

3E05

## 近赤外レーザーに誘起されるマラリア赤血球の変形・回転運動の機構に関する理論的研究

(<sup>1</sup>東北大院理, <sup>2</sup>東大院理)○山田敏博<sup>1</sup>, 加藤毅<sup>2</sup>, 河野裕彦<sup>1</sup>, 藤村勇一<sup>1</sup>

【序】近年、レーザーによって分子の動きや化学反応を制御することが行われている。また、細胞や脂質二重膜といったマイクロメートル系の生体物質に対する操作にもレーザーが用いられており、その技術開発は生物・医学分野での応用という観点からも注目されている。このような生体物質系の光操作に関する研究の

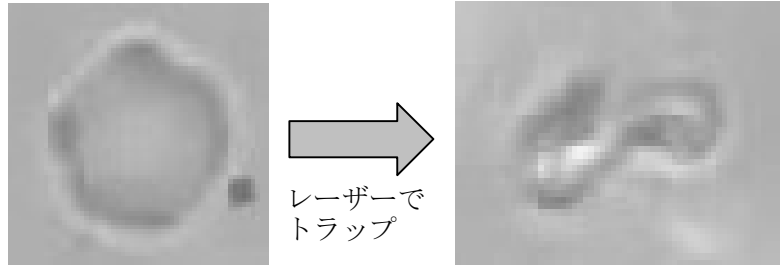


図 1 近赤外レーザー光で捕捉されたマラリア感染赤血球の変形。両凹面構造の赤血球（左）がレーザー焦点付近に捕捉されると、ねじれ変形を起こす（右）。

一つとして、近赤外レーザー場中での赤血球の捕捉・変形・回転の実験が報告されている[1,2]。両凹面円盤構造の弾性体である赤血球がレーザー光の焦点付近に捕捉されると、赤血球の挙動はマラリア原虫の感染の有無やレーザー光の偏光などの要素に応じて変化する。例えばマラリア感染した赤血球に直線偏光を照射した場合は、捕捉後大きくねじれるように変形し（図 1）、その後回転し始めることが報告されている[1]。またその回転の方向は焦点の前後で反転することも報告されている。本研究はレーザー場中での赤血球の変形・回転のダイナミクスを解明することを目的とする。

【回転運動の解析】我々はこれまで文献 1 の実験について、回転運動の解析を行った。その結果、回転運動は周期的な回転速度の変調を伴っていることがわかった（図 2）。我々はこの回転運動について、剛体モデル（図 3 左）を用いることで定性的に回転の挙動を記述する運動方程式を導出した。得られた運動方程式では、回転運動は定常的な回転を与えるトルクと回転速度の変調を与えるトルクの 2 つのトルクによって記述されている。我々は 2 つのトルクの由来について考察し、変調を与えるトルクについては変形した赤血球が複屈折性を持つことで説明された。また定常トルクについても、プロペラ状モデル（図 3 右）を用いて光圧回転子の効果などを計算から見積もり、その結果を報告してきた[3-6]（解析の詳細は文献 6 を参照）。しかし、これまでの定常トルクに関する仮説では、実験における焦点前後での回転方向の反転を説明することができなかった。これはプロペラが受ける力の回転方向成分が焦点の前後で逆向きになるという焦点の前後での回転方向の反転に必要な

条件を満たさないためであった。そこで我々は新たに定常トルクの由来について、赤血球を焦点付近に捕捉する光トラップの力を仮定した。光トラップは物質を焦点に引きつける方向の力を生じる。これを焦点の前後それぞれについて考えれば、z 軸方向成分の符号が逆となり、焦点前後での回転方向の変化が期待

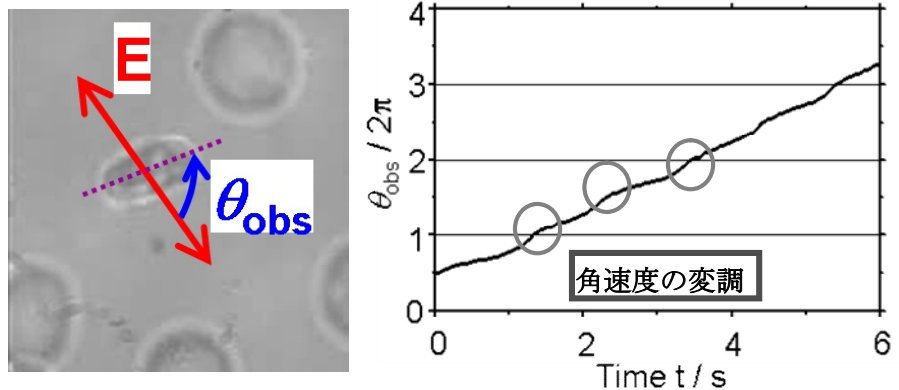


図 2 レーザーの偏光軸 ( $E$ ) と変形した赤血球の長軸のなす回転角  $\theta_{\text{obs}}$  の定義（左）と、その時間変化（右）。1 回転の間に 2 回の周期的な角速度の変調（右図中の丸）が確認できる。

