

光を使った原子や粒子の運動の制御は、非接触で駆動、遠隔操作が可能のため、光ピンセットやレーザー冷却をはじめとしてさまざまな応用があります。これらは原子や  $100\ \mu\text{m}$  程度までのミクロな物体を対象にしており、それより大きな物体を動かすことは困難です<sup>1)</sup>。光の輻射圧以外の効果、たとえば光熱効果などを用いて物体を駆動する研究も行われていますが、それらについてもやはりミリメートルオーダーの物体が対象となっています<sup>2,3)</sup>。しかし、宇宙空間のような特殊な環境では、光を使ったより大きなスケールの物体への応用が現実味を帯びてきます。また宇宙空間では非接触であることが本質的に必要なケースもあります。実現可能性は未知ですが、光技術の広がりを示すものとして、ここではそれらの提案を紹介してみたいと思います。

### 1. 光の輻射圧を利用したもの

光子は  $p=h/\lambda$  の運動量をもち、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。光強度  $I$  で表すと、吸収の場合、圧力  $P_{\text{Rad}}=I/c$  として表されます。反射の場合にはこの2倍です。光ピンセットは光の輻射圧を利用した一例です。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。このため光の輻射圧はわれわれの世界ではほとんど感じる事ができませんが、宇宙スケールでは、例えば彗星が曲がった尾 (ダストテール) を引くのも光の輻射圧で説明されています。推進に利用する提案として、宇宙船のソーラー帆推進<sup>4)</sup> がありますが、このように小さい力であるため、キロメートルオーダーのサイズの帆を必要とします。このように、光駆動のために光の輻射圧を利用することは限界があると考えられてきました。

しかし最近、能動的な光共振器を利用して光強度を増大させ、大きな輻射圧を得るアイデアが提案されました (photonic laser thruster; PLT)<sup>5)</sup>。2つの物体間で共振器を構成し、その中に利得媒質が配置されます。反射率に応じて、前述の値より、ほぼ  $1/(1-R)$  倍に力が増幅されます。ここで  $R$  はミラーの反射率であり 1 に近い値ですから、力は大きく増幅されます。ロケットのように飛翔体の加速に利用するほか、宇宙空間での望遠鏡やアンテナの構成のために複数の衛星間の位置をコントロールして、宇宙空間での建造物の建設をする応用が提案されています (photon tether formation flight; PTF)<sup>6)</sup>。

光の輻射圧では物体を押しやる方向にしか力を及ぼせませんが、位置の制御のためには手前に引っ張ることも必要です。このためにはテザー (紐) を使います。テザーは引っ張ることはできますが押すことはできませんから、両者を併用することで位置の制御が可能になります。10 W の Nd:YAG レーザーで 100 kg の衛星を制御するために必要な mN の力を発生でき、数 10 km 離れてナノメートルのオーダーでの距離の制御ができると試算されています。

### 2. 光のエネルギーを利用したもの

光の輻射圧ではロケットを打ち上げるような大きな力を発生させることはできませんが、光の運動量ではなくエネルギーを利用することで、このような目的にも光が使われることが検討されています。ライトクラフト (lightcraft) はそのようなレーザー推進の一種で、地上に設置した基地からレーザー光を照射して飛翔体を軌道にまで推進します<sup>7)</sup>。ロケットは宇宙に行くことを初めて可能にしたきわめてすぐれた方式ですが、燃料をそれ自体で持っていかないとはいけなため、その重量の 1% 程度しか軌道以上に打ち上げることができません。レーザー推進は燃料を地上に置いたまま飛ばすことができる (あるい

は、エンジンの大部分が地上に残ると考えてもよい) ため、はるかに低コストで打ち上げることができると期待されています。ライトクラフトの底面は放物面鏡になっており、地上からのパルスレーザー光を集光し、そこで空気が急速に加熱されショックウェーブを発生することで上方への推進力を得ます。30 km 程度以上の高度では本体に内蔵した燃料のアブレーションにより推進力を得ます。

名古屋大学<sup>8)</sup>や東京工業大<sup>9)</sup>でも、それぞれ独自の方式のレーザー推進を提案しています。

### 3. 光による電力の伝送

宇宙エレベーターはアーサー・C・クラークの作品「楽園の泉」に描かれたアイデアで、35,787 km 上方にある静止軌道上の衛星とその直下の赤道上の1点をケーブルで結ぶというものです。もしそのようなものがあれば、あたかもジャックと豆の木のようにケーブルを登って宇宙に行くことができます。はじめはSFの世界のものにすぎませんでした。近年、必要とされる強度に近いカーボンナノチューブの量産方法が確立されつつあることで、にわかには現実味をおびてきました。このケーブルを上るエレベーター(クライマー)への電力供給に地上からレーザー光を照射して、太陽電池で電力に変換し、動力とすることが検討されています<sup>10)</sup>。

このように光によって電力を送る方法は、Photonic power transmission とよばれる一般的な技術となりつつあります。従来からの銅線を用いた送電は、きわめて大きい距離の伝送には不向きです。重量がかさむだけでなく、爆発性の物体があると危険である等の問題もあります。最も本質的な問題点は、たとえば宇宙エレベーターのような固定されていない物体に対しては現実的でないということです。これに対し、光を使うと全くの非接触で電力を送ることができます。最新の太陽電池を使えば、光

から電力への変換効率が40~50%ありますから、システム全体でみても、用途によっては十分に実用になるレベルです。

NASA では研究を促進するために、垂直に張られたテザーを伝ってクライマーを時間内に上昇させることを競うコンペティションを毎年行っています。2005年にはサーチライトを使って12 mまでしか上がらなかったのが、2007年には30個のLDバーを3個重ねた合計10 kWのレーザー装置で、100 mの高さまで52秒で上昇させることができました。宇宙エレベーターは次第に現実のものとなりつつあります。(国際基督教大学 岡村秀樹)

### 文 献

- 1) 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.
- 2) 羽根一博：“光アクチュエーターの可能性—光熱効果を中心として—”，光技術コンタクト，**30** (1992) 327-333.
- 3) 岡村秀樹：“光駆動の現状と展望”，光学，**36** (2007) 110-111.
- 4) 三浦公亮，長友信人：ソーラーセイル(丸善，1993).
- 5) Y. K. Bae: “First demonstration of photonic laser thruster (PLT),” *High-Power Laser Ablation VII* (Taos, NM, 2008).
- 6) Y. K. Bae: “Photonic tether formation flight (PTFF) for distributed and fractionated space architectures,” *AIAA Space 2007* (Long Beach, CA, 2007) pp. AIAA 2007-2060.
- 7) L. N. Myrabo: “World record flights of beam-riding rocket lightcraft: Demonstration of ‘disruptive’ propulsion technology,” *AIAA/ASME/SAE/ASEE 37th Joint Propulsion Conference* (Salt Lake City, UT, 2001) pp. AIAA-2001-3798.
- 8) A. Sasoh: “Laser-driven in-tube accelerator,” *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001) 1893-1898.
- 9) T. Yabe, *et al.*: “Microairplane propelled by laser driven exotic target,” *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 4318-4320.
- 10) 佐宗章弘：“レーザーエネルギーによる宇宙エレベーターの遠隔駆動”，日本機械学会誌，**107** (2004) 390.