

# 光学異方性粒子の光捕捉とマニピュレーション

日暮 栄治

光は運動量を有するため、反射・屈折・吸収により運動量変化が生じたときに、放射圧 (radiation pressure) が作用する。1970年、Ashkinは放射圧による誘電体微粒子の光トラップに初めて成功した<sup>1)</sup>。その後、微粒子を非接触操作する光ピンセット技術として、生物物理、マイクロ化学の分野で精力的に研究が行われてきた。

最近では、転送や移動のほか、光トラップした微粒子にトルクを付与する新しい光マニピュレーション技術が開発され、その操作性、制御性も一段と向上している。円偏光ビーム<sup>2)</sup>や異方性強度プロファイルを有する回転ビーム<sup>3)</sup>による微粒子回転操作、マイクロマシニングで作製した形状異方性 (断面形状が鏡面对称性をもたない) 回転体<sup>4-6)</sup>、空中での高速回転<sup>7)</sup>、金属微粒子を付着した回転粒子<sup>8)</sup>、回転トラップ粒子を利用したマイクロ加工<sup>9)</sup>、マイクロ攪拌<sup>10)</sup>など、研究も一段と広がりを見せている。解析もトルク解析<sup>11)</sup>に加えて動的な運動解析も行われるようになった<sup>12,13)</sup>。以上のように放射圧はマイクロマシンの分野で新しい駆動源としてもその応用が期待されている<sup>14)</sup>。

さらに放射圧は、マイクロ部品の微細組み立て手段として用いることが可能である。部品の微小化が進めば、従来のピンセットでつかむことは難しくなる。吸引ピペットなどによる機械的操作に比べ、非接触に操作でき、回折限界まで集光したレーザー光を精密位置制御するため、空間制御性にすぐれている。トラップ粒子の接着<sup>15)</sup>、構造物組み立て<sup>5)</sup>、空中での組み立て<sup>16,17)</sup>、トラップ粒子の基板への固定<sup>18)</sup>などが報告されている。このような微細組み立て応用においては、さらに粒子を所望の角度にアライメントする操作性の高い新しい光マニピュレーション技術を開発

する必要がある。

筆者らは波長板など光の偏光制御に用いられる光学異方性材料に着目し、光トラップした光学異方性粒子が直線偏光ビームによりアライメントされる現象を見いだした<sup>19-21)</sup>。また複屈折カルサイト破片粒子でも観察された<sup>22)</sup>。本稿では、光誘起アライメント現象のメカニズム、マイクロマシニングで作製したマイクロ光部品アライメントへの応用<sup>23)</sup>など筆者らが最近行った光学異方性粒子のマニピュレーションの研究を中心に紹介する。

## 1. 光誘起アライメント現象

光は波としての性質とともに粒子としての性質を併せもつ。すなわち、光は  $h\nu$  ( $h$ : プランク定数,  $\nu$ : 振動数) のエネルギーと  $h\nu/c$  ( $c$ : 光速) の運動量をもつフォトンとしてふるまう。さらに、フォトンには角運動量を有する。全角運動量成分はスピン角運動量 (spin angular momentum) と軌道角運動量 (orbital angular momentum) に分けられる。円偏光のフォトンには  $\pm\hbar$  ( $\hbar = h/2\pi$ ) のスピン角運動量を有する<sup>24)</sup>。また、らせん状の波面をもつ位相特異性ラゲール・ガウシアン (Laguerre-Gaussian) モードのレーザービームのフォトンには、軌道角運動量をもつ<sup>25-28)</sup>。

これらの角運動量を吸収により粒子に受け渡すことにより、トラップした粒子を容易に回転させることが可能である<sup>2,25-28)</sup>。一方、光学異方性材料を用いれば、透過光を用いても角運動量の受け渡しが可能である。図1は、光学異方性を有する位相板に光が上方から入射したときの角運動量 (偏光状態) 変化を示したものである。円偏光ビームによる回転 (図1(b), (c)) に加えて、さらに位相板のリタデーション (retardation,  $\Delta n \cdot d$ ,  $n$ : 屈折率,  $\Delta n$ : 位相板の複屈折率  $= n_{\text{slow}} - n_{\text{fast}}$ ,  $d$ : 位相板の厚さ) が  $\lambda/$

NTT 通信エネルギー研究所 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1)

