

情報処理の熱力学

Thermodynamics of information processing

沙川 貴大¹

Takahiro Sagawa¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

¹Department of Applied Physics, University of Tokyo

Abstract: In the nineteenth century, J. C. Maxwell considered a hypothetical being that can observe and manipulate individual atoms and molecules, leading to apparent violation of the second law of thermodynamics. Such a being was named Maxwell's demon and has been an issue of intense controversies. Nowadays, it is realized that information is the key concept to understand the role of the demon, and thermodynamics of information has attracted renewed attention from both the theoretical and experimental viewpoints. In this talk, I will make a brief introduction to modern theory of thermodynamics of information.

はじめに

近年、情報と熱力学の関係に新たな光が当たっている。本講演では、情報を取り入れて一般化された熱力学である「情報熱力学」の考え方を紹介する[1,2].

歴史的背景

19 世紀、物理学者マクスウェルは一つの思考実験を考案した。もし原子や分子を一つずつ観測して操作できる「デーモン」が存在すれば、仕事をすることなく熱力学系のエントロピーを減らすことができ、熱力学第二法則が破れるかもしれない。このような「マクスウェルのデーモン」が第二法則と如何に整合するかについては、その後 150 年にわたって物理学者たちが色々な議論を行ってきたが、20 世紀のうちはその議論のほとんどが思考実験に基づいたものであった。しかし 21 世紀に入ってから、現代的な非平衡統計力学に立脚することで、理論と実験の両面から状況は大きく進展した。

現代の研究

理論的には、非平衡統計力学と（量子）情報理論を融合して、情報量を熱力学量（熱や仕事）と対等に扱う、情報熱力学の現代的な理論的枠組みが構築されてきた。この観点からは、マクスウェルのデーモンとは、熱ゆらぎのレベルで熱力学系を測定し、その測定結果に基づいた操作（フィードバック制御）を行うデバイスであると理解できる。そのとき、デーモンが測定で得た情報量が本質的な役割を果たす。

すなわち、デーモンの取得した情報のエントロピーと、熱力学エントロピーを両方考慮して初めて、デーモンと第二法則の整合性が理解できることになる。

また、現代では熱ゆらぎのレベルでの測定や操作は実験的に可能であり、デーモンはもはや思考実験上の存在ではない。実際 2010 年になって、コロイド粒子を用いた実験によってマクスウェルのデーモンが世界で初めて実験的に実現された[3]。その後、単一電子、NMR、超伝導量子ビットといった、量子系も含めた多くの系でデーモンの実験が行われるようになっていく。

マクスウェルのデーモンはもはや歴史の遺物ではなく、現代の熱力学の最先端の研究テーマになっている。その研究を通して、熱力学における情報の役割が深く理解され、情報処理に要するエネルギーコスト（仕事）の原理的な限界が解明されてきている。これは基礎物理として重要な問題であるだけでなく、低エネルギー消費のデバイスの設計など工学的な問題にも結びつくことが期待される。

参考文献

- [1] J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, T. Sagawa, *Nature Physics* **11**, 131 (2015).
- [2] 沙川貴大, 『非平衡統計力学——ゆらぎの熱力学から情報熱力学まで』(共立出版, 2022).
- [3] S. Toyabe, T. Sagawa, M. Ueda, E. Muneyuki, and M. Sano, *Nature Physics* **6**, 988 (2010).