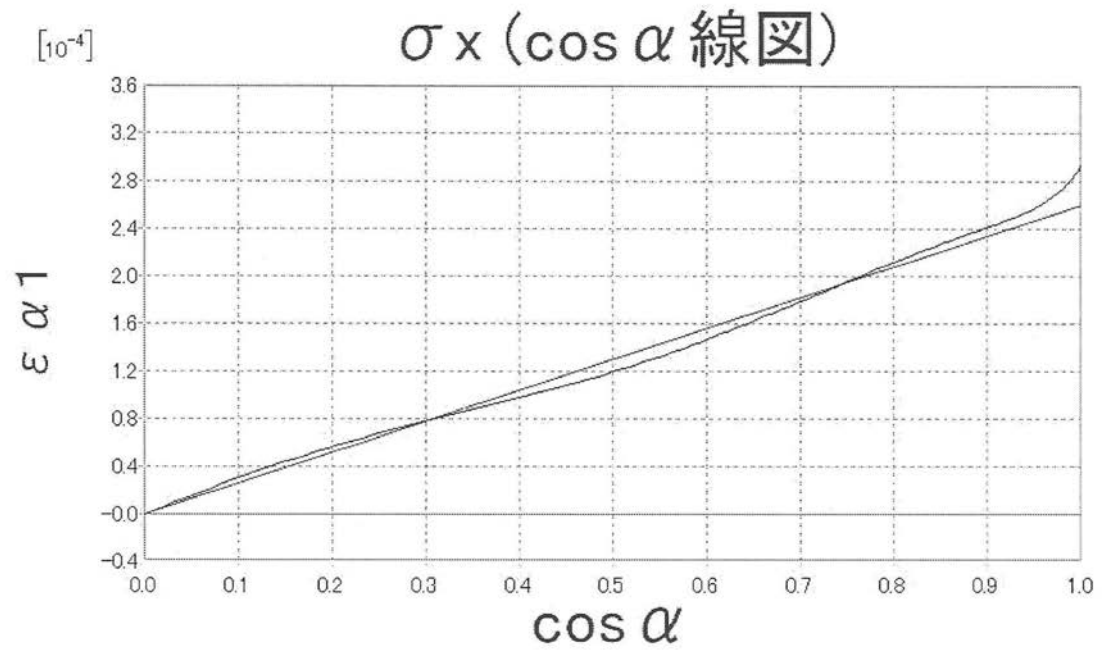


【図7】

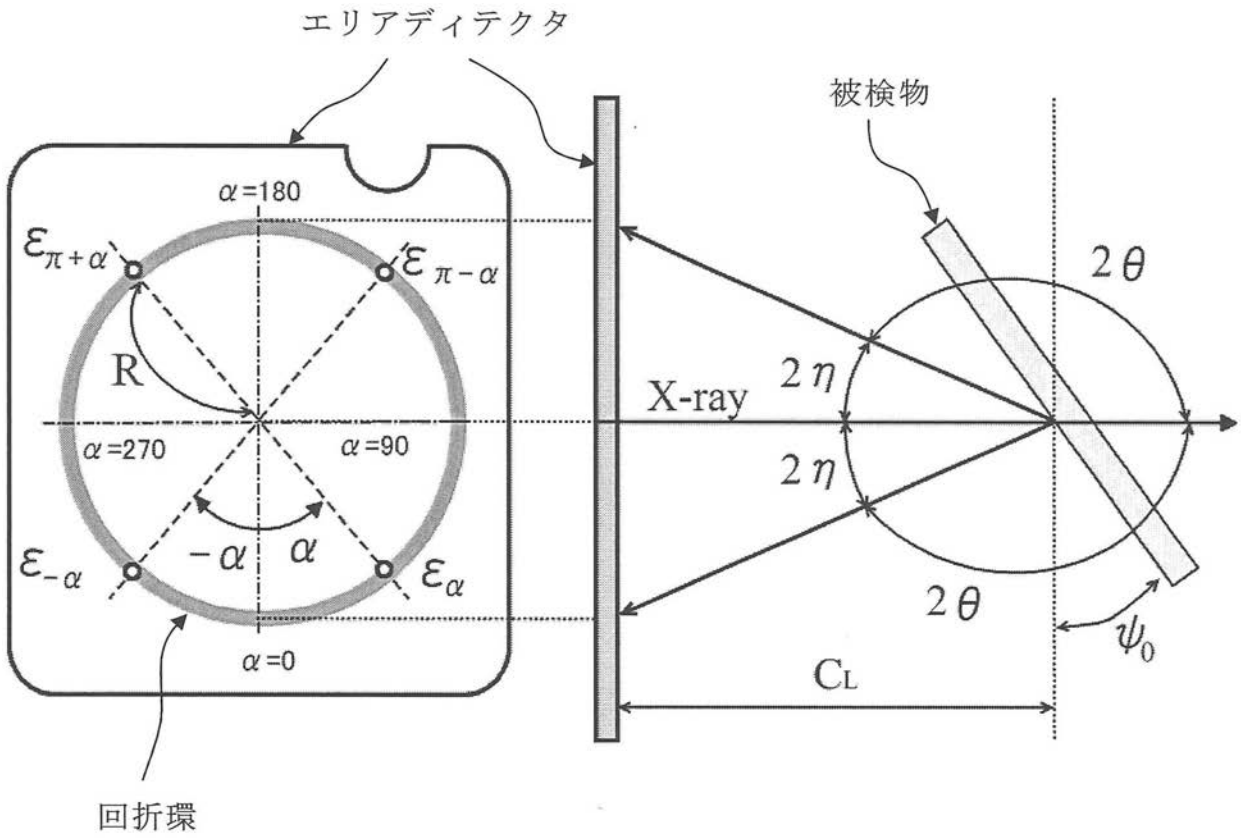
(a)



