

# 液晶光学素子を用いたベクトルビームの発生と応用

橋本 信幸

## Vector Beam Generation Using Liquid Crystal Optics and Applications

Nobuyuki HASHIMOTO

Phase plates play important roles as devices to generate spatially varying polarization and phase distributions. Since the half wave voltage of liquid crystal cells are only a few volts, liquid crystal phase plates can play important roles as active phase modulators. This manuscript describes liquid crystal optics with multi aligned optical axes and segmented transparent electrodes and their application to vector beam generators. We introduce the application to laser scanning microscopy to generate super-resolved images and observe molecule orientations.

**Key words:** liquid crystal optics, vector beam, radial beam, super resolution, laser scanning microscopy, molecule orientation

空間的な偏光分布や位相分布を得る方法として、位相差板は重要な役割を果たす。なかでも液晶素子は複屈折性をもち、その半波長電圧がわずかに数Vであることから、アクティブな位相変調素子として本質的に優れたデバイスといえる。これは、ELやプラズマ等の発光型表示素子では原理的に成し得ない。この性質に着目し、われわれは液晶空間光変調器による3D動画ホログラフィーの報告や<sup>1)</sup>、空間的偏光分布を得る分割配向型液晶光学素子および空間的位相分布を得る分割電極型液晶光学素子と、その光ピックアップへの適用に関する研究開発を行ってきた<sup>2,3)</sup>。そして2000年には光ピックアップ用液晶収差補正素子を実用化した。

本稿では、方位分割された光学軸あるいは分割透明電極をもち空間的に可変な位相差板を実現する液晶光学素子の特徴と、それを用いたベクトルビーム変換について解説する。そして、液晶ベクトルビーム変換素子をレーザー走査型顕微鏡に応用した超分解観察、および分子配向観察について事例を紹介する。

## 1. 光ビームとその性質

### 1.1 ヘルムホルツ方程式と光波の伝搬モード

電荷や磁化が無視できる真空中において、マックスウェルの方程式を整理し空間と時間に関わる項に変数分離し、さらに空間に関わる部分のみを取り出すと、ヘルムホルツ方程式 ( $\Delta u + k^2 u = 0$ ) が導出される。ここで  $\Delta$  はラプラスの演算子、 $\mathbf{k}$  は波数ベクトルである。パラキシャル近似 (伝搬方向  $z$  に対し複素振幅は緩やかに変化) を導入することで、その解は式 (1) のようになる<sup>4)</sup>。ここでは円筒座標系  $(\rho, \theta, z)$  を用い、 $i$  は虚数単位、 $R$  は波面の曲率半径を表す。また Guoy 位相は省略した。

$$u(\rho, \theta, z) = (1/\rho_0)(\sqrt{2} \rho/\rho_0)^{|m|} f_{n,m} [2(\rho/\rho_0)^2] \exp [-(\rho/\rho_0)^2] \exp [-i(m\theta - kz + k\rho^2)/2R] \quad (1)$$

式 (1) で、最初の指数部はガウス関数で半径  $\rho_0$  をもつガウスビームの振幅を表す。また、関数  $f_{n,m} [2(\rho/\rho_0)^2]$  は  $n, m$  をそれぞれラジアル次数およびアジマス次数としたラゲール多項式 (直交座標系ではエルミート多項式) で、高次ガウスビームのひとつであるラゲールガウスビームを与える。位相項  $\exp [-im\theta]$  に注目すると、 $m$  が 0 以外の場合、位相は方位座標  $\theta$  の一次関数で変化する。こ

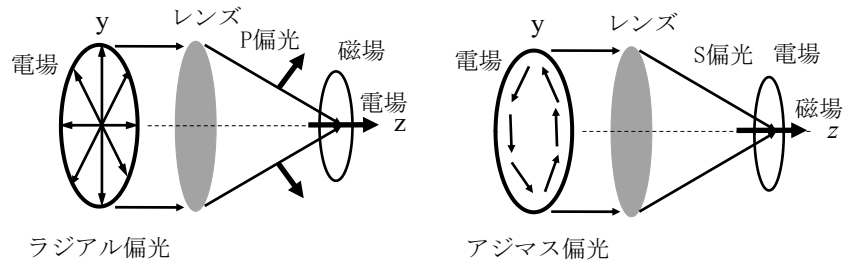


図1 ラジアル偏光およびアジマス偏光とその集光特性.

