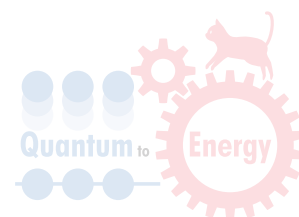
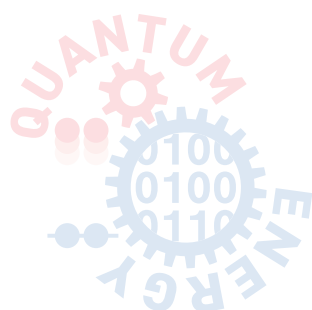
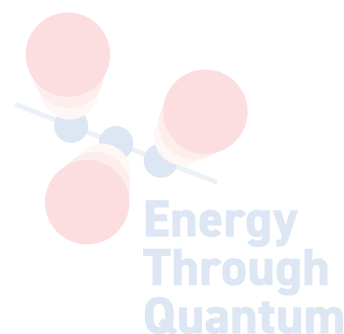
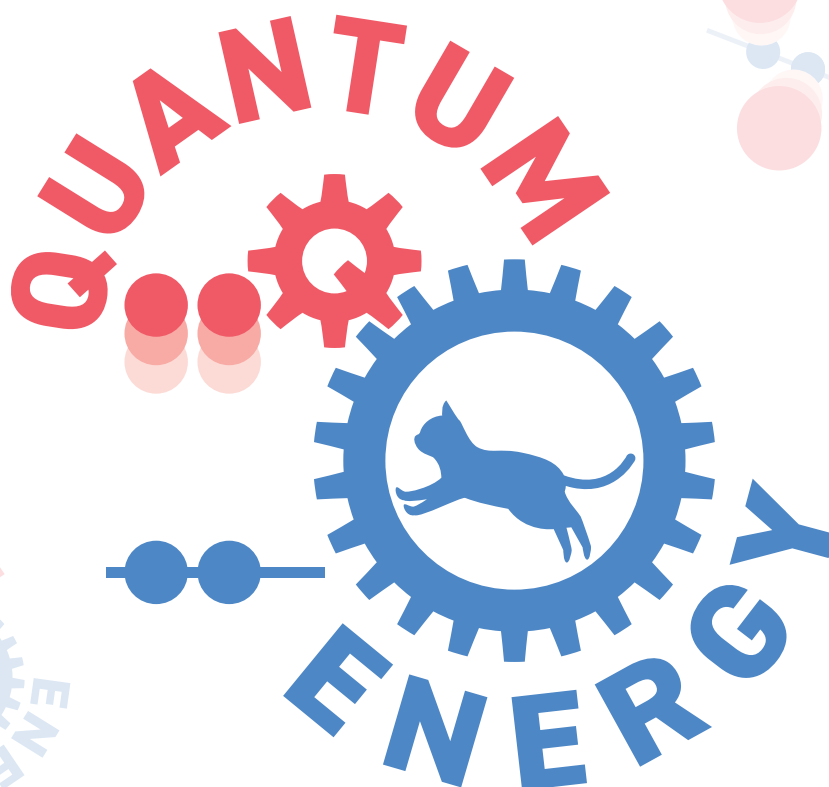




NewsLetter

量子エネルギー革新

01 2025 Apr.



Contents

Overview	Research Outline & Organization
Outline of Each Projects	A01/A02/A03/A04
Conference Reports	Kick-off meeting/long-term-workshop/Research retreat
Research Highlight	Symmetry induced enhancement in finite-time thermodynamic trade-off relations (K Funo)
List of publications/talks	A01/A02/A03/A04

目次 Contents

目次.....	02
代表あいさつ.....	03
領域概要.....	04
計画研究紹介	
A01：量子優位班.....	06
A02：量子実現班.....	07
A03：古典再現班.....	08
A04：量子改善班.....	09
研究会報告.....	10
学術集会報告.....	11
最近の研究から.....	12
お知らせ.....	13
業績一覧.....	14
編集後記.....	18



領域代表

田島 裕康 Tajima Hiroyasu

九州大学 大学院システム情報科学研究所 情報学部門 准教授

エネルギーの生成と消費の釣り合いは、近い将来大きな問題を抱えることが予想されています。IT分野を中心としてエネルギー消費量は指数的な増大を見せている一方、エネルギーの生成原理は蒸気機関の時代から本質的に変化しておらず、線形にしか増大していません。こうしたエネルギー問題を解決し、持続可能社会を実現するためには、エネルギーの生成・利用において、これまでに比較してはるかに性能の良いデバイスを実現する必要があります。

こうした飛躍的な性能向上は、情報処理の分野では、量子情報を鍵として実現しつつあります。ショアの因数分解アルゴリズムに代表される数々の数理的結果が、量子効果を用いることで古典力学に従うデバイスの性能をはるかに上回る量子デバイスを構築できるという「量子優位性」が情報処理分野において成立することを予言しています。もしもこの量子優位性がエネルギーの生成・利用においても実現可能であれば、エネルギー生成の新しい基幹技術を構築する鍵となりえます。しかし、情報処理とエネルギー生成・利用は大きく異なるタスクであり、エネルギーデバイスにおける量子優位性が原理的に成立可能なのか、可能だとしてどのように実現できるかは明らかではありません。

昨年4月に発足しました我々の学術変革領域研究 (B) 「量子効果によるエネルギー生成／利用の革新的効率向上法の開拓と実現」では、この問題に対し、量子情報と、近年熱力学の基礎研究に理論的なブレイクスルーをもたらした「確率的熱力学」を組み合わせることで、量子優位性がエンジンをはじめとしたエネルギーデバイスでも実現することを理論的に確立し、さらに実験室レベルで実証していくこと

を目指しています。具体的な目標としては、①エネルギーデバイスにおける「量子優位性」の概念を理論的に確立し、どのような条件下でどこまでの性能向上が可能であるかを解明すること②理論的に予言された量子エネルギーデバイスの飛躍的な性能強化を実験的に検証し、実証レベルで量子エンジンを実現することを掲げています。

この目標を達成するには、理論面では古典・量子の双方でのマルコフ・非マルコフそれぞれのダイナミクスでの熱力学デバイスの性能限界と、その性能限界に対する量子効果を定量的に評価する手法を確立することが必要です。また、実験面では、超伝導ビット上で有限時間で動作する熱機関を構成し、熱ノイズによって壊れやすい量子効果を熱機関の上を実現することが必要となります。このそれぞれに必要な分野横断的な知見を醸成するため、本領域では、各計画班の間で積極的な交流を行うと同時に、外部から定期的に研究者を招くセミナーシリーズを開催しております。また、国内外の研究者への公開のイベントとして、電通大でのキックオフミーティングを開催し、京都での国際会議を共催いたしました。こうした交流の結果、まだ第一年度ですが、領域全体で領域目標に向けていくつかの重要な結果が得られました。本ニュースレターでは、この第一年度の活動・業績の報告と、得られた成果について報告をまいります。

