

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Analysis of finite-size effects in quantum thermodynamics of multiple conserved quantities beyond i.i.d. regime  
(複数保存量の量子熱力学における有限効果の独立同一分布を超えた解析)

氏 名 伊藤 康介

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年の量子熱力学の研究により、巨視的な系とは異なる量子熱機関の法則が明らかになってきたが、熱浴の有限性による効果は、まだあまり研究されていない。最近の先行研究 [H. Tajima and M. Hayashi, Phys. Rev. E 96, 012128 (2017)] では、独立同一分布 (i.i.d.) に従う  $n$  個の粒子からなる熱浴を用いた熱機関の最適効率に対する、粒子数  $n$  についての有限効果が初めて導出された。しかし、より一般に粒子数変化等、エネルギー以外も含めた複数保存量を用いる熱機関の浴の有限効果は扱えない。また、従来の i.i.d. に従う熱浴のスケーリングでは、相関を含む自然な系を扱うことができず、体積をサイズとしたスケーリングも扱えない。これらを解決することで、電池や化学反応系、生物系などの熱浴の有限効果が現れうる興味深い対象への応用が期待される。また、量子系の熱力学として、非可換な保存量の熱力学も注目されており、その有限効果への非可換性の影響も興味深い。

そこで本研究では、非可換な場合も含めた複数保存量を用いた量子熱機関の普遍的な最適性能が、熱浴の有限サイズ効果によって受ける影響を、漸近論によって定量的に明らかにした。系の状態として、i.i.d. を仮定せずに、示量性に着目した一般的なスケーリングの下で有限サイズ効果を扱った。結果として、それぞれの保存量の熱的な移動量に応じて仕事量の上限を与える一般化 Carnot bound に対して、有限サイズ効果による補正を加えた不等式 (fine-grained generalized Carnot bound) を得た。熱力学極限での最大仕事を与える一般化 Carnot bound は、通常のカノール bound と同様に一般化逆温度のみで与えられる。これに対し、有限サイズ効果の補正項には逆温度だけでなく、物理量同士の相関があらわれる。特に、非可換の場合には、カノール相関の形で非可換性を反映している。この有限効果が現れるメゾスコピックなスケールの系一般に対して、物理量の相関によって熱機関の性能の上限が与えられる普遍的な法則があることは、マクロでなく、極端に微小な系でもない中間的スケールの新たな熱力学的構造の解明の第一歩といえる。

さらに、得られた上限を達成するプロトコルを、示量性からのずれが小さい場合に構成し、漸近的最適性を示した。これにより、得られた上限は、性質のいい系については常に達成可能であり、漸近的に最大性能をあたえることを証明した。その証明は、中心極限定理や強い大偏差原理を、示量性の仮定の下で拡張し、情報幾何学を駆使した、情報理論的な漸近解析によって達せられた。

最後に、幾つかの具体例に対して、得られた一般論を適用し、有限効果の具体的振る舞いを調べた。1次元イジングスピン系を熱浴とした熱機関の場合、最適性能の有限効果は結合定数に依存し、最大の性能が得られる結合定数の条件が得られた。二準位系で、外部磁場をかけたスピンのハミルトニアンと、それと異なる方向のスピントを非可換な保存量としてもつ熱浴を用いる場合の有限効果では、最大性能を得るための、外部磁場と温度の関係が得られた。

体積でスケールされた理想気体を熱浴として、粒子の移動を伴う熱機関に適用した場合、粒子の質量が大きいほど仕事量の上限が大きくなるという、興味深い振る舞いが得られた。