

非平衡条件下のコロイド分散系における揺らぎと応答の関係

福井大学大学院工学研究科・講師 原田 崇広

平衡近傍における巨視的物理量の揺らぎと応答の関係（揺動散逸関係）は、系が平衡から遠く離れると成立しなくなる。ところがコロイド分散系のように、熱浴の自由度と系の自由度が大きく分離している場合には、揺動散逸関係の破れの度合は、簡単な等式によってエネルギー散逸率と結びつけられることを示す。

1950年代に確立された（第1種）揺動散逸定理は、平衡状態近傍において巨視的物理量の揺らぎと応答が、系の温度を介して結びつけられていることを明らかにした（揺動散逸関係）。ところが、系が熱平衡状態から遠ざかると、一般にこの関係は成り立たなくなる。そこで、平衡から遠く離れた系に対して、揺動散逸定理を拡張しようとする試みは多くなされている。近年では、揺らぎの定理と総称される一連の関係式が発見され、揺動散逸定理はその特別な場合として理解されるようになった。その一方で、非平衡状態における揺動散逸関係の破れが持つ物理的意味そのものにも興味を持たれ、たとえばガラス系などにおいて、揺動散逸関係の破れを用いて実効温度を定義しようとする試みがなされている。

それに対して我々は最近、非平衡定常状態にある系において、揺動散逸関係の破れの度合いと系が単位時間あたりに散逸するエネルギー J とが、簡単な等式関係で結びついていることを明らかにした [1, 2]。ここでは、詳細釣り合いを破っている自由度と熱浴の自由度の時間スケールがかけ離れており、遅い自由度を Langevin 方程式で書き表せるような系を対象とする。この場合、時間反転対称な自由度（変位）の時間微分（速度）の平均を v_s 、速度揺らぎのパワースペクトル密度を $\tilde{C}(\omega)$ 、微小な摂動への複素感受率を $\tilde{R}(\omega)$ 、熱浴の温度を $k_B T$ とすると、以下のような関係が一般的に成り立つことを示すことができる。

$$J/\gamma = v_s^2 + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\tilde{C}(\omega) - k_B T (\tilde{R}(\omega) + \tilde{R}(-\omega)) \right] \frac{d\omega}{2\pi}$$

ここで、 γ は今考えている自由度と熱浴との相互作用における粘性係数であり、感受率の高周波数成分から見積もることができる。右辺は、揺動散逸関係の破れの度合いと見ることができ、この式は、系から熱浴へのエネルギー散逸率が、揺動散逸関係の破れの度合いと直接的に結びついていることを表すものである。

上の式は一自由度の Langevin 方程式に対する結果であり、一次元空間上を運動するコロイド粒子などに適用可能であるが、多自由度の場合や系に温度勾配が存在するような場合など、応用上より重要ないくつかの場合についても、同様の関係式が成立することが示せる [2]。この式は、系内部の相互作用ポテンシャルなどの形には依らずに一般的に成立するため、様々な系について、ゆらぎと応答の測定によって系に流れるエネルギーについての得られることを示している。今後、非平衡条件下にあるソフトマテリアルへの応用が期待される。

<参考文献>

- [1] T. Harada and S. -i. Sasa, Phys. Rev. Lett **95**, 130602 (2005).
- [2] T. Harada and S. -i. Sasa, Phys. Rev. E **73**, 026131 (2006).