



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	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

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 薺里¹、伊奈 裕彦¹、尾崎 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、外観上の違和感是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

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15~20 mm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、外見は普通的眼鏡と変わらず、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⁶⁾。

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、輪帯状に配置した楕円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3 V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、レンズ口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

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ンニングされた同心円状の楕円型電極に、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。

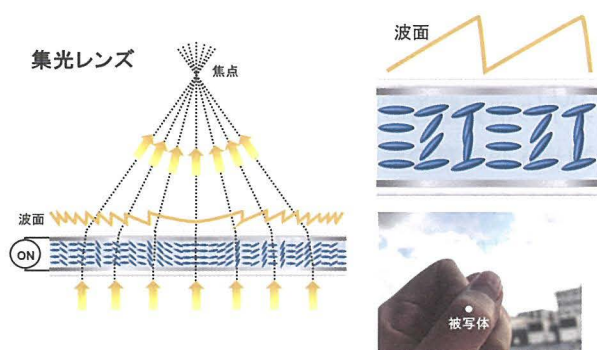


図1 集光レンズの波面と、眼鏡画像

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。

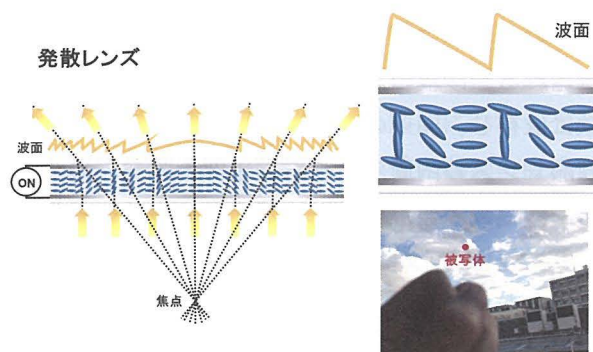


図2 発散レンズの波面と、眼鏡画像

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 $n_e d$ 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 $20 \mu\text{m}$ 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 $n_o d$ 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

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⁸⁾。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⁹⁾。

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。

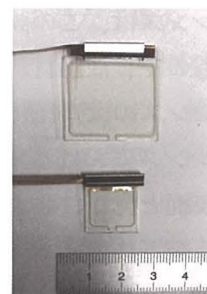


図3 液晶レンズ試作品の外観

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 μ W 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 $1/4\lambda$ 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。

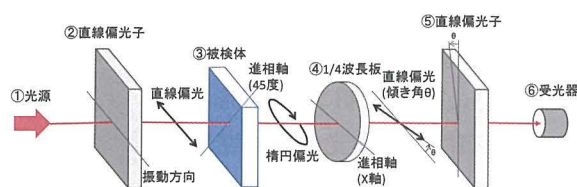


図4 セナルモン方式の原理図

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⁾。

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

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。

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

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

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。

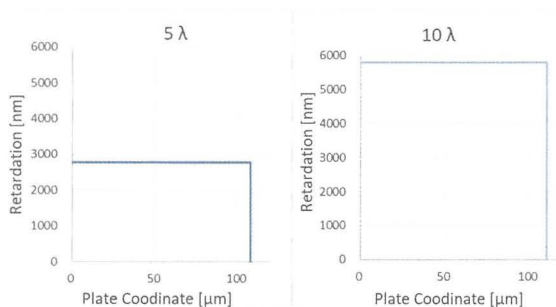


図5 標準位相差板測定結果

Fig.5 Measuring result of retardation standard plates.

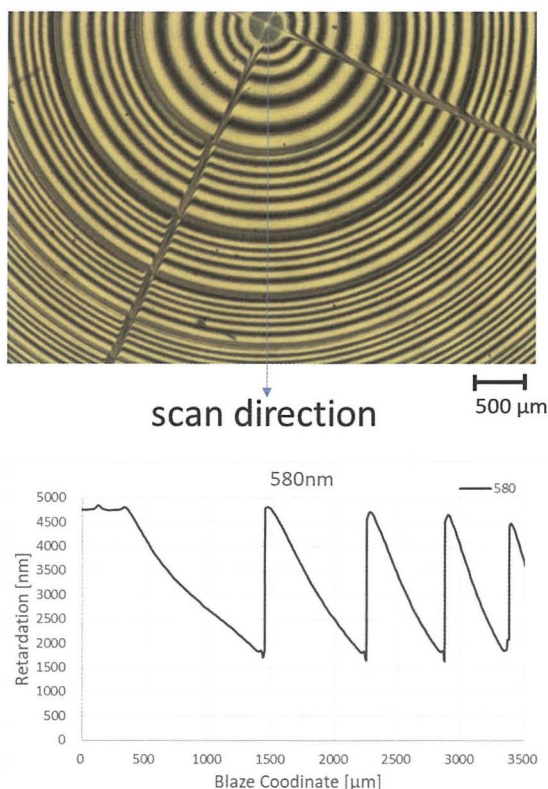


図6 液晶レンズにおける干渉縞と、リタデーション測定結果

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楕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、楕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ドの幅 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。サンプルのブレード幅は、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。

