

Title	フレネル型液晶レンズにおけるリタデーション実測評 価
Author(s)	澁谷, 義一; 李, 舜里; 伊奈, 裕彦 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2021, 30, p. 27-37
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/86832
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

フレネル型液晶レンズにおけるリタデーション実測評価

澁谷 義一¹、李 蕣里¹、伊奈 裕彦¹、尾﨑 雅則²

¹⁾株式会社エルシオ 〒530-0001 大阪府大阪市北区梅田 1-1-3 大阪駅前第3ビル 2F 267 号
 ²⁾大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

Measurement of Optical Retardation for Fresnel Liquid Crystal Lens

Giichi SHIBUYA¹, Sunri LEE¹, Hirohiko INA¹, Masanori OZAKI²

¹⁾ Elcyo Co., Ltd. Osaka Ekimae Daisan building 2F 267

1-1-3 Umeda Kita-ku, Osaka, Osaka 530-0001, Japan

²⁾ Division of Electrical, Electronic and Infocommunications Engineering,

Graduate School of Engineering, Osaka University

2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

We have achieved direct measurement of distributions of optical retardation which is an origin of lens power in tunable liquid crystal (LC) lens. This paper introduces the trend of tunable eyeglasses with LC lens application first, and express the progress of our Fresnel LC lens development and their technical issues with the background of our present studies. Next, principles and structures of Fresnel LC lens, their design approach and the examples of trial samples are introduced. Then, as a result of present researches, principles of a measurement of optical retardation, original evaluation systems built with existing polarized microscope, inspection and discussion of directly measured distributions of optical retardation in Fresnel LC lens are reported. Finally, their lens power characteristics and images of present manufacturing samples with these measurement technologies, and the future prospects of large aperture of tunable LC lens are described.

キーワード:液晶レンズ、大口径、フレネル、リタデーション測定、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)

1. はじめに

1.1. 最新の液晶レンズの実用化動向

液晶の屈折率異方性を応用し、電圧の印加によっ てその焦点距離を制御できる液晶レンズは、1980 年代の頃より、形を変えて進歩を続けてきた¹⁾。 その技術を活用した成果の一つとして、度数可変 眼鏡への応用が挙げられる。眼鏡の度数可変機能 は、2000年代頃より眼鏡市場におけるアンメット ニーズとして顕在化してきており、2010年代に は、液体レンズ方式²⁾やスライドレンズ方式³⁾ など、海外を中心にいくつかの製品が提案されて きた。これらの眼鏡はいずれも、手動でつまみを 回して度数を可変させる方式で、形状も複雑とな り、ファッション性の高い現代の眼鏡に比較して、 外観上の違和感は否めないものであったが、処方 箋なしで度数の調整ができる利点を生かし、携帯 端末の世界的な流通に伴って、特に眼鏡店が行き 届いていない発展途上国において、有効に活用さ れているものと思われる。

その中で、回折型液晶レンズを応用した度数可

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.30, No.1 2021

変眼鏡が、2017年に日本国内のメーカーから発売 された⁴。この眼鏡は、遠近両用眼鏡の近距離用 の領域の一部に、直径15~20mmの、液晶レンズ を充填した度数可変領域を形成しており、電圧の スイッチングにより、同領域の度数を、0度と+0.75 度の2種に切り替えることができる。液晶レンズ の薄型軽量の特徴を生かし、度数の切り替えも、 フレーム内に組み込まれたタッチ方式のスイッチ で行われるため、外見は普通の眼鏡と変わらず、 ファッション性も兼ね備えた画期的なデザインを 達成している。

その後、同様に液晶レンズを応用して、2 種の 異なる処方箋の仕様を切り替える方式の眼鏡が、 ベルギーのメーカーから発表された ⁵⁾。レンズの 間に、薄型の精巧な液晶層を充填しており、搭載 されたマイクロチップの働きで、1 クリックの電 圧の印加によって、遠近の切り替えを 0.6 秒で達 成できると記載されている。可変度数の範囲は明 示されていないが、顧客ごとのニーズに適合した 処方の組合せを提供できるという。イラストの描 写によれば、度数可変領域は、従来の遠近両用眼鏡 と同様に、眼鏡の中心付近の一部のみと推測される。

