

分子や微粒子の動態制御におけるブラウン運動の役割

東京農工大学大学院 工学研究院 先端機械システム部門

花崎 逸雄

E-mail: hanasaki@cc.tuat.ac.jp, Website: <http://web.tuat.ac.jp/~ihlab/>

レーザーに誘起される物体への力、いわゆる「光圧」を活用した研究が盛んである。その主な技術上の目的は、流体中に漂う微粒子を捕捉したり、多分散系の中で特定の条件を満たす粒子群だけを選択抽出したり、微粒子群を集合させて（原子・分子より大きな単位構造を人工的に組み合わせるという意味での）メタマテリアルを作製することにある。ここで、流体中に漂う微粒子は（例えば常温の水中ならおよそ $1\mu\text{m}$ オーダー以下の粒径なら）ブラウン運動していることが顕微鏡観察で確認できる。また、一般的な分散媒質である流体は有限温度で必然的に伴うブラウン運動を微粒子に対して引き起こす。すなわち、微粒子群を光圧で操ることを想定する現実的な場面において、ブラウン運動は対象とする系を構成する本質的な特徴であることがわかる。そして、流体中に漂う微粒子群を光圧により集積させようとする目的に対して、ブラウン運動は拡散を引き起こすという意味では逆の作用を担う。そのため、ブラウン運動は光圧誘起メタマテリアルの作製を阻害する因子のように見なされることがあるが、それは必ずしも妥当ではない。

なぜならば、例えば熔融金属を急冷すれば結晶構造の代わりにアモルファス構造の固体になったりするのは、端的に言えばブラウン運動によって原子群が十分に自由エネルギーの低い相対配置を探索することができないまま温度が低下して固まるからである。同様のことは、微粒子分散系すなわちコロイドについても成立する。近年、固体基板上へ滴下した微粒子分散液滴の乾燥過程で生じるコーヒーリング現象において、乾燥に伴う流動の速度場に関する特性時間スケールと微粒子のブラウン運動に関する特性時間スケールとの相対関係が、微粒子群の集積により出来上がる配列パターンを決定付ける、ということが実験計測により示されている^[1]。すなわち、ブラウン運動が十分に激しくなければ流動場による微粒子供給の速さに支配されたアモルファス構造になり、流動場に対してブラウン運動の影響が十分であれば境界条件と力場に応じた安定な結晶構造を取り得る。それゆえ、もし光圧を駆使することを通じて従来にない特別なコロイド結晶やその他の新たな秩序構造を作製することを狙うのであれば、微粒子群の秩序形成を設計して実現するために重要な建設的役割も担う構成要素として、ブラウン運動を的確に取り扱う必要がある。つまり、統計力学が材料の開発に直結している。

流体中に分散した微粒子を補足・集合させるために活用される既知の一般的な光圧の直接的な影響の範囲は、空間スケールも原子・分子とマクロな連続体描像の典型的な領域との間に位置しており、その自由エネルギー差は熱揺らぎを無視できるほどには大きくはない。その意味で、熱揺らぎに支配されたメゾスケールに対して直接的な摂動を与える手段として光圧が特徴付けられる。そもそも、大数の法則や中心極限定理を鑑みれば、取り扱う系の代表的な寸法が小さくなると分子論的な特性が露わになってブラウン運動が顕在化することは

普遍的で基礎的な事実である。また、実用上は、照射中に構造が誘起された後に照射を止めても自立する構造を実現するための方策も必要になる。将来的に光圧の独自性を活かすならば、光圧で実現した特有な非平衡定常状態の構造を固定する方策も必要であり、その際には塗布乾燥技術を活用することが有力な選択肢の一つになる^{[1]-[3]}。この目的において、乾燥過程とはブラウン運動を確保していた分散媒を取り除く現象である。

さらに、微粒子分散系の非平衡定常状態を議論するには、自由エネルギープロファイルに加えて散逸的な特性を評価する必要もある。分散媒のバルクにおける粘度を把握できても、微粒子群が高濃度に集合している状態では流体力学的な効果だけで分散系の有効粘度が増大する。メゾスケールにおけるこれらの要素をすべて考慮した計算物理の数値解析、いわゆるシミュレーションを行うことも原理的にはもちろん有効だが、シミュレーションが一層強みを発揮するのは個別的な場面の再現よりも未知の法則性それ自体を明確に示す用途にある^{[4]-[6]}。むしろ、実際の個別具体的に重要な系で何が起きているのかを明らかにするためには、顕微鏡動画データをはじめ計測の生データから最大限の知見を理論的に獲得することが効果的である。この時、ブラウン運動というランダムさが本質である現象を取り扱うためには、精度と解像度に加え十分な総量を確保して生データの背後に潜む法則性を明らかにすることこそが、現象のメカニズム解明と技術開発のカギとなる^{[7]-[10]}。

参考文献

- [1] Á. G. Marín, H. Gelderblom, D. Lohse, J. H. Snoeijer, “Order-to-disorder transition in ring-shaped colloidal stains”, Vol.107, (2011) 085502.
- [2] I. Hanasaki, Y. Isono, B. Zheng, Y. Uraoka, I. Yamashita, “Adsorption density control of ferritin molecules by multistep alternate coating”, Jpn. J. App. Phys., Vol.50, (2011) 065201.
- [3] Y. Ooi, I. Hanasaki, D. Mizumura, Y. Matsuda, “Suppressing coffee-ring effect of colloidal droplet by dispersed cellulose nanofibers”, Sci. Technol. Adv. Mater., Vol.18, (2017) pp.316-324.
- [4] I. Hanasaki, R. Nagura, S. Kawano, “Coarse-grained picture of Brownian motion in water: Role of size and interaction distance range on the nature of randomness”, J. Chem. Phys., Vol.142, (2015) 104301.
- [5] I. Hanasaki, D. Fujiwara, S. Kawano, “Departure of microscopic friction from macroscopic drag in molecular fluid dynamics”, J. Chem. Phys., Vol.144, (2016) 094503.
- [6] I. Hanasaki, J. H. Walther, “Suspended particle transport through constriction channel with Brownian motion”, Phys. Rev. E, Vol.96, (2017) 023109.
- [7] I. Hanasaki, Y. Isono, “Detection of diffusion anisotropy due to particle asymmetry from single-particle tracking of Brownian motion by the large-deviation principle”, Phys. Rev. E, Vol.85, (2012) 051134.
- [8] I. Hanasaki, S. Kawano, “Evaluation of bacterial motility from non-Gaussianity of finite-sample trajectory by the large deviation principle”, J. Phys.: Condens. Matter, Vol.25, (2013) 465103.
- [9] I. Hanasaki, S. Uehara, Y. Arai, T. Nagai, S. Kawano, “Threshold-free evaluation of near-surface diffusion and adsorption-dominated motion from single-molecule tracking data of single-stranded DNA through total internal reflection fluorescence microscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.54, (2015) 125601.
- [10] R. Motohashi, I. Hanasaki, Y. Ooi, Y. Matsuda, “Robust evaluation of diffusion coefficient against displacement threshold parameter of single particle tracking algorithm”, Micro & Nano Lett., Vol.12, (2017) pp.506-510.