

やわらかく小さなシステムの構造変化と非平衡ダイナミクス

東京大学大学院理学系研究科・教授 佐野 雅己

非平衡状態におけるソフトマターの基本特性の探求を目的として研究を行っており、今年度は1分子DNAの伸張による摩擦効果の測定、Directed Percolationの検証、エントロピー力を利用した新しいレーザートラップ法の発見などの成果を得た。

1. 単分子DNAの力学的非可逆応答の測定

DNAは直径(2nm)に比べて全長が極めて長いこと、セミフレキシブル高分子の理想的なモデルとして用いられる。この実験では単分子DNAの両端にビーズを取り付け、レーザーピンセットにより伸張・収縮を繰り返すことで非可逆仕事速度依存性を測定した。その結果、行きと帰りのヒステリシス(非可逆仕事)は、伸張速度に比例して増大することが明らかとなった。これは第一に、戻り過程の収縮時にDNA凝縮に時間遅れが生じるためであるが、伸張時のみの力の平均値も伸張速度に比例して増加することから、DNAの伸張時のエネルギー散逸の起源に関する知見を与えるものである。論文ではKramerの速度論による解析と内部摩擦が速度に比例する可能性の2つを指摘した¹。

2. 熱泳動によるDNA単分子の操作と引き伸ばし

温度勾配中での物質の拡散(熱泳動: Thermophoresis)は、古くから知られた現象で通常、線形非平衡熱力学で扱われる。近年、コロイドやミセル、高分子などMacromoleculeの熱泳動が定量的に測定され、理論的取扱いも進展している。我々は、単一粒子や単一分子を用いて熱泳動の過程を測定し、熱泳動によって単一分子に働く力の測定や熱泳動による単一分子の操作を目指して実験を行っている。その一つの成果として、単一分子DNAを熱泳動により引き伸ばし、構造変化を引き起こすことができることを実証し、熱泳動によってDNAモノマーに働く力の測定に成功した。片端または両端を基盤に固定したDNAの近傍にレーザーを集光させ、基盤にレーザー光を吸収させることにより局所的に $1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ 程度の温度勾配を作る装置を実現した。その結果、コイル状態にある λ DNAが全長の1/2程度まで伸張され、両端固定の場合には温度勾配に垂直に円弧状の形態をとることが明らかになった。WLCモデルとの比較から熱泳動による力は1分子当たり1~2pNと推定された²。

3. Directed Percolation転移と履歴現象におけるユニバーサリティーの初の実験的検証

吸収状態がある系の相転移は、Directed Percolation(DP)と呼ばれ、非平衡系における相転移の普遍的なクラスとして知られており、物理・化学・生物等多くの分野で理論的研究が行われてきた。しかし、DP転移の実験による十分な検証は存在しなかった。我々は、液晶中に生じる乱流・乱流転移の間欠性に着目し、従来謎とされてきたヒステリシス転移がDP転移と関わっていることを見出し、従来に比べ格段にシステムサイズが大きく統計性の高い実験を行い、3つの臨界指数すべてが高精度でDPクラスの指数に一致することを始めて示し、DP転移が現実に存在することを実証した。これまで理論的には多くの研究が存在したが3つの臨界指数が一致する実験は存在せず、実験系との対応に疑問が持たれていたが、この実験によりDPが自然界に存在することが示された³。

