

機関番号：11401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760215

研究課題名 (和文) 新規液晶微小光学デバイスを用いた光断層血流測定装置
の開発研究研究課題名 (英文) An optical measurement system for a velocity of the blood flow by using
a novel liquid crystal optical device

研究代表者

河村希典 (KAWAMURA MARENORI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・助教

研究者番号：90312694

研究成果の概要 (和文)：光機能イメージングを行うための血流測定マッピング装置における光プローブの先端部に取り付ける新たな光学デバイスとして、これまでの装置にはなかった電子的に連続的で滑らかにレーザー光の波面制御、偏向 (ビームステアリング) 制御及びレーザー光の焦点距離を可変することが可能なユニークな機能を有する多機能液晶光学デバイスを開発し、光応用センシングの解析法を組み合わせることにより、機械的制御系を一切必要としない流速測定装置を実現することである。

研究成果の概要 (英文)：We propose an optical measurement system for a velocity of the blood flow by using a novel liquid crystal (LC) optical device with several divided circularly hole-patterned electrodes. The LC optical device has unique functions such as a variable focal length and beam-steering properties without any mechanical movements. The water flow and blood flow can be measured by using the optical measurement system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：液晶材料, 液晶光学デバイス, レンズ特性, 焦点距離, 光偏向, 流速測定, レーザ計測

1. 研究開始当初の背景

現在, 人間を非侵襲的に計測することを目的として, 磁気共鳴画像法(MRI)が広く医療分野で用いられており, 鮮明な断層撮影などにより病態診断が行われている。また, 血液中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンに分離して測定する近赤外分光法【F.F.Jobsis, "Non invasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters," Science 198, 1264 (1977)】やレーザー光を利用した生体組織の断層検出法が【佐藤,牧:"光トポグラフィーによる高次脳機能計測", 応用物理, 第76巻, 4 (2007) 369】で報

告されている。レーザー光を利用した方法【L.Duteil, J.C.Bernengo and W.Schalla: "A double wavelength laser Doppler system to investigate skin microcirculation", IEEE Trans on Biomedical Eng. 6, 439 (1985).】では, レーザ光の出射端及び受光端部 (プローブ) が固定されているため, ある程度の深さ方向のみしか測定することができない。プローブを駆動できるような測定系では, ある程度経験を持った測定者がプローブを手動で移動しながら測定しなければならない。しかも, 上記の方法では, 被験者が動きながら(日常生活をしながら)の血流測定は難しい。そのため, 機械駆動部を必要と

せず、断層部の分解能を向上し、コンパクトかつシンプルに使用できる生体組織内部の光断層血流測定装置(光トポグラフィ)が学術的にも社会ニーズとしても極めて重要である。

2. 研究の目的

本応募研究課題の目的は、機械駆動部を一切必要とせず、レーザー光の焦点距離を可変することが可能な新規液晶光学デバイスの開発とその液晶光学デバイスを用いて生体組織内部における血液中の酸素濃度を測定することができる小型光断層流速測定装置の研究開発を行うことである。

3. 研究の方法

(1) 新規小型液晶光学デバイスの設計と作製

① 八分割円形パターン電極を有する液晶光学デバイス

焦点距離可変機能を有する円形パターン電極構造の液晶光学デバイス、さらにビーム偏向機能を有する多分割円形パターン電極付き液晶光学デバイスの作製を行った。八分割円形パターン電極と外部制御電極を有する液晶光学デバイスの構造を図1に示す。液晶光学デバイスは、透明電極膜付きガラス基板1(ガラス厚: $d_{\text{glass1}}=1.0\text{mm}$), 極薄ガラス基板2($d_{\text{glass2}}=0.1\text{mm}$), 八分割円形パターン電極付きガラス基板3($d_{\text{glass3}}=1.1\text{mm}$), 液晶層($d_{\text{LC}}=0.11\text{mm}$), 透明電極膜付きガラス基板4($d_{\text{glass4}}=1.0\text{mm}$)で構成している。円形パターン電極の直径は3.8mmとした。液晶分子の配向はポリイミド水平配向膜をガラス基板に塗布し熱処理した後、一方向にラビング処理を行った。ラビング方向がアンチパラレル方向となるように基板を組み合わせ、空セルを作製した後、ネマティック液晶材料(MLC6080, Merck Co.)を封入した。

