

論 文

## 静電力および光圧力を併用した細胞等の微粒子の操作

今 村 誠\*, 細 井 功 一\*, 水 野 彰\*  
(1989年4月6日受理)

### Manipulation of Single Cells in Liquid by Electrostatic Force in Combination with Optical Pressure

M. IMAMURA\*, K. HOSOI\* and A. MIZUNO\*

(Received April 6, 1989)

In order to manipulate biological cells or molecules, the opt-electrostatic micro-manipulation has been proposed utilizing electrical force in combination with optical pressure of focussed laser beam. The optical pressure has two components, the optical confinement pressure and the optical drift pressure. Due to the optical confinement pressure, cells can be confined in the focussed laser beam. The confined cells are pushed away toward downstream of the laser by the optical drift pressure. The optical drift velocity of yeast cells dispersed in water was measured using an Ar laser, and was  $460 \mu\text{m/s}$  at the laser power of 500 mW. The combination of the light pressure and the electrical force was made using an electrode system having an insulating slit. The laser was focussed at the center of the slit, where a dc electric field was formed. The yeast cell acquired negative charge in deionized water. The cell, confined in the laser beam, could be manipulated on the axis of the laser beam by adjusting the dc voltage and the laser power. As an example, a cell feeder was constructed, by which single cell can be fed successively on the beam axis. An extraction process of yeast cells in water to air was also tested utilizing the optical pressure and the electrical force. A cell was optically transported to the surface, where a dc electric field was formed to extract the cell. This process may be used to supply biological cells or molecules into gas or vacuum where high speed sorting or analysis can be made.

### 1. はじめに

バイオテクノロジーの分野において、細胞等の微粒子の選別や計測等の操作は極めて重要な支援技術である。静電力を用いた技術としては電気泳動あるいは誘電泳動による細胞・タンパク等の分離・計測操作<sup>1)</sup>が広く行われている。また、細胞を含む液滴を形成して静電力により選別するセルソータ<sup>2,3)</sup>、パルス電圧を用いた細胞融合や遺伝子導入<sup>4,5)</sup>の技術が近年確立されてきた。しかし、個々の細胞等に着目した操作技術に関してはまだ極めて限られた種類の研究例のみであり、フォトリソグラフィーを用いて製作した流体集積回路による操作<sup>6,7)</sup>、あるいは収束したレーザ光の光圧力によるバクテリア、

ウイルスのトラップ<sup>8-10)</sup>、等が報告されている。

筆者らはより制御性の高い細胞操作を行うことを目的として、レーザ光による光圧力と、微小電極による静電力との組合せを用いた光圧静電微小操作と呼ぶ方法を提案した。収束したレーザ光は微粒子に光軸への閉じ込め力を及ぼすことができる。これは空間にポテンシャル井戸が形成できることであり、電極を用いた方法では不可能である。また、液体中に電気分解を起こすことなく高電界を形成して静電力による細胞操作を行うためには、スリットあるいはピンホールを持った絶縁物を微細加工で製作し、電流を集中させるとともに、低電圧で高電界が得られるようにすることが効果的である<sup>8)</sup>。スリットあるいはピンホール中央にレーザ光を収束することにより、光圧力と静電力を組み合わせることが可能であり、細胞等の微粒子をレーザ光軸上に閉じ込め電極等に接触させることなく、個々に操作することができる。この方法では、電極間の電界強度が一様でない場合においても、操作対象の微粒子が通過する収束したレーザ光軸上の電

キーワード：細胞操作、電気泳動、誘電泳動、光圧力、遺伝子操作

\* 豊橋技術科学大学電気電子工学系 (440 豊橋市天伯町)  
Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Toyohashi University of Technology, Ten-paku-cho,  
Toyohashi, 440 Japan

界強度が求められるので、極めて精度の高い操作が実現できる特徴を有していると考えられる。

本研究では、まず光圧力、静電力それぞれによる細胞の移動速度の測定等の予備実験を行い、この結果をもとに光圧力と静電力を組み合わせた光圧静電微小操作用セルを試作し、その基本的動作を実験的に調べた。また液体中の細胞等を気体中あるいは真空中に取り出す操作は、高速度の分離・分析等に必要な手段となり得ると考えられる。本研究では、液中の細胞をレーザ光で液面に運んだ後、液面に対向させた電極と液面との間に高電圧を印加し、細胞を液面から気体中に取り出す操作を試み、この取り出し操作が基本的に可能であることを示した。

## 2. 微粒子に働く静電力および光圧力

### 2.1 静電力

懸濁液中の細胞等の微粒子は電気泳動力、誘電泳動力、あるいはこれらの力の組合せにより操作することができます<sup>1,11)</sup>。電気泳動力は電界中の荷電粒子に働くクーロン力である。誘電泳動力は、外部電界により粒子に誘起される双極子モーメントと不平等電界との相互作用で生じる力であり、周波数の高い交流を使用することにより電気分解を抑制できるため液体中の微粒子操作に有用である。

