

生体分子モーターにおけるゆらぎの増大

われわれの体内では、「回転する」タンパク質や「歩く」タンパク質など、生体分子モーターとよばれるタンパク質が数多く活動している。これらの分子モーターの回転や歩きのペースは一定ではなく、確率的にゆらいでいる。本研究では、分子モーターに特定の大きさの力を加えると、このゆらぎが格段に増大することを理論的に明らかにした。このゆらぎの増大を実験的に観測できるならば、そこから分子モーターの動作機構についての知見が得られる。

物理学会の年会会場が、最寄りの電車の駅から徒歩で 15 分から 30 分程度の距離にあるならば、多くの参加者は駅から会場まで歩く。電車を降りた参加者の集団は、最初は小さなかたまりだが、会場に着く頃にはかなり広がってしまう。この現象は、物理学者や化学者になじみの拡散に類似している。駅から会場までの途中に信号機があって、青信号で通過できたグループと赤信号で取り残されたグループに分かれたりすると、集団の拡散は加速される。これに似た拡散の増大が、生体分子モーターとよばれる動くタンパク質で発生する可能性があることが最近明らかになった。

液体中に分散されたコロイド粒子の拡散は古くから研究されており、この粒子に外力を加えても、拡散には影響しないことはよく知られている。しかし、一次元周期ポテンシャル中を運動する粒子（図 1(a) の挿入図）に外力を加えると一見奇妙なことが起きる。外力 F の値がポテンシャルの最大傾き F_c に近いときに拡散係数の大きさは、ポテンシャルがないときの何倍にも増大するのである（図 1(a)）。この興味深い現象は、前世紀の終わりから今世紀の初めにかけて理論的に発見された。また、この現象を F_1 -ATPase とよばれる回転タンパク質モーター（通称 F_1 モーター、図 1(c) の挿入図）で観測して、その結果から F_1 モーターの回転子・固定子間相互作用のポテンシャル障壁高さを評価した、という成果が昨年発表された。この実験は、 F_1 モーターのエネルギー源であるアデノシン三リン酸（ATP）を加えず、 F_1 モーターが自発的には回転しない（モーターとして機能しない）状況で行った。

最近、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻の研究グループは、自発的に運動する分子モーターに外力を作用させた場合にも、拡散の増大が起り得ることを理論的に明らかにした。生体分子モーターは ATP の加水分解反応を利用してタンパク質の構造を変えることにより、構成要素間の相互作用を切り換えて運動を生み出す。東北大のグループは、図 1(b) に示すモデルを用いて分子モーターの運動を解析した。モーターを束縛するポテンシャル（..., V_{-1} , V_0 , V_1 , ...）が周期的に並んでおり、モーターに作用するポテンシャルが ATP 分解反応により V_n から V_{n+1} に切り換わる。この分解反応の速度がモーターの位置 x の増加関数であると仮定して、拡散係数の外力 F 依存性を計算した結果の例を図 1(c) に示す。この計算では、先行研究による F_1 モーターの回転速度の実験データをもとにしてモデルに含まれるパラメータの値を設定している。したがって、 F_1 モーターでは ATP 濃度が低いときに拡散係数の顕著な増大を観測できると予想される。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2016 年 6 月号に掲載された。

この分子モーターのモデルにおいて拡散の増大が起きる理由はおおよそ次のとおりである。化学反応が起きるまでは、モーターは外力とポテンシャルによる力が釣り合う位置を中心にして、ブラウン運動をする（図 1(b) の上段の図）。そして、反応が起きると、次のポテンシャルのつり合いの位置までモーターは前進する（図 1(b) の下段の図）。いま、反応速度は x の増加関数であると仮定し

ているので、モーターの進行方向に力を加えると反応が起こりやすくなる。モーターが化学反応を待っているのは、学会会場へ向かう物理学者たちが信号待ちをしていることに喩えることができる。ひとつの信号から次の信号まで歩くのに要する時間（反応が起きてから力の釣り合い位置まで移動するのにかかる時間）と信号待ちの時間（化学反応が起きるまでの時間）が適度な関係にあり、信号の変わり目でうまく渡れる人と待たされる人の数が同程度になると、拡散は大きくなる。このように、分子モーターに適度な大きさの外力を作用させる（適度な反応待ちの時間を設定する）と拡散の増大が起きるのである。

拡散増大によるピークの位置と高さは、モーターの化学反応速度やポテンシャルの形状に強く依存する。したがって、分子モーターの動作のゆらぎ（拡散）を観測することで、その動作機構に関する情報が得られる。アインシュタインによるブラウン運動の研究、揺動散逸定理、ゆらぎの定理など、統計物理においてゆらぎは重要な役割を果たしてきたが、本研究はゆらぎに関わる現象のおもしろさやゆらぎの有用性を再認識させてくれる。

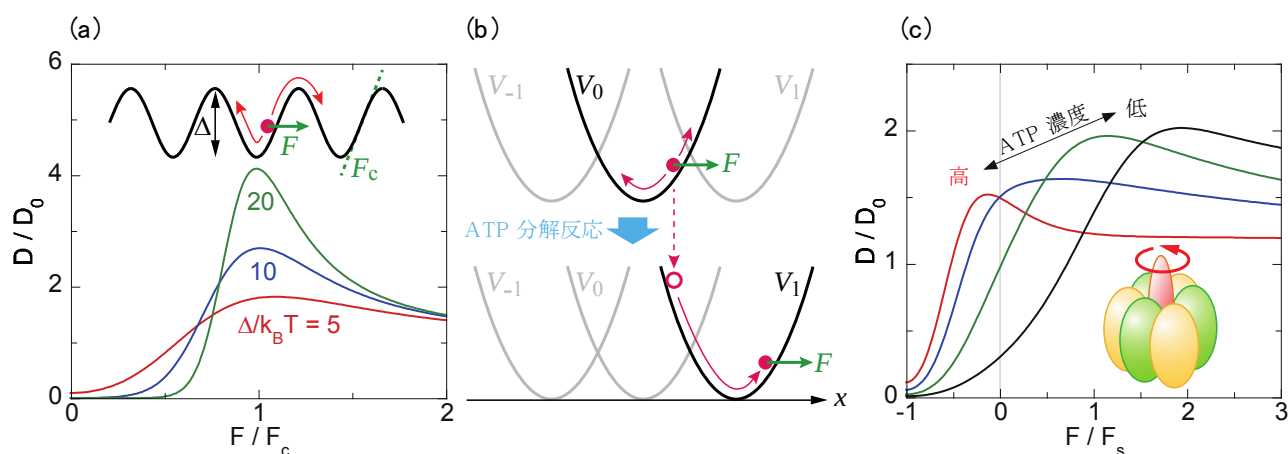


図 1. (a) 周期ポテンシャル中のコロイド粒子（挿入図）の拡散係数 D の外力 F 依存性。 F_c はポテンシャルの最大傾き。 D_0 はポテンシャルが存在しないときの拡散係数。 (b) 分子モーターのモデル。 ATP 加水分解反応により、モーター（赤丸）に作用するポテンシャルが切り換わる。 (c) 分子モーターの拡散係数 D の外力 F 依存性。 F_s はモーターの進行方向とは逆の向きに力を加えたときに、モーターを停止させるのに必要な力の大きさ。挿入図は回転分子モーター F_1 の模式図。

原論文

Enhanced Diffusion of Molecular Motors in the Presence of Adenosine Triphosphate and External Force
Ryota Shinagawa and Kazuo Sasaki: J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 064004

問合せ先：佐々木一夫（東北大学大学院工学研究科）