

## 最近の技術から

# ニアフィールド光学顕微鏡におけるレーザートラップ技術

河田 聡

大阪大学工学部 〒565 吹田市山田丘 2-1

### 1. はじめに—レーザートラップ技術の応用性

レーザー光の放射圧を用いて微小な粒子を駆動させる研究は、Ashkin による単一のフォーカスビームによるトラッピングの提案と成果報告によって、はじめて実用的なものとなり<sup>1)</sup>、その結果、現在では多くの関連研究が行われている。しかし、応用の点から考えると、レーザー光によるトラップ力は非常に小さいので（ピコニュートンのオーダー）、あまり過度の期待をすることはできない。細胞や微小器官などを操作する細胞工学、生物工学などへの応用が、特に注目されているほか<sup>2,3)</sup>、マイクロマシン技術における非電氣的駆動力としての検討が、よく議論されている<sup>4)</sup>。

では、ピコニュートン程度の力を有効に利用できる科学技術は、これらのほかにあるだろうか。ここで紹介するのは、プローブ走査顕微鏡のプローブの制御力としての、レーザートラッピング技術の応用の一例である<sup>5,6)</sup>。プローブ走査顕微鏡の針先は非常に細く、また試料を破壊しないためにその力はできる限り小さいことが望ましく、レーザー・トラッピングがうまく利用できる。

### 2. プローブ走査光学顕微鏡の弱点

光学顕微鏡におけるプローブ走査顕微鏡は、ニアフィールド顕微鏡 (NSOM)<sup>7)</sup>とか、フォトン STM<sup>8)</sup>、あるいはエバネッセント場顕微鏡<sup>9)</sup>、などいくつかの名称で呼ばれている。このような光学的なプローブ顕微鏡は、ほかのプローブ顕微鏡 (STM や AFM, MFM など) と比べて、プローブと試料の距離を nm オーダーで一定に保つことが難しい、という欠点を有している。これは他のプローブ顕微鏡と異なり、NSOM の検出光強度は、試料の高さ情報、構造、および屈折率や吸光度、蛍光強度などの光学定数を反映しており、それらを互いに分離して測定することが難しいこと、による。

また、信号感度が微弱である上に、雑音となる要因が多くあり、SN 比が他のプローブ顕微鏡より非常に低い

ため、プローブと試料の間の距離を十分小さくすることは、きわめて難しい。

この SN 比の低さをカバーするために、プローブあるいは試料には、比較的強いレーザー光が導入されることになる。その結果、試料やプローブは吸収に伴う熱的影響を受けることになるが、試料、プローブそして装置各部品における熱膨張係数の違いがあると、試料の形状や光学定数を測定しているのか、熱膨張を測定しているのかわからなくなりかねない。

### 3. プローブのレーザー・トラップ走査

レーザートラップ力をプローブの制御に応用すると、この問題がうまく解決できる。図1に今回われわれが提案したレーザー・トラップによるプローブの走査の原理を示す。フォトンが境界面で反射および屈折により散乱すると、フォトンの運動量が変化し、運動量保存則より境界面には変化分の力積による放射圧が発生する。図1に示すように、プローブにガウシアンビームが集光されると、プローブは電場の勾配により、光軸中心に引き寄せられる。ビームウエストの位置(スポットの集光位置)がプローブの中心よりやや下方に来るように調整すると、プローブは試料表面上にわずかに押しつけられる。その結果、プローブと試料表面間の距離は、ゼロに保たれる。

### 4. 実験装置と結果

図2に試作したプローブ走査顕微鏡の光学配置を示

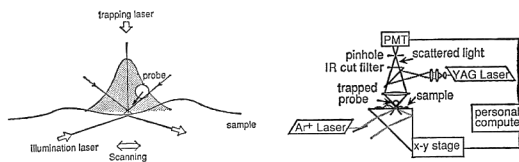


図1 レーザー・トラップによるプローブ走査の原理

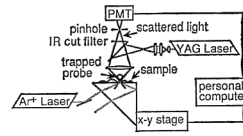


図2 試作したニアフィールド走査光学顕微鏡

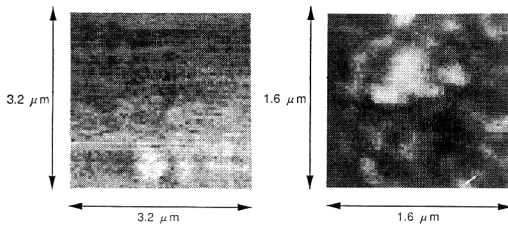


図3 孤立した微小ポリスチレン球の観察像 図4 凝集した微小ポリスチレン球の観察像

す。トラッピング用のレーザーには Nd:YAG レーザー (150 mW) を用い、試料の観察には Ar<sup>+</sup> レーザーを用いた。観察用のレーザーのパワーは、試料照射領域において、YAG レーザーの 10<sup>-5</sup> 程度であり、トラッピングには影響を与えない。

