［研究助成（A）］

焦点を連続制御可能な高機能液晶レンズを用いた高齢者視覚インターフェースの研究開発

Research and Development of Visual Interface Using Functional Liquid Crystal Lenses with Continuously Controllable Focal-Length

2211008

研究代表者　秋田大学　大学院理工学研究科　教　授　河　村　希　典

［研 究 の 目 的］

液晶は，液体のような流動性を有し，大きな複屈折と誘電異方性の特徴を示す材料であり，比較的低い電圧により液晶分子の配列（配向）状態を変えることができる。そのため，実効的な屈折率を異常光に対する値から常光に対する値まで連続的に制御することができる。この特性を利用したプリズムやレンズ等の能動光学素子に用いる研究が行われている。液晶をレンズ等に用いる研究は 1970 年代頃から始まり，平凹及び平凸レンズ形状のセルを液晶層とした液晶光学デバイスの研究が始まった。さらに，円筒面平凸レンズ形状を液晶層にもつ液晶レンズやフレネルレンズ形状の液晶層を有する液晶レンズが提案された。その後，レンズ特性を有する屈折率分布（光学位相差分布）を実現するために，液晶層厚を一定とし，種々の電極構造を有する液晶レンズとして，回折効果を利用したビーム偏向制御液晶レンズ，フレネルレンズ屈折分布型液晶レンズ，円形開口パターン電極を用いた液晶レンズ，球面形状電極を用いた液晶レンズなどが報告された。円形開口パターン電極を有する液晶レンズでは，マイクロからミリサイズの屈折率分布型の液晶レンズを実現することができた。これらの液晶レンズではレンズ開口径を広くした場合，円形パターン電極と液晶層までの絶縁層を厚くする必要があるため，高い印加電圧が必要である。駆動電圧を下げることを目的とした低電圧駆動型液晶レンズについて提案され，高輪帯電極構造を有する液晶レンズについても当研究室で研究を精力的に行っている。

本研究では，焦点距離及び焦点面の自由な位置を電圧のみにより制御し実現することができる液晶レンズを設計し，液晶レンズの各電極に電圧を加えた場合の液晶層における液晶分子の配向状態について，3 次元的に解明することである。さらに，液晶分子の配向により決定できる光学位相差からレンズ特性を求め，焦点可変量の範囲とする大きなレンズパワーを保持しつつ，有効レンズ径の拡大化をすることにより，焦点面の位置制御を実現することを目的としている。加えて，電子制御による視覚調整が可能なインターフェースとするメガネ応用への可能性について述べる。

［研究の内容，成果］

1. 液晶分子配向シミュレータの開発

ネマティック液晶は分子方向に規則性を示すが，位置に関しては秩序が存在しないため，ダイレクタ $\boldsymbol{n}$ の分布状態が不均一となる際に，初期配向状態となるようにダイレクタ変化に対

して復元力が働く。ダイレクタの変形は，スプレイ，ツイスト及びベンド変形に分類され，ダイレクタ分布の変形が小さい場合，フックの法則により復元力は $\boldsymbol{n}$ の変形量に比例する。液晶におけるダイレクタ分布の変形による自由エネルギー密度F_dは，スプレイ，ツイスト及びベンド変形による弾性定数 k_{11}，k_{22}及び k_{33}を用いて次式で表せる。

$$f_d=\frac{1}{2}k_{11}(\nabla\cdot\boldsymbol{n})^2+\frac{1}{2}k_{22}[\boldsymbol{n}\cdot(\nabla\times\boldsymbol{n})]^2+\frac{1}{2}k_{33}[\boldsymbol{n}\times(\nabla\times\boldsymbol{n})]^2 \quad (1)$$

ネマティック液晶において，電界を加えた際に液晶分子の配向状態により，屈折率が変化する電気光学効果が見られ，この効果は電界により分子の配向状態が変化するために生じるものであり，比較的大きな効果が得られるという特徴がある。液晶分子の長軸方向の誘電率$\varepsilon_{//}$とその軸に直交な方向の誘電率$\varepsilon_{\perp}$で異なる値を示すことから，液晶レンズにおける液晶層での液晶分子が電界分布により再配向することになる。

