

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04928

研究課題名(和文) 液晶の電気光学効果を利用した顕微鏡観察・計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of Microscope Based Observation and Measurement System by Using Electrooptical Effects of Liquid Crystals

研究代表者

能勢 敏明 (Nose, Toshiaki)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：00180745

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：液晶の位相変調効果と偏光回転効果を利用した二つの顕微鏡観察・計測システムの開発を行った。第一は「複屈折画像観察・測定システム」であり、液晶セルを顕微鏡に組込んで位相シフト法を導入する事により高精度な複屈折画像観察を実現すると共に、45°の偏光回転を生じる液晶セルを更に組合せて全方位の複屈折画像測定を実現した。第二は「微分干渉観察・計測システム」であり、90°TN液晶の横ずれ効果と偏光回転効果を組み合わせて、横ずれ量や背景の明るさが電子的に調整可能となる微分干渉顕微鏡を開発した。さらに、TN液晶のねじれ方向切替によって全方位の微分干渉画像を電子的に取得できる可能性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的な意義としては、これまで注目されていなかったツイストネマチック液晶セルの複屈折現象(二重像の形成)の理解と分子配向計算に基づく定量的な解析手法を確立した点が挙げられる。また、位相差を生じない45°の偏光回転素子が実現できる事も実験的に示された。これらの基礎検討に基づき、実際に市販の顕微鏡に液晶セルを組み込む事により、電子的に調整可能な機能を持つ複屈折観察および微分干渉観察システムを実現した。これらの成果は、優れた電気光学材料としての液晶の可能性について、新たな応用分野の開拓に寄与する社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Two types of novel microscopic observation systems were developed by using precise phase shifting and polarization rotation effects of liquid crystal (LC) cells. First one is "Birefringence imaging and measurement system based on phase shifting technique", which is utilizing a potential of LCs as precise control phase shifters. Furthermore, the system was extended to the versatile birefringence imaging system by introducing 45° twisted nematic (TN) LC cells. Second one is "Differential interference contrast imaging system by using TNLC cells", which utilizes lateral shear and polarization rotation effects of 90° TNLCs. Furthermore, a potential of extension to the total differential imaging system was demonstrated by switching the twist direction of the TN cells.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 複屈折イメージング 微分干渉イメージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液晶は低電圧・低電力で極めて大きな屈折率変化を生じる優れた電気光学材料であることから、フラットパネルディスプレイ応用において大きな実績がある事は周知の事実である。しかし、小型・軽量・低電圧・低電力で動作する広義の光波制御デバイスへの応用という観点から眺めると、ディスプレイ以外にも多くの可能性が残されている。本研究は、光計測システムに液晶の位相変調効果や偏光回転効果を導入する事によって、機械的な動作を必要とせずに性能改善や機能拡張を実現する可能性について検討を行ったものである。特に、液晶の小型軽量性を生かして通常の偏光顕微鏡の光学系に組み込む事により、これまでに無い2次元の画像観察・計測を行うシステムの開発を目指す取り組みを行う事とした。

2. 研究の目的

申請者らのこれまでの研究実績および申請時の背景に基づき、具体的に二つのシステムについて検討を行う事とした。第一は、「位相シフト干渉による複屈折画像観察・測定システム」の高機能化を目指した。液晶セルは小型化が容易であり駆動も通常のPCのインターフェースを直接用いる事が可能である為、精密な位相変調器を市販の顕微鏡に組み込んだ計測システムを容易に構築する事ができる。このような手法によって小型で簡便な2次元複屈折画像計測システムを実現していたが、定量的な複屈折測定を行えるのは測定試料の光学軸方向が分かっている場合に限られるため、生体試料等の複雑なサンプルにおける測定画像の理解にはあらかじめ複屈折を発現する原理や構造等の情報・知識が不可欠となってしまう。そこで、サンプルあるいは光学系全体を45°回転させた測定結果を併用する事によって、光軸の分布が未知でも複屈折分布を抽出できる方法の検討を行いその有用性を実証した。さらに本研究の最も新規な点は、機械的な45°回転動作を液晶ディスプレイの表示モードとして最も基礎的なTN液晶を使って実現し、電子的に動作する全方位複屈折計測システムを開発する事にある。