観察光は、試料裏面から全反射角で入射することによって、試料を暗視野照明し、低周波数構造からくる散乱光 (伝播光成分) を除去する。試料表面上には、微細構造がつくるエバネッセント場と、全反射によって境界面にできるエバネッセント場の合成が存在するが、そこにプローブが挿入されることによって、エバネッセント場は散乱され、伝播光に変換される。

伝播光はトラッピングに用いる対物レンズを利用して集光し、ピンホール (直径 20 μm) を通して、光電子増倍管により検出される。プローブとピンホールは対物レンズに対し共役の位置にあることから、プローブ以外の試料からの散乱光は除去される。図3、4に実験結果の例を示す。試料は直径 100 nm のポリスチレン微小球 ( $n=1.59$ ) が分散された PMMA 膜 ( $n=1.49$ ) であり、表面はフラットで屈折率分布のみを有する透明な試料である。プローブは直径 1 μm のポリスチレン球を用いた。図3は孤立球の観察例、図4は凝集した球の観察結果であり、100 nm の2点分解能が得られている。

ここでは示さないが、物質分析への応用として、微小蛍光試料の観察に対しても、図2の光学系に励起光カットフィルターを加えることによって、成功している<sup>5)</sup>。

## 5. おわりに

レーザー・トラップされたプローブは、ピコニュートン・オーダーのきわめて小さな力で試料の上を走査するため、プローブは試料との間に働く原子間力 (特に shear force) の影響を受ける。われわれは実際に、実験を通してこの現象を確認しており、これを積極的に利用することによって、NSOM-SFM の同時観察が可能なプローブ顕微鏡を実現できるものと考え、現在、研究を

進めている。レーザートラップ力による AFM は、通常の AFM と比べて、きわめてバネ定数の小さなプローブを実現していることになり、最高級の AFM となりうる可能性を秘めている。レーザー・トラップしたプローブと試料間に働く原子間力を利用した AFM は、コーネル大学の Webb らによっても報告されている<sup>10)</sup>。このような、プローブの多機能化は、最近のプローブ顕微鏡の流れであり、NSOM においても、AFM-NSOM<sup>11)</sup> や STM-NSOM<sup>12)</sup> の報告がみられるようになってきた。

顕微鏡機構から物理的に遊離したプローブを用いるもう一つのメリットは、散乱光の検出が容易であることにある。この方式では、プローブによって散乱した光を光ファイバーなどの導波路を介さずに直接検出するので、明るい光学系となり<sup>11,13)</sup>、スペクトル測定にも有利である。

ニアフィールド走査プローブ顕微鏡の分解能は、プローブ径をより小さくすることで向上できるが、レーザー・トラッピングでは、プローブの径が小さくなるにつれて、トラップ力が弱まり、また、ブラウン運動によるトラッピングに対する擾乱も大きくなる。そこで、現在、プローブとして、球形ではなく、構造として大きいトラッピング部と小さいチップ部を有したプローブの形状や材質について、検討を行っている。

## 文 献

- 1) A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm and S. Chu: Opt. Lett., **11** (1986) 288-290.
- 2) A. Ashkin, J.M. Dziedzic and T. Yamane: Nature, **330** (1987) 769-771.
- 3) A. Ashkin and J.M. Dziedzic: Science, **235** (1987) 1517-1520.
- 4) 河田 聡: エレクトロニクス, **38** (1993) 56-60.
- 5) 井上康志, 杉浦忠男, 河田 聡: 第13回レーザー顕微鏡研究会論文集, **13** (1994) 41-48; S. Kawata, Y. Inouye and T. Sugiura: Jpn. J. Appl. Phys. (accepted).
- 6) 河田 聡, 杉浦忠男, 井上康志: 第41回春季応用物理学会講演予稿集 (1994) p. 857.
- 7) 河田 聡: 光学, **21** (1992) 766-779.
- 8) 大津元一, 堀 裕和: 光学, **21** (1992) 780-788.
- 9) 中野隆志, 河田 聡: 分光研究, **41** (1992) 377-384.
- 10) L.P. Ghislain and W.W. Webb: Opt. Lett., **18** (1993) 1678-1680.
- 11) N.F. van Hulst, M.H.P. Moers, O.F.J. Noordman, R.G. Tack, F.B. Segerink and B. Bolger: Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 461-463.
- 12) 井上康志, 河田 聡: 近接場光学研究グループ第1回研究討論会予稿集 (1994) pp. 42-46.
- 13) Y. Inouye and S. Kawata: Opt. Lett., **19** (1994) 159-161.

(1994年7月7日受理)