

位相シフト法による2次元複屈折測定

大谷 幸利・吉澤 徹

オプトエレクトロニクスの発展とともにガラスや透明プラスチック、結晶などの光学部品、光ディスクや薄膜製品などが利用されている。近年、これらの形状は複雑化、特殊化、大型化しており、内部に残留する応力歪みによる微小複屈折が問題になっている。そのため複屈折の高精度な測定法が求められている。さらに、電気光学効果や磁気光学効果を利用した光学素子の普及に伴って複屈折の分布をとらえたいという要求もある。

近年、光学技術の高度化とともにこれらの偏光や複屈折問題が盛んに議論されており、1994年のSan Diego会議のあと1996年に横浜でもSPIEの偏光解析に関する国際会議が開かれるに至っている¹⁾。

本稿ではまず、2次元の複屈折分布測定法についての現状を概観した上で、筆者らが進めている位相シフト法による複屈折分布測定を述べる。

1. 2次元複屈折測定法

複屈折の測定ではその大きさのみならず主軸方位（進相軸または遅相軸方位）の決定が要求される。一般に物質表面の複屈折の測定には古くからエリプソメーターによる測定法が知られている²⁾。

物質内部の複屈折測定法には、歪み計として使われているバビネ・ソレイユ補償器を用いた方法、あるいは1/4波長板によって偏光の補償を行うセナルモン法などの偏光補償法³⁾がある。しかしながら、これらの測定における位相の検出感度は数度程度と低く、再現性にも問題があった。さらに、測定試料の主軸方位を測定器の主軸に合わせておく必要があった。これに対して、複屈折の大きさを高精度

に求める解析法としてヤングの干渉縞を用いた手法が報告されている⁴⁾。一方、高分解能で自動的に複屈折の大きさおよび主軸方位を測定する手法として、持田による光弾性素子を用いた位相変調法⁵⁾や梅田・高和による横ゼーマンレーザーを用いた光ヘテロダイン法による計測法⁶⁾が報告され、両者ともに実際に製品化がなされている。しかし、これらの手法はいずれもが点計測であるため、複屈折の2次元的分布をとらえるには試料または光学系の全体を移動して走査させたり、ガルバノメーターで光線を走査させて計測を行う必要がある⁷⁾。

このような背景のもとで2次元の複屈折分布計測を行うために2つの流れがみられる。ひとつは点計測で実時間化、高速化を目指したものであり、他は画像計測として面で一度にとらえようとするものである。今まで、点計測での実時間化はプラスチックやガラス光ディスク基板の応力によって発生する複屈折測定装置として実際に使用されており、高速で回転している状態での測定が可能となっている^{8,9)}。例えば、図1に示すように測定サンプルに軸ゼーマンレーザーからの左右円偏光を透過させた後、1/4波長板と偏光子によって光ヘテロダイン法のビート信号として検出し、その位相と振幅情報をロックインアンプによって巧みに分離し、図2(a)に示すような光ディスクの静止状態から(b)に示すように3,000 rpmで高速に回転している状態での複屈折分布を得ている⁸⁾。図2では線分の方向が主軸方位を表し、長さが複屈折の大きさを示す。ここで高速回転時において主軸方位に変化がみられるが、これは遠心力によって発生する内部応力のためである。

2次元分布を画像的にとらえる手法としては、干渉縞解析によく用いられているフーリエ変換法¹⁰⁾や位相シフト法¹¹⁻¹³⁾を用いた複屈折測定法がある。フーリエ変換法を適用した例としては、古くから内部応力解析に用いられてき