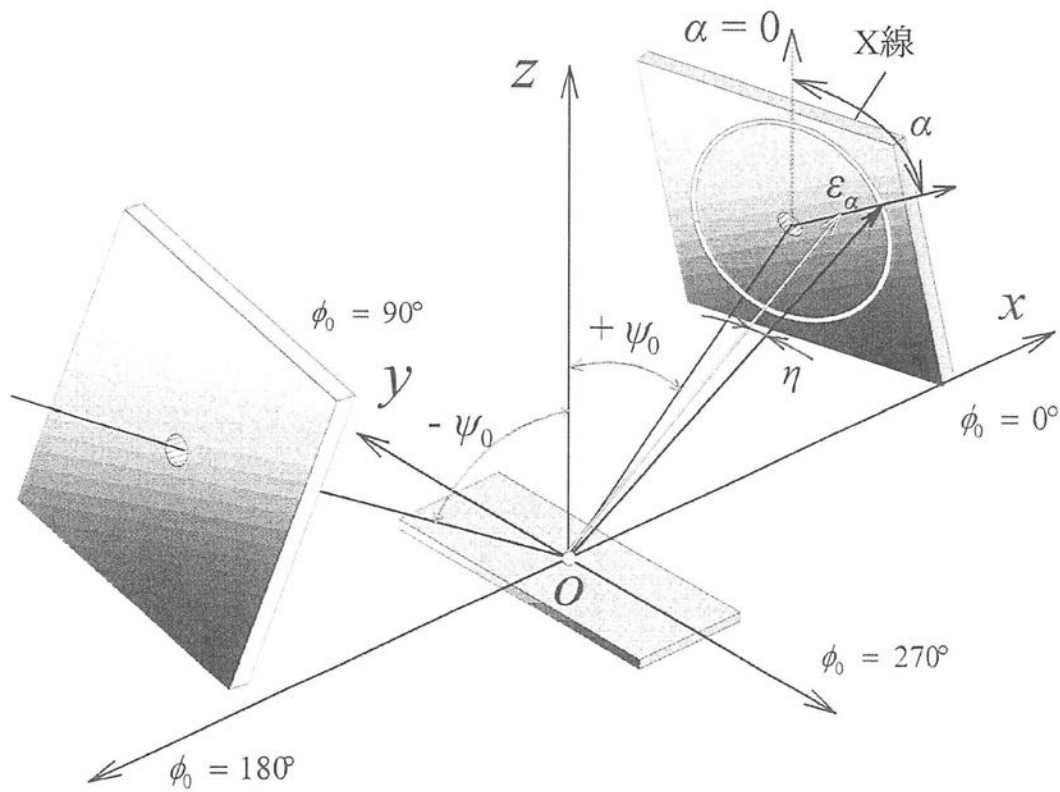
(b)



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(74)代理人 100163658

弁理士 小池 順造

(74)代理人 100174296

弁理士 當麻 博文

(72)発明者 佐々木 敏彦

石川県金沢市角間町又7番地 国立大学法人金沢大学内

Fターム(参考) 2G001 AA01 BA18 CA01 GA13 KA07 LA02