第二に、「液晶セルを用いた微分干渉観察・計測システム」の実現と高機能化を目指した。顕微鏡に微分干渉(DIC)プリズムを組み込んで微分干渉計を構成する観察システムは、微分干渉(DIC)顕微鏡として広く使われている。例えば、細胞等の生体試料は透明で薄く通常の顕微鏡では観察が難しい為、生物学分野等では強力な観察ツールとして欠かせないものとなっている。DIC顕微鏡でキーとなるDICプリズムは固体結晶の複屈折効果を利用したものであるが、同じ現象が適当な電圧印加によって液晶セル内でも起こり得る。液晶セルの場合には複屈折量が電圧で可変となり、さらに複屈折現象が生じる方向も切り替える事ができる可能性がある。そこで、固体結晶では実現できない電子的な可変特性の導入によりDIC観察システムの高機能化を目指した。

3. 研究の方法

「位相シフト干渉による複屈折画像観察・測定システム」については、機械的な45°回転機能を電子的な方法に置き換える点が液晶研究ならではのアプローチである。機械的回転の本質は測定試料に入射する偏光の回転にあるため、液晶ディスプレイの表示モードとして長い歴史のあるTN液晶の動作を利用する事が可能である。ここでは、常光・異常光の両者に対して位相差を発生させずに45°回転させる必要があるため、モーガン条件と呼ばれるTN液晶の設計指針を適用して作製した一組の±45°TN液晶をシステムに導入して動作の確認を行った。通常のTN液晶セルは偏光を90°回転させる為、特殊なTN液晶セルを用意する必要がある。

「液晶を用いた微分干渉観察・計測システム」については、全く新しい取り組みとなるため基礎的な事項も含めた検討が必要となる。そこで、液晶分子配向状態の解析に基づき液晶材料の複屈折に起因する横ずれ効果の解析モデルの構築を行うと共に、実際に横ずれが観測可能となる厚い液晶セルを作製して解析モデルの妥当性の検証を行った。次に、この解析モデルを用いて実際に微分干渉観察に必要な液晶セルを設計し、液晶セルを基本素子として用いたDIC観察システムを構築し、その基本動作の確認を行った。さらに、液晶ならではの機能として横ずれ効果を電子的に調整する効果や横ずれ方向を90°切替える機能の発現等について検討を行った。

4. 研究成果

(1)「位相シフト干渉による複屈折画像観察・測定システム」については、従来の複屈折測定システムに一組の±45°TN液晶セルを導入し、基本動作の検証を行った。新に導入した±45°TN液晶セルに十分大きな電圧を印加するとTN効果が消失し、従来と同じ測定データが取得される。次に電圧をOFFにして測定を行うと±45°の偏光回転が生じ、サンプルを通過する偏光が45°回転した測定となるため、測定試料を機械的に45°回転して測定した場合と同等なデータが得られる。しかし、測定試料が実際に回転している訳ではないため画像データ取得後の相乗平均等のデータ処理は極めて簡単になる。ジャガイモのでんぷん粒子を測定試料として用い、機械的なサンプル回転の代わりに偏光板と位相変調器を45°回転させて観測した結果との比較を行った結果、ほぼ同じ結果が得られる事を確認した。一方、今後さらに測定精度を向上さ

せようとした場合、電圧 ON 時の TN 液晶セルにおけるわずかな残留複屈折が問題になって来る事も明らかになっている。

(2)「液晶を用いた微分干渉観察・計測システム」は全く新しい取り組みであり、多くの成果が得られたのでこちらを中心に成果の報告をまとめる事とした。はじめに、申請者が開発した TN 液晶セルを用いた微分干渉観察システムの動作原理を図 1 に示す。光学系は、観察試料を一对の同じ TN 液晶セルで挟んで通常の偏光顕微鏡に設置した単純な構成となっている。第一の TN 液晶セルで異常光が横方向に分離し、わずかに横にずれた部分の観察試料の位相情報を取得した後第二の TN 液晶セルで合成されて横ずれ干渉、すなわち微分干渉コントラストを発生させる。通常の DIC 顕微鏡では、液晶セルの代わりに固体の複屈折結晶で作られた DIC プリズムがレンズとの適当な位置関係に設置されている。DIC プリズムは、同一形状のくさび形結晶を光学軸が直交するように正確に組合せて平板構造に作製されており、精密で高価な素子であると共に横ずれ量は決まった値になっている。図 2(a)に示すように、TN 液晶は液晶分子配向状態にねじれ構造が伴う点が大きな特徴である。この場合は図 2(b)に示すように、液晶層内部でねじれ構造に沿った横ずれ効果が蓄積され、最終的には 45° 方向への横ずれ効果が生じる。このとき直進する常光と横ずれを受ける異常光の間には、横ずれ効果と同時に大きな位相差が生じており、これを補償するために第 2 の同じ構造の TN 液晶セルが効果的に働いている。すなわち、第一の TN 液晶セルでは横ずれや位相差と同時に偏光の回転が生じており、第二の TN 液晶セルにとっての常光と異常光が入れ替わる為、横ずれした光線が合成されると共に第一の TN 液晶で生じた位相差も自動的に補償される。