本領域は始まったばかりですが、上記のような研究活動を通じて、「量子エナジー革新」の実現に向けて貢献を行っていきたいと考えております。皆様のお力添えをいただければ幸いです。

領域の全体像

本領域が目標にするのは、熱力学デバイスでのエネルギーの生成・利用の性能を、量子情報的手法で飛躍的に向上させることです。量子情報の分野では、エンタングルメントやコヒーレンスといった量子的な「資源」によってあらわされる量子効果を用いることで計算・通信などの情報処理技術に関する飛躍的な性能向上を実現できることが、理論・実験の双方から確かめられつつあります。もし同様の飛躍的性能向上がエネルギーの生成・利用においても実現可能であれば、エネルギー問題を解決し、持続可能社会の実現に向けた新しい基幹技術を構築する鍵となりうるものが予想されます。しかし、情報処理とエネルギー生成・利用は大きく異なるタスクであり、こうした性能向上が実際に可能なのか、可能だとしてどのように実現できるかは明らかではありません。本領域の目標は、この問題を理論・実験の両面から解決することです。具体的には、量子情報科学と非平衡統計力学の理論・実験手法を利用し、量子計算機が計算において実現するような「古典力学デバイスに比した超効率性の実現（＝量子優位性）」を、エネルギーの生成・消費の両面において確立し、それによる性能向上の限界を見極め、実験室レベルで実際に実現します。

領域の研究体制

本領域の具体的な目標は以下の通りです。

- ・エネルギーが携わる多様なデバイス・対象における量子強化の普遍的手法の確立。
 - ・飛躍的性能強化を示す量子熱機関の実験による実現。
 - ・古典非マルコフ熱機関による量子マルコフ熱機関の飛躍的性能の再現可能性の検証。
 - ・最適性に基づく量子強化の改善と、達成可能な限界の探求。
- これらの目標を達成するために、本領域ではA01からA04まで4つの研究班を立ち上げました。これに総括班を加えた5グループが、本領域の構成班です。それらの間の構造は以下の図のようになります。

X00：総括班

(領域代表：田島裕康)

研究領域全体のマネージメントを行う総括班を設置しています。具体的な活動内容としては、各研究班の研究進捗の管理を行うとともに、国内外の研究者を招いての合同セミナー・合宿などを通して研究領域内での活発な交流の促進を図ります。また、国際会議への参加や領域会議の開催おアウトリーチ活動などを通じて領域内の研究成果を積極的に発信することも行います。





領域概要

A01：量子優位班

(研究代表：田島裕康、研究分担：布能謙)

本A01班の研究のベースにあるのは、班代表および分担が与えた、量子効果を用いることで、熱機関などのエネルギーデバイスを線形オーダーで性能向上し、古典限界を突破できるという結果 (Tajima-Funo PRL2021) です。上記の結果はエネルギーデバイスの効率・パワーのトレードオフに対する「量子優位性」の提案として初めての例ですが、①対象がマルコフな熱機関に限定されていること②より高次オーダーの性能向上の可能性が未開拓であること③提案された量子優位性の達成法は理想化されたモデルであり、より現実的なモデルでの達成可能性は未知数であることの三つの未解決の問題があります。そこで本A01班では、これらの未解決の問題を解決することを目標としています。具体的には、量子効果によるエネルギーデバイスの線形オーダーを超えた性能向上に関する一般論を求めること、非マルコフを含めた熱力学的なデバイスの性能限界の古典・量子での違いの解析、実験的に実現可能かつ量子優位性を示すような量子熱機関モデルの提案の三つを、A02~A04の各班との連携を行いつつ目指しています。

A02：量子実現班

(研究代表：野口篤史、協力：河野信吾)

本A02班では、超伝導量子回路によって熱機関を構成し、古典力学に従う従来の熱機関に対して優位性を持つ量子熱機関の実証を目指しています。超伝導量子回路は、高精度に制御・測定が可能な量子系として、情報熱力学のプラットフォームとして着目されてきました。本A02班では、超伝導量子回路のこの特徴を活かし、その集積性と高精度制御技術をさらに発展させることで、複数の量子ビットが協調して動作する量子熱機関を構成できると考えています。これらの研究を通し、熱機関における量子優位性を評価するとともに、全結合量子回路を用いた量子制御技術を開拓していくことが、本班の目標です。

A03：古典再現班

(研究代表：金澤輝代士、研究分担：Andreas Dechant)

本領域が目指す量子優位性の理論的検証には、古典的な熱力学的デバイスの性能限界の評価が欠かせません。しかし、これまで確率熱力学で性能が評価されてきたのは主としてマルコフ過程に従うデバイスで、非マルコフ過程の熱力学的デバイスの性能限界は明らかになっていません。一方、古典非マルコフ過程においては、班代表の金澤が発展させてきた一般的な解析手法が確立されつつあります。本A03班ではこれを拡張し、古典非マルコフ過程に従う熱機関の性能限界を調べる理論を確立することを目指します。特に、量子重ね合わせによって起こる量子協同現象 (超放射・超吸収) をどの程度非マルコフ効果によって再現できるかを調べていきます。同時に、量子優位班と協力して非マルコフ過程における量子熱力学の枠組みも整備します。

A04：量子改善班

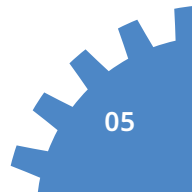
(研究代表：伊藤創祐、研究協力：Artemy Kolchinsky)

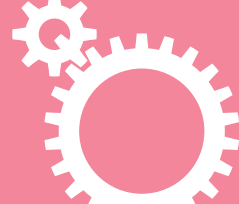
本A04班の代表である伊藤は、最適輸送・情報幾何などの幾何学的手法を用いて、熱力学的トレードオフ関係の最適化を行ってきました。実際、古典系において最適性に基づいた熱力学的トレードオフ関係式は伊藤らによって導出されたものです。TF理論が与える不等式は量子系における熱力学的トレードオフ関係式と呼べる結果なので、伊藤の熱力学的トレードオフ関係を量子拡張するとともに、量子系での幾何学的な最適化手法を開発します。また開発した手法を援用することで、TF理論およびその発展形の改善/最適化を行うことを目指していきます。

領域アドバイザー

より広い視点からのアドバイスのため、関連分野で著名な研究者に領域アドバイザーをお願いしています。

早川尚男 (京都大学)、長岡浩司 (電気通信大学)、
仙場浩一 (東京大学)





