

光の放射圧

電気力線の綱引き・おしくらまんじゅう

光の放射圧は光ピンセットとして利用することができ、顕微鏡下の物体を見るだけでなく、捕捉したり動かしたりすることができるようになりました¹⁾。近年では、細胞操作やDNA操作の道具として、機械的なマイクロピンセットやマイクロペレットに代わるものになってきています²⁾。このように光の放射圧は、科学ツールとして幅広く利用されるようになっていますが、その成因などについてわかりやすく記述された教科書は案外少ないのです。そこで今回の光学工房では、光の放射圧が生じる理由について考えてみます。

光が物体にあたると力を及ぼすことは、マクスウェルの電磁方程式が完成した1865年ごろから、理論的に予測されていました。実験で確認されたのは、1901年のLebedevとNicholsらによるものが初めてです^{3,4)}。ニュートンも理論的には間違っていたことにはなりますが、光の粒子説と万有引力の法則を提唱したころから、きわめて近い距離において何らかの力が光と物質との間に及ぼし合うとの考えを1704年の著書「光学」に表していました⁵⁾。

光の放射圧はマクスウェル応力によるものと考えるのが汎用的で実際の計算には役に立つことが多いのですが、直感的には理解しにくい面があります。直感的理解を助けるものとしては、光の運動量変化によって放射圧がはたらくと考える方法が簡単で有効です。ここでは、この2つの考え方について、簡単な例を示しながら、その接点を探っていきましょう。

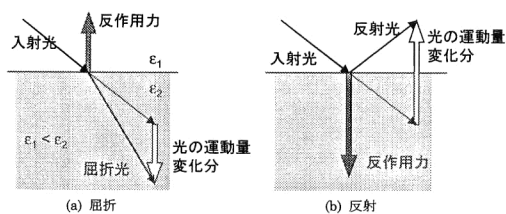


図1 ガラス平面での光の運動量変化と放射圧。

簡単な例として、ガラス平板で光の平面波が屈折および反射するときの放射圧を取り上げます。光の運動量変化の考え方を、図1を見ながら説明します。平板に入射した際に、屈折あるいは反射によって光が曲げられて、運動量が変化します。屈折する場合、光は進行方向に対して下側に力を受けて、光が曲げられたこととなります。そのため、反作用力として、平板は上側への力が与えられることとなります。これが、光の運動量変化から説明される放射圧です。反射の場合は、光が上側に曲げられるため、平板は下側へ押されることとなります。

このように運動量変化を用いた力学的な説明は、簡単で理解しやすいのですが、放射圧が電磁気学的な力であるということから離れてしまいます。実は、光の放射圧は、正電荷と負電荷がくっつくということと同じ作用による力であることを見ていきましょう。これがマクスウェル応力とよばれる考え方です。

さきほどの例と同様に、屈折と反射とをマクスウェル応力を使って見ていきますが、その前に、電気力線に働く力を、図2に示しておきます⁶⁾。正電荷から伸びた電気力線は、負電荷へと導かれ、その間では図2(a)のように分布していることはよく知られています。電気力線は、長さ方向にゴムひものように張力をもっているため、綱引きのように、正電荷と負電荷とが引き付け合います。この張力はその場所の電場 E に比例しており、 $(1/2)E$ と表せま

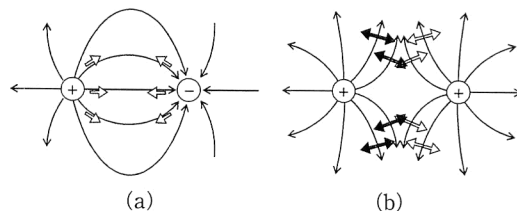


図2 電気力線に働く力、(a) 正電荷と負電荷の場合と、(b) 同電荷の場合。

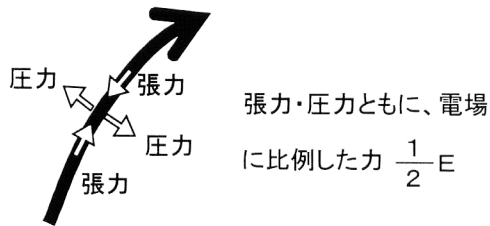


図3 ファラデーの電気力線に働く力。

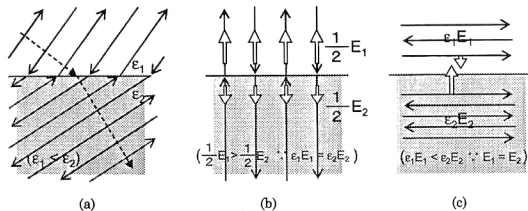


図4 (a) 屈折による電気力線分布, (b) 垂直成分と, (c) 水平成分とそれにより働く放射圧. 実線は電気力線, 白抜き矢印は, 電気力線による力を示す.

