

(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2005-292028
(P2005-292028A)

(43) 公開日 平成17年10月20日(2005. 10. 20)

(51) Int.Cl.⁷
G 0 1 B 11/16

F I
G O 1 B 11/16

Z

テーマコード (参考)
2 F O 6 5

審査請求 未請求 請求項の数 1 O L (全 8 頁)	
(21) 出願番号 (22) 出願日	特願2004-109921 (P2004-109921) 平成16年4月2日 (2004. 4. 2)
(71) 出願人	303019123 木原 利喜 大阪府和泉市光明台二丁目5番8号
(71) 出願人	000125347 学校法人近畿大学 大阪府東大阪市小若江3丁目4番1号
(72) 発明者	木原 利喜 大阪府和泉市光明台二丁目5番8号
Fターム(参考)	2F065 AA65 BB03 BB22 FF50 GG04 GG22 HH10 HH13 HH15 JJ03 JJ09 JJ26 LL33 LL34 LL36 QQ17 QQ26

(54) 【発明の名称】 楕円偏光入射による複屈折板の測定法

(57) 【要約】

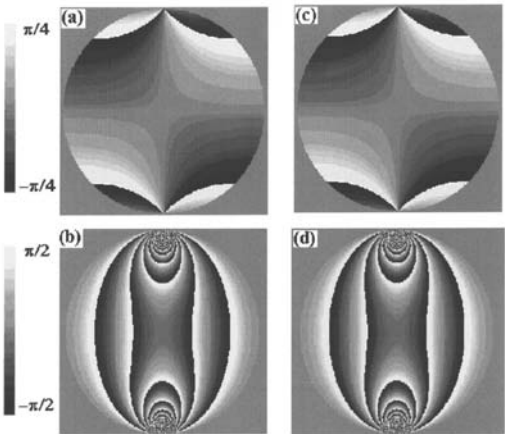
【課題】

楕円偏光入射による複屈折板の方位角 ψ と絶対的相対位相差 ρ_{toi} の測定法を示す。

【解決手段】

従来の楕円偏光入射を使用する測定方法では、絶対的相対位相差 ρ_{toi} の測定は予め測定した校正表との測定強度の比較から決める。本発明は楕円偏光入射による複屈折板からの射出光を1/4波長板 Q_2 と偏光子 P_2 で構成される検光子系で数2の方法により測定する。これにより、任意の波長の入射光による Q_2 の位相誤差を克服できる。それゆえ、楕円偏光の楕円率角 ε と方位角 θ が既知の場合、 ψ と ρ はそれぞれ数3と数4で得ることができ、それを位相结合することにより任意の方位角 ψ と絶対的相対位相差 ρ_{toi} を得ることができる。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

楕円偏光入射を利用して、複屈折板の方位角 ψ と絶対的相対位相差 $\rho_{t o l}$ をアークタンゼント関数から解析する方法。この方法は多波長の入射光の使用による複屈折板の動的測定に利用できる。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光技術を利用した複屈折板の複屈折および光弾性モデルの応力解析のための解析法を開発したものである。

10

【背景技術】

【0002】

複屈折板の方位角 ψ と相対位相差 ρ の測定は1/4波長板と偏光子で構成される検光子系により視覚的に測定でき、これは光弾性法としてよく知られている。この方法の自動測定は一点測定と全視野測定に分類できる。全視野測定はCCDカメラとコンピュータの使用により遂行され、さまざまな全視野測定法がある¹⁻⁹。これらの方法の中で位相シフト法はデータ取得の自動化に対して広く利用されている¹。

【0003】

位相シフト法は光学素子を回転することによりモデルからの位相をシフトさせて記録する技術である。完全な自動測定では、絶対的相対位相差 $\rho_{t o l}$ と $\rho_{t o l}=2\pi N$ (N : 整数)⁶ あるいは $\pi N^{5,7}$ 付近も含むモデル全域の方位角 ψ の測定が必要である。 ψ と $\rho_{t o l}$ の測定は一般に入射光に直線偏光⁶か円偏光^{5,7}を使用する。他方、楕円偏光を使用する測定方法はあまり存在しない^{2,10}。今までの楕円偏光を利用する方法では、 $\rho_{t o l}$ は予め測定した校正表から決める。

20

【0004】

【非特許文献 1】Ramesh, K. (2000) Digital Photoelasticity. Springer-Verlag.