E-mail: eiji@aecl.ntt.co.jp

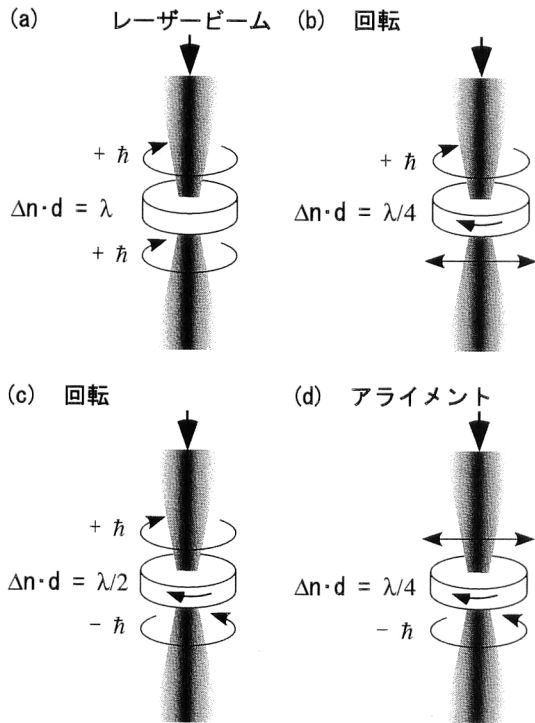


図1 位相板による光の角運動量の変化と作用するトルク。(a) リタデーション  $\Delta n \cdot d = \lambda$  (ここで  $\Delta n$  は複屈折率,  $d$  は位相板の厚さ,  $\lambda$  は波長), 角運動量変化  $\Delta l = 0$ , (b)  $\Delta n \cdot d = \lambda/4$ ,  $\Delta l = \hbar$ , (c)  $\Delta n \cdot d = \lambda/2$ ,  $\Delta l = 2\hbar$ , (d)  $\Delta n \cdot d = \lambda/4$ ,  $\Delta l = \hbar$ .

4 ( $\lambda$ : 波長) の場合, 角運動量をもたない直線偏光のレーザービームを用いても, トルクを付与することが可能である (図1(d)). このトルクを粒子のアライメントに用いる.

図2に, 光トラップした光学異方性粒子の角度位置による偏光状態の変化と作用するトルクを示す. 特に, ガウシアンビームの光軸付近の光に着目する. トラップした複屈折を有する粒子は, レーザービームの光軸 ( $z$  軸) に垂直な面内に中性軸 (高速軸と低速軸) を有し, リタデーションが  $\Delta n \cdot d \neq m\lambda$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) の場合を示す. 図2(b) 左側に示すように入射電場の振動面と光学異方性粒子の中性軸がある角  $\theta$  をなす場合 (振動面と中性軸が一致しない場合), 透過光は直線偏光から楕円偏光となり角運動量を有するようになる. すなわち, この角運動量が粒子から光へ加えられたわけであり, その反作用として粒子は反対向きのトルクを受け取り角運動量が保存される. このトルクにより粒子は回転する. 電場の振動面が粒子の中性軸と一致した場合 (図2(b) 右側), 粒子を透過したビームは直線偏光のままであるため角運動量の受け渡しはなくなりトルクは働かない. このように電場の振動面と粒子の中性軸が一致するように角度アライメントが実現される.

