

熱力学第3法則を拡張する新たな普遍原理を発見

—「時間・コスト・エラー」間に成立する限界の解明—

概要

京都大学基礎物理学研究所 Vu Tan Van（ヴー タンバン）准教授、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 齊藤圭司教授らの研究グループは、冷却や情報消去など、あらゆる熱力学的な操作において、「所要時間」「熱力学的なコスト」「エラー（誤差）」の間に成り立つ根本的なトレードオフ関係式を発見しました。この成果は、長年にわたり主張が曖昧であった「絶対零度には到達不可能」とする熱力学第3法則が、なぜ、どのように不可能なのかを定量的に示すものであり、第3法則を「時間・コスト・エラー」の観点から一般化・更新するものです。さらに今回の発見は、熱力学第3法則を、従来の冷却過程を超えて、コピー過程を始めとする様々な物理過程に適用可能な一般的な法則として格上げするものです。本成果は、ナノマシンや量子コンピューターなど、微小な世界での高速・高精度な操作における根本的な性能限界を解明するもので、将来の技術設計に不可欠な指針を与えます。

本研究成果は、2025 年 11 月 13 日に米国の国際学術誌「*Physical Review X*」にオンライン掲載されました。

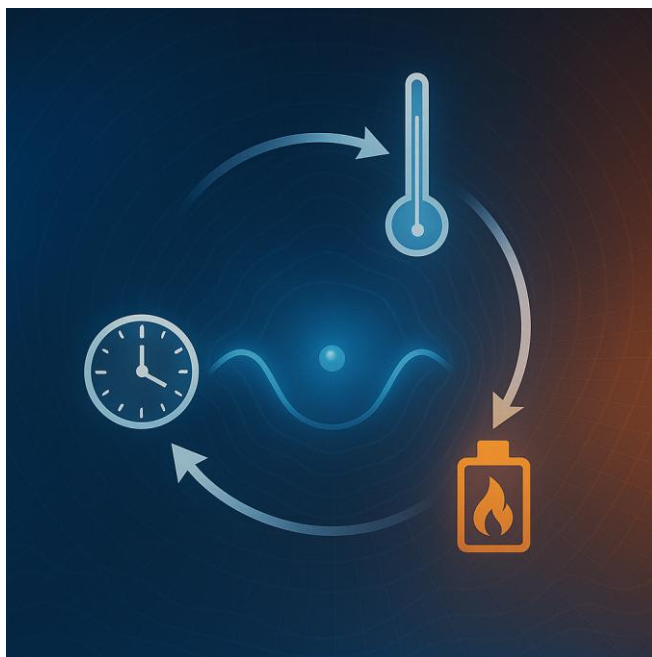


図1：本研究で導出したトレードオフ関係式概念図。観測確率をゼロにする熱力学過程では、時間・コスト・エラーの間に普遍的なトレードオフ関係が生じます。代表的な例として、冷却、情報の消去、コピーなどが挙げられます。

1. 背景

私たちの生活を維持する大事な物理現象の中には、「熱力学」^{注1)} が関わる現象が多く存在します。例えば、私たちの日常生活に不可欠な電力は、火力発電や原子力発電などで高温を生み出し、その熱でタービンを回すという熱力学過程を経て得られます。こうした熱のエネルギーを電力に変換する過程は、まさに熱力学の原理に基づいています。熱力学は電力発生という人工的な装置だけでなく、我々の体の中の生体内の分子モーター^{注2)} など、生命維持のための基本原理にも登場します。さらに最近では、ブラックホール^{注3)} の物理との関わりな

ど、思いもよらない関係も分かってきています。

このように様々な現象に関わる基本原理として重要な熱力学には、3つの基本的な法則があります。1つ目は、熱力学第1法則です。第1法則は、熱もエネルギーの一種であり、さきほどの電力の例では、熱と電力のエネルギーの総和は変化しないということを主張します。2つ目は、熱力学第2法則です。私達は、お湯に氷を入れたら氷は溶け、その後は二度と最初の状態に戻らないことを知っています。このようにもとに戻らない性質は、熱力学的不可逆性^{注4)}と呼ばれます。割れた卵が自然に元の形に戻らないことにも通じる、私達の自然界を支配している重要な性質です。熱力学第2法則はこの不可逆性を定量化しています。さらに熱力学第3法則は、絶対零度には到達できないことや、絶対零度に到達するためには無限個の手順（プロトコル）が必要であることを主張します。ただし第3法則は、第1法則や第2法則に比べて主張がやや曖昧で、「なぜ、どのように不可能なのか」を明確かつ定量的に説明することが難しい法則です。

