

## 偏光による前眼部の解析と臨床的観察

石川和夫 畑田豊彦 市橋裕一

### Analysis and clinical observations of the eye lens surfaces by polarized light

Kazuo ISHIKAWA, Toyohiko HATADA, Yuuichi ICHIHASHI

A new instrument for the documentation of the eye lens surfaces by polarized light was developed. Characteristics of this instrument are an alignment system through VT monitoring, adopting a polarized light for observation system, image documentation with CCD camera and realtime computed analysis of the obtained image. With this instrument, the dark cross pattern observed in the normal cornea was evaluated. The corneal scars and distortion of the corneal lamellae could be visualized.

#### はじめに

前眼部は眼球結像系で重要な要素であり、その機能の異変状態は眼科診断上重要視される。特に角膜の光学的特性については、三島<sup>1)2)3)</sup>、吉川<sup>4)</sup>、Stanworth<sup>5)</sup>、Blokland<sup>6)</sup>らによって研究され、角膜を構成するコラーゲンは複屈折性により黒い十字パターンが表れることを報告している。三島らは角膜片を偏光顕微鏡で観察する方法を示し、その理論的基礎を述べている。しかし、この十字パターンを臨床観察に応用した報告は余りなされていない。

偏光特性を示す物質に対して、偏光を計測に利用した場合下記に示す有効性が考えられる。

①構造特性……一般光では同様に観察される2種類の透明物質であっても、偏光ではその物質が等方性か非等方性かの構造特性を確認することが出来る。

②厚み(光路長)……直線偏光を用いて複屈折物質を観察すると、二つの屈折波が生じこの波の相対的な遅れ、すなわち光路差が屈折率差か

ら求められる。

③拡散性……不純物を含む物質中を偏光が透過する際、全体の偏光保持状態などからその混濁を推定したり、表面の傷などによる偏光の乱れが観察できる。

④光弾性……等方性の物質に応力をかけた状態にすると、複屈折性を生ずる。これを偏光で観察すると縞模様が観察され、その応力の大きさや方向が判る。

我々は、角膜の偏光特性と偏光計測の有効性に着目し、テレビカメラと画像処理部から成る前眼部撮影装置を試作した。本装置は、角膜形状や眼圧の分布状態などについて in vivo で複合的な測定が可能である。本報告では、角膜モデルのサンプルレンズによるシミュレーション実験と、正常眼と眼疾患を対象に撮影を行い、前眼部撮影装置の検討、画像処理による黒十字パターンの計測と角膜構造や形状の解析について検討を行った。

#### 測定方法

##### 1) 測定装置

試作した前眼部撮影装置を図1に、そのブロッ

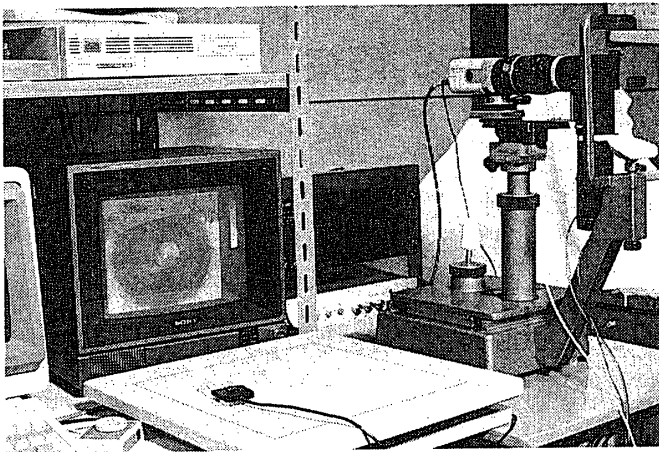


図 1 前眼部撮影装置

クダイアグラムを図 2 に示す。ハロゲンランプの照明光源は、偏光子 (polarizer) を透過後直線偏光となり、ハーフミラーで反射されカメラの光軸と平行な状態で前眼部を照射する。虹彩と眼底で反射された光は、ハーフミラーと検光子 (analyzer) を透過後、モノクロの CCD テレビカメラ (キャノン Ci-20M) で撮影される。偏光子と検光子の透過軸の角度は、それぞれ自由に設定することが出来るが、今回は直交ニコルの状態で使用した。

テレビカメラからの映像信号は、イメージプロセッサ (NEXUS 6400) に取り込みテレビモニターに表示される。また、カメラからビデオテープレコーダ (VTR) に録画された映像は、タイムベースコレクター (TBC) で回転むらなどを補正した後イメージプロセッサに取り込みテレビモニターに表示する。イメージプロセッサに取り込まれた画像は、スムージングやエッジ強調、各種のフィルタ処理、計測などの画像処理が行われ疑似カラー等で表示することが出来る。

