

平成30年6月19日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06025

研究課題名(和文) 準光学的手法による多孔質ポリマー材料を骨格としたミリ波制御液晶デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of Liquid Crystal Millimeter-Wave Control Devices Based on Porous Polymer Materials by Using Quasi-Optic Approach

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：液晶材料のミリ波用準光学デバイス応用として液晶ミリ波フレネルレンズを目指した。大きな課題である液晶の超厚膜化を実現するために、PMMAモノリスとして知られる多孔質材料を用いてPDLC形の超厚膜液晶層を形成する方法を開発した。バルク状の大型モノリスに機械加工によってフレネルレンズ構造を作製し、磁界印加によるミリ波の収束特性の変化を確認した。さらに、フレネル構造の基板をベースとして、溝部分にスプレー法によって薄膜を積み重ねて超厚膜化を実現する手法の検討を行った。3Dプリンタによるフレネル基板が良好なミリ波レンズ特性を示す事を実証すると共に、スプレー法による薄膜の積層条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research work is aiming to attain liquid crystal (LC) Fresnel lens, which is the typical quasi-optic device for the millimeter-wave (MMW) application of LC materials. First agenda is developing a novel fabrication method of extremely thick LC layer, and then we focus on excellent porous material so called "monolith" to attain PDLC type extremely thick LC layer. LC Fresnel lens is fabricated by using milling machine starting from the bulky PMMA monolith, and its focusing change by magnetic field is demonstrated. Furthermore, a bottom up type fabrication method, which can be attained by laminating the spray films, is investigated based on the Fresnel lens substrate fabricated by 3D printer. It is demonstrated that the base Fresnel substrate shows excellent MMW focusing properties, and the spray deposition condition for successive lamination is optimized.

研究分野：電子デバイス

キーワード：液晶 ミリ波 フレネルレンズ 可変レンズ

1. 研究開始当初の背景

携帯電話の通信方式が3Gから4Gへと移行し携帯端末もスマートフォンが主流となる時期にあたり、端末使用数の増加と共に高機能化によって動画などの利用もごく普通となり、それらの結果として通信技術の進歩の速度を超えて情報通信量の益々の増加を招き、使用可能な周波数帯の枯渇が懸念される状況が続いている。そのような中、まだ利用が進んでいないより高い周波数帯であるミリ波の利用によって通信量を各段に増加させる新しい技術に期待が高まっている。

ミリ波帯以上の高い周波数帯では、電波の直進性が強く現れる事から、小型アンテナで所望の通信相手のみに必要最低限の電力で通信を行うエネルギー効率の高い使い方が可能になる。一方で、このような利点を十分に活用する為には、ミリ波の伝搬を自由に操る何らかの制御デバイスが不可欠になる。

ところで、液晶材料は低電圧・低電力で屈折率を大きく変化できるため、小型軽量の光制御デバイス応用の一つの実証形態である平板型ディスプレイ応用が華々しい成果を上げている。しかし、このような液晶材料の優れた制御性は広い電磁波スペクトルにおける光波領域だけのものでは無く、電波に分類されるマイクロ波やミリ波帯でも同様に期待できる事が分って来た。そこで本研究では、液晶を用いたミリ波制御デバイスの実現を念頭に、最も大きな課題となっている超厚膜液晶層を実現する手法について検討を行い、これにより実現可能となる準光学デバイスへの応用を目指した。

2. 研究の目的

電波と光の間の周波数領域に位置するミリ波帯では、デバイス応用を検討する場合には両者のアプローチが両立し得る周波数帯である。第一に、長い歴史を持つマイクロ波技術を高周波化する手法があり、特にハイブリッドICのような小型化した高周波回路の一部に液晶材料を一つの電子部品として組み込む手法が考えられる。第二に、光波デバイスからのアプローチとして、光デバイスとして実現されている様々な液晶デバイスを波長に応じてスケールアップしてミリ波制御デバイスとして利用する方法がある。後者の手法によって得られるデバイスは、準光学的デバイスと呼ばれており、構造や設計方法は簡単であるが光デバイスに比べて桁違いの大型化が必要となる。

本研究では、様々な光デバイス応用で実績がある液晶材料に注目し、準光学的手法によってミリ波制御デバイスを実現する手法について検討を行った。しかし大型化に際して、液晶デバイスに不可欠なセル構造を単純にスケールアップした場合、応答速度の低下を招く事は十分に予想され、ミリ波応用における桁違いのスケールアップではデバイス応用に耐えない致命的な応答特性の劣化を招