イスラエルからは、レンズの領域ごとの度数調 整が可能な液晶レンズを応用した眼鏡が提案され ている。このレンズは、従来の液晶ディスプレイ と同様に、数百万個に分割された透明な液晶画素 を個別に駆動することで、レンズ機能に必要な光 学的リタデーションの分布を形成している。レン ズパターンの形成を有効領域の中で任意に行える ので、眼鏡に必要な瞳孔間距離(PD)の調整も自在 に行える。度数可変領域は前述の製品群と同様に、 眼鏡領域の一部としており、±3 度の範囲の制御 が可能とされている。加えて、領域ごとにレンズ を任意に形成できる機能を用いることで、現在急 成長の兆しが見える VR、AR 用ヘッドマウントディ スプレイ(HMD)市場において最も重要な課題と なっている、「適合的眼球離反運動の不一致 (vergence accommodation conflict)」と呼ばれる目の 疲れの要因を、有効に回避できるとしている 677。

これらの技術開発と製品化の傾向は、数年前に 発表されたスマートグラスなども含めて、人々の 生活必需品として長きにわたり流通してきた眼鏡 の市場に対し、新しい変革の流れが見え始めてき たことを示唆するものと捉えることもできる。

1.2. フレネル型液晶レンズの現状と課題

筆者らは、度数可変レンズとしての応用範囲を より拡張するために、必要な課題であるレンズの 大口径化に対する有効な手段の一つとして、フレ ネル型液晶レンズを提案し研究開発を進めてきた1)。 この方式における要素技術は、輪帯状に配置した 櫛型電極と平板電極との間に、液晶材料内の電界 分布を制御する GΩオーダーの表面抵抗値を持つ 高抵抗層と、輪帯境界部分に設けたそのギャップ 部分の組合せによって、後述するフレネルレンズ の断面図と同形状の電位分布を形成する点にあ る。これにより、液晶層厚を従来方式と同等の30 μmに保ったまま、レンズの口径を 30 mm に拡張 することが可能になり、実効値3Vの矩形交流電 圧の印加によって、正負両極性のレンズ度数を± 4 [m-1]の間で、連続的に制御できることを確かめ た8)

一方で、本レンズから球面に近い理想的な波面 を得るためには、レンズを構成する輪帯の幅を、 レンズ中心から外周部に行くほど狭くなるように 設計する必要がある。しかし、輪帯幅の減少に伴っ て、液晶層により形成される、光の位相を示すリ タデーション分布は、理想的な鋸歯形状からズレ る傾向が強くなることが、液晶分子の挙動を扱う シミュレーションによって確かめられた⁹。リタ デーション分布形状の劣化は、レンズの理想的な 波面からのズレを示す波面収差の発生や、結像に 寄与しない迷光、散乱光の増大を招くため、その ままレンズ画質の劣化につながる。このため、フ レネル型液晶レンズにおいては、特に輪帯幅の狭 くなるレンズ周辺部分の画質の向上が、レンズロ 径のさらなる拡張を進める際の重要な技術課題と なる。

2. フレネル型液晶レンズの仕組み

2.1. 構造と波面

従来のレンズにおいて、レンズの性能を保った

論文:フレネル型液晶レンズにおけるリタデーション実測評価

まま材質の厚みを低減する方策として、フレネル 構造が広く活用されている。この構造は、レンズ の曲面を同心円状の輪帯に分割して、光軸方向に 対して段差を設けて形成することにより、レンズ の厚みを薄くして軽量化を図ったもので、灯台用 のレンズや太陽光を集めて加熱するための集光レ ンズなど、主に大口径のレンズに利用されている。 フレネル型液晶レンズは、この設計思想を液晶レ ンズに応用したもので、液晶材料の厚みを増大さ せることなく、レンズの大口径化が可能となる。

図1は、液晶レンズにおける集光レンズ(凸レ ンズに相当)の波面と光路、および眼鏡位置に配 置した時に見える被写体のイメージ図を示す。透 明電極によってパターニングされた同心円状の櫛 型電極に、異なるレベルの交流電圧を印加するこ とで、図に示すように、フレネル型凸レンズの断 面形状と類似した鋸歯状の入射光の波面が得ら れ、光が一点に集中する集光レンズが得られる。 このレンズを眼鏡に応用すれば、従来の老眼鏡と 同様に、近距離の被写体の視力を補正することが 可能になる。



図1 集光レンズの波面と、眼鏡画像 Fig.1 Wavefront and eyeglass image with converging lens.

