

平成 21 年 4 月 15 日現在

研究種目：	特定領域研究
研究期間：	2006 年度～2010 年度
課題番号：	18068005
研究課題名（和文）	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
研究課題名（英文）	Nonequilibrium Dynamics and Structural Transition in Small Soft Systems
研究代表者	東京大学・大学院理学系研究科・教授・佐野雅己
研究者番号：	40150263

研究分野： 物理学

科研費の分科・細目： 物性基礎論

キーワード： ソフトマター、一分子計測、マイクロマニピュレーション、非平衡ゆらぎ

1. 研究計画の概要

やわらかく小さなシステムでは、 kT 程度の熱ゆらぎが構造変化に際して無視できないため、外力や電場、化学反応などにより非平衡状態に置かれたシステムにおけるゆらぎと構造変化に関する法則の存在が非平衡統計力学によって示唆されている。本研究は、やわらかく小さなシステムの典型である、DNA や RNA、タンパク質などの生体高分子やコロイド、脂質膜、細胞膜などの外場に対する応答を測定し、構造変化と非平衡ゆらぎの関係を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の進捗状況

これまで以下の成果を挙げた。

(1) 単分子 DNA の力学的非可逆応答の測定に成功した。

(2) 非平衡定常状態における新しい関係式の実験的検証：

非線形系の非平衡定常状態に関して最近提案された Harada-Sasa 等式をコロイド粒子系に適用し、レーザーピンセットで粒子をドライブさせて非平衡定常状態を実現し、この関係が成立していることを実験的に初めて検証した。さらに高分子溶液中のコロイド粒子系においてもこの関係式の成立を高精度で実証し、高分子溶液中のコロイドの運動が記憶効果を持つ一般化ランジュバン方程式で記述される実験的証拠を与えた。

(3) 熱泳動による DNA 単分子の操作と伸張：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する実験を行った。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。WLC モデルとの比較から熱泳動による力は 1 分子当たり $2pN$ と推定された。

(4) 高分子溶液中コロイドを用いた非平衡関係式の検証：

非平衡定常状態で揺動散逸定理が破れる場合に成り立つ Harada-Sasa 等式とその一般化である Deutche-Narayan の式を粘弾性溶液中のコロイドの運動解析により初めて実験的に検証した。

(5) 単一タンパク質の外力による伸張過程（アンフォールディング）における中間状態の観測とアンフォールディング過程の並列性を見出した。

(6) 細胞運動において膜の自発的変形と重心移動の相関を測定し、規則的パターンのスイッチングによる運動機構と関連する分子機構を明らかにした。

3. 現在までの達成度

当初の計画以上に進展している。

非平衡定常状態において揺動散逸定理の破れと非可逆発熱の関係を表わす新しい関係式を実験的に始めて検証することに成功。

単一タンパク質の外力による伸張過程（アンフォールディング）における中間状態の観測と並列性の発見。細胞運動において膜の自発的変形と重心移動の相関を測定し、規則的パターンのスイッチングによる運動機構と関連する分子機構を明らかにした。レーザーを用いた新しいマイクロマニピュレーション法を発見し、特許出願中。高分子とコ

ロイドの混合系において、レーザー照射で局所的な温度勾配を形成すると熱拡散により高分子の濃度勾配が形成され、溶液中のコロイドは高分子のエントロピー的排他相互作用によりレーザーの焦点に移動する。これにより通常の光ピンセットではトラップできない分子や様々のコロイド粒子を補足、操作、濃縮できることを明らかにした。その他、多くの成果が得られており、当初の計画以上に研究が進んでいると判断される。

4. 今後の研究の推進方策

計画が順調に進行しているので今後は予定通り、温度勾配を利用したマニピュレーションの更なる開発や、非平衡ゆらぎの研究、脂質膜や細胞膜の変形、ゆらぎ、運動などの定量的研究を進める。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

- 1) H. Shiba, J. Ruppert-Felsot, Y. Takahashi, Y. Murayama, Q. Ouyang, and M. Sano; Elastic Convection in Vibrated Viscoplastic Fluids, *Phys. Rev. Lett.* 98, 044501 (2007)
- 2) Y. Murayama, H. Wada and M. Sano, Dynamic force spectroscopy of a single condensed DNA, *Europhys. Lett.* 79, 58001 (2007).
- 3) H.-R. Jiang and M. Sano, Stretching Single Molecular DNA by Temperature Gradient, *Appl. Phys. Lett.* 91, 154104 (2007).
- 4) K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano, Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, *Phys. Rev. Lett.* 99, 234503 (2007)
- 5) H. Delanoë-Ayari, S. Iwaya, Y. T. Maeda, J. Inose, C. Rivière, M. Sano, and J.-P. Rieu, Changes in the Magnitude and Distribution of Forces at Different Dictyostelium Developmental Stages, *Cell Motility and the Cytoskeleton* 65, 314 (2008).
- 6) S. Toyabe, H.R. Jiang, T. Nakamura, Y.

Murayama, and M. Sano: Experimental Test of a New Equality: Measuring Heat Dissipation in an Optically Driven Colloidal System, *Phys. Rev. E* 75, 011122 (2007).

7) S. Toyabe and M. Sano: Evaluating Energy Dissipation of a Brownian Particle in a Viscoelastic Fluid, *Phys. Rev. E* 77, 041403 (2008).

8) Y. T. Maeda, J. Inose, M. Y. Matsuo, S. Iwaya, M. Sano, *PLoS ONE* 3 (11), e3734 (2008).

9) T. Ishii, Y. Murayama, A. Katano, K. Maki, K. Kuwajima, M. Sano, *Biochemical and Biophysical Research Communications* 375, 586 (2008).

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

国内特許出願: Y09S003PCT

「熱勾配を利用した粒子の操作方法」

国際出願: US61/068,269