いてしまう。そこで本研究では、マイクロなセル構造が多数積み重なって形成されているPDLC形の液晶セル構造に注目した。この場合、セル壁面と液晶分子の相互作用が維持されるため、極端な応答速度の低下をもたらす事は無く、マイクロなセルの数を適当に増やす事で任意の厚さや形状に加工する事も可能になる。

3. 研究の方法

PDLCは偏光板を必要としない散乱型表示素子としての応用が注目されている液晶動作モードの一つである。通常は、紫外線硬化樹脂と液晶材料の混合物からスタートして、光重合による相分離過程を経てマイクロな液晶セルが液晶層全体に分散する構造を実現している。しかし、このようなマイクロな相分離構造の形成には、液晶材料とセル基板表面との相互作用が大きな役割を担っている事は経験的にも知られており、実際ミリ波応用に最低限必要なmm程度の厚みに拡大すると、従来方法では全くPDLC構造が作製できない。

そこで本研究では、エタノールと水の混合溶媒を60°C程度に温めてアクリルポリマーを溶解し、室温まで冷却して相分離させ、その後溶媒を乾燥させる簡単なプロセスによって多孔質材料が得られるアクリルモノリスに注目した。あらかじめ所望の大きさや形状の多孔質材料を調製し、その後液晶材料をしみ込ませる事によりPDLC液晶を実現しようとするものである。この場合、モノリスの語源の通り孔構造は表面から全体に繋がっている必要があり、PDLCの用語が示す独立して液晶が分散する構造とは異なるが、マイクロに分布して存在する壁面の効果は同様に期待できる。しかし、例えばフレネルレンズのような具体的な素子を作製しようとする場合、乾燥プロセスにおける極めて大きな収縮現象によって、初めに溶液を入れるフレネルレンズ構造の容器の形状から大きく歪み、正確な構造を作製する事が難しい問題がある。

そこで本研究では、初めにバルク状の大型モノリスを調製し、その後機械加工によって精密なフレネルレンズ構造を作製する手法を検討した。また、薄膜を多数積層して徐々に大型構造を形成する事によって収縮の問題を解決する手法も考えられるため、スプレー法によって薄膜を積層する方法についての検討も行った。

4. 研究成果

(1) 機械加工による液晶デバイス

PMMAポリマーは、純粋な水およびエタノールには溶けないが、それらを1:4で混合した混合溶媒を60°C程度に加熱して攪拌すると良好に溶かす事ができる。この溶液を室温まで冷却するとPMMAの相分離過程を経てマイクロな多孔質構造が形成される。この状態では、まだ柔らかいゲル状の物質だが、溶媒の蒸発と共に徐々に収縮し次第に硬くなる。図1に

完全に溶媒が蒸発した後の PMMA モノリス表面の SEM 観察像を示す。PMMA ポリマーが細かいネットワークを形成し、多数のすき間を持つ良好な多孔質構造が形成されている事が分る。空孔率は 80% を超え、液晶材料が表面から容易に内部まで浸透する事も確認している。溶液を収める大型の容器としてビーカーを用い、直径 50mm 程度の円盤状モノリスを調整した結果を図 2 に示す。容器の底に接した面は平らであるが、空気に接する上面は溶媒蒸発速度の違いから大きく歪むものと思われる。最終的に得られるモノリスの厚さは、最初に仕込む溶液量にほぼ比例するため、試料の厚さは容易に調整できる事を確認している。図 3 は、各厚さの試料において空孔率を測定した結果である。厚さに関係なく 80% 程度の良好な多孔質材料が得られている事が分る。