れは波面（等位相面）軌跡が進行方向  $z$  に対し螺旋を描く軌道角運動量をもったスパイラルビームを表し、 $m$  がアジマス次数といわれる由縁である。スパイラル位相をもつ光波はその中心が位相特異点となりダークスポットを形成する。 $n, m$  ともに 0 の場合は、スパイラル位相をもたない基本ガウスビームを与える。

ラゲールガウスビームはラジアル次数  $n$  に対応したサイドローブをもち、高次のラゲールガウスビームは NA（開口数）の大きいレンズで集光した際に、ガウスビームと比べ深い焦点深度と細いメインローブを与える。複素振幅がベッセル関数となる平面波はヘルムホルツ方程式の直接解を与える。これはベッセルビームといわれ、平面波として伝搬する。

## 1.2 ベクトルビームとその性質<sup>5)</sup>

空間的に偏光分布をもった光は特異な集光特性を示す。その代表的なものとして、図 1 に示す軸対称な偏光分布をもつラジアル偏光およびアジマス偏光があり、ベクトルビームとよばれる。このとき式 (1) は式 (2) で記述される<sup>6)</sup>。

$$u(\rho, \theta, z) = (1/\rho_0)(\sqrt{2} \rho/\rho_0) f_{n,1}[2(\rho/\rho_0)^2] \exp[-(\rho/\rho_0)^2] \exp[-i(-kz + k\rho^2)/2R] \quad (2)$$

軸対称偏光ビームは中心が偏光特異点となり、ダークスポットを形成する。また、NA が 1 に近いレンズで集光することにより、焦点近傍でラジアル偏光では強い  $z$  方向電場が、アジマス偏光では強い  $z$  方向磁場が発生し、定在波を形成する。さらにその周りを径方向の電磁場をもった光の流れが取り囲む。 $z$  方向電場は通常の径方向電場と比べ深度が深く、シャープで丸い集光スポットを形成する。

## 2. 液晶光学素子による光ビーム制御の基礎

前章で述べたベクトルビーム発生のための代表的な手法として、レーザー共振器内に円錐ミラーや結晶等の光学素子を挿入する方法や<sup>7)</sup>、外部に干渉計を構築する方法<sup>8)</sup>、また液晶やフォトニッククリスタル等の特殊な波長板を用いて光を直接変調する方法<sup>9)</sup>がある。しかし、共振器や外部

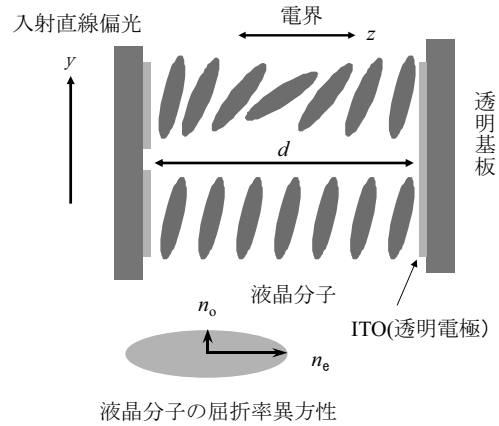


図2 平行配向型液晶素子による位相変調の原理.

