



光の力

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 研究グループ長
日暮栄治 HIGURASHI, Eiji
(当協会 オプトメカトロニクス技術委員会 委員)

長年、研究開発に携わっていると、画期的な新発見により技術が飛躍的に進展する状況を見ることが時々ある。それが研究開発者をワクワクさせる。私にとってその一つが光の力である。

現在、MEMS 技術などを駆使した小型原子時計（正確な時間や周波数を発生する装置）の研究開発に携わっている。時間の基本単位である「秒」は、セシウム（Cs）原子が吸収するマイクロ波の周波数を用いて定義されている。2004年に、米国の National Institute of Standards and Technology (NIST) の研究グループにより、小型原子時計モジュール (A microfabricated atomic clock) が発表され、2011年にチップスケール原子時計 (Chip Scale Atomic Clock: CSAC) として市販（消費電力 120 mW 以下、体積 17 cm³以下）され、大きな注目を集めた。小型原子時計は、次世代の時間・周波数標準器として、自動車等の移動体への搭載やセンサネットワークのセンサ端末同期などに応用することが期待されている。大幅な小型化と省電力化の両立が可能になったのは、コヒーレント・ポピュレーション・トラッピング (Coherent Population Trapping: CPT) 共鳴と呼ばれる、セシウム (Cs) やルビジウム (Rb) などのアルカリ原子が光と相互作用することで起きる量子干渉現象を利用することで、レーザ照射によりマイクロ波遷移を検出することが可能となったためである。CSAC では、アルカリ原子と反応しないバッファガスをガスセル内に一緒に封入することでアルカリ原子がセル壁面へ到達する時間を長くして観測時間を長くするバッファガス方式が用いられている。さらに次世代の高安定・高精度な時間・周波数標準を目指して、レーザ冷却方式原子時計の小型・集積化の要素技術開発が進められている。レーザによる中性原子の冷却とは、レーザ光から原子に運動量を与えることによって原子の熱運動を止める操作であり、原子を減速させるというのは、冷却を意味する。このようなレーザ冷却は、1975年にヘンシュ (T. Hänsch) やショーロー (A. Schawlow) によって提案され、1985年にベル研究所のチュー (S. Chu) らによってはじめて実験成功が報告され、「レーザ光による原子の冷却、トラップ方法の開発」により、1997年度のノーベル物理学賞が与えられている。

思い返せば、私が初めて光の力学的な効果に出会ったのは、東北大学電気通信研究所の稲場研究室での学生時代にまでさかのぼる。研究室では1980年代後半から光の放射圧による生体細胞の光トラップ・マニピュレーションの研究が行われていた。光が物体で反射、屈折、吸収されるとき、光の運動量に変化し、物体に光の放射圧と呼ばれる力が作用し、これを利用するわけである。卒業後は NTT に入社し、メカフォトニクスの研究として、マイクロマシニングで作製した構造物の光回転駆動の研究などを推進した。これらの研究のベースになる光放射圧による数ミクロン程度の誘電体微粒子の光トラップを最初に報告したのは、1970年、ベル研究所のアシュキン (A. Ashkin) である。この光トラップは、空間的コヒーレンシーに優れたレーザ (1964年ノーベル物理学賞受賞) が発明 (1960年) されたことで実現された。また、1986年には単一レーザビームを強く集光することにより、その集光点近傍に微粒子を三次元的に捕捉する光ピンセットの実験に成功している。2018年度のノーベル物理

学賞は、特に感慨深いものだった。アシュキン博士が、ノーベル賞史上で最高齢 96 歳の受賞者（受賞業績「光ピンセットの発明と生物学システムへの応用」）となったのだ。特に多くの関係者が驚いたのは、1997 年度のノーベル物理学賞を受賞したチュー博士らの受賞理由の中でもアシュキン博士が開発した光ピンセットの結果が引用されており、受賞済の業績で引用された先行研究が 20 年以上も経ってから受賞したということであった。これは、光ピンセット技術が、レーザ冷却の技術に発展しただけでなく、生物学の分野で DNA 等の生体分子のダイナミクスに直接アクセスする新たな研究分野を切り開いたことが高く評価されたものと言えよう。

さらにさかのぼると、光の力（放射圧）を検出する試みは、現在物理学の発展と密接に関わる大変興味深い研究であったことがわかる。古典物理学では、粒子と波は明確に峻別された完全に異なる概念であった。放射圧は運動量を有する光子が物体に衝突することにより生じると解釈すると理解しやすいように、光の波動説に対し、粒子説が支配的であった 18 世紀にはそれを検出する多くの試みが行われた。しかし、その大きさがきわめて微弱だったため測定不可能であった。一方、測定にかからないほど微弱な光の放射圧は、19 世紀のヤング (T. Young) やフレネル (A. J. Fresnel) などによる波動説の台頭にはむしろ幸いしたと言われている。この光の放射圧を、実験で初めて測定したのが、レベデフ (P. Lebedev) (1901 年)、ニコルス (E. F. Nichols) とハル (G. F. Hull) (1901 年) である。排気した容器内に光を受ける円盤を取り付けたねじり秤を設置し、光の圧力によって秤を回転させ、放射圧を測定した。この実験の様子は、夏目漱石 (1867 年-1916 年) の小説「三四郎」(1908 年) の中でも野々宮君の「光線の圧力の測定」実験として描写されている（話のねたを提供したのは漱石の教え子であった物理学者の寺田寅彦といわれている）。漱石の生きた時代は、1895 年に、X 線が発見 (1901 年ノーベル物理学賞受賞) され、プランク (M. Planck) が量子仮説 (1918 年ノーベル物理学賞受賞) を提唱し、アインシュタイン (A. Einstein) が特殊相対性理論、光量子仮説 (1921 年ノーベル物理学賞受賞) を発表するなど、古典物理学から現代物理学へと移行する物理学の激動期である。光学の歴史においても、光の本質は波か粒子かという二者択一の議論から、粒子性と波動性の両面が内在しているという二重性として確立され、やがて量子力学が誕生する。

現在、夏目漱石の時代には想像もできなかった原子や生体細胞を実際に光で操作することが可能になり、幅広く利用されている。将来は、さらに高安定・高精度な原子時計など、ますます身近なところで光の力学的な効果を利用した新しい製品が出てくるかもしれない。

地球に生命が誕生し、生命が進化してきた最大の原因が太陽光の存在であるように、光は人類の誕生から発展にも非常に重要な役割を果たしてきた。ノーベル物理学賞や化学賞などの歴代の受賞テーマを見ても、多くのテーマが光と関係している。このように当協会にも関連が深い光には、世界を変える力があり、魅力に満ちている。