研究代表者

田島 裕康 Tajima Hiroyasu

九州大学 大学院システム情報科学研究院 情報学部門 准教授

研究分担者

布能 謙 Funo Ken

東京大学 講師

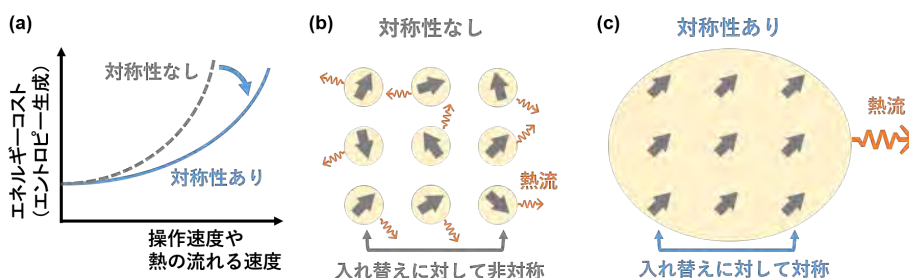


A01班の研究目標は、量子効果による熱力学デバイスの性能向上限界を理解し、さらに実現可能なモデルで古典モデルに比べて大幅な性能向上が実現することを示すことにあります。この目標のためには、①量子効果の元になる量子的な「資源（リソース）」の量をどのように量るか②量子効果によるエネルギーデバイスの性能強化の原理的限界③熱力学的なプロセスを実現する際の実現難易度の評価④実験室レベルで実現しやすい量子強化のモデルの三つを与える必要があります。2024年度には、このうち①～③について、それぞれ具体的な結果を与えました。

まず①について、コヒーレンスの量を定量評価する非対称性のリソース理論において、エンタングルメントエントロピーに該当する量を規定する iid-convertibilityの問題を、コンパクトリー群について完全に解決しました。この結果によって、対称性が支配する状況下でのコヒーレンスを、その対称性がコンパクトリー群で記述できる限り常に定量評価できるようになりました。この結果は、該当のリソース理論において長く未解決問題とされていた Marvian-Spekkens conjecture の解決をコララリーとして含みます。この結果は量子情報の top conference である QIP2025 の talk として採択されました。次に②について、対称性で量

子熱機関の性能をどう強化できるかの原理的限界を与え、粒子数の2乗あるいはそれ以上の仕事率 (=馬力に相当) を実現しつつ、理想効率であるカルノー効率に漸近できることを示しました。この結果は、本研究班の目的の一つである量子効果による熱機関の性能向上の原理的限界の一つの回答を与える、非常に重要な結果です (より詳細は本 newsletter 「最近の研究から」を参照)。この結果は PRL に採択されました。最後に③について、量子熱力学において等温過程の対応物と考えられてきた Gibbs 保存写像の中に、コヒーレンスコストが発散し、実現不可能になるものがあることを示しました。この結果は、Gibbs 保存写像が量子熱力学において自由に行える「free operation」であると考えられてきただけに、重要な意味を持ちます。この結果は QIP2025 の talk として採択されたほか、PRL に採択されました。

④については2024年度中に成果を上げることはできておりませんが、A02班と実験室レベルでの超高性能量子エンジンの実現に向けて活発な議論を行い、予備的な結果が複数得られています。2025年度には、この部分についての成果を報告できるよう、研究に励んでいく予定です。





研究代表者

野口 篤史 Noguchi Atsushi

国立研究開発法人理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チームリーダー

協力者

河野 信吾 Kono Shingo



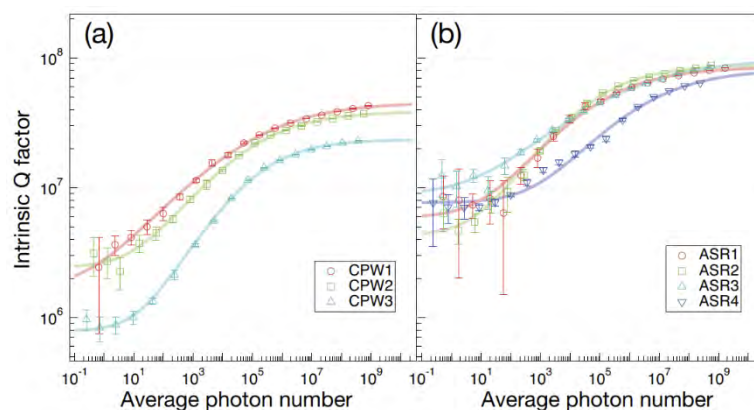
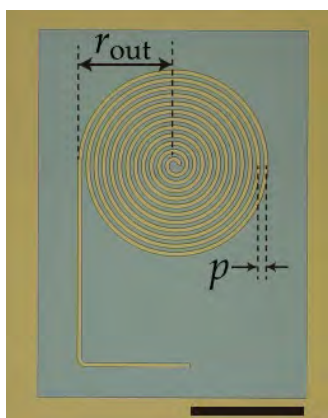
量子もつれを利用した熱機関の高速化

励起状態にある原子は熱浴との相互作用によって自然放出し、光子を放出する。多数の原子が励起状態にあるとき、自然放出はどうなるであろうか。個々の原子は個々に自然放出を起こすように思われるので、単純にその数だけ多くの光子が放出されるように考えられる。しかしながら、もし個々の原子が同じ場所にあって、互いに見分けられないようなときは、多数の原子が協調しながら自然放出する超放射と呼ばれる現象が起きる。これは、見分けられない原子が自然放出することにより、原子間に量子もつれが形成され、この量子もつれ状態が個々の原子に比べて強く熱浴と相互作用するために起きると説明できる。

自然放出のような量子系と熱浴との相互作用を利用して、量子系を用いた熱機関を構成することができる。こうした量子熱機関では、古典力学に基づいた熱機関の限界を超え

ることができることが知られている。近年の量子技術の高まりとともに、こうした実験をおこなうことが可能になってきた。このプロジェクトでは、超伝導量子回路を用いて量子熱機関を実現し、超放射を起こす量子もつれ状態によって熱浴との相互作用を増強し、熱機関の量子加速の観測を目指している。今年度は、この実現のためにキーとなる高Q値の2次元超伝導マイクロ波共振器の開発と量子熱機関として動作する超伝導量子回路の設計をおこなった。

下の図に超伝導共振器の写真を示す。渦巻き状の回路構造が超伝導界面の電場密度を逓減し、損失が見えづらい構造であることを発見し、実際に回路の性能を示すQ値が10,000,000を超える世界一高性能な2次元超伝導マイクロ波共振器の開発に成功した。このマイクロ波共振器内に蓄えられる光子を制御することで、量子熱機関を構成することができる。





