

令和3年11月5日

国立大学法人 電気通信大学  
 国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)  
 国立研究開発法人 理化学研究所

## 熱の流れに量子効果が与える影響の解明：エネルギーロスのない熱流の発見と、量子熱機関への応用

### 【ポイント】

- \* 量子系が熱源と接触している状況において、量子効果が熱の流れにおけるエネルギーロスにどのように影響するかの系統的な規則を理論的に明らかにした。
- \* 得られた規則は、量子効果が量子熱機関における「摩擦」をどのように増減させるかに関するルールを明らかにしている。
- \* 特殊な場合には、量子効果を用いてエネルギーロスのない熱の流れを作ることができる。
- \* 発電機・エンジン・冷却器などをはじめとした熱機関の、量子効果を用いた性能向上につながる可能性がある。

### 【概要】

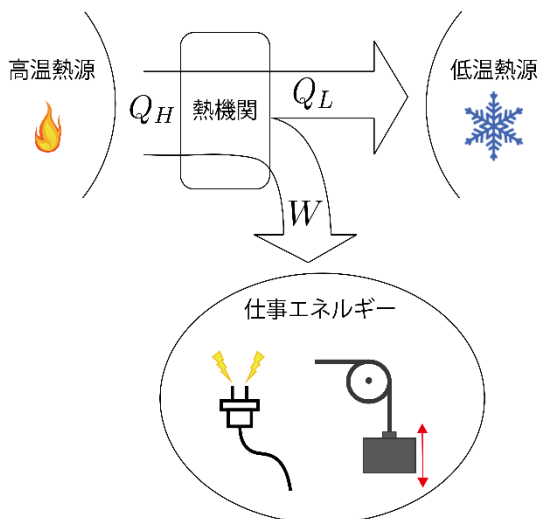
電気通信大学の田島裕康助教（兼任：JST さきがけ研究者）は、理化学研究所開拓研究本部の布能謙特別研究員と共に、量子的な状態の重ね合わせが熱の流れにどのように影響するかの系統的な規則を理論的に明らかにしました。この規則によれば、適切な種類の量子重ね合わせを大量に用意することで、マクロな大きさの、エネルギー損失のない熱の流れを作ることができます。この効果を用いることで、少なくとも理想化されたモデルの上では、発電機・エンジン・冷却器などをはじめとした熱機関の性能が大幅に向上することがわかりました。

この研究成果は、令和3年11月4日（EST）付で米国科学雑誌「Physical Review Letters」オンライン版に掲載される予定です。また、特に重要な成果として「Editor's Suggestion」と American Physical Society の「Featured in Physics (Synopsis)」に選ばれました。

### 【背景】

#### 背景1：熱機関の性能の限界

温度の異なる二つの物体をつなげると、温度の高い側から低い側にエネルギーが流れます。このエネルギーの移動は熱と呼ばれ、日常生活の多くの場面で見ることができます。発電機やエンジン、クーラーのような「熱機関」は、こうした熱エネルギーから力学的な仕事を取り出す、あるいは逆に力学的な仕事を用いることで熱の流れをコントロールするデバイスの総称です（図1）。



温度の高い側から低い側にエネルギーが流れます。このエネルギーの移動は熱と呼ばれ、日常生活の多くの場面で見ることができます。発電機やエンジン、クーラーのような「熱機関」は、こうした熱エネルギーから力学的な仕事を取り出す、あるいは逆に力学的な仕事を用いることで熱の流れをコントロールするデバイスの総称です（図1）。

図1：熱から仕事を取り出す熱機関の概念図。高温熱源から熱エネルギーを $Q_H$ として受け取り、その一部を仕事 $W$ として取り出す。残りの $Q_L = Q_H - W$ は排熱として低温熱源に捨てられる。こうした熱機関には例えば発電機がある。動作を逆にすると、冷蔵庫などをはじめとした冷却器（仕事を用いて低温熱源から高温熱源に熱エネルギーを流す）として機能する。