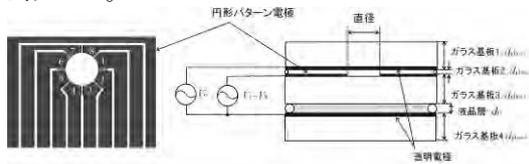
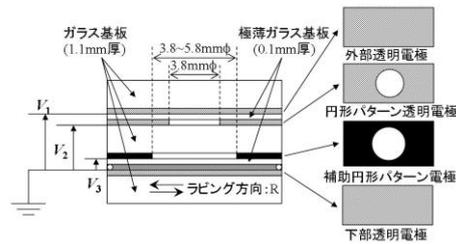


図1 八分割円形パターン電極を有する液晶光学デバイス

② 補助円形パターン電極を用いた凸レンズ向上型液晶レンズ

図2(a)及び(b)は、円形パターン透明電極及び補助円形パターン電極を有する液晶レンズの模式図を示している。円形パターン電極における円形パターン直径は3.8mmであり、補助円形パターン電極の直径が異なる液晶レンズを5種類(3.8, 4.3, 4.8, 5.2, 5.8mm)作製することでより大きなレンズパワーが得られる条件について

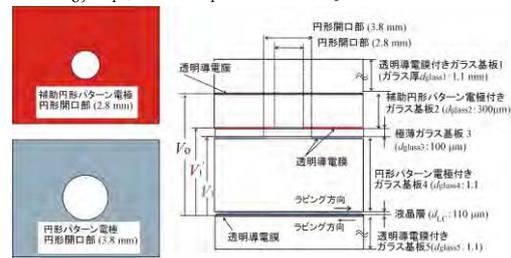
検討した。液晶材料には MLC6080 を用い、下部透明電極から外部電極、円形パターン電極及び補助円形パターン電極に印加する電圧を V_1 , V_2 及び V_3 としている。しきい値電圧 ($V_{\text{th}}=1.24\text{V}$)は LCR メータ(HP4284A)を用いて液晶レンズと同等の配向膜と液晶材料を用いてホモニアス配向液晶セルを作製し、電気容量変化から求めた。He-Ne レーザ($\lambda=632.8\text{nm}$)を光源とした偏光顕微鏡システムを用いて、液晶レンズにおける円形開口部の干渉縞観察から光学位相差分布を求め有効径及びレンズパワーを求めた。有効径は円形パターン直径3.8mmに対して干渉縞から求めた位相差分布と2次の近似曲線(理想球面)との光学位相差 $R(2\pi)$ が $R/10$ 以下となるように各電極に印加する電圧を制御し、補助円形パターン電極による有効径及びレンズパワーについて比較を行った。



(a)側面図 (b)上面図
図2 凸レンズ向上型液晶レンズ

③ 補助円形パターン電極を用いた凹レンズ向上型液晶レンズ

円形パターン電極及び異なる円形パターン直径電極を有する液晶レンズの模式図を図3(a), (b)に示す。各円形パターン電極は透明導電膜(Indium Tin Oxide: ITO)をフォトエッチングにより作製した。各ガラス基板厚、液晶層厚は図中に示す通りである。上述した条件での液晶分子の配向処理を行い、同一の液晶材料を用いた。下部透明電極から外部電極、円形パターン電極及び補助円形パターン電極に印加する電圧を V_0 , V_1 及び V_1' としている。



(a) 上面図 (b)側面図
図3 凹レンズ向上型液晶レンズ

(2) 半導体レーザーと液晶光学デバイスを組み合わせた流速測定装置の作製

① 流速測定装置

液晶光学デバイスを用いた流速測定装置を図4に示す。生体組織の血流測定を目指すため、生体組織を模擬したガラス管に赤血球

に見立てたポリマー微粒子（約 $5\mu\text{m}$ ）を水に分散した試料を用いる。半導体レーザ光は光ファイバを介して末端に取り付けた液晶光学デバイスへ伝搬する。凹レンズ及び凸レンズ特性を示すように図 1 の電極に加える電圧を制御し、散乱光を受信側の光ファイバで受け光検出器（アバランシェフォトダイオード）により測定を行う。測定信号を高速フーリエ変換の周波成分により流速の解析を行い、ガラス管表面と内部の流速の分布測定を行う。