研究代表者

金澤 輝代士 Kanazawa Kiyoshi

京都大学 理学研究科 准教授

研究分担者

Andreas Dechant

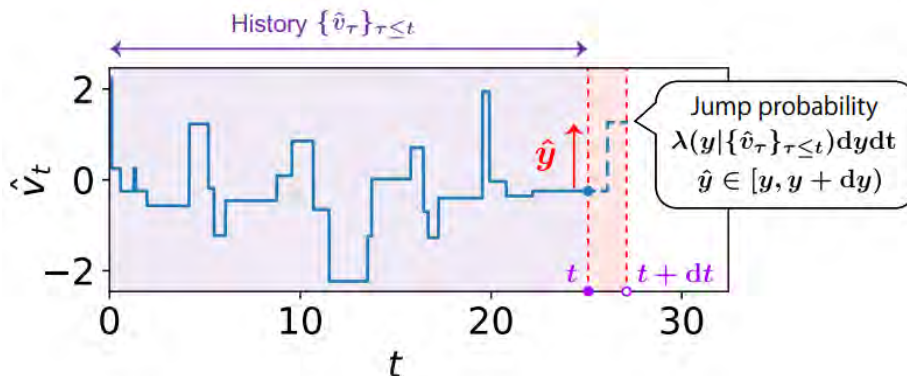
京都大学 講師



A03班の研究目標は非マルコフ古典確率過程の確率熱力学の研究です。非マルコフ古典確率過程とは、強い履歴依存性を持ち、過去の系のパス（下図）に依存した時間発展を示す古典確率過程を指します。このような系に関する確率熱力学はあまり発展しておらず、熱力学限界も明らかになっていません。そこでA03班では一般の非マルコフ古典確率過程に対する確率熱力学を樹立し、そこにおける熱力学限界を明らかにします。本年度はまず、一般の非マルコフジャンプ過程に対するマスター方程式を導出した結果を論文としてまとめました (K. Kanazawa and D. Sornette, Phys. Rev. Res. 6, 023270 (2024))。確率過程における解析計算のツールであるマスター方程式は非マルコフ過程において発達して来ませんでしたが、確率熱力学の定式化においてマスター方程式は主要な役割を果たしてきました。そこで、我々は最初のステップとして、ジャンプ過程に限った任意の非マルコフ系のマスター方程式の標準形を導出しました。具体的には、低次元の非マルコフ過程を高次元のマルコフ過程に変換する技術（マルコフ埋め込み）を発展させることで、場の理論としてのマスター方程式を導出す

ることで問題の解決を図りました。次に、マルコフ埋め込み法の技術を発展させることで、非マルコフジャンプ過程に対する確率熱力学を構築しました（出版準備中）。マルコフ埋め込みの選び方には自由度があり、確率熱力学を構築する上ではフーリエ型の埋め込みが重要であることが明らかになりました。フーリエ型埋め込みを行った時のマスター方程式を導出し、更には詳細つり合い条件、熱力学第一法則・第二法則を定式化することに成功しました。今後はこの枠組みを発展させることで、様々な熱力学不等式を一般の非マルコフ系に対して導出し、どのような熱力学限界が創発するかを研究する予定です。

図の引用元：K. Kanazawa and D. Sornette, “Standard form of master equations for general non-Markovian jump processes: The Laplace-space embedding framework and asymptotic solution”, Physical Review Research 6, 023270 (2024)





研究代表者
伊藤 創祐 Ito Sosuke
 東京大学 大学院理学系研究科 准教授

研究協力者
Artemy Kolchinsky
 スペイン ポンペウ・ファブラ大学



非平衡熱力学におけるダイナミクスと、最適輸送理論や情報幾何などの幾何学との関係が最適性の観点から注目を集めています。古典確率過程のダイナミクスにおいては、これまで熱力学的な散逸と遷移にかかる時間、正確性などの間のトレードオフ関係が最適輸送理論の文脈で議論されてきました。このような幾何学に基づく古典系での非平衡熱力学の理論の拡張の方向性の一つに、量子拡張が挙げられます。量子改善班(A04)は、既存の古典系での熱力学の幾何学的手法を量子系に拡張することや、古典系の熱力学の理論を進展させ量子拡張性を考察することで、古典の非平衡熱力学と量子熱力学を進展させる研究をしています。

本年度は重要な出発点として、古典マルコフ過程(マスター方程式)における最適輸送理論に基づいた幾何学的な熱力学の理論[Yoshimura, K., Kolchinsky, A., Dechant, A., & Ito, S. PRR, 5, 013017 (2023)]の量子拡張に特に取り組みました。マスター方程式における量子対応物はGKSL方程式ですが、このGKSL方程式において同様の理論が成り立つかどうかを考えました。時間依存する密度演算子をス

ベクトル分解すると、GKSL方程式はマスター方程式に形式的に書き直すことができるので、自明な拡張は可能ですが、この場合は量子性が時間変化する基底に覆い隠されてしまいます。そのため我々は量子性が顕に見える形での理論の拡張を模索しました。そして最適輸送理論におけるGKSL方程式での数学的な勾配構造[Mittnenzweig-Mielke, 2017]に着想を得て、熱力学的な力と流れを演算子の形で表現することに成功したことで、エントロピー生成率の最適輸送理論的な幾何学的な表現を古典系と平行な形で導入できました[K. Yoshimura, Y. Maekawa, R. Nagayama & S. Ito, Phys. Rev. Res. 7, 013244 (2025)]。またその幾何学的な表現に基づいて量子系での熱力学的なトレードオフ関係や散逸の維持過剰分解を導出し、量子性と古典性を区別可能な形で古典系の結果を量子拡張することに成功しました。他にも古典系での情報幾何に基づいた定式化、トレードオフに関する種々の結果の発展、古典系での実験、脳解析への応用、機械学習への応用の研究も行っています。

GKSL方程式

$$\frac{d\rho}{dt} = -i[H, \rho] + \mathcal{D}(\rho)$$

$$\mathcal{D}(\rho) = \sum_k \gamma_k \left(L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho\} \right)$$

$$L = \bigoplus_{k \in K} \begin{pmatrix} 0 & L_k^\dagger \\ L_k & 0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \bigoplus_{k \in K} \begin{pmatrix} \gamma_k/2 & 0 \\ 0 & -\gamma_k/2 \end{pmatrix}$$

(最適輸送理論に基づく)勾配構造

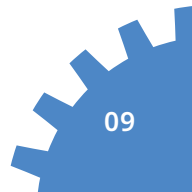
$$\nabla_L A := [(I_h \otimes A), L], L = \bigoplus_{k \in K} \begin{pmatrix} 0 & [A, L_k^\dagger] \\ [A, L_k] & 0 \end{pmatrix}, \quad \nabla_L^\dagger B = \text{tr}_h[B, L]$$

	Classical	Quantum
Gradient	∇	∇_L
Continuity	$dx/dt = \nabla^T J(x)$	$\mathcal{D}(\rho) = \nabla_L^\dagger J(\rho)$
Current	$J_c = J_c^+ - J_c^-$	$J(\rho) = [L, \Gamma \otimes \rho]$
Force	$F_c = \ln(J_c^+ / J_c^-)$	$F(\rho) = [L, \ln(\Gamma \otimes \rho)]$
Conservative	$F^* = -\nabla \phi$	$F(\rho) = -\nabla_L \phi$
Detailed balance	$J(x^{**}) = 0$	$J(\rho^{**}) = 0$
EPR	$J^T F$	$\text{tr}(J(\rho) F(\rho))$