液晶層内での液晶分子の総自由エネルギー密度は，式(1) で述べたように，ひずみによる弾性エネルギーf_kと電界によるエネルギーf_e=$-(1/8\pi)\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{E}=-(1/8\pi)(\varepsilon\cdot\boldsymbol{E})\cdot\boldsymbol{E}$を用いて次式のように示される。

$$f=f_k+f_e \quad (2)$$

したがって，液晶レンズの液晶層における液晶分子の配向状態が電圧印加により変形を受けたときの液晶層全体の自由エネルギーFは，ひずみによる弾性エネルギーf_kと電界によるエネルギーf_eの和の体積分のため，次式のように示される。

$$F=\int(f_d+f_e)dv \quad (3)$$

液晶ダイレクタは，$\boldsymbol{n}=(n_x,n_y,n_z)$ で示され，n_x，n_y，n_z及び V に関する非線形の微分方程式を解くために，式(3) は有限差分法（FDM: Finite Difference Method）により一次と二次の微分を書き換えられ，代数方程式によって変換される。液晶層における計算中では x-y 平面において等間隔 h，x-z 平面において等間隔 d で構成される格子点を用いて，計算を行った。

2. 液晶レンズの構造

液晶レンズの上面と側面を図 1 に示す。上部電極は円形パターン電極，輪帯電極及び円形孔パターン電極で構成されている。ここで，スリット幅は 0.2 mm としている。計算に用いる液晶レンズの x, y 軸方向の分割数を 101 分割，液晶層の厚みを 60 μm で 30 分割，ガラス基板（1 mm 厚）を 5 分割，絶縁層 5 μm を 5 分割，高抵抗膜を 0.1 nm を 5 分割として，シート抵抗がρ_sの抵抗層を配置した。

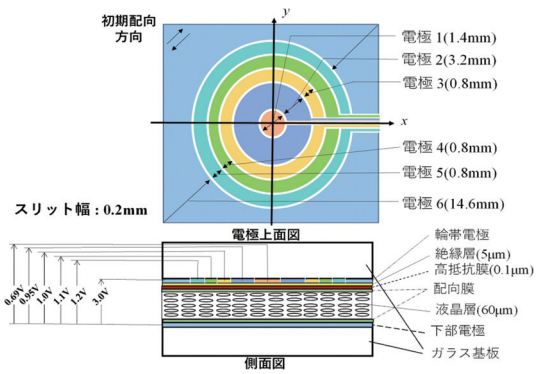


図 1　液晶レンズの構造

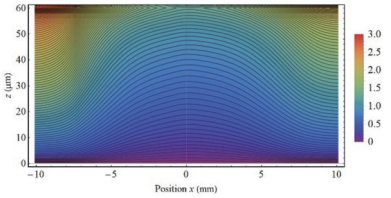
液晶の物性値として P 型ネマティック液晶 RDP-85475（DIC㈱）の弾性定数（k_{11} =14.8 pN, k_{22}=4.6 pN, k_{33}=30 N），誘電率（$\varepsilon_{//}$=26.9, $\varepsilon_{\perp}$=4.8），屈折率（n_o=1.518, n_e=1.812）を用いた。液晶分子の配向は平行配向としてプレチルト角を 1° とし，光の波長を 532 nm とした。比電圧 V/V_{th}は閾値電圧 V_{th}が k_{11}=14.9 pN, $\Delta\varepsilon$=22.1 として 0.864 V と求められ，電極に印加されている電圧の値は計算に用いた比電圧と閾値電圧 0.864 V の積となる。物線状のレンズ特性となるように各電極 #1～6 には比電圧 V_1～V_7=0.8 V_{th}, 1.1 V_{th}, 1.2 V_{th}, 1.3 V_{th}, 1.4 V_{th},

