

令和 5 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：2020～2022

課題番号：20K04625

研究課題名(和文) 液晶の分子間相互作用を活用したテラヘルツ帯で動作する液晶アンテナの高性能化

研究課題名(英文) Research and development of new liquid crystals for the terahertz tunable antennas focusing the intermolecular interaction

研究代表者

伊東 良太 (Ito, Ryota)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：20433146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波による無線通信の実用化にとって重要となる「液晶アンテナ」に有望な液晶を分子間相互作用に焦点を当て開発を進めた。テラヘルツ帯で損失特性が優れる水素結合液晶を中心に評価を進め、末端基としてフッ素を導入した場合のテラヘルツ帯での物性を明らかにした。また、水素結合液晶のコア部分のシクロヘキサン環が1つの場合に比べ、2つの場合に複屈折の増大の効果が見られた。水素結合以外の相互作用として、電荷移動相互作用およびイオン相互作用を対象としてテラヘルツ帯での評価を行い、電子移動相互作用が複屈折、損失に影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は無線通信の高速化・大容量化を推し進めると予想されているが、光の周波数に近いテラヘルツ波は指向性が強く、放射方向を高速に制御するアンテナの開発が必要となる。液晶は誘電率を電圧により制御できる材料であり、テラヘルツ帯での液晶アンテナへの展開が期待されている。一般的に液晶デバイスは薄型・軽量かつ低消費電力であるため実用化には有利であるが、テラヘルツ帯での動作特性を改善するために高複屈折かつ低損失な液晶が求められている。本研究では、様々な分子間相互作用がテラヘルツ帯での屈折率と損失に与える影響を評価しており、本研究の成果は分子間相互作用を考慮した新たな材料設計の可能性を見出したといえる。

研究成果の概要(英文)：Liquid crystal(LC) antennas are important for practically implementing wireless communication using terahertz waves. This research project focuses on the molecular interaction of liquid crystal materials to achieve high-birefringent and low-loss LCs in the terahertz range. Experimental results indicate that the core structure and side chain of the hydrogen-bonded LC are important in the birefringent and loss in the terahertz range. In addition, the charge transfer interaction in the LC also affects the birefringent and loss in the terahertz range. These results provide important information for developing LC antennas for future wireless communication technology using terahertz waves.

研究分野：電子工学

キーワード：テラヘルツ波 液晶 水素結合 分子間相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

IoT技術の発展には無線通信の高速化が重要であり、多くの研究が進められている。無線通信では利用する電磁波の周波数を上げることで高速化を実現しており、その通信速度はこの30年で約10,000倍と伸びている。近年では、マイクロ波からミリ波帯の電磁波を用いた第5世代移動通信システム(5G)による超高速通信の運用も試験的に始まっている。さらなる無線通信の高速化には、より高い周波数の電磁波の利用が必要であり、ミリ波よりも周波数の高いテラヘルツ波が注目されている。しかし、電磁波の周波数が光に近づくにつれて指向性が強くなるため、テラヘルツ波による無線通信を実現するためには、発信側と受信側の位置に合わせてテラヘルツ波の放射方向を精密に制御する必要がある。特に携帯端末による通信では、移動しながら通信するため、テラヘルツ波の放射方向を高速に制御するアンテナの開発が必要となる。

液晶は電圧により屈折率を高速に変えられる材料であり、テラヘルツ波の放射方向を動的に制御するアンテナへの応用が可能である。液晶アンテナでは、平板導波路とアンテナアレーの間に液晶が挿入されている。液晶部分は配向処理により初期配向を自由に決められるだけでなく、電圧印加によって液晶分子の向きを制御することも可能である。液晶部分では、配向の変化によって屈折率(液晶では屈折率の二乗が誘電率)が変わるため、それぞれのアンテナから放射されるテラヘルツ波の位相を変えることができる。液晶アンテナでは、印可電圧によりこの位相を調整することで、アンテナ全体からの放射方向を自由に制御することが可能である。一般的に液晶デバイスは薄型かつ軽量であるだけでなく、電圧による配向の変化の際に電力をほとんど消費しないため、液晶アンテナは移動体通信の基地局だけでなく携帯端末への応用も期待される。液晶アンテナでは、液晶の複屈折(分子長軸方向と短軸方向の屈折率の差)によりテラヘルツ波の位相を変えているため、放射方向の変化量を大きくするためには、複屈折の大きい液晶が必要となる。しかし、多くの液晶は、テラヘルツ帯の複屈折が可視光域に比べて小さくなる傾向が報告されている。また、テラヘルツ帯では液晶の吸収が大きいため、アンテナの利得を下げる原因になっている。このため、テラヘルツ帯での液晶アンテナの実現には、「高複屈折」かつ「低損失」な液晶材料の開発が必要不可欠となっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、テラヘルツ波による無線通信の実用化に必要な不可欠な液晶アンテナに有望な液晶を「分子間相互作用に焦点を当て開発」することが目的である。ディスプレイでの利用を踏まえた液晶材料の開発では、液晶の分子構造に着目し高性能化が進められてきた。一方、水素結合、電荷移動相互作用、イオン相互作用などの分子間相互作用は、共有結合に比べ結合エネルギーが低い。これらの相互作用は、テラヘルツ帯のエネルギーと比較的近いため、テラヘルツ帯での液晶の物性に大きな影響を及ぼす可能性がある。そのため、分子間相互作用を的確にコントロールすることにより、テラヘルツ帯で「高複屈折」かつ「低損失」な液晶が得られる可能性が高い。そこで、本研究では、水素結合、電荷移動相互作用、イオン相互作用により発現する液晶のテラヘルツ帯での特性を明らかにし、「高複屈折」かつ「低損失」な液晶材料を試みた。