熱力学的速度限界
熱力学的不確定性関係
維持過剰分解

←

古典-量子対応



KICK-OFF MEETING プログラム 2024年5月27日 (月) 電気通信大学

本領域発足間もない2024年5月27日に、電気通信大学にてキックオフミーティングを開催しました。本ミーティングでは4つあるすべての計画研究グループが、今後の研究計画とその前提となるこれまでの研究成果に関して、質疑応答を取り入れながらプレゼンを行いました。講演者は田島裕康（領域代表、A01班代表：電通大）、布能謙（A01班分担：東大）、野口篤史（A02班代表：東大）、金澤輝代士（A03班代表：京大）、Andreas Dechant（A03班分担：京大）、伊藤創佑（A04班代表：東大）でした（敬称略）。また、会議の最後には領域アドバイザーとして参加された、早川尚男先生、長岡浩司先生、仙場浩一先生の三名から、それぞれの専門の観点から意見の提案がなされました。この研究会はオープンな会として開催し、本領域の研究代表者および研究分担者に加え、外部からの参加者を広く募り、当日は80名以上の出席者が参加する会となりました。会議の後には懇親会も開催し、会議の講演内容について多数の議論が行われ、夜まで非常に活発な質疑・討論が行われました。

Long-term 国際ワークショップ Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024 (共催) 2024年7月8日 (月)～7月19日 (金) 京都大学基礎物理学研究所

2024年7月に、京都大学において、国際会議を共催の形で開催いたしました。本会議は、非平衡統計力学の国内外の先進的な研究成果を相互に発信・共有することを目的とし、各国から著名な研究者を招待して開催をしました。本会議は滞在型研究会と呼ばれるスタイルで、講演は午前中のみ、午後は議論とポスターセッション、懇親会のみを開くことで議論の時間を多くとるスケジュールで開催されることが特徴で、100名を超える参加者の間で非常に活発な

情報交換と共同研究が行われました。

この会議において本領域の参加の仕方は共催で、主宰ではありませんでしたが、京都大学を主体とする organizing committee との連携の下、招待講演者の選定や司会の協力など、運営の協力を努めました。この過程において、国際会議の運営に必要な実践的な経験を積むことができ、2025年度に予定されている国際会議主催に向けた貴重な知見を獲得する結果となりました。以上の成果を踏まえ、今回の国際会議運営を通じて得た経験は、今後の国際交流および会議開催の基盤強化に大いに寄与すると考えております。

ERATO・学変B 合同合宿会議 2025年3月26日 (水)～28日 (金) ふくしま磐梯熱海温泉ホテル華の湯

ERATO 沙川情報エネルギー変換プロジェクトとともに、2025年3月26日から28日の3日間で合同合宿を開催しました（会場：ふくしま 磐梯熱海温泉 ホテル華の湯）。当合宿は本領域の領域会議として開催すると同時に、ERATO 沙川プロジェクトとの研究成果の共有と意見の交換を目的とするもので、ERATO 沙川プロジェクトと本領域のそれぞれの研究グループの代表および分担者が質疑応答を交えた講演と、それぞれのグループ参加者によるポスター発表が行われました。強風に伴い東北新幹線の運航停止があったものの、合宿全体を通して多数の出席者のもと活発な議論が行われ、それらは深夜までにおよぶ白熱したものとなりました。本領域の今後の研究についても多くの示唆が得られ、これからの研究のさらなる展開が期待されるものとなりました。



学術集会 学変B「量子エネルギー革新」セミナーシリーズ

分野横断的な知見を得るため、また外部との交流のために、定期的に外部からの研究者を招いてセミナーシリーズを開催しております。1~2時間のセミナーの後、ディスカッション、そして共同研究のための議論を行うスタイルで、実際にここから多くの共同研究が始まっております。2024年度に開催されたセミナーシリーズの一覧は以下の通りです。

講演者：David Sivak (サイモン・フレイザー大学)

開催日：2024年7月2日

タイトル：Information arbitrage in molecular machines

講演者：Iman Marvian (デューク大学)

開催日：2024年7月23日

タイトル：From energy-conserving quantum circuits to quantum Fisher information metrics

講演者：星野真宏 (東京大学)

開催日：2024年9月26日

タイトル：Measurement and decoherence in quantum critical states

講演者：Theo Mckeever (マンチェスター大学)

開催日：2024年10月10日

タイトル：A Finite-Time Quantum Heat Engine subject to Control Noise and Enhancement Techniques

講演者：Seok Hyung Lee (蔚山科学技術院)

開催日：2024年10月30日

タイトル：Unique multipartite extension of quantum state over time

講演者：Artemy Kolchinsky (ポンペウ・ファブラ大学)

開催日：2024年11月25日

タイトル：Information bounds on production in replicator systems

講演者：山鹿汐音 (中央大学)

開催日：2025年1月9日

タイトル：量子多体系におけるエンタングルメントアシンメトリーと量子ムベンバ効果

講演者：Satoya Imai (QSTAR, INO-CNR, and LENS)

開催日：2025年2月3日

タイトル：Metrological usefulness of entanglement and nonlinear Hamiltonians

講演者：Jann van der Meer (Kyoto University)

開催日：2025年2月3日

タイトル：Thermodynamic inference beyond lower bounds: Coarse graining in space and time



量子熱力学における対称性の効果

熱デバイスや量子情報処理デバイスでは、いかに高速動作と省エネルギー性を実現するかが重要な目標となる。しかしながら、操作速度を大きくするとエネルギーコストが不可避免的に大きくなり、それらの間には普遍的な熱力学的トレードオフ関係が存在することが近年の微小系の熱力学の進展によって明らかにされてきた (図1(a)参照)。このような熱力学的トレードオフ関係に量子系特有の量子効果がどう寄与するかについても活発に研究が行われており、これまでに古典力学的な熱機関では不可能 [1] とされている、ゼロでない仕事率を發揮しつつ、理想効率であるカルノー効率に近い効率で動作する量子的な熱機関の存在が明らかになってきた [2]。しかし、このような量子効果による性能改善がどの程度まで可能なのかについて、原理的な限界は明らかにされていなかった。

そこで、我々は量子開放系の対称性に基づいた統一的な理論的枠組みを構築することで、熱力学的トレードオフ関係が改善される原理的な限界とその最適な場合を達成する対称性の条件を解析的に求めた [3]。特に、より対称性が高くなるほど、高速動作かつ省エネルギー性を実現できることを示し、実際に量子熱機関へと応用することで、従来の熱機関の仕事率を大幅に超えるような量子熱機関のモデルを構築した (図1参照)。これによって、これまでの「非ゼロの仕事率を持ちつつカルノー効率に近づく」量子熱機関を大きく超え、「粒子数や量子ビット数の2乗～指数乗の仕事率を持ちつつカルノー効率に近づく」量子熱機関の設計原理が明らかになった。本研究で提案された量子熱機関を少数の量子ビットを用いて、実験検証・デモンストレーションを行うための理論提案や、より広範囲の熱デバイスや量子情報処理デバイスへと本研究の理論を発展させていく予定である。

[1] N. Shiraishi, K. Saito, and H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. 117, 190601 (2016).

[2] H. Tajima and K. Funo, Phys. Rev. Lett. 127, 190604 (2021).