楕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、そのブレード幅が狭くなるほど、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、ブレード幅 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、ブレード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ド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、ブレード幅に対して大きくなりすぎるケースが生じる。

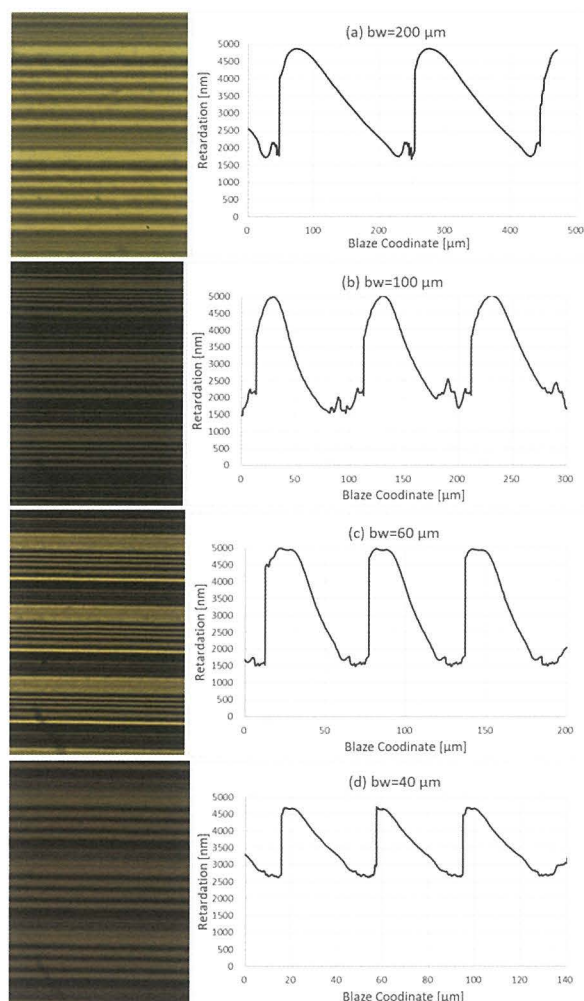


図7 ブレード幅に対する、リタデーション分布
Fig.7 Distributions of retardation with various blaze width.

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 の狭いブレード幅においても、(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、ブレード内に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、ブレード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、ブレード境界の段差領域(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ド長の制約 (fringe-field 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

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20 mmで、レンズメータの検出器の有効感度領域の直径は8 mmである。

液晶層厚20 μm 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 $\pm 3 [\text{m}^{-1}]$ 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。

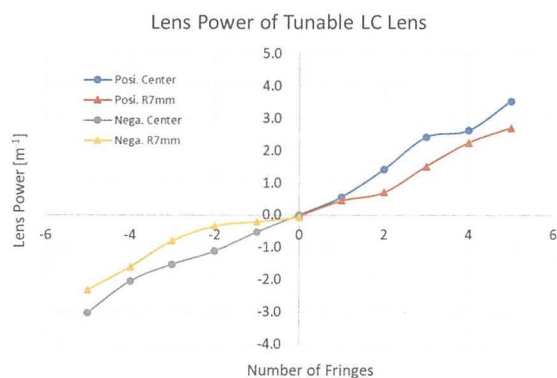


図8 レンズパワー内外周測定値

Fig.8 Measured lens power with various numbers of obtained fringes.

