

# 光ピンセットを用いたソフトマターの局所物性測定

(九州大学理学研究院) 木村康之  
(京都大学理学研究科) 市川正敏

## 【はじめに】

光が物体に圧力(光圧)を及ぼすことは、彗星の尾が常に太陽と逆向きを向くことが発見されて以来知られていたが、この光圧を利用してマイクロサイズの粒子を補足し、操作する技術(光ピンセット)が広く用いられるようになってきた。高倍率のレンズを用いてレーザー光を急速に絞ることで、粒子は焦点方向に向かう力を常に受けることになる。この力により、周りの媒質より屈折率の高い粒子を焦点に補足することが可能となる。レーザー位置を操作することで細胞やコロイド粒子を自在に移動させることが可能となる。さらに、焦点の周りでの光トラップ力が焦点からの距離に比例することを利用して、pN程度の小さな力を測定するマイクロのバネばかりとして利用することができる。本講演では光ピンセットの持つこれらの利点を生かしたソフトマターの局所相互作用測定、局所力学測定、光操作に関して、最近の我々の研究を紹介する。

## 【液晶中のコロイド粒子間力の直接測定】

ネマチック液晶中のコロイド粒子間には液晶の配向ひずみに起因した異方的な長距離相互作用が働くことが理論的に知られている。我々は、光ピンセットをマイクロスケールのバネばかりとして用いて、液晶中におけるコロイド粒子間相互作用の直接測定を試みた[1]。

2つの粒子-欠陥対(双極子)が平行かつ同じ方向を向いている場合(図1の写真)、粒子間に働く力 $F$ は図1に示すように、粒子間距離 $R$ が大きいときにはLubenskyらによる静電アナロジーから得られた理論的予測に従い、 $F(R) \propto R^{-4}$ で与えられる。一方、 $R$ が小さい場合には粒子間に欠陥が存在するために粒子は互いに近づけず、粒子間に斥力成分が発生することがわかった。また、粒子間力の距離依存性から算出された粒子間ポテンシャル(図1の青線)は数マイクロの距離で数千 $k_B T$ であり、ファンデルワールス相互作用に比べて桁違いに強い相互作用を示すことが明らかとなった。このような強力な力を用いればコロイド粒子を互いに接着し、液晶中でさまざまな高次構造を安定に構築可能になるものと考えられる。

さらに、光ピンセットを用いれば、自然な状態では不安定である粒子欠陥対が反平行な状態を実現可能であり、この場合の粒子間力の距離依存性の直接測定にも成功した。また、実験結果を理解するためにA02班の福田グループと共同で粒子間力のシミュレーションと実験との比較を行い、粒子径の異なる粒子間相互作用に関して新たな知見を得ることに成功している。

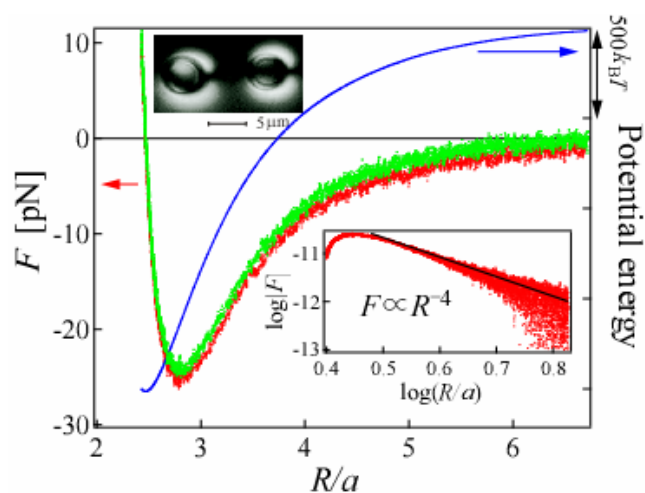


図1. ネマチック液晶中のコロイド粒子間力。

### 【ジャイアントリボソームの力学測定】

両親媒性分子であるリン脂質は水中で会合し、2分子膜を形成する。リン脂質2分子膜である生体中の細胞膜では、特定の脂質に会合したドメインがシグナル伝達や物質輸送などの機能を示すことが知られている。このため、ドメインを有する脂質2分子膜の研究が精力的に行なわれている。我々は細胞膜のモデル系として、脂質2分子膜小胞（リボソーム）の力学的性質を光ピンセットにより測定している[2]。

