

光ピンセットによる DNA 操作

量子・物質工学科 清水研究室 桜井孝憲

1、背景

光ピンセットとは、レーザー光を対物レンズで集光させ、レーザー光を物体に照射したときに生じる光の放射圧によって、 $1\ \mu\text{m}$ 以下から数十 μm の大きさの粒子を捕え（トラップ）、非接触で自由に動かすことのできる技術である。微粒子を細胞に接着させて間接的に細胞を動かせるので医学や生物物理学の分野でも応用されている。

2、目的

DNA をポリスチレンラテックス球（以下 Beads）に接着してレーザーで操作し、DNA の力学特性を調べる。また、ラゲールガウスモードでトラップしたときの DNA の状態変化の観測をする。

3、原理

放射圧

集光したレーザーを微粒子に照射すると屈折により光の進行方向が変わり、運動量が変化する。運動量保存則により、変化した運動量はレーザー光の焦点位置の方向に向かう力に変換される。これが放射圧になる。

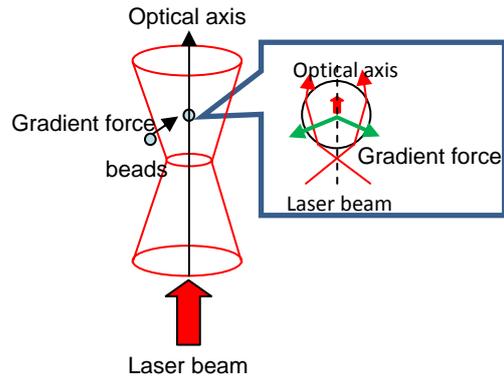


図1 レーザーが球形粒子に及ぼす放射圧

ストークスの式

レーザーが Beads に及ぼす力の測定を行うためにストークスの式を使用する。ストークスの式とは半径 r の球体が粘性率 η の液体中を速度 v で移動する時、球体に発生する抵抗力 F_s を算出するものである。ストークスの式に表されるように速度が上がると抵抗力が上がるので、レーザーで Beads をトラップして早く移動させると抵抗力が発生して Beads がトラップから外れてしまう。だから Beads がレーザーの動きにちょうどついて来られなくなった時、抵抗力とレーザーが Beads に与える力が等しくなったと考える。一連の式をまとめると下記のようなになる。

ストークスの式

$F_s = \gamma v$	F_s : 粒子に働く抵抗力
	v : 粒子の移動速度
$\gamma = 6\pi \eta r$	η : 液体の粘性
	r : 粒子の半径

$$F_l = F_s \quad F_l: \text{レーザーがBeadsに及ぼす力}$$

Worm like chain

DNA の力学特性は単純なバネのような性質ではなく、Worm like chain (ミミズ鎖) のモデルで表すことができる。このモデルは、曲がることの無い最小の長さ P (persistence length : 持続長) が多数連なって全長 L (contour length : 輪郭長) になるものである。F が DNA を引っ張る力、x が DNA の伸びとすると、このモデル式は下記のようなになる。この式を用いて DNA の力学特性を調べた。

Worm like chainの式

$$\frac{PF}{K_B T} = \frac{1}{4(1-x/L)^2} - \frac{1}{4} + \frac{x}{L}$$

4、実験

実験 1、レーザー焦点の移動速度測定実験

図 2 のような装置を用いてレーザー焦点の移動速度を測定した。 piezo素子を対物レンズに固定し、piezo素子に 150V 数 Hz の駆動電圧を印加して左右に動かし、レーザー光が対物レンズ焦点位置でスリットを通過する時間を求めた。