粒子に作用するトルクは変化した光の角運動量から見積

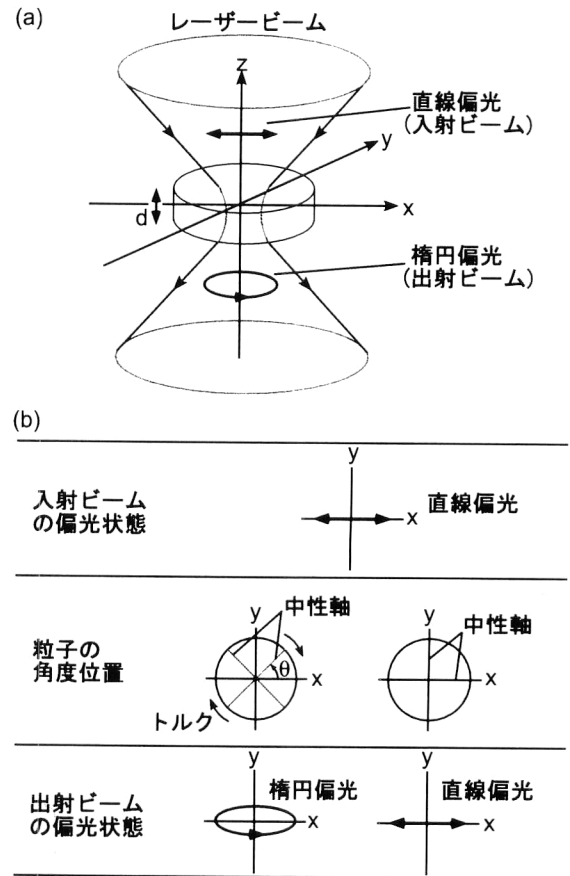


図2 光学異方性粒子の光誘起アライメント現象. (a) 光トラッピングの様子, (b) 粒子の角度位置による偏光状態の変化と作用するトルク.

もることができる. 直線偏光のビームが複屈折率位相板を透過した結果生じた楕円偏光のビームの角運動量密度は,

$$J = \frac{\epsilon}{2\omega} E_0^2 \sin(k \cdot \Delta n \cdot d) \sin(2\theta) \hat{i} \quad (1)$$

で与えられる<sup>21,22</sup>. ここで,  $\epsilon$  は誘電率,  $\omega$  は角周波数,  $\theta$  は低速 (中性) 軸の角度 (電場の振動面に対する),  $k$  は波数である. すなわち, 光学異方性粒子に作用するトルクは, 図3に示すように  $-T_{\max} \sin(k \cdot \Delta n \cdot d) \sin(2\theta)$  で変化する. 最大のトルクは,  $\theta = \pm 45^\circ$ ,  $\Delta n \cdot d = (2m+1)(\lambda/4)$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ ) で生じ, 粒子を透過した光は完全な円偏光状態となり1フォトンあたり  $\pm \hbar$  の角運動量を有する. 例えばパワー  $P=10 \text{ mW}$  ( $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ) の場合, 最大トルクは  $T=6 \times 10^{-18} \text{ N m}$  となる. このトルクは入射レーザーパワーに比例する.

## 2. 光学異方性粒子の作製

光学異方性粒子の材料には, 光通信用に開発されたフッ素化ポリイミド<sup>29)</sup>を用いた. フッ素化ポリイミドを選択したのは, (1) 屈折率, 複屈折率を精密に制御できる,

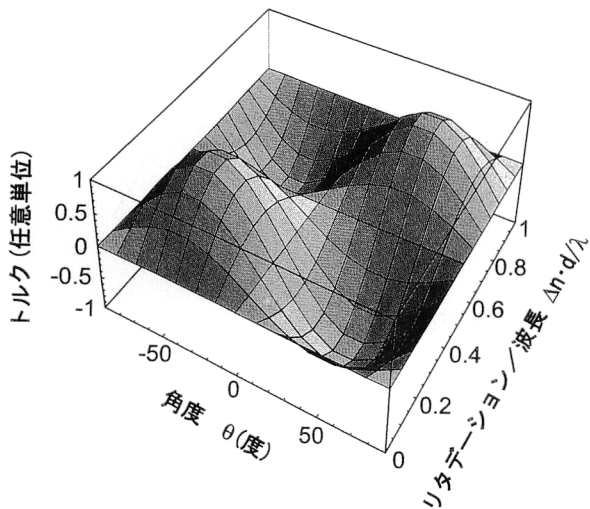


図3 光学異方性粒子に作用するトルク解析結果。

(2) 無機材料(方解石, 水晶など)に比べて加工性にすぐれている, (3) 光透過性にすぐれている, ためである。ジアミンにTFDB (2,2'-bis(trifluoromethyl)-4,4'-diaminobiphenyl), 酸二無水物に6FDA (2,2'-bis(3,4-dicarboxyphenyl)hexafluoropropane dianhydride)とPMDA (pyromellitic dianhydride)を用いて2種類のポリイミド(6FDA/TFDB, PMDA/TFDB)が合成される。さらにこれらを共重合することで屈折率, 複屈折率を制御できる。本実験では, 高複屈折率を示す剛直性フッ素化ポリイミド(PMDA/TFDB)<sup>29)</sup>を用いた。ポリイミド光学異方性粒子の作製は, 以下に示す厚さ方向, 面内方向に複屈折を有する2種類のポリイミドフィルムを使用して行った(図4)。