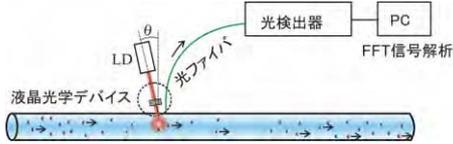


図 4 液晶光学デバイスを用いた流速測定装置

4. 研究成果

(1) 新規小型液晶光学デバイスの電気光学特性 ① 八分割円形パターン電極を有する液晶光学デバイスの液晶分子配向シミュレーション

図 5(a) ~ 5(d) は時間領域を考慮した液晶分子配向シミュレーションを用いて、図 1 で示した液晶光学デバイスにおける円形パターン領域での光学位相差分布が楕円形状となるように八分割円形パターン電極の各印加電圧 ($V_1 \sim V_8$) を調整した場合の光学位相差分布の計算結果を示している。ここで、図 5(a) における各電極に印加する比電圧は $V_3/V_{th}=V_7/V_{th}=36$, $V_2/V_{th}=V_4/V_{th}=V_6/V_{th}=V_8/V_{th}=25$, $V_1/V_{th}=V_5/V_{th}=18$ ($V_{th}=\pi\sqrt{k/(\epsilon_0 \cdot \Delta\epsilon)}$, k : 弾性エネルギー, $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}\text{F/m}$, $\Delta\epsilon=\epsilon_{//}-\epsilon_{\perp}$) であり、外部制御電極における比電圧は $V_0/V_{th}=5$ としている。経過時間 $\tau/\tau_0=0.06$ ($\tau_0=d^2\gamma_1/\pi^2k$, d : 液晶層厚, γ_1 : 粘性係数) 後に各電極における比電圧を $V_2/V_{th}=V_6/V_{th}=36$, $V_1/V_{th}=V_3/V_{th}=V_5/V_{th}=V_7/V_{th}=25$, $V_4/V_{th}=V_8/V_{th}=18$ に切り替えた場合の光学位相差分布を図 5(b) ~ 5(d) に示す。各電極に印加する電圧を制御することにより光学位相差が変化し、任意の面内方向における楕円形状の屈折率分布特性を得ることができた。

図 5(a) で示した光学位相差分布から図 5(d) で示した光学位相差分布となるように、各電極の電圧を切り替えた場合の円形パターン領域における光学位相差の過渡特性を図 6 に示す。各円形パターン電極にオーバードライブやアンダーシュート等の電圧制御を行うことで、光学位相差が $\lambda/10$ になるまでの応答時間を改善することができた。

