

3D プリンタによるミリ波用液晶フレネルレンズの検討

能勢敏明¹, 鏡太郎¹, 真坂護², 伊藤謙二², 伊東良太¹, 本間道則¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科² 由利工業株式会社

最近話題になっている ICT の基盤技術の中で、超高速通信が可能となる次世代の通信方式である 5G が現実味を帯びてきた。従来は限られた用途のみであったミリ波帯も、いよいよ我々の身近で使われようとしている。今後、様々な場面でミリ波の伝搬を制御する扱い易い制御デバイスが重要になると思われる。そのような考えから、筆者らはこれまで液晶材料を利用したミリ波制御デバイスの実現に向けた取り組みを行って来た。ミリ波帯における液晶デバイス実現方法として、一般に大きく二つの手法がある。第一は、平板型の高周波回路の一部にセル構造を導入し、駆動回路やアンテナ素子などと同様に液晶を集積化して一つの機能デバイスを実現するものである。第二に、光学素子として実現されている液晶デバイスをミリ波帯に合わせてスケールアップする準光学的手法と呼ばれる方法がある。本研究では後者に注目し、液晶による可変特性を有するフレネルレンズを実現する事を目的としている。この場合、前者による集積回路に比べると構造が単純で設計も容易であるが、光学素子に比べると桁違いに大型化する問題がある。これは、液晶材料を利用する立場からすると極めて困難な課題を生じ、従来の素子作製・駆動技術とは全く異なる新しい手法を検討する必要がある。ここでは、ミリ波用の液晶フレネルレンズの基本構造を作製する為に、最近進歩の目覚ましい 3D プリンタを利用する手法について検討を行った。将来的な目標としての PMMA 多孔質材料を用いた PDLC 型の液晶層との複合化を念頭に、その基礎的な検討を行った。

キーワード: 液晶, ミリ波, フレネルレンズ, 可変レンズ, 3D プリンタ

身近な範囲での電波の利用状況の上限を周波数軸で眺めてみると、1GHz 付近の携帯電話やスマートフォンに代表される携帯端末から様々な WiFi 機器等によって、5GHz 付近までの周波数帯が使われるようになってきている。しかし、機器の高性能化や端末数の増加によって情報通信量が年々増加しており、使用可能な周波数帯域の枯渇が懸念される状況にある。また、最近話題になっている ICT の活用に伴う端末数の更なる増加は、この状況を益々加速するものと考えられる。そこで、これまでほとんど使用されて来なかったより高い周波数帯である“ミリ波・THz 波”の利用が急務となっている。現在までのところ、衝突防止レーダーやセキュリティー用センシング機器等に一部実用化が始まっているが、その利用はまだ限定的である。ところが最近、ICT を駆使した技術の中でも自動運転、遠隔機器操作等の通信の

高速性を利用した新しい応用の期待も高まっており、ミリ波帯を使った次世代の通信システムである 5G の実用化に向けた実証実験も多数行われている。

ミリ波帯は、周波数が高い事により高速・広帯域の通信能力があること他に、機器を小型軽量化できること、直進性が高いため省エネ化した使い方が容易であり情報セキュリティーの点でも有利であること等の特徴を持っている。今後我々の身近な所でミリ波帯の利用が進めば、ミリ波の伝搬を操る扱い易い制御デバイスが益々重要になると考えられる。

ところで液晶材料は、ミリ波・THz 波領域でも大きな複屈折を持ち、この帯域でも電子的に可変なデバイスを実現するために大変魅力ある材料である事が明らかになってきた。そこで本研究では、ディスプレイの実績と同様に、液晶材料を用いて小型軽量で低駆動電圧を特徴とするミリ波帯における制御

デバイスの実現を目指している。

光と電波の間に位置するミリ波帯において液晶デバイスを実現しようとする場合、(1) 高周波回路の一部に液晶材料を導入して集積回路全体で一つの機能デバイスを実現する方法と、(2) 光領域で実現されている液晶デバイスをスケールアップしてミリ波帯で利用する“準光学的手法”の大きく二つの方法が考えられる。前者の立場として、液晶を用いてミリ波帯で動作する位相変調器を構成しアンテナレイと組み合わせたフェーズドアレイアンテナシステムの実現を目指した研究がある。高周波用の平板回路として良く使われているマイクロストリップラインの一部に液晶層を集積化する簡単な素子構造のミリ波位相変調器が開発されている。(Ito et al, 2012) (Nose et al, 2013), (能勢ら, 2015)