[3] K. Funo and H. Tajima, Phys. Rev. Lett. 134, 080401 (2025).

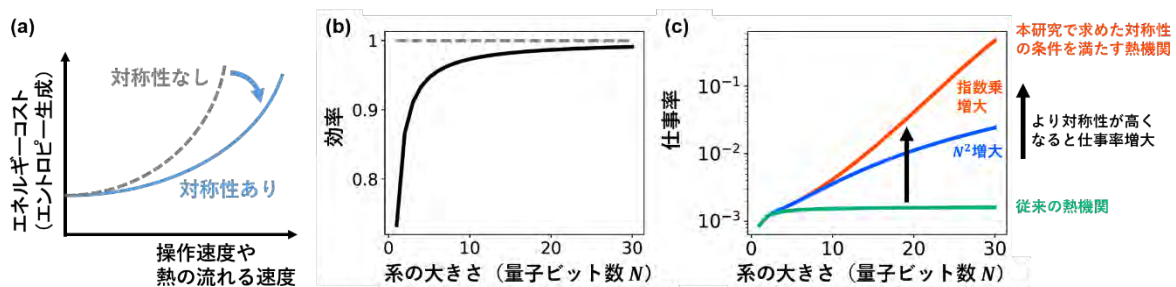


図1 (a) 熱力学的トレードオフ関係と対称性の関係。速度を大きくするとエネルギーコストが不可避免的に大きくなるが、量子開放系が満たす対称性を適切にデザインすることで、対称性がない場合に比べて、より高速動作かつ低いエネルギーコストを実現できる (b) 量子熱機関の効率。量子ビット数が増えるほど、カルノー効率 (灰色の点線) に近づいていく。(c) 量子熱機関の仕事率。量子ビット数を増やした時の仕事率のスケールアップが、従来知られていたモデル (緑色) に対して、本研究で得られた成果を活用すると最大で指数乗の増大が起きる (赤色)。

執筆者紹介

布能 謙 (Ken Funo) 東京大学 大学院工学系研究科

田島 裕康 (Hiroyasu Tajima) 九州大学 大学院システム情報科学研究院 情報学部門 准教授



若手国際ワークショップ

Kyoto workshop on quantum thermodynamics and stochastic thermodynamics 2025

日程：2025年12月予定

場所：京都大学 基礎物理学研究所

概要：近年の物理学の進歩により、量子現象と統計的ゆらぎが共存する微視的スケールでのエネルギー変換を理解する必要性がますます浮き彫りになってきています。量子熱力学は、熱力学の概念を量子の領域に拡張しようとするもので、コヒーレンス、エンタングルメント、量子ゆらぎなどの効果を扱います。一方、確率熱力学は、ランダムな熱揺らぎが支配的な系、特に小規模あるいは非平衡環境におけるエネルギー過程を分析するための枠組みを提供しています。これら2つのアプローチの統合により、量子確率熱力学が急速に台頭しつつあります。

この新たな方向性の交わる場所では「量子効果は熱力学的あるいは情報学的装置の限界をどのように変えるのか？」という基本的な問題に行き着きます。この問いに答えるため、リソース理論、非マルコフ性、最適輸送理論などの豊富な知見が、現在、量子確率熱力学に流入しています。

この会議は、量子確率熱力学の第一人者が一堂に会し、この新しいフロンティアの進展を加速させるような交流を促進することを目的としています。この会議では、活発な交流を深めるため、直接会場にお越しいただく予定です。

A01班

(査読付論文)

- [1] Hiroyasu Tajima and Ryuji Takagi, “Gibbs-preserving operations requiring infinite amount of quantum coherence” , arXiv:2404.03479, (accepted in Phys. Rev. Lett.)
- [2] Ken Funo and Hiroyasu Tajima, “Symmetry Induced Enhancement in Finite-Time Thermodynamic Trade-Off Relations” , Physical Review Letters 134, 080401 (2025).
- [3] Takuya Kamijima, Ken Funo, Takahiro Sagawa, “Finite-time thermodynamic bounds and tradeoff relations for information processing” , arXiv:2409.08606 (accepted in Phys. Rev. Res.)

(プレプリント)

- [4] Satoshi Nakajima and Hiroyasu Tajima, “Speed-accuracy trade-off relations in quantum measurements and computations” , arXiv:2405.15291
- [5] Koji Yamaguchi, Yosuke Mitsuhashi, Tomohiro Shitara, Hiroyasu Tajima, “Quantum geometric tensor determines the iid conversion rate in the resource theory of asymmetry for any compact Lie group” , arXiv:2411.04766
- [6] Takuya Kamijima, Asuka Takatsu, Ken Funo, Takahiro Sagawa, “Optimal Finite-time Maxwell’s Demons in Langevin Systems” , arXiv:2410.11603
- [7] Kotaro Sekiguchi, Satoshi Nakajima, Ken Funo, Hiroyasu Tajima, “Improvement of Speed Limits: Quantum Effect on the Speed in Open Quantum Systems” , arXiv:2410.11604
- [8] Aoi Yamauchi, Rihito Nagase, Kaixin Li, Takahiro Sagawa, and Ken Funo, “Thermodynamic speed limit for non-adiabatic work and its classical-quantum decomposition” , arXiv:2502.19661

(国際会議、招待講演)

- [1] Hiroyasu Tajima “Gibbs-preserving operations requiring infinite amount of quantum coherence,” Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, YITP, Kyoto, Japan July 2024.
- [2] Hiroyasu Tajima “A Universal Constraint on the Reversibility of Quantum Dynamics from Symmetry and Its Applications,” AQIS 2024 Satellite Workshop on Fundamental Aspects of Quantum Information, Hokkaido univ, Hokkaido, Japan August 2024.
- [3] Ken Funo “Dynamics of a quantum system interacting with non-Gaussian baths” , Long-term Workshop on Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, YITP, Kyoto, Japan, July, 2024.
- [4] Ken Funo “Dynamics of a quantum system interacting with non-Gaussian baths: Poisson noise master equation” , RIKEN-KAIST-NCTS Joint Workshop on QIS, KAIST, Korea, October 2024.
- [5] Ken Funo “Quantum advantages in nonequilibrium thermodynamics” , 2025 International Young Researchers Forum on Quantum Information Science, NCKU and Academia Sinica, Tainan, Taiwan, February 2025.

(国際会議、一般講演)

- [6] Hiroyasu Tajima and Ryuji Takagi, “Gibbs-preserving operations requiring infinite amount of quantum coherence” , Quantum Information Processing 2025 (QIP2025) 2025年2月26日
- [7] Koji Yamaguchi, Yosuke Mitsuhashi, Tomohiro Shitara, Hiroyasu Tajima, “Quantum geometric tensor determines the iid conversion rate in the resource theory of asymmetry for any compact Lie group” , Quantum Information Processing 2025 (QIP2025) 2025年2月26日
- [8] Hiroyasu Tajima and Ryuji Takagi, “Gibbs-preserving operations requiring infinite amount of quantum coherence” , Quantum Resources 2025 2025年3月17日

**(国内会議、招待講演)**

[9] 田島裕康, 布能謙 “量子効果によるエネルギー生成・消費の効率向上: 熱力学と量子効果の関係の解明に向けて”, (量子エネルギー革新 キックオフミーティング, 電気通信大学, 2024年5月27日).