東京農工大学工学部機械システム工学科(〒184-8588 小金井市中町2-24-16)
E-mail: otani@cc.tuat.ac.jp

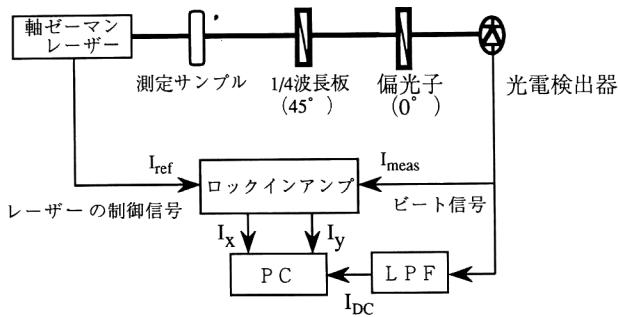


図1 軸ゼーマンレーザーを用いた実時間複屈折測定法。

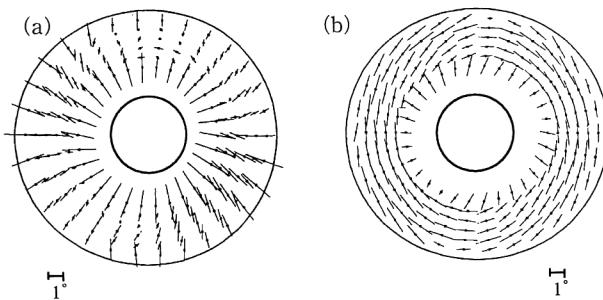


図2 回転している光磁気ディスク素材の複屈折分布（ポリカーボネート製 5.25 inch ディスク）。（a）静止状態の場合、（b）3,000 rpm で回転した場合。

た光弾性法¹⁴⁻¹⁷⁾に複屈折ウェッジプリズムを用いてキャリヤ一周波数を与えて光弾性縞解析を行った例がある¹⁶⁾。また、岡らは直交偏光成分にキャリヤ一周波数を与えることによって解析を行う偏光計を提案している¹⁹⁾。一方、位相シフト法を用いた例として、光弾性縞解析に適用し、大きさのみ²⁰⁾、または大きさと主軸方位を求める手法が報告されている²¹⁾。また、野口らはエリプソメトリーにおける回転検光子法を2次元に拡張し位相シフト法によって主軸および複屈折位相差を求めている^{22,23)}。筆者らは2回の位相シフト法を組み合わせた位相変調法を報告してきた²⁴⁻²⁶⁾。

実用化のためにはいかに画像数を減らして高速にかつ高精度に解析を行い複屈折分布を得るかが重要である。このような目的においては位相シフト法はフーリエ変換法に対して簡単に高精度に縞解析ができる。そこで、以下に位相シフト法による複屈折法について述べることとする。

2. 位相シフト法を用いた2次元複屈折分布測定法

2.1 回転検光子法

回転検光子法の基本構成は図3に示すように PQSQA の光学系である^{22,23)}。入射光は偏光子と1/4波長板によって円偏光として、測定サンプルに入射する。試料を透過し

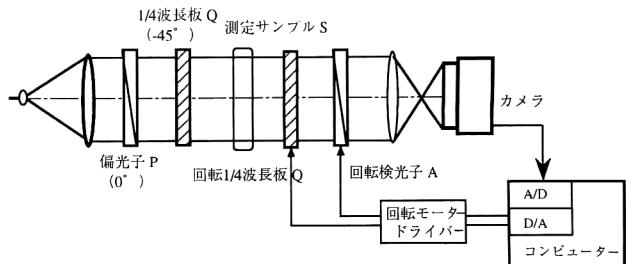


図3 回転検光子法による位相シフト法を用いた複屈折分布測定。

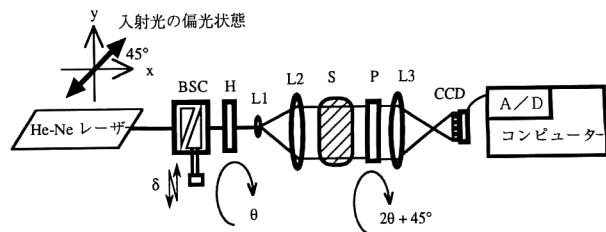


図4 位相変調法による位相シフト法を用いた2次元複屈折分布測定。BSC：バビネ・ソレイユ補償器または液晶位相変調器、H：半波長板、P：検光子、S：測定試料、C：CCD カメラ、L1, L2, L3：レンズ。

た梢円状態を、1/4波長板の主軸方位を 0° と 45° に変化させ、その各々の状態において検光子を回転させ位相シフトすることで位相を求める。ここで求まった2つの位相を α 、 β とすると以下の式を用いて複屈折位相差 Δ と主軸方位 ϕ を求めることができる。

$$\Delta = \tan^{-1} \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (2)$$

実際の位相シフトは 0° ～ 135° の間で 45° ごとに検光子を回転させた4ステップ位相シフト法を用いて、合計8枚の画像から複屈折の主軸方位および大きさを求めている。これらの光学素子の回転はコンピューター制御の電動モーターで行い、計測時間は1分以内ですみ、 2° 以内の誤差での複屈折計測が可能となっている。実際に測定サンプルとしてガラスとプラスチックレンズについてアフォーカル系の光学系によって複屈折分布の計測を行っている。