実際に本システムを用いて観察を行った例を

図 3 に示す。観察試料は ITO 透明電極ガラス基板を 10 μ m 幅でエッチングしたものである。透明基板上の透明電極は、通常観察と同じ動作となる電圧 0V(図 3(a))でははっきり見えないが、図 3(b)のように適当な電圧印加によって DIC 観察特有の明暗がストライプのエッジに現れる。しかし一方で、同じ電圧印加下の観察でも横ずれ方向がストライプパターンに平行となる図 3(c)では、0V と変わらない画像しか得られていない。微分干渉観察の微分コントラストは、横ずれ方向(図中の赤い矢印)の微分係数に比例して現れるため、図 3(b)のように凹凸に垂直な方向の微分係数を観察する配置の場合に良好なコントラストが得られる事が確認できる。もし試料を 90° 回転して垂直方向の微分係数も取得すれば任意の測定試料の微分干渉観察が可能となるが、これを電子的に行おうとする点が本研究の大きなモチベーションとなっている。

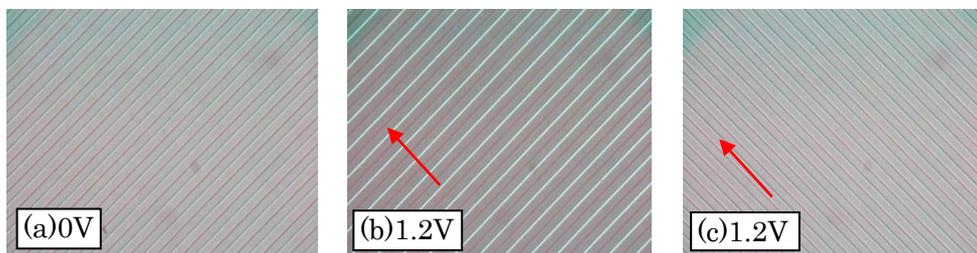


図 3 ITO ガラスのストライプパターンの観察例 (赤い矢印は横ずれ方向)

実際の応用が期待される生体細胞の観察例を図 4 に示す。試料は透明な樹脂に包埋された皮膚ガンの細胞である。本システムは測定試料の前後に TN 液晶セルを設置するだけの簡単な構成となっているが、この場案は観察試料と対物レンズの間に液晶セルが 1 枚挿入される事になり、観察画像の劣化要因となり得る。ここでは 60 倍の対物レンズを用いているが、この倍率ではまだ良好な DIC 画像が得られており、通常顕微鏡観察では難しい細胞核内部の細かい構造も微分干渉効果によって可視化されている。液晶セルの印加電圧を変えると背景の明るさが少し変化する様子も分かる。電圧調整による観察画像の変化についての定量的な評価はまだ行っていない