熱機関の性能をどこまで高めることができるのかは実用

上非常に重要な問題であるため、古くから非常に多くの研究が行われてきました。熱機関の性能は、大きく分けて次の二つの量で測ることができます。

- ・ 高温熱源から取り出した熱エネルギーのうち、どのくらいの割合を仕事に変換できるかを表す「熱効率」。高温熱源から吸収した熱エネルギーの量を $Q_H$ 、取り出した仕事の量を $W$ とすると、その比で与えられる： $\eta = W/Q_H$
- ・ 単位時間当たりどのくらいの仕事ができるかを表す「パワー」。仕事と、熱機関が動作する時間 $\tau$ の比で与えられる： $P = W/\tau$

大雑把に言えば、熱効率が燃費、パワーが馬力に対応します。従って、熱機関開発においてはこれら二つの量を同時に大きくすることが重要になります。これは簡単ではなく、いくつかの「超えられない限界」があることが知られています。まず、熱効率には熱機関である限り絶対に越えられない限界があります。熱効率は、高温熱源の温度 $T_H$ と低温熱源の温度 $T_L$ で与えられる、カルノー効率と呼ばれる限界効率  $\eta_{car} = 1 - T_L/T_H$  を絶対に上回ることができません： $\eta \leq \eta_{car}$ 。つまり、燃費には熱源の温度だけで決まる絶対的な限界があります。

次に、「熱効率を高めるとパワーが下がる」という傾向があることも知られています。このことに関する重要な定理が白石-齊藤-田崎限界<sup>[1]</sup>で、一般に熱効率がカルノー効率に到達するような熱機関は、パワーが0になることが厳密に証明されています。馬力が0の熱機関は実質的には全く役に立たないので、実用的な熱機関である限り、カルノー効率を達成する方法はない、ということになります。実際に、現在社会で使用されているような、有限の大きさの馬力で動作する熱機関は全て、カルノー効率よりはるかに低い効率でしか動作できていません。

## 背景 2: 量子効果と熱機関の関係

一方、近年の量子情報技術の高まりとともに、量子効果を用いて熱機関の性能(パワーや熱効率)を高めることができるか、という問題が重要になりつつあります。量子力学では、異なる二つの状態を重ね合わせ、同時に存在させることができます。この有名な「状態の重ね合わせ」は、量子力学特有の様々な現象を引き起こす原因として知られています。量子情報理論の分野では、この状態の重ね合わせを用いて様々な装置の性能を向上させられることが知られています。既に小規模なものでは実現している量子計算機をはじめとして、通信、センサーなど多くの分野で、量子重ね合わせが実際に機械の性能を向上させることが、理論と実験の両面から確認されています。熱機関でも同じように性能の向上が実現できれば、発電機やエンジンの燃費向上をはじめとして、様々なメリットを享受できることが期待されます。こうした期待の一方で、熱機関への量子重ね合わせの影響には不明な点が多くあります。熱機関の性能に量子重ね合わせがプラスの影響を及ぼすのか、マイナスの影響を及ぼすのか自体が議論の対象となっており、全体としてどのような構造になっているのかは不明なままでした。

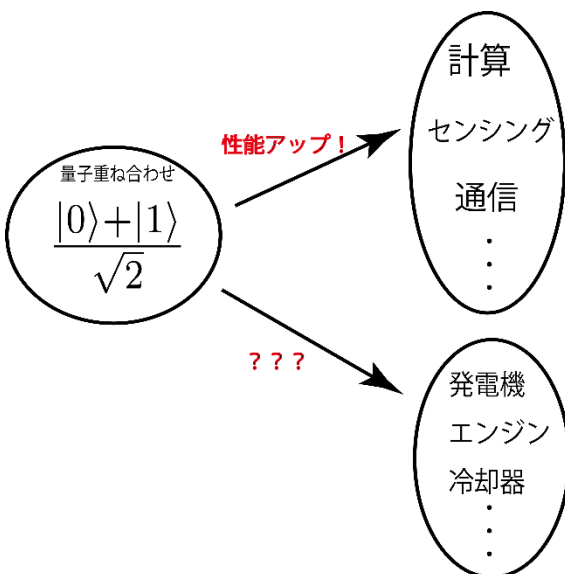


図 2: 量子重ね合わせと様々なデバイスの性能の関係: 量子力学では、異なる状態の「重ね合わせ」をとれる。この量子重ね合わせは、計算機・通信機・センサーのような様々なデバイスの性能を飛躍的に上げることが知られている。一方で、熱機関(=発電機・エンジン・冷却器など)の性能に重ね合わせがどう影響するかは不明な点が多い。