2.2 位相変調法

2.2.1 2回の位相シフト法を組み合わせた手法

位相変調法では、図4に示すような光学系において、位相シフト法を2回施すことによって複屈折分布を測定する²⁴⁻²⁶⁾。光源からの直線偏光はリターダーに入射し、半波長板、試料を透過することによって複屈折の影響を受け、位相変化が生じる。この位相変化を受けた光波は、さらに半波長板からの梢円偏光の主軸方位と直交する方位に設置された偏光子を透過後、光強度としてCCDにより検出さ

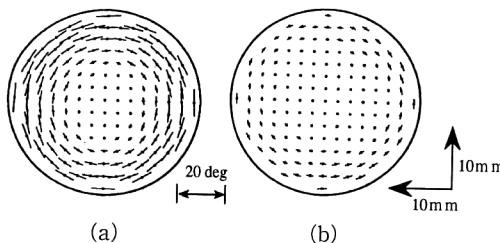


図5 レンズの2次元複屈折分布測定結果。(a) 急冷した場合、(b) アニール処理を施した場合。

れる。実際にはリターダーはバビネ・ソレイユ補償器または液晶位相変調器が用いられている。ここで、半波長板の回転角を θ 、試料の主軸方位を ϕ 、複屈折位相差を Δ ($\Delta \ll 1$)とし、半波長板の回転角 θ を基準とし、これに呼応して検光子の方位を $2\theta + 45^\circ$ 回転させる。これらの関係をストークス・パラメーターとしてミューラー行列^[2,3,27-31]を用いて計算すると、最終的に得られる干渉縞の光強度 I は入射光強度を I_0 として次式のようになる^[24,25]。

$$I = \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot (1 - \cos(\phi + \delta)) \quad (3)$$

ここで、

$$\phi = \Delta \cos(4\theta - 2\phi)$$

である。

複屈折位相差 Δ と主軸方位 ϕ の検出には2段階の位相シフト法を用いる。まず、 θ を 0° に設置して位相シフターであるリターダーにより位相変化 δ を与えたときの位相 ϕ を求める。次に、位相 ϕ が半波長板の回転角 θ が1回転に対して4周期正弦状に変化するので、 θ の回転に呼応して位相シフトを行うことによって、複屈折の主軸方位 ϕ および複屈折位相差 Δ を得ることができる。ここで、位相 ϕ に着目すると、この式はバイアス成分がないため事実上、未知数が2つということになるので、最初の位相シフト法に4ステップの位相シフト法を用いた場合には合計8画面(3ステップ法の場合は6画面)の情報から複屈折量を得ることができる。しかしながら、実際にはサンプリング回数が多いほうが精度が良いので、4ステップ位相シフト法を用いて合計16枚の画像を用いて主軸方位と複屈折位相差を求めている。この測定法の精度および測定限界は、校正されたバビネ・ソレイユ補償器によって検定を行った結果、複屈折位相差および主軸方位とともに $\pm 1^\circ$ となっている。測定時間は液晶位相変調器と半波長板と偏光子を電動駆動させることにより1分以内になっている。

ここで光学素子の品質検査への応用として、レンズおよびガラスレーザー用のネオジウムをドープしたガラスロッドの複屈折分布計測した例を示す。まず、図5は研磨前の

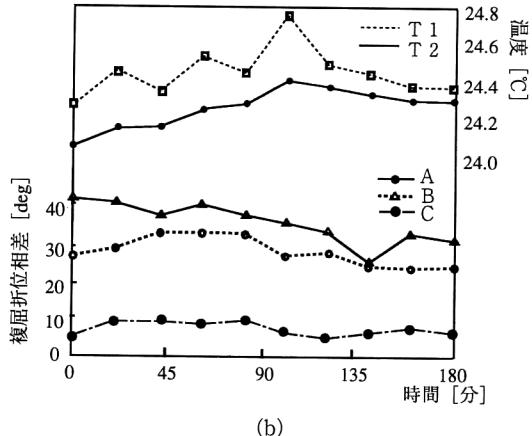
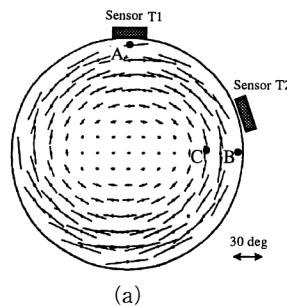