す。一方、同電荷の場合には、片側から伸びた電気力線は、もう一方へ入ることなく、図2(b)のように分布します。電気力線同士は、互いに離れようとするような、垂直方向への圧力を及ぼすため、電気力線の押し合いによって、同電荷は反発し合います。この圧力も電場に比例しており、 $(1/2)E$ です。このように、電気力線は、線に沿う方向に縮もうとする張力と、その垂直方向に押し合う圧力をもっています。この近接作用の考え方は、ファラデーの電気力線とよばれています(図3)。

図1の例に戻りましょう。平面波に対して電気力線の模式図を書くと、光の進行方向に対して垂直方向に伸びているので、屈折のようすは図4(a)のように描くことができます。放射圧は、前に述べたように空気側の電気力線とガラス側の電気力線の綱引きなので、界面を垂直に近いほうから引っ張っている空気側のほうが有利であろうことが想像できます。さらに、誘電体界面では綱の本数(電束密度)

は同じですが、綱を引く力となる電場の大きさ((電場)=(電束密度/誘電率))が、誘電率の低い空気側で強くなっているのです、やはり空気側の勝ちとなり、ガラス平面は上側へ押し上げられることになります。これは図1(a)に対応しています。

理解を深めるため、この勝敗の原因をもう少し詳しく見てみましょう。電気力線を(b)垂直成分と(c)水平成分に分けてみます。図4(b)のように、電気力線は電荷のない場所で消滅したり発生したりすることはないため、界面でつながっている必要があります(電束密度の法線成分が連続)。界面の上下で電気力線の本数(電束密度)は同じですが、図3で示したように1本あたりの力は電場 E に比例して $(1/2)E$ ですので、空気側のほうが張力が強くなっています。(電束密度 ϵE が等しいとき、 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ なので、 $E_1 > E_2$ となります。)

また、水平成分の図4(c)について見ると、電場が界面で等しくなければならぬため(電場の水平成分が連続)、誘電率の高いガラス側で、電気力線の密度が高くなります。電気力線同士は互いに押し合うので、“おしくらまんじゅう”のように、電気力線の密度が高いほうから低いほうへむけてガラス平板は押し上げられます。このように、どちらの成分とも、誘電体を引き付ける方向の放射圧が及ぼされることになります。

次に、反射のようすも、マクスウェル応力で考えてみましょう。ガラス平板での反射のようすを電気力線で表したものが図5(a)です。ガラス平板の直上では電気力線が面に平行に分布していますので、電気力線間の圧力により、ガラス平板は下側への力を受けます。これは図1(b)に対応しています。

水平成分とそれにより働く放射圧。実線は電気力線、白抜き矢印は、電気力線による力を示しています。

ここでは単純な例を見ながら、誘電体に働く光の

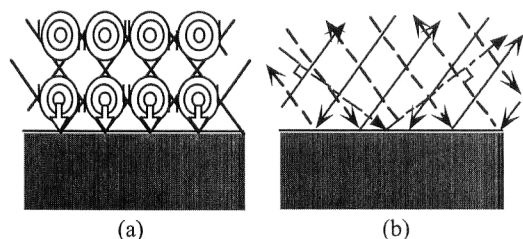


図5 (a) 反射による電気力線分布 (実線), とそれにより界面に働く光放射圧 (白抜き矢印), (b) 入射光の電気力線と (実線) と, 反射光の電気力線 (破線) とを独立に描いたようす.

放射圧について考え, 光の運動量変化による放射圧とマクスウェル応力との2つの考え方について見てきました.

誘電体へ働く光放射圧は, 誘電体を引き付けることができるため, 光ピンセットでのトラップも容易であり, 応用も進んでいます. 一方で, 金属体に対しては, 表面での光反射のために, 光ピンセットでトラップできないと考えられています, ここで示したようなマクスウェル応力を考えれば, 金属に対しても引力となるような力が存在することがわかります⁷⁾. 金属の場合は, 誘電体では無視できた磁場成分による力を考慮する必要がありますが, 考え

方は同様なので, 興味のある方は各々でご確認ください.

この記事に関するお問い合わせは, kato@opt-sun.riken.go.jp あるいは tanida@ist.osaka-u.ac.jp まで. (古川 祐光)

文 献

- 1) A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu: "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 288-290.
- 2) T. T. Perkins, S. R. Quake and S. Chu: "Relaxation of a single DNA molecule observed by optical microscopy," *Science*, **264** (1994) 822-826.
- 3) P. Lebedev: "Untersuchunge über die Druckkräfte des Lichtes," *Ann. Phys.*, **6** (1901) 433.
- 4) E. F. Nichols and G. F. Hull "A preliminary communication on the pressure of heat and light radiation," *Phys. Rev.*, **13** (1901) 307-320.
- 5) I. ニュートン: 光学, 島尾永康訳 (岩波文庫, 1983).
- 6) 砂川重信: 理論電磁気学, 第2版 (紀伊國屋書店, 1973).
- 7) H. Furukawa and I. Yamaguchi: "Optical trapping of metallic particles by a fixed Gaussian beam," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 216.