

アシュキン博士が開拓した 光ピンセットとその科学

東海林竜也
坪井泰之

しょうじ たつや
大阪市立大学 理学研究科
つばい やすゆき
大阪市立大学 理学研究科

二度のノーベル物理学賞に輝く 光マニピュレーションの科学

光により微小な物質・物体の運動を制御する学術分野があり、ここではそれを「光マニピュレーション(操作)の科学」と呼ぼう。この光マニピュレーションの科学は、ノーベル物理学賞に二度輝いている。最初は1997年「development of methods to cool and trap atoms with laser light(レーザー光による原子の冷却と捕捉法の開発)」に対し、米国のステーヴン・チュー博士ら三氏に対し授与された。それから約20年後、米国のアーサー・アシュキン博士に2018年のノーベル物理学賞が授与された。アシュキン博士への授賞理由は「for the optical tweezers and their application to biological systems(光ピンセットとその生物系への応用)」である。

光マニピュレーションに関する研究に携わり、アシュキン博士の論文で学び、研究のインスピレーションを得てきた筆者にとって、今回のご受賞は本当に嬉しく思う。同時に、この受賞の知らせには、本当に驚いた。そのあたりは最後に書くが、とにかく、この光マニピュレーションの科学がとても価値ある重要な学術分野であることは、この二度のノーベル賞からも、もはや疑いないことがわかる。この二つのノーベル賞の関連は後述する。アシュキン博士が開発した光ピンセットの原理からはじめ、アシュキン博士の研究について述べる。

光の力学的作用「光圧」

光ピンセットで微小物体をつかまえる「力」は、純粹に電磁気学的な力であり「光圧」(optical force, optical pressure)と呼ばれている。「輻射力」とか「輻射圧」とも呼ばれる。この光はせいぜいピコニュートン程度の極めて小さな力であり、私たちが日常生活においてこの光圧を感知することはまずない。しかし、無抵抗で無重力である宇宙空間では実際に物体を動かす力として働きうる。それを実際の応用に成功したのが、2010年に日本が打ち上げに成功した宇宙ヨット「IKAROS」である(宇宙空間で帆を広げ、太陽の光を受け、ミリニュートン程度の微弱な推進力を得て、実際に宇宙空間を航海している。詳細はJAXAのウェブページに詳しい)。

光の圧力をどのように理解すればよいであろうか？ 光は波動性も粒子性も併せもつ。そして、それぞれの立場からこの「光圧」を説明することができる。例えば、粒子性の立場から考えてみよう。サッカーボールでも野球ボールでも、壁に投げ、ぶつけると、ボールが跳ね返ってくる。この時、ボールの運動量変化とその保存則より、壁には「押す力」が働くことは誰しも直観にしてわかる。光を構成する粒である「光子(photon)」は運動量をもつので、これが物体に当たると物体を押す力が働くはずである。これが最もシンプルな光圧の説明である。

一方、波動の立場から考えると、光は電磁波であり、この場が微粒子と相互作用し、力が働く。

ファインマンの教科書にはこのように書かれている。引用しよう¹。「光が光源からやって来て、電荷に働らき、電荷を上、下に動かすとしよう。(中略)(電荷は)上下に運動するので、速度をもち、その(電荷)に $B(\text{磁場}) \times v(\text{速度}) \times q(\text{電荷})$ という力が働らく。この力の方向は？ それは光の伝播の方向になる。(中略)電荷には光線の方向におしやる力が働らく」。この力は、つまりローレンツの力であり、やはり「光圧は電荷を押し力」となるとされている(より詳しくは末尾の補論参照)。

光圧はとても小さい。レーザーポインターを鏡に当てて反射させた場合、鏡に及ぼす光圧は数ピコニュートン程度である。一方、直径 $1\mu\text{m}$ の水滴にかかる重力は 10^{-2} ピコニュートン程度である。つまり、ミクロな世界の微粒子(バクテリアや赤血球などの細胞など)にとっては、光圧は自身にかかる重さをはるかに凌駕する大きな力となる。これが光ピンセットの「握力」となる。