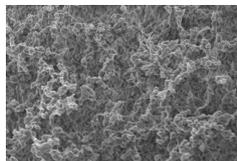


図 1 モノリス表面の SEM 観察

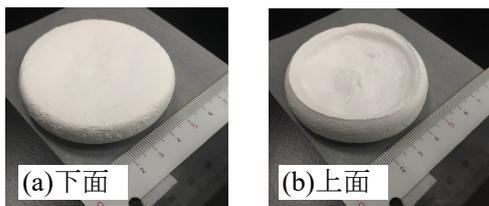


図 2 バルク状モノリスの外観

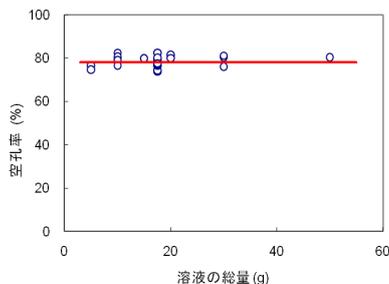


図 3 溶液仕込み量に対する空孔率の変化

図 2 に示した円盤状のモノリスを小型のミリングマシンを使ってフレネルレンズ構造に整形した結果を図 4 (a) に示す。モノリスは 80% 以上の空孔率を示しており非常に軽い、ミリング加工に耐えるある程度の硬さも有している。肉眼上は、表面が非常に滑らかで凹凸形状がきれいに形成されている様子が分かる。図 4 (b) は、ミリング加工を行った表面の SEM 観察を行った結果である。回転するミリングカッターの横の面で加工されたモノリス表面には加工傷と思われる細長い溝も見えるが、大きな損傷は生じていない事が分る。図 5 は、レンズ表面から液晶材料を滴下して液晶を全体に染み込ませた後

の様子を示す。滴下した液晶は直ちに内部へ吸収され、最終的には表面がぬれたような状態に見えるため、バルク全体に液晶が入りこんだ事は容易に判断できる。

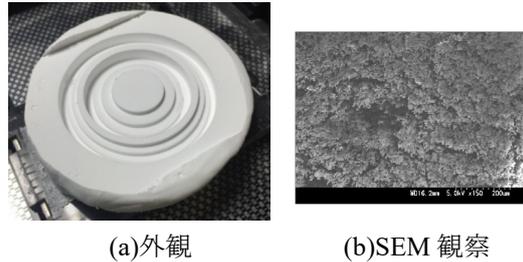


図 4 機械加工後のモノリスの観察



図 5 液晶封入後の様子

作製した凸レンズ状の液晶フレネルレンズの溝部分と一致する凹レンズをプラスチック材料を用いて作製し、それらを組合せた複合レンズを作製した。液晶の駆動によるミリ波収束特性の変化を確認するために、あえてレンズパワーを小さくして実証実験を行った。図 6 は、電磁石を用いて複合レンズに磁界を印加した時の、レンズ焦点におけるミリ波の強度変化を測定した結果を示す。複合レンズの作製精度が十分で無い為、液晶レンズのみに比べてレンズ特性が劣化しているが、磁界による液晶の駆動に応じてミリ波収束特性が変化している様子が確認された。

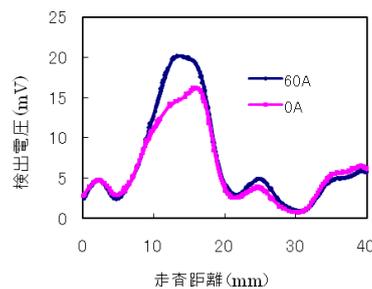


図 6 磁界印加前後のミリ波収束特性の変化

(2) 3Dプリンタの利用

モノリスの作製時に発生する大きな収縮現象の問題を解決するもう一つのアプローチとして、薄膜を積み上げる方法を検討した。すなわち、目指すデバイス構造に対応したモールドを準備して、スプレー法によって薄膜を繰り返し積層する方法の開発を目指した。モールドの作製は、近年進歩の目覚ましい 3Dプリンタを利用した。図 7 に、作製されたフレネルレンズ基板の様子を示す。フレネル

構造を作製する際に一周期分の分割数を増やすとレンズ特性が向上する事は理論的にも分っている。分割ステップ数を増やすと各ステップの幅が小さくなり加工も難しくなるが、機械加工では難しかった8ステップ構造も3Dプリンタでは容易に作製が可能である。図7(a)を見ると、肉眼レベルでは、CADデータに対応した良好な構造が形成されている事がわかる。また、図7(b)、(c)の表面を拡大して観察した結果を見ると、積層厚さの条件0.4mmおよび0.2mmに対応した凹凸が見えるが、ミリ波の波長を考慮すると影響はほとんど無いものと思われる。

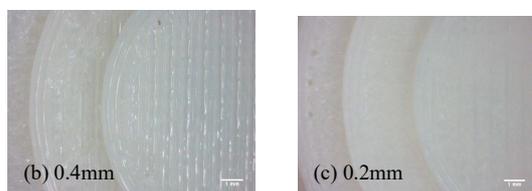
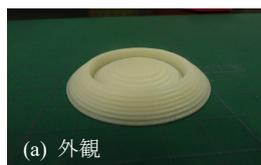