### 2.2 光圧力

微粒子に光を照射すると光の屈折が生じ、光子の運動量が変化する。これにより微粒子に力が働く。この力を光圧力または輻射圧力といい文献8,9)に詳しい。光圧力は光軸に沿ってレーザ出射方向に働く駆動力と、光軸と垂直方向に働く閉じ込め力とに分解できる。本論文ではこれらを各々、軸方向光圧力および閉じ込め光圧力、と呼ぶ。軸方向光圧力の大きさは微粒子の屈折率とレーザ光の強度によって決まる。閉じ込め光圧力は、レーザ光強度がビーム中心部で大きく周辺部で小さいことに起因する。その大きさはレーザ光強度の光軸に垂直な面でのグレディエントに依存し、その方向は微粒子の屈折率が周囲媒質の屈折率より大きい場合、ビーム中心部に向かう。この閉じ込め光圧力により、空間にポテンシャル井戸が形成できるため光軸上に微粒子を閉じ込めたまま、静電力と軸方向光圧力による操作が可能になる。この光圧力は直径27 nmのレイリー散乱領域の微粒子にも働く。分子量約 $3 \times 10^6$ の生体高分子の直径が27 nm程度であり、生体高分子がラテックス粒子と同程度の屈折率であると仮定すれば、これ以上の分子量の生体高分子の光圧力による操作が可能であると考えられる<sup>10,12)</sup>。

## 3. 実験装置

図1に微粒子の光圧力による運動を観測するための装置を示す。内部寸法が、厚さ1 mm、幅8 mm、高さ8 mmの透明ガラス製セルを用いた。試料には、イースト菌(直径3~5 μm、長さ4~8 μmの球形)、およびポリスチレンラテックス粒子(直径0.20 μm、0.72 μmの球形)を純水に分散した懸濁液を使用した。このセルにレーザ光を水平に照射した。微粒子の運動を顕微鏡で観測しVCRに記録した。アルゴンイオンレーザ(連続発振、最大パワー2 W)を使用した。開口数0.14の顕微鏡用対物レンズで集光したレーザビームをセル中に導入した。レーザビームの光軸に垂直方向の光強度はガウス分布をしている。

図2は光圧静電微小操作の基本動作を確認するために試作した電流集中型セルを示す。ガラス板上にアルミ電極を貼り、2 mm間隔で対向させた。電極中央にはレーザ光照射のために直径3 mmの穴があけてある。この電極間の中央に厚さ100 μmのポリプロピレン製のスリットを設けた。スリット幅dは150 μmである。電流をより集中させるには、操作対象の細胞の直径よりわずかに大きいピンホールにすることが望ましいが、レーザ光の照射および散乱光の観測を容易にするために図のようなスリットとした。

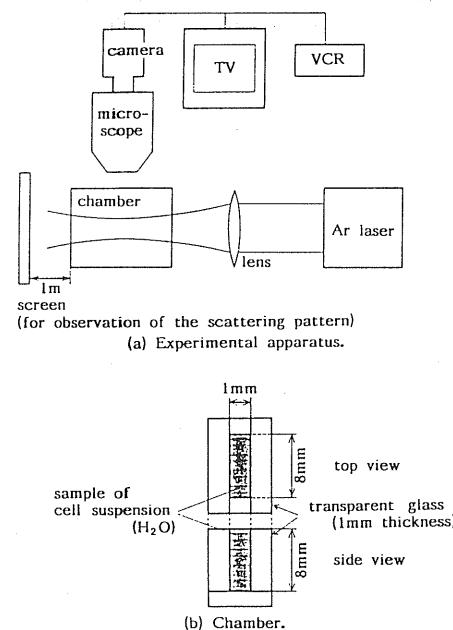


図1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus for observation of particle motion by the light pressure.

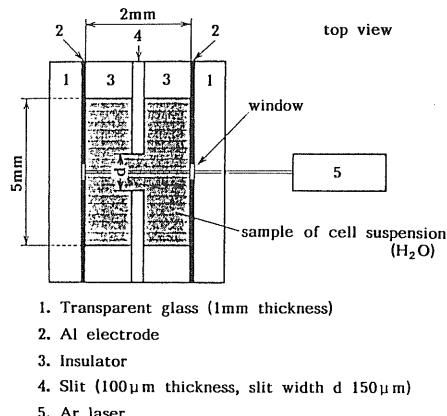


図 2 電気力と光圧力を組み合わせた細胞操作装置

Fig. 2 Opt-electrostatic micro-manipulation device.

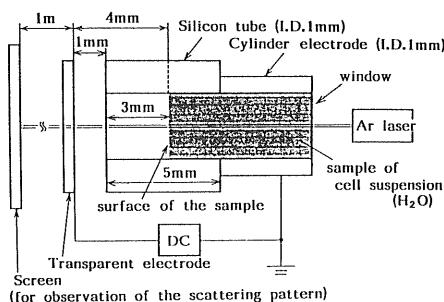


図 3 光圧力と電界による細胞の気中への取り出し装置

Fig. 3 Cell extraction device.