3.6 V_{th}を印加した。高抵抗膜はシート抵抗値6.0×10^{6}Ω/□と設定し，液晶レンズに用いる高抵抗膜の形状は全体に一様になっている。

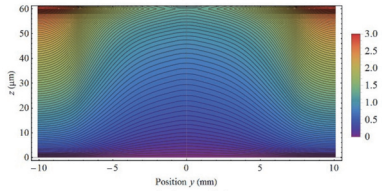
3. 液晶レンズの液晶分子配向とレンズ特性

3.1 電位分布

液晶レンズの液晶層におけるx軸方向とy軸方向の電位分布の断面図を図2(a)，(b)に示す。



(a) x軸



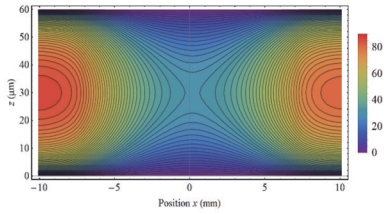
(b) y軸

図2　電位分布

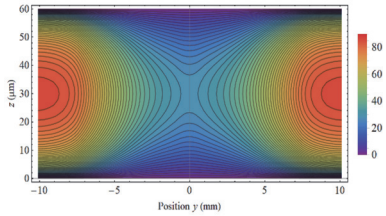
図2に示したように，y軸方向に対しては，y=0 mmを中心として対称的になっているのが見られた。一方，x軸方向はx=0を中心として引出電極側が低い電位側に偏りが生じ，左右非対称でることが分かる。この結果は引出電極にかかる電界分布による液晶分子の再配向効果により，非対称性を生じたためと考えられる。

3.2 チルト角分布

液晶レンズの液晶層における液晶分子が基板面から立ち上がるチルト角分布を図3(a)，(b)に示す。y軸方向に沿ったチルト角は，y=0を中心に比較的対称なチルト角になっている。一方，x軸方向のチルト角分布は引出電極側のチルト角が小さい傾向が見られた。引出電極に加わる電圧が他の電極に加わる電圧よりも低いため，対称となる位置での電界が小さいために生じた。そのため，電界分布に沿った液晶分子の配向状態により，誘電率分布が異なる。基



(a) x軸



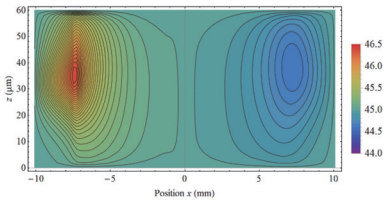
(b) y軸

図3　チルト角分布

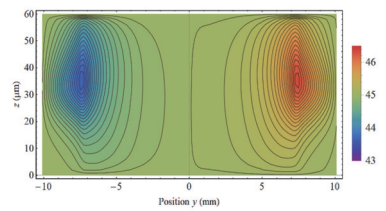
板面に対して水平方向に配向している場合，誘電率は大きく，垂直方向に配向している場合では，誘電率は小さくなるため，引出電極側の配向状態がx軸において対称の位置よりも水平方向に配向している影響が電位分布に関与している。

3.3 方位角分布

液晶層におけるx軸とy軸方向の方位角分布の断面図を図4(a)，(b)に示す。液晶分子の初期配向の方向が45°であり，y軸方向におけるy=0を中心として左右で方位角の差は見られなかった。x軸方向では引出電極側のねじれの影響の度合いが比較的小さくなっているのが



(a) x軸



(b) y軸

図4　方位角分布

分かる。印加電圧が高い輪帯電極ほど，方位角の変化が大きくなるものと思われる。

3.4　光学位相差分布

3次元液晶分子配向シミュレーションによって求めた液晶層における液晶分子の3次元ダイレクタ分布により各位置での実効的な屈折率分布を求め，その値から液晶層の各厚みを積算し，x-y 平面での光学位相差分布を計算した結果を図5に示す。ここでカラーバーは光学位相差の値を示している。上に凸状の放物面状光学位相差分布を示し，凸レンズ特性になっているのが分かる。引出電極によりその周辺の光学位相差が，引出電極側に歪んでいるのが確認できた。引出電極の幅に大きく依存する傾向が見られ，電極幅を狭くすることで，引出電極による光学位相差分布の歪みの影響を低減できることが示された。