## 【成果】

我々は、異なる温度の物体間での熱の流れに量子重ね合わせがどのように影響するか、といった総合的なルールを明らかにすることで、量子重ね合わせは熱機関性能にプラスの影響を与える場合もあれば、マイナスの影響を与える場合もあること、そしてそれらがそれぞれどのような時に起こるかを明らかにしました。この規則から分かる重要な帰結として、熱効率を理想的な限界であるカルノー効率にほぼ等しくしつつ、大きなパワーを持つ熱機関の存在があげられます。

我々はまず、熱としてのエネルギーの流れの大きさを表す  $J$  と、熱の流れに伴って起きるエントロピー<sup>[2]</sup>の増大量  $\dot{\sigma}$  の間の比  $J^2/\dot{\sigma}$  に注目しました。この比はオームの法則で言う抵抗  $R$  の逆数に対応する量で、 $J^2/\dot{\sigma}$  が大きければ大きいほど熱の流れはロスが小さいものになります。従って、この量を大きくすることができれば熱機関はエネルギーロスのない、性能のよいものになる傾向があると予想できます。我々はこの比  $J^2/\dot{\sigma}$  に対して成立する一般的な不等式をいくつか導き、具体的なモデルによる解析と組み合わせることで、量子重ね合わせがこの比  $J^2/\dot{\sigma}$  にどのような影響を与えるかについて、以下の三つの一般的な規則を発見しました。:

1. 異なる大きさのエネルギーを持つ状態の重ね合わせは、 $J^2/\dot{\sigma}$  を常に小さくする。すなわち、異なるエネルギーの間の重ね合わせは摩擦を大きくする。
2. 一方、同じ大きさのエネルギーを持つ状態の間の重ね合わせは、適切に利用することで  $J^2/\dot{\sigma}$  を大きくする。すなわち、同じエネルギーを持つ状態の間の重ね合わせは摩擦を小さくする。
3. 同じエネルギーを持つ状態の間の重ね合わせが大量にある時、 $J$  をマクロな大きさに保ちつつ、 $\dot{\sigma}$  を実質的に消去することができる。この状況においては摩擦が消え、熱エネルギーがロスなく流れる「散逸なし熱流」が実現する。

熱機関において比  $J^2/\dot{\sigma}$  はエネルギーロスを表すため、上記の三つの規則はそのまま熱機関に適用できます。特に、同じエネルギー状態の間の重ね合わせが大量にあるときには、散逸なしの熱流を利用してエネルギーロスを実効的に 0 にすることができるため、「熱効率を高めるとパワーが下がる」という傾向をうまく回避して熱機関の性能を向上させることが可能になります。具体的には、熱効率を理想的な限界であるカルノー効率との差を、厳密に 0 にならない範囲で好きなだけ小さくしつつ、パワーを好きなだけ大きくすることができるようになります。