従来の熱力学は、一般に時間を含まない学問体系として発展してきました。しかし現実の世界では、熱力学的な操作はすべて有限の時間の中で行われます。そのため、近年では、時間を含む「非平衡熱力学」^{注5)}が盛んに研究されています。非平衡熱力学では、熱力学が関与するタスクの実行時間や精度などを、定量的に解析する手法が発達し、熱力学第2法則を拡張する試みがこれまで数多く提唱されました。一方で、第3法則については、こうした現代的な手法による新たな解釈や発展が長く望まれていたものの、本研究以前には本格的な探究がほとんど行われていませんでした。さらに、熱力学第3法則と同等の物理現象はこれまで示唆されてきましたが、熱力学第3法則の定式化を拡張することによる統一的な考察はなされてきませんでした。

量子力学^{注6)}が支配的となる微小な世界では、熱力学の法則も新たな重要性を帯びます。その中でも熱力学第3法則は量子コンピューター^{注7)}の動作と深く関係します。量子コンピューターでは、演算を始める前にシステムを最も低いエネルギー状態まで冷却し、安定した初期状態を準備することが多いです。しかし第3法則によれば、絶対零度には原理的に到達できません。この「冷却の限界」は、量子ビットの初期化精度や演算の安定性に直接影響します。したがって、有限時間でどこまで低温状態を実現できるかを定量的に明らかにすることは、量子情報処理を支える重要な課題です。このように、第3法則は、その理解が理論研究にとどまらず、量子テクノロジーの発展にも直結する基本原理なのです。

2. 研究手法・成果

今回の研究では、主に確率的に時間発展するマルコフダイナミクス^{注8)}を使って、熱力学第3法則とその拡張を体系的に考察しました。本研究では、熱力学第3法則の意味を明確化するだけでなく、これまでに考えられていた以上に同様の制約原理が熱力学的な操作の中に普遍的に存在することを明らかにしました。具体的には、熱力学的な操作で目的を達成する際、熱力学的なコスト（熱力学的不可逆性の大きさ）・所要時間・精度という三つの量のあいだに、一方を高めれば他方が犠牲になるトレードオフ関係が成り立つことを定量的に示しました。つまり、精度を高めようとすれば、より長い時間や大きなコストが必要となり、逆に時間やコストを抑えれば精度を落とさざるを得ないという「綱引きの関係」が熱力学的操作の一般的特徴として普遍的に成り立つことを示したのです（図2）。

従来の第3法則では、目的は絶対零度に到達することでした。このとき、絶対零度にどれだけ近づけたかが精度、それに要する時間と熱力学的不可逆性の度合いがそれぞれのコストに相当します。精度を上げるためには、所要時間を長くかけたり、不可逆性の度合いを上げたプロトコルを用いたりしなければなりません。本研究は、この冷却過程を超えて、多くの熱力学的操作においても同様の制約が成り立つことを示しました。冷却だけでなく、例えば情報のコピー操作も同じ枠組みで理解できることが分かりました。0 または 1 をとる変数 x を別の変数 y にコピーする熱力学的操作を考えると、完全な精度でコピーを行うには、無限の時間やエネルギーコストが必要になります。これは、従来の第3法則（絶対零度に到達できないという限界）と同等の構造を持つことを意味します。また、量子系の冷却に対しても、量子マスター方程式^{注9)} や熱浴（ねつよく）^{注10)} による力学的解析を行うことで、同様のトレードオフ関係式を導出しました。これにより、古典系だけでなく量子系にも適用できる、普遍的な時間・コスト・エラーの制限関係を明らかにしました。