一方、印加する交流電圧の大小を反転させるこ とによって、液晶レンズは図2に示す発散レンズ (凹レンズに相当)の波面を形成する。この場合の 入射光は、図に示すように、入射光側に仮想焦点 を持つ方向で、出射側に向けて発散する。この レンズを眼鏡に応用すれば、近視用眼鏡と同様に 遠距離の被写体の視力を補正することが可能に なる。



図2発散レンズの波面と、眼鏡画像 Fig.2 Wavefront and eyeglass image with diverging lens.

なお、本研究において使用した液晶材料 RDP-D4214 (DIC 社製) は、定常状態では正の誘電率異 方性を有するホモジニアス配向を形成するため、 液晶分子は基板に平行に配列されており、高い屈 折率 n_eとリタデーション n_ed を示す。ここで n_e は液晶材料における異常光の屈折率であり、本材 料では1.768 である。また、d は液晶層の厚みを示 し、本研究では 20 µm が標準値である。液晶層へ の電圧の印加によって、液晶分子は電界の方向に 沿って、基板に垂直に配列され、屈折率とリタデー ションは n_od に近い低い値を示す。ここで n_o は 液晶材料における常光の屈折率であり、本材料で は 1.518 である。このため、液晶層内の等電位面 とリタデーションは、互いに極性が反転したよう な形状の分布を示す。従来のフレネル型レンズの 鋸歯状形状の断面図は、リタデーション分布と同 位相である。一方、液晶レンズにより形成される 光の波面は、等電位面と同極性の鋸歯状の断面形 状を示すため、電位と波面、およびリタデーション の各分布波形の区別に注意が必要である⁹。

2.2. 干渉縞と輪帯幅

液晶材料は複屈折体であり、電圧の印加によっ て変調を受ける(進行方向が変わる)光は、偏光 の振動面が液晶分子の長軸方向と平行な、異常光 の成分のみである。したがって、液晶レンズに電 圧を印加した状態で、透過型の偏光顕微鏡による 観察を行うことによって、後述するように液晶層 内のリタデーション分布の概略を把握することが できる。この状態では、レンズの輪帯上には、常 光と異常光の間の干渉によって生じる同心円状の

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.30, No.1 2021

明暗のコントラスト(干渉縞)が確認できる。観 測される干渉縞の本数は、印加電圧の振幅や周波 数に依存し、同一の条件における電圧印加では、 液晶レンズの内周部よりも周辺部の方が、得られ る干渉縞の本数が少なくなることも確認されてい る[®]。これは、輪帯幅の減少に伴って、得られるリ タデーションの振幅が減少する傾向があるために 生じるもので、その要因の説明として、輪帯境界 の段差部分の、レンズ径方向への漏れ電界の影響 を指摘する報告もある。前述のように、液晶レン ズの輪帯幅は、レンズ口径の拡大に伴って減少す る設計が必要となるため、この振幅減少への対策 は、将来に向けて液晶レンズの大口径化を実現す るための、重要な技術課題の一つとなる[®]。

このような背景から、今回我々は、液晶レンズ におけるリタデーション分布のプロファイルを、 偏光顕微鏡を用いて詳細に計測することを試み た。これにより、特に輪帯幅が狭い領域において、 リタデーションの分布状態や、印加する電圧およ び周波数の影響などの詳細を把握し、より理想的な 形に制御するための手段を検討した。今回の報告で は、その成果の一例と、これらの技術を応用した最 新のレンズ試作品の特性と画像について紹介する。

なお、液晶レンズにおいて偏光依存性を除去 し、全ての振動方向を持つ自然光においてレンズ 効果を発現させるためには、2 枚の液晶レンズ素 子を、その配向方向が互いに垂直となるように配 置して貼り合わせる方法が簡明であり、我々もそ の方法を採用している。

2.3. レンズの設計と作製

電磁界解析による素子構造の設計、液晶材料内 の電位分布の形成に伴って配列する液晶分子の振 る舞いと、これにより発現するリタデーションの 算出と評価を行うためのシミュレーションを活用 して、液晶レンズの設計を行った。また、今回は 新たに、通常のレンズ設計のツールとして用いら れる、光線追跡を行うためのシミュレータを、液 晶 レンズが属する屈折率分布型(Gradient Refractive INdex = GRIN)レンズを扱える形に改造 して導入した。今回作製したフレネル型液晶レン ズの外観写真を、図3に示す。レンズの直径は、 10 mm と 20 mm の 2 通りで、厚みは単板仕様で約 1 mm、偏光無依存の貼り合わせ仕様で、約 2 mm で ある。レンズに設けられた複数の領域に、個別に電 圧を印加するための電極パッドを、レンズの上部に 設けており、可撓性のある配線材を用いて電極を引 き出し、簡便に電圧印加が行える設計としている。



図3 液晶レンズ試作品の外観 Fig.3 Outline of manufactured liquid crystal lens.