一方、後者の方法では素子構造は簡単になるが、ディスプレイ等の光デバイスに比べて桁違いに厚い液晶層を実現する為の新たな手法の開発が大きな課題となる。そこで一例として、多孔質 PMMA による PDLC 型の超厚膜液晶層を実現する試みが行われている。(大野ら, 2016) バルク状の多孔質材料を調製した後に機械加工によってミリ波用フレネルレンズを試作し、その動作が確認されている。(Nose et al, 2017) しかし、機械加工では加工時間の問題や構造の自由度に制限があった。そこで本稿では、最近進歩のめざましい 3D プリンタに注目し、ミリ波用に設計した基本フレネル構造を切削加工に代わって積み上げによって作製する手法について検討を行った結果について述べる。

フレネル構造の作製

設計および加工精度

図 1 に、作製したフレネルレンズの断面構造を示す。ここでは、1 周期を 4 分割する 4 ステップルールを適用した場合の構造を示している。ミリ波の周波数は 70GHz (波長:4.3mm)、焦点距離は 30mm および 50mm とした。周期は 2 周期程度で、直径が約 50mm となるフレネルレンズを作製した。ステップ数を増やすと各ステップの幅が小さくなるが、機械加工では難しかった 8 ステップの構造も 3D プリン

タでは容易に作製が可能である。

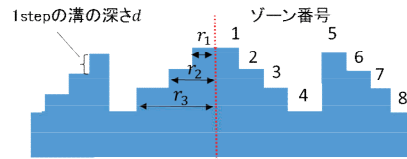


図 1 4 ステップルールで設計されたフレネルレンズの構造

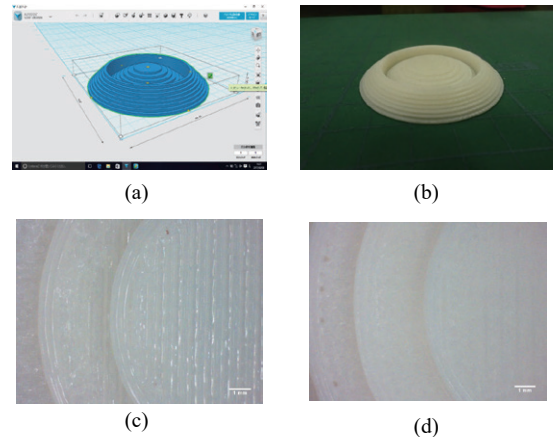


図 2 試作レンズの構造と外観, (a) フレネル構造の CAD データ, (b) 試作レンズの外観, (c) 積層厚 0.4mm の表面の様子, (d) 積層厚 0.2mm の表面の様子

図 2 は、試作したレンズの外観を観察した結果を示す。図 2 (a) と (b) を比較すると、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。同図 (c), (d) は、積層の厚さを 0.4mm, 0.2mm と変化させた場合の表面の様子を示している。積層厚が厚い場合に表面の凹凸が目立つが、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。

レンズ特性

図 3 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水平に放射したミリ波 (70GHz) を反射板で反射し、伝搬方向を 90° 上方に折り曲げた後に水平に配置したフレネルレンズに下方から入射させた。また、導波管プローブを取付けたダイオード検出器をレンズ上部の焦点面内で水平に走査し、ミリ波の収束特性の測定を行った。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、作製したフレネルレ

レンズによって良好なミリ波収束特性が得られていることが分かる。わずか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回折限界に近い良好な値が得られている。