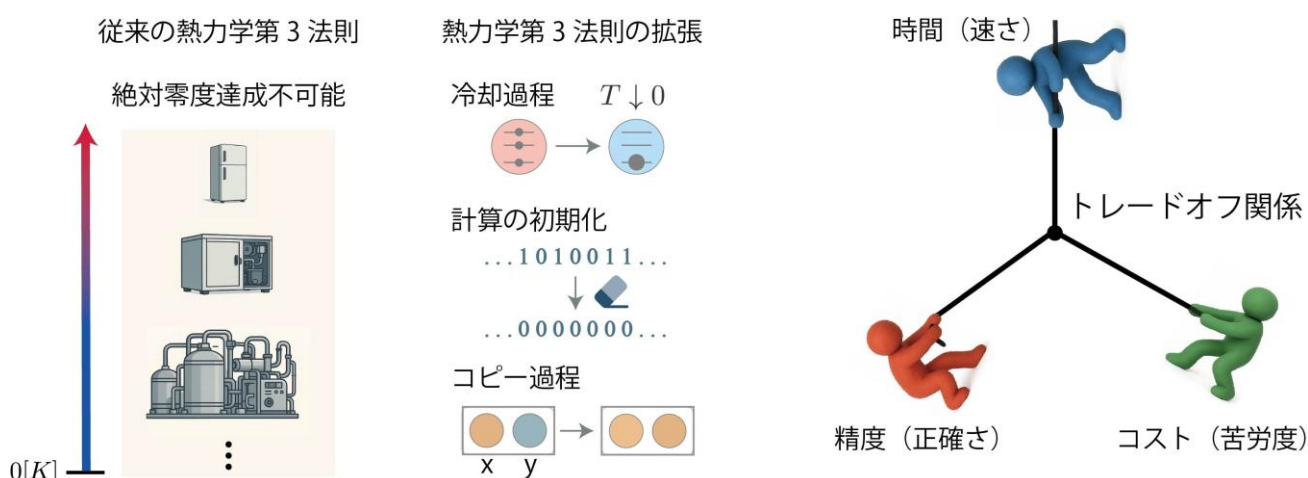


図2：本研究の成果の概念図。従来は「絶対零度には到達できない」とされていた熱力学第3法則（左図）が、冷却・情報消去・コピーなどの多様な熱力学的操作にも普遍的に現れる原理であることを示しました（中央図）。さらに、これらの過程では時間・コスト・エラーの間に厳密なトレードオフ関係が成り立つことを理論的に明らかにしました（右図）。

3. 波及効果、今後の予定

今回のトレードオフ関係式や熱力学第3法則の拡張は、ナノマシンや量子コンピュータなど、微小な世界での高速・高精度な操作における根本的な性能限界を解明するもので、将来の技術設計に不可欠な指針を与えます。導出した関係式は様々な系に適用可能であり、適用範囲を模索していくことは、これからの大事な課題です。さらに今回我々が採用したダイナミクス以外でも第3法則を定式化する必要があります。また、本研究の成果を実験的に検証し、理論と実験の両面から理解を深めていくことも今後の大きな展望です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記の助成金と研究機関による支援を受けて行われました。

- (1) JSPS 科研費「Exploring universal relations in nonequilibrium systems using optimal transport theory」JP23K13032 (研究代表者：Vu Tan Van)
- (2) JSPS 科研費「速度限界と情報伝播に関する理論的研究」JP23K25796 (研究代表者：齊藤圭司)
- (3) 京都大学研究連携基盤次世代研究者支援事業
- (4) 京都大学基礎物理学研究所 重力量子情報研究センター

<用語解説>

- 注1) 熱力学：熱が仕事に変換される現象やその限界を定量化する学問体系。
- 注2) 分子モーター：生物の体の中にあるモーターであり、生命活動を維持するための燃料を作ったり、細胞内物質を輸送したりする様々なモーターが存在する。熱のやり取りを伴いながら運動するために、熱力学的な考察が重要になる。
- 注3) ブラックホール：極端に高い重力を持ち、近傍の物質や光が脱出不可能である天体。
- 注4) 熱力学的不可逆性：熱は高温から低温に流れその逆方向には流れないなど、熱に関する限界を意味する性質。
- 注5) 非平衡熱力学：熱力学的に不可逆なダイナミクスおよび熱力学を記述する分野。
- 注6) 量子力学：極めて小さな領域で顕著になる力学であり、粒子の性質と波の性質を併せ持つ力学。
- 注7) 量子コンピューター：量子力学の使ったコンピューター。古典コンピューターでは達成不可能な計算を短時間で達成できると期待されている。
- 注8) マルコフダイナミクス：過去の履歴に依存しない確率的なダイナミクス。
- 注9) 量子マスター方程式：環境と相互作用する量子系の時間発展を記述する方程式。
- 注10) 熱浴：外部との相互作用によっても自分の温度が変化しないほど大きな系のこと。対象の系にエネルギー（熱）を与えたり奪ったりして、一定の温度を保つ役割をもつ。

<研究者のコメント>

「熱力学第3法則は非常に基礎的な基本原理でありながら、さまざまな分野で重要な役割を果たしてきました。それにもかかわらず、非平衡熱力学の分野では、第1法則や第2法則に比べて長年にわたり、厳密で明確な定式化が行われていませんでした。今回の研究で第3法則を厳密に定式化し、それをより幅広い熱力学的操作にまで拡張できたことを嬉しく思います。今後は、これまで扱われてこなかったさまざまなダイナミクスでもこの法則を一般化し、理解をさらに深めていきたいと考えています。」(Vu Tan Van、齊藤圭司)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Time-Cost-Error Trade-Off Relation in Thermodynamics: The Third Law and Beyond（熱力学における時間・コスト・誤差のトレードオフ関係：第3法則とそれを超えて）

著者：Tan Van Vu and Keiji Saito

掲載誌：*Physical Review X* (*Phys. Rev. X* **15**, 041029 (2025)) DOI: 10.1103/l6b9-rg1j