

A04 負の相関に起因する異常拡散現象とその周辺

九州大学大学院理学研究院 坂上貴洋

九州大学大学院理学研究院 中西秀

京都大学福井謙一記念研究センター 齋藤拓也

(1) 高分子膜のダイナミクス

構成要素（モノマー）が二次元的に重合したシート状の巨大分子を高分子膜(**polymerized membrane**)といい、しばしば、グラフェンシート、赤血球細胞などのモデルとして考えられる。系を構成する骨格の内部次元(**D**)という視点からは、**D=1**の鎖状分子（高分子）を二次元の網状に架橋することで**D=2**に拡張したものと見なすことが出来る。細胞膜のモデルとして良く知られる流動膜(**fluid membrane**)では、構成要素である脂質分子の位置は定まっておらず流動的であるのに対し、高分子膜ではネットワーク構造が凍結されているため、内部空間上でのモノマーの位置は変化しない。そのため、熱揺らぎの下で高分子膜は面内弾性を持ち、これが面外方向への波打ち揺らぎ(**undulation**)と相互作用する結果、流動膜とは異なる興味深い性質を示す。中でも排除体積の為に、網状分子は大きなスケールで平坦である(**flat phase**)ということは、特筆すべきである（図1）。

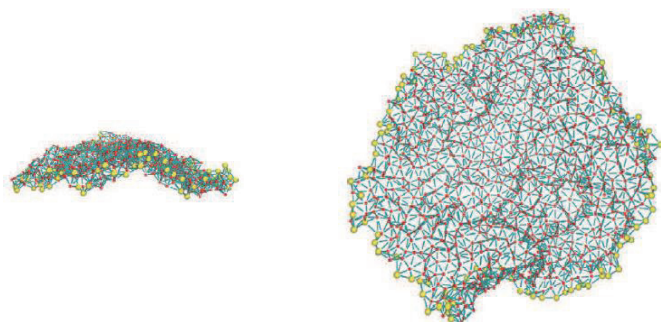


図1. 高分子膜のスナップショット。
(左) :**side-view**, (右) :**top-view**

高分子膜内の適当なモノマーにラベルをし、その軌跡を追跡すると、短時間での個別モノマーの拡散と長時間での系全体の拡散との間の中間時間スケールにおいて、特徴的な異常拡散挙動を示す。これは、個々のモノマーの運動が系全体の内部運動に支配されるためで、同様の現象は高分子鎖(**D=1**)でも見られる。この現象はどのように記述できるか？また、高分子鎖と比べ、高分子膜のダイナミクスの特徴はどのようなものか？これらの問いを念頭に研究を行い、以下の成果を得た[1]。(1) 高分子膜では、系全体が平坦になるために、異方性が特に重要となる。モンテカルロ法を用いて高分子膜のシミュレーションを行い、ラベルモノマーの変位を膜面内と面外方向とに分解して、それぞれに対して異なる拡散指数を得た。(2) 様々なサイズの高分子膜における面内および面外方向それぞれの平均二乗変位のデータを動的スケーリング則の形に整理し、異常拡散を特徴付ける指数と、高分子膜の構造を記述する臨界指数との間に成り立つスケーリング関係式を得た(図2)。(3) 観測される異常拡散の背後にある物理的なメカニズムを考察し、ラベルモノマーのダイナミクスを記述する一般化ランジュバン方程式を導出した。