干渉計を用いる方法は、構造や調整等が複雑になってしまう。その点で光を直接変調するのは有利であり、なかでも液晶素子は製作が比較的容易かつ電氣的に複屈折性を制御できる。本章では、液晶光学素子として代表的な液晶分子が平行（ホモジニアス）配向された素子の基本構造と、その光学特性に関して概説する。

### 2.1 平行配向型液晶位相変調素子とその作用<sup>10)</sup>

図 2 に平行配向型液晶位相変調素子の基本構造を示す。ITO（透明電極）がコートされたガラス基板にさらに配向膜がコートされ、液晶分子長軸が  $y$  方向に平行配向されている。液晶分子は誘電異方性をもち、一般に分子長軸方向の電場に対する屈折率が大きい。ITO が上下二分割されているとし、上半分の ITO に電圧を加えれば液晶分子が  $z$  方向に傾く。このとき配向方向と同じ入射直線偏光に対する実効屈折率は、上側では  $n_o$ （分子短手方向）に近づく。また下側は  $n_e$ （分子長手方向）のままなので、液晶層厚を  $d$  とし  $(n_e - n_o)$  を  $\Delta n$  とすると、最大で  $k\Delta n d$  の位相変調を行える。ただし、 $k$  は波数である。

中間電圧をかければ液晶は中間状態に傾き、連続的な位相変調が可能である。すなわち平行配向型液晶素子は配向軸（分子長軸）を遅相軸とし、その複屈折量を制御できるアクティブな波長板である。したがって、ITO を適当に分割し、さらに必要に応じて画素ごとに配向方向を変えるこ

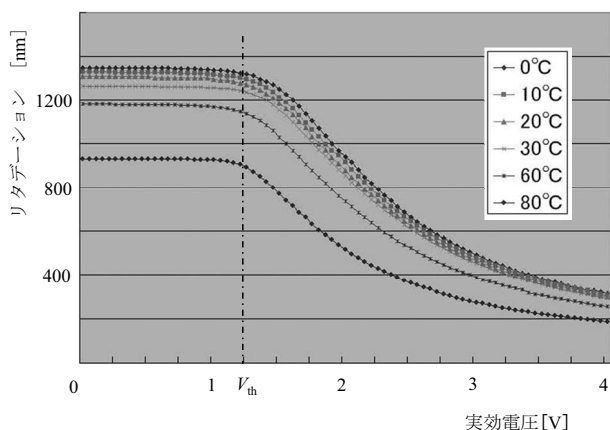


図3 液晶素子の電圧対位相変調特性 ( $\Delta n = 0.2$ , セルギャップ  $d = 6.5 \mu\text{m}$ ).

とで、入射直線偏光の位相や偏光状態を空間的に変調可能である。また  $x$  方向の偏光に対しては、その実行屈折率は分子の傾きにかかわらず常に  $n_o$  となる。

## 2.2 位相変調特性

図3に液晶素子の電圧対位相変調特性を温度特性と合わせて示す。縦軸は  $p$  偏光 (変調される  $y$  方向) と  $s$  偏光の光路差 (リタデーション) で、液晶層厚  $6.5 \mu\text{m}$ , ( $n_e - n_o$ ) が  $0.2$  の場合である。図3より閾値電圧  $V_{th}$  を超えるとリタデーションが低下しはじめるが、ゼロにはならない。これは図2に示すように、配向界面近傍の分子は強いアンカリング力により動かないからである。また、液晶の種類にもよるが、 $40^\circ\text{C}$  近辺から初期のリタデーションも低下をはじめる。

液晶の応答性はセル厚  $d$  の2乗に反比例する。一例として、単純駆動の場合は  $6.5 \mu\text{m}$  の液晶では  $25^\circ\text{C}$  で  $30 \text{ ms}$ ,  $0^\circ\text{C}$  で  $100 \text{ ms}$  程度である。これはフル変調の場合で、中間状態の変調では逆に遅くなる。また、電圧緩和による立ち下がりのほうが、立ち上がりより遅い。

また液晶はアクティブな干渉フィルター特性をもつが、膜設計を最適にすることで駆動による透過率変動を  $\pm 1\%$  以下に抑えられ<sup>10)</sup>、その絶対透過率は無反射コートをしたとき可視光域で  $95\%$  程度である。