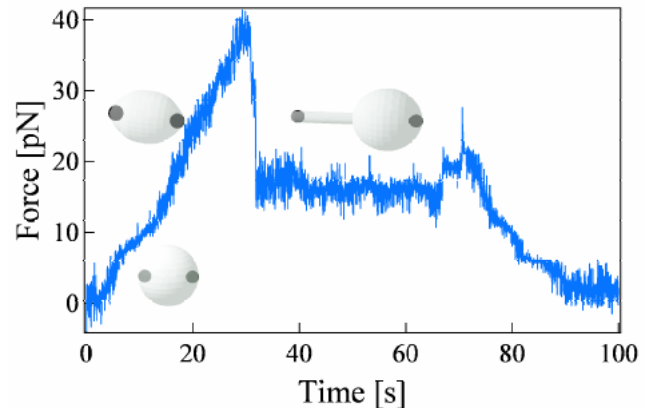


図2. リボソームの力 - 変形曲線。

測定には中性脂質 DOPC と荷電脂質 DOPG からなる混合脂質のリボソームを用いた。この際、リボソームに力を加え、変形に要する力を測定するために、リボソーム中に2個のコロイド粒子を封入し、それらを光ピンセットでトラップし操作することでリボソームに力を加え[3]、その力を測定した。図2には変形の際に粒子にかかる力の距離（一定速度で粒子を移動させているので時間軸は距離軸と等価）依存性を示している。

リボソームは球形からレモン型に徐々に変形していくが、この過程では変形に要する力はほぼ変形に比例して増大していく。しかし、ある力を超えると管状部分が生成し、これと同時に力は極大を取った後、急激に減少する。これ以降は管状部分の単調に伸張して行くが、そのために要する力はほぼ一定値  $f_0$  を示す。この際、測定により得られた  $f_0$  および力曲線の初期勾配から曲げ弾性および表面張力などの脂質膜の力学物性に関する情報を得ることができる。このように光ピンセットを細胞などのミクロンサイズシステムの力学物性測定に用いる利点として、特定の環境下でその場測定することが可能な点が挙げられる。

### 【光ピンセットによる単一分子・細胞の新規操作手法の開発】

ソフトマター研究は化学工業や医療への応用が期待できるという側面も持っている。従来、光ピンセットによるマイクロ操作は点で物体をつまみ、その位置を変えることで並進ならびに回転操作を行なっている。これに対して、光ピンセットの傾きをコントロールするという新奇な操作方法（傾き操作トラップ）を開発し、1ビームで細胞の様な非対称立体形状を持った物体の向きの操作やナノファイバー等の繊維状物体の角度操作に成功した[4]。また、集光レーザーによって作成したミクロンスケールの局所加熱が生成する対流場と温度勾配場による力を利用して、高分子溶液中に分散させた無修飾のDNA 1分子の伸張に成功した[5]。

### 【参考文献】

- (1) K. Takahashi, M. Ichikawa and Y. Kimura: J. Phys. Condens. Matter **20**, 075106 (2008), Physical Review E **77**, 020703(R) (2008).
- (2) Y. Shitamichi, M. Ichikawa and Y. Kimura: submitted.
- (3) T. Inaba, A. Ishijima, M. Honda, F. Nomura, K. Takiguchi, and H. Hotani: J. Mol. Biol., **348**, 325 (2005).
- (4) M. Ichikawa, H. Ichikawa, K. Yoshikawa and Y. Kimura, Phys. Rev. Lett. **99**, 148104 (2007).
- (5) M. Ichikawa, K. Kubo, K. Yoshikawa and Y. Kimura, J. Biomed. Opt., **13**, 010503 (2008).