図7 3Dプリンタを用いて作製したミリ波用フレネルレンズの一例

図8は、8ステップルールで作製した焦点距離の異なる凸レンズを用いてミリ波の収束特性を測定した結果を示す。ここでは、ホーンアンテナから放射されたミリ波をレンズに入射し、導波管プローブを取付けたダイオード検出器をレンズ焦点面で走査し、ミリ波の強度分布を測定した。レンズを設置しない場合の背景のミリ波強度分布と比較すると、3Dプリンタで作製したフレネルレンズによって良好なミリ波収束特性が得られている事が分かる。わずかに2周期程度のフレネル構造であるが、収束スポットの幅はいずれも回折限界に近い良好な値が得られている。

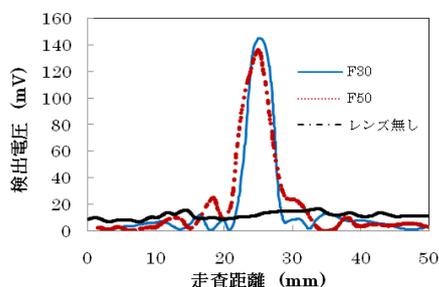


図8 ミリ波収束特性

次に、液晶材料との複合化レンズの実現に向けて、図8とは逆の凹レンズ構造の容器を作製した。容器となる溝の部分に液晶材料を注入して複合レンズを作製し、磁界印加による分子配向状態の変化によって得られる可変特性を調べた。はじめに、凹レンズ形状の

フレネルレンズに液晶材料を導入する前後で、ミリ波の強度分布を測定した結果を図9に示す。凹レンズ単体ではミリ波の発散効果が表れていると思われるが、強度分布を直接測る方法ではその効果ははっきり観測できない。一方、液晶材料を導入した後の複合レンズでは、設計通りの焦点位置で大きな凸レンズ効果が確認された。

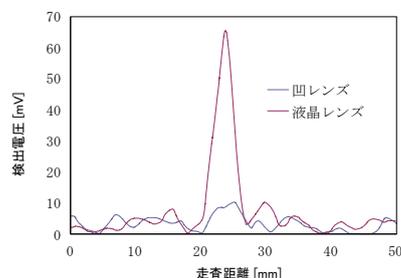


図9 液晶注入前後のレンズ特性の変化

次に、電磁石を用いて横方向に磁界を印加して、ミリ波の収束特性の変化を測定した。非常に大きな容器に導入されている液晶は、その分子配向状態は巨視的にはランダムとなり、 n_e と n_o の平均的な屈折率になっているものと考えられる。磁界を横方向に印加した場合、液晶分子は磁界方向に配向するためミリ波の電界方向と磁界が平行な場合は n_e 、垂直な場合は n_o の値に変化すると考えられる。ミリ波電界と印加磁界が平行及び垂直となる配置とした場合の、ミリ波収束特性の測定結果をそれぞれ図10および図11に示す。図中の点線は、磁界を印加しない場合の収束特性を表わしている。

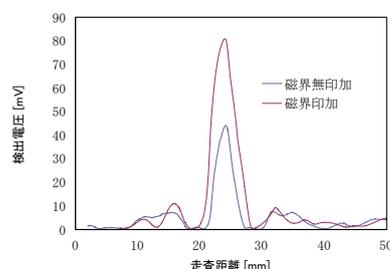


図10 ミリ波電界と磁界が平行な場合の磁界印加による収束特性の変化

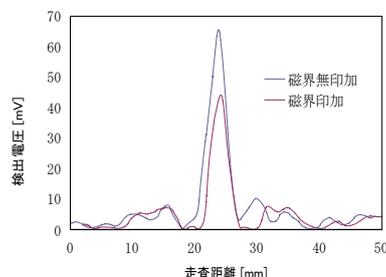


図11 ミリ波電界と磁界が垂直な場合の磁界印加による収束特性の変化

図10を見ると、磁界の印加によってミリ波の強度が明らかに大きくなっている。これは、液晶分子の配列によりミリ波は液晶の n_e の値を感じる事から、初めの平均的な屈折率

の値より大きくなり基板との屈折率差が大きくなった為、回折効率が高くなったものと考えられる。

これに対して、図 11 ではミリ波は n_0 の値を感じるため、屈折率が小さくなる事になる。従って、図 10 とは逆に回折効率は低下しピーク値が小さくなる様子が確認された。磁界の方向によるこのような相補的な強度変化は、磁界を印加しない場合の平均的屈折率の値から、磁界によって屈折率が上下する変化を反映した応答と考えられ、磁界による液晶分子の配向変化によるミリ波レンズ特性の変化が得られている事が検証された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

①T. Nose, Y. Watanabe, A. Kon, R. Ito, and M. Honma, “Quasi-optic millimeter-wave device application of liquid crystal material by using porous PMMA matrix”, Proceedings of SPIE, 査読なし, 105550T1-8 (2018).

