

## 緩和と情報による冷却限界

伊藤創祐, 佐野雅己

東京大学理学系研究科 物理学専攻

”Maxwell の悪魔 ”の問題が提起した, ”情報” と仕事の関係が近年注目を浴びており, 系の状態と測定結果間の相互情報量を用いて, 熱力学第二法則はフィードバック制御下で拡張された. この”情報” と仕事の関係は実験的にも確かめられ, 回転ブラウン運動を行うコロイド粒子系を用いて情報-仕事変換が達成された [1].

一方で, フィードバック制御によってブラウン粒子の速度揺らぎを減らすことで”温度”を下げる系が実験的に作られている [2]. コロイド粒子の速度と逆向きフィードバック力をレーザーピンセットを用いて加えることで, 実験的にミリケルビンレベルの低温が実現され, ノイズキャンセレーションや BEC などの低温での量子効果の達成などの広い応用が期待されている.

我々は実験 [2] のような系においても, 実験 [1] と同じような形で”Maxwell の悪魔”の文脈で冷却現象を”情報”の観点から理解し, フィードバック制御によって達成可能な冷却限界と”情報”の関係を導出した [3].

この”情報”と冷却限界を議論するために, 我々はまずフィードバック制御された 1 次元 Langevin 系で, 拡張された熱力学第二法則の議論を非平衡遷移下での揺動散逸定理の議論を用いることで, フィードバックによる低温実現に対して議論を行い, 定常状態を仮定したときに以下の式が導出されることを発見した.

$$\frac{T - T_{\text{eff}}}{T} \leq \frac{\sum_i \langle I_i \rangle m}{\tau \gamma} \quad (1)$$

ここで  $T$  は熱浴の温度であり,  $T_{\text{eff}}$  はブラウン粒子の速度揺らぎから定義されるコロイド粒子の”温度”,  $\sum_i \langle I_i \rangle$  は時間  $\tau$  間で得られた相互情報量の総和であり”情報”に相当する部分である.  $m$  はブラウン粒子の質量,  $\gamma$  は摩擦係数である.

この式は有効温度の熱力学的な原理的下限を決定する式となっており, 系の緩和時間 ( $m/\gamma$ ) と結びついているので題名通り”緩和と情報による冷却限界”と呼ぶことができる. フィードバック制御下で達成可能な定常分布に対して条件を与える制限式である. また, この式は  $N$  次元 Langevin においても同じ形に帰着することが確かめられており, 複数次元においても普遍的に”緩和と情報の冷却限界”の描像が存在している.

この結果に対して, 実際の実験 [2] におけるパラメータを代入して, 冷却を達成するのに必要な測定誤差に関する定量的な予言が可能なことや, いくつかの異なる測定誤差の関数形とフィードバックのプロトコルで, (1) 式が常に成り立っており, 誤差理論として働いていることを紹介する.

---

[1] S. Toyabe, T. Sagawa, M. Ueda, E. Muneyuki and M. Sano, *Nature Phys.* **6**, 988 (2010).

[2] T. Li, S. Kheifets and M. G. Raizen, *Nature Phys.* **7**, 527 (2011).

[3] S. Ito and M. Sano, *Phys. Rev. E* **84**, 021123 (2011).