

ソフトマターを光で「見る」,「測る」,「操る」

(九大院理) 木村 康之

【はじめに】

高分子, 液晶, コロイド, 両親媒性分子などのソフトマターは, 例えば, 高分子のように分子内に多数の内部自由度を有していたり, 両親媒性分子会合系のように構成分子が互いに弱い分子間力で結合しているために, 外部刺激に対して“ソフト”であり, その応答が容易に非線形となる. また, 集合体のサイズが大きく, 構成要素の間の結合が弱いために, 平衡状態における構造の揺らぎが大きく, 構造揺らぎの特性時間や応答時間の時間スケールが他の物質系に比べて遅い, などの特徴がある. これらソフトマター典型的な「非線形・非平衡系」としての物性を実験的に観測する手段のうち, 本講演では光を用いてソフトマターを研究する手法について話してみたい(分光学的な研究手法については触れない). ことに20世紀後半はレーザーの発明など, 光にまつわるさまざまな技術が飛躍的な進展を見せ, それまで考えられなかったような様々な手法での物性研究が可能となった. 今後もこれら最先端の光技術を積極的に用いることで[1, 2], ソフトマターの物性研究の新たな展開が期待される.

【光で見る】 [1, 2]

可視光の波長は 380nm-760nm 程度であり, これより小さなサイズの物体を光学顕微鏡で「像」として観察することは困難であり, 例えば, 高分子一本鎖や数十ナノメートルサイズのコロイド粒子を光学像として直接観察することは困難である. 従って, 電子顕微鏡など, さらに波長の短い光源を用いて可視化する必要があるが, 電子顕微鏡では試料を真空環境に置かねばならず, 「生」の状態ではなく「ひもの」状態でしか観察できない. 一方, 何らかの形で分子に色付けすることができれば多少ぼんやりしていても背景とのコントラストをつけることで像として観測することが可能となる. このような例として**蛍光顕微鏡**がある. 従来, 蛍光顕微鏡は生物組織等の観測に用いられてきたが, ソフトマターの実験研究でも重要な機器となっている. 多くの巨視的物性測定法は洗練されてはいるが, 間接的な方法で情報を得ている点で「群盲, 象をなでる」の感があり, 「百聞は一見にしかず」という言葉があるように, 実際に可視化することで, 予想した以上に多くの情報を得ることができる. 図1は蛍光染色したDNAの蛍光顕微鏡像を示す. このようなDNA1分子のリアルタイム観察からさまざまな物性量を同時に得ることができる. 他に, タンパク質分子や脂質分子などを蛍光ラベルして観察することで, さまざまな情報をリアルタイムで得られるようになって来た. 図2は蛍光ラベルした脂質分子がリポソーム上での相分離している様子を示す.

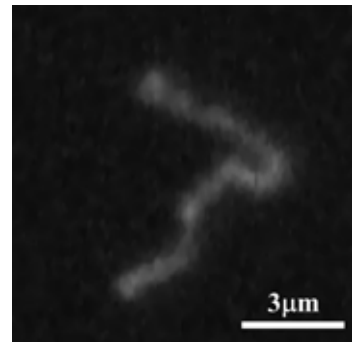


図1. DNA鎖の蛍光顕微鏡像.

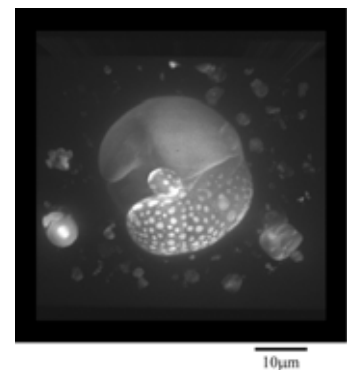


図2. 相分離したリポソームの3次元蛍光顕微鏡像.

また、最近、**原子間力顕微鏡 (AFM)** によってもソフトマターのナノスケールでの観測が可能になっているが、原理的に探針 (カンチレバー) の変位をレーザー光により測定し、その情報を可視化している点で広い意味での光で “見る” 測定法と言える。

【光で測る】

従来の物性測定の大半は歪み、応力、電場、磁場などの外場 (外力) を物質に加えたときの応答を測定し、それらの比で与えられる物性値を求める「**応答関数測定**」が行なわれてきた。一方、ソフトマター系は、構造の揺らぎが大きいため「**揺らぎ測定**」をすることで、系に関する有用な情報を得ることが可能となる[3]。揺らぎ測定法の典型的な例は**光散乱測定法**である。光散乱測定は、系の揺らぎに伴い生ずる屈折率揺らぎのために散乱される光を観測することで系の静的・動的情報を得るものである。入射方向と観測方向のなす角 (散乱角) を変化させることで、特定の距離スケールでの系の静的・動的構造に関する情報を選択的に得られる点で、応答関数測定にない特徴を有している。光散乱により得られる情報は拡散係数や粘性係数、弾性率などの他に、電気的物理量である電気泳動易動度の測定も可能である[4]。

また、コロイド粒子をプローブとしてソフトマター中に分散して、その揺らぎを顕微鏡観察、あるいはレーザー光の回折像の位置変化から測定し、媒質の力学物性を直接測定する**マイクロレオロジー**と呼ばれる測定も行なわれている[5]。マイクロレオロジーの利点として巨視的なレオメーターなどを用いた測定法と比べ、(1)試料が少量で測定可能、(2)測定周波数の上限が高くできる、(3)微小な変形に対する応答の観測可能である、などが挙げられる。

【光で操る】

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ミクロンサイズの粒子を補足し、操作する技術 (**レーザーピンセット**) が広く用いられるようになってきた[6]。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光圧に水平方向の成分を生じさせると、この成分は粒子に常に焦点方向に向かう力を及ぼすことになる。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。また、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。また、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パネばかりとして利用することができる。実際、DNA 1 分子の弾性率測定やモータータンパク質分子の発生する力の測定などに利用されている[6]。

【参考文献】

- [1] 船津高志編著；生命科学を拓く新しい光技術，共立出版，1999。
- [2] P.N.Prasad；Introduction to Biophotonics, Wiley-Interscience, 2003。
- [3] 早川，伊藤，木村，岡野共著；非平衡系のダイナミクス入門，培風館，2006。
- [4] B.J. Berne and R. Pecora；Dynamic Light Scattering: With Applications to Chemistry, Biology, and Physics, Dover Pub., 2000。
- [5] T.A. Waigh, *Rep. Prog. Phys.* **68**, 685, 2005.
- [6] K. Svoboda and S. M. Block, *Annu. Rev. Biophys. Struct.*, **23**, 247, 1994。