

Title	レーザーピンセット
Author(s)	笹木, 敬司
Citation	大阪大学低温センターだより. 92 P.1-P.4
Issue Date	1995-10
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/8225
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

レーザーピンセット

工学部 笹木 敬司 (内線7839)

E-mail : sasaki@ap.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

高分子ラテックス、微小液滴、マイクロカプセルなどのマイクロメートルオーダーの微粒子を気体や液体中に分散して顕微鏡で覗くと、ブラウン運動で激しく動き回る様子が観測される。この熱エネルギーによる不規則運動をレーザー光の持つ力「放射圧」を利用して抑制し、空間のある位置に捕捉するレーザーピンセットと呼ばれる技術が最近注目されている¹⁾。我々は、この技術を発展させて、多数の微粒子をレーザー光で自在に操り空間パターンに配列して輸送したり、微小構造物を組み立て加工するマイクロマニピュレーション技術を開発し、微小領域における化学反応場の作製や反応過程の制御などの研究に応用している²⁾。本稿では、放射圧を用いたレーザーピンセットの原理について説明するとともに、新しい微粒子操作技術について応用例を交えながら紹介する。

2. 放射圧発生のメカニズム

フォトン質量を持たないが、波数ベクトルに比例した運動量を有する。この運動量を持つフォトンが微粒子表面で反射、屈折すると、波数ベクトルの方向が変わるため、運動量保存則により微粒子に力が作用する。また、フォトンが吸収される時も、運動量が失われることから同じく力が発生する。この光と微粒子の相互作用により生じる力が放射圧である。電磁理論に基づいて運動量変化を解析すると、周囲の媒質より屈折率が高い透明な微粒子の場合、放射圧は光強度の高い方向に作用する。たとえば、顕微鏡対物レンズでレーザー光を微粒子に集光すると、微粒子は焦点位置付近に引き寄せられ熱運動が抑えられて3次元的に捕捉される。この原理に基づくレーザーピンセット技術により、高分子ラテックス、微小液滴、シリカゲル、ガラスビーズ、バクテリアやウイルス、染色体、精子、小さいものでは数十nmの膨潤ミセルなどを水や種々のアルコール中でトラッピングできることが確認されている²⁾。

3. 放射圧を利用した高感度な力計測

微粒子に作用する放射圧を理論的、実験的に見積もると、mWのレーザー光で 10^{-12} Nオーダーの力である。これは原子間力顕微鏡のチップ先端に作用する力よりもはるかに小さく、筋肉を構成する分子一個一個が引き合う力と同程度である。この放射圧を光バネとして利用すれば、そのバネ定数が極めて小さいことから高感度な力計測を行う

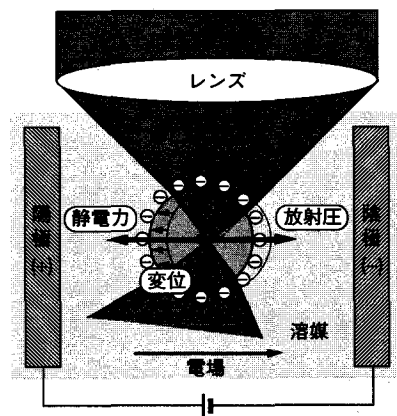


図1 放射圧を用いた表面電荷測定の実験原理

ことが可能である。図1は、我々が開発した単一微粒子の表面電荷密度測定装置の原理図である³⁾。液体中に分散した微粒子は解離や吸着により電荷を帯び、電場下に置くと微弱な静電力が発生する。この静電力を微粒子一個一個について観測し表面電荷密度を解析して解離や吸着現象を明らかにするのが図1の装置である。本装置は、レーザー光を顕微鏡下で集光して液体中の単一微粒子を捕捉するとともに、マイクロ電極を使って電場を印加し表面電荷による静電力を作用させる。微粒子は静電力と放射圧が釣り合う位置に変位し、その変位が設定値になるように印加電圧にフィードバックをかけて、その電圧から表面電荷密度を求める。本装置は、電場内の微粒子の流れから電荷密度を解析する電気泳動法と比べると、零位法に基づくため高い測定精度が得られるだけでなく、不均一な媒質や時間的に変化する試料にも適用できるという特徴があり、また単一微粒子の分光測定と組み合わせて微粒子表面・界面の物質分析を行うことも可能である。