## 3. 液晶光学素子によるベクトルビーム変換

### 3.1 分割配向液晶によるベクトルビーム変換

前章で述べたように、平行配向型液晶は位相差板として機能する。図4に、入射直線偏光を放射状のラジアル偏光に変換するための軸方位分割位相差板の構成を示す。図4で位相差板は8分割され、矢印に示された位相差板の軸方位は各領域で異なる。ここで位相差板が入射光の波長に対し半波長板として機能すれば、入射直線偏光は  $2\theta$  ( $\theta$  は

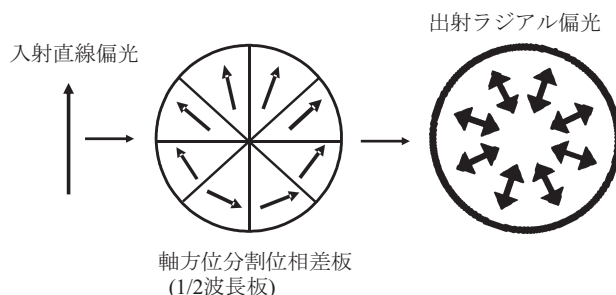


図4 軸方位分割位相差板 (1/2 波長板) によるベクトルビーム変換の原理。

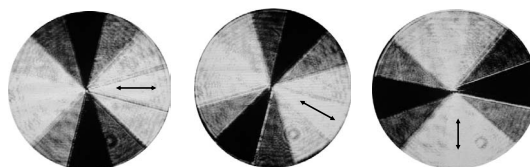


図5 液晶ベクトルビーム変換素子によるラジアル偏光変換 (矢印は観察用偏光板の透過軸)。

入射直線偏光と軸方位のなす角) 回転して出射する。すなわち、各分割領域の軸方位を  $180/n$  度 ( $n$  は分割数) ずつ変えれば、近似的に放射状のラジアル偏光分布をもったベクトルビームを実現できる<sup>11)</sup>。また、図4で入射直線偏光の方位を  $90$  度回転すれば、出射偏光はアジマス偏光となる。

前述の分割波長板は、同様の方位に液晶分子を分割配向した平行配向型液晶素子で実現することができる<sup>12)</sup>。配向分割により境界領域では液晶分子の不正捻れが生じる。よって素子作成ではシミュレーション等の結果をもとに  $12$  分割とし、また透明電極は上下基板ともプレーン電極とした。特定の波長のみ機能するパッシブな素子なら、光反応性液晶等を用いて固定化するのが温度特性等に優れる。しかし電極を介してリタデーションを変調すれば、任意の波長に対してベクトルビーム変換素子として機能する。

試作した液晶ベクトルビーム変換素子に直線偏光を入射しラジアル偏光変換を行い、偏光板を通して観察した写真を図5に示す。矢印は偏光透過軸方位を表す。領域により出射偏光の方位が異なり、 $12$  方位に量子化されたラジアル偏光が得られているのがわかる。

### 3.2 分割画素液晶素子の組み合わせによる偏光モード変換

前述の素子は単体でベクトルビーム変換素子として機能するが、分割配向は特殊な手法である。そこで、図6に示すような液晶偏光モードコンバーターを用いれば、配向軸は一定でリタデーションのみを変えて入射直線偏光を任意に回転できる<sup>13)</sup>。その原理を図で説明する。