図 3 に静電力と光圧力を組み合わせて液体表面から微粒子を取り出す操作が可能であるかどうかを調べるために装置を示す。内径 1 mm のシリコン製チューブとアルミ製チューブを接続し、チューブ内にイースト菌の懸濁液を封入した。レーザ光はアルミ製チューブの端に取り付けたガラス板を通して導入し、シリコン製チューブの先端から 3 mm の位置にある懸濁液表面に集光した。直流電圧をシリコン製チューブの前に置いた透明電極とアルミ製チューブとの間に印加し、懸濁液表面と透明電極との間に、微粒子を液面から引き出すための電界を形成した。なお液面に運ばれた微粒子の前方散乱パターンを、透明電極から 1 m 離れた位置に置いたスクリーンで観察した。

#### 4. 光圧力、静電力による微粒子の運動

##### 4.1 光圧力による光軸方向への運動

イースト菌あるいはポリスチレンラテックス粒子の懸濁液を図 1 に示すセルに満たし、光圧力による運動の観測を行った。図 4 に光パワー 500 mW のレーザ光を集め、セルに照射したときの焦点付近でのイースト菌の

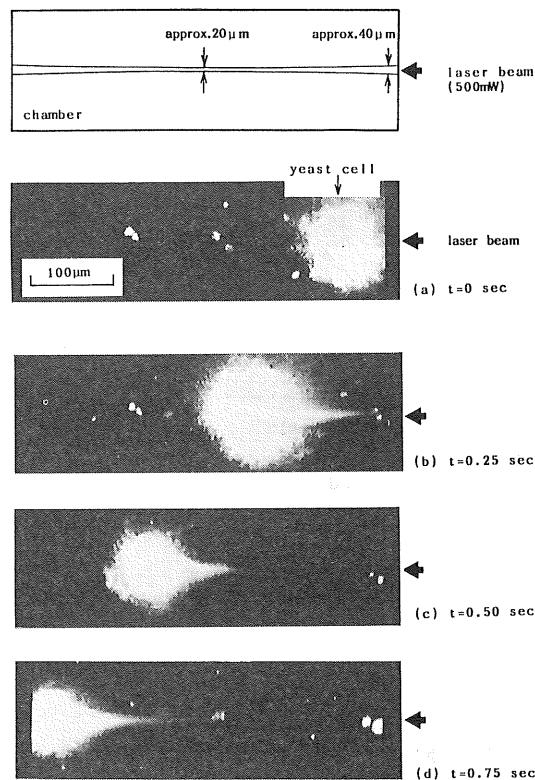


図 4 光圧力によるイースト菌の移動

Fig. 4 Sequence photographs of yeast cell motion by light pressure.

運動を示す。レーザビームは図 4 の写真の右側から照射している。イースト菌はレーザビームに引き込まれ、ビーム上を右から左へ移動している。これらは録画したビデオ画面を 0.25 秒おきに写真撮影したものである。光軸上を移動するイースト菌からの散乱光が強く、大きなスポットとして VCR に録画されている。この場合のイースト菌の移動速度は 450  $\mu$ m/s であった。

図 5 にイースト菌およびラテックス粒子の光軸方向の移動速度とレーザ光のパワー  $P_t$  との関係を示す。これらの移動速度は  $P_t$  にほぼ比例しているという結果が得られた。微粒子の移動はレーザビーム焦点から  $\pm 800$   $\mu$ m 以内の範囲で確認できた。

この実験において、光の吸収の大きい媒質、例えば螢光染料を含んだ液、を使用しない限りセル内部の対流は無視できる程度であった。すなわち、光軸から少し外れた位置にありレーザビームに引き込まれる前の微粒子は対流が起こっていれば動くはずであるが、本実験条件下ではその動きは無視できる程度であった。またビーム近傍の微粒子がビーム中心に引き込まれることは閉じ込め光圧力が働いていることを示している。もし光の当たっ

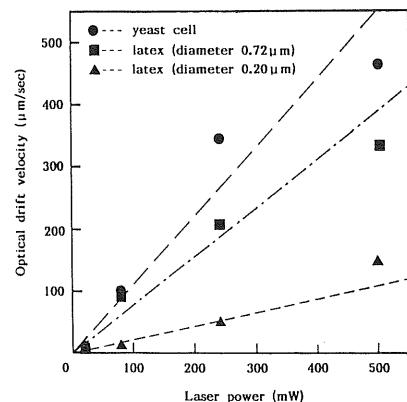


図 5 光圧力による粒子移動速度とレーザ光強度

Fig. 5 Relationship between the optical drift velocity and the laser power.