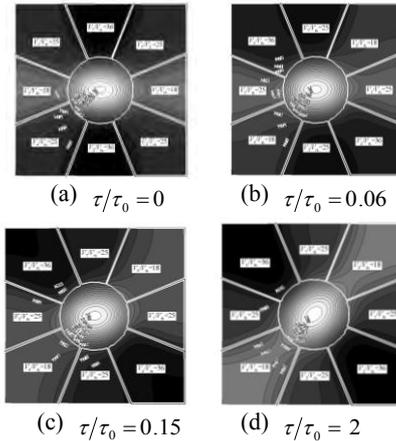


図 5 円形パターン領域における光学位相差分布

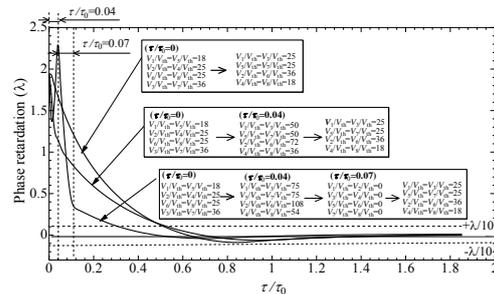


図 6 円形パターン領域における光学位相差の過渡特性

② 八分割円形パターン電極を有する液晶光学デバイスの光学位相差分布

図 7(a) ~ (h) は液晶光学デバイス (図 1) における外部制御電圧 $V_0=17\text{V}$ を一定とし、八分割円形パターン電極に各図中に示すような電圧 $V_1 \sim V_8$ で 15 秒/回転になるように切り換えながら印加したときの干渉縞の移動の様子を示している。これらの干渉縞写真から見られるように、印加電圧の低い方へ円形状の干渉縞の分布が移動している様子が確認され、干渉縞の中心点を x - y 平面において約 $\pm 300\mu\text{m}$ 程度移動することができた。すなわち、印加電圧が高い電極側と比較して印加電圧が低い電極側の屈折率分布が緩やかになり、その結果、干渉縞が移動したものと思われる。干渉縞の中心点のずれ幅に関して、相対する電極間の電圧差を大きくすることで干渉縞の移動量も増加する傾向があるが、収差等も増大するため、レンズ特性が劣化する傾向が見られた。

干渉縞が楕円形状になるように八分割円形パターン電極に最適な電圧 ($V_1 \sim V_8$) を印加し、外部制御電極の印加電圧を $V_0=20\text{V}$ としたときの偏光顕微鏡写真を図 8(a) ~ 9(h) に示す。各電極に印加する電圧を制御することで、常光と異常光の干渉によって形成される楕円形の干渉縞の形状と本数が変化し、任意の面内方向の屈折率分布特性、いわゆるアナモルフィックレンズ機能を得ることができ

た。干渉縞の長軸方向及び短軸方向の光学位相差特性を図9に示す。この図から分かるように、八分割円形パターン電極の印加電圧をそれぞれ制御することで楕円形状の屈折率分布特性を示した。すなわち、長軸方向の焦点距離が短軸方向よりも長く、比較的大きな非点収差特性を得ることができた。

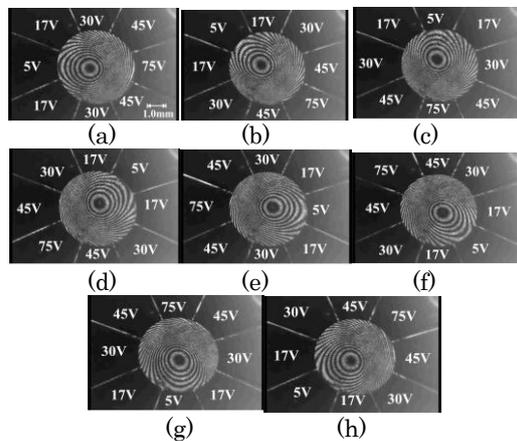


図7 液晶レンズにおける干渉縞の中心移動制御

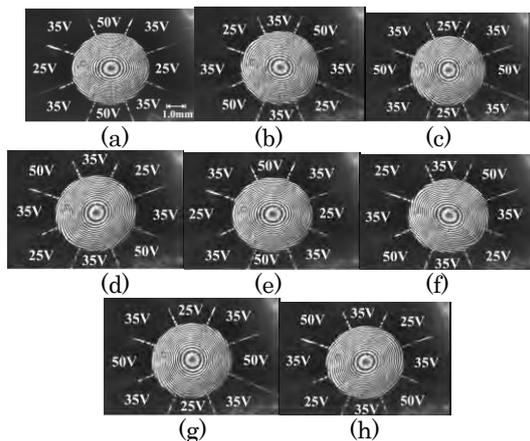


図8 楕円形状の屈折率分布制御

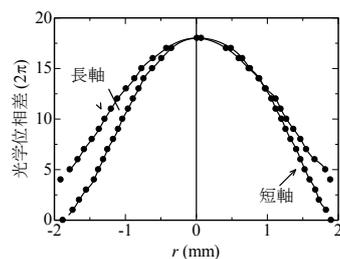
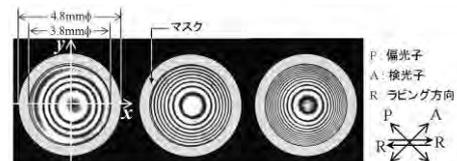


図9 干渉縞の長軸及び短軸方向の光学位相差特性

③補助円形パターン電極を用いた凸レンズ向上型液晶レンズの光学位相差分布

図2に示した凸レンズ向上型液晶レンズにおける補助円形パターン直径を4.8mm、 $V_1=13V_{th}$ 及び $V_2=25V_{th}$ とし、補助円形パターン電極に印加する電圧 V_3 を変化させた場合の円形パターン領域における干渉縞の様子を図10(a)~(c)に示す。補助円形パターン電極に印加する電圧