本装置を用いて屈折異常以外の疾患をもたない被験者の撮影を行い、その結果を図 3 に示す。角膜中央部に黒十字をしたパターンと、角膜周辺部に干渉縞のように見える菱形のパターンが観察される。他の被験者についても同様な 2 種類のパターンが観察されるが、その形状や濃淡には眼球差や個人差があるように思われる。パターンの比較や形状の要因を考察していくには、生体眼では困難であり、角膜モデルを用いたシミュレーシ

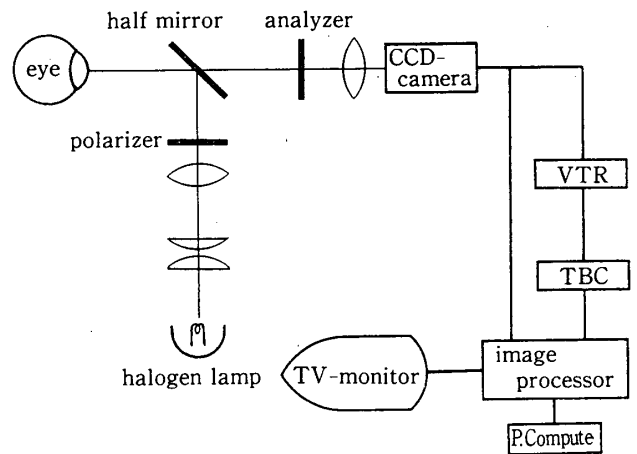


図 2 前眼部撮影装置のブロックダイアグラム

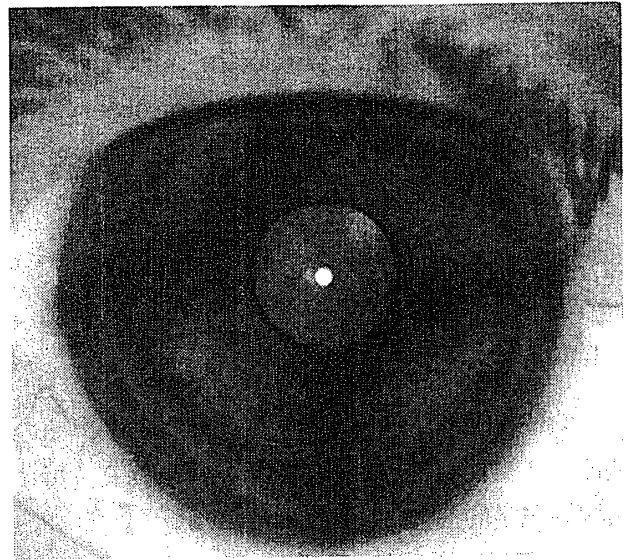


図 3 正常眼者の入力画像 (原画像)

ン実験を行い解析を行った。また 2 種のパターンの発生要因はそれぞれ異なると考えられるため、本報告では角膜中央部の黒十字パターンに着目し解析を行った。

## 2) 角膜モデルによる偏光状態の測定

前眼部に観察されるパターンは、複屈折性を有する角膜に因っていると考えられるため、生体眼と同様なパターンを生ずるサンプルレンズを角膜モデルとした。

角膜モデルのサンプルレンズ (ポリジエチレングリコールビスアリルカーボネート) に生じた黒十字パターンを図 4-1, 図 4-2 に示す。偏光の測定には、位相板を使用して各屈折波間の位相遅れを補償して直線偏光に変え、その位相遅れと新たにできた直線偏光の方位から偏光状態を求める消光

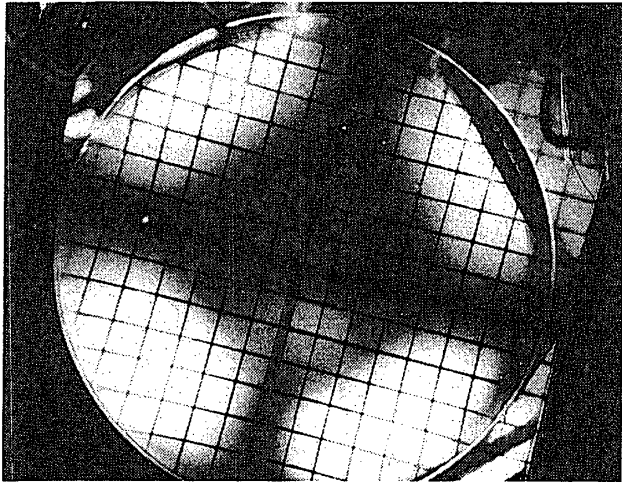


図 4-1 サンプルレンズの偏光パターン(-4Dpt)

