

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：81406	研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2009～2011	課題番号：21560380
研究課題名（和文）	サブ波長誘電率分布構造による低電圧駆動液晶光学デバイスの開発に関する研究
研究課題名（英文）	Study on Development of Low-Voltage-Driving Liquid-Crystal Optical Devices with Sub-Wavelength Dielectric Distribution Structures
研究代表者	佐藤 進（SATO SUSUMU） 秋田県産業技術センター・技術顧問 研究者番号：50005401

研究成果の概要（和文）：新規液晶光学デバイスの実現を目的として、インピーダンス回路網モデルによる液晶分子配向のシミュレーション法を開発し、様々な液晶光学デバイスにおける光学特性のシミュレーション解析を行った。また、サブ波長強誘電体ナノ粒子の分散配置を行い、電極と液晶層間に誘電率やインピーダンスが分布している層を形成した液晶セルを構成した。電極間に電圧を印加した時に液晶層に誘起される実効屈折率分布や光学特性を測定し、プリズムやレンズ効果等を得ると共に、種々の光学デバイスを提案することができた。

研究成果の概要（英文）： Numerical simulation method of liquid-crystal (LC) molecular orientation is prepared for the purpose of the realization of new type LC optical devices by using an impedance network model. Then some properties of several LC optical devices are analyzed. The LC cells with distributed layer of dielectric constant or impedance between an electrode and LC layer are fabricated by arranging the distribution of sub-wavelength ferroelectric nano-particles. Effective refractive index distribution and optical properties are investigated by applying a voltage across the electrodes, and voltage controllable optical properties such as a prism and lens are demonstrated. In addition, new types of LC optical devices are proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：光学デバイス・液晶・サブ波長・誘電体・インピーダンス

1. 研究開始当初の背景

- (1) 液晶の応用分野は従来からディスプレイに限定され、それ以外は活発ではなかった。
- (2) 研究代表者は、30年以上前に世界で初めて液晶による「焦点可変レンズ」を実現し (Jpn. J. Appl. Phys., Vol.18, p.1679

(1979))、その後今日に至るまで種々の液晶光学デバイスの開発に専念してきた。

- (3) たとえば、電圧可変型の液晶マイクロレンズや、凸～凹の連続切り替えが可能な液晶レンズ等を実現し、撮像デバイス等への実用化を目指して研究を続けてきた。

(4) しかし、液晶層の利用効率が低く焦点の可変範囲が狭いなどの問題点があり、更なる効率の改善や、種々の広範なデバイスへの応用展開等が課題とされていた。

2. 研究の目的

(1) 従来の液晶光学デバイスの問題点であった液晶層の利用効率を改善し、外部電圧による光学特性の可変範囲を拡大し、薄型化及び低電圧化、さらには高機能化を行うことを目的としている。

(2) サブ波長強誘電体ナノ粒子からなる強誘電微粒子の分散配置により電極と液晶層間に誘電率やインピーダンスが分布している層を形成する。

(3) 電圧印加により液晶層に誘起される実効屈折率分布を所定の形状に構成して光学特性の可変範囲の拡大等、新規シミュレーションの手法による解析を行う。

(4) 新規な原理に基づく液晶光学デバイスの実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 強誘電体を含むインピーダンス層における微細領域の分布形状と液晶層に加わる実効電圧や液晶分子配向と屈折率分布について新規に開発したシミュレーションにより解析を行う。次に、液晶セル内で光学位相差が実効的に直線（一次元）状及び放物線（二次元）状に滑らかに変化する条件を確立すると共に、新規液晶光学デバイスを実現するための実効的な屈折率分布特性と誘電率及びインピーダンス等の分布形状に関わる設計指針を確立する。

(2) 強誘電体ナノ粒子を分散した試料を用いて、ナノ粒子の密度や最適な分散媒質を選定すると共に、ディスペンサやインクジェット法等によりITO基板上にナノ粒子を分散した微細領域を形成し、その基礎特性の測定及び評価を行う。

