

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01827

研究課題名（和文）小規模量子素子回路による情報処理過程の非平衡量子熱統計力学的研究

研究課題名（英文）Nonequilibrium quantum thermodynamics of information processing in small scale quantum device circuits

研究代表者

内海 裕洋（Utsumi, Yasuhiro）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10415094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、小規模量子素子回路の情報処理性能の限界を、最近の確率熱力学的研究の成果である熱力学的不確定性関係、速度限界、揺らぎの定理などを用いて解析し、発熱、計算時間、誤り率を低減する回路やプロトコルを見出すことを目的とし、次の成果等を得た。ブラウン型計算機ではリセットにかかる情報熱力学のコストのみで発熱なく計算できることを示し、計算時間揺らぎの信号雑音比の熱力学的不確定性関係による上界を示した。古典アニーリング計算において、フィッシャー情報計量を用いた誤差の上界を導出した。CMOS・NANDゲートのスイッチに関わる熱力学のコストを、揺らぎの定理を満たす計算の確率熱力学の解析により導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去20年にわたり、確率熱力学の概念に基づいて、メゾスコピック固体量子素子を用いた低温物理分野で、熱・情報・量子に関する非平衡量子熱統計力学的研究が進んできた。また、量子計算機や確率ビット回路など、量子素子を集積した回路の実証も進んでいる。本研究は、量子素子の非平衡統計力学を、情報処理機能を持つ量子素子回路に拡張したという学術的意義がある。現在、半導体集積回路ではリーク電流や情報伝達に伴う発熱が問題となっているが、本研究はそれを回避し、熱揺らぎを利用する可能性を示したという点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study aims to explore the physical limits of the performance of small-scale solid-state quantum nano-device circuits by utilizing recent achievements in stochastic thermodynamics, such as thermodynamic uncertainty relations, speed limits, and fluctuation relations. The goal is to identify circuits and protocols that reduce heat production, computation time, and error rates. The following results were obtained: 1) For Brownian computers, it was shown that calculations can be performed without heat generation, requiring only the thermodynamic cost of resetting. An upper bound on the signal-to-noise ratio of the fluctuating computation time was derived based on the thermodynamic uncertainty relations. 2) An upper bound on errors, expressed using the Fisher information metric, was obtained for classical annealing computation. 3) The thermodynamic cost of the switching for the CMOS NAND gate was derived through the stochastic thermodynamics of computation and the fluctuation theorem.

研究分野：数理物理および物性基礎関連

キーワード：メゾスコピック量子輸送 完全計数統計理論 熱力学的不確定性関係・速度限界 計算機科学 情報量
揺らぎ 非平衡統計力学・揺らぎの定理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体微細加工プロセスルールは nm 領域に達し、リーク電流や情報伝達に伴う発熱が問題となっている。このため熱や量子効果を制御することが重要な課題となっている。過去 20 年間で、メゾスコピック固体量子素子を用いた低温物理分野で、熱・情報・量子に関する研究が深化した。例えば、単一電子トランジスタの揺らぎを測定・制御することで、情報から仕事を取り出すシラード・エンジン [Koski, et al., PNAS 111, 13786 (2014)]等が実現している。これは、固体量子素子が「揺らぎの定理」をはじめとする、揺らぎに基づく現代的な非平衡熱統計力学の研究の舞台に適していることの証でもある。

以上は過去数十年に渡る固体量子素子の作成・観測・制御技術の進歩の賜物である。最近、超伝導量子ビットの品質向上によりその集積化が進み、量子計算機が作成されている。また磁気トンネル接合を用いた確率ビット計算機も試作されている。これらは情報処理能力を持つ制御可能な量子(古典)多体系であり、前者では熱を抑制、後者は熱を利用するという立場から、非平衡量子熱統計力学の研究対象として興味深い。熱・情報・量子のつながりについての研究の歴史は長く、物理学法則が情報処理性能に原理的な制約を与えることが明らかにされてきた。例えば、熱力学により温度 T のもとでメモリ 1 ビットを消去するためには、 $k_B T \ln 2$ の発熱が伴うこと (Landauer 原理。 k_B は Boltzmann 定数) や、計算速度 f 、誤り率 b と発熱 Q の間にはトレードオフの関係 $Q = k_B T \ln(f/b)$ があることが知られている (Feynman Lectures on Computation, 2nd ed. (2023))。また量子効果は、計算時間の下限 $\hbar/(4E)$ ($4E$ は回路エネルギー) を与える (Margorousov-Levitin 速度限界。 \hbar は Planck 定数)。これらは元々、理想化した思考実験から導かれた。近年、確率熱力学分野で熱力学的不確定性関係をはじめとする普遍的な関係式が発見され、それらと関連して理解されるようになってきた。しかし実際の量子素子集積回路に適用した研究はない。