図6 レーザーロッドの複屈折分布計測。(a) レーザーロッドの複屈折分布、(b) レーザーロッドの時間に対する複屈折位相差変化。

直径25 mm プレス材レンズの複屈折分布を測定した結果である。レンズなど入出射面が平面でない試料や研磨されていない試料では屈折や散乱が伴うため、液浸法を用いた^[25,26]。図5(a)は550°Cのガラス転移温度から室温へ急冷した結果である。黒丸は測定点を表し、線分の長さが複屈折位相差の大きさ、線分の方向が進相軸方位を表している。これによって複屈折の主軸方位が円周方向を向いており、中心にいくほど小さくなっている様子がわかる。図5(b)はガラス転移温度から毎時30°Cずつ徐冷しアニュール処理を施したときの複屈折分布である。アニュールによって複屈折が減少した効果がわかる。次に、図6に高出力ガラスレーザーの増幅媒体に用いられているネオジウムをドープしたレーザーガラスロッド($\phi 90 \times 375$ mm, ひずみ量のスペック 2 nm/cm)の複屈折分布の計測例を示す^[32]。このレーザーガラスロッドは非常に長いために、温度コントロールされた室温における温度変化に対してさえ膨張収縮によりひずみ量が変化する。実際に2次元複屈折分布を計測した結果を図6(a)に示す。ここで、図6(a)に示すように温度センサー位置と測定点A, B, Cを決め、この状態で20分おきに180分まで10回計測した。このとき図6(b)に示すように、A, B, Cの点における複屈折量の変化を温度変化とともに示す。レーザーロッドの表面においては温度が

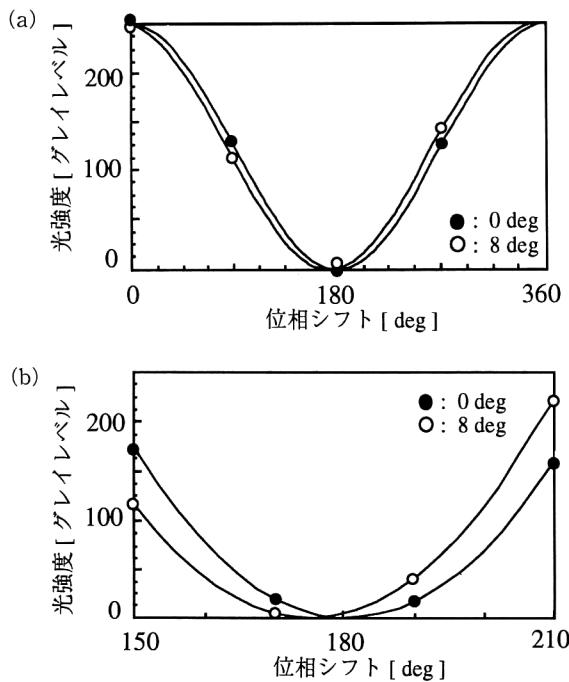


図7 局所サンプリング位相シフト法の原理。(a) 従来の位相シフト法, (b) 局所サンプリング法。

上昇するのに対して、見かけ上複屈折位相差が減少していく傾向がみられる。点Aにおいては上部のため温度センサーに現れる温度変化が著しいので、積分効果で複屈折変化も少ない傾向がみられる。点Cは中心に近いために複屈折変化は少ない。従来の1点ごとの計測手法^{6,7)}においては測定時間を要するので、温度変化に対する複屈折計測は困難であったが、ここでは可能となっている。

このように本手法は実用的に利用することが可能であるが、高精度化および高速な計測に対処する必要がある。

2.2.2 局所サンプリング位相シフト法による高精度化

前項で示した2回の位相シフト法を用いた手法では、位相シフト法において測定精度を向上させるためにはサンプリング回数を増やす方法が最も効果的である。しかしながら、測定および解析時間の点からもむやみに取り込み画像を増やすことは有効ではない。そこで以下に述べる測定範囲を狭めて分解能を向上させる局所サンプリング法が有効である。