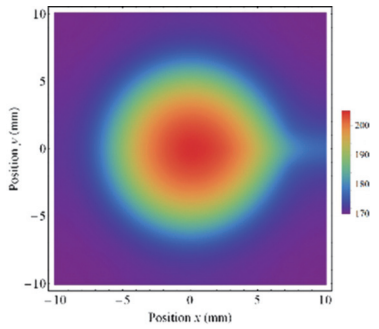
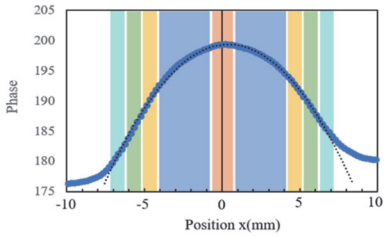
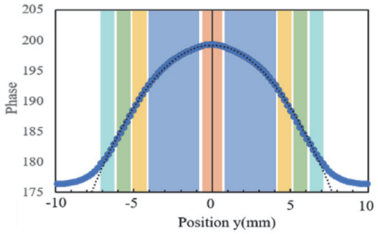


図5　光学位相差分布

液晶レンズの液晶層における x 軸（y=0）と y 軸（x=0）方向に沿った光学位相差分布の断面図を図6(a)，(b) に示す。液晶レンズでの x 軸及び y 軸共に円形孔パターン電極付近において放物線状の光学位相差分布の裾が外側に広がる傾向が見られた。また，引出電極のある x 軸方向において，位置 x=5.05 mm 及び −5.05 mm を比較する，と光学位相差が 3.0 rad の差があり，引出電極側の光学位相が非対称となることが示される。y 軸方向における理想球面との平均二乗偏差（RMS 値）は円形孔パターン電極直径の範囲内で 0.28，電極直径が 70% の範囲内で 0.15 という値になった。一方，x 軸方向において，円形孔パターン電極直径の範囲内で左右の非対称性が大きく，理想球面との RMS 値では評価を得ることができないと考えられる。



(a) x軸



(b) y軸

図6　方位角分布

3.5　干渉縞観察結果

液晶レンズを用いて適切な値（$V_{1\sim6}$=1.0, 1.1, 1 1.2, 1.3, 2.3, 2.8 V）となるように調整した電圧を各電極に印加し凸レンズ特性を測定した。液晶レンズは偏光顕微鏡を用いて直交ニコル下で撮影されており，ラビング方向は右上・左下方向に反平行となるように設置した。各電極に電圧を印加した時に撮影された干渉縞写真を図7に示す。隣接する干渉縞の間隔が 2π であるため，干渉縞写真から光学位相差を求めることができる。

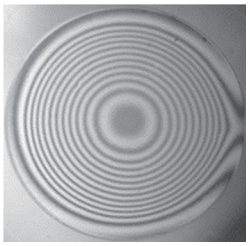
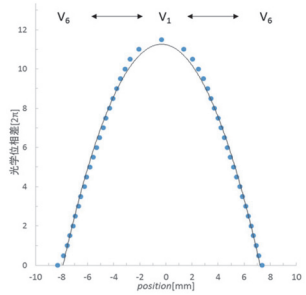


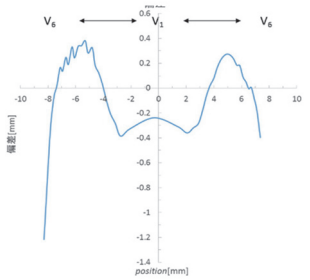
図7　干渉縞写真

光学位相差特性及び測定点と理想曲線との偏差を図8(a)，(b) に示す。偏差は理想曲線の

値から測定値の差分を示している。偏差の値が正であるときは干渉縞が狭まくなり，負の値では干渉縞が広がっていることを示す。この時の理想球面と測定値より求めた光学位相差の平均2乗偏差（RMS 値）は 0.29 λ と求められた。さらに光学位相差分布における曲線の2次係数よりレンズパワーを算出することができ，この時のレンズパワーは 0.25 m^{-1}であると求められた。