[10] 田島裕康 “量子熱力学における対称性の役割——制約・強化・リソース”, ERATO・学術変革B合同会議, 2025年3月28日

(国内会議、一般講演)

[11] 布能謙、田島裕康 「有限時間熱力学トレードオフ関係における対称性の効果」, 日本物理学会第79回年次大会, 領域11, 16aE314-4, 北海道大学 2024年9月

(集中講義)

[12] 田島裕康 「Quantum resource theory and its applications to the quantum gravity」, 東京科学大学 2024年11月19日-22日

(プレスリリース)

[13] 布能謙、田島裕康 「熱力学的トレードオフ関係における対称性の効果を解明——高速動作と省エネ性を両立する熱デバイスの実現に向けて——」 2025年2月28日

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2025-02-28-001>

(報道)

[14] 日経新聞電子版 「東大と電通大、熱力学的トレードオフ関係における対称性の効果を解明」 2025年2月28日

A02班**(プレプリント)**

[1] Enhancing Intrinsic Quality Factors Approaching 10 Million in Superconducting Planar Resonators via Spiral Geometry, Yusuke Tominaga, Shotaro Shirai, Yuji Hishida, Hirotaka Terai, Atsushi Noguchi, arXiv:2502.17901 (2025).

(国際会議、招待講演)

[1] Hybrid technologies with high-performance superconducting circuits, 9th Workshop on Physics between Ecole Normale Superieure and University of Tokyo, 東京大学生産技術研究所, 東京, 2024.12

[2] Hybrid Technologies with Superconducting Circuits, Impurity Spins for Quantum Information Science and Technologies, OIST, 沖縄, 2024.12

[3] Hybrid technologies with high-performance superconducting circuits, 37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 京都ブライトンホテル, 京都, 2024.11

[4] Superconducting ion traps Hybrid Technologies with Superconducting Circuits, Advanced Quantum Technologies for Trapped Ions, OIST, 沖縄, 2024.9

[5] Quantum engine with superconducting qubits, Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, 2024.7

[6] Hybrid Technologies with Superconducting Circuits, Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024, Yayoi Auditorium, Tokyo, 2024.6

(国際会議、一般講演)

[7] Hybrid technologies with high-performance superconducting circuits, QSE Quantum Seminar, EPFL, Swiss, 2025.2

[8] Hybrid Quantum Technologies with High-Performance Superconducting Circuits, RIKEN - LBNL Workshop on Quantum Information Science, UC Berkeley, USA, 2024.9

[9] Hybrid Technologies with Superconducting Circuits, Special Pathfinding Seminar, google quantum ai, USA, 2024.9

(国内会議、招待講演)

[10] 超伝導回路の高性能化とその他量子技術への応用、第72回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「誤り耐性量子コンピュータへの新技術」、東京理科大学、千葉、2025.3

[11] 超伝導回路を使った様々な量子制御技術について、NICT 若手チャレンジラボ研究会、NICT イノベーションセンター、東京、2025.3

[12] 超伝導量子回路の性能向上と集積システムへ、革新的シミュレーション研究センター ワークショップー工学における量子コンピューティングへの期待ー、東京大学生産技術研究所、東京、2024.11

[13] 量子コンピュータ：干渉を使った計算機、アナログかデジタルか、2024年度第1回 TM 研究会、三井住友銀行呉服橋クラブ、東京、2024.4

A03班**(査読付論文)**

[1] Kiyoshi Kanazawa, Didier Sornette, “Standard form of master equations for general non-Markovian jump processes: The Laplace-space embedding framework and asymptotic solution”, Physical Review Research 6, 023270 (2024)

(プレプリント)

[2] “Fundamental limits on nonequilibrium sensing”, A. Dechant and E. Lutz, arXiv 2407.17831 (2024)

(国内会議、一般講演)

[1] 金澤輝代士, 「非マルコフ過程の場のマスター方程式：確率熱力学に向けて」, 量子エネルギー革新 Kick-off meeting, 2024年5月27日

[2] Kiyoshi Kanazawa, “Stochastic thermodynamics for general non-Markovian processes”, Long-term Workshop on Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, 2024年7月18日

[3] Kiyoshi Kanazawa, “Master equations for general non-Markovian processes: the Hawkes process and beyond”, Riken iTHEMS/BDR seminar, 2025年2月5日

[4] 金澤輝代士, “非マルコフジャンプ過程のマスター方程式と詳細釣り合い”, 計測自動制御学会 第12回 制御部門マルチシンポジウム, 2025年3月3日

[5] 金澤輝代士, “非マルコフジャンプ過程の確率熱力学”, 沙川ERATO・田島学変B合宿, 2024年3月28日

[6] Dechant Andreas, “Markovian and non-Markovian stochastic thermodynamics”, 量子エネルギー革新 Kick-off meeting, 2024年5月27日

[7] Dechant Andreas, “Detailed balance and entropy production for non-Markovian diffusions”, 沙川ERATO・田島学変B合宿, 2024年3月28日

A04班**(査読付論文)**

[1] Ryuna Nagayama, Kohei Yoshimura, Sosuke Ito “Infinite variety of thermodynamic speed limits with general activities” to appear in Physical Review Research (2025). arXiv:2412.20690 (pdf) (2024).

[2] Kohei Yoshimura, You Maekawa, Ryuna Nagayama, Sosuke Ito “Force-current structure in Markovian open quantum systems and its applications: geometric housekeeping-excess decomposition and thermodynamic trade-off relations” to appear in Physical Review Research (2025). arXiv:2410.22628 (pdf) (2024).

[3] Daiki Sekizawa, Sosuke Ito, Masafumi Oizumi “Decomposing Thermodynamic Dissipation of Linear Langevin Systems via Oscillatory Modes and Its Application to Neural Dynamics” Physical Review X 14, 041003 (2024). arXiv:2312.03489 (pdf) (2023).

[4] Kohei Yoshimura, Sosuke Ito “Two applications of stochastic thermodynamics to hydrodynamics” Physical Review Research 6, L022057 (2024). arXiv:2305.19519 (pdf) (2023).

**(プレプリント)**

- [5] Shingo Oikawa, Yohei Nakayama, Sosuke Ito, Takahiro Sagawa, Shoichi Toyabe “Experimentally achieving minimal dissipation via thermodynamically optimal transport” arXiv:2503.01200 (pdf) (2025).
- [6] Artemy Kolchinsky, Andreas Dechant, Kohei Yoshimura, Sosuke Ito “Generalized free energy and excess entropy production for active systems” arXiv:2412.08432 (pdf) (2024).
- [7] Naruo Ohga, Hisao Hayakawa, Sosuke Ito “Microscopic theory of Mpemba effects and a no-Mpemba theorem for monotone many-body systems” arXiv:2410.06623 (pdf) (2024).
- [8] Kotaro Ikeda, Tomoya Uda, Daisuke Okanohara, Sosuke Ito “Speed-accuracy trade-off for the diffusion models: Wisdom from nonequilibrium thermodynamics and optimal transport” arXiv:2407.04495 (pdf) (2024).

