

分子モーターによるフィラメントの滑り運動の揺らぎの フィラメント長依存性

九州大学 大学院 理学研究院 御手洗 菜美子¹, 中西 秀

ミオシンやキネシンといった分子モーターは、ATP の加水分解のエネルギーを用いてアクチンや微小管などの細胞骨格フィラメントの滑り運動を起こす。ATP 濃度が十分に高い環境で、フィラメントを分子モーター上で自由に滑べらせると、一定の平均速度 V で進み、時刻 t でのフィラメントの位置 $X(t)$ の平均が $\langle X(t) \rangle = Vt$ に従う。

今福らは、基板上に固定された分子モーター上を滑るフィラメントの運動について、 $\langle |X(t) - Vt|^2 \rangle = 2D_m t$ で定義される滑り距離の有効拡散係数 D_m の、フィラメント長 L 依存性を測定した [1]。モーターに個性がなく、独立にフィラメントと相互作用すると考えると、相互作用するモーターの数が増えるほど揺らぎが減少するので、 $D_m \propto 1/L$ が予想される。ところが、実験結果は、

$$D_m = D_{ac} + \frac{c}{L} \quad (1)$$

でよくフィットされ、長さによらない定数部分 D_{ac} があることを示唆した。

関本と太和田 [2] は、モーターの向きが揃っておらず、首振りの性能にばらつきがある場合には、フィラメントがあるモーターを通り過ぎるまでにかかる時間 L/V にわたる相関が現れることを指摘し、フィラメント長に依存しない D_m が導かれることを単純なモデルの解析によって示した。我々は、フィラメント長 L に依存しない有効拡散係数 D_m を与える機構を詳しく検討するため、上述の関本・太和田モデルの数値実験を行い、 D_m だけでなく、速度相関の関数形や L 依存性を詳しく調べた。また、関本・太和田モデルを、より現実的で複雑なモデルへ拡張し、速度相関及び D_m の L 依存性がモデルの変更に対してどのような変化を受けるかを調べた。

モデル 数値実験を行ったのは次のモデルである：分子モーターは等間隔に基板に固定されており、長さ L のフィラメントがその上を滑るものとする。フィラメントの下にあるモーターは、確率 p でフィラメントに結合し、確率 q で解離する。モーターが新しく結合するとすぐに首振り運動を起こしてフィラメントの位置 $X(t)$ が $a_{i,\nu_i}/N_s$ だけ進むものとする。 a_{i,ν_i} は首振り運動の「幅」を表し、添字 i は i 番目のモーターが結合したことを、 ν_i はそのモーターが結合するのが ν_i 回目であることを示す。 N_s は、その瞬間にフィラメントに結合しているモーターの数である。

モーターをランダムに 1 個ずつ選び、上の操作を繰り返す。フィラメントと相互作用できるモーターの数と同じ回数だけこの操作を行ったときを単位時間 (1 モンテカルロステップ) とする。

結果 平均速度 V は長さ L によらず $V = \langle a_{i,\nu_i} \rangle / q$ で与えられる。速度揺らぎ $\tilde{v}(t) = \dot{X}(t) - V$ の時間相関関数 $C(t) = \langle \tilde{v}(0)\tilde{v}(t) \rangle$ を数値的に計算した。 D_m は $C(t)$ の時間積分から計算できる。

関本・太和田の有効拡散係数の評価は、 a_{i,ν_i} の ν_i 依存性を無視して行われた。つまり、モーターの個性はあるが、同じモーターはいつも同じ幅の首振りをするモデルになっている。この場合に