【非特許文献 2】Redner, A. S. (1985) Photoelastic measurements by means of computer-assisted spectral-content analysis. Exp. Mech. 25, 148-153.

【非特許文献 3】Voloshin, A.S. and Burger, C.P. (1983) Half-fringe Photoelasticity : A new approach to whole-field stress analysis. Exp. Mech. 23, 304-313.

30

【非特許文献 4】Hecker, F.W. and Morche, B. (1986) Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity. Experimental stress analysis. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 535-542.

【非特許文献 5】Kihara, T. (1989) Automatic whole-field measurement of relative retardation and principal axes using circular-polarized incident light (in Japanese). Proc. of the Japan Society for Photoelasticity 9, 1-8.

【非特許文献 6】Kihara, T. (1990) Automatic Whole-field measurement of photoelasticity using linearly polarized light. Proc. of the 9th Int. Conf. on Exp. Mechanics, Copenhagen, 821-827.

【非特許文献 7】Patterson, E.A. and Wang, Z. F. (1991) Towards full field automated photoelastic analysis of complex components. Strain, 49-56.

40

【非特許文献 8】Plouzenec, N. and Lagarde, A. (1999) Two-wavelength method for full-field automated photoelasticity. Exp. Mech. 39, 274-277.

【非特許文献 9】Kihara, T. (2003) An arctangent unwrapping technique of photoelasticity using linearly polarized light at three wavelengths. Strain 39, 65-71.

【非特許文献 10】Yoneyama, S. and Takashi, M. (1999) Photoelastic analysis from a single image using elliptically polarized tricolor light. JSME International Journal, Series A, 42, 396-402.

【非特許文献 11】Kihara, T. (1994) Stokes parameters measurement of light over a wide wavelength range by judicious choice of azimuthal settings of quarter-wave 50

e plate and linear polariser, Optics Comm. 110, 529-532.

【非特許文献 1 2】Frochit, M.M. (1948) Photoelasticity Vol.2, John Wiley & Sons, Chapter 4.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

複屈折板の完全な測定では、絶対的相対位相差 ρ_{t01} とモデル全域の方位角 ψ の測定が必要である。 ψ の測定は単色入射光だけでは $\rho_{t01} = 2\pi N$ (N : 整数) あるいは πN での位置の測定は不定である。そのため、一般にそれらの位置での ψ の測定は数値計算により内挿で求めるか、多波長を利用して求める。また、 ρ_{t01} は ρ を位相結合して得るか多波長の利用による一致法から求める。また、多波長を利用する場合は検光子系に使用する 1/4 波長板に位相誤差が生じる。さらに、入射光は直線偏光か円偏光を使用する方法が一般的である。今までの楕円偏光入射光を用いる方法では、 ρ_{t01} は予め測定した校正表から決めている。

10

【0006】

本発明では複屈折板の方位角 ψ と絶対的相対位相差 ρ_{t01} の測定に任意の楕円偏光入射光を利用する方法を発明する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

楕円率角 ε で方位角 θ の楕円偏光 $S(\varepsilon, \theta)$ が複屈折板 $M(\psi, \rho)$ に入射し、1/4 波長板 Q_2 と偏光子 P_2 で構成される検光子系により記録される光強度 $I(\varepsilon, \theta, \beta_2, \alpha_2)$ は数 1 となる。