液晶レンズは容量性リアクタンスの性質を持 つため、理論上は電力消費を発生せず、眼鏡のよ うなウェアラブル機器への応用に好適であるが、 実際には液晶レンズが持つ透明電極の抵抗値等か ら生じる損失の影響を受けるため、注意が必要で ある。今回我々は、レンズ駆動時に液晶レンズを 流れる電流波形の実効値を計測することにより、 素子の消費電力の算出を行った。その結果、直径 20 mm レンズの消費電力は、前述の配線材と合わ せて、レンズ 1 層当たりで約 40 μW と算出され た。これは、2 次電池として現在主流となってい るリチウム-イオン蓄電池の標準電圧 3.7 V でレ ンズを駆動した場合、直径 3.5 mm のピン型電池の 容量 13 mAh で換算すると、4 枚の液晶レンズを同 時に使用した場合でも、80時間以上の連続使用が可 能となる数値である。駆動回路の IC チップ化によ る小型・省電力化の技術と合わせて、長時間の連続 装用が可能な度数可変眼鏡への応用が期待できる。

3. リタデーションの実測評価

3.1. リタデーションの評価原理

平面型液晶レンズにおいては、液晶層にて形成 されるリタデーションの分布が、入射光の波面を 変調し、集光・発散・偏向の特性を発現する要素と なるため、その実測値の測定は、特に重要な評価技 術の一つとなる。本研究では、リタデーションの実 測のために、市販の偏光顕微鏡を用いて簡便に測定 を行えるセナルモン法を用いて、検討を行った¹⁰。

セナルモン法は、測定試料を含む光路中に配置 した検光子を回転させ、消光位を求めることでリ タデーションを算出する、簡便で高精度の測定法 と言える。図4にその基本構成を示す。入射光源 ①を単色光とし、2枚の直線偏光子②と⑤の間に、 被検体③と、測定波長に合わせた 1/4λ板④を組 み込み、出射側の直線偏光子⑤を回転させて、受 光器⑥で検出した光が暗状態になる角度(消光位) を求め、この値からリタデーションを算出する。





Fig.4 Principle of Senarmont method for retardation measurement.

光源の波長を λ 、消光位を θ としたとき、被検体のリタデーションRは以下の式で与えられる¹⁰。

$$R = \frac{\lambda \theta}{\pi} - m\lambda \qquad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$
(1)

しかし、消光位 θ は $0 \sim \pi$ の間の値でのみ計測 されるため、被検体のリタデーションの絶対値が 光源の波長 λ を超える場合には、(1)式における整 数mの値を、何らかの方法で算定する必要がある。 そこで本研究では、波長の近い2種の単色光を光源 として、各々の消光位の値を求め、それらの差異か ら(1)式のmを求める方法を用いることとした。

2種の単色光の波長をそれぞれ λ_1 、 λ_2 とし、各波 長における消光位の測定値を θ_1 、 θ_2 としたとき、被 検体のリタデーション*R*は以下の式で与えられる。

$$R = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\theta_1 - \theta_2)}{\pi (\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{2}$$

この方法によれば、上記の2種の波長の差をn と置いたとき、(1)式のmの値が λ/n に到達する まで、リタデーションの絶対値を算定することが、 理論上は可能となる。しかし、近い波長間では消 光位も近い値となるため、測定値が誤差やノイズ に埋もれることのなきよう注意が必要となる。

本研究においては、使用した市販の偏光顕微鏡 の光学系を有効活用するため、図4における光源 側の直線偏光子②を回転させ、受光器側の直線偏 光子⑤の角度を固定とし、④の1/4 波長板の進相 軸を⑤の振動方向に合わせて配置し、被検体③の 進相軸を④の進相軸に対して、45 度の傾きになる ように配置して、測定を行った。単色光源①は、白 色光の光源に、波長 540 nm および 580 nm の2 種の 単色の帯域通過フィルタを挿入して生成した。受光 器⑥は、顕微鏡に備え付けられているデジタルカメ ラの撮像素子(画素数 6000 × 4000)にて代用した。