図6で左から順に、 $x$  軸 ( $s$  偏光方位) から  $45$  度傾いた入射直線偏光、入射直線偏光と同方位の配向軸をもつ液晶位

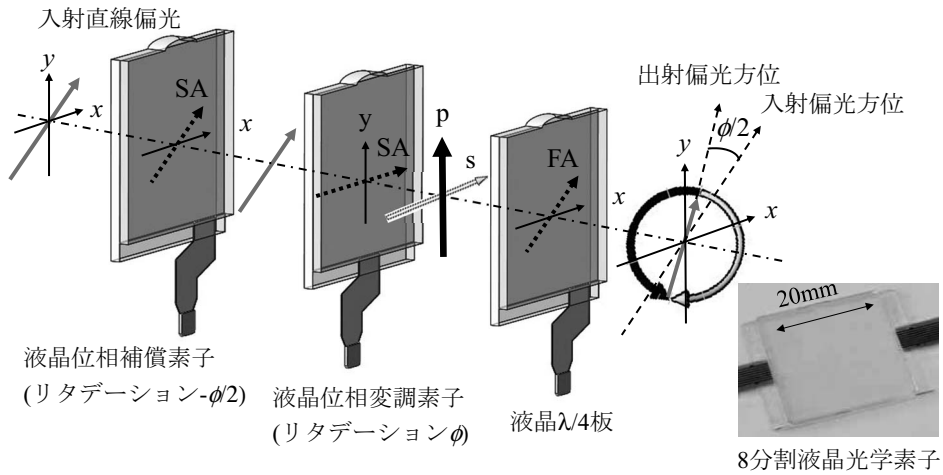


図6 液晶偏光モードコンバーターの構成と8分割画素液晶光学素子の写真。

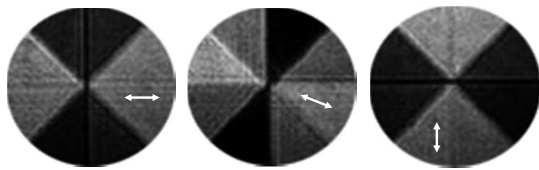


図7 液晶偏光モードコンバーターによるラジアル偏光変換。(矢印は観察用偏光板の透過軸)。

相補償素子,  $x$  軸方向の配向軸 (遅相軸 SA) をもつ液晶位相変調素子, そして最後に  $x$  軸から  $45^\circ$  傾いた進相軸方位 FA をもつ液晶  $\lambda/4$  板から偏光モードコンバーターは構成される. 直線偏光が液晶位相補償素子により  $\xi$  の位相変調を受け, 引き続き液晶位相変調素子により変調される. このとき  $p$  偏光成分と  $s$  偏光成分の位相差を  $\phi$  とする.  $p$  偏光成分はその後液晶  $\lambda/4$  板により左回り円偏光に,  $s$  偏光成分は右回り円偏光に変換されるが, 図6に示すように左回りは  $\phi/2$  位相が進み, 右回りは  $\phi/2$  位相が遅れる (位相差が  $\phi$ ). 結果として左右円偏光の和は, 図に示すように入射偏光方位から  $\phi/2$  だけ傾いた直線偏光となる. また出射直線偏光は液晶位相変調素子により  $\phi/2$  の位相変調を受け, これは偏光回転角に依存している. そのため必要に応じて液晶位相補償素子により  $\xi(-\phi/2)$  の位相補償を行う.

図では簡単にするため1つの画素で説明したが, 実際には例えば8分割され, 各画素を独立に駆動する. 試作した液晶偏光モードコンバーターに直線偏光を入射してラジアル偏光変換し, 偏光板を通して観察した写真を図7に示す. 矢印は偏光透過軸方位を表す. 領域により出射偏光の方位が異なり, 8方位に量子化されたラジアル偏光が得られているのがわかる.

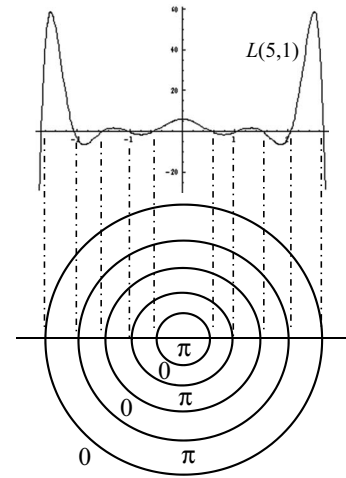


図8 液晶ラゲルガウスビーム変換素子の画素電極パターン設計。

#### 4. 液晶ベクトルビーム変換素子のレーザー走査型顕微鏡への応用

##### 4.1 ラゲルガウスモードラジアル偏光を用いた超分解観察<sup>14)</sup>

図8に, ガウスビームをラゲルガウスビームに変換する液晶光学素子の透明電極パターンを示す. ラジアル次数が5, アジマス次数が1のラゲル関数  $L(5,1)$  の振幅をバイナリー近似したもので, 同心円状のリング電極から構成され, 隣り合う電極間で  $\pi$  の位相差を与える位相フィルターとして用いる.