(3) 強誘電体ナノ粒子プレポリマーを基板面に塗布し、重合硬化平坦化を行うと共に、ラビング(摩擦)法によりホモジニアス配向処理を行い、液晶セルを作製する。

(4) 強誘電体ナノ粒子の密度分布が異なる基板を用いて作製した液晶セルの光学的特性を測定し、実効的な光学位相差分布特性等の詳細な測定及び評価を行う。

(5) 上記の研究成果に基づいて、新規な電圧及び周波数可変制御型の液晶光学デバイスを実現すると共に、研究の総括を行う。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

①インピーダンス層を有する液晶セルにおけるシミュレーション解析法の確立

従来のシミュレーション法では、電流や電荷の移動等が含まれるインピーダンス層を有

する液晶セルへの適用が困難であった。本研究では、図1に示したインピーダンス回路網モデルを用いることで、従来困難であったこのような液晶セルにおける分子配向や光学位相差分布等を計算により求めるシミュレーションの手法を確立した（学会発表⑧）。

このインピーダンス回路網モデルによるシミュレーション法は極めて有効であり、液晶や誘電体中に抵抗性の媒質がある場合のみならず、高抵抗層を有する低電圧駆動液晶レンズ等での不均一電界中の液晶分子配向や光学位相差分布等のシミュレーションによる解析を行うこともできるという、優れた特徴を持っている（学会発表①⑥⑦）。

②屈折率分布が一次、また二次関数で変化する液晶光学デバイスの構成（学会発表⑤）

液晶レンズは機械的な可動部を持たず、電気的に焦点距離を可変できるという優れた特徴を有しており、小型軽量の撮像デバイス等への応用が期待されている。研究代表者らは、数ボルト以下の低電圧で凸レンズ～凹レンズの連続可変特性が可能で、収差等の光学特性が優れた液晶レンズを提案してきた。しかしこれらの液晶レンズでは、液晶層における誘起複屈折の利用効率が低く、更なる改善が課題とされている。本研究では、液晶セルにおける透明電極と液晶層の間に誘電率の

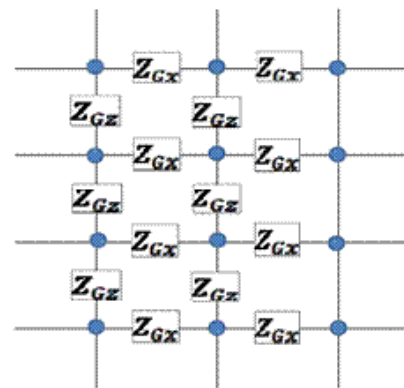


図1 インピーダンス回路網モデル
ここで、 Z_{Gx} : x 方向のインピーダンス、 Z_{Gz} : z 方向のインピーダンス

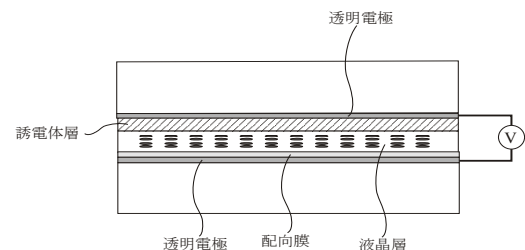


図2 誘電体層を有する液晶光学デバイスの構造

値が分布している層を設けることで、液晶層内の実効電圧が空間的に変化するような構成の液晶光学デバイスを提案した。すなわち、電圧印加により実効的な屈折率分布が液晶セル内で直線状に変化するプリズムや、実効的な屈折率分布が二次関数（放物線・放物面）で変化するレンズ特性を有するデバイスについて、シミュレーションによる解析を行なった。液晶光学デバイスの構造を図2に示す。ここで、誘電体層の厚みは $150\mu\text{m}$ 、液晶層の厚みは $60\mu\text{m}$ とし、液晶はMLC6080（メルク社）の各パラメータを使用した。