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。

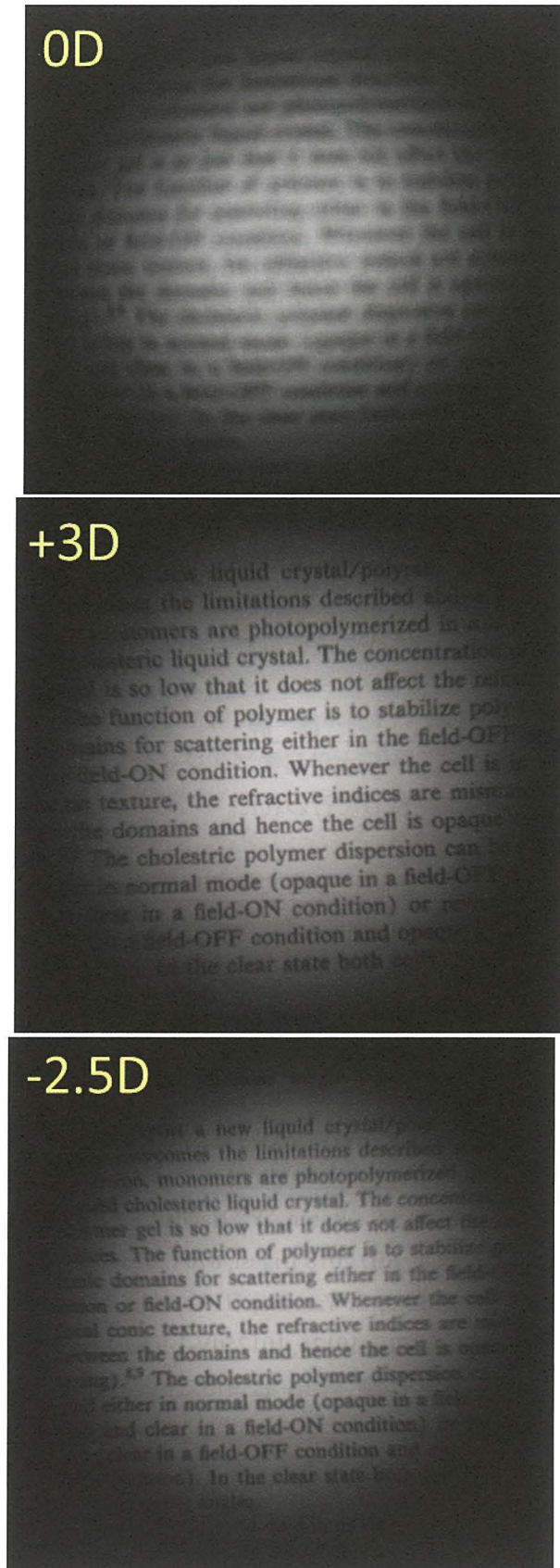


図9 視力補正効果写真

Fig.9 Images of vision correction with tunable liquid crystal lens.

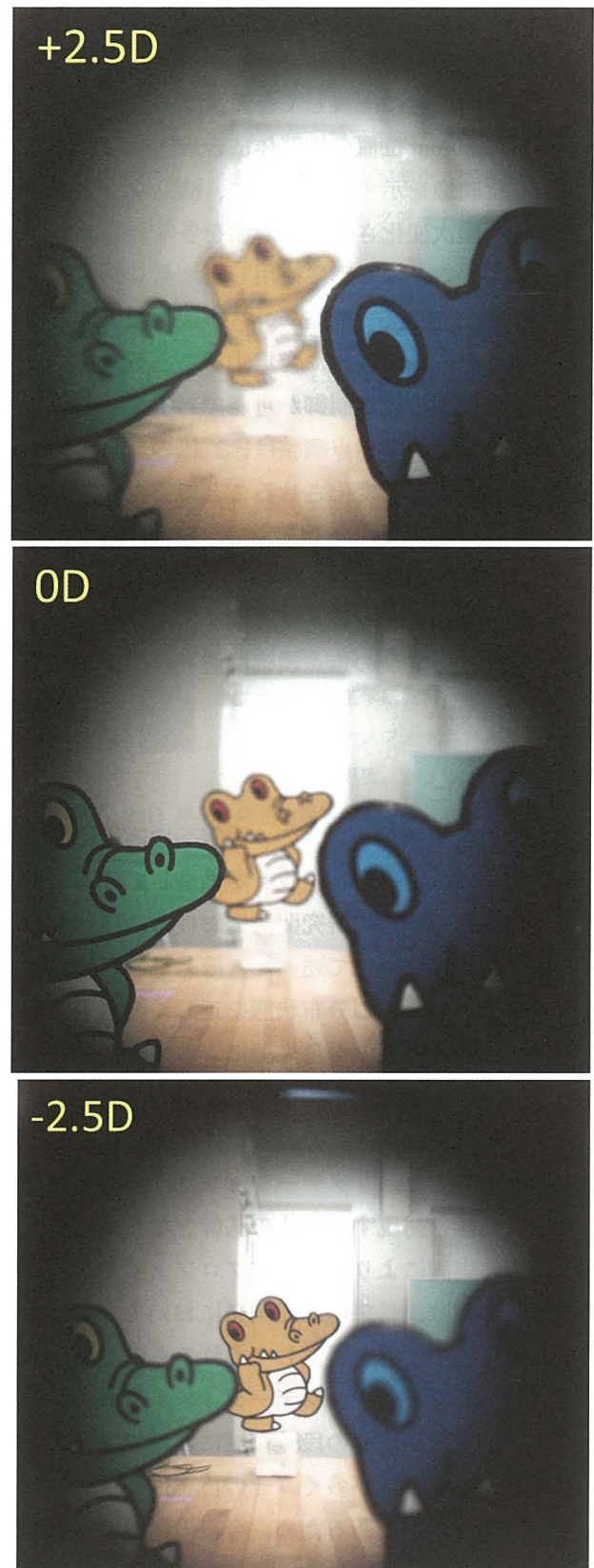


図10 遠近制御画像写真

Fig.10 Images of focus control with tunable liquid crystal lens.

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20 mm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¹⁾。

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) <https://kaden.watch.impress.co.jp/docs/news/482427.html>
- 3) <https://do.presby.co.jp>
- 4) <https://www.touchfocus.com/>
- 5) <https://morroweyewear.com/technology>
- 6) <https://deepoptics.com/site/>
- 7) Y. Yadin, S. Rosen, Y. Haddad, Y. Vardi, I. Grutman, SID 2018 Digest, 870 (2018)
- 8) G. Shibuya, S. Yamano, H. Yoshida, M. Ozaki, Proc. SPIE, **10125**, 101250V-1-9 (2017)
- 9) 澁谷義一, 李 薺里, 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)
- 11) B. Apter, U. Efron, E. Bahat-Treidel, Appl. Opt. **43**, 11 (2004)

(2021 年 11 月 2 日 受理)

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 薺里（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、ナノフォトンクス、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。