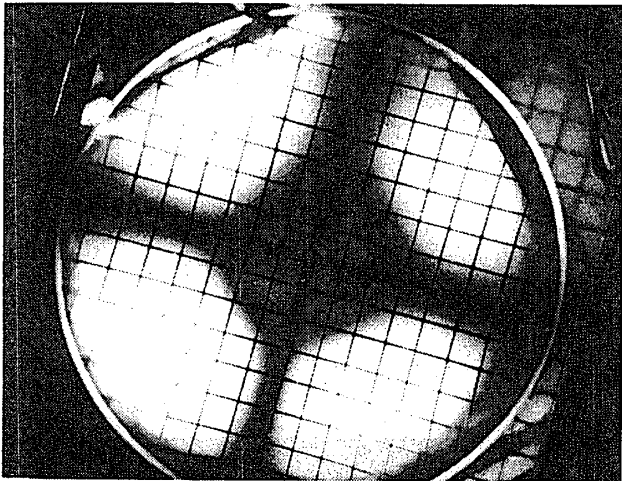


図 4-2 サンプルレンズの偏光パターン(-6Dpt)

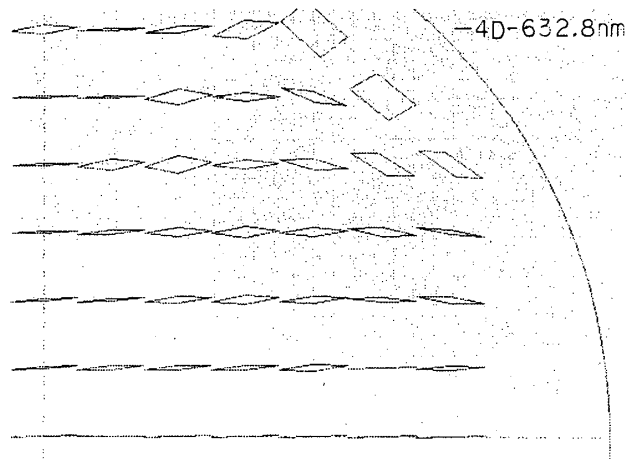


図 4-3 サンプルレンズの偏光状態(-4Dpt)

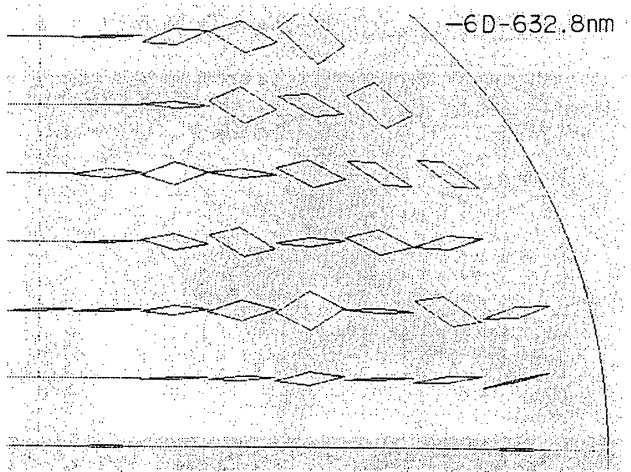


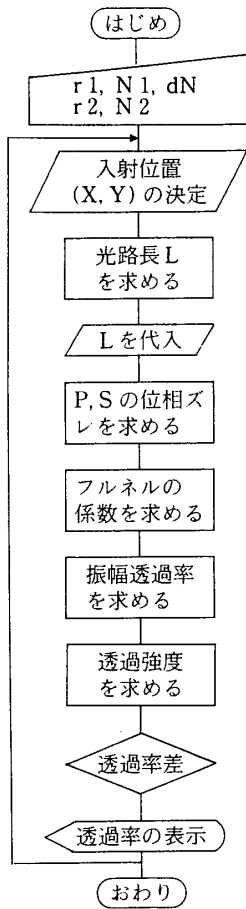
図 4-4 サンプルレンズの偏光状態(-6Dpt)

法で行った。各サンプルレンズの偏光状態を図 4-3, 図 4-4 に示す。サンプルレンズは球面レンズであるので測定は第一象限だけとし、それを 46 箇所に分けその部分を He-Ne レーザで走査して行った。偏光の方位は  $180^\circ$  である。図中の菱形は楕円偏光の長軸と短軸を表し、この菱形に外接する楕円がその部分の偏光状態である。