た側の微粒子表面温度が上昇し光泳動が生じているなら微粒子はビームからはずれる方向に動くはずであるので光泳動の寄与は無視してよいと考えられる。この光泳動については文献13)に詳しい。以上より、本実験条件下での光による微粒子の移動は光圧力によるものと考えられる。

#### 4.2 収束したレーザ光圧力による細胞操作

レーザ光を照射した細胞には軸方向光圧力と閉じ込め光圧力が働く。光軸への閉じ込め光圧力が働いている範囲内でレーザビームを光軸に垂直方向に動かすと、光軸上の細胞はビームに追随するので細胞の二次的な操作が可能となる。図6にイースト菌に対する操作例を示す。レーザのパワーを240 mWとし、図において上方へ60 μm/sの速度でレーザビームを走査した。ビームに閉じ込められたイースト菌はビームと共に上方へ移動する。このときイースト菌は同時に軸方向光圧力により光軸方向にも移動する。その移動速度はビームを静止した時より遅く、150 μm/sであった。これは光強度がガウス分布をしているビームの中心からイースト菌が外れているためである。

ビームの走査速度を100 μm/sに上げてもイースト菌はビームに追随した。走査速度をさらに上昇させると、イースト菌はビームに追随できず、ビームから外れる。閉じ込め光圧力と軸方向光圧力との比率は、イースト菌が追随できるビーム走査速度の最大値と、ビームを静止させたときの光軸方向移動速度との比率と考えられる。レーザパワー80~500 mWの範囲において、イースト菌、ラテックス粒子ともにこの比率は20~40%であった。この比率はレーザビームの光軸に垂直方向の光強度分布が異なるれば変化するはずである。

図 7(a), (b) に、二つのレーザビームによる細胞操作例

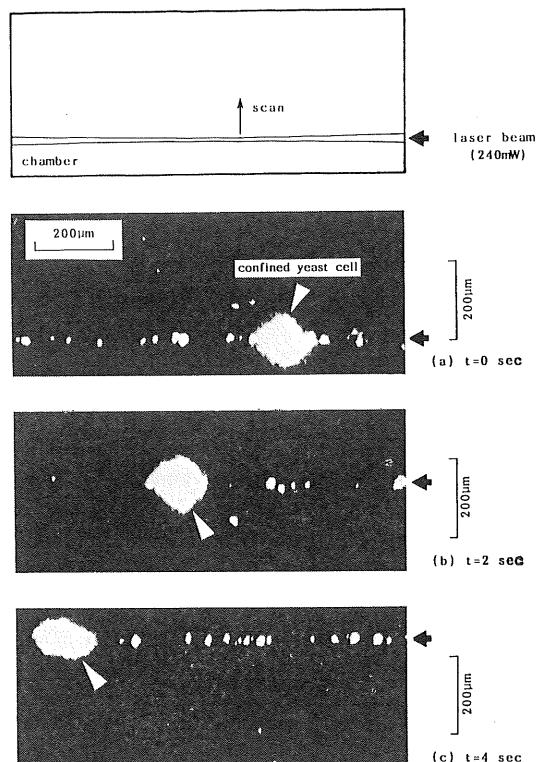


図 6 レーザ光走査によるイースト菌の操作

Fig. 6 Manipulation of the confined yeast cell by scanning the laser beam.

を示す。これらの写真は、二本のビームの交差点付近でのイースト菌の挙動を2秒おきに撮影したものである。ビームをハーフミラーで二本に分け、イースト菌を分散させたセル中で、それぞれのビームが焦点付近で交差するように調整した。右上から入射させたビーム(ビーム1)のパワーは350 mW、右下から入射させたビーム(ビーム2)のパワーは140 mWである。ビーム付近のイースト菌は、ビーム内に引き込まれ動きはじめる。図中矢印で示す強い散乱光が、光軸上に引き込まれたイースト菌である。同図(a), (b)に示すように、ビーム2に沿って光軸を移動してきたイースト菌(移動速度80 μm/s)は、ビームの交差点でビーム1による力を受け、同図(c), (d)に示すように、ビーム1に沿って移動する。イースト菌が、ビーム1に沿って交差点にきたときに、ビーム2をフィルタで減衰させると、そのままビーム1に沿って移動する。なお、イースト菌移動速度が、前項で測定した値に比べて小さいが、細胞が高濃度で存在する条件で実験を行ったため、レーザ光が、目的細胞以外のビーム中の細胞によって減衰されたことが原因であろうと思われる。