②能勢敏明、鏝太郎、真坂護、伊藤謙二、伊東良太、本間道則、“3D プリントによるミリ波用液晶フレネルレンズの検討”、秋田県立大学ウェブジャーナルB、査読なし、第 4 巻、113-118 (2017)。

③T. Nose, S. Ohno, M. Masaka, K. Ito, R. Ito, and M. Honma, “Basic performance of a liquid crystal millimeter-wave Fresnel lens fabricated using machinable porous polymethacrylate materials”, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 査読あり, 647, 1-10 (2017)。

④能勢敏明、永澤雅、真坂護、伊藤謙二、伊東良太、本間道則、“液晶ミリ波位相変調器を組み合わせたツインアンテナアレイシステムの基礎特性”、秋田県立大学ウェブジャーナルB、査読なし、第 3 巻、169-173 (2016)。

⑤能勢敏明、永澤雅、渡辺猛、伊藤謙二、伊東良太、本間道則、“n 形液晶を用いたミリ波位相変調器の検討”、秋田県立大学ウェブジャーナルB、査読なし、第 2 巻、159-163 (2015)。

[学会発表] (計 11 件)

①T. Nose, Y. Watanabe, A. Kon, R. Ito, and M. Honma, “Quasi-optic millimeter-wave device application of liquid crystal material by using porous PMMA matrix”, Photonics West 2018, Conference 10555, 10555-27 (2018, San Francisco)。

②渡邊義晃、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“スプレー法を用いた多孔質 PMMA 膜の検討 (II)”、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、18a-A204-3 (2018、早稲田大)。

③Y. Watanabe, A. Kon, R. Ito, M. Honma, and T. Nose, “Study on PDLC like LC cell by using porous PMMA spray film for millimeter-wave application”, IDW' 17, LCTp2-9L (2017, Sendai)。

④渡邊義晃、金暁、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“スプレー法を用いた多孔質 PMMA 膜の検討”、2017 年度日本液晶学会討論会、PB38 (2017, 弘前)。

⑤佐藤稜輔、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“静電容量測定による THz 液晶デバイスの評価”、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、17a-P4-36 (2017、パシフィコ横浜)。

⑥佐藤稜輔、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“THz 反射型液晶デバイスの作製とその動作特性の評価”、2016 年度日本液晶学会討論会、PA38 (2016、大阪工業大)。

⑦T. Nose, S. Ohno, M. Masaka, K. Ito, and M. Honma, “Fundamental properties of millimeter-wave LC Fresnel lenses fabricated by using machinable porous PMMA materials”, 26th International Liquid Crystal Conference, 609 (2016, Kent USA)。

⑧大野真之介、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“多孔質 PMMA を用いたミリ波用フレネルゾーンプレートの検討”、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、19a-P3-28 (2016、東工大)。

⑨永澤雅、笹森崇行、磯田陽次、真坂護、伊藤謙二、伊東良太、本間道則、能勢敏明、“液晶位相変調器を用いたミリ波アンテナアレイシステムの検討”、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、19a-P3-27 (2016、東工大)。

⑩T. Nose, H. Suzuki, S. Shibata, N. Tushima, M. Masaka, K. Ito, and M. Honma, “Liquid crystals for MMW (sub-THz) application”, 2015T-TW, Invited-(15) (2015, Taiwan)。

⑪伊東良太、高山和久、本間道則、斗内政吉、荻戸立夫、能勢敏明、“液晶デバイスを用いたテラヘルツ波偏光計測法の検討”、2015 年日本液晶学会討論会、3C-11 (2015, 東工大)。

[その他]

秋田県立大学ウェブジャーナル

[https://akitapu.](https://akitapu.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_snippet&index_id=1&pn=1&count=20&order=17&lang=japanese&page_id=13&block_id=21)

[repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_snippet&index_id=1&pn=1&count=20&order=17&lan](https://akitapu.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_snippet&index_id=1&pn=1&count=20&order=17&lang=japanese&page_id=13&block_id=21)

[g=japanese&page_id=13&block_id=21](https://akitapu.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_snippet&index_id=1&pn=1&count=20&order=17&lang=japanese&page_id=13&block_id=21)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 連携研究者

荻戸 立夫 (NOZOKIDO TATSUO)

富山大学・工学部・准教授

研究者番号：00261149