2. 研究の目的

本研究では、具体的な小規模量子素子回路における演算等の情報処理過程について、発熱量、誤り率、計算速度を、最近の確率熱力学的研究の成果である、熱力学的不確定性関係、速度限界、揺らぎの定理を用いて解析する。量子素子回路に対して熱統計力学や量子力学が与える情報処理性能の限界を明らかにすることで、最小発熱・最短計算時間・最小誤り率を実現する回路とプロトコルを見出すことを目的とする。本研究は、代表者と 2 名の分担者の 3 グループで行う。具体的には以下の 3 つの目的を設定して研究を遂行する：「古典計算過程の計算速度分布理論構築」、「古典・量子計算過程の非断熱ダイナミクス理論の構築」、「量子ブラウン型計算理論の構築」

3. 研究の方法

主な研究成果(「4. 研究成果」に例示)で用いた方法は以下である。

- 「古典計算過程の計算速度分布理論構築」：古典マスター方程式に基づく完全計数統計理論を用いる [Y. Utsumi, 'Full counting statistics for the number of electrons in a quantum dot', Phys. Rev. B 75, 035333 (2007)]。確率ペトリネットで記述される多状態マルコフ連鎖の数値シミュレーションには Gillespie アルゴリズムを用いる。
- 「古典・量子計算過程の非断熱ダイナミクス理論の構築」：主に Shortcut to adiabaticity 分野の理論手法を用いる。量子系においてシュレディンガー方程式を用いた理論 (K. Suzuki and K. Takahashi, 'Performance evaluation of adiabatic quantum computation via quantum speed limits and possible applications to many-body systems', Phys. Rev. Res. 2, 032016(R) (2020)) を、古典マスター方程式に拡張する。
- 「量子ブラウン型計算理論の構築」：確率熱力学によりアップデートされた計算の熱力学理論 (D. H. Wolpert, J. Phys. A 52, 193001 (2019)) と、揺らぎの定理とコンシステントな非線形素子の確率熱力学理論 (N. Freitas, et. al., Phys. Rev. X 11, 031064 (2021)) を用いる。CMOS-NAND 回路の数値シミュレーションには Gillespie アルゴリズムを用いる。

4. 研究成果

「古典計算過程の計算速度分布理論構築」における主な成果：

計算機を「自由エネルギーを数学的仕事と排熱に変換する熱機関」と捉えることは、計算の熱力学の根本となるアイデアである (C.H. Bennett, Int. J. Theor. Phys. 21(12), 905-940 (1982))。このアナロジーを定量的に検討した。熱力学では「熱機関」は「熱」を「仕事」に変換し、その効率は取り出す仕事と高熱源から受け取る熱量との比と定義される。この効率について、準静可逆過程で最大(カルノー効率)となる等、普遍的性質が理解されている。一方で計算機は、熱力学的な仕事を取り出すものではなく、性能指数、熱力学的コストについて、動作プロトコルに従った定義が必要である。本研究では以下の関連成果を得た。

・「ブラウン型計算機における計算時間と熱力学的不確定性関係」

本研究では、計算の熱力学における基本的な計算機モデルであるブラウン型計算機に着目する。

とくにトークン・ベースのブラウン型計算機 (Lee, Peper, et al., Int. J. Unconventional Computing, 12, 341 (2016))はトークンとよばれる粒子が3種類の回路素子(図 1上)で構成される回路上をブラウン運動するモデルで、単電子トランジスタや磁気スキルミオンを用いた実証研究が進められている。その動作は、実行したい計算と同等な状態空間の経路を熱運動により探索し、解に対応する状態に到達する(図 1下)というものである。常に正解を与えるが、計算時間(入力状態*i*から出発して出力状態*f*に初めて到達する時間、つまり初到達時間)は実行する毎に異なる。計算時間の期待値は回路素子の物質パラメタで決まるため、重要な性能指数は、「計算がどの程度確実に終了するか?」を測る計算時間揺らぎの信号雑音比である。信号雑音比は、 $\langle A \rangle$ を遷移の回数(アクティビティ)、 $\langle A_{uni} \rangle$ を観測やリセットなど一方向遷移の回数、 $\langle \Sigma_{bi}^{tot} \rangle$ を全エントロピー生成(二方向遷移に伴う環境と系のエントロピー生成)として、熱力学的不確定性関係による不等式

$$\frac{S}{N} \leq \sqrt{\langle A \rangle} \text{ および } \sqrt{\frac{\langle \Sigma_{bi}^{tot} \rangle}{2} + \langle A_{uni} \rangle}$$