サンプルレンズの異方性に関しては、①面内の X, Y 方向の異方性 ②面内と厚み方向の異方性 ③同心円方向と動径方向の異方性 の三通りの仮定が考えられる。①の仮定は、サンプルレンズ自体を回転させた場合にパターン形状が変化するが、実際にサンプルレンズを回転させてもパターン変化は生じなかった。②の仮定は、図 5 に示した入射角 ( $\varphi$ ) と屈折角 ( $\chi$ ) の差が小さいために、偏光の垂直成分と水平成分の振幅透過が近似され

てしまう。③の仮定は、消光法の結果から推定できるように、偏光状態が X 軸から Y 方向へ進むにつれ楕円偏光が大きくなり、Y 軸に近づくにつれまた小さくなっている。サンプルレンズの異方性を同心円方向と動径方向と仮定し、偏光の透過強度の理論値を求めパターンをシミュレートした。図 5 には計算略図とフローチャートを示した。計算の結果、図 6-1, 図 6-2 に示すようによく一致した結果を得た。図中の色分けは、水色は偏光が維持されている部分でこれを強度 1, 赤はその 50 倍までの透過強度, 緑が 50 倍から 500 倍まで, 白は 500 倍以上とした。

図 3 に示した被験者のケラトメータ測定による角膜頂点値の曲率(前面 8mm, 後面 6.8mm)と③の異方性による仮定に基づき、屈折率差を 0.000012 として計算すると、図 6-3 に示すように



パターンのシミュレーションフローチャート

$r_1, r_2$ : 曲率  $N_1, N_2$ : 屈折率  $dN$ : 屈折率差

$L$ : レンズ内を通る光路長

$$dL = 2 * \pi * L * dN / \lambda \quad dL: p, s \text{ 成分の位相差} \\ \lambda: \text{波長}$$

$$T_s = 2 * \sin(\chi) * \cos(\psi) / \sin(\chi + \psi) \\ T_p = T_s / \cos(\psi - \chi) \quad \text{フレネルの式} \quad \psi: \text{入射角} \quad \chi: \text{屈折角}$$

$$E_p = T_{p1} * T_{p2} * \cos(\theta) \quad E_p, E_s: \text{振幅透過率} \\ E_s = T_{s1} * T_{s2} * \sin(\theta) \quad \theta: \text{入射面に対する直線偏光の方位角}$$

$$E = (E_p * \cos(90 - \theta))^2 + (E_s * \sin(90 - \theta))^2 \\ - E_p * E_s * \sin(2 * (90 - \theta)) * \cos(dL) \\ E: \text{通過強度}$$

