



オンデマンド・ホログラフィック光ツィーザー

東京農工大学
岩井俊昭

1. はじめに

光が物体に照射されると、光の圧力が発生する。この光の圧力は、放射圧とも呼ばれ、Maxwellによって理論的に予想され¹⁾、1901年に Lebedev²⁾と 1903年に Nicholsら³⁾によって実証された。光の放射圧はその作用力が余りに微小なため、レーザー光源のような光エネルギーをマイクロ領域に高密度化できる光源が発明されるまでは、有効な現象として研究されていなかった。したがって、Lebedevや Nicholsらの研究から約70年間後の1970年に、Ashkinが1本の集光レーザービームと2本の対向する集光レーザービーム照射のもとで直径 $0.59\mu\text{m}$ ～ $2.68\mu\text{m}$ のラテックス微粒子の加速と捕捉の実証を行なった⁴⁾。Ashkinの研究が発端となり、マイクロ粒子、ナノ粒子、さらには原子の光操作の研究が展開された^{5,6)}。光の放射圧を利用して物体を操作する技術は、光ツィーザーと呼ばれている。光ツィーザー技術の特徴は、マイクロ物体、特に生体組織に対する非侵襲性、非破壊性、非接触性および遠隔操作性である。このような技術的な優位性のため、光ツィーザー技術は、例えば、誘電体粒子^{4,7,8)}、金属粒子⁹⁻¹²⁾、エアロゾル^{13,14)}、マイクロバブル^{15,16)}、半導体ナノワイヤ^{17,18)}、カーボンナノチューブ¹⁹⁾、ウイルス、バクテリアや細胞²⁰⁻²²⁾などのマイクロ物体の遠隔操作に利用されている。光の放射圧を利用した光ツィーザー技術の多種多様な分野に広く展開されてきた功績が認められ、その発案者である Ashkin は 2018 年ノーベル物理学賞を受賞した。

我々は、顕微領域にあるマイクロ物体に対して、オンデマンド光操作を可能とするホログラフィック・光ツィーザー (Holographic optical tweezers, HOTs) システムの研究を行ってきた²³⁾。HOTs システムは、空間光変調器を利用して2次元強度パターン生成の自由度を向上させた方式である⁶⁾。2000年前後には、コンピューター制御可能な空間光変調器 (Spatial light modulator, SLM) の画素分解能とフレーム速度が飛躍的に向上した。同時期に、マイクロコンピューターの性能も大幅に向上したため、SLMを実時間で操作することが可能になった。このようなデバイスの動向を背景にして、HOTs システムが実用的かつ機能的な技術になるに至った²⁴⁻³⁰⁾。我々が開発したシステムでは、SLMの高速なフレーム速度を利用して、物体を捕捉・移動させる運搬用ビームスポットと複数の物体を配列・固定させるための配列用マルチビームスポットを同時に発生させる。このことによって、ディスプレイに表示されている顕微領域のマイクロ物体の操作を、マウスのドラッグ&ドロップ操作で実現できるようになった。本解説では、我々が開発したオンデマンド HOTs システムについて概説する。

2. オンデマンド HOTs システム

我々の開発研究の目的は、液滴中に浮遊する複数の生細胞を、適切に選択し、自在に配列することである。図1に、我々が開発したオンデマンド HOTs システムの概略を示す。ディスプレイ上では、細胞を配列させる配列用マルチビームスポットの位置が常時マーキングされている。マウスカーソルによって浮遊する細胞から特定の細胞を選択したのち、それをドラッグ操作で移動させ、マーキング位置にドロップする。配列用マルチビームスポットの全てがマーキングされた位置に細胞を配列し終