種々の考察から、誘電体層の比誘電率を図3のように設定し、電圧9V(5kHz)を印加した場合の液晶のダイレクタの分布から、液晶層に誘起される光学位相差（波長633nm）分布特性は図4のようになり、2.5mmの範囲でほぼ直線状の光学位相差分布特性が得られた。印加電圧を変換することで光学位相差分布の形状を変化させることもできる。次に、同様の考察から図5に示すような誘電率分布を与え、7Vの電圧を印加した場合について液晶内の電位分布を求め、液晶のダイレクタ分布から光学位相差分布を求めた結果を図6に示す。 $\pm 2.5\text{mm}$ の範囲で光学位相差分布特性はほぼ放物線（二次関数）状となり、図7に示した凸レンズ特性（レンズパワー2.6dpt；焦点距離は387mm）を得ることができた。さらに、図8のような径が4mmの凹レンズの中に2mm径の凸レンズを含む複合レンズを構成することもできる（学会発表④）。

以上、誘電率分布層を形成することで、誘起複屈折の利用効率が高い電圧可変型のプリズムやレンズの構成の可能性が示された。

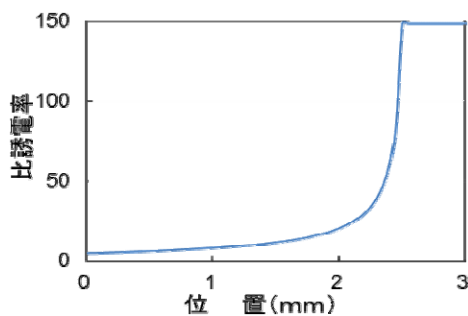


図3 誘電体層における比誘電率の分布

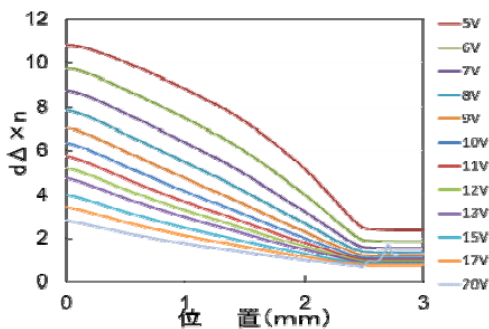


図4 光学位相差分布（プリズム）

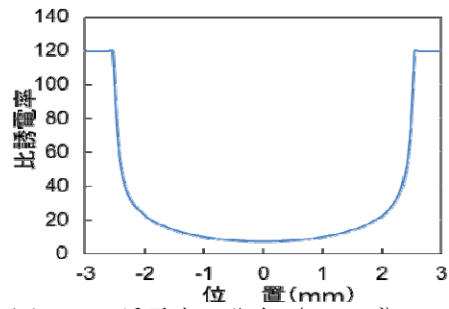


図5 比誘電率の分布（レンズ）

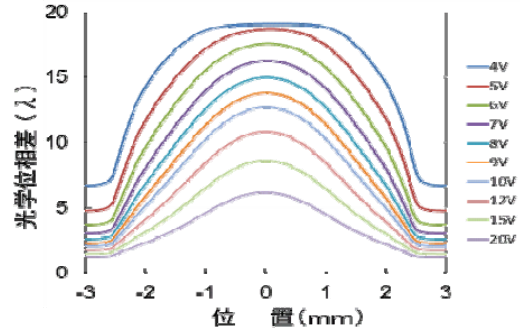


図6 光学位相差分布（レンズ）

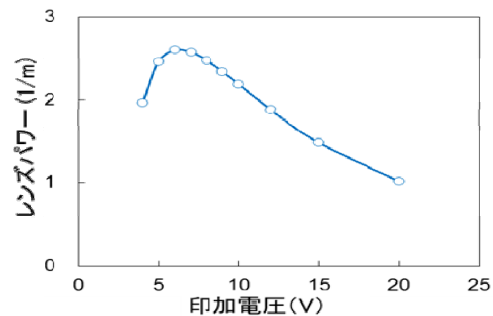


図7 印加電圧とレンズパワーの関係

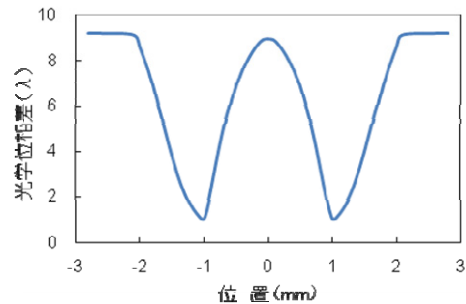


図8 複合レンズの構成

