

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となるという特徴があります。従来はモーターやピエゾ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他、小型軽量、高い耐電磁ノイズ性、様々な環境下で動作が可能などの特徴を活かし、マイクロロボットなど、従来にない新しい応用への可能性を持っています。

今日まで提案されてきた様々な種類のアクチュエーターはその形態も目的も様々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。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、 λ 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¹⁾。同様のことは、原子や分子に対しても行なうことができ、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²⁾。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³⁾。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 mW のオーダーの赤外光を照射して 40 MHz の機械的振動を起こすことが観測されました⁴⁾。

光の輻射圧は一般に大変小さく、光ピンセットの場

合 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ます。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 km 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 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⁵⁾。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⁶⁾。

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だけで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

例では 366nmの光の照射で収縮し、540nm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⁷⁾。

温度上昇による相転移を利用するとさらにバ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ない構造を用いて尺取り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⁸⁾。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⁹⁾。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¹⁰⁾。アブ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出来ます¹¹⁾。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¹²⁾。

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も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¹³⁾。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他にも、発生した電力でスピーカーを駆動して音を出すことも出来ます。これも光駆動の一種ということが出来ます¹⁴⁾。

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持っていますが、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 microcavity 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, 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 Vol. 6374, 637401, Optomechatronic Actuators, Manipulation, and Systems Control*; Yukitoshi Otani, Farrokh Janabi-Sharifi; Eds., Oct 2006
- 10) T. Yabe, et. al, "Microairplane propelled by laser driven exotic target," *Appl. Phys. Lett.*, 80 (2002), 4318-4320
- 11) P. Poosanaas, K. Tonooka, K. Uchino: "Photostrictive actuators," *Mechanics* 10 (2000) 467-487
- 12) 産総研: 静電型光モーターの研究 . <http://www.aist.go.jp/MEL/soshiki/tokatsu/web-press/H13-2-morikawa/morikawa.html>
- 13) NASA: NASA research team successfully flies first laser-powered aircraft, <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/NewsReleases/2003/03-54.html>
- 14) 岡村秀樹: レーザー駆動スピーカー, <http://subsite.icu.ac.jp/people/okamura/research/laserspeaker.pdf>