後述の細胞供給装置の後にこの方法を用いることによ

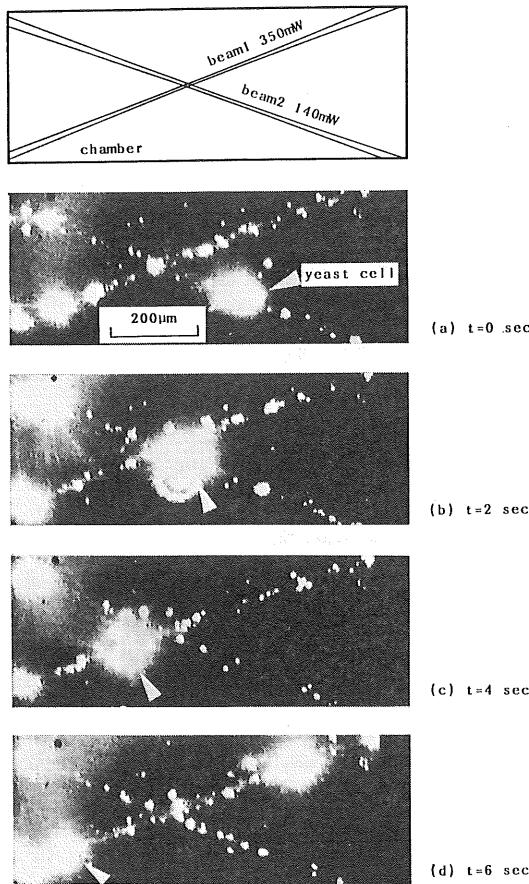


図 7 レーザビーム 2 本によるイースト菌の操作

Fig. 7 Manipulation of the confined yeast cell using double laser beams.

り、個々の細胞の選別操作が可能となる。このとき細胞の種類はセルソータと同様、前方および側方散乱光、蛍光等により識別することができる<sup>20</sup>。特に光圧力による操作では、粒子が光軸中心を動くので鮮明な散乱パターンが観測できる<sup>14</sup>。レーザ光でイースト菌およびラテックス粒子を移動させる実験において、ビーム中央に引き込まれた粒子からの散乱パターンを図 8 に示す。これらは、イースト菌およびラテックス粒子（直径 0.20 μm）が光軸上を移動する際に、セル前方に設置したスクリーンに写しだされた散乱パターンの一例である。なお、スクリーン中央は減光のため黒くしてある。これらの散乱パターンを解析することにより、細胞等の形状を高精度で分析できるので、この情報をもとに選別操作等を行うことが可能であると考えられる。

#### 4.3 静電気力による細胞の運動

図 2 に示した電流集中型セルを用いて、直流電圧印加時のスリット付近での細胞の運動の観測を行った。細胞

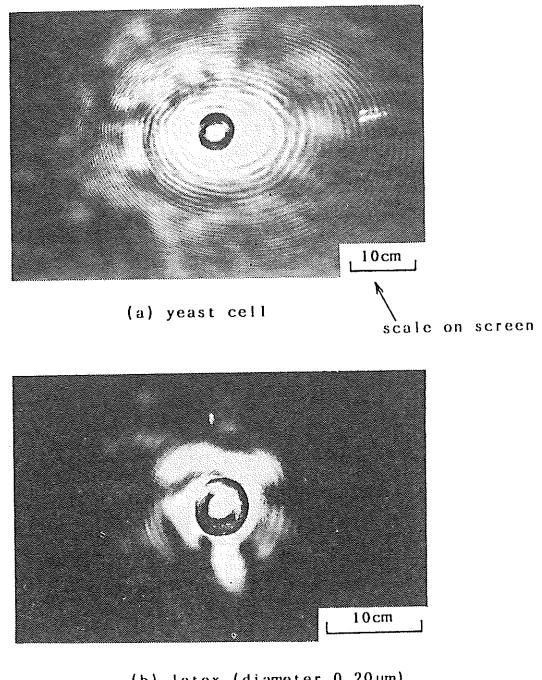


図 8 レーザ光軸上の粒子の前方散乱光パターン

Fig. 8 Forward scattering pattern of a particle confined in the focused laser beam.  
(Black plate (dia. 5 cm) attached at the center of the scattering pattern to avoid halation when photographed.)

表面は通常負に帯電しているため、直流電界により電気泳動力が働き、陽極側に引き寄せられる。印加電圧 5 V で電気分解が起こりセル内に気泡が発生したので、これ以下の電圧範囲で実験を行った。その結果、イースト菌はスリットを通って左側（陰極側）から右側（陽極側）へ移動した。スリット付近での移動速度は、印加電圧 2 V のとき 50 μm/s, 4 V のとき 190 μm/s であった。移動速度が印加電圧に比例していないのは、電圧が高くなると微弱な電気分解の発生およびジュール熱の発生により対流が起きているためと思われる。

この実験結果から、電流集中型セルを用いて直流電圧により、イースト菌を 200 μm/s 以下の速度で働かせることができたことが確かめられた。レーザ光による速度と同程度であることから、後述のような光圧力と電気泳動力とを併用したイースト菌の操作が可能である。なお、電極間に高周波電圧を印加して、誘電泳動力を操作に利用することも可能であると考えられる。