③インピーダンス分布層を有する液晶光学デバイスの駆動周波数特性（学会発表③）

誘電体の他に抵抗成分を含む場合には、液晶光学デバイスの特性は印加電圧の周波数にも依存するため、多彩な特性を有するデバイスを構成することができる。液晶光学デバイスの構造を図9に示す。(a)並列モデルでは比誘電率 ϵ 及び抵抗率 ρ が分布しているインピーダンス層の厚みを $150\mu\text{m}$ 、直列モデルでは ϵ が分布しているインピーダンス層及び抵抗層を各 $100\mu\text{m}$ 、インピーダンス分布領域の直径を5mm、液晶層の厚みを $60\mu\text{m}$ とし、液晶MLC6080の各パラメータを使用して

液晶のダイレクタを含む液晶セル断面における二次元でのシミュレーションを行った。(a) 並列モデル

図 9 (a) の構造の液晶セルにおいて、 ϵ と ρ がそれぞれ図 10 のように分布している場合のインピーダンス分布の周波数特性を図 11 に示す。図から分るように、高・低の周波

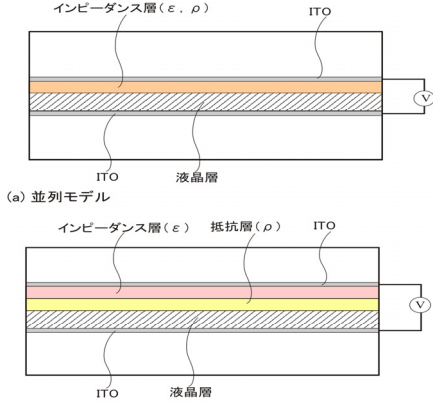


図 9 (a) 並列モデル (b) 直列モデル

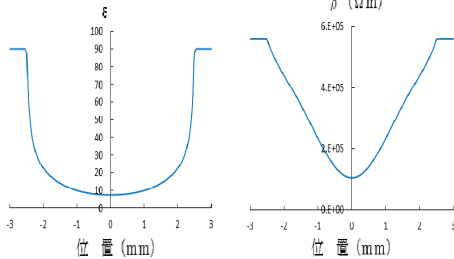


図 10 (a) 比誘電率分布、(b) 抵抗率分布

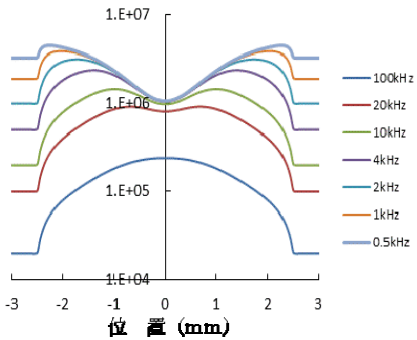


図 11 並列モデルのインピーダンス

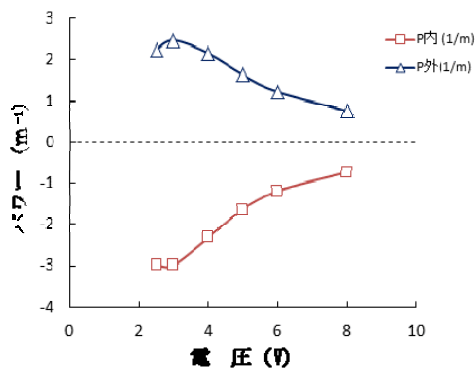


図 12 レンズパワーの電圧依存性

数変化によりインピーダンス分布が反転することで、低周波では凹レンズ特性、高周波では凸レンズ特性となり、またある条件のもとでは凹レンズ (内側) と凸レンズ (外側) の複合レンズ特性を得ることもできる。凸レンズ特性及び凹レンズ特性を図 12 に示す。

