

近年、光によって駆動するアクチュエーターや光モーターなどがいくつか提案されています。これらは、非接触でエネルギーを供給して駆動できることが最大の特徴であり、同時に遠隔操作が可能です。従来はモーターや piezo アクチュエーターが用いられていた分野でのおきかえのほか、小型軽量、高い耐電磁ノイズ性、さまざまな環境下で動作が可能などの特徴を生かし、マイクロロボットなど、従来にはない新しい応用への可能性をもっています。

今日まで提案されてきたアクチュエーターはその形態も目的もさまざまですが、光エネルギーを機械的エネルギーに変換するという点では共通しています。ここではそのような観点から、これらの提案をまとめて紹介してみたいと思います。光エネルギーの変換にはさまざまな方式が提案されていますから、方式によって分類してみましょう。まず、大きな分類として、光の輻射圧を利用するものと、光吸収を利用するものに分けることができます。

### 1. 光の輻射圧を利用するもの

光子は  $p = h/\lambda$  の運動量を持ち、物体との相互作用によって物体に力を及ぼすことができます。ここで  $h$  はプランク定数、 $\lambda$  は波長です。光ピンセットは光の輻射圧を利用した一例で、微小粒子を捕捉し、ビームを移動させることで捕捉した粒子を移動することができます<sup>1)</sup>。同様のことは原子や分子に対しても行うことができ、レーザー冷却や中性粒子のトラッピングなどに利用されます<sup>2)</sup>。また逆に大きいスケールでは、宇宙船のソーラー帆推進も光の輻射圧を利用したものです。

光の輻射圧を利用して微小な振動子を振動させることができます<sup>3)</sup>。このような系は量子力学の興味ある対象となっています。最近、 $Q$  値の高い ( $Q \sim 10^7$ ) 微小共振器中で、光の輻射圧により引き起こされた共振器の機械的な振動が観測されました。この実験では、直径  $23 \mu\text{m}$  のリング型の共振器に  $1 \text{ mW}$  のオーダーの赤外光を照射して  $40 \text{ MHz}$  の機械的振動を起こすことが観測されました<sup>4)</sup>。

光の輻射圧は一般に大変小さく、光ピンセットの場合  $\text{pN}$  (ピコニュートン) の単位です。これは、

光の運動量とエネルギーの関係式  $p = E/c$  において、光速  $c$  が非常に大きい値であることにより、光の運動量を利用する方法では、光のエネルギーの大部分は利用されずに残り、ドップラー効果によるわずかな波長シフトがこの物体のエネルギーに転化されるだけです。このように小さい力のため、たとえばソーラー帆推進ではキロメートルのオーダーのサイズの帆を必要とします。これからわかるように、光駆動のために光の運動量を利用することは限界があります。

### 2. 光吸収を利用するもの

光のもつエネルギーを物体の駆動に用いる場合には物体で光は吸収されなければいけません。吸収されたエネルギーがどのようにして機械的エネルギーに転換されるかには、さまざまな方式があります。まず、光照射によって体積の変化を誘起するものと、それ以外に分けることができると考えられます。

#### 2.1 光吸収による体積変化

光照射によって体積の変化を誘起するものとしては、温度上昇による熱膨張、光化学反応、ポリマーの熱収縮、相転移など、さまざまな反応が利用されています。

熱膨張の例として、光ファイバーを利用したアクチュエーターを紹介します。光ファイバーの石英コアを数  $\text{mm}$  露出させ、その片側半分だけに光を吸収する膜を蒸着し、強度変調したレーザー光をこのファイバーに導波させるとファイバー先端部が振動します。振動の振幅は共振条件で  $10 \mu\text{m}$  程度と大きくはありませんが、ビームのスキャンやマイクロロボットに応用することができます<sup>5)</sup>。このほかにもフッ化ポリビニルデンポリマー (PVDF) のフィルムを用いたアクチュエーターなどが報告されています<sup>6)</sup>。

次に光化学反応ですが、たとえば光感受性のあるポリマー材料の中には光収縮現象を示すものがあります。そのような材料の片側の面でだけ光収縮が起きるようにすれば、その材料は光照射によって曲がりますから、それをアクチュエーターとして利用す