20

【0008】

【数 1】

$$I(\varepsilon, \theta, \beta_2, \alpha_2) = 0.5 I_0 \{ 1 + [2 \sin^2(\rho/2) \cos 2\varepsilon \sin 2(\phi - \theta) + \sin \rho \sin 2\varepsilon] \\ \times [- (1 + \sin \Delta \rho_1) \cos 2(\beta_2 - \phi) \sin 2(\alpha_2 - \beta_2) + \sin 2(\alpha_2 - \phi)] + \sin 2(\alpha_2 - \beta_2) \\ \times [\cos 2\varepsilon (1 + \sin \Delta \rho_1) \sin 2(\beta_2 - \theta) + \cos \Delta \rho_1 (\sin \rho \cos 2\varepsilon \sin 2(\phi - \theta) \\ + \cos \rho \sin 2\varepsilon)] + \cos 2\varepsilon \cos 2(\alpha_2 - \theta) + I_N \}$$

30

ここで、 $I(\varepsilon, \theta, \beta_2, \alpha_2)$ は、楕円率角 ε で方位角 θ の楕円偏光入射光が複屈折板から射出した光を位相誤差 $\Delta \rho_1$ で方位角 $\beta_2 (^\circ)$ の 1/4 波長板と方位角 $\alpha_2 (^\circ)$ の偏光子で測定したときの光強度である。 I_0 は入射光強度であり、 I_N は背景光強度である。

【0009】

これより、光のストークスベクトル S' (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3) は数 2 で計算される^{9, 11}。

【0010】

【数 2】

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S'^2_1 + S'^2_2 + S'^2_3)^{0.5} \\ I(\varepsilon, \theta, 0, 0) - I(\varepsilon, \theta, 90, 90) \\ I(\varepsilon, \theta, 45, 45) - I(\varepsilon, \theta, 135, 135) \\ [I(\varepsilon, \theta, -45, 0) - I(\varepsilon, \theta, 45, 0)] / \cos \Delta \rho_1 \end{bmatrix}$$

40

ここで、 $\{S'_0, S'_1, S'_2, S'_3\}$ は、射出光の基準化ストークスベクトルである。

【0011】

楕円率角 ε で方位角 θ の任意の楕円偏光入射光を用いて、測定されたストークスパラメータ $\{S'_0, S'_1, S'_2, S'_3\}$ から、複屈折板の方位角 ψ と相対位相差 ρ は、それぞれ、数 3 と数 4 より得ることができる。

50

【 0 0 1 2 】

【 数 3 】

 ϕ の計算

$$\begin{aligned}\phi &= -0.5 \tan^{-1}[(s'_1 - \cos 2\varepsilon \cos 2\theta)/(s'_2 - \cos 2\varepsilon \sin 2\theta)] \\ &= -0.5 \tan^{-1}\{[-(2\sin^2(\rho/2)\cos 2\varepsilon \sin 2(\phi - \theta) + \sin \rho \sin 2\varepsilon) \sin 2\phi] / [(2\sin^2(\rho/2) \\ &\quad \cos 2\varepsilon \sin 2(\phi - \theta) + \sin \rho \sin 2\varepsilon) \cos 2\phi]\}.\end{aligned}$$

ψ はストークスパラメータ s'_1 と s'_2 , および入射楕円偏光の ε と θ で得られる。 ψ の値はアークタンゼント関数で得られるのでその位相結合 (アンラップ) は容易にできる⁹。しかしながら、単色光入射のみによる測定では、 ψ は $2\sin^2(\rho/2)\cos 2\varepsilon \sin 2(\psi - \theta) + \sin \rho \sin 2\varepsilon = 0$ の位置では不定であるが、多波長入射光による測定では可能である。

【 0 0 1 3 】

【 数 4 】

 ρ の計算

$$\begin{aligned}\rho &= \tan^{-1}\left\{\frac{s'_1 \sin 2\varepsilon \sin 2\psi - s'_2 \sin 2\varepsilon \cos 2\psi - s'_3 \cos 2\varepsilon \sin 2(\psi - \theta)}{-s'_1 \cos 2\varepsilon \sin 2\psi \sin 2(\psi - \theta) + s'_2 \cos 2\varepsilon \cos 2\psi \sin 2(\psi - \theta) - s'_3 \sin 2\varepsilon}\right\} \\ &= \tan^{-1}\left\{\frac{\sin \rho [\cos^2 2\varepsilon \sin^2 2(\psi - \theta) + \sin^2 2\varepsilon]}{\cos \rho [\cos^2 2\varepsilon \sin^2 2(\psi - \theta) + \sin^2 2\varepsilon]}\right\}.\end{aligned}$$