(a) 光学位相差分布



(b) 偏差

図 8　液晶レンズ領域における光学特性

したがって，電圧を制御することによりレンズパワーを 0～0.25 m^{-1}変化させることができ，焦点距離に換算すると無限大から 4.0 m の凸レンズと見積もることができる。この液晶レンズは，凸レンズ特性を示すだけでなく，電圧の制御により凹レンズ特性を示すことが可能であるため，レンズパワーの可変範囲を −0.25 m^{-1}～0.25 m^{-1}，すなわち約 0.5 m^{-1}のレンズ可変特性を得ることが可能となる。

［今後の研究の方向，課題］

本研究では，焦点距離及び焦点面の自由な位置を電圧のみにより制御し実現することができる液晶レンズの研究を行った。この液晶レンズは，大きなレンズパワーを保持しつつ，有効レンズ径の拡大化，レンズ特性を高精度化することにより，焦点面の3次元位置制御を行うことが可能となる。複雑な光の波面制御も実現できることから，電子制御による視覚調整が可能なインターフェースを今後の研究の方向に位置付ける。本研究の一部の成果により，従来の成型レンズでは成し得なかった光の制御が可能な光学素子を創製することが可能であることが示されたが，実用化に向けて，液晶レンズのレンズパワーをさらに増加する必要性の課題が残された。

［謝　　辞］

公益財団法人 立石科学技術振興財団からの助成に感謝いたします。また，液晶レンズの電極設計・光学特性等についてご指導を頂いた佐藤進 秋田大学名誉教授に感謝申し上げます。

［成果の発表，論文等］

（1） 河村：“アキシコンレンズ特性を有する液晶レンズの光学位相差分布”，2021 年日本液晶学会討論会 3CI1（2021）招待講演

（2） M. Kawamura: “Low-Driving-Voltage Liquid-Crystal-Lenses and Their Applications”, The 28th International Display Workshops (2021). Invited paper.

（3） 檜山，河村：“引出電極を有する液晶レンズの光学位相差特性（Ⅰ）”，2022 年第 69 回応用物理学会春季学術講演会，26a-E205-9（2022）.

（4） 伝法谷，河村：“フレネルレンズ型屈折率分布特性を有する液晶レンズの 3 次元液晶分子配向”，2022 年日本液晶学会討論会，PD09（2022）

（5） 河村：“輪帯電極を有する液晶レンズの電気光学特性”，光エレクトロニクス研究会（OPE），R2022-23 EMD2022-11 CPM2022-28 OPE2022-54 LQE2022-17（2022）招待講演

（6） 今井，河村：“異なるプレチルト角を有する液晶レンズの光学位相差特性”，2022 年第 83 回　応用物理学会秋季学術講演会，21p-P01-11（2022）.

（7） 檜山，河村：“液晶レンズにおける液晶分子の配向方向と引出電極との関係”，日本光学会年次学術講演会，Optics & Photonics Japan 2022，15pC3

(2022).
(8) 今井，河村：“プレチルト角を制御した液晶レンズの光学特性，NPO 法人光環境 DX 研究学会　第 1 回年次学術研究発表会，OpDX1（2022）.
(9) 寺井，河村：“非球面レンズ特性を有する液晶レンズの光学位相差分布”，NPO 法人光環境 DX 研究学会　第 1 回年次学術研究発表会，OpDX2（2022）.
(10) 伝法谷，河村：“フレネルレンズ特性を有する液晶レンズの液晶分子配向分布”，NPO 法人光環境 DX 研究学会　第 1 回年次学術研究発表会，OpDX4，(2022).
(11) 檜山，河村：“輪帯電極構造を有する液晶レンズの引出電極が与える影響”，NPO 法人光環境 DX 研究学会　第 1 回年次学術研究発表会，OpDX5 (2022).