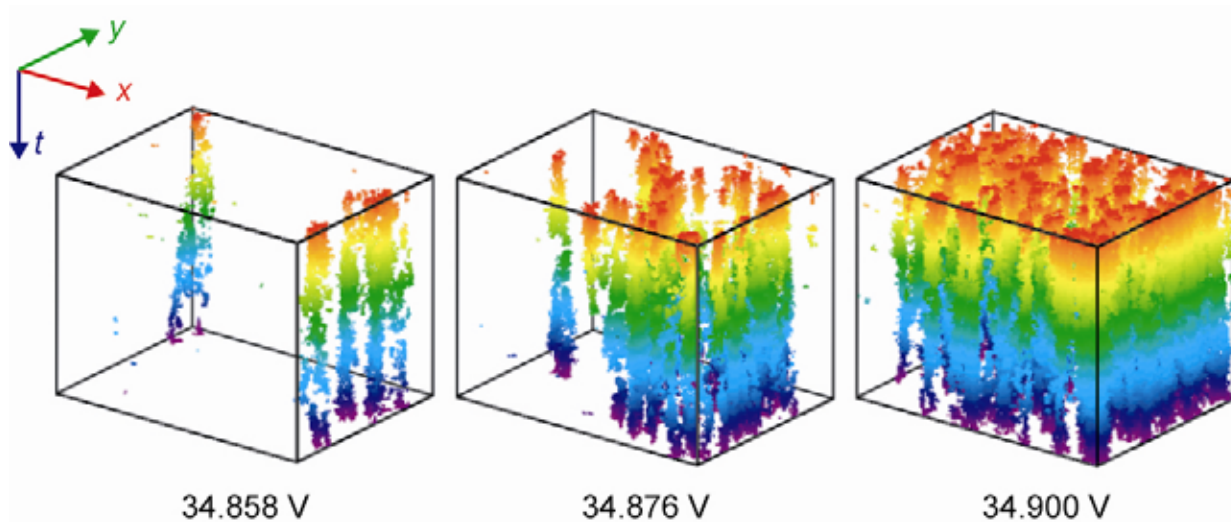


図1 液晶の乱流・乱流転移における Directed Percolation 転移の様子

4. 非平衡を利用した微小物体用レーザートラップとレーザー操作法の開発

レーザートラップは光の運動量の変化を利用しており、水溶液中での微小な物体やコロイド、細胞の操作など多方面に応用されている。一方、レーザーピンセットには制限も多く、溶液との屈折率の違いが必要であり、DNAのように不定形のものにはトラップ困難である。我々は溶液中に低濃度の高分子を溶かし、レーザーにより局所的に温度勾配を作ることにより、ナノ粒子、DNA、細胞など様々の物体がトラップでき、レーザーにより濃縮したり、移動したり、操作できることを示した。種々の実験と理論解析の比較から、この現象は熱泳動による高分子の Depletion Effect によって誘起されたトラップ力であることが明らかになった。集光したレーザーをクロムコートした基板に吸収させることにより、局所的に $1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ 程度の温度勾配を形成すると、正の熱拡散係数を持った高分子は低温領域に泳動し、空間的に不均一な分布を形成する。この分布は温度上昇に対して指数的に減少し理論と一致する。一方、微小粒子の周りには高分子が侵入できない Depletion Layer があることが知られており、コロイドや Macromolecule が接近したときに働く Depletion Force の原因としてよく知られている。普段はこの力は等方的で釣合っており現れることはない。しかし、熱泳動によって高分子の濃度分布の対称性が破れると濃度勾配に応じて微粒子に力が働き、微粒子は高分子の濃度が最も低い中心部にトラップされるというものである。実験からトラップ力は高分子の濃度に比例し、微粒子の濃度分布は理論的予測と良く一致することからトラップがエントロピー力に起因することを示した⁴。

<参考文献>

- 1) Yoshihiro Murayama, Hirofumi Wada and Masaki Sano, Dynamic force spectroscopy of a single condensed DNA, *Europhys. Lett.* 79, 58001 (2007).
- 2) Hong-Ren Jiang and Masaki Sano, Stretching Single Molecular DNA by Temperature Gradient, *Appl. Phys. Lett.* 91, 154104 (2007).
- 3) Kazumasa A. Takeuchi, Masafumi Kuroda, Hugues Chaté, and Masaki Sano, Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, *Phys. Rev. Lett.* 99, 234503 (2007).
- 4) Hong-Ren Jiang and Masaki Sano, Optical trapping and manipulation of colloidal objects by entropic force, submitted (2007).