アシュキン博士の開拓した光ピンセット

米国ベル研でレーザーのフォトリフラクティブ効果について研究を展開していたアシュキン博士は、1970年に光ピンセットの先駆的研究となる論文を発表した²。アシュキン博士は次のような実験を行った。用いた微小物体は、水に分散した高分子の微粒子(ラテックスと呼ぶ)であり、サイズは $0.6\sim 2.7\mu\text{m}$ (つまり Mie 散乱微粒子(補論参照)とみなせる)である。この分散液に、図1に示すような二つの光学配置でレーザーを照射し、微粒子の挙動を観察した。レーザーは波長 $\lambda=0.515\mu\text{m}$ のアルゴンレーザーであり、今日の研究にあるような回折限界までの集光ではなく、集光スポットサイズは $6\mu\text{m}$ 程度の「緩い」集光である。集光光学系は光ピンセットの光圧(=握力)の大きさに大きく影響を及ぼすが、後述する。

まず、図1(a)の実験では、微粒子はレーザー光の進行方向に加速され、押されて移動するのが観測された。そうして、輸送された微粒子はやがてセルのガラス壁にぶつかり、そこでそのまま光

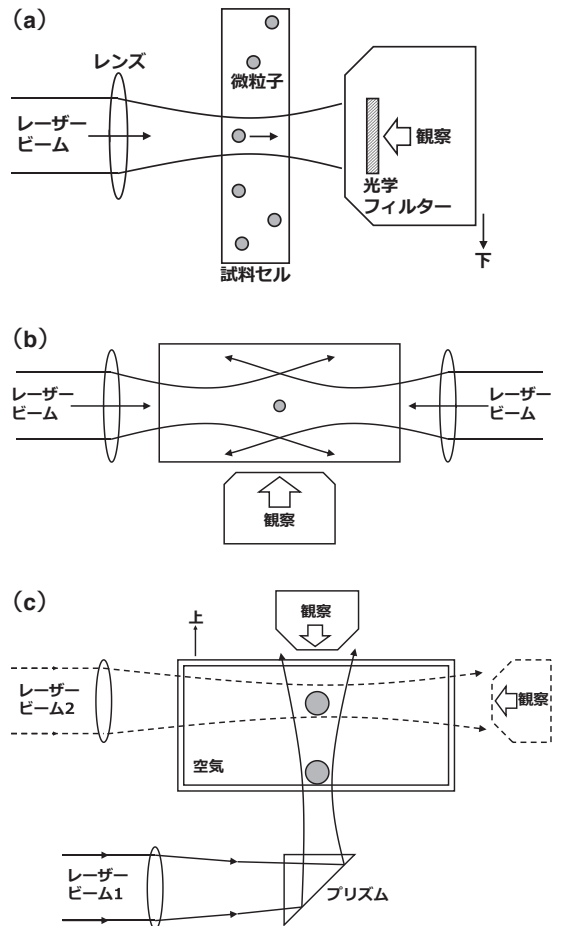


図1—アシュキンが開発した初期の光ピンセット

圧でガラス壁に押し付けられ、「捕捉」された。これは、まさに微粒子が散乱力により押された結果であり、ガラス壁と散乱力で挟まれて微粒子が捕捉されたわけである。アシュキン博士は緻密な理論的考察も行っており、この光圧で輸送される速度を計算し、実験値とよい一致を得ている(速度は毎秒数十 μm)。続いて、アシュキン博士はこの光で押し力を利用して安定した微粒子の捕捉を実現した。それが図1(b)の実験である。つまり、同じレーザービームを対向させて試料セルに集光し、反対方向に進み押し付ける光圧で微粒子を挟んで安定して捕捉したのである。翌年、続いてアシュキン博士は、図1(c)に示すように、下方からレーザーを照射して、重力に逆らって微粒子を持ち上げた微粒子の「浮揚(levitation)型の捕捉」にも成功している³。この二つの論文が、アシュキン博