図9に, 本素子に直線偏光ガウスビームを入射した際の透過光強度分布と, 比較として  $L(5,1)$  ラゲルガウスビームの強度計算値を示す. 偏光板等は用いていないが, ラゲルガウスビームを近似した振幅変調が行われているのがわかる.

図10に, ラゲルガウスビーム変換および12分割ラジ



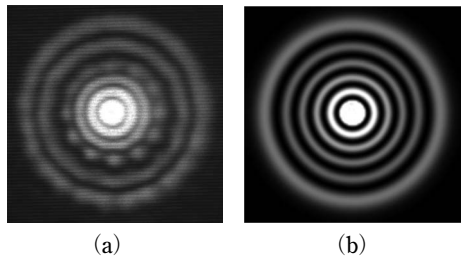


図9 液晶ラゲールガウスビーム変換素子の透過光強度分布 (a) とその計算値 (b).

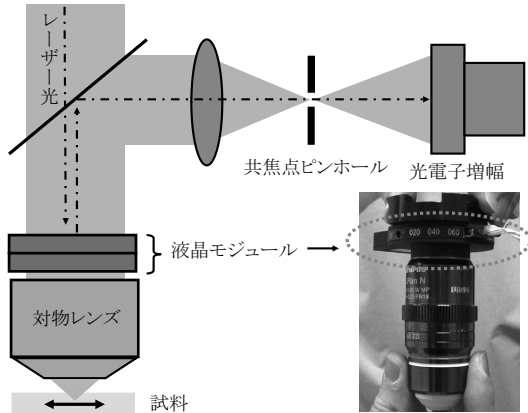


図10 液晶ラゲールガウスモードラジアル偏光変換素子を取り付けた共焦点顕微鏡と対物レンズの写真.

アル偏光変換の液晶光学素子から構成される液晶モジュールを対物レンズに組み付けた写真と、レーザー共焦点顕微鏡の構成を示す。理想的には光学系の瞳位置に設置する必要があるが、本構成では既存の顕微鏡を改造することなく簡単に取り付けることができる。

本モジュールを  $NA$  が 1.2 水浸の対物レンズと組み合わせることで、集光スポットの半値幅は直線偏光ガウスビー

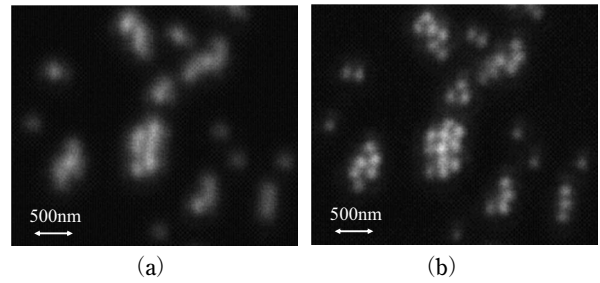


図11 液晶ラゲールガウスモードラジアル偏光変換モジュールを用いたレーザー共焦点顕微鏡 ( $NA = 1.2$ , 波長 488 nm) による 170 nm 蛍光ビーズ観察<sup>12)</sup>. (a) 液晶モジュールオフ, (b) 液晶モジュールオン.