V_3 を可変することで上部円形パターン電極縁付近(~3.8mm)における同心円状の干渉縞間隔、すなわち屈折率分布を制御することが可能となった。これは円形パターン電極縁近傍における電界強度が補助円形パターン電極による不均一電界により強められることで液晶分子が基板に対して鋭く立ち上がっているためだと考えられる。つまり V_3 の電圧を印加することで円形パターン電極領域内における光学位相差が増加し、レンズパワーを向上することが可能となった。一層円形パターン電極構造の液晶レンズと補助円形パターン電極を有する二層円形パターン電極構造を有する液晶レンズにおける有効径とレンズパワーの関係を図11に示す。一層円形パターン電極構造の液晶レンズにおいて、円形パターン電極の直径3.8mmにおける最大のレンズパワーは約 $3.1m^{-1}$ であり、二層円形パターン電極構造を用いた液晶レンズ(補助円形パターン直径:4.3mm)における最大のレンズパワーは約 $5.5m^{-1}$ であることが分かった。有効径を広く保つためには、上部円形パターン電極への印加電圧 V_2 に比べて補助円形パターン電極への印加電圧 V_3 が小さい($V_2 > V_3$)という傾向があり、 V_2 に対する V_3 の比が大きくなるにつれてレンズパワーが増加するという傾向が見られた。



(a) $V_3 = 0V_{th}$ (b) $V_3 = 6V_{th}$ (c) $V_3 = 15V_{th}$

図10 円形開口部における干渉縞写真

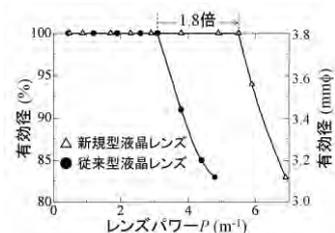


図11 有効径とレンズパワーの関係

④補助円形パターン電極を用いた凹レンズ向上型液晶レンズの光学位相差分布

半導体レーザー($\lambda=532nm$)を光源とした偏光顕微鏡システムを用いて、直交ニコル下で従来の1層円形パターン電極構造及び2層円形パターン電極構造を有する凹レンズ向上型液晶レンズ(図3)における円形パターン領域の干渉縞観察を行った結果を図12(a),(b)に示す。円形パターン領域内に同心円状の干渉縞が生じ、隣り合う干渉縞の光学位相差が 2π である。これらの干渉縞から求めたy軸方向における光学位相差分布を図13に示す。なお、円形パターン電極、補助円形パターン電極に印加する電圧を $V_1=V_2=0V$ とし、図12に示した干渉縞から求め

た位相差分布と 2 次の近似曲線(理想球面)との光学位相差が $\lambda/10$ になり, 干渉縞の本数が可能な限り多く発生するように外部電極に印加する電圧 V_0 を調整した。その結果, 光学位相差分布から求めた 1 層円形パターン電極構造及び 2 層円形パターン電極構造を有する液晶素子における凹レンズ特性のレンズパワーはそれぞれ -6.2m^{-1} , -10.2m^{-1} となり, 補助円形パターンによる凹レンズパワー範囲の向上と円形パターン開口径 3.8mm に近づけることができた。