できる。我々はこの仮定を元に、A. Ashkin の剛体球に対する光トラップの理論[7]に基づいて、図3右のプロペラ状の剛体モデルが光トラップによって受ける力を計算し、焦点の前後で回転方向が反転するか確かめた。その結果、剛体プロペラモデルにおいては回転方向が焦点の前後で反転するという実験と同様の結果を得ることができた。

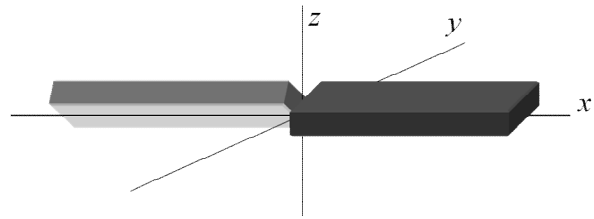
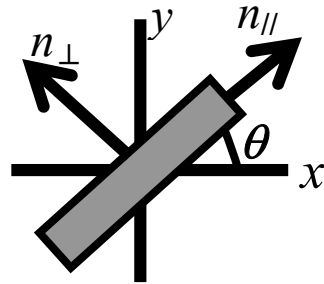


図3：解析に用いた  $x$ - $y$  平面上の複屈折剛体棒モデル（左）とプロペラ状剛体モデル（右）。偏光軸は  $x$  軸で、偏光軸とモデルの長軸がなす角度を  $\theta$  とする。レーザー光の進行方向は  $z$  軸と平行。複屈折性は長軸方向の屈折率  $n_{//}$  とそれに垂直な方向の屈折率  $n_{\perp}$  の違いによって定義される。このモデルで赤血球の回転は角度  $\theta(t)$  で記述される。光トラップの力による回転運動の解析に用いた。  $x$ - $y$  平面上で傾けた 2 つの板を互い違いにつなげた構造をしている。このモデルに集光電場を入射した時、回転する方向に力が生じ、  $x$ - $y$  平面上を回転する。その回転方向は力の向きによって変化する。

【変形に関する考察】赤血球の回転運動はその変形によって誘起される現象である。回転運動での解析では焦点の前後で赤血球の形状が同じであることを前提としたが、光トラップされた赤血球が実際にどう変形しているかは回転の機構の解析において重要な要素であることから、変形についても解析を行った。実験では単純に光トラップした赤血球は集光される電場勾配に沿うように変形（図4左）するという結果が得られている。そこで我々は集光レーザー電場中における赤血球の変形を、何種類かの形状の剛体（図4）の分極ポテンシャルの比較を元に考察した。その結果、図4左の剛体が最も安定になることがわかった。この結果は赤血球が焦点の前と後では逆の向きに折れ曲がった変形を起すことを示唆している。これは剛体プロペラモデルであれば、焦点の前後でプロペラのねじれ方が逆になっている可能性があるということであり、これまで回転方向の反転を説明できないうしてきた光圧回転子などの仮説でも回転方向の反転が起こりえることを意味している。

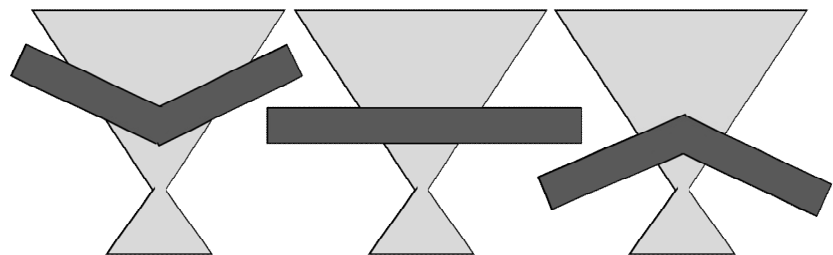


図4 集光電場中での赤血球の変形解析のための剛体モデルの概要。

左：両端が焦点とは逆方向に折れ曲がったもの

中央：変形せずにそのままの形のもの

右：両端がレーザーの焦点方向に折れ曲がった形状になったもの  
モデルの表面（上面・底面・側面）にはそれぞれ同じ分極率（面と平行な分極率と垂直な分極率）が与えられている。

本発表ではこれらの詳細について報告する。

- [1] J.A. Dharmadhikari et al., Optics Express 12, 1179(2004).
- [2] J.A. Dharmadhikari et al., Appl. Phys. Lett. 85, 6048(2004).
- [3] 山田敏博他、分子系の極微構造反応の計測とダイナミクス 第4回公開シンポジウム P-15 (2006)
- [4] 山田敏博他、日本化学会第89春季年会 2A4-42 (2009)
- [5] 山田敏博他、第3回分子科学討論会 3B06 (2009)
- [6] K. Bambardekar et. al., J. Biomed. Opt. 15, 041504(2010)
- [7] A Ashkin., Biophys. J. 61, 569(1992)