ムと比較して平均的 ( $y$  方向と  $x$  方向の平均) に 30% 程度細く、また円形のスポットが得られる。このとき中心強度は 30% 程度に低下し、さらにサイドローブも発生するが、共焦点顕微鏡ではピンホールで、多光子や SHG (second harmonic generation) 観察ではその強い非線形性により影響を除去可能である。

図11に170 nmの蛍光ビーズを観察した写真を示す。波長は488 nmを用いた。液晶ラゲールガウスモードラジアル偏光変換モジュールを動作させることで、スポットサイズの半値幅(計算値)は330 nmから200 nmとなる。その結果、通常では解像されない蛍光ビーズが解像されることがわかる。

また、本素子をオンオフし焦点面で  $y$  偏光と  $z$  偏光を切り替え、SHG を用いて PDLC (ポリマー分散型液晶) のポリマー界面における液晶分子配向観察も可能である<sup>15)</sup>。常誘電性の液晶分子は反転対称性をもち、SHG は観測されないが、ポリマー界面においては対称性が打ち消される。

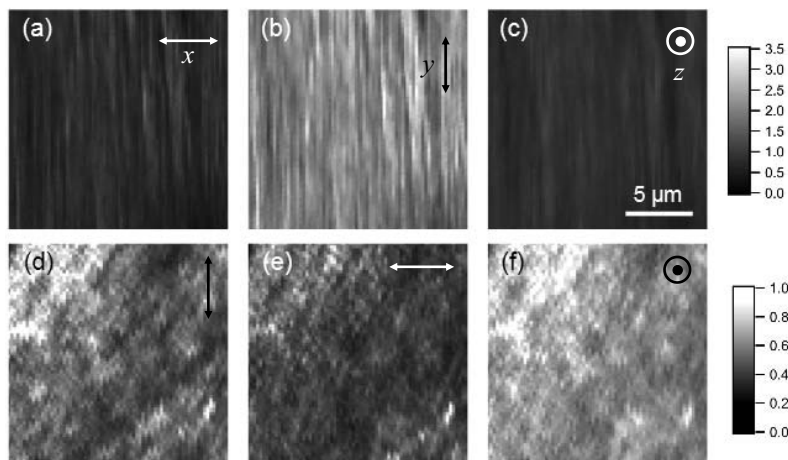


図12 液晶偏光モードコンバーターを用いた SHG 顕微鏡 ( $NA = 1.4$ , 波長 800 nm) によるヒトのコラーゲン繊維の観察<sup>16)</sup>.

## 4.2 偏光モードコンバーターを用いた分子配向の観察<sup>16)</sup>

3.2節で述べた液晶偏光モードコンバーターは電圧により入射直線偏光を連続的に回転できる。ここでは8分割画素から構成される液晶偏光モードコンバーターを取り付けた対物レンズをSHG顕微鏡に適用した。光源はチタンサファイヤレーザー(800 nm)、対物レンズはNA 1.4油浸を用い、観察試料として20  $\mu\text{m}$ にスライスした人のコラーゲンファイバーを用いた。発生した透過SHG光はNA 1.46の対物レンズで受光される。コラーゲンファイバーはその繊維軸方向の偏光に対し強いSHGを示すことが知られている。

図12に実験結果を示す。液晶偏光モードコンバーターを用い、入射直線偏光を焦点面でx, y, z偏光に変換した。上側はコラーゲンを繊維軸(z軸)方向に平行に、下側は繊維軸方向と垂直方向にスライスした試料での結果である。また、偏光モードコンバーターで変換した偏光方向を図中に矢印で示した。図より、繊維軸方向に平行にスライスしたものは、xもしくはy方向の偏光に対し強いSHGが観察される。また、垂直方向にスライスしたものは、z方向の偏光に対し強いSHGが観察されているのがわかる。

平行配向された液晶光学素子の特徴と、それを応用した液晶ベクトルビーム変換素子について解説した。さらに、本素子をレーザー走査型顕微鏡に適用した超分解観察や、分子配向観察の事例も報告した。ここで述べた液晶光学素子はマトリクス画素駆動型と比べ表示の自由度は少ないが、透過型で構成が簡単なため、既存の光学系に容易に適用できる。また、ここでは紹介できなかったが、高次光渦を発生させるための液晶光学素子や<sup>17)</sup>、強誘電性液晶光学素子を用いた偏光干渉によるステラコーナグラフ等のアプリケーションも興味深い<sup>18)</sup>。今後は液晶光学技術の開発と実用化の経験を生かし、既存分野のみならず新たな光学技術の開発とその実用化に貢献していきたい。

