

2P081 赤血球の光誘起構造変化の理論的研究

(東北大院理) 山田敏博, 加藤毅, 河野裕彦, 藤村勇一

研究の背景 近年、レーザーピンセットやレーザーメス等、レーザーを用いて細胞に操作を行なう実験が多数行なわれるようになってきている。そのような実験の一例として、赤血球のレーザーによる変形・回転運動が報告されている [1,2]。溶液中の赤血球に電子的に非共鳴な近赤外レーザー光を照射すると、両凹円板状からラグビーボール状に変形し、光照射後はもとの構造に戻る。特に、マラリア感染した赤血球の場合は、直線偏光レーザーに対しても、変形後、持続的に回転し (回転速度 20-300 rpm)、その回転方向は赤血球の位置とレーザー光焦点の前後関係によって一意的に決まる。この機構に対する理論的説明はまだなされていない。

目的 本研究の目的は、単一赤血球の細胞膜モデルを構築し、上に示した実験結果を説明・解析することによって、マクロな細胞と光との相互作用の動的特性を明らかにすることである。

誘電体弾性膜モデル 本研究では赤血球というマクロな系 ($\sim \mu m$) を取り扱うため、モデルについても巨視的な視点から考えていく。マクロな系と光との相互作用について考えると、光の振動周期が系の運動の時間スケール ($\sim \mu s$) に比べ非常に短いことから、双極子相互作用の効果は小さく、電場との相互作用は分極相互作用が支配的であると考えられる。また、細胞膜による電場の遮蔽効果も想定され、赤血球内部との相互作用も十分無視できるものと考えられる。以上のことから、モデルとして、電場と分極相互作用する細胞膜を考えることにする。

血液中の赤血球は通常両凹円板形をしているが、毛細血管のような細い場所を通るときには大きく変形し、通過後短時間でもとの構造に戻るといふ、非常に高い柔軟性を持っている。

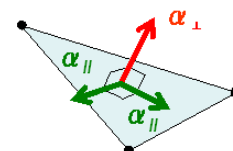
以上から、作成する細胞膜のモデルは、以下の2点を満たすものとする。

- 変形：外力や電場との相互作用によって変形
- 電場との相互作用：膜の持つ分極率との相互作用

ここでは細胞膜を、図1に示すように、質量を持つ多数の頂点とそれを結ぶ線分とでモデル化する。隣接する頂点とそれを結ぶ線分が作る三角形で囲まれた領域を面要素と呼ぶ。細胞の等体積的な変形を考えるために、膜の囲む体積・表面積変化に対する適当な調和ポテンシャルを仮定する。細胞膜の分極率分布は、各面要素の重心に図2のように分極率テンソルとして配置することで表現する。以上のモデル化によって、細胞膜のダイナミクスは各頂点の運動によって記述することができる。与えられた細胞膜の形状と外部電場のもとで、各頂点のニュートン方程式を導ける



図1: モデルの概略(球膜の例) 白丸が頂点で、頂点同士を結ぶ線分が作る三角形で囲まれた領域が面要素。これを多数張り合わせることで閉じた膜を表現



面要素上の分極率テンソル α

図2: 分極率の配置の模式図

ので、それらを連立させて時間積分することで赤血球の変形・回転運動を調べることができる。

球膜を用いたモデルの検証 作成したモデルが力学的に妥当なものか確かめるため、次の2つの予備計算を行なった。初期平衡構造として球膜を考える。

1. 平面偏光電場に対する伸縮変形：全ての面要素に同一な分極率テンソル ($\alpha_{//} > \alpha_{\perp}$) を配置した膜に対して、 z 軸方向に電場 E を印加 ($\sim 10^9 Wcm^{-2}$) した。図3にあるように、膜が z 軸方向に伸長していることがわかる。これは分極エネルギー ($U = -1/2 E^T \cdot \alpha \cdot E$) の異方性から予想される結果と一致している。
2. 光ピンセット効果による捕捉：光の焦点 (原点) に対して電場勾配 (約 $5.5V/\mu m^2$) を想定したとき、原点から $3\mu m$ にはなれた位置にある赤血球の重心の移動を計算した。速度に比例する摩擦を仮定している。図4のように、マイクロ秒のオーダーで赤血球が焦点近傍に捕捉されていく様子がわかる。

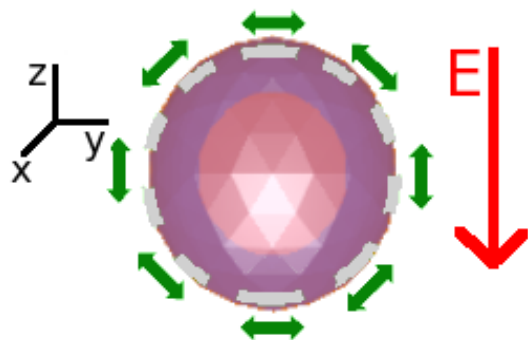


図 3: 変形の様子 (円は初期平衡構造
↔ は分極率)

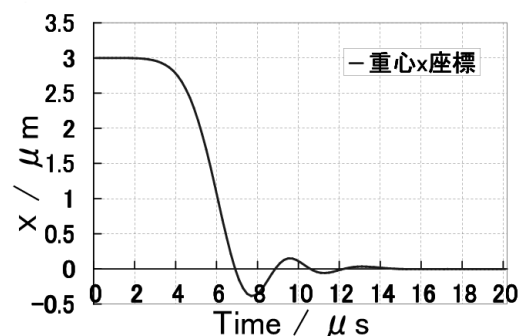


図 4: 電場勾配によるモデルの捕捉

赤血球状膜モデルの作成 先に述べたように赤血球は近似的に軸対称な両凹円板形をしているため、球形よりも異方性が高くなっている。この異方性をモデルで近似的に取り扱うために、球構造から歪ませたモデルの作成を試みた。

ここでは、膜に垂直な分極率を持つ球モデルに電場をかけながら緩和法を用いて体積を小さくした。膜は $x(y)$ 方向と z 方向の直径が $8\mu m : 4\mu m$ と 2:1 となっており、赤血球の凹部分がないものに比較的近い形状となっている (図5)。 $z \sim 0$ では膜に尖った部分が見られる。これは、隣接する2つの面積要素のなす角度に対するポテンシャルを考慮していないためである。

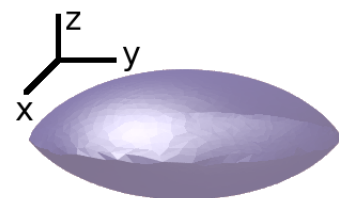


図 5: 赤血球状膜モデル

まとめ これまでに、光との分極相互作用効果を取り込んだ弾性細胞膜モデルを作成し、実際に電場による伸縮と捕捉を確認した。当日は、実験データが報告されている円偏光による回転運動 [2] の解析結果について述べる。

[1]J.A.Dharmadhikari et al., Optics Express, **12**, 1179(2004)

[2]J.A.Dharmadhikari et al., Applied Physics Letters, **85**, 6048(2004)