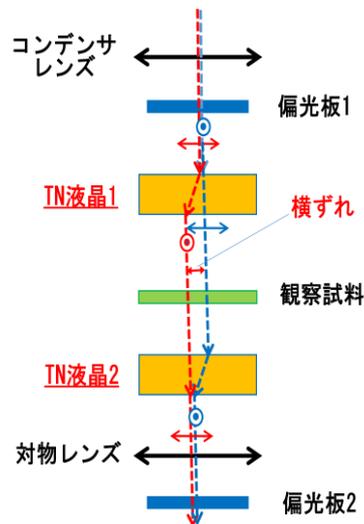


図 1 TN 液晶セルを用いた微分干渉観察・計測システムの光学系

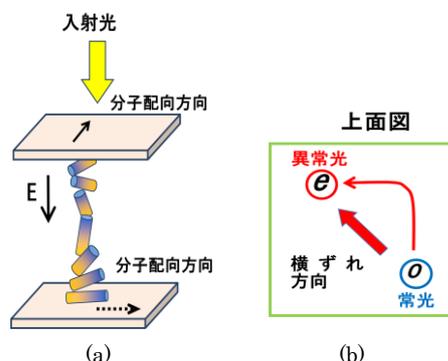


図 2 TN 液晶セルの分子配向状態とその横ずれ効果

いが、本システムの最大の特徴は液晶の駆動電圧によって横ずれ量の調整のみならず背景の明るさも調整できる可能性がある点にある。背景の明るさが変化しているのは、二つの液晶セル間に少し位相差が生じてい

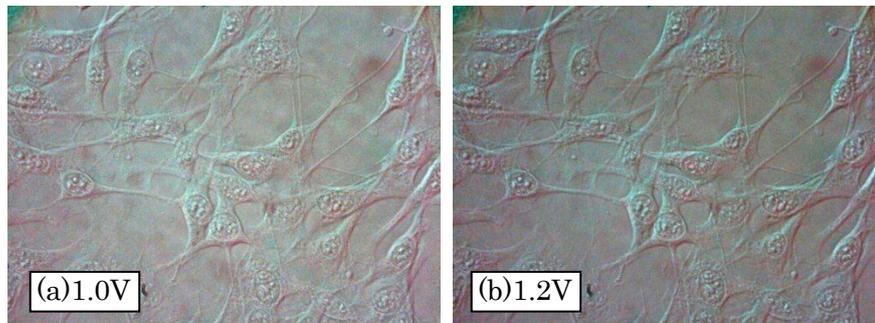


図4 生体細胞（皮膚ガン細胞）の観察例（×60）

る事を示しており、液晶セル間のわずかな特性のばらつきが影響しているものと思われる。横ずれ距離も観察試料によって適切な量があるため、通常のDICシステムでは複数個のプリズムを取換えて観察する場合もあるのに対して、液晶セルを用いるシステムでは電子的に最適な観察条件に調整して使用する事も可能になるとと思われる。

(3)横ずれ効果の定量的な議論を進める為に、液晶分子配向状態の解析に基づき簡単な解析モデルで液晶セルの横ずれ距離を計算する手法について検討を行った。また、横ずれ現象が実測可能な程度に大きくなる厚いTN液晶セルを作製し、駆動電圧に対する横ずれ距離の測定を行った様子を図5に示す。観察試料としてガラスビーズを用い、そのレンズ効果によって中心に小さな輝点が見える為その複屈折像から横ずれ距離を測定した。電圧0Vでは輝点は一つしか確認できないが、1V（図5(b)）程度の印加電圧で斜め方向への横ずれ効果によって二つの輝点が観察される。横ずれ距離は2V程度で最大となるが、印加電圧が高く偏光の回転効果が消失する3V（図5(c)）付近では4つの輝点が現れる。更に高い電圧を印加すると再び輝点は二つになるが（図5(d)）、1Vとは90°異なる方向に横ずれ効果が現れる事も確認された。2~3V程度以上では偏光回転効果が消失すると共に透過光の偏光状態も複雑になるため、この付近の横ずれ現象の理解にはより詳細な検討が必要と思われる。本研究では、TN液晶内において直線偏光状態が維持されながら横ずれ効果を生じる簡単な解析モデルを用いるため、実測との関係では2V程度までの低電圧側での動作解析に有効と思われる。

図5における横ずれ距離の実測データと分子配向計算に基づく解析結果の比較を行った結果を図6に示す。青い四角プロットは、低電圧側に現れる横ずれ効果の距離を示している。赤い丸プロットは高電圧側に現れる90°異なる横ずれ効果であるが、中間部分で二重のプロットがある部分は、両者が同時に観察され、輝点が4つ現れている電圧領域に対応している。本研究で提案している簡単な解析モデルによって計算した横ずれ距離を黄色の線で示している。液晶セルの印加電圧に対する変化の様子は、想定していた低電圧領域だけでなく、印加電圧レベルの中間および高電圧の範囲でも実測で得られた結果にある程度追従する結果が得られている。