### 5. 光圧静電微小操作の基礎実験

#### 5.1 細胞供給操作

図 2 に示す電流集中型セル内を用いて個々の細胞の供

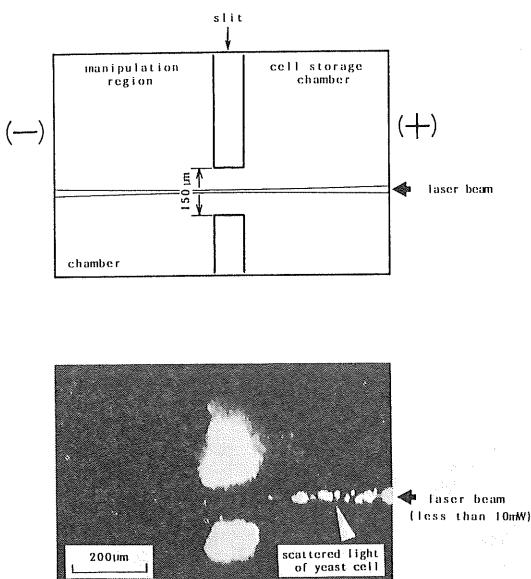


図 9 直流電界によるイースト菌の閉じ込め

Fig. 9 Confinement of yeast cells using the electro-phoretic force.

給操作を行った。高濃度で細胞が存在するスリット右側の細胞供給部から左側の細胞操作部へ1個ずつ細胞を供給するものである。まずセル内に純水を入れ、電極間に直流電圧を印加し右向きの電気泳動力が働いている状態で、スリット右側の細胞供給部の純水を細胞懸濁液に置換した。図9に、電極間に2Vの電圧を印加しつつイースト菌懸濁液を導入したときのセルを示す。浮遊しているイースト菌を観測するため、光圧力が無視できる程度の弱いレーザ光を照射した。写真中央に明るく見えるのがスリットである。スリットの右側の細胞供給部はイースト菌が高濃度で存在するために、レーザの散乱光が多く見られるが、スリット左側には散乱光がほとんど見られない。このように、イースト菌を細胞供給部に高濃度のまま保持できる。ただし、本実験においてはイースト菌懸濁液をマイクロピペットを用いて注入し純水と置換したので、置換時に若干のイースト菌がスリット左側に混入した。これは液体の微量定量供給を行えば防げるはずである。

図10(a)～(d)は、イースト菌を細胞供給部に閉じ込めた後、レーザ光でスリット左側の細胞操作部に1個ずつ供給する様子を4秒おきに撮影した写真である。電極間に1Vの直流電圧を印加しつつ、セルに右から光パワー80 mWのレーザ光を照射した。光圧力により、細胞供給部のイースト菌がビームに沿ってスリットを通過し[同図(a), (b)]、細胞操作部に供給される[同図(c), (d)]。ただし、同図(a), (b)において、スリットの左側に円形で

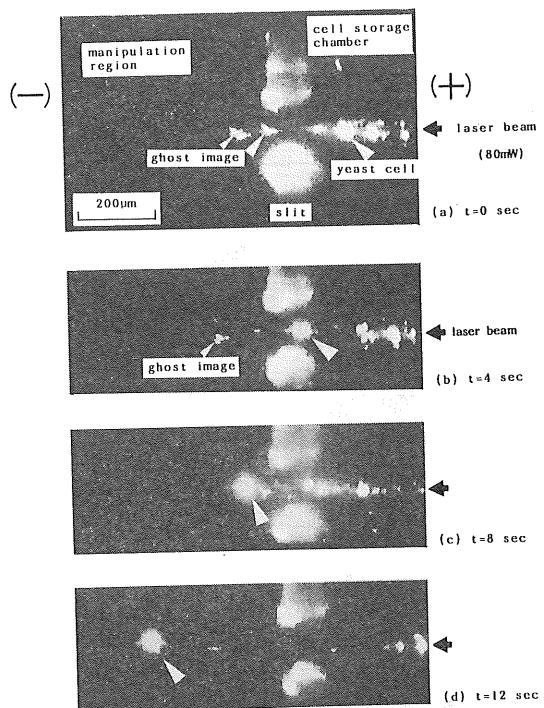


図 10 電気力と光圧力を組み合わせた細胞供給動作

Fig. 10 Feeding of single cells by the opt-electrostatic micro-manipulation.

ない散乱光が見られるが、これらはスリット右側のイースト菌の散乱光がスリットで反射したものである。

以上の実験より、電流集中型セルは、電気泳動力と光圧力を適切に選択することで、細胞等を一個ずつ供給できる装置となり得ることが判明した。軸方向光圧力が電気泳動力より少し大きい場合、細胞等はビーム中央のパワーの高い中心線上のみで電気泳動力に逆らって光圧力で運ばれるはずである。したがって、この細胞供給操作は、確実に一個ずつ細胞をビームに沿って供給できる利点を有している。この細胞供給装置に、4.2で述べたレーザ光による細胞操作を組み合わせることにより、細胞等の選択操作が可能である。

## 5.2 光軸上での静止、および逆方向移動操作

前項で述べた細胞供給操作は、スリット内で電気泳動力が光圧力よりやや大きい条件となるように、印加電圧およびレーザ光パワーを調整して行った。電気泳動力と光圧力とのバランスを変化することによりレーザビーム上に細胞を静止させる、あるいは細胞を光源に向って押し戻す操作が可能である。