## 3. 研究の方法

テラヘルツ帯での液晶の物性評価にはテラヘルツ時間領域分光装置を用いた。この装置では、0.1~3.0THzの広帯域で屈折率と吸収係数を評価が可能であり、水晶基板を用いた液晶セルを作製し液晶材料の物性評価を行った。また、比較のために可視光域での屈折率をアッペ屈折率計により測定した。本研究は、分子間相互作用がテラヘルツ帯の電磁波へ与える影響を液晶材料の開発に積極的に取り入れるものであり、これまでの液晶開発とは全く異なるアプローチである。

## 4. 研究成果

### (1) 水素結合を有する液晶の測定

水素結合を分子間相互作用として液晶相を発現する液晶は、「テラヘルツ帯の複屈折が可視光に比べ大きくなる」、「テラヘルツ帯での損失係数が分子長軸と短軸方向で同じになる」ことがわかっている。一般的に液晶では分子構造を変えることで特性を制御することができ、末端基とコア部を変えることでその特性が大きく変わる。前述の水素結合液晶の結果は、末端基がアルキル鎖の場合の結果であり、水素結合を有する液晶で末端基を変えた場合のテラヘルツ帯での物性はこれまでの評価されていない。水素結合を有する液晶でも分子構造を変えることで複屈折や損失が変わる可能性があるため、まずは末端基を変えた水素結合を有する液晶を対象として評価を行った。

水素結合を有する液晶に様々な末端基を有する安息香酸を混合した場合、末端基がCN、Cl、CF<sub>4</sub>では5w%程度、末端基がFでは15w%程度まで混合しても液晶状態が保たれることが分かった。混合された安息香酸は二量体を形成している可能性が高く、これらの液晶材料を評価することで、水素結合液晶における末端基の影響が明らかになると考えられる。末端基がCN、Cl、CF<sub>4</sub>の場合には、混合比が低いこともあり、テラヘルツ帯での物性への影響を確認できなかった。

一方、末端基がFの場合は、可視光およびテラヘルツ帯の物性に变化が確認された。図1にはFの位置が異なる、2-フルオロ安息香酸、3-フルオロ安息香酸、4-フルオロ安息香酸を水素結合性液晶に15w%混合した場合の589nmおよび1.5THzでの複屈折、1.5THzでの損失の測定結果を示す。ここで、テラヘルツ帯での評価は、2F、3Fが70度、4Fは80度で行っている。複屈折に関しては、フッ素の位置によって可視光とテラヘルツ帯同じ傾向が見られた。特に、分子長軸方向にFを導入した場合に複屈折が増加する傾向が見られ、テラヘルツ帯のデバイスにとって有利な結果となった。一方、損失については、2Fと3Fでは分子短軸および長軸方向の損失(  $a_e$ ,  $a_o$  )が同じとなっているが、分子長軸方向にFを導入した4Fについては、値は小さいものと  $a_e$  に差が見られた。

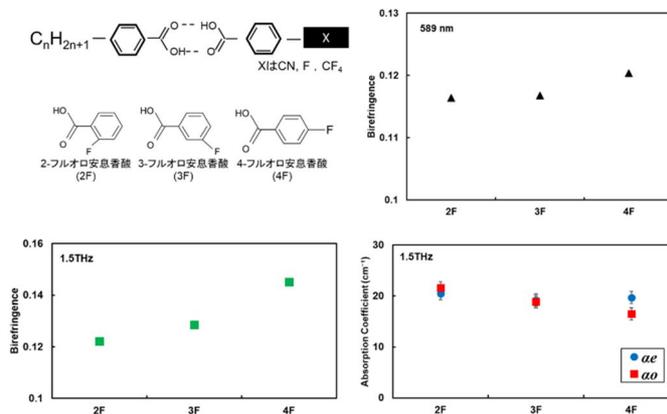


図1 末端基にFを有する水素結合液晶の可視光およびテラヘルツ帯での測定結果

以上の結果から、末端基の位置が水素結合液晶のテラヘルツ帯での物性に影響を与える可能性が示された。

次に、水素結合を有する液晶のコア部分の構造がテラヘルツ帯での物性に及ぼす影響を調べた。図2に示すように、コア部分のシクロヘキサン環の数が異なる条件で測定を行った。可視光の複屈折は1環の場合と2環を含む場合で、大きな変化が見られないのに対し、テラヘルツ帯ではシクロヘキサン環の数が增多することで複屈折が大きくなる結果が得られた。さらに、損失については1環、2環ともに分子長軸と短軸方向での異方性を示さないことがわかった。