ることができます。アゾベンゼン色素を含んだ液晶フィルムの場合では、366 nm の光の照射で収縮し、540 nm 以上の波長の光で再び元に戻り、伸縮を繰り返すことができました<sup>7)</sup>。

温度上昇による相転移を利用すると、さらにパラエティーに富んだ応用が可能です。感温磁性体をばねでつないだ構造を用いて、尺取虫のように駆動するマイクロロボットが報告されています<sup>8)</sup>。これは、光照射で温度がキュリー点以上に上昇すると磁性を失うことを利用しています。同様に感温性の合金なども利用可能です<sup>9)</sup>。固相もしくは液相から気相への相転移は非常に大きな体積変化を伴いますから、たとえば水やその他の物質の気化を利用して、その反作用で物体を加速することができます<sup>10)</sup>。アプレーションを利用しても同様です。

## 2.2 その他の効果を利用するもの

光歪効果は、光を照射すると機械的変位を発生する現象です。光起電力効果で発生した高電圧が圧電効果によって機械的変位を発生します。この現象をアクチュエーターに応用することができます<sup>11)</sup>。機械的変位は小さいですが、ナノポジショニングなどの用途には好適です。代表的な物質として、PLZTセラミックス(チタン酸ジルコン酸ランタン鉛)があります。発生する高電圧を利用した静電モーターなども提案されています [http://www.aist.go.jp/MEL/soshiki/tokatsu/web-press/H13-2-morikawa/morikawa.html]。

また、電気への変換を介する点で間接的ではありませんが、太陽電池を利用して光から機械的エネルギーに変換することができます。現在の太陽電池の効率は高いので、現状では最も実用的といえるでしょう。NASAの研究しているレーザー動力飛行機は、飛行機に貼られた太陽電池パネルに地上からレーザー光を照射し、その電力でモーターを回して飛行します [http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/NewsReleases/2003/03-54.html]。これは燃料を積む必要がなく、レーザー照射をしている限り飛び続けることができるという大きな特長を持っています。

太陽電池で発電してモーターを回すほかにも、発

生した電力でスピーカーを駆動して音を出すこともできます。これも光駆動の一種といえます [http://subsite.icu.ac.jp/people/okamura/research/laserspeaker.pdf]。

## 3. 光駆動の展望

現在市販されているレーザー発振器は一般のアクチュエーター用途には十分すぎるだけのエネルギーをもっていますが、ここに紹介したほとんどの報告でエネルギー変換効率は1%にもはるか及ばないというのが現状です。効率的なエネルギー変換が可能になれば、さまざまな応用が広がります。ここに紹介した方法以外にも新しい方法がこれからでてくるでしょう。今後の展開が楽しみな分野といえます。

(国際基督教大学 岡村秀樹)

## 文 献

- 1) A. Ashkin: "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970) 156-159.
- 2) 岡村秀樹: "分子光学—高強度レーザー光による分子の運動制御とその応用—", *分光研究*, **50** (2001) 101-109.
- 3) O. Hahtela and I. Tittonen: "Optical actuation of a macroscopic mechanical oscillator", *Appl. Phys. B*, **81** (2005) 589-596.
- 4) T. Carmon, H. Rokhsara, L. Yang, T. J. Kippenberg and K. J. Vahala: "Temporal behavior of radiation-pressure-induced vibrations of an optical micro-cavity phonon mode," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 223902.
- 5) S. Inaba, H. Kumazaki and K. Hane: "Photothermal vibration of fiber core for vibration-type sensor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 2018-2021.
- 6) S. S. Sarkisov, M. J. Curley, L. Huey, A. Fields, S. S. Sarkisov II, G. Adamovsky: "Light-driven actuators based on polymer films," *Opt. Eng.*, **45** (2006) 034302.
- 7) Y. Yu, M. Nakano and T. Ikeda: "Directed bending of a polymer film by light," *Nature*, **425** (2003) 145.
- 8) 大谷幸利: "光駆動走行マシン", *光アライアンス*, **10** (1999) 40-42.
- 9) H. Okamura: "Laser motor," *Proc. SPIE*, **6374** (2006) 637401.
- 10) T. Yabe, *et al.*: "Microairplane propelled by laser driven exotic target," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 4318-4320.
- 11) P. Poosanaas, K. Tonooka and K. Uchino: "Photostriuctive actuators," *Mechanics*, **10** (2000) 467-487.