(b) 直列モデル

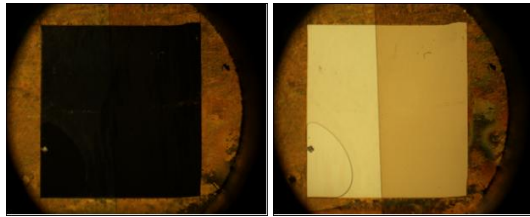
次に図 9 (b) の直列モデルにおいて、 ϵ 及び ρ が図 10 のように分布しているキャパシタンス層と抵抗層が液晶層に直列に配置されている液晶セルの印加電圧の周波数を可変した場合の光学位相差分布特性を求めた。この場合は、並列モデルの場合とは逆に低周波側で凸レンズ特性が、高周波側で凹レンズ特性が得られることが示された。

以上、インピーダンス層と液晶層の複合化により、誘起複屈折の利用効率が高く、周波数変化で凸⇄凹レンズの切り替えや、凹レンズ中に凸レンズを構成できることなどが示された。なお、高・低の周波数により誘電異方性が反転する二周波駆動の液晶を用いても同様の駆動を行うことが可能であるが、二周波駆動の液晶は種類が少なく、温度依存性が非常に大きいなどの難点があり、また二周波駆動の液晶のみでは図 11 のような複雑な特性を得ることは困難である。

④ 強誘電体ナノ粒子分散媒質を用いて作製した液晶セルの特性

強誘電体ナノ粒子を分散した溶液 (KR I 製: BaTiO₃ ナノ粒子・エポキシコンポジット) を用いて、ITO ガラス基板面に BaTiO₃ ナノ粒子分散媒質が 100% の領域と参照膜としてエポキシのみによる膜の 2 領域 (~40 μm 厚、~1 cm 角) を形成し、表面を研磨により平坦化し、対向電極としてポリイミド膜を塗布した ITO ガラス基板との間にネマティック液晶 MLC6080 を封入した。平坦化した面及びポリイミド膜を一方にラビングし、25 μm 径のスペーサを用いてホモジニアス配向の液晶セルを作製した。この液晶セルを直交または平行偏光子間に挟み、ラビング方向を偏光方向と一致させた場合の透過写真を図 13 に示す。直消光状態で真黒くなり、液晶分子の配向状態は良好であることが分る。

次に、ラビング方向を偏光方向と 45 度設定し、直交偏光子状態で液晶セルに電圧 (1kHz 正弦波) を加えた場合の透過光強度の極値から印加電圧と光学位相差の関係性を求めた結果を図 14 に示す。BaTiO₃ ナノ粒子分散膜の比誘電率は ~40 程度とナノ粒子を含まないエポキシのみの膜に比べて大きいため、BaTiO₃ ナノ粒子分散媒質有の領域ではナノ粒子分散媒質無しの領域に比べて液晶層に加わる実効電圧が大きくなるため、特性は低電圧側に移動している様子が分る。



直交偏光子 平行偏光子
図13 液晶セルの偏光顕微鏡写真

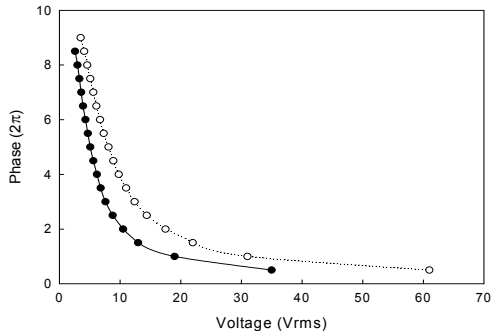


図14 光学位相差と印加電圧の関係
○ : BaTiO₃ナノ粒子分散媒質無し、
● : 有り

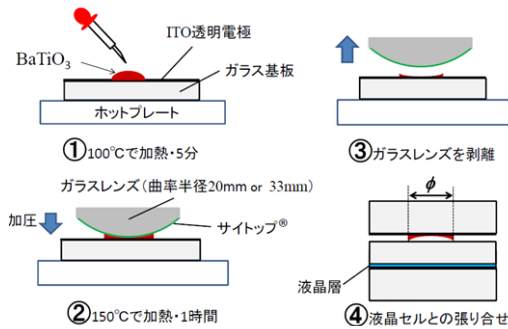


図15 ナノ粒子を用いた液晶セルの作製

⑤強誘電体ナノ粒子分散媒質を用いた液晶光学デバイスの作製 (学会発表②)