測定系の各素子を、被検体を含めて固定した 後、消光位を求めるために、偏光子の角度を基準 位置に対して、0度から135度まで45度間隔で変 化させて、写真撮影を行った。それらの画像デー タの輝度に対して、高速フーリエ変換法(FFT)を用 いて、各画素毎に光量が最も少なくなる消光位を 求め、式(1)(2)にしたがって、リタデーションの絶 対値 R を算出した。

3.2. リタデーション測定結果

作製した装置において、標準リタデーションサ ンプル(ニコン社製)の測定を行った結果を、図 5に示す。標準サンプルの設計基準波長λは546.1 nmで、5λ、10λの2種のサンプルを準備した。 各サンプルのリタデーションの、データシートの 記載値2779.5 nm、5473.9 nmに対して、本方式に よる各々の測定結果は、2781 nm、5675 nm となり、 このリタデーション範囲においては良好な一致が 得られていることを確認した。

次に、液晶レンズを被検体として、上記と同様 の測定手順により、電圧を印加した状態における リタデーションの評価を行った。単色光の波長を 580 nm とし、偏光子の回転角度を0度(クロスニ コル状態)とした場合に、液晶レンズに観察され る干渉縞の写真と、その中心位置から半径方向に 画素を走査した場合の、リタデーションの測定結 果を、図6に示す。液晶レンズにおけるリタデー ションは、前述のように半径方向において鋸歯状 に分布しており、その様子は、同心円状に分割さ

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.30, No.1 2021

れたレンズの各領域(輪帯)において、常光と異 常光の干渉によって形成される縞となって表れ る。この干渉縞の位置は、偏光子を回転させるこ とによって、半径方向に連続的にシフトしていく 様子が確認された。撮影した複数の写真の画像デー タをもとに、リタデーションを算出した結果は、 図に示すように、半径方向の座標に対して、鋸歯 状に分布しており、等間隔の干渉縞の形成を目標 に、レンズの駆動条件を最適化するべきという、こ れまでの進め方の妥当性を裏付けることができた。





Fig.5 Measuring result of retardation standard plates.



図6 液晶レンズにおける干渉縞と、リタデーション 測定結果

Fig.6 Observed fringes and measuring result of retardation on manufactured liquid crystal lens.

3.3. リタデーション分布の検討

液晶レンズにおける同心円状の櫛型電極によっ て形成される鋸歯状のリタデーションは、その 振幅や形状が、レンズを構成する輪帯の幅に影響 を受ける。そこで我々は、レンズ駆動時における 輪帯幅とリタデーション分布の関係を明確にする ため、フレネル型の構造を持つ液晶光偏向素子 8) を作製し、そのリタデーション評価を行った。液 晶光偏向素子は、櫛型電極への電圧の印加により、 液晶材料内のリタデーションの傾きを変化させ て、光の進行方向を制御する素子である。回折型 の素子と違って、入射光に対する出射光の角度を 連続的に変化させることが可能であり、光通信器 の光軸合わせ等への応用が期待される。この素子 においても、電圧印加によって形成されるリタデー ション分布は、偏向光の指向性の向上、散乱光の 低減といった観点からも、理想的な鋸歯状に近い 形が望ましく、液晶レンズと同様に、その実測に よる評価と検証が望まれる。

液晶レンズの輪帯幅に相当する、液晶偏向素子 のブレーズの幅 bw を変えたサンプルを作製し、 観測された干渉縞と、その画像データを基に測定 した、リタデーション分布のパターンを、図7に 示す。干渉縞は、2種の波長と4種の偏光子回転 角度で、計8枚について写真撮影を行い、そのう ちの波長 580 nm、回転角度0度の条件下の干渉縞 画像を掲載している。サンプルのブレーズ幅は、 200 µm、100 µm、60 µm、40 µm の4通りで、液晶 レンズの駆動電圧は 1.0~3.5 Vrms、周波数は 0.2 ~1.0 kHz である。これらの駆動条件の調整によ り、得られるリタデーション分布の振幅および形 状を制御できる。

櫛型電極への電圧印加によって得られる液晶 層内部の電位分布は、そのブレーズ幅が狭くなる ほど、コントラストが鈍る性質があり、その結果、 得られるリタデーションの振幅が減少する傾向が あることが、電磁界解析および液晶分子の挙動を 扱うシミュレーションによって明らかにされてい る ⁹。今回の測定結果においても、図7の(a)のケー スのように、ブレーズ幅 200 μm と比較的広い領 域では、鋸歯状分布の頂点の部分に若干の鈍りは 生じるが、ほぼ良好な分布を達成できている。し かし、ブレーズ幅が狭くなるにしたがって、(b)の ようにリタデーションの段差部分が急峻でなくな り、ピーク位置がブレーズの境界部からズレて発 生するケースや、(c)のようにリタデーションの平 坦部分の割合が、ブレーズ幅に対して大きくなり すぎるケースが生じる。