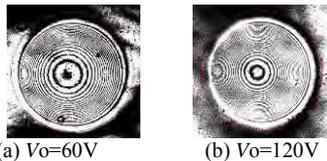


図 12 円形パターンにおける干渉縞写真

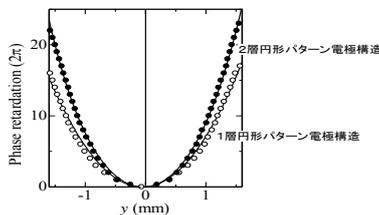


図 13 光学位相差分布

(2) 半導体レーザーと液晶光学デバイスを組み合わせた流速測定装置の実験結果

① 流体中の微粒子のモンテカルロシミュレーション解析

血液層を含む生体組織の 3 次元多層モデルを用いて生体組織内からの血流に対する散乱光についてモンテカルロシミュレーションを新たに提案し, シミュレーション結果から得られた散乱光強度分布の結果を解析することで, 血液層までの計測深度を特定する可能性について検討を行った。ここでは, 生体組織の 3 次元の単純化多層モデルを構築し, 血液層内の赤血球について次のように仮定を行った。屈折率 1.48 とした球状微粒子 (粒径: $10\mu\text{m}$) を屈折率 1.3 の媒質 (深さ: 10mm) にランダムに配置し, 上部より液晶光学デバイス (直径 2mm) を透過したレーザー光が $x=50\text{mm}$, $y=50\text{mm}$ の位置に入射したときの散乱光についてモンテカルロシミュレーション解析を行った結果を図 14(a)~(e) に示す。なお, 液晶光学デバイスの光の出射部と散乱粒子との間は 20mm としている。液晶光学デバイスにおけるレンズパワーを $P=-20\text{m}^{-1} \sim 0\text{m}^{-1}$ (凹レンズ特性) では散乱光の広がりが大きく, 特に表面に位置している微粒子からの散乱光が大きいと思われる。一方, $P=10\text{m}^{-1}$ においては, $x=50\text{mm}$, $y=50\text{mm}$ の位置における散乱光成分が多く, 深さ方向での散乱粒子の情報を得ることが可能であることが示された。

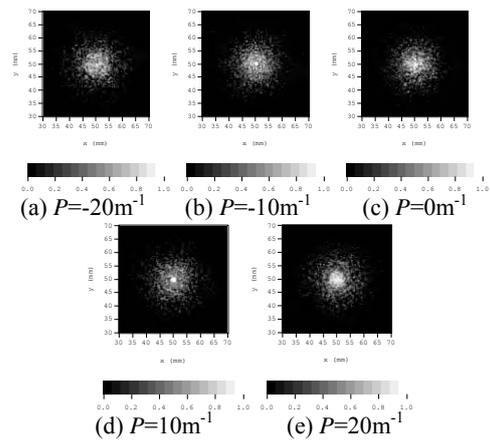


図 14 微粒子からの散乱光のモンテカルロシミュレーション解析結果

② 流体中の微粒子における周波数解析

生体組織からのレーザー散乱光を信号処理して血液の血流を求める装置は粒子散乱計測法の応用装置として考えるべきである。生体組織のような拡散物は時間とともに移動する多数の散乱粒子の集合体であると考えられるためである。組織中に静止組織と移動粒子として考えられる幾つかの赤血球が存在するモデルを考えた場合, レーザ光がこの組織に照射すると静止組織と移動赤血球によって散乱される。受光信号の直流成分は静止組織の量に比例した信号成分であり, 交流成分は赤血球の量と速度に比例した信号成分であるため交流成分と直流成分の関係からサンプル中の血流の流速を測定することができる。ここでは, 上述した液晶光学デバイスを用いた流速測定装置を用いて, 生体組織を模擬したガラス管に赤血球に見立てたポリマー微粒子 (直径: 約 $5\mu\text{m}$) を水に分散した試料について実験を行った。図 15(a)~(c) は各流速における液晶光学デバイスのレンズ特性における高速フーリエ変換 (FFT) 解析結果を示している。水の流速の測定において流速が速くなるにつれ, 水に分散した微粒子からの散乱光の受光信号に対する FFT 信号の $50 \sim 200\text{Hz}$ 付近の周波数成分が上昇し, スペクトルの傾きが緩やかになる傾向が見られた。