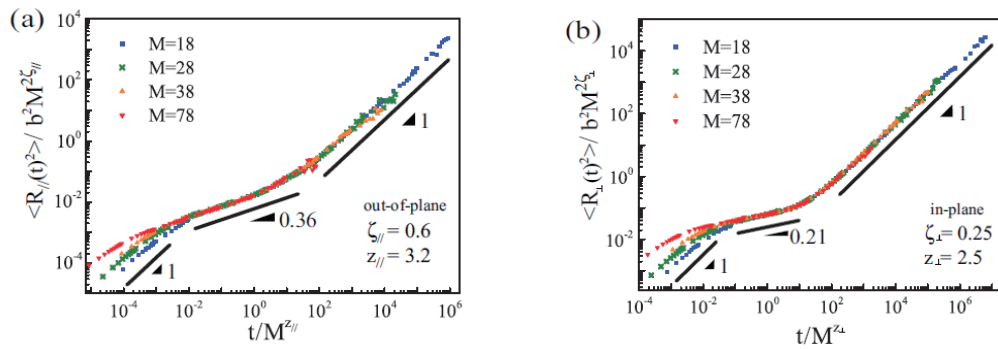


図 2. ラベルモノマーの平均二乗変位の動的スケーリングプロット。
(左) : 面外方向、(右) : 面内方向

(2) ナノドーザーによる DNA の動的圧縮

長鎖 DNA 分子を直径がサブミクロン程度の筒状のチャンネル (ナノチャンネル) 中に閉じ込めると、DNA は筒の軸方向に沿って伸張する。この現象は、ゲノム科学上での応用とも関連し、これまで、その平衡状態について多くの研究が為されてきた。本研究では、光トラップしたビーズを用いて、DNA を操作することにより、ナノチャンネル中での DNA のダイナミクスの研究を行った (図 3)。

ビーズを一定の速さ (V) で動かし、DNA を一端から押す。この時の操作速度が十分ゆっくりであれば、DNA 分子は、単に並進移動をするのみである。しかし、操作速度がある臨界値を超えると、DNA 分子は特徴的な動的な応答を示し、一定時間の後に、空間的に不均一に軸方向に圧縮された定常状態へと至る。本研究では、DNA 分子の運動に伴う粘性応力と、浸透圧勾配とのバランスから、この定常状態の解析を行い、(1) 動的圧縮の起こり始める臨界速度、(2) 速度と軸方向圧縮度との関係を記述する動的状態方程式、(3) 不均一濃度プロファイルの形状を理論的に求め、実験との良い一致を得た [2]。

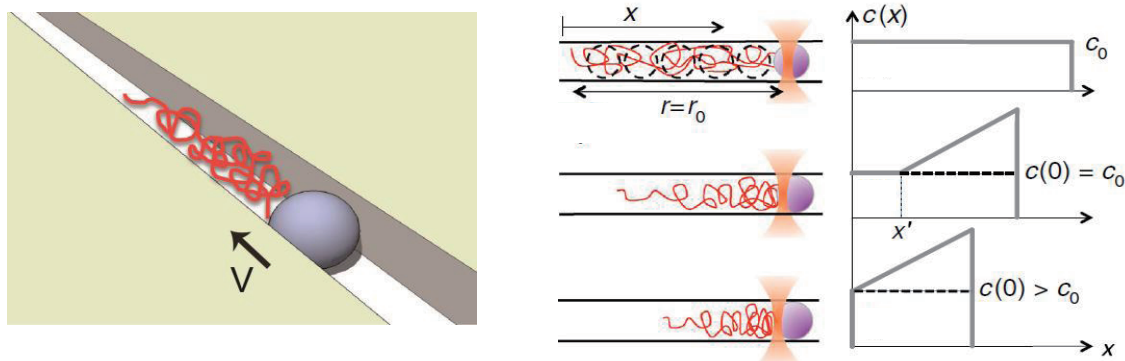


図 3. (左) 光トラップしたビーズを用いてナノチャンネル中の DNA を動かす「ナノドーザー」系の模式図。(右) 軸方向の DNA 濃度プロファイル (上から下に行くに従い、操作速度は増加)。

参考文献:

- (1) K. Mizuochi, H. Nakanishi and T. Sakaue, *Europhys. Lett.* **107**, 38003:1-6 (2014)
- (2) A. Khorshid, P. Zimny, D. T.-La Roche, G. Massarelli, T. Sakaue, and W. Reisner, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 268104:1-5 (2014)