サンプリング以外の誤差要因を検討すると、光強度検出の際の量子化の問題がある。例えば、コントラストが1の理想的な状態で初期位相0°と8°をもつとき、これを位相シフトをする場合の光強度を8ビット階調で表して図7(a)に示す。このときの4ステップ位相シフトにおけるサンプリング点を丸印で示す。この場合サンプリング点の0°と180°付近においてはほとんど両者の光強度の差が認め

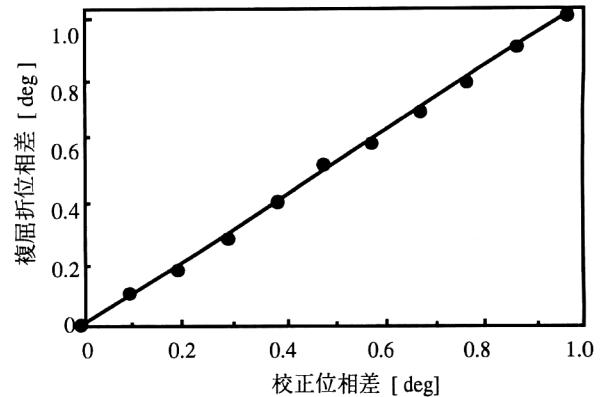


図8 局所サンプリング位相シフト法校正結果。

られない。特に、現在のCCDカメラとA/D変換器を利用して検出系の場合は暗電流などによるさまざまなノイズの影響で両者の識別は事実上不可能である。そこで、数十度以下の位相計測を行うことに限定し、図7(a)の180°付近において、図7(b)に示すように光源の光強度をCCDカメラが露出オーバーにならない限界まで上げる。サンプリング点を丸印の全体の一部分のみ4点の光強度をサンプリングする。これが局所サンプリング法³³⁾である。実際に式(1)で得られた光強度Iから位相 ϕ を得るには最小自乗法により次式によって求めることができる。

$$\phi = \tan^{-1} \left[-\frac{\sum \sin^2 \delta_i \cdot \{ \sum \cos \delta_i \cdot \sum I'_i - N \sum I'_i \cos \delta_i \}}{\sum I'_i \sin \delta_i \cdot (\{ \sum \cos \delta_i \}^2 - N \sum I'_i \cos^2 \delta_i)} \right] \quad (4)$$

実際にこの局所サンプリング位相シフト法の精度および測定限界を確認した結果を図8に示す。検定の試料は複屈折位相板によって与えた校正位相差、縦軸に局所サンプリング法で計測した位相量であり、黒丸は測定点を表し、直線は校正直線を表す。ここで局所サンプリング位相シフト法は10°の測定レンジの場合で150°, 170°, 190°, 210°の20°ごとの位相シフトを行った。この結果より位相検出は±0.02°という高精度な結果が報告されている。

局所サンプリング法を用いた微小複屈折計測光学系は基本的には図4と同じである。図4では2回目の位相検出を半波長板を回転させることによって行っていたが、半波長板は数度の位相誤差があるため、微小複屈折計測にはこの影響が問題になる。そこで図4の光学系から半波長板を取り去り、バビネ・ソレイユ補償器の前に偏光子を設置する。偏光子への入射光は円偏光とし、偏光子と検光子の主軸は一致させてバビネ・ソレイユ補償器の主軸に対して45°に設置する。偏光子、バビネ・ソレイユ補償器および検光子の主軸方位を同期させて回転させることによって2回目の位相検出を可能とした。局所サンプリング位相シフトにお

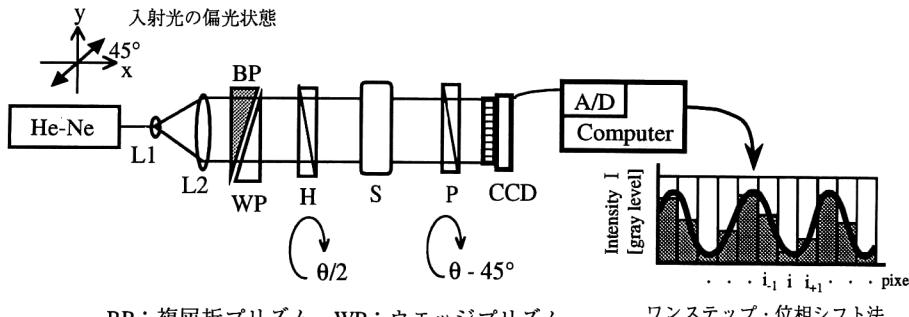


図9 ワンステップ・位相シフト法による2次元複屈折計測のための光学系。

いて、 10° の測定レンジの場合 150° から 20° ごとに、 1° の測定レンジの場合 177° から 2° ごとの位相シフトによって行われている。2回目の位相シフトは従来の4ステップの位相シフト法である。