エネルギーの大きさ

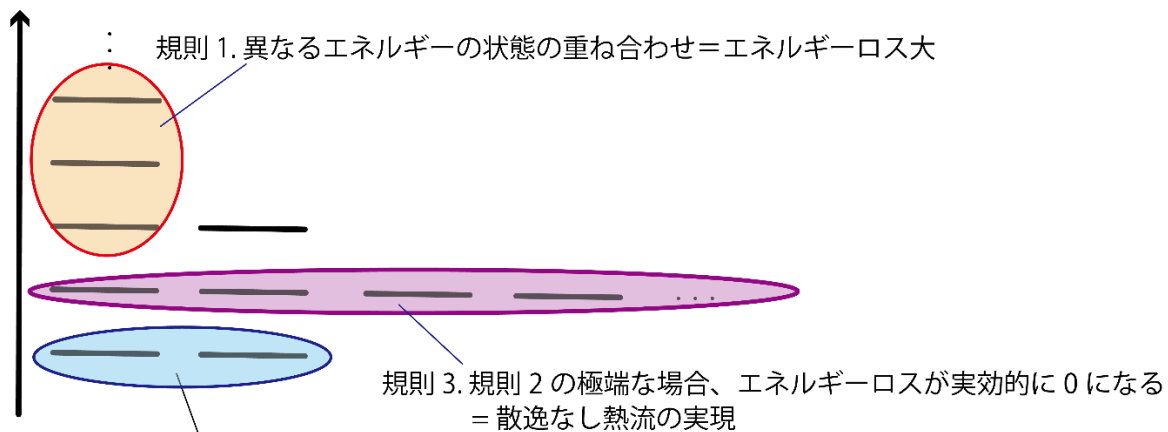


図 3: 量子重ね合わせの種類と、それがどのように熱の流れに影響するかの図解。横棒一つ一つが、一つのエネルギー状態を表し、縦軸がその状態が持つエネルギーの大きさを表している。異なる大きさのエネルギーの状態の重ね合わせは、 $J^2/\dot{\sigma}$  を常に小さくし、エネルギーロスを大きくする。一方、同じエネルギーの間の重ね合わせはエネルギーロスを小さくする。その極端な状況では、エネルギーロスが実効的に 0 になり、散逸なしで熱エネルギーが流れるようになる。

## 【今後の期待】

本研究成果は、発電機やエンジン、冷却器と言った熱機関全般の性能向上を量子的に行う際、有望な指針を与えると期待できます。現時点で「散逸なし熱流」自体は理想化された理論モデルの上で確認されているだけですが、我々が提案する熱機関の性能向上それ自体は、現在の量子情報技術の範囲で十分に確認可能なものです。将来的に、散逸なし熱流を現実の系で実現できるようになれば、高いパワーと、(ほぼ)理想的な熱効率とを併せ持つ熱機関が実現することになります。

また、本研究成果は異なる温度を持つ熱源の間の熱の移動であれば適用可能であるため、熱機関以外の対象にも適用することができます。特に、光合成をはじめとした生体反応の中で量子重ね合わせがどのような影響を及ぼしているかの解析などへの適用が期待できます。

### (論文情報)

著者: Hiroyasu Tajima and Ken Funo

論文タイトル: *Superconducting-like heat current: effective cancellation of current-dissipation trade off by quantum coherence*

雑誌名・論文番号: Physical Review Letters, Vol. 127, 190604 (2021)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.190604

### (外部資金情報)

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（若手研究 JP19K14610(田島)、特別研究員研究奨励費(PD) JP18J00454(布能))、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（さきがけ JPMJPR2014(田島))、ムーンショット型研究開発事業（JPMJMS2061(田島))、the Foundational Questions Institute Fund, a donor advised fund of Silicon Valley Community Foundation (FQXi-IAF19-06(布能))の助成を受けて実施されました。

### (用語解説)

[1] 白石-齊藤-田崎限界：熱機関のパワーと効率の間で成立するトレードオフ（片方が大きくなると、もう片方が小さくなる関係）を表す定理。

[2] エントロピー：物理学における重要な量の一つで、物の乱雑さを表す指標。

### 【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学（所属）大学院情報理工学研究科

【職名】 助教

【氏名】 田島 裕康

Tel : 042-443-5687 E-Mail : hiroyasu.tajima[at]uec.ac.jp

理化学研究所 開拓研究本部 Nori 理論量子物理研究室

【職名】 特別研究員

【氏名】 布能 謙

<JST 事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

Tel : 03-3512-3526 Fax : 03-3222-2066

E-Mail : presto[at]jst.go.jp

<報道に関すること>

電気通信大学 総務企画課 広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k[at]office.uec.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-Mail : jstkoho[at]jst.go.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

E-Mail : ex-press[at]riken.jp