図2の装置でレーザの光パワーを80 mW一定とし、印加直流電圧を上昇したところ、スリット内を光軸方向に動くイースト菌の移動速度が低下し、2.5 Vで静止し

た。さらに電圧を上昇させると光軸に閉じ込められたまま逆方向(右向き)に移動した。このように光軸方向に直流電界を形成することにより、光軸上に微粒子を動かすことができる。特に光軸上に静止させた場合、微粒子からの散乱光のパターンがより鮮明になる。このとき球形でない粒子は電界方向には配向させることができるので、粒子形状の測定に有効であると考えられる。高周波交流不平等電界を用い、最大電界強度の位置をレーザ光軸と一致させることにより、光軸上に微粒子を静止させることも可能である。この場合には電界方向を任意に設定できることで、配向させた非球形粒子に特定の方向から光を照射することができ、極めて高精度の形状測定が可能となる。また、光軸上で微粒子を結合させることも容易である。前項の細胞供給装置を2つ用いて、異なる細胞どうしを光軸上で結合させることができるので細胞融合操作にも有効であろうと思われる。

### 5.3 細胞の液面から気中への取り出し

図3に示したセルを用い、光圧力と静電力を組み合わ

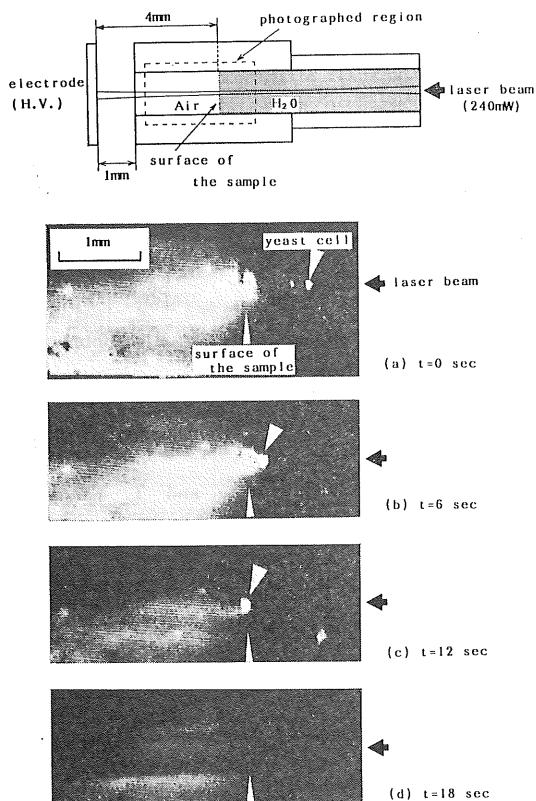


図 11 光圧力と電界による液体中の細胞の気中への取り出し操作

Fig. 11 Cell extraction from the liquid surface into air using light pressure and dc high electric field.

せて、液体表面からの細胞の取り出し操作を試みた。図11(a)～(d)に観測結果を示す。セルにイースト菌懸濁液を封入し、光パワー 240 mW でレーザビームを照射すると、ビーム付近のイースト菌は、ビームに引き込まれ、ビームに沿って液面まで移動し、ここでビームからはずれることなく静止した [同図 (a)～(c)]。ただし (a), (b) には、移動中のイースト菌のほかに、すでに液面に静止したものも存在している様子が観察される。イースト菌を液面に静止させた後、液面の 4 mm 前方に對向させた透明な平板電極と接地したセルとの間に電圧を印加し、液面に直流高電界を形成した。電圧を +5～+7 kV まで上昇させると、液面に静止していたイースト菌の散乱光が消えた [同図 (d)]。これは、液面にあったイースト菌が気中に飛び出したことに対応していると思われる。このとき、図8に示すような前方散乱パターンも、イースト菌が液面に静止している間は観測できるが、図11(d)に示すようにイースト菌からの側方散乱光が消えた瞬間に、前方散乱パターンも消えることが確認できた。電圧印加時の電界による液面の動き、あるいは乱れは観測できなかった。液が電界噴霧されている様子も観測できなかつた。

この結果から、レーザ光圧力によりイースト菌が液体表面に突出し、そのため電気力線が集中して、イースト菌を液面から引き出した可能性が考えられる。このメカニズムの理論的解析は今後の課題である。