(4)TN液晶における横ずれ効果のもう一つの特徴は、液晶セル内部の分子配向状態におけるねじれ構造に沿って生じる点が挙げられる。すなわち、ねじれ方向が異なるTN液晶セルでは同じ45°斜め方向でも±45°となる為、90°異なる方向に横ずれが発生する事になる。従って、もし電子的にねじれ方向を切替える事が可能になれば、電子的な動作で全方向の微分干渉画像

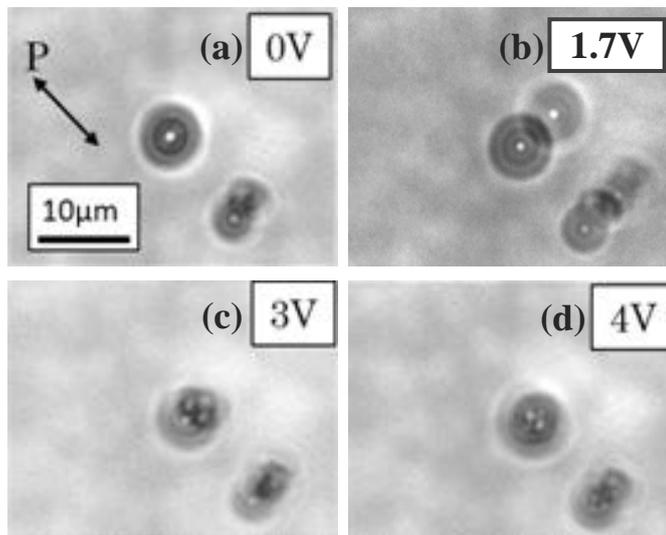


図5 厚いTN液晶セル（40μm）を用いて観察したビーズ像における横ずれ現象の観察例

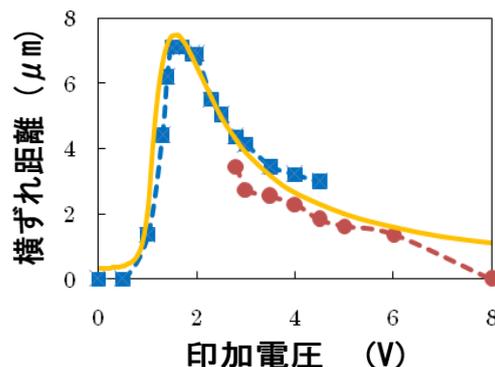


図6 印加電圧に対する横ずれ距離の実測値と計算値(黄色実線)の比較

を得る事が可能になり、機械的動作では困難な高速な観察・計測システムへの発展も期待される。

このような考えの基に、液晶セル基板表面のチルト方向が同じでねじれ方向のみが異なる配向状態について、横ずれの方向とその距離について解析を行った結果を図7に示す。二つの基板表面における分子配向処理を一定とした分子配向状態の解析によると、電圧印加時の分子のチルト方向2種類とねじれ方向2種類の組み合わせによって全部で4つの安定な配向状態を取り得る。しかし、横ずれ方向の切り替えを目的とする場合にはチルト方向は揃えておく必要がある。そこで、基板配向処理にわずかな非対称性を導入する事によってチルト方向を定める事が可能になる事が分かった。図7の結果は、わずかな非対称条件を導入して得られる二つの配向状態について計算している。一つは、上下の分子配向の境界条件に自然にマッチするノーマルなツイスト配向状態 (n-ツイスト) であり、もう一つはわずかにスプレイ歪みが入り込んで逆ねじれ状態となっている (s-ツイスト) である。図7(a)の横ずれ方向の計算結果を見ると、小さな電圧領域では二つのツイスト状態間で横ずれ方向に大きな差が生じているものの、実際にDIC観察で使用する1V付近以上では横ずれ方向がほぼ90°異なっている事が分る。図7(b)の横ずれ距離の計算結果を見ると、低電圧側で二つのねじれ状態において横ずれ距離に差が見られるが、実際のDIC観察での使用が想定される1~2V付近では横ずれ距離が大きくなると共に差が小さくなる傾向にあるため、両者間の差の影響は小さくなると思われる。