## 文 献

- 1) N. Hashimoto and S. Morokawa: "Real-time electro holographic system using liquid crystal television spatial light modulators," *J. Electro. Imaging*, **2** (1993) 93-99.
- 2) 橋本信幸, 諸川 滋: "液晶超解像光学素子と光ピックアップ

- への応用", 電子情報通信学会技術研究報告報(CPM), **99** (1999) 15-20.
- 3) 橋本信幸: "液晶による波面補正とその応用", *光学*, **36** (2007) 149-153.
  - 4) M. W. Beijersbergen, L. A. van der Veen and J. P. Woerdman: "Astigmatic laser mode converters and the transfer of orbital angular momentum," *Opt. Commun.*, **96** (1993) 123-132.
  - 5) 小澤祐市, 佐藤俊一: "ベクトルビーム一覚醒する光波の潜在能力", *応用物理*, **82** (2013) 27-32.
  - 6) A. V. Nesterov and V. G. Niziev: "Laser beams with axially symmetric polarization," *J. Phys. D*, **33** (2000) 1-6.
  - 7) Y. Kozawa, K. Yonezawa and S. Sato: "Radially polarized laser beam from a Nd:YAG laser cavity with a c-cut YVO<sub>4</sub> crystal," *Appl. Phys. B*, **88** (2007) 43-46.
  - 8) S. C. Tidwell, D. H. Ford and W. D. Kimura: "Generating radially polarized beams interferometrically," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 2234-2239.
  - 9) M. Stalder and M. Schadt: "Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1948-1950.
  - 10) N. Hashimoto: "Electro holography and active optics," *Optical applications of liquid crystals*, ed. L. Vicari (Taylor & Francis, 2003) pp. 62-117.
  - 11) R. Dorn, S. Quabis and G. Leuchs: "Sharper focus for a radially polarized light beam," *Phys. Rev. Lett.*, **91** (2003) 233901.
  - 12) 橋本信幸, 齋藤友香, 田辺綾乃, 栗原 誠, 小澤祐市, 佐藤俊一, 日比正輝, 根本知己: "軸偏光超解像スポット生成用液晶ベクトルビーム素子の設計", *Optics and Photonics Japan 講演予稿集* (2010) pp. 448-449.
  - 13) M. Hashimoto, K. Yamada and T. Araki: "Proposition of single molecular orientation determination using polarization controlled beam by liquid crystal spatial light modulators," *Opt. Rev.*, **12** (2005) 37-41.
  - 14) 一本嶋佐理, 日比輝正, 小澤祐市, 洞内 響, 佐藤綾耶, 栗原 誠, 橋本信幸, 横山弘之, 佐藤俊一, 根本知己: "高次径偏光ビームによる超解像イメージング", *バイオイメージング*, **20** (2011) 193-194.
  - 15) A. Tanabe, Y. Saito, M. Kurihara, N. Hashimoto, Y. Kozawa, S. Sato, T. Hibi and T. Nemoto: "Observation of PDLCs by SHG laser scanning microscopy using a liquid crystal vector beam generator," *Proc. SPIE*, **8279** (2012) 82790L.
  - 16) K. Yoshiki, R. Kanamaru, M. Hashimoto, N. Hashimoto and T. Araki: "Second-harmonic-generation microscope using eight-segment polarization-mode converter to observe three-dimensional molecular orientation," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1680-1682.
  - 17) 福本良平, 岡 和彦, 坂本盛嗣, 村上尚史, 森田隆二, 栗原誠, 橋本信幸: "2枚の軸対称半波長板を用いた  $l = 4$  の光渦生成における分散低減(II)", *Optics and Photonics Japan*, **23pB5** (2012).
  - 18) N. Baba, N. Murakami, T. Ishigaki and N. Hashimoto: "Polarization interferometric stellar coronagraph," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1373-1375.

(2013年8月6日受稿)