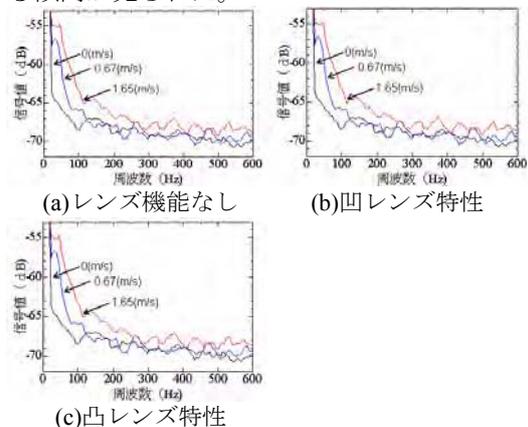


図 15 高速フーリエ変換 (FFT) 解析結果

③血流の周波数解析

人差し指先近傍の血流状態を定常状態、止血時、弛緩時の3段階に変化させて測定したFFTスペクトル解析結果を図16(a)～(c)に示す。図に示すように血液中の赤血球からの反射、散乱光を測定することが可能で止血時では大幅に血流が減少するため、FFTのスペクトルの変化率が大きくなり、積分値 S が小さくなる傾向が見られた。弛緩することにもない血流が速くなり、スペクトルの傾きがなだらかになり積分値 S が増大することが確認できた。次に連続的に止血、弛緩を繰り返して測定を行った。図17は血流状態の変化に対する積分値 S の変化を示している。血管の止血・弛緩に対応して流速が変化していることが分かる。このことから連続的に変化する血流の速度を測定することが可能であると考えられる。

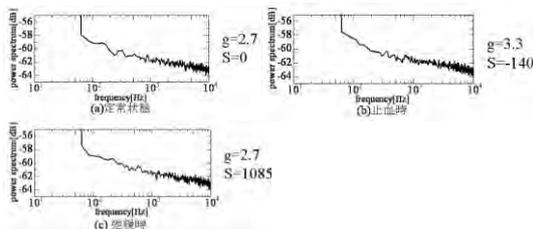


図16 血流状態のFFTスペクトル解析結果

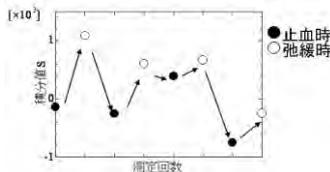


図17 血流状態(止血時・弛緩時)のFFT解析結果

(3)今後の展望

本研究で得られた成果を利用し、機械的駆動部を必要とせず、電圧のみにより光の焦点距離、光偏向機能、干渉効果及び楕円形状の屈折率分布特性を制御することができる液晶光学デバイスを用いた新たな光学応用として“液晶複合レンズを用いた3次元顕微鏡システムの開発”に関する研究を行うことを計画している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① M. Kawamura, H. Goto, Elliptical Light Distribution Control by Using Liquid Crystal Device, International Journal of Optomechatronics, 査読有, Vol.5, 2011, 15-29.
- ② M. Kawamura, Y. Ito, Liquid crystal device with a variable focal length by using two different ring electrodes, The institute of Electrical Engineers of Japan, 査読有, 131, 2010,

53-58.

- ③ M. Kawamura, M. Ye and S. Sato, Transient Properties of a Liquid Crystal Optical Device with an Anamorphic Lens Property, 査読有, 510, 2009, 182-190.
- ④ M. Kawamura, J. Onishi and S. Sato, Laser Manipulation by Using Liquid Crystal Devices with Variable-Focusing and Beam-Steering Functions, International Journal of Optomechatronics, 査読有, 3, 2009, 264-276.
- ⑤ M. Kawamura, M. Ye and S. Sato, Transient Properties of a Liquid Crystal Optical Device with an Elliptical Intensity Distribution, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 47, 2008, 6404-6406.

〔学会発表〕(計19件)

- ① M. Kawamura, and H.Goto, Liquid crystal lens with two divided and double circularly hole-patterned electrodes, ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010.10.26 (Toronto, Canada)
- ② M. Kawamura, H. Goto and S. Sato, Transient properties of a liquid crystal lens with multiple divided circularly hole patterned electrodes, International Symposium on Optomechatronics Technologies ISOT 2009, 2009.9.22 (Istanbul, Turkey)
- ③ M. Kawamura and S. Sato, Liquid crystal lens with divided-circularly hole-patterned electrodes, 2008 International Display Research Conference (IDRC '08), 2008.11.6 (Orlando, Florida, U.S.A.)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 光計測装置

発明者: 河村希典

権利者: 秋田大学

種類: 特開

番号: 2009-240414

出願年月日: 2008年3月31日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ee.akita-u.ac.jp/~liquid-crystal/kawamura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村希典 (KAWAMURA MARENORI)

秋田大学・大学院工学資源学研究所・助教

研究者番号: 90312694