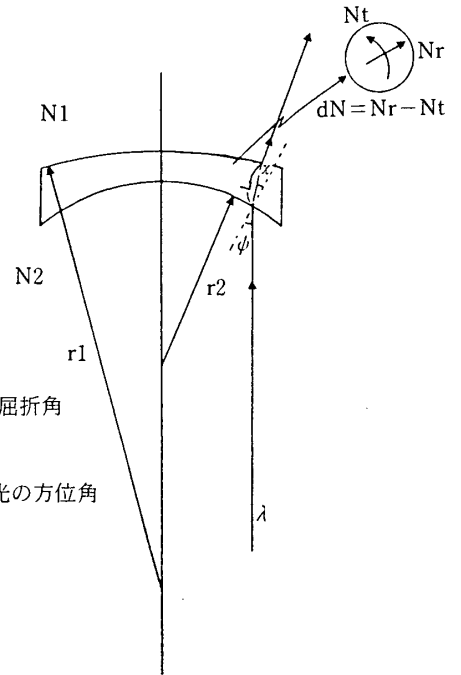


図 5 シミュレーション実験のフローチャートと計算説明書

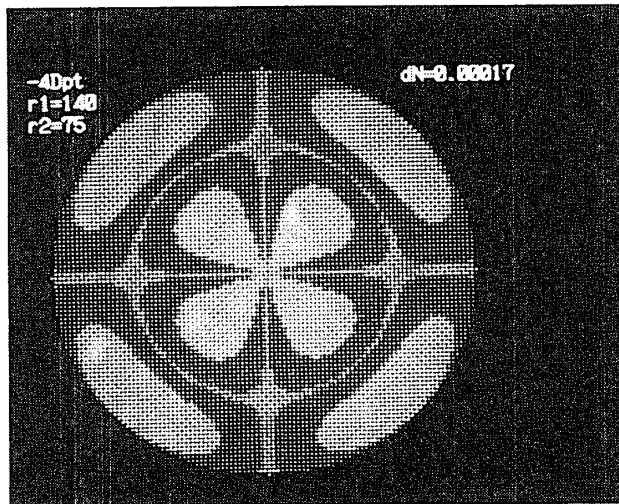


図 6-1 サンプルレンズ(-4Dpt)のシミュレーション結果

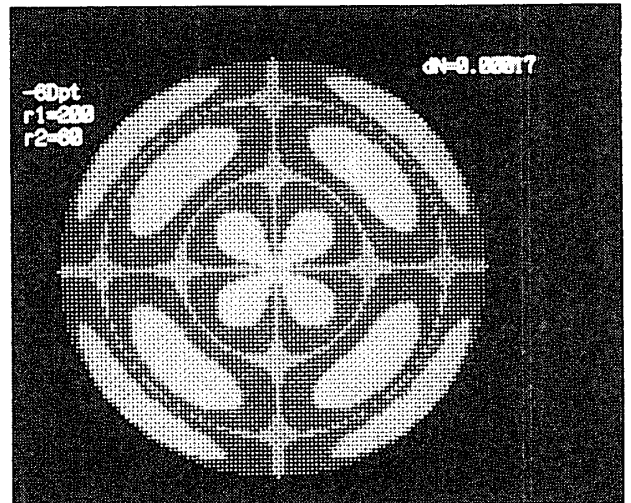


図 6-2 サンプルレンズ(-6Dpt)のシミュレーション結果

よく一致した結果が得られる。この図の直径は、近似後面の 6.8mm である。また極端な例として前面の曲率半径 9mm を代入した場合、図 6-4 に示すようにパターンの形状や偏光状態も変化していくことが予測され、これらの結果から、パター

ン形状に寄与している変数は、曲率半径の大きさに伴う厚みの変化であると考えられる。

サンプルレンズに負荷加重をかけると偏光パターンが変化することが示される。図 7 は無加重状態に対して、90gW の加重を一方向に加えたと

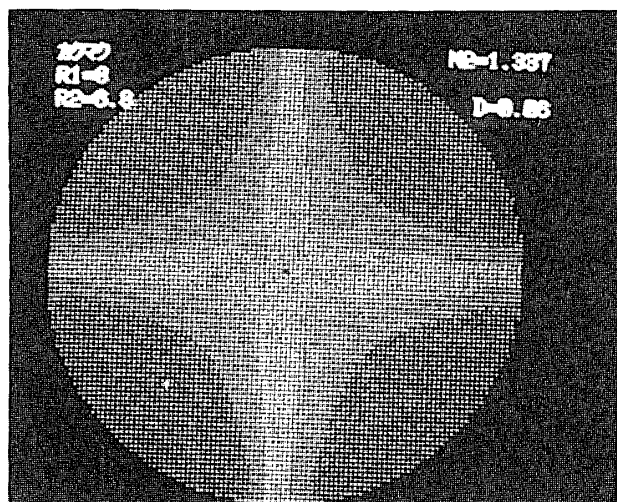


図 6-3 角膜のシミュレーション(前面曲率 8 mm)

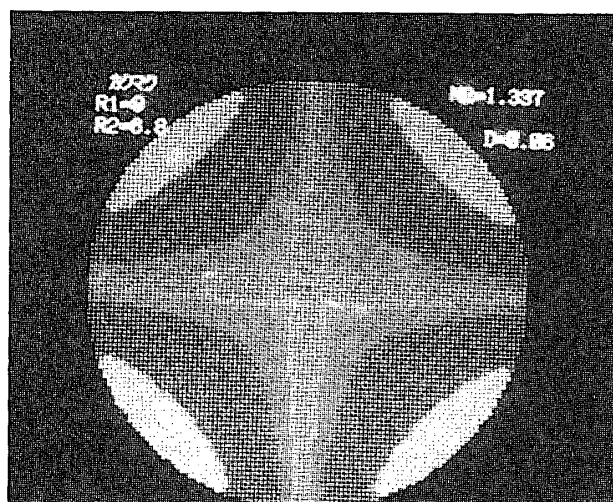


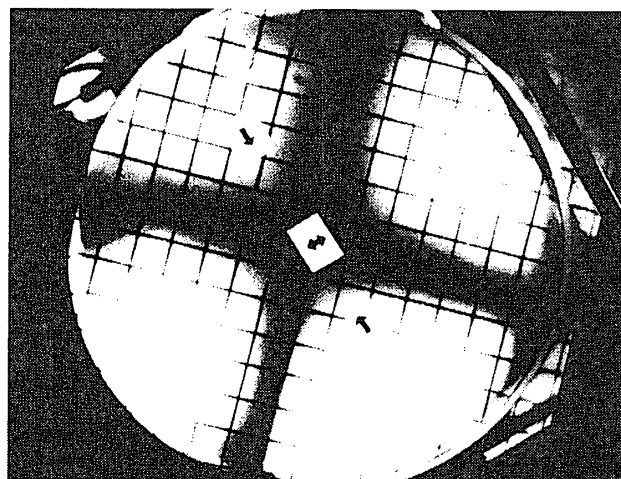
図 6-4 角膜のシミュレーション(前面曲率 9 mm)