ρ はストークスパラメータ s'_1, s'_2, s'_3 と ε, θ および ψ から得られる。 ρ の値もアークタンゼント関数で得られるのでそのアンラップは容易にできる。 ρ は $\cos^2 2\varepsilon \sin^2 2(\psi - \theta) + \sin^2 2\varepsilon = 0$ の位置では不定である。しかしながら、 ρ は $\varepsilon = 0$ および $\psi = \theta$ 以外の位置で得ることができる。 $\varepsilon \neq 0$ の場合 (直線偏光でない場合)、 ρ は ψ の値に影響されない。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 4 】

楕円偏光の使用を基にした複屈折板の方位角 ψ と相対位相差 ρ の測定方法を発明した。 ψ および ρ は位相のアンラップを容易に遂行できるアークタンゼント関数により得ることができる。この方法は異なる波長の入射光を利用することにより生じる 1/4 波長板の位相誤差を克服できる。それゆえ、多波長の楕円偏光入射光の使用による複屈折板モデルの動的測定に対して利用できることが期待される。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 5 】

波長 λ_i の楕円偏光 $S(\varepsilon, \theta)$ が複屈折板 $M(\psi, \rho)$ に入射し、1/4 波長板 Q_2 と偏光子 P_2 で構成される検光子系を通過し CCD カメラにより記録される光学系を図 1 に示す。観測される光強度 $I(\varepsilon, \theta, \beta_2, \alpha_2)$ よりストークスパラメータは数 2 より得られ、それらのストークスパラメータから ψ および ρ が得られることを数値シミュレーションから検証する。

【 実施例 】

【 0 0 1 6 】

実施例での複屈折板モデルは対向圧縮荷重を受ける円板を使用し、楕円偏光入射と円偏光入射を利用して円板モデルの方位角 ψ と相対位相差 ρ を数値シミュレーションからそれぞれ得る。それらの比較から、楕円偏光入射による ψ と ρ の測定が正確に得られることを証明する。

【 0 0 1 7 】

対向圧縮荷重 P を受ける円板の主応力方向 ψ と相対位相差 ρ の理論解は数 5 と数 6 で与えら

10

20

30

40

50

れる。

【 0 0 1 8 】

【 数 5 】

$$\psi = 0.5 \tan^{-1} \{ 2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y) \},$$

【 0 0 1 9 】

【 数 6 】

$$\rho = \alpha t \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 \}^{0.5}.$$

10

ここで、円板の応力成分は以下の数式で与えられる¹²。

【 0 0 2 0 】

【 数 7 】

$$\sigma_x = -(2P/\pi t) \{ (R-y)x^2/r_1^4 + (R+y)x^2/r_2^4 - 1/d \},$$

【 0 0 2 1 】

【 数 8 】

$$\sigma_y = -(2P/\pi t) \{ (R-y)^3/r_1^4 + (R+y)^3/r_2^4 - 1/d \},$$

20

【 0 0 2 2 】

【 数 9 】

$$\tau_{xy} = (2P/\pi t) \{ (R-y)^2 x/r_1^4 - (R+y)^2 x/r_2^4 \},$$

ところで、d, R, および t は円板の直径、半径、厚みであり、 $r_1^2 = x^2 + (R-y)^2$, および $r_2^2 = x^2 + (R+y)^2$ の関係がある。また、 α は入射光の波長 λ_i でのモデルの光弾性感度である。

30

【 0 0 2 3 】

入射偏光が右回り円偏光である場合、 ψ と ρ は $\varepsilon = \pi/4$ と $\theta = 0$ を伴って数10と数11により計算できる。