### 6. レーザ光によるイースト菌の損傷

レーザ光を照射したイースト菌懸濁液と、照射しない液を寒天培養し発生したコロニー数を比較し、レーザ光照射による細胞への影響を調べた。内径 1 mm、長さ 5 mm の円筒型セルにイースト菌懸濁液を 2  $\mu$ l 注入し、これに収束したレーザ光を照射した。このときのイースト菌濃度は、懸濁液 2  $\mu$ l を培養したときのコロニー数が 70 個程度になるように調整した。光パワー 80 mW で、セル内の 50 個のイースト菌を約 1 mm 移動させる操作を行い、その後セル内の 2  $\mu$ l イースト菌懸濁液を培養した結果、コロニー数が 42～63 個に減少した。光パワー 500 mW で同様の操作を行ったものは、コロニー数が 35～66 個になった。いずれの場合にも、レーザ光による損傷を受けていることは否定できない。80 mW で 1 mm 移動させるには 10 秒程度照射時間が必要で、500 mW では 2 秒程度必要であった。イースト菌に照射された光のエネルギーが同程度となったため、両者におけるコロニー数の減少に大きな差異が現れなかつたと考えられる。

レーザ光照射による細胞等の損傷についてはいくつか

の報告がある<sup>10,15</sup>。これらによると、アルゴンイオンレーザを用いて光パワー 20 mW で数分間イースト菌に照射した場合イースト菌に著しい損傷を与えるが、光源に赤外線レーザ（YAG レーザ）を使用すると、光パワー 5~80 mW の範囲で、損傷を与えることなくビーム焦点付近にトラップでき、またイースト菌の出芽も確認できることが報告されている<sup>15</sup>。またイースト菌以外のバクテリア、赤血球などについても、赤外線レーザの使用により、ダメージを与えることなく操作できることも報告されている<sup>15</sup>。

この実験で、レーザ照射によるイースト菌の損傷に関してある程度の知見が得られた。この問題は光で細胞操作を行うにあたり極めて重要であるので、今後さらに、操作した個々の細胞について定量的にレーザ照射の影響を調べる必要があると考えている。

## 7. 結 論

収束したレーザによる光圧力と電流集中型セルによる静電力を併用した、光圧静電微小操作法と呼ぶ液体中の細胞等の新しい操作方法を提案し、その基本的動作を実験的に調べた。光圧力は軸方向光圧力および閉じ込め光圧力とからなり、閉じ込め光圧力により空間に微粒子閉じ込めのためのボテンシャル井戸を形成することができる。電流集中型セルを用い、電気泳動力と軸方向光圧力が同程度となる条件で両者を組み合わせて、電極に接触させることなくレーザ光軸上での細胞の保持、前後進操作ならびに個々の細胞の供給操作が可能であることを示した。本方法は細胞等を電極内の特定の位置を通過させることができたため、操作精度が高い利点を有していると考えられる。また、光圧力により液体中の細胞を液体表面に運び静止させた後、液体表面に形成した直流高電界により細胞を気体中に取り出す方法を提案し、この操作が基本的に可能であることを示した。レーザ光による細胞等への損傷の低減等、今後解決すべき問題が残されているが、提案した二種類の操作法は、細胞のみなら

ず生体高分子の分離、分析の新しい手段になり得るものと考えられる。

本研究を進めるにあたり貴重な御助言をいただいた日本本光工業株式会社 木村茂行氏、渡辺光雄氏、眞砂 央氏、長谷川勝二氏ならびに成蹊大学工学部電気工学科助教授 鶯津正夫氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) H.A. Pohl : *Dielectrophoresis*, Cambridge University Press, Cambridge (1978)
- 2) M.R. Melamed, P.F. Mullany and M.L. Mendelsohn : *Flow Cytometry and Sorting*, John Wiley & Sons, New York (1979)
- 3) A. Mizuno, T. Nakashima, T. Kawakami, H. Masago and K. Hasegawa : Development of a Softlanding Type Multi-Cell Sorting System using an Upward Nozzle, *Conference Record IEEE IAS*, p. 1992 (1989)
- 4) U. Zimmermann, P. Scheurich, G. Pilwat and R. Benz : *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 20 (1981) 325
- 5) U. Zimmermann, W.N. Arnord and W. Hehrle : *J. Electrostat.*, 21 (1988) 309
- 6) S. Masuda, M. Washizu and T. Nanba : *Conference Record of IEEE/IAS*, p. 1549 (1987)
- 7) M. Washizu, T. Nanba and S. Masuda : *Conference Record IEEE IAS*, p. 1735 (1988)
- 8) A. Ashkin : *Phys. Rev. Lett.*, 24 (1970) 156
- 9) A. Ashkin and J.M. Dziedzic : *Appl. Phys. Lett.*, 19 (1971) 283
- 10) A. Ashkin and J.M. Dziedzic : *Science*, 235 (1987) 1517
- 11) 静電気学会編：静電気ハンドブック，pp. 307~309，オーム社 (1981)
- 12) A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm and S. Chu : *Lett.*, 11 (1986) 288
- 13) 早川一也監訳：エアロゾルテクノロジー，pp. 155~157，井上書院 (1985)
- 14) A. Ashkin and J.M. Dziedzic : *Appl. Opt.*, 19 (1980) 660
- 15) A. Ashkin, J.M. Dziedzic and T. Yamane : *Nature*, 330 (1987) 769