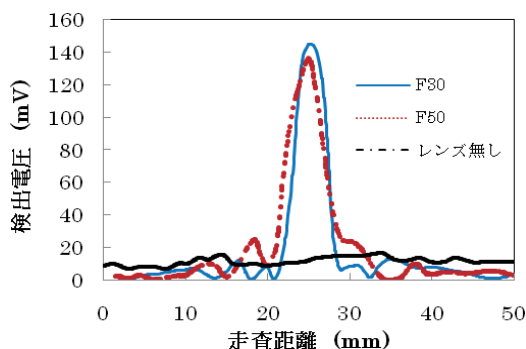


図3 焦点距離30mmおよび50mmのフレネルレンズにおけるミリ波収束特性

液晶複合化フレネルレンズの作製

次に、液晶材料との複合化レンズの実現に向けて、図1とは逆の凹レンズ構造の容器を作製した。図4に示すように、溝の部分に液晶材料を導入し、磁界による分子配向効果によって可変特性を得る事を目標にした。図3の測定で用いた反射板を利用したミリ波測定装置は、図4に示すような電磁石のポールピース間に液晶複合レンズを水平に設置する事を想定したものである。

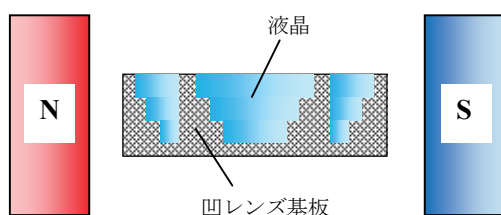


図4 液晶複合レンズの測定の様子

図5に、作製した凹レンズ形状のフレネルレンズおよび溝の部分に液晶材料を満たした様子を示す。通常は空気が満たされている部分に、3D フィラメントに使われているプラスチック材料よりやや大きな屈折率を持つ液晶材料を導入し、複合化した後に凸レンズとして動作するように設計している。このと

き、フレネル構造の基板材料との屈折率差が空気で満たされている場合より小さくなるため、必要となる溝が非常に深くなっている。

図6は、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5 3D プリンタで作製した凹レンズ形状の容器および溝部分に液晶材料を満たした後の様子

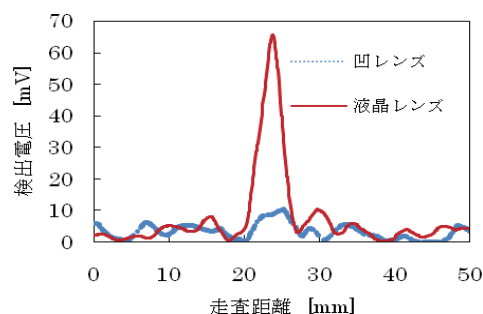


図6 液晶材料導入前後におけるミリ波強度分布

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水平な場合は n_e 、垂直な場合は n_o の値を取ると考えられる。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7および図8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。これらは、図6の動作と同じであるが、検出器としての矩形導波管プローブの

方向を 90° 回転させて測定を行っているため、図 7 と 8 でやや違った値になっているものと思われる。

図 7 を見ると、磁界の印加によって収束する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 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効果が現れていると考えられる。

これに対して、図 8 ではミリ波は n_o 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 7 の場合とは逆に回折効率は低下し収束特性における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ピーク強度の変化は、磁界を印加しない場合の平均的な屈折率の値から、磁界によって屈折率が上下する変化を反映している動作と考えられ、磁界による液晶分子の配向効果によるミリ波レンズ特性の変化が得られている事を示している。

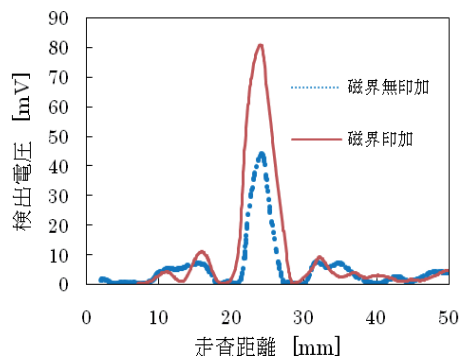


図 7 ミリ波電界と印加磁界が平行な場合のミリ波収束特性の変化

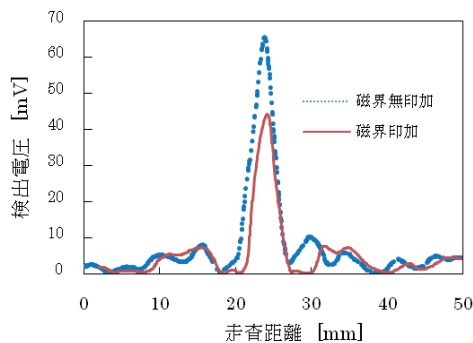


図 8 ミリ波電界と印加磁界が垂直な場合のミリ波収束特性の変化

磁界印加による変化の方向や大きさは、設計した

フレネル構造と液晶材料の屈折率との組み合わせによって変化する。したがって、図 7 および 8 の結果を見ると、3D プリンタのフィラメントの屈折率は、設計に用いた値よりやや小さい可能性があり、フィラメントの屈折率を正確に評価する事により最適化が可能と思われる。