【 0 0 2 4 】

【 数 10 】

$$\begin{aligned} \psi &= -0.5 \tan^{-1} [s_1/s_2] \\ &= -0.5 \tan^{-1} [(-\sin \rho \sin 2\psi) / (\sin \rho \cos 2\psi)] \end{aligned},$$

40

【 0 0 2 5 】

【 数 11 】

$$\begin{aligned} \rho &= \tan^{-1} [(-s_1 \sin 2\psi + s_2 \cos 2\psi) / s_3] \\ &= \tan^{-1} [\sin \rho (\sin^2 2\psi + \cos^2 2\psi) / \cos \rho] \end{aligned}.$$

【 0 0 2 6 】

シミュレーションでは、波長 $\lambda_i = 0.6360 \mu\text{m}$ の直線偏光と波長 $0.5145 \mu\text{m}$ 用の1/4波長板から作られた楕円偏光入射光を波長 $0.5145 \mu\text{m}$ 用の1/4波長板で測定する場合を想定する。その場合、入射楕円偏光の楕円率角 ε と方位角 θ は $\varepsilon = 36.4^\circ$ および $\theta = 15^\circ$ であり、 Q_2 の位相誤差は $\Delta \rho_i = -17.2^\circ$ である。数値シミュレーションのための円板モデルの実験条

50

件を表1に示す。シミュレーションでの円板の直径(40.0 mm)はCCDカメラの画素で320 ピクセルとした。普通のCCDカメラは512×512 ピクセルで0-255階調 (8 ビット)であるので、入射光強度 I_0 と背景光強度 I_N の値はCCDカメラから記録される値を考慮して、それぞれ160と40に決めた。実際の実験では、 I_0 と I_N は強度変動が生じる、しかし、ここでは方法の有用性の証明のため、これらは考慮しない。

【 0 0 2 7 】

【表 1】

	楕円偏光入射	円偏光入射
楕円率角 $\varepsilon(^{\circ})$	36.4	45
方位角 $\theta(^{\circ})$	15	15
位相誤差 $\Delta\rho_i(^{\circ})$	-17.2	0
荷重 $P(N)$	196	196
直径 $2R(mm)$	40.0	40.0
厚み $t(mm)$	6.0	6.0
光弾性感度 $\alpha(mm/N)$	0.0774	0.0774
入射光強度 I_0	160	160
背景光強度 I_N	40	40

10

20

【 0 0 2 8 】

荷重 $P=196\text{ N}$ を受ける円板モデルの主応力方向 ψ と相対位相差 ρ の理論値は数10と数11から計算した。図2は ψ と ρ の理論値であり、図2(a)と2(b)はモデル全域の ψ と中心水平上の ρ を示す。そして、シミュレーションはこれらの ψ と ρ を得るように遂行した。

【 0 0 2 9 】

楕円率角 $\varepsilon=36.4^{\circ}$ および方位角 $\theta=15^{\circ}$ の楕円偏光入射により得られた画像強度 $I(36.4, 15, \beta_2, \alpha_2)$ は数1で得られる。これらの強度 $I(36.4, 15, \beta_2, \alpha_2)$ から、ストークスパラメータは全域上のピクセルに対して数2から計算された。

【 0 0 3 0 】

入射楕円偏光の使用による ψ と ρ の値は数3と数4式から計算される。 ψ はストークスパラメータ s'_1 と s'_2 、および楕円偏光の ε と θ から得られる。シミュレートされた ψ は図3(a)に示す。 ψ はノイズによる強度変動を考慮しない数値解の結果として、不定の点を生じることなく、モデル全域上で得られた。 ρ は $s'_1, s'_2, s'_3, \varepsilon, \theta$ および得られた ψ を用いて計算された。 ρ は図3(b)に示すように全域で得られた。入射光に円偏光を使用したときの ψ と ρ の値は、 $\varepsilon=45^{\circ}$ 、 $\theta=15^{\circ}$ および $\Delta\rho_i=0$ として数10と数11からシミュレートされた。得られた ψ と ρ はそれぞれ図3(c)と3(d)に示す。