しかしながら今回の検討では、液晶レンズへの 2 種の印加電圧と周波数を微調整することによ り、(d)に示すように、40 µmの狭いブレーズ幅に おいても、(a)のようにほぼ理想的な鋸歯状のリタ デーション分布を得られることが確認できた。

3.4. 今後の課題

液晶の回折素子において、ブレーズ内に 10 以 上の複数の電極を配置して、鋸歯状のリタデーショ ン分布を形成した場合に、ブレーズの幅が狭くな るほど、その形状が鈍る傾向があることは、既に 報告されている。この鈍りの主要因は、鋸歯状の リタデーション分布に見られる、ブレーズ境界の 段差領域(fly-back zone)が占める割合の広さと、 その領域の漏れ電界によって生じる、光の波長と の比率で決まる最小ブレーズ長の制約 (fringefield limitation)に起因すると説明されている¹¹⁾。フ レネル型液晶レンズにおいては、段差領域を通過 する光は結像に寄与しないため、この領域の増加 はレンズを通した画像全体が白くなる現象(白化) の原因となる。また、図7(c)のケースで生じる平 坦部分は、透過光が直進してしまうため、レンズ におけるこの領域の増加は、画像が2重に映る原 因となる。このため、液晶レンズの各輪帯におけ るリタデーション分布を、より均一に鋸歯状の理 想的な分布に近づけることが、将来の大口径化お よび画質の向上につながる重要な課題となる。

この課題解決の方策としては、本研究の例のよ うに、駆動電圧と周波数の最適化による改善の他 に、レンズの構造を改良することも有力な手段で ある。その一例として、素子の液晶層の部分に絶 縁体の隔壁を設け、液晶分子の連続性を分断し、 垂直壁のアンカリング効果によるダイレクターの チルト角を制御することで、狭い輪帯幅の領域に おけるリタデーション振幅を拡大できることも確 認されている⁹。光の波長によって制約を受ける 漏れ電界を自在に制御することは、現在の素子構 造のままでは容易ではないが、輪帯の境界部分に おける液晶分子の振る舞いを改善することは、未 だ可能性が残されていると思われ、今後の研究開 発の進展が期待できる。

4. 最近のレンズ評価結果

4.1. レンズパワー評価結果

今回試作したフレネル型液晶レンズにおいて、 焦点距離の逆数に相当するレンズパワーを、眼鏡 用レンズメータ(NIDEK 社製 LM-1800PD)を用

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.30, No.1 2021

いて評価を行った結果を、駆動電圧の最適化によ り観測された干渉縞の数に対する測定値として、 図8に示す。図の右上の領域は正極性のレンズ、 左下の領域は負極性のレンズに相当し、レンズの 中心領域と、周辺領域に分けて記載している。レ ンズサンプルの直径は20mmで、レンズメータの 検出器の有効感度領域の直径は8mmである。

液晶層厚20 umにて試作したサンプルのレンズ パワーの可変範囲として、正負両極性において土 3[m-1]が得られた。これは眼鏡の度数においては、 そのまま±3 度の間で連続的な制御が可能である ことを示す。但し、レンズの輪帯幅がより狭くな る周辺領域では、得られるレンズパワーが、中心 領域に比較して、少々劣る結果となった。この理 由は前述のように、輪帯幅の減少に伴って、得ら れる干渉縞の数が減少する傾向を有することに起 因する。対策としては、レンズの領域を半径方向 に分割し、各領域において適切な印加電圧条件で 駆動することと、前述のレンズ設計用シミュレー タを活用して、その駆動条件に適合した輪帯幅の 設計をより精密に行うことで、これにより内外周 領域におけるレンズパワーの差異は十分に解消で きるものと思われる。







4.2. 視力補正効果

液晶レンズによる視力補正効果を検証するた めに、レンズサンプルをデジタルミラーレスカメ ラのレンズ直前 1.5 cm に配置し、同カメラと被写 体までの距離を 20 cm とした、所謂眼鏡ポジショ ンを用いて、液晶レンズの度数を変化させた場合 の、画像の検証を行った。使用したレンズの直径 は 10 mm で、被写体を新聞サイズの 10 point のフォ ントとし、液晶レンズを透過した撮影画像を図 9 に示す。カメラレンズは、人間の眼球のレンズに 合わせるため、焦点距離 16 mm の広角レンズ (リコー社製)を用いた。