厚さ方向に複屈折を有するポリイミドフィルムは, 前駆体であるポリアミド酸溶液をシリコン基板上にスピコートにより塗布し, 熱処理によるイミド化を行い作製される(図4(a))。また, 面内に複屈折を有するポリイミドフィルムは, ポリアミド酸溶液を塗布して溶媒を乾燥し, 剥離したポリアミド酸フィルムを延伸処理しながら熱イミド化することにより作製される(図4(a'))<sup>30)</sup>。これらポリイミドフィルムをフォトリソグラフィー, 反応性イオンエッチングにより加工することにより, 光学異方性粒子が作製される<sup>21,23)</sup>。図5にそれぞれの方法で作製した光学異方性粒子の走査電子顕微鏡写真を示す。厚さ方向に複屈折を有する光学異方性粒子は(図5(a)), 水中でトラップしたときに基板上ポリイミドフィルムの側面がレーザー入射面になるようにトラップする(このとき, レーザービームの光軸と複屈折の中性軸が直交)。そのため, 粒子の形状は制限される。一方, 面内に複屈折を有する光学異方性粒子(図5(b))は, 基板上ポリイミドフィルムの上面がレーザー

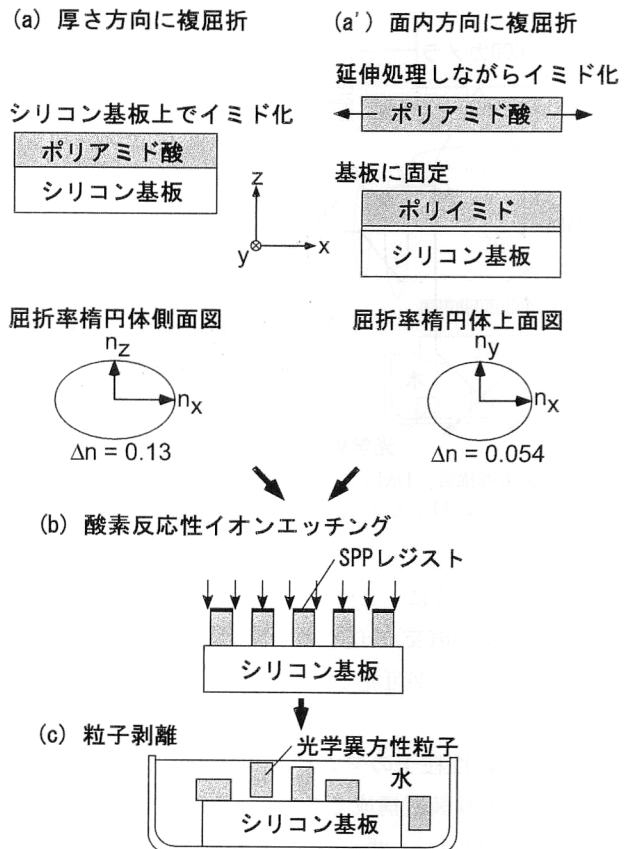


図4 ポリイミド光学異方性粒子の作製方法。

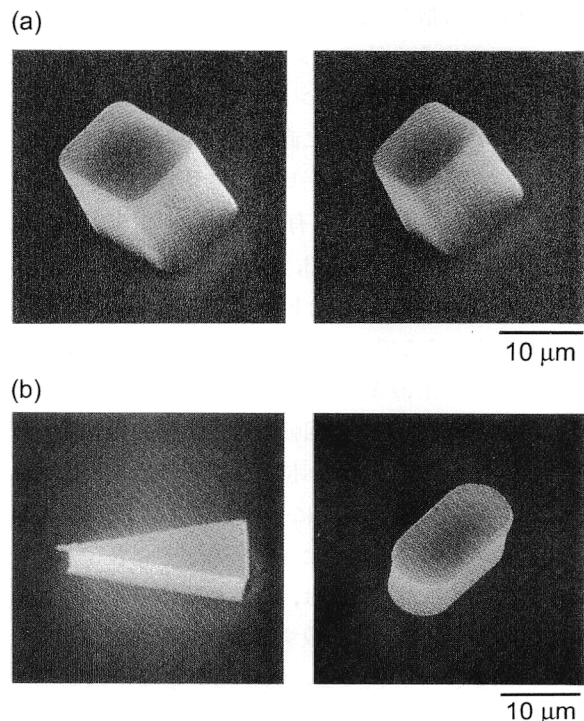


図5 作製したポリイミド光学異方性粒子の走査電子顕微鏡写真。(a) 厚さ方向に複屈折を有する粒子, (b) 面内方向に複屈折を有する粒子。

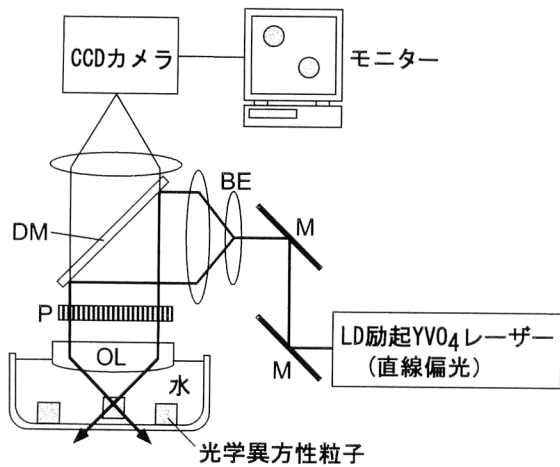


図6 実験装置構成。DM：ダイクロイックミラー，BE：ビームエキスパンダー，M：ミラー，P： $\lambda/2$ 板，OL：対物レンズ。

入射面になるようにトラップするので（ビームの光軸と複屈折の中性軸が直交），任意の断面形状を有する光学異方性粒子を得ることが可能である。