局所サンプリング法によって高精度の位相計測が可能となると、2次元化のためにビームを広げる場合のレンズ系がもつ複屈折の影響が無視できなくなる。ここではサンプルがない状態で位相キャリブレーションを行っているが、理想的にはなるべく複屈折の少ないレンズ系を用いた計測が望まれる。

2.2.3 ワンステップ位相シフト方式による2次元複屈折分布計測

前項までの2次元複屈折計測法は、解析のために数枚以上の画像を検出するための計測時間を要する。そこで、計測時間の短縮のために空間的位相シフト法であるワンステップ位相シフト方式^{34,35)}の導入がなされている。この光学系は図9に示すようであり、ワンステップ位相シフト法を行うためのキャリヤー周波数は複屈折ウエッジ板によって与えている³⁶⁾。図中に示したx軸に対して 45° の方位をもつ直線偏光に空間キャリヤーを与えるために、複屈折の方位と楔の方向が一致した水晶の複屈折ウエッジ板を用いている。また、ウエッジによる屈折の影響を補正するためにウエッジプリズムが反対に入っている。以上により、最終的に得られる干渉縞の光強度が、図に示すようにCCDカメラ上で4画素1周期となるようなキャリヤー周波数を与え、ワンステップ位相シフト法を用いて位相を求めることができる。

複屈折の大きさと方位を求めるための2回目の位相シフト法は、半波長板と偏光子を位相シフターとして位相変化を与えることによって行う。この際の半波長板の主軸方位角 0° と偏光子が 45° の組み合わせ、および半波長板が 22.5° と偏光子が 135° の組み合わせから得た2枚の画像データより、2次元複屈折分布を求めることができる。将来

的には2台のカメラを用いることによって、実時間計測が可能になる。

近年の光学技術の高度化とともに複屈折の問題が盛んに議論され、また、注目されている。ここでは2次元複屈折分布測定について、特に、位相シフト法を用いた手法を中心述べた。

点による手法がすでに製品化されて成功しているのに対して、2次元複屈折測定はいまだ製品化された例は見あたらない。現実的には、2次元化において避けて通れないレンズ系の複屈折の問題や、CCDカメラなど受光素子の画素数の制限による空間分解能の問題など実用化に伴う課題がある。さらに、材料評価で重要な分光を取り入れて画像計測を行う場合、光学素子の分光特性なども検討する必要もある。今後、複屈折測定や偏光解析がさらに技術的に発展することを期待する。

文 献

- 1) T. Yoshizawa and H. Yokota (ed.): *International Symposium on Polarization and Applications to Device Technology*, Proc. SPIE, 2873 (1996).
- 2) R. M. A. Azzam and N.M. Bashara: *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, Amsterdam, 1987).
- 3) E. Collett: *Polarized Light* (Marcel Dekker, New York, 1993).
- 4) S. Nakadate: "High precision retardance measurement using phase detection of Young's fringes," *Appl. Opt.*, 29 (1990) 242-246.
- 5) 持田悦宏: "位相変調による複屈折測定と応用", 光技術コンタクト, 27 (1989) 127-134.
- 6) 梅田倫弘, 高和宏行: "横ゼーマンレーザによるガラスレーザディスクの残留応力分布の計測", 電子情報通信学会論文誌C-I, J73-C-I (1990) 652-657.
- 7) J. E. Hayden and S. D. Jacobs: "Automated spatially scanning ellipsometer for retardation measurements of transparent materials," *Appl. Opt.*, 32 (1993) 6256-6263.
- 8) N. Umeda, S. Wakayama, S. Arakawa, A. Takayanagi and H. Kohwa: "Fast birefringence measurement using right