今回我々は、近視者や老眼者の視界を再現する ため、カメラの焦点位置を被写体の合焦位置から ずらして設定し、検証を行った。上段の写真は、 老眼者を想定して、カメラのフォーカスを-3.0 度 ずらして撮影したもので、眼球の水晶体の焦点調 整が効かない位置では、被写体はこのように観測 される。この時の液晶レンズは電圧の印加がない ため、通常の透明ガラス板と同様の視野となる。

これに対して、中段の写真は、液晶レンズを+3.0 度のレンズパワーになる条件で駆動した場合の被 写体画像を示す。このように、液晶レンズを駆動 させることで、老眼者の視力を、文字の判別が可 能になるまで補正することが可能となる。また、 下段の写真は、カメラの焦点距離を-2.5 度ずらし て同様の撮影を行ったもので、この場合も焦点ず れのために判別できなかった新聞の文字の認識が 可能になる。これらが、所謂眼鏡の視力補正効果 である。従来の遠近両用眼鏡は、被写体の遠近に 応じたレンズの度数を、レンズの領域によって変 化させて設計されているため、視界が極端に狭く なる、歪みが発生して気分が悪くなる、などの問 題を抱えていた。これに対して、レンズに度数可 変の液晶レンズを用いることで、被写体の遠近に 応じた最適度数を自在に調整することが可能にな り、眼鏡装用者の視界に起因するストレスを大幅 に低減することが可能となる。





+3D

the limitations described to limitations described to be a set of the set of the set of the limitations described to be a set of the set of the set of the limitation of polymer is to stabilize polying for scattering either in the field-OF eld-ON condition. Whenever the cell is texture, the refractive indices are miss domains and hence the cell is opaque the cholestric polymer dispersion can normal mode (opaque in a field-OF in a field-ON condition) or any of OFF condition and opaque the clear state both

-2.5D

a new input crystal is a conserve the limitations described in monomers are photopolymerized chalesteric liquid crystal. The concerned gel is so low that it does not affect the function of polymer is to statistic chalesteric condition. Whenever the field or field-ON condition. Whenever the cell is the domains and hence the cell is the the domains and hence the cell is the field of the cholestric polymer dispersion the in a field-OFF condition and the condition is field-OFF condition and the cell is the field of the clear state 20 to the clear s

図 9 視力補正効果写真 Fig.9 Images of vision correction with tunable liquid crystal lens.







図 10 遠近制御画像写真 Fig.10 Images of focus control with tunable liquid crystal lens.

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.30, No.1 2021

図 10 は、同一のサイズおよび形状の被写体を カメラレンズの端面から、17 cm、30 cm、90 cm、 の3箇所の位置に配置して、カメラの焦点位置を 中距離の30 cm 位置の被写体に合焦させた状態で 撮影した映像を示す。その際に、液晶レンズの制 御度数を順次変化させ、その値を各写真の上部に 表示している。本撮影に使用した液晶レンズの直 径は20mmである。液晶レンズの度数制御によっ て、遠近両者の被写体に合焦することができて、 カメラと同様の焦点制御が可能であることを示し ている。カメラの焦点調整は、2 組のレンズ群の 距離を光軸方向に変化させることで実現している が、液晶レンズを用いる場合は、レンズ位置を固 定したままでの調整が可能なので、光軸ずれやレ ンズ傾きの原因となる可動機構を一切排除できる ため、小型カメラの焦点調整機能への応用が期待 されているり。

5. おわりに

度数可変型液晶レンズの、眼鏡への応用に関す る最近の実用化動向と、我々が推進しているフレ ネル型液晶レンズの研究開発における、現状の技 術課題と成果について述べた。液晶レンズにおけ るリタデーションの分布状態を正しく把握するた めに、2種の波長の単色光源によるセナルモン法 を用いて、駆動電圧を印加した状態でのリタデー ションの実測評価を行い、レンズの開発に役立て ることができた。リタデーションは、液晶素子の レンズ機能を発現するための基幹となる物性であ るため、実測によりその分布プロファイルを把握 できたことは、将来の研究開発において、今後も 多くの貴重な情報を提供してくれるものと思われ る。しかしながら、リタデーションが最も急激な 変化を示す輪帯境界の段差領域においては、まだ 測定結果にノイズが多く、その再現性や信憑性に 疑問が残る状態であるため、今後の開発による測 定精度の改善が望まれる。