士の初期の光ピンセットの先駆的な研究である。図1を見れば簡素な実験に見えるが、実際は相当な苦勞があったことは想像に難くない。

しばらく時をおいて1986年、アシュキン博士は画期的な光ピンセットを開発した⁴。上記のように外力(壁からの反作用や重力)との釣り合いに頼らず、1本のレーザービーム($\lambda=514.5\text{ nm}$)を高い開口数をもつ顕微鏡対物レンズで集光して発生する勾配力 F_{grad} で微粒子を捕捉したのである。捕捉対象は、水に分散した誘電体(ガラスや高分子)の微粒子である。特筆すべきはその微粒子のサイズであり、 $10\ \mu\text{m}$ から $25\ \text{nm}$ までの微粒子(つまり Mie 散乱粒子から Rayleigh 散乱粒子まで)の捕捉にアシュキン博士は成功している。なお、この論文にはチュー博士も著者に名を連ねている。二人は共同研究者であったのだ。

翌年、アシュキン博士は、この技術にもとづき、タバコモザイクウイルスや大腸菌の光捕捉に成功している⁵。また、同年、生体組織に吸収の少ない近赤外のレーザービーム($\lambda=1064\ \text{nm}$)を用いて、イースト菌、大腸菌、ヒト赤血球などの捕捉と操作に成功している⁶。近赤外光を使うことにより、これら生体系物体の光損傷を大きく回避することができる、つまり殺さずに捕捉・操作できることは大きなアピールとなった。それまで微細なガラス針などで接触し、機械的に操作されていたバクテリアや生細胞が、このように光により非接触で損傷なしに自由度が大きく操作できることは、生物学、ライフサイエンス分野に大きなインパクトを与え、光ピンセットは急速にその活躍の場を広げていった。この貢献が、「for the optical tweezers and their application to biological systems」とあるように、今回のノーベル賞につながった。

その後の光ピンセットに関しては重要な研究はいくつもあるが、紙面の都合上、ここでは二つだけ紹介しておきたい。光圧はピコニュートンオーダーであり、生体分子が生む力と同程度であることを利用した研究である。一つは、DNAの光操作である。DNAそのものを光ピンセットで捕捉し、操ることは容易ではないが、DNAの両末端

に微小球を結合させ、この微小球を光ピンセットで操り、DNA1分子の力学応答を調べる研究である⁷。この手法はDNA科学に大きな進展をもたらし、現在でもトップランクジャーナルに頻繁に論文が報告されている。もう一つは、柳田敏雄博士らが行った、筋肉を司る分子モーターであるミオシンがアクチン分子を引っ張る力(筋肉がちぢむ力)の「1分子力学計測」の一連の研究である⁸。これらは生物学、物理学の研究であるが、化学に関しては1980年代後半から始まった増原らによる「マイクロ化学」の一連の研究が、現在は光マニピュレーション化学として花開きつつある。当該領域における日本の研究レベルは極めて高く、石原一博士(大阪大学/大阪府立大学教授)による新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」も進行中である。

結びに

本稿を書くにあたり、学生時代に読んだはずのこれらアシュキン博士の論文を改めて読み直すと、新たな感動がわいてきた。それは、実に示唆に富む味わい深い論文であるということだ。例えば、1970年の“Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure”²には、光圧を働かせるレーザービームの波長を捕捉物質の電子遷移に共鳴チューンし、光圧を増大させるアイデアや、これを同位体分離に応用する技術が議論されている。アシュキン博士は同じころ、“Atomic-Beam Deflection by Resonance-Radiation Pressure”と題した理論研究の論文を報告しており⁹、同様に共鳴光圧による原子マニピュレーションの可能性を議論している。これらの研究とチュー博士のレーザー原子冷却の研究は密接な関連がある。チュー博士もアシュキン博士のこれら一連の研究から強いインスピレーションを受けていると思う。これが、冒頭で筆者らが今回のノーベル賞受賞に驚いた理由である。まったく個人的な感想であるが、1997年のチュー博士の受賞の際、「なぜアシュキン先生が同時受賞でないのか」と、筆者は強く思

ったことを思い出す。それから約 20 年の時を経てアシュキン博士がご受賞されたことは感慨深い。今回は史上最高齢の受賞ということでも話題になった。受賞に際したアシュキン博士の柔和な笑顔を見るにつけ、ますますのご健勝を祈らずにはいられない。そういう科学者は、たぶん世界にたくさんいるだろう。