¹ E-mail: namiko@stat.phys.kyushu-u.ac.jp

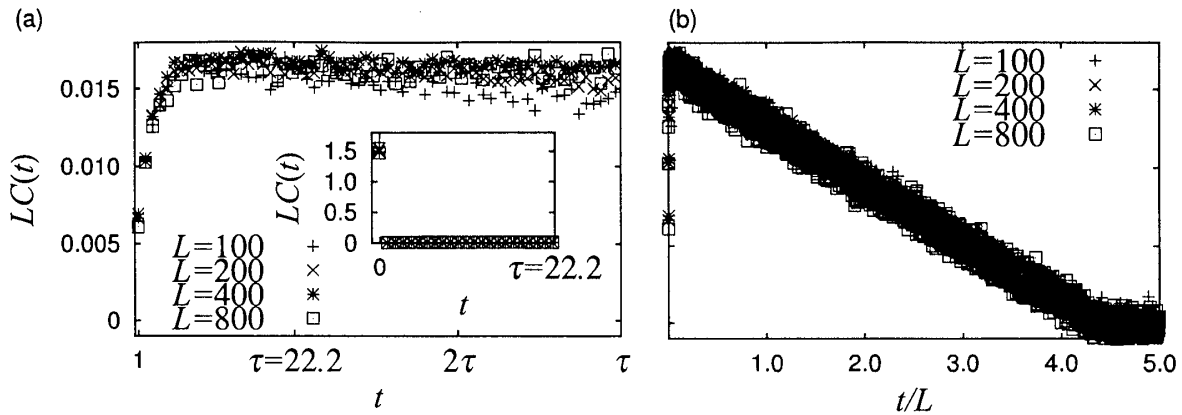


図 1: $L = 100, 200, 400, 800$ の速度相関関数 $C(t)$ 。(a)(ii) の領域。横軸は t 、縦軸は $LC(t)$ 。インセットは $LC(0)$ も含めたプロットで、 $LC(0)$ の値が他の時刻の $LC(t)$ と比較して非常に大きいことがわかる。(b)(iii) の領域。横軸はスケールされた時間 $T = t/L$ 、縦軸は $LC(t)$ 。

ついて速度相関を計算すると、その振舞は次の 4 つの時間領域に分けられることがわかった。

- (i) $t=0$: $C(0) = \langle \tilde{v}^2 \rangle$ (速度揺らぎの二乗平均) は $1/L$ に比例する (図 1(a) インセット)。
- (ii) $1 \leq t \lesssim \tau = 1/p + 1/q$: ここで τ はあるモーターが一度結合してから次にもう一度結合するまでの平均時間間隔である。この領域では、速度相関 $C(t)$ は、一旦減少して再び増加する。増加の程度は $1/L$ に比例し、 $LC(t)$ は異なる L に対してほぼ一致する (図 1(a))。
- (iii) $\tau \lesssim t \leq L/V$: $C(t)$ が t に線形に減衰する。この領域では、特徴的な時間スケールが L/V となり、スケールされた時間 $T = t/L$ を用いると、 $\Phi(T) = LC(LT)$ がほぼ一致する (図 1(b))。
- (iv) $t > L/V$: 相関はみられず $C(t)$ はゼロになる。

$C(t)$ の積分から D_m を計算すると、 $1/L$ に比例する部分は主に速度揺らぎ (i) から、 L に依存しない部分は主に (iii) の領域の面積から与えられる。後者の値は [2] の見積りによく一致した。このモデルでモーターの個性 (a_{i,ν_i} の i 依存性) をなくすと、 $C(0)$ しか値をもたず $D_m \propto 1/L$ になる。

また、結合する度に首振りの幅が違う場合 (a_{i,ν_i} の ν_i 依存性有り)、相互作用を線形ばねとして力の釣合いを考慮した場合などにモデルを拡張し、違いを調べた。モデルが複雑になると $C(0)$ が増え、 D_m の $1/L$ に比例する部分が大きくなる傾向が見られた。一方、モーターの個性さえあれば、 $C(t)$ の領域 (iii) の振舞は変化せず、長さ依存しない部分 D_{ac} の値はほとんど変わらなかった。

このモデルは $t \gg L/V$ での D_m が L によらないが、短時間では $C(0)$ の効果が大きくほぼ $1/L$ に比例するはずである。しかし実験では比較的短時間の振舞から D_m を決定しており、モーターの個性による相関だけでは十分に説明できないようだ。 L に依存しない D_m を与える他の可能性や、モーターの相関について情報を与える D_m 以外の測定可能な量があるかななどを今後検討したい。

参考文献

- [1] Y. Imafuku, Y. Y. Toyoshima, and K. Tawada, Biophys. J. **70** (1996) 878; Biophys. Chem. **67** (1997) 117.
- [2] K. Sekimoto and K. Tawada, Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 180.