きの黒十字パターンの変化を示したものである。加重を加えた方向(加重軸)に対して黒十字パターンが双曲線状に別れる傾向を示し、加重軸に対して何らかの圧力分布を持つものと考えられ。

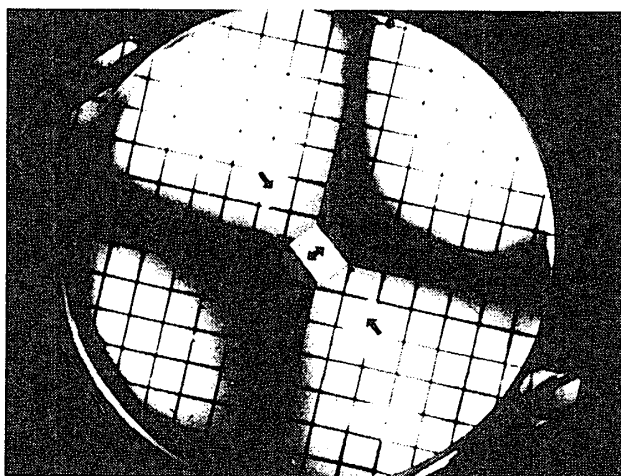
### 3) 症例観察

本装置を用いて前眼部を観察すると、定常光による観察では見ることのできない所見を得ることができる。得られる画像は黒白の濃淡画像であり、CCDカメラや回路に誘導してくるノイズによって画質が低下し、必ずしも見易い画像とは言えない。今回は視覚的に判別を容易にするために以下の画像処理を行った。画像のノイズを低減させるために $3 \times 3$ の荷重マトリックス演算の近傍による平滑化処理を行った後、微分処理によるエッジ強調を行った。更に、低輝度部分を強調した後、濃度域を16階調に変換し疑似カラー表示を行った。

図 8-1, 図 8-2 には円錐角膜患者でもパターンは観察されるが、図に示したように乱れた黒十字パターンを示し、特に角膜下部では高濃度部分の面積が広がっているのが観察される。角膜の形状測定には、フォトオフサルモメータによるデスクパターンの観察や曲率半径の計測によって行われている。図 9 は図 8 の眼疾患患者のデスクパターンと曲率半径の測定結果である。デスクパターンの乱れは著しく円角膜特有の特徴を示しており、乱れた部分は図 8 の高濃度部分と一致している。



無荷重状態



加重状態(90 gW)

図 7 負荷加重によるサンプルレンズの偏光パターンの変化

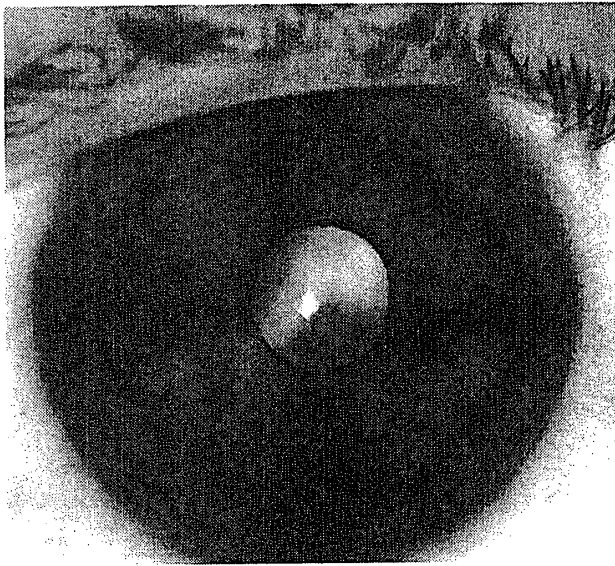


図 8-1 円錐角膜患者の入力画像(原画像)