を満たす。右辺の前者は kinetic bound、後者は mixed bound と呼ばれる。

ここでは、計算時間の揺らぎ分布を求め、上記のバウンドを解析した。図 2左に半加算器回路を示す。一つの値に対して2つの配線が準備され、どちらにトークンを置くかで、0と1を区別する。真理値表(図 2中上)に示されるように、論理的に非可逆であるため、遷移状態図(図 2中下)のうち、 $1+0=0+1=(0)1$ の計算過程に枝分かれがある。図2右の計算時間分布から、揺らいでいる様子が確認できる。図 3上に4通りの入力における信号雑音比 S/N

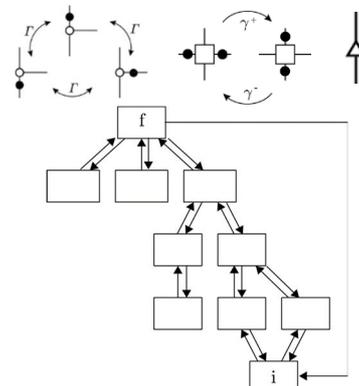


図 1 (上左)Hub: トークン(黒丸)が三差路を熱揺らぎにより探索する。(上中)CJoin: 2トークンの散乱により相関を生み出す。前進と後退の発火レートを γ^+ と γ^- とする。(上右)Ratchet: ダイオード素子。(下)計算+リセット過程の模式図。

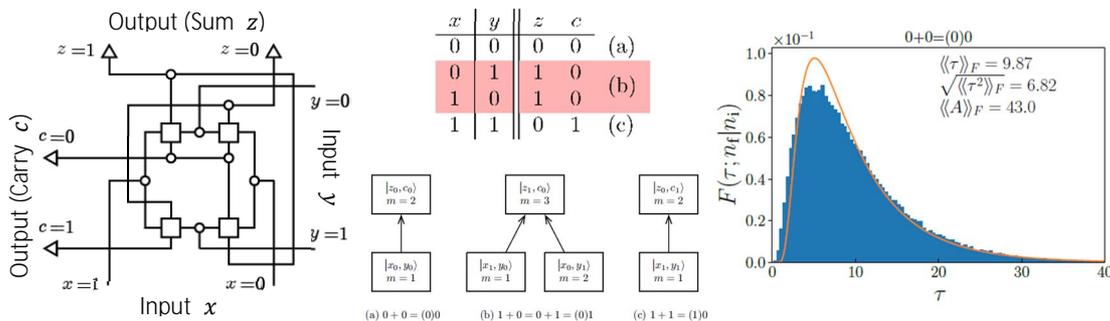


図 2 (左) $x + y = (c)z$ を計算するブラウン型半加算器。(中)真理値表(上図)及び計算過程における遷移状態図(下図)。下のノードが入力論理状態、上のノードが出力論理状態を表す。論理的非可逆性のため枝分かれが現れる。(右) $0+0=(0)0$ 計算時間分布。

を示す。 S/N に対する mixed bound と kinetic bound との比(r_Σ および r_A)は1より小さく、不等式を満たす。また後者 $r_A = (S/N)/\sqrt{\langle A \rangle}$ は小さく、不等式として弱い。図 3下は環境への発熱(エントロピー生成) Σ_{bi}^{env} および全エントロピー生成(Σ_{bi}^{tot})である。CJoinの前進と後退の発火レート(図 1(上中))を同じにすると、発熱が0となる。一方、 $\langle \Sigma_{bi}^{tot} \rangle$ は正であり、熱力学第2法則に反しない。

以上は、Y. Utsumi, Y. Ito, D. Golubev, and F. Peper, Computation time and thermodynamic uncertainty relation of brownian circuits, (2022), arXiv:2205.10735 および国際会議等で報告している。

・ Y. Utsumi, Y. Ito, D. Golubev, F. Peper, "Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits", Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2022 (FQMT'22)