(a) 厚み分布を有する液晶デバイスの作製

サイトップ (AGC旭硝子) を表面に塗布した曲率半径20~33mmのガラスレンズをBaTiO₃ナノ粒子が分散した材料に押し当て、硬化した後ガラスレンズを剥離することで、厚み分布を有する誘電体層を配置した液晶セルを作製した。液晶セルの作製工程を図15に示す。液晶はMLC6080であり、11μm径のスペーサを用いて液晶層の厚みを決めている。

この液晶セルに電圧 (1kHz) を印加した時の光学位相差分布特性を図16に示す。図では印加電圧ごとに光学位相差の曲線が重ならないように平行移動して示してある。BaTiO₃ナノ粒子分散媒質が厚み分布を有するように配置した液晶セルにおいて、光学位相差分布特性が2次元放物線状となり、レンズ特性を示すデバイスを構成することができた。

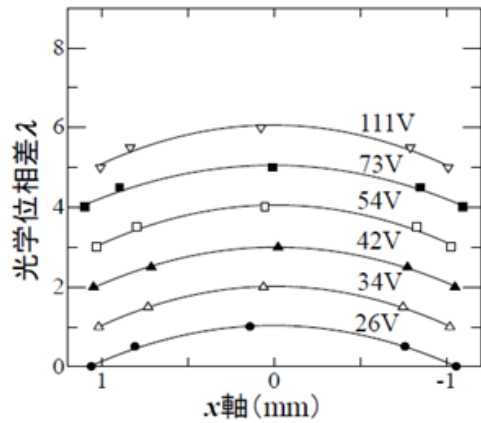


図16 光学位相差分布特性

(b) インクジェットプリンタ使用による液晶光学デバイスの作製

ピエゾ素子をヘッドに持つインクジェットプリンタ (EPSON : Colorio/EP-302) を用いて、エチルセロソルブアセテートで 8.3wt% に希釈した BaTiO₃ ナノ粒子分散溶液を I T O ガラス基板表面に描画ソフトウェアで設計した面内分布に描画した。ホットプレートを用いて加熱・製膜した後、ポリビニルアルコール配向膜を塗布し、ラビング処理を行い、MLC6080 及び 11μm 径の球状ポリマーボールスペーサを用いて液晶セルを作製した。

図17に示すように、BaTiO₃ナノ粒子が一方方向に面内で線形に分布密度分布が生じるように描画した基板を用いて液晶セルを作製した。液晶セルを直交偏光子で挟み、電圧を印加した時の透過写真を図18に示す。図には液晶セルに0.013V~1.53Vの電圧を印加した時の偏光顕微鏡写真を示している。BaTiO₃ナノ粒子を含む領域 (破線の下部) と無い領域 (破線の上部) を比較すると、BaTiO₃ナノ粒子分散領域での透過光強度が徐々に明るくなる傾向が見られることから、BaTiO₃ナノ粒子分散領域における分布密度により液晶

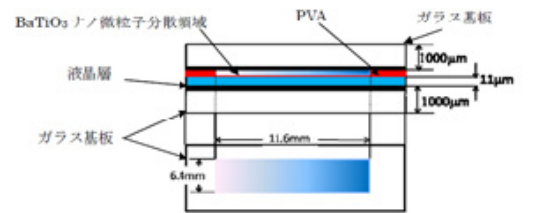


図17 線形面内分布を有する液晶セル

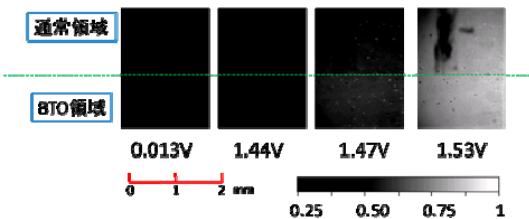


図18 BaTiO₃ナノ粒子が線形に分布している液晶セルの透過写真 (直交偏光子)