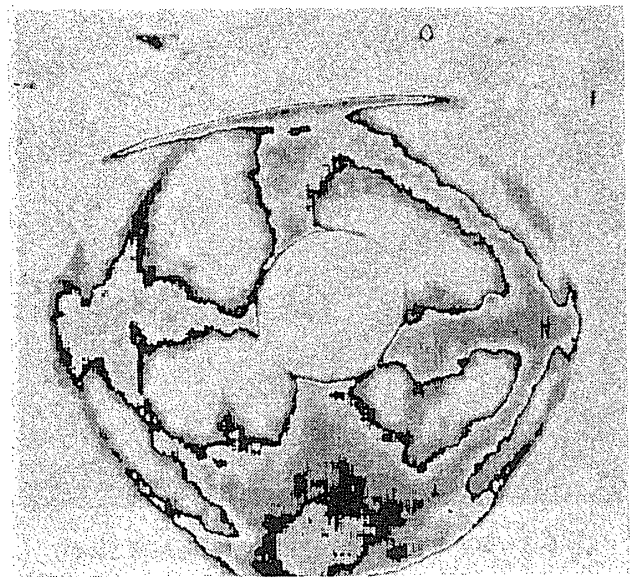


図 8-2 図 8-1 の画像処理後の出力画像

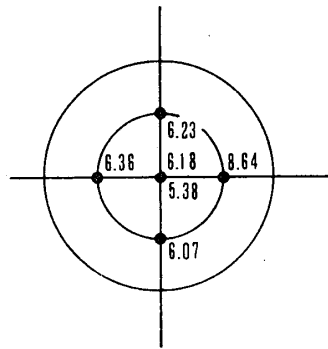
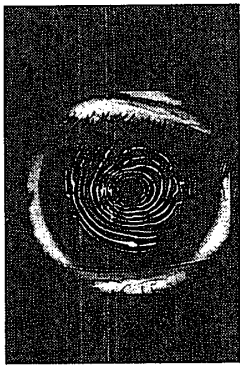


図 9 フォトオフサルモメータによる円錐角膜患者のディスクパターンと曲率半径

図 10 には円錐角膜によりデスメ氏膜破裂の観察例を示した。黒十字のパターンは見られず、コラーゲン線維板の配列の乱れた状態を示していると考えられるパターンが見られる。

図 11 は近視手術 (radial keratotomy) を受けた患者の例であり、定常光では薄い混濁線と見えたものが、偏光によって複屈折を呈し瘢痕が切開線にそって形成されているのが観察される。

図 12 には角膜移植後の患者の観察例を示した。定常光による観察では角膜の歪みはめだたないが、偏光を用いることによって歪みを生じていることがわかる。角膜実質のコラーゲン線維板が手術の際の縫合などにより不均等なストレスをうけ、歪みが生じ複屈折が変化しているものと考えられる。この歪みは手術後次第に減少していく傾向を示している。

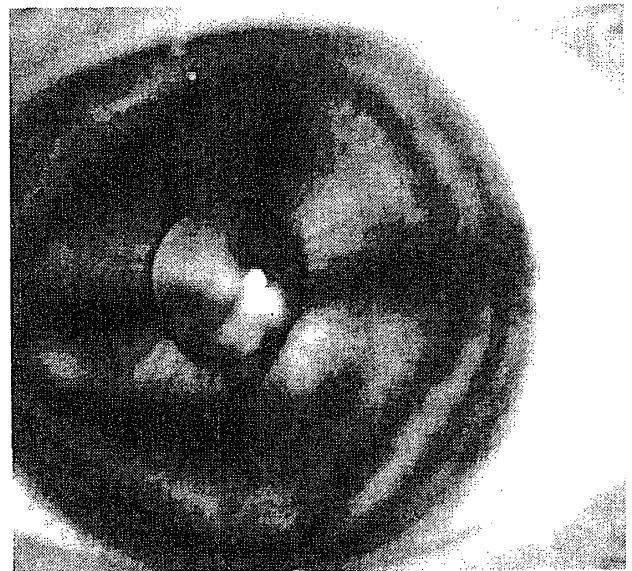


図 10 円錐角膜疾患(デスメ氏膜破裂)の出力画像

図 7 に示した黒十字パターンが双曲線状に別れる傾向は生体眼にも観察される。この傾向は特に乱視眼に多く表れ、双曲線状に別れる対象軸の方向と乱視軸とに相関があると考えられる。

#### まとめ

偏光を用いた前眼部撮影装置を試作し、正常者と眼疾患を有する被験者を対象に撮影を行った。正常眼と眼疾患では、それぞれ異なる偏光パターンを示し、各疾患で定常光では見ることができない所見を得ることができ眼科臨床への応用の可能性を見出した。眼疾患の偏光パターンの変化につ