液晶レンズの度数可変眼鏡への応用において は、画質を良好に保ったまま、レンズ周辺部の輪 帯幅をより狭い領域まで活用する必要があり、こ の限界値を拡張することが、そのままフレネル型 液晶レンズの口径拡大につながる。これを実現す るために、駆動電圧の振幅と周波数条件の最適化 や、微細構造による垂直隔壁の敷設も含めたレン ズにおける輪帯構造の改善など、リタデーション 分布形状を理想に近づけるためのいくつかのアプ ローチが考えられる。

度数可変眼鏡は、視線を検出して度数を制御す る自動フォーカス機能の実現や、弱視・斜視など の症状を持つ児童たちに向けた医療用途、さらに は、各種センサと合わせて病変や身体の異常を検 出し予防する健康管理への応用など、視力補正と いう従来の枠を超えた新しい時代の眼鏡へと進化 する可能性も容易に想像できる。そのような多機 能眼鏡が、人々の社会生活を、一生に渡ってより 豊かにするアイテムへと発展する明るい未来を願 い、今後のさらなる技術革新に期待したい。

謝 辞

本研究は、大阪大学起業プロジェクト育成グラ ントの支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 澁谷義一,吉田浩之,尾崎雅則,光技術コン タクト,53,11 (2015)
- 2) <u>https://kaden.watch.impress.co.jp/docs/news/482427.html</u>
- 3) <u>https://do.presby.co.jp</u>
- 4) <u>https://www.touchfocus.com/</u>
- 5) <u>https://morroweyewear.com/technology</u>
- 6) <u>https://deepoptics.com/site/</u>
- Y. Yadin, S. Rosen, Y. Haddad, Y. Vardi, I Grutman, SID 2018 Digest, 870 (2018)
- G. Shibuya, S. Yamano, H. Yoshida, M. Ozaki, Proc. SPIE, 10125, 101250V-1-9 (2017)
- 3) 澁谷義一,李 蕣里,吉田浩之,尾崎雅則,液 晶,23,2 (2019)
- 10) 佐藤裕哉,中村勇夫,堀井信宏,佐藤松雄, 関 秀廣,八戸工業大学紀要,24,57 (2004)
- B. Apter, U. Efron, E. Bahat-Treidel, Appl. Opt.
 43, 11 (2004)

(2021年11月2日 受理)

— 36 —

著者略歴



澁谷 義一(しぶや ぎいち)

1984 年 慶應義塾大学大学院工学研究 科 修士課程修了。同年4月、TDK 株式 会社入社。主に光記録媒体、光記録ヘッ ドの研究開発に従事。1994年 信州大学 大学院工学系研究科 博士後期課程修了。

2014 年 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専 攻 特任研究員 液晶レンズの研究開発に従事。2019 年 株 式会社エルシオ 代表取締役社長。



伊奈 裕彦(いな ひろひこ)

1978 年 神戸市立工業高等専門学校 電気工学科卒 同年ウエスト電気(株) (現パナソニックフォトライティング) 入社

カメラ関連の電気回路設計 レンズ設 計 携帯電話用カメラモジュール開発 新規事業開発業務に 従事。2019 年 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信 工学専攻 特任研究員

2021年 株式会社エルシオ 非常勤従業員。



李 蕣里(りじゅんり)

2011 年 東京大学大学院工学研究科 修士課程修了。同年 浦項工科大学 (韓国) 留学。2016 年 UCSD (米国) 留学。2017年 大阪大学大学院理学研究 科 博士後期課程修了。2019 年 大阪大 学大学院工学研究科電気電子情報通信 工学専攻 特任助教 グロービス経営大学院在学中。電子材料、 経営学専攻。2019年 株式会社エルシオ 代表取締役副社長。



尾崎 雅則(おざき まさのり)

1985 年 大阪大学大学院工学研究科 修士課程修了。1988年 大阪大学大学院 工学研究科 博士課程修了。2005年 大 阪大学大学院工学研究科 教授。電気電 子材料工学、ナノフォトニクス、ソフト マター物理等専攻。2015年 日本液晶学

会業績賞、2013 年 応用物理学会フェロー表彰賞等受賞。 電気学会 理事。2019 年 株式会社エルシオ 技術顧問。