(国際会議、招待講演)

- [1] Sosuke Ito “Nonequilibrium thermodynamics and optimal transport for diffusion models” DAIKIN International Symposium on Physics of Intelligence 2024, Tokyo, Japan, Nov. 6-8, 2024.
- [2] Sosuke Ito “Minimum Entropy production rate for macroscopic systems” Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems 10th KIAS conference on statistical physics, Seoul, Korea, Jul. 22-25, 2024.
- [3] Sosuke Ito “Optimal transport and thermodynamics for the learning: Application to the diffusion model” Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, Kyoto, Japan, Jul. 1-Aug. 2, 2024.
- [4] Sosuke Ito “Oscillation, relaxation dynamics and thermodynamic bounds” Stochastic Thermodynamics and Computer Science Theory, Santa Fe Institute, United States, Jun. 17-21, 2024.
- [5] Sosuke Ito “Decompositions of the entropy

production rate and its application to thermodynamic trade-off relations and neural dynamics” CSH Workshop: Trade-offs between thermodynamic cost, intelligence, and fitness in living organisms, Complexity Science Hub Vienna, Austria, Mar. 11-12, 2024.

[6] Sosuke Ito “Nonequilibrium thermodynamics based on information geometry” Further Developments of Information Geometry, Tokyo, Japan Mar. 17-21, 2025.

(国内会議、招待講演)

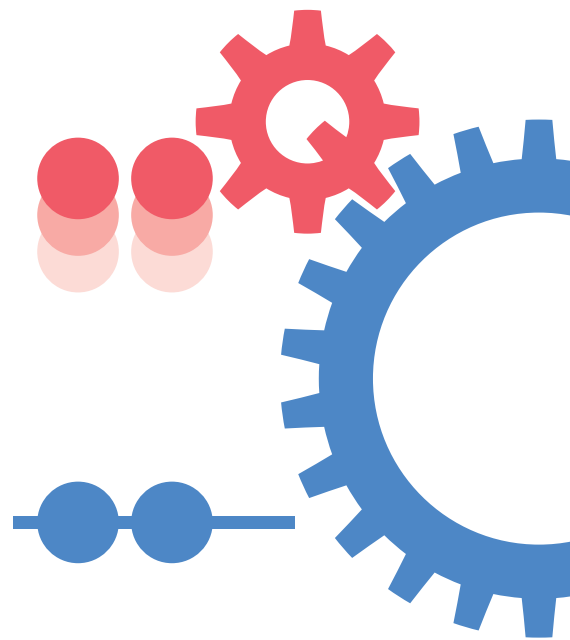
- [7] 伊藤創祐 “最適輸送と非平衡熱力学: 拡散モデルへの応用”, 「学習物理学の創成」領域セミナー, 上智大学, 2025年1月30日
- [8] 伊藤創祐 “非平衡熱力学と最適輸送: 非平衡熱力学の入門から拡散生成モデルでの応用まで”, 計測自動制御学会 DML 研究会, 東京大学, 2024年12月3日.
- [9] 伊藤創祐 “化学反応ネットワーク上の最適輸送と熱力学”, 「物理学・情報科学と生物学」研究会, 京都大学, 2024年7月31日.
- [10] 伊藤創祐 “最適輸送理論に基づく非平衡熱力学の基礎”, ERATO・新学術勉強会, 東京大学, 2024年6月6日.
- [11] 伊藤創祐 “最適輸送に基づいた非平衡熱力学: 量子拡張に向けて”, 量子エネルギー革新 キックオフミーティング, 電気通信大学, 2024年5月27日.
- [12] 伊藤創祐 “生体内での熱力学的散逸による限界”, 東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 A7サブコース 第6回 シンポジウム「生物物理の新展開」, 東京大学, 2024年4月26日.
- [12] 伊藤創祐 “GKSL 方程式における幾何学的な量子熱力学とトレードオフ関係”, ERATO・学術変革 B 合同会議, 2025年3月28日

編集後記

本領域が活動を開始して1年近くが経過いたしました。キックオフミーティングを皮切りに、領域内外の皆様のお力添えもあり、領域全体の研究目標の実現に向けて着実な一歩を踏み出した一年となったと感じております。1年目ながら国際会議の共催にも関わり、研究についての知見を積むことはもちろんとして、運営面においても共催としての実践的な経験を積む貴重な機会となりました。会議全体の進行管理や参加者対応など、実際の運営業務について得られた知見は、来年度に予定されている同様の国際会議開催に向けた大きな財産となると確信しております。

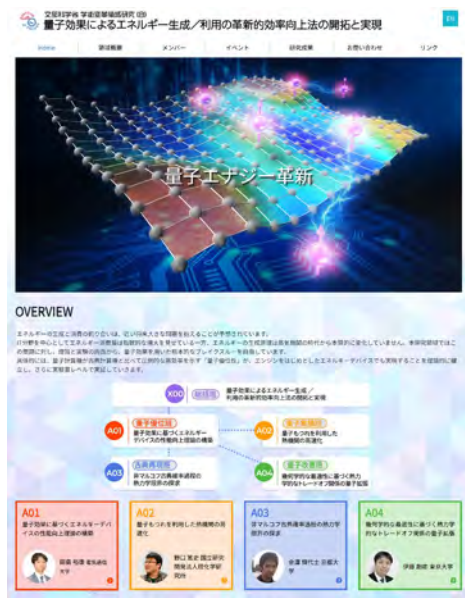
また、ポストコロナ時代に対応し、セミナーシリーズでは対面とオンライン双方の良さを融合した柔軟な運営体制の構築を進めることが出来ました。参加者間で活発な意見交換が行われ、今後の共同研究や学際的連携の可能性が広がる結果となりました。これもひとえに、関係各位の多大なご協力の賜物であり、心より御礼申し上げます。

今後も、学術変革領域Bの活動が分野を超えた交流と革新的研究の場として着実に発展していくことを期待し、次号以降もその成果や展望をお伝えできるよう努めてまいります。(文責：押尾・田島)



領域 web サイト

<https://www.tajima-qi.lab.uec.ac.jp/qe-innovation/>



領域 X アカウント

 @QEInnovation

発行日 ■ 令和7年4月1日 編集 ■ 押尾美穂・田島裕康 Email ■ hiroyasu.tajima@inf.kyushu-u.ac.jp

NewsLetter 01

量子エネルギー革新

2025 Apr.

学術変革領域研究 (B) 量子効果によるエネルギー生成/利用の革新的効率向上法の開拓と実現
Pioneering and realizing innovative methods to improve the efficiency of energy generation / utilization through quantum effects