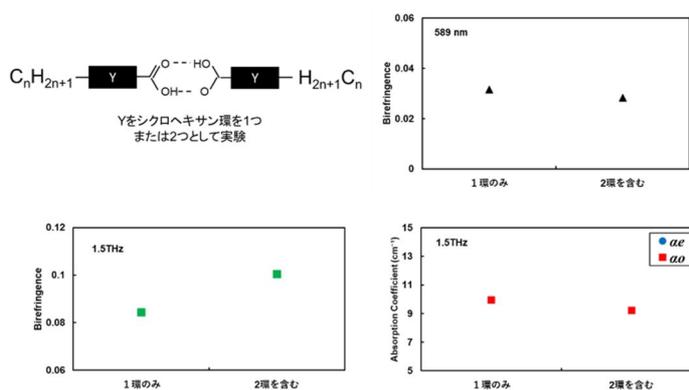


図2 水素結合液晶のコア部を変えた場合の可視光およびテラヘルツ帯での測定結果

以上の結果から、水素結合液晶のコア部分のシクロヘキサン環の数を増やすことで、テラヘルツ帯での損失の異方性を生じさせることなく複屈折を増大できることが明らかになった。

## (2) 水素結合以外の相互作用を有する液晶の測定

続いて、分子間の相互作用を水素結合から、イオン相互作用、電荷移動相互作用へ対象を広げて実験を行った。

### イオン相互作用を有する液晶の測定

イオン相互作用は電荷を共有するイオン間に働く力であり、イオン相互作用により発現する液晶も報告されている。本研究では、ポリエチレンイミンとステアリン酸を混合したイオン液晶をターゲットとして測定を行った。固体相、SmA相、等方相においてテラヘルツ時間領域分光測定を行ったが、屈折率、吸収係数ともに大きな変化は現れなかった。

### 電荷移動相互作用を有する液晶の測定

電荷移動相互作用は、分子それぞれが電荷を帯びその結果生じる分子間力であり、液晶相の安定化や出現に深く関わる重要な効果である。本研究では、電荷移動相互作用を示す液晶として、図3に示す5CB/MBBA混合液晶をターゲットとし、混合比を5CB:MBBA=100:0~0:100(重量比)の間で変化させてテラヘルツ時間領域分光測定を行った。その結果、屈折率、損失ともに混合比により変化することがわかった。特に損失については、混合比60:40の場合に損失の異方性が大幅に減少する傾向が得られた。この現象が現れる濃度範囲やメカニズムについては不明な点が残るが、電荷移動相互作用はテラヘルツ帯での液晶の物性に比較的大きな影響を与えることを示唆しており、この相互作用を利用した複屈折および損失の制御の可能性が示された。

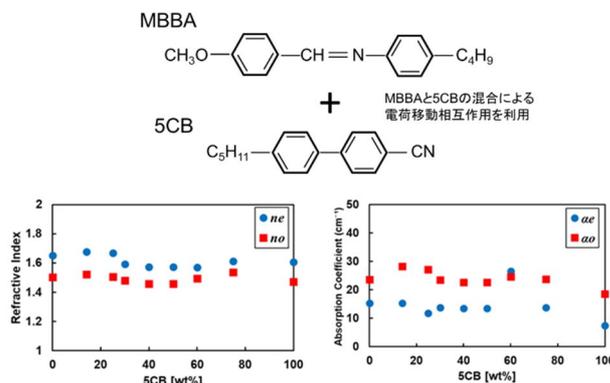


図3 電荷移動相互作用を有する液晶のテラヘルツ帯での測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 ITO Ryota, SEKIYA Hayato, HONMA Michinori, NOSE Toshiaki	4. 巻 E105.C
2. 論文標題 Estimating the Birefringence and Absorption Losses of Hydrogen-bonded Liquid Crystals with Alkoxy Chains at 2.5 THz	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 68 ~ 71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2021D110003	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 Ito Ryota, Sekiya Hayato, Kawayama Iwao, Honma Michinori, Tonouchi Masayoshi, Nose Toshiaki	4. 巻 62
2. 論文標題 Influence of dichroism on the optical properties of a twisted nematic liquid crystal cell in the terahertz region	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 4052 ~ 4052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.487770	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊東良太, 正崎一馬, 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 5CB/MBBA混合液晶のTHz時間領域分光測定
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Ito, Hayato Sekiya, Michinori Honma and Toshiaki Nose
2. 発表標題 Ryota Ito, Hayato Sekiya, Michinori Honma and Toshiaki Nose " Estimation of Birefringence and Absorption Losses of hydrogen-bonded Liquid Crystal with Alkoxy Chain in Terahertz region
3. 学会等名 The 27th International Display Workshops (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎史弥, 正崎一馬, 伊東良太, 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 フルオロ安息香酸を混合した水素結合性液晶のTHz帯における光学特性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡崎史弥, 伊東良太, 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 THz帯における水素結合液晶の複素屈折率の温度依存性
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2022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