実際のTN液晶セルにおいて横ずれ方向の電子的な切替えを実現する為には、電界や磁界によるTN液晶セルのねじれ方向の切替を実現しなくてはならない。本研究では、液晶セル基板に平行となる磁場を液晶セル面内で90°切替えて印加する方法を検討した。図5の観察と同様に横ずれの直接観察を目指して厚いTN液晶セルを4極電磁石に設置して実験を行った。現状では5~10分程度の極めて長い時間を要する初期的な実験結果ではあるが、横磁場印加による切替が可能である事は実証されている。

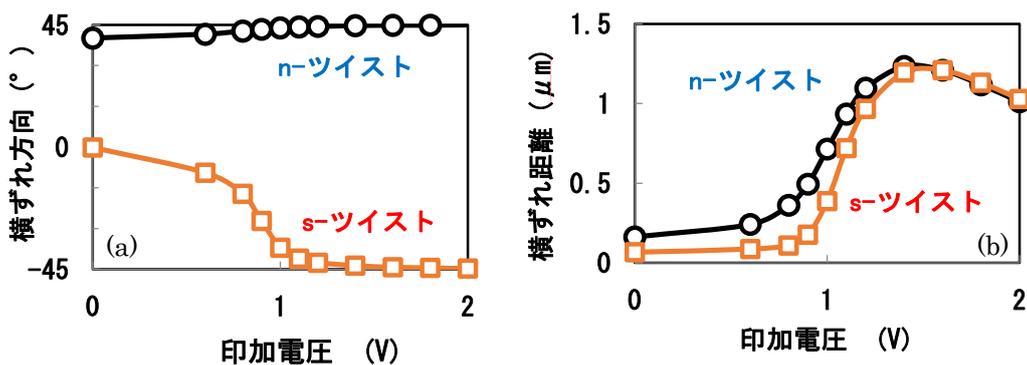


図7 チルト方向が一定でねじれ方向のみが異なる二つのねじれ配向状態における(a)横ずれ方向、(b)横ずれ距離の計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 能勢、猪野、真坂、伊藤、伊東、本間	4. 巻 6
2. 論文標題 導波管型液晶ミリ波制御デバイスの磁場駆動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 秋田県立大学ウェブジャーナルB	6. 最初と最後の頁 96-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nose Toshiaki, Ito Ryota, Honma Michinori	4. 巻 8
2. 論文標題 Potential of Liquid-Crystal Materials for Millimeter-Wave Application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app8122544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T.Nose, R.Ito, and M.Honma	4. 巻 31
2. 論文標題 Characterization of hydrogen-bonded liquid crystal materials in the millimeter-wave region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Microwave and Wireless Components Letters	6. 最初と最後の頁 453-456
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LMWC.2021.3062841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 T.Nose, S.Ishizaka, K.Okano, N. Fujita, J.Murata, H.Muraguchi, N.Ozaki, M.Honma, and R.ito
2. 発表標題 Application of double refraction properties in liquid crystal cells to differential interferometry
3. 学会等名 IMID2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 能勢、石坂、本間、伊東、岡野、藤田、村田、村口、尾崎
2. 発表標題 液晶における横ずれ効果と微分干渉観察応用の検討()
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 能勢、石坂、本間、伊東、岡野、藤田、村田、村口、尾崎
2. 発表標題 液晶セルにおける横ずれ特性と微分干渉観察応用の検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会、9a-PA2-1
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯山、伊東、本間、真坂、伊藤、能勢
2. 発表標題 平板回路を用いた液晶ミリ波位相変調器における磁界印加の効果
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会、9a-PA2-4
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Nose, T.Ito, R.Ito, and M.Honma
2. 発表標題 Basic performance of rectangular waveguide type liquid crystal phase shifter driven by magnetic field
3. 学会等名 IRMMW2018, Mo-POS-46 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Nose, K. Okano, N.Fujita, J.Murata, H.Muraguchi, N.Ozaki, M.Honma, and R.Ito
2. 発表標題 Simple differential interference contrast imaging system by using twisted nematic liquid crystal cells
3. 学会等名 IDW 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.Nose, R.Ito, and M.Honma
2. 発表標題 Distinct optical properties of hydrogen-bonded liquid crystal materials in millimeter-wave region
3. 学会等名 Photnics West 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関