30

【 0 0 3 1 】

楕円偏光と円偏光入射で得られた ψ と ρ の画像は正確に同じであり、理論値と完全に一致する。 ψ と ρ はアークタンゼント関数から得られるので、 ψ と ρ のアンラップは容易に遂行できる。その方法は位相ジャンプを消去することにより結合され、そしてある点での既知の値と比較して得た一定値を加えることで実行できる⁹。これらの事実から、楕円偏光入射光の使用により複屈折板の ψ と ρ の測定ができることが確認された。

40

【図面の簡単な説明】

【 0 0 3 2 】

【図1】楕円偏光入射光を利用する全画像測定法の光学系を示した図面である。 $S(\varepsilon, \theta)$ 、楕円偏光入射光； Q_2 、1/4波長板； P_2 、偏光子； D 、拡散板。

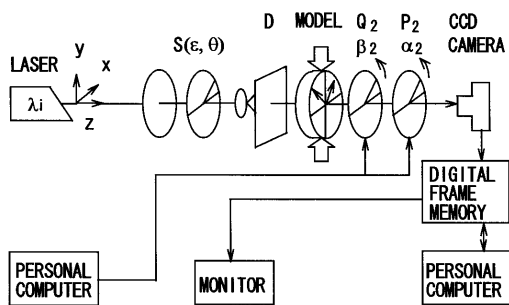
【図2】円板モデルの主応力方向 ψ と相対位相差 ρ の理論値。 ψ と ρ は数10と数11から計算した。(a)と(b)はモデル全領域の ψ と中心水平上の ρ を示す。

【図3】楕円偏光入射と円偏光入射で得られた ψ と ρ の画像。(a)および(b)は楕円率角 $\varepsilon=36.4^{\circ}$ および方位角 $\theta=15^{\circ}$ の楕円偏光入射によりシミュレートされた ψ と ρ の画像。(c

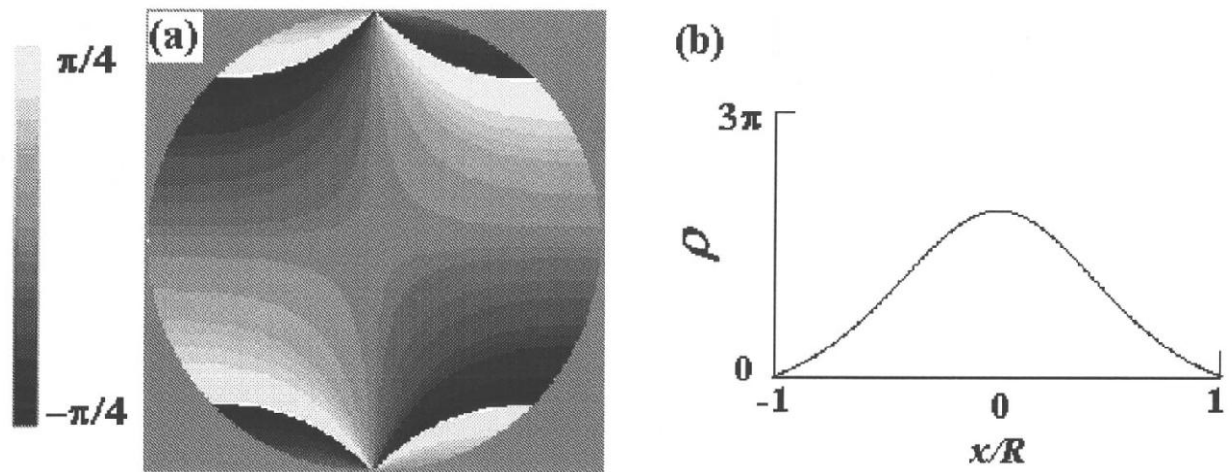
50

)および(d)は円偏光入射によりシミュレートされた ψ と ρ の画像。

【図 1】



【 図 2 】



【 図 3 】