### 3. 光学異方性粒子のマニピュレーション

図6は，実験装置構成である。光源には，連続発振のLD励起YVO<sub>4</sub>レーザー（直線偏光， $\lambda=1.064\ \mu\text{m}$ ，TEM<sub>00</sub>モード）を用いた。このレーザー光を光学顕微鏡に導入し，水浸対物レンズ（60倍，開口数NA=0.9，作動距離：2mm）で集光照射する。光学異方性粒子は水中（ $n=1.33$ ）に分散した。ミラー面での光の振動面の回転，および楕円偏光化を防ぐために，ミラーへの入射光はS偏光にした。また，対物レンズの直上に取り付けた $\lambda/2$ 板の回転により，任意方向に直線偏光を回転できる。

図7は，直線偏光レーザービームを用いて光学異方性粒子（厚さ方向に複屈折を有するポリイミドPMDA/TFDB，複屈折率 $\Delta n=0.13$ ，厚さ $d=10\ \mu\text{m}$ ，リタデーション $\Delta n \cdot d=0.12\lambda$ ）を光トラップ，アライメントした様子である<sup>21)</sup>。ここで，ビームは写真に垂直に入射している。対物レンズ上の $\lambda/2$ 板（図6）を $\theta^\circ$ 回転することにより光学異方性粒子は $2\theta^\circ$ 回転した。電場の振動面の回転に粒子は追従し，任意角度へ位置決め可能であった。さらに，電場の振動面が高速軸に一致するように光を入れても，低速軸が電場の振動面に一致するように粒子が回転する現象が観察された。これは，高速軸は不安定点であり，電場の振動面が低速軸に一致するように復元力が働くためである（図3）。この例では，低速軸が電場の振動面と一致したが，振動面と一致する軸（低速軸または高速軸）は粒子のリタデーションで決まる。図8は，さまざまなリタデーションを有する光学異方性粒子をアライメントした写