4. レーザー走査マイクロマニピュレーション

従来のレーザートラッピングは一個の微粒子の捕捉を目的としたものであり、ビームの本数を増やさなければ複数の微粒子を同時に操作することはできない。また、周囲よりも屈折率の低い微粒子や光を反射・吸収する金属微粒子などは、放射圧がレーザー光から遠ざかる方向、すなわち斥力として働くために捕捉することは困難である。たとえば、水は有機溶媒よりも屈折率が低いため、水滴を有機溶媒中で捕捉することは難しい。我々は、これらの問題点を解決する新しい手法としてレーザー走査マイクロマニピュレーション法を開発した²⁾。本手法は、レーザー光をコンピュータ制御した電動ミラーによって高速に走査し、試料面上で集光ビームを任意の形状に繰り返し描画するものである。微粒子に働く放射圧は時間平均した光強度分布から与えられるので、屈折率の高い透明な微粒子の場合、レーザースポットの軌跡上に複数の微粒子が配列してパターンを形成する。また、レーザー光の強度と走査速度を適当に調整すると、配列した微粒子をパターンに沿って任意の速度で輸送することもできる。金属微粒子や屈折率の高い微粒子については、微粒子を取り囲むように集光ビームを円形に走査することにより、微粒子は全て方向から斥力を受け、いわば「光のかご」の中に3次的に閉じこめて捕捉することができる。

図2は、“ μm ”という文字パターンを描画し、有機溶媒中で高分子微粒子（粒径 $1\ \mu\text{m}$ ）を配列させ

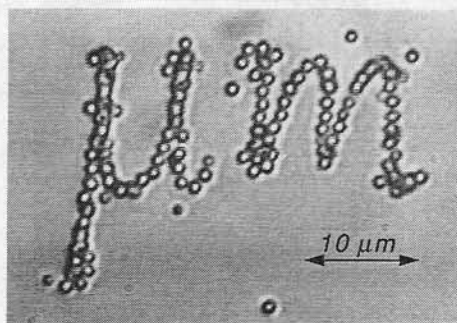


図2 高分子微粒子（粒径 $1\ \mu\text{m}$ ）によるパターン形成

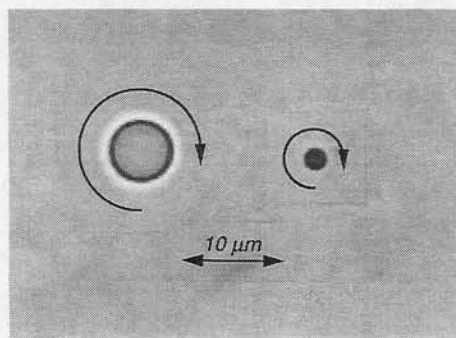


図3 周囲の媒質より屈折率が低い微小液滴のトラッピング

た様子である。レーザー光を照射しはじめた時点では視野内に微粒子は存在しないが、放射圧により多数の微粒子が引き寄せられ、数十秒後には数珠状に並んで図のパターンが形成される。パターン形成はコンピュータ制御されているので時間的に図形を変化させることも容易にできる。図3は、屈折率の低い微粒子の捕捉例として、2本のトラッピング用レーザーを同時に円形走査して、赤色の色素を溶かした水滴（屈折率1.33、図中右側）とエチレングリコールの液滴（屈折率1.43、図中左側）を流動パラフィン（屈折率1.46~1.47）中で捕捉した様子である。「光のかご」を動かして二つの液滴を近づけ、一つの「光のかご」の中に入れて、その輪を小さくしていくと二つの液滴を融合することもできる。このレーザー走査マイクロマニピュレーション法と従来のレーザートラッピング法を相補的に用いることにより、あらゆる微粒子の捕捉が可能である。