まとめ

ミリ波帯で動作する液晶フレネルレンズの実現に向けて、液晶複合化においてセル基板となるレンズ形状を 3D プリンタで作製する手法について検討した。フィラメント積層時のばらつきによると思われる微小な凹凸構造が見られるものの、ミリ波領域のデバイスにはほとんど影響は無いと考えられ、凸形状のフレネルレンズでは良好なミリ波収束特性が得られる事が確認された。加工精度の点からは切削加工より劣ると思われるが、作製可能な形状の自由度や加工時間の点では 3D プリンタの方が優れており、加工精度をそれほど必要としないミリ波応用では極めて有効な手法と思われる。

ミリ波用の液晶フレネルレンズを実現する為に、セル基板に相当する凹レンズ形状のフレネルレンズを 3D プリンタを用いて作製した。実際に液晶材料と組み合わせた複合レンズを作製し、磁界による分子配向制御を行い、レンズ特性の変化を調べた。その結果、印可磁界の方向の切り替えに伴うミリ波収束特性の相補的かつ可逆的な変化が確認された。

文献

- Ryouta Ito, Takayuki Kawakami, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Michinori Honma, and Toshiaki Nose (2012). Fundamental Properties of Novel Design Microstrip Line Type of Liquid Crystal Phase Shifter in Microwave Region. *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 044104.
- Toshiaki Nose, Liang-Chy Chien, Otilia Catanescu, Andrii Golvin, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Ryouta Ito, and Michinori Honma (2013). Improved High-Frequency Performance of

Microstrip- Line- Type Liquid Crystal Phase Shifter.

Jpn. J. Appl. Phys., 52, 091701.

能勢敏明, 永澤雅, 渡辺猛, 伊藤謙二, 伊東良太,
本間道則 (2015). 「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』 ., 2, 194-198.

大野真之介, 伊東良太, 本間道則, 能勢敏明 (2016) .
「多孔質PMMA材料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) .

Toshiaki Nose, Shinnosuke Ohno, Mamoru Masaka,
Kenji Ito, Ryouta Ito, and Michinori Honma
(2017). Basic performance of a liquid crystal
millimeter wave Fresnel lens fabricated using
machinable porous polymethylmethacrylate
materials. Molecular Crystals and Liquid
Crystals, MCLC, Vol.647, 1-10.

〔平成 29 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 29 年 7 月 11 日受理〕

Study of Liquid Crystal Fresnel Lenses Fabricated Using a 3D Printer for Millimeter-Wave Application

Toshiaki Nose¹, Taro Abumi¹, Mamoru Masaka², Kenji Ito²,
Ryouta Ito¹, and Michinori Honma¹

¹ *Department of Electronics and Information Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Yurikogyo Co. Ltd.*

Recently, ICT has come to be expected to be a key to open a new era of electronics and information technology fields. One of the most important issues is developing extremely high-speed communication systems such as 5G, which can be attained by using the millimeter-wave (MMW) region. Consumer use of the novel frequency region will expand greatly in the near future, and many kinds of manageable MMW control devices will be necessary. Therefore, we are working to attain compact and low-power-consumption MMW control devices using liquid crystal (LC) materials. In this paper, the fundamental properties of the Fresnel lens fabricated using a 3D printer are investigated, intended for the LC tunable lens working in the MMW region. The concave Fresnel lens substrate is fabricated by a 3D printer, and then the LC material is introduced to the cavity to attain a composite flat convex lens. It shows an excellent focusing property for MMW, and a complementary change of the focusing peak can be observed by changing the molecular orientation direction according to the external magnetic field.

Keywords: Liquid crystal, Millimeter wave, Fresnel lens, Tunable lens, 3D printer