層に誘起される光学位相差を可変することができた。

次に、同じインクジェットプリンタを用いて円形パターンの縁付近でBaTiO₃ナノ粒子分散媒質の面内分布を100%とし、中心に向かうに従い面積階調が次第に小さくなるように設計し、円形状にBaTiO₃ナノ粒子分散媒質の面内分布を形成した液晶セルを作製した。この液晶セルにおいて、電圧印加により円形状の光学位相差分布の変化が認められたが、変化量は小さかった。この方法で光学デバイスを構成するためには、BaTiO₃ナノ粒子分散層の比誘電率の向上、及びナノ粒子分散層の厚みの増大等が課題として残された。

(2) 成果の国内外における位置づけとインパクト

インピーダンス回路網モデルを適用した分子配向のシミュレーション解析法は、インピーダンス層等の電流や電荷の移動等を含む液晶デバイスにおけるシミュレーションを可能とするもので、これまで困難であった課題を解消するきわめて有効な手法である。また、本研究により誘起複屈折の利用効率が高く、任意の特性を有する液晶光学デバイスを構成する方法が示されたことの意義は大きいものとする。

(3) 今後の展望

シミュレーションにより新規液晶光学デバイス創製の可能性が示されたことから、BaTiO₃ナノ粒子等の強誘電体微粒子分散層における比誘電率の更なる向上、及び強誘電体微粒子分散層の厚みの増大等により、新規液晶光学デバイスとしての広範な応用展開が期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計8件)

- ① 佐藤 進、葉 茂、王 濱：二層構造自然光対応液晶レンズのシミュレーションによる解析、第59回応用物理学関係連合講演会 15a-B10-5、2012年3月15日、東京都新宿区西早稲田 1-6-1 早稲田大学早稲田キャンパス
- ② 糸田大輝、河村希典、佐藤 進：BaTiO₃ ナノ微粒子分散膜を用いた液晶素子の電気光学特性、第59回応用物理学関係連合講演会 15p-GP5-5、2012年3月15日、東京都新宿区西早稲田 1-6-1 早稲田大学早稲田キャンパス
- ③ 佐藤 進、内田 勝、河村希典：インピーダンス分布層を有する液晶光学デバイスの駆動周波数特性、2011年日本液晶学会討論会 PB49、2011年9月11日、東京都世田谷区玉堤1-28 東京都市大学

- ④ 佐藤 進、葉 茂：インピーダンス分布型液晶光学デバイスのシミュレーションによる解析、第71回応用物理学学会学術講演会 14p-ND-12、2010年9月14日、長崎市文教町、長崎大学文教キャンパス
- ⑤ 佐藤 進、内田 勝、河村希典：誘電率分布層を有する液晶光学デバイス、2010年日本液晶学会討論会 PA52、2010年9月6日、福岡市東区馬出3丁目、九州大学医学部百年講堂
- ⑥ M. Ye, B. Wang, M. Uchida, S. Yanase, S. Takahashi, M. Yamaguchi, and S. Sato: Low-voltage-driving Liquid Crystal Lens, The 17th International Display Workshops LCTp4-11, 2010年12月1日、福岡市博多区石城町2-1, 福岡国際会議場
- ⑦ 佐藤 進、葉 茂：薄型・低電圧駆動液晶レンズのシミュレーションによる解析、第57回応用物理学関係連合講演会、20a-L-1、2010年3月20日、神奈川県平塚市、東海大学湘南キャンパス
- ⑧ 佐藤 進、葉 茂、王 濱：低電圧駆動液晶レンズのシミュレーション解析、2009年日本液晶学会討論会、PA47、2009年9月13日、東京都小金井市、東京農工大学小金井キャンパス

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：液晶光学デバイス
発明者：佐藤 進、山本正男
権利者：秋田県、スカラ株式会社
種類：特許
番号：特願 2009-254804
出願年月日：平成21年11月6日
国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 進 (SATO SUSUMU)
秋田県産業技術センター・技術顧問
研究者番号：50005401

(2) 研究分担者

内田 勝 (UCHIDA MASARU)
秋田県産業技術センター・
電子光応用開発部・主任研究員
研究者番号：90370238

河村 希典 (KAWAMURA MARENORI)
秋田大学・工学資源学研究所・講師
研究者番号：90312694