5. 微粒子の分光・加工

液体中をブラウン運動する微粒子一個を捕捉しパルスレーザー光を照射してピコ秒分光測定を行うシステムにより、微粒子に特有な様々な現象を解析することができる。その一つとして、図4は、ローダミンBをドーブした高分子微粒子にナノ秒パルスYAGレーザーの第2高調波（532nm）を照射してレーザー発振を誘起したところである。これは、表面張力によって球形をした微粒子が光共振器として働き、発光が微粒子の内部に高いQ値で閉じこめられて誘導放出が誘起されたものである。図で、球全体にぼんやりと光るオレンジ色の蛍光とは別に球の縁でリング状に明るく輝いているのが発振光である。この微粒子レーザー発振を利用すると、微粒子内部、特に界面近傍の分光情報を極めて高感度に観測することができ、また自在に動かせる微小光源としてニアフィールド走査顕微鏡のプロープに応用することもできる²⁾。

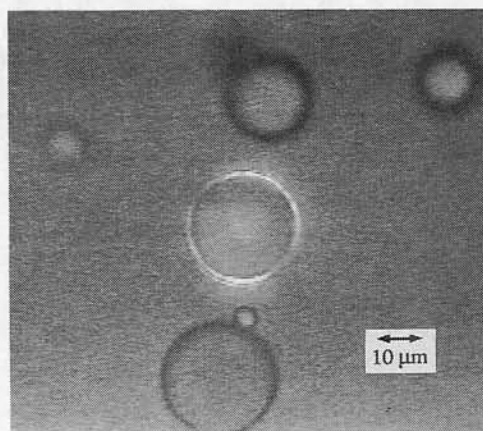


図4 ローダミンBをドーブした高分子微粒子(粒径 $24\mu\text{m}$)のレーザー捕捉・発振

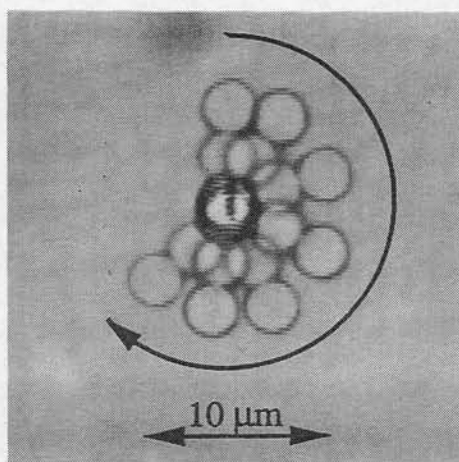


図5 高分子微粒子からなる微小構造物の回転・振り子運動

また、励起レーザー光によって種々の化学反応を誘起し微粒子に加工を行うこともできる。たとえば、複数の微粒子を操作しながら光重合反応を用いて接着し微小構造物を組み立てたり、高強度レーザーでアブレーションを誘起して単一微粒子に穴を貫通させたりすることにも既に成功している²⁾。図5は、高分子微粒子3個を接着して作った構造物の両端を2本のレーザーで捕捉し、一方を固定してもう一方

を回すことで回転運動や振り子運動を行っている様子である。3次元的な駆動も可能でありマイクロマシンの組み立てやハンドリングに応用できる。

6. おわりに

微小空間で種々の微粒子を自在に操ることができるレーザーマニピュレーションについて応用例を交えながら紹介した。これらの技術はマイクロ化学のみならず様々なマイクロテクノロジーに応用できるとともに、微小領域の物理・化学現象さらには生物試料の研究に役立つものと期待される。また、技術的な応用だけでなく、レーザー光でナノメートルオーダーの分子あるいは分子集合体に放射圧を作用させて、物理・化学的な環境を制御したり、新しい現象を誘起しようという試みも既に始まっている。

参考文献

- 1) A. Ashkin: Phys. Rev. Lett., 24, 156 (1970). A. Ashkin: Science, 210, 1081 (1980).
A. Ashkin, et al.: Opt. Lett., 11, 288 (1986).
- 2) Masuhara, ed., Microchemistry (Elsevier, Amsterdam, 1994). 極微変換プロジェクト編：
マイクロ化学, (化学同人, 1993).
- 3) 笹木、他：レーザー顕微鏡研究会第13回講演会論文集 p.49-54.