- and left hand circularly polarized laser," Proc. SPIE, **2873** (1996) 119-122.
- 9) P. J. deGroot, A. Dergevorkian and T. Erickson: "Interferometric analysis of stress-induced birefringence in a rotating disk," Proc. SPIE, **3478** (1998) 227-233.
 - 10) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 156-160.
 - 11) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses," Appl. Opt., **13** (1974) 2693-2703.
 - 12) J. E. Greivenkamp and J. H. Bruning: "Phase shifting interferometers," *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1992) pp. 501-598.
 - 13) K. Creath: "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics XXVI* (Elsevier, Amsterdam, 1998) pp. 351-393.
 - 14) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法 (日刊工業新聞社, 1965).
 - 15) P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos: *Matrix Theory of Photoelasticity* (Springer, Berlin, 1979).
 - 16) C. P. Burger: *Hand Book on Experimental Mechanics*, 2nd ed., ed. A. S. Kobayashi (VCH, New York, 1993) p. 165.
 - 17) H. Aben and C. Guillement: *Photoelasticity of Glass* (Springer, Berlin, 1993).
 - 18) C. Quan, P. J. Bryanston-Cross and T. R. Judge: "Photoelasticity stress analysis using carrier fringe and FFT techniques," Opt. Lasers Eng., **18** (1993) 79-108.
 - 19) K. Oka and Y. Ohtsuka: "Polarimetry for spatiotemporal photoelastic analysis," Exp. Mech., **33** (1993) 44-48.
 - 20) A. Asundi: "Phase shifting in photoelasticity," Exp. Tech., **22** (1993) 19-23.
 - 21) A. L. Bajor: "Automated polarimeter—macroscope for optical mapping of birefringence, azimuths, and transmission in large area wafers. Part I," Rev. Sci. Instrum., **66** (1995) 2977-2990.
 - 22) M. Noguchi, T. Ishikawa, M. Ohno and S. Tachihara: "Measurement of 2D birefringence distribution," Proc. SPIE, **1720** (1992) 367-378.
 - 23) 野口正人, 石川 剛: "複屈折空間分布測定法", 光技術コンタクト, **31** (1993) 241-246.
 - 24) 大谷幸利, 島田卓也, 吉澤 徹, 梅田倫弘: "位相シフト法による2次元複屈折分布測定", 光学, **21** (1992) 682-687.
 - 25) Y. Otani, T. Shimada, T. Yoshizawa and N. Umeda: "Two-dimensional birefringence measurement using the phase shifting technique," Proc. SPIE, **1720** (1992) 346-354.
 - 26) Y. Otani, T. Shimada, T. Yoshizawa and N. Umeda: "Two-dimensional birefringence measurement using the phase shifting technique," Opt. Eng., **33** (1994) 1604-1609.
 - 27) 高崎 宏: "偏光の表示", 結晶光学 (森北出版, 1975) pp. 137-163.
 - 28) W. A. シャークリフ: 偏光とその応用 (共立出版, 1965).
 - 29) S. Huard: *Polarized of Light* (Wiley, Chichester, 1997).
 - 30) D. S. Kliger, J. W. Lewis and C. E. Pandall: *Polarized Light in Optics and Spectroscopy* (Academic Press, San Diego, 1990).
 - 31) N. Umeda and H. Takasaki: "New ellipsometry realized by the use of a stabilized two-frequency laser," Surf. Sci., **96** (1980) 141-148.
 - 32) Y. Otani and T. Yoshizawa: "Measurement of two-dimensional birefringence distribution for laser materials," Proc. SPIE, **2873** (1996) 160-163.
 - 33) Y. Otani, T. Shimada and T. Yoshizawa: "The local-sampling phase shifting technique for precise two-dimensional birefringence measurement," Opt. Rev., **1** (1994) 103-106.
 - 34) R. Gu, T. Yoshizawa and Y. Otani: "One-step phase shift 3-D surface profilometry with grating projection," Opt. Lasers Eng., **21** (1994) 61-75.
 - 35) D. W. Robinson and G. Raid: *Interferogram Analysis* (IOP Publishing, Bristol, 1993).
 - 36) Y. Otani and T. Yoshizawa: "Polariscope using the phase shifting technique," Proc. SPIE, **2265** (1994) 54-61.

(1998年8月17日受理)