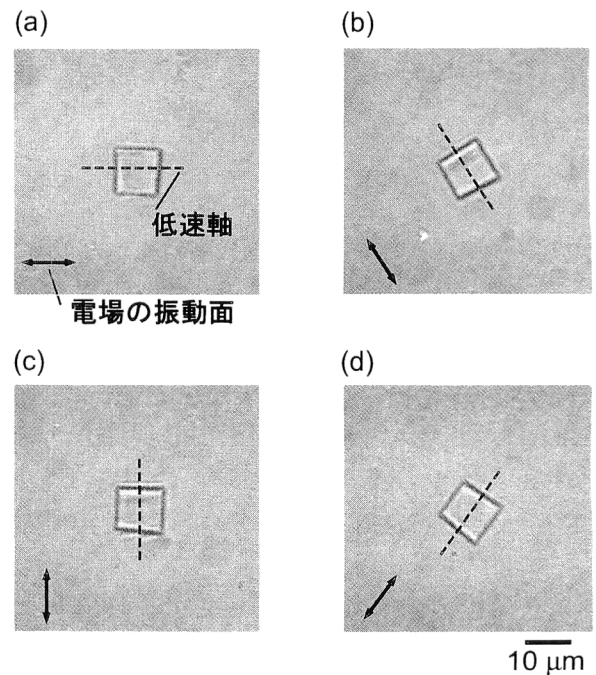


図7 光学異方性粒子の光誘起アライメント（写真左下に入射レーザー光の電場振動面を示す）。

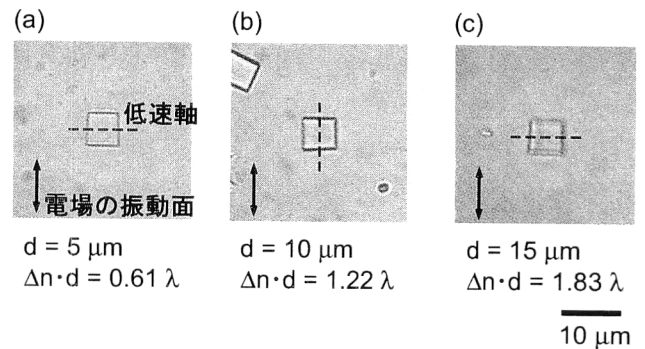


図8 異なるリタデーション（ $\Delta n \cdot d$ ）をもつ粒子の光誘起アライメント（写真左下に入射レーザー光の電場振動面を示す）。

真である<sup>21)</sup>。リタデーションが $m\lambda < \Delta n \cdot d < (2m+1)(\lambda/2)$  ( $m=0,1,2,\dots$ )の場合，低速軸が電場の振動面と一致するようにアライメントされ， $(2m-1)(\lambda/2) < \Delta n \cdot d < m\lambda$  ( $m=1,2,3,\dots$ )の場合，高速軸が電場の振動面と一致する。これは，粒子透過後の楕円偏光の回転方向が，それぞれの場合で反転し，作用するトルクの向きも反転するためである。

さらにマイクロ光部品のアライメントへの応用を目指し，面内に複屈折率を有するポリイミドフィルムを用いてマイクロレンズ，マイクロプリズムを作製した。使用したフィルムは，複屈折率 $\Delta n=0.054$ ，厚さ $d=14.4\ \mu\text{m}$ ，リタデーション $\Delta n \cdot d=0.76\lambda$ である。図9に，マイクロレンズ，プリズムのアライメントの様子を示す<sup>23)</sup>。マイクロレンズ，プリズムの側面に放射圧が作用しないように2次

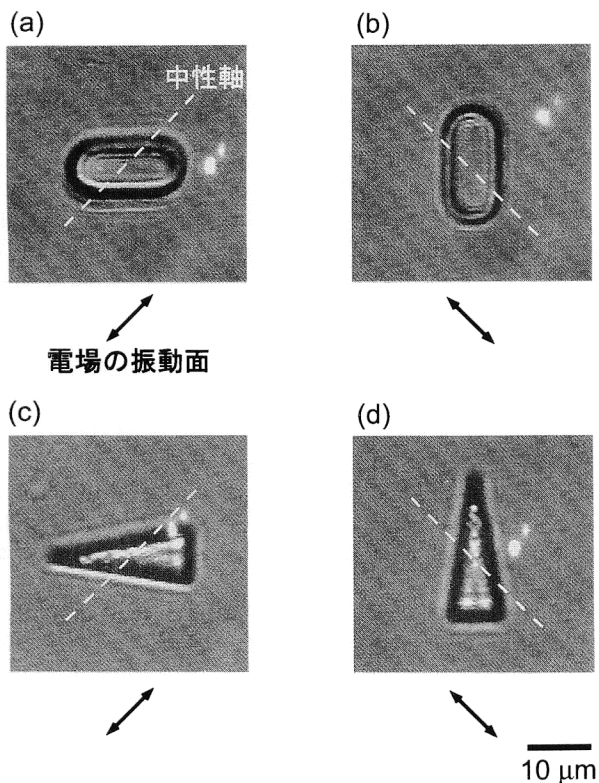


図9 マイクロレンズ、プリズムの光誘起アライメント (写真の下に入射レーザー光の電場振動面を示す)。

元的に基板上で光トラップした。電場の振動面の方向を制御することにより、任意の角度位置にアライメントすることができた。

アライメントした光学異方性粒子は、周囲の水分子が衝突によって与える運動量のゆらぎ (ブラウン運動) のためランダムな角度ゆらぎをともなう。この角度ゆらぎは、エネルギー等分配則から見積もることができる<sup>21)</sup>。

$$\frac{1}{2}k_{\theta}\langle\theta^2\rangle = \frac{1}{2}k_B T \quad (2)$$

ここで、 $k_{\theta}$  は回転に関するばね定数、 $\langle\theta^2\rangle$  は角度変位の2乗平均、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度である。例えば、レーザーパワー  $P=100$  mW の場合、マイクロ光部品 ( $\Delta n \cdot d = 0.76\lambda$ ) の角度ゆらぎは  $0.35^\circ$  である。リタデーションを最適 ( $\Delta n \cdot d = (2m+1)(\lambda/4)$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ )) 化し、入射レーザーパワーを大きくすることにより、さらに高精度な角度アライメントが可能である。