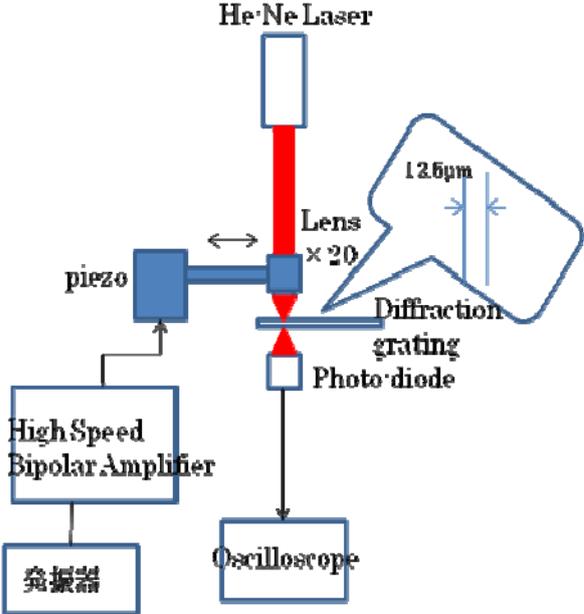
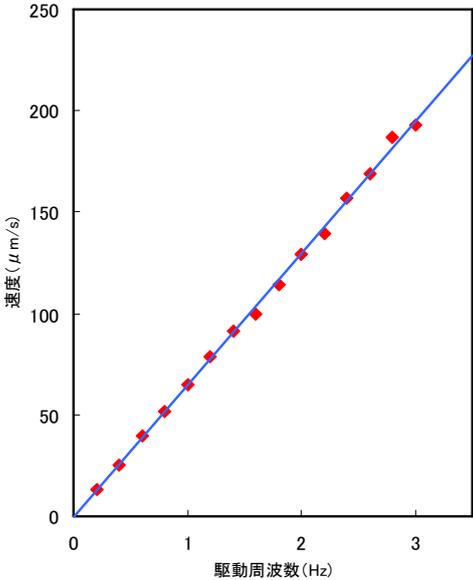


図 2 レーザー焦点移動速度測定実験の装置図



グラフ1 piezo駆動周波数とレーザー焦点移動速度の関係

実験 2、レーザートラップによる Beads 補足力の測定

図 3 のような装置を用いて補足力を測定した。レーザーで Beads をトラップし、トラップ移動速度 (piezo素子の駆動周波数) を固定し、レーザーの動きについて来られなくな

った時のレーザーパワーを測定した。次にトラップ移動速度を変えて同様の測定を行った。得られた周波数とパワーの関係に対して、実験 1 で得られた piezo 素子の駆動周波数と速度の関係式を用いて周波数を速度に変換し、さらにストークスの式を代入して速度を抵抗力に変換して、実際にレーザーが Beads に及ぼす力の関係を求めた。

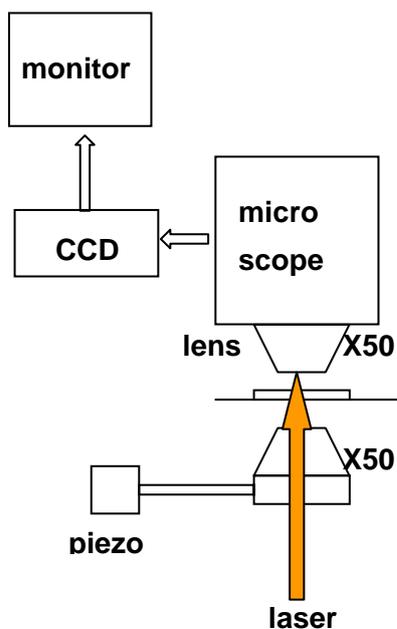
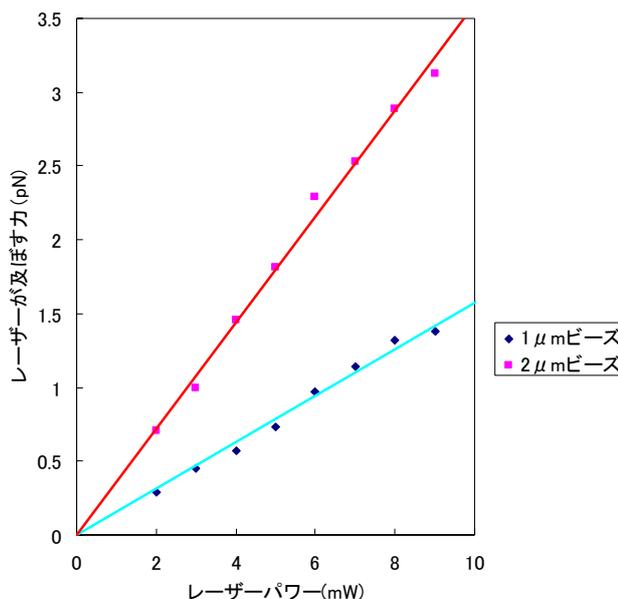


図 3 トラップ補足力の測定実験装置図



グラフ2 トラップ捕捉力のパワー依存性

実験 3、DNA の伸びの測定

DNA の環状構造を切断して両端に $2\mu\text{m}$ の Beads が着くように試料を作成して、片側をレーザーでトラップして固定し、もう片方の Beads もトラップして移動させる。ある程度伸ばすと Beads がトラップから外れ、DNA の収縮性で縮む。この長さを測定する。