・「リセットの確率熱力学に基づくブラウン型計算機の熱力学的コスト」

本研究では初到達時間+リセット・プロトコルでの情報熱力学的コストの評価を行った。このプロトコルでは入力状態から出発し、揺らぎにより計算状態空間を探索して出力状態に到達した瞬間、始状態にリセットする。ここでは、前進と後退の遷移レートが等しく環境への発熱が0の場合に着目した。リセットに伴うエントロピー生成は、初到達時間 τ におけるリセット直前の状態と始状態の確率 $P_{|\Omega\rangle}(\tau)$ と $P_i(\tau)$ を用いて、 $\Sigma_{uni}^{sys} = \ln(P_{|\Omega\rangle}(\tau)/P_i(\tau))$ と書ける。リセットは系を非平衡状態に駆動するが、通常 $P_{|\Omega\rangle} < P_i$ のためリセット・エントロピーは負であり、リセットにより情報が消去される。これに必要な仕事 $W > -\Sigma_{uni}^{sys}$ を計算コストと解釈する(J. Fuchs, et. al.,

Europhys. Lett. 113(6), 60009 (2016))

リセット・エントロピー $\Sigma_{\text{uni}}^{\text{sys}}$ は、情報理論的な量であり、経路ごとに決まる。ただし、時間依存する存在確率 $P_i(\tau)$ と $P_{|\Omega|}(\tau)$ を得るために、多数のサンプルが必要である。そこで、存在確率の比を、一つの経路におけるリセット直前の状態と始状態における滞在時間 $\tau_{|\Omega|}$ と τ_i の比で置き換え、リセット・エントロピーを $\Sigma_{\text{uni}}^{\text{sys}} \approx \ln(\tau_{|\Omega|}/\tau_i)$ と近似した。この量は経路ごとに簡単に求めることができる。その近似の妥当性を Gillespie アルゴリズムにより数値的に検討した。図 4 左は、リセット・エントロピーの状態空間サイズ $|\Omega|$ 依存性で、その絶対値がサイズに対数的に依存する。図 4 右は近似の結果で、期待値をよく再現する一方、エラーバーによって示される分布の幅に違いがみられる。

対数的依存性は、ランダウア原理からも予想されている (J.D. Norton, Found. Phys. 43(11), 1–27 (2013)) : 始状態ではエントロピーが 0 であるが、計算を進めてゆくと状態空間全体に存在確率が広がりエントロピーが $\ln |\Omega|$ となり、その消去にはコストが必要なためである。ただし、すべての時刻で系のシャノン・エントロピーが $\ln |\Omega|$ よりも小さいことから、この解釈には曖昧さが残る。一方で、リセットを多数繰り返して得られる定常状態分布を用いてリセット・エントロピーがよく近似できることから (図 2 点線) 計算の熱力学的コストは、定常状態を保つためのコストとも解釈できる。以上の成果は以下に発表している。

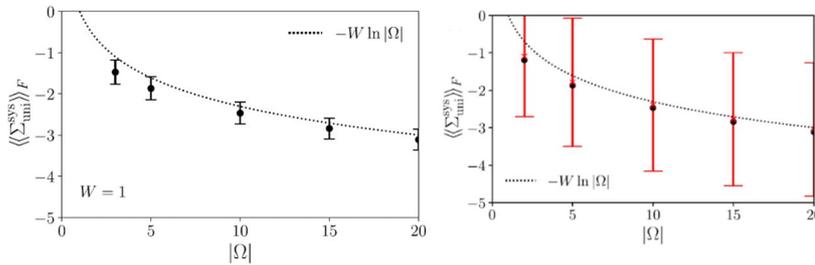


図 4 (左) リセットが一回の場合のリセット・エントロピーの期待値の状態空間サイズ依存性。黒丸は Gillespie アルゴリズムによる結果 (サンプル数 10^5 。エラーバーは標準偏差)。 (右) 近似 $\Sigma_{\text{uni}}^{\text{sys}} \approx \ln(\tau_{|\Omega|}/\tau_i)$ を用いた結果。点線は定常分布確率 $\Sigma_{\text{uni}}^{\text{sys}} \approx \ln(P_{|\Omega|}^{\text{st}}/P_i^{\text{st}})$ を用いた結果 (図は成果論文から引用)。

「古典・量子計算過程の非断熱ダイナミクス理論の構築」

・「一般化された古典速度限界およびその応用」

古典アニーリング計算では、温度を高温から低温に下げて最低エネルギー状態に分布を収束させる。そのダイナミクスは時間依存する古典マスター方程式で記述される。操作が準静的であれば、各時刻において平衡状態 (一般的には定常状態) が実現するが、速く操作すればそれからのずれが大きくなる。誤差は、実際の遷移行列と、各瞬間で定常状態を実現するように counterdiabatic 項を加えた仮想的な遷移行列に従い時間発展する 2 つの分布のトレース距離となる。ここでは、まず一般的に与えられた分布が 2 つの異なる遷移行列で時間発展