また、入射ビームの偏光状態を直線偏光から円偏光にすることにより、粒子を容易に連続回転させることができる<sup>21,22)</sup>。円偏光ビームの吸収を利用した連続回転では、粒子の損傷になるためあまり大きなパワーを入射できない。一方、この透明な光学異方性粒子を用いると、リタデーションが  $\Delta n \cdot d = (2m+1)(\lambda/2)$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ ) の場合、

入射円偏光の有する角運動量の2倍のトルクを付与することが可能である (図1(c) 参照, 吸収の場合最大でも1倍まで)。また、透明粒子は3次元的な光トラッピングも容易である。

マイクロ位相板を円偏光の角運動量で連続回転駆動させ、信号光を強度変調する試みが行われ、微小光学素子の光駆動による光波制御の可能性が示されている<sup>31)</sup>。また、光学異方性粒子をマイクロマシニングで作製した粒子 (光学異方性をもたない) に付着させて光駆動することも最近行われている<sup>32)</sup>。

直線偏光レーザービームを用いた光学異方性粒子の光トラップと光誘起角度アライメント現象を解説した。レーザー光が光学異方性粒子を透過したときに変化した角運動量が微粒子に働くアライメントトルクとなる。本稿では、光学異方性を有する固体微粒子のマニピュレーションを紹介したが、液晶材料についてもアライメント、回転現象が報告されているので参照されたい<sup>33-35)</sup>。

将来、光のみを用いて、マイクロ部品を転送し、位置決め、角度アライメントを行って組み立て、接着、さらに駆動、加工などを行うことが可能になると考えられる。マイクロ・ナノ領域空間での新しいアクチュエーション手法として発展することを期待したい。

## 文 献

- 1) A. Ashkin: "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970) 156-159.
- 2) 杉浦忠男, 河田 聡, 南 茂夫: "円偏光レーザービームを用いた顕微鏡下での粒子の回転操作", *分光研究*, **39** (1990) 342-346.
- 3) S. Sato, M. Ishigure and H. Inaba: "Optical trapping and rotational manipulation of microscopic particles and biological cells using higher-order mode Nd:YAG laser beams," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1831-1832.
- 4) E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi: "Optically induced rotation of anisotropic micro-objects fabricated by surface micromachining," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 2209-2210.
- 5) E. Higurashi, O. Ohguchi, T. Tamamura, H. Ukita and R. Sawada: "Optically induced rotation of dissymmetrically shaped fluorinated polyimide micro-objects in optical traps," *J. Appl. Phys.*, **82** (1997) 2773-2779.
- 6) E. Higurashi, R. Sawada and T. Ito: "Optically induced rotation of a trapped micro-object about an axis perpendicular to the laser beam axis," *Appl. Phys. Lett.*, **72** (1998) 2951-2953.
- 7) R. Omori, K. Shima and A. Suzuki: "Rotation of optically trapped particles in air," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) L743-L745.
- 8) Z. P. Luo, Y. L. Sun and K. N. An: "An optical spin mi-