図4 DNAサンプル

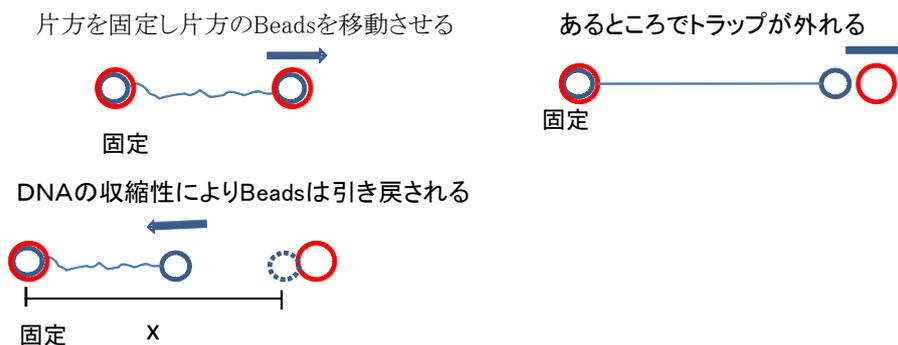
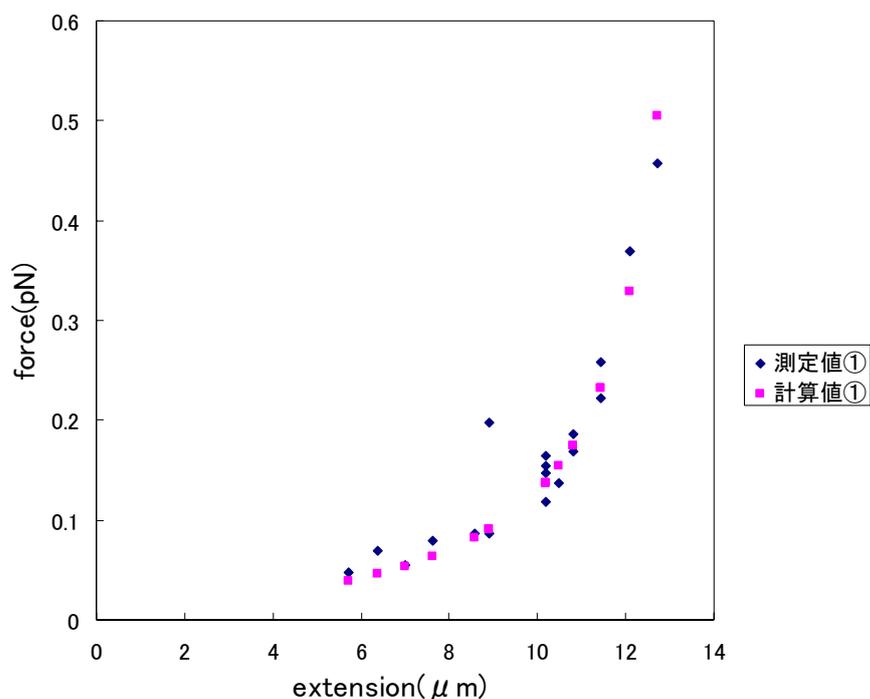


図5 DNAの伸びの測定法

DNAの伸びとレーザーパワーの関係、また伸びから Worm like chain モデルの式を用いて計算した関係とを比較した。Worm like chain モデルで表されている L と P の値を調整することによりフィットすることを確認した。だが、いくつかの固体の DNA で実験を行うと、P の値が大きく二つに分かれることがわかった。



グラフ3 DNA①の力学特性 P=80nm L=15 μm

表1 P と L の値の分布

	P (nm)	L (μm)
DNA①	80	15.2
DNA②	35	16.7
DNA③	40	18
DNA④	80	11.9
DNA⑤	80	16.3
DNA⑥	45	17.2

5、まとめ

DNAの伸びでフィッティングをかけた時、Pの値が大きく分けて2種類あった。その2種類とは本来のDNAと同程度の40nm前後のものとその2倍の80nmであった。DNAの状態はねじれによっても変わるようなので、それらとの因果関係や他の原因の解明をする。また、今回は間に合わなかったが、ラゲールガウスモード内におけるDNAの状態変化の観測を行い、スーパーコイルに凝縮したDNAを解く操作方法を開発する。