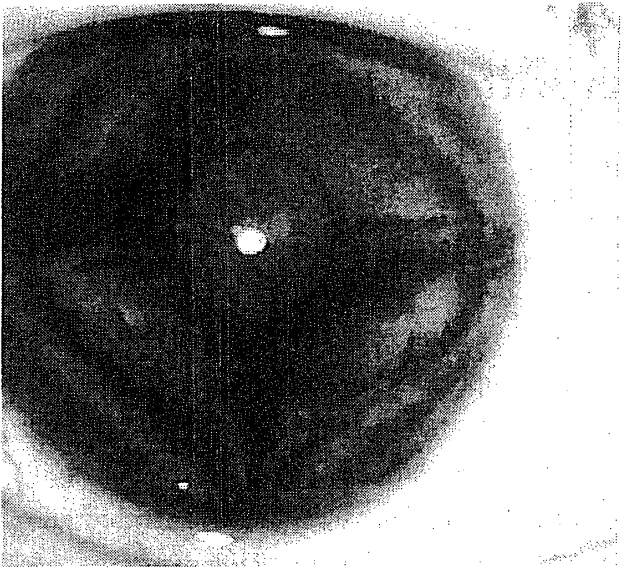


図 11 radial keratotomy術後の切開線の瘢痕

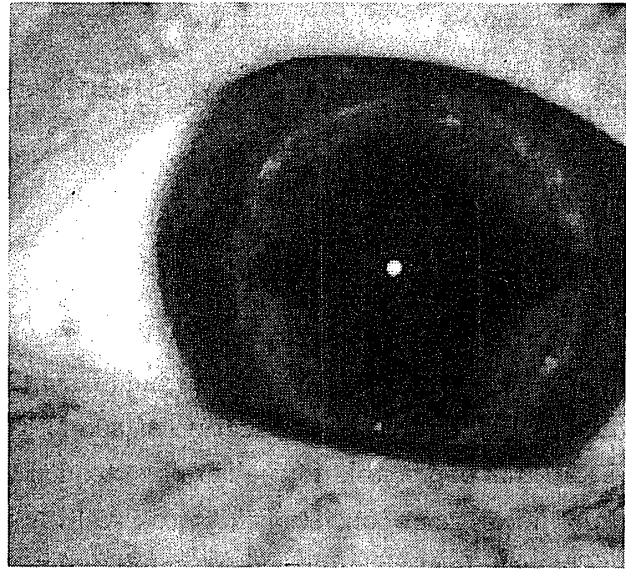


図 12 全層角膜移植後の偏光パターン

いては、疾患の進行状態や手術後の経時変化もふくめて検討を行っていききたい。

前眼部と同様な偏光状態を示すサンプルレンズを用いたシミュレーション実験によって、前眼部で観定される黒十字の偏光パターンについて解析を行った。角膜の異方性は同心円方向と動径方向と考えられ、シミュレーションの理論値と観察されるパターンはよく一致した。偏光パターンの形状因子は、角膜の曲率とそれに伴う各部の厚みやストレスによる歪みなどが考えられる。

偏光を用いた光学計測は、in vivo で複合的な計測を一つの系で行われる可能性が高く、角膜の内部構造などを観察することも可能である。また、偏光状態を高精度に測定することにより角膜形状の三次元計測や角膜全体の二次元応力分布などの測定が可能であると考えられる。

今後、偏光特性を精度良く測定できる素子や方法を開発すると共に、眼科診断に適した画像処理方法の確立が必要でありさらに検討していききたい。今回、解析を行わなかった角膜周辺部にでき

る菱形パターンについても今後検討していききたい。

稿を終えるにあたり偏光解析について有益な助言を頂いた本学の川畑州一助教授、眼疾患者の撮影の機会を与えて下さった順天堂大学医学部眼科の中島章教授、金井淳教授に深謝いたします。

#### 文 献

- 1) 三島濟一：偏光を応用した眼の生体顕微鏡検査の理論，その1．眼臨，52：929-938，1958
- 2) 三島濟一：偏光を応用した眼の生体顕微鏡検査の理論，その3．眼臨，53：257-260，1959
- 3) 三島濟一：偏光を応用した眼の生体顕微鏡検査の理論，その4．眼臨，53：364-367，1959
- 4) 吉川義三：角膜の光学的特性．眼紀，19：1212-1223，1968
- 5) Stanworth, A. and Naylor, E.J.: Polarized light studies of the cornea, I. The isolated cornea J. Exp. Biol., 30: 165-163, 1953
- 6) G.J. van Blokland: preservation of polarization, J.O.S.A.2, 1: 72-75, 1985