- cromotor," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 1779-1781.
- 9) H. Shimizu, T. Miyoshi, Y. Takaya and S. Takahashi: "Study on micro-machining using optical radiation pressure," *1st International Euspen Conference*, Bremen (1999) pp. 199-202.
  - 10) H. Ukita and M. Idaka: "Visualization and analysis of a micro-flow generated by an optical rotator," *Opt. Rev.*, **7** (2000) 448-450.
  - 11) R. C. Gauthier: "Ray optics model and numerical computations for the radiation pressure micromotor," *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 2269-2271.
  - 12) R. C. Gauthier and M. Ashman: "Simulated dynamic behavior of single and multiple spheres in the trap region of focused laser beams," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6421-6431.
  - 13) J. S. Kim and S. W. Kim: "Dynamic motion analysis of optically trapped nonspherical particles with off-axis position and arbitrary orientation," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 4327-4332.
  - 14) 日暮栄治: "マイクロ光アクチュエーター", *O plus E*, **20** (1998) 43-49.
  - 15) H. Misawa, K. Sasaki, M. Koshioka, N. Kitamura and H. Masuhara: "Multibeam laser manipulation and fixation of microparticles," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 310-312.
  - 16) R. Omori and A. Suzuki: "Formation of three-dimensional spatial patterns of glass particles using a single-beam gradient-force optical trap in air," *Proc. SPIE*, **3097** (1997) 685-690.
  - 17) 池野順一, 澤木大輔, 森 幸博, 堀内 幸: "レーザー光線を利用した3次元微小構造物の組立技術に関する研究(第1報, 空中における微粒子の操作法と組立法の提案)", *日本機械学会論文集(C編)*, **64** (1998) 4434-4439.
  - 18) J. Won, T. Inaba, H. Masuhara, H. Fujiwara, K. Sasaki, S. Miyawaki and S. Sato: "Photothermal fixation of laser-trapped polymer microparticles on polymer substrate," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 1506-1508.
  - 19) E. Higurashi, R. Sawada and T. Ito: "Alignment and orientation of birefringent micro-objects using optical radiation pressure of linearly polarized laser beams," *International Conference on Optical MEMS and Their Applications (IEEE/LEOS IEEJ/SAMS, 1997)* pp. 186-189.
  - 20) E. Higurashi, R. Sawada and T. Ito: "Optically induced angular alignment of birefringent micro-objects by linear polarization," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 3034-3036.
  - 21) E. Higurashi, R. Sawada and T. Ito: "Optically induced angular alignment of trapped birefringent micro-objects by linearly polarized light," *Phys. Rev. E*, **59** (1999) 3676-3681.
  - 22) M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg and H. Rubinsztein-Dunlop: "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles," *Nature*, **394** (1998) 348-350.
  - 23) E. Higurashi, R. Sawada and T. Ito: "Optically driven angular alignment of microcomponents made of in-plane birefringent polyimide film based on optical angular momentum transfer," *J. Micromech. Microeng.*, **11** (2001) 140-145.
  - 24) R. A. Beth: "Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light," *Phys. Rev.*, **50** (1936) 115-125.
  - 25) H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg and H. Rubinsztein-Dunlop: "Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity," *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995) 826-829.
  - 26) M. E. J. Friese, J. Enger, H. Rubinsztein-Dunlop and N. R. Heckenberg: "Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles," *Phys. Rev. A*, **54** (1996) 1593-1596.
  - 27) N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen and M. J. Padgett: "Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: An optical spanner," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 52-54.
  - 28) A. T. O'Neil and M. J. Padgett: "Three-dimensional optical confinement of micron-sized metal particles and the decoupling of the spin and orbital angular momentum within an optical spanner," *Opt. Commun.*, **185** (2000) 139-143.
  - 29) T. Matsuura, S. Ando, S. Sasaki and F. Yamamoto: "Polyimide derived from 2,2'-bis(trifluoromethyl)-4,4'-diaminobiphenyl. 4. Optical properties of fluorinated polyimides for optoelectronic components," *Macromolecules*, **27** (1994) 6665-6670.
  - 30) S. Ando, T. Sawada and Y. Inoue: "Thin, flexible waveplate of fluorinated polyimide," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 2143-2144.
  - 31) 日暮栄治, 澤田廉士, 伊藤高廣: "光トラップしたマイクロ光部品の角度アライメントと光駆動", *電気学会マクロマシン研究会資料(電気学会, 1999)* pp. 47-50.
  - 32) M. E. J. Friese, H. Rubinsztein-Dunlop, J. Gold, P. Hagberg and D. Hanstorp: "Optically driven micromachine elements," *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 547-549.
  - 33) E. Santamato, B. Daino, M. Romagnoli, M. Settembre and Y. R. Shen: "Collective rotation of molecules driven by the angular momentum of light in a nematic film," *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986) 2423-2426.
  - 34) J. Hotta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Manipulation of liquid crystal textures with a focused near infrared laser beam," *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 2085-2087.
  - 35) S. Juodkazis, M. Shikata, T. Takahashi, S. Matsuo and H. Misawa: "Fast optical switching by a laser-manipulated microdroplet of liquid crystal," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 3627-3629.

(2001年2月17日受理)