補論：光圧について

もう少し詳しく、光によって微小物体が捕捉される機構を考えてみよう。その光圧の機構は、微小物体のサイズ(d)が光の波長(λ)よりも大きい Mie 散乱領域と、逆に物体のほうが小さい Rayleigh 散乱領域($\lambda \gg d$)では、その数式の取扱いが異なるが、「微小物体が媒質よりも分極しやすい時、物体は光の強度が強い位置に引き寄せられる」という同様の結論が共に導かれる。

Mie 散乱領域 まず、サイズの大きい Mie 散乱粒子を捕捉する光圧に関して説明しておこう。図 2 に示すように、幾何光学的に光捕捉が説明できる。高い開口数の対物レンズで大きな立体角で微粒子に絞り込まれたレーザービームは、微粒子への入射の際と微粒子からの出射の際に、その界面において反射、屈折を繰り返す。光の進行ベクトルが変化し、運動量保存則を満たす要請により、微粒子の屈折率が周囲の媒体(この場合は水)のそれよりも大きい時、微粒子に働く光圧のベクトル和は、ビームの焦点位置を向く。つまり、微粒子は焦点位置に捕捉される。

Rayleigh 散乱領域 光の波長よりも十分小さい微小物体(ナノ粒子)は、一個の電気双極子と見なすことができる。この電気双極子は、光の電場によりナノ粒子の分極が誘起され、生ずることに留意されたい。Rayleigh 散乱の理論によると、この電気双極子が光の電磁場から受ける力(F ; ローレンツカ)は次式

$$F = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2 + \alpha \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

と表される。ここで \mathbf{E} , \mathbf{B} はそれぞれ入射光の電場密度と磁束密度であり、 α は媒質中におけるナノ粒子(分子)の分極率であり、以下のように表される。

$$\alpha = 4\pi\epsilon_2 r^3 \frac{(n_1/n_2)^2 - 1}{(n_1/n_2)^2 + 2} \quad (2)$$

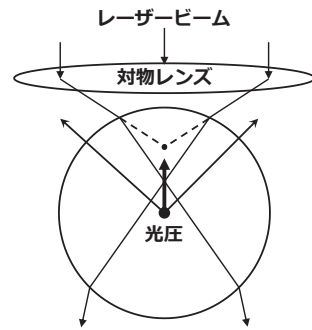


図 2—Mie 散乱微粒子に働く光圧

ここで、 r はナノ微粒子の半径であり、 n_1 , n_2 はそれぞれ微粒子および媒質の屈折率であり、 ϵ_2 は媒質の誘電率である。(1)式の右辺の第一項が勾配力 F_{grad} であり、第二項は散乱力 F_{scat} である。二つの力の寄与があるが、一般には散乱力よりも勾配力のほうが十分大きいので、第二項は無視できる。そうすると、微粒子(分子)の屈折率が媒質の屈折率よりも大きいとき ($n_1/n_2 > 1$)、ナノ微粒子は光強度の高いところ(レーザービームの焦点中心)に引き付けられることになる。このような勾配力が形成する光圧のポテンシャル U_{trap} は、 $F_{\text{grad}} = -\nabla U_{\text{trap}}$ より以下のようにあらわされる。

$$U_{\text{trap}} = -\frac{1}{2} \alpha E^2 \quad (3)$$

この光圧のポテンシャル U_{trap} が熱揺らぎのエネルギー (kT ; k はボルツマン定数、 T は温度) よりも深いとき ($|U| \gg kT$)、安定な捕捉が実現される。

文献

- 1—リチャード・P. ファインマン: ファインマン物理学(2)光・熱・波動、富山小太郎(訳)、岩波書店、(1968)pp. 113-114
- 2—A. Ashkin: Phys. Rev. Lett., **24**, 156(1970)
- 3—A. Ashkin: Appl. Phys. Lett., **19**, 283(1971)
- 4—A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm & S. Chu: Opt. Lett., **11**, 288(1986)
- 5—A. Ashkin & J. M. Dziedzic: Science, **235**, 1517(1987)
- 6—A. Ashkin, J. M. Dziedzic & T. Yamane: Nature, **330**, 769(1987)
- 7—C. Bustamante, Z. Bryant & S. B. Smith: Nature, **421**, 423(2003)
- 8—A. Ishijima & T. Yanagida: Trends Biochem. Sci., **26**, 438(2001)
- 9—A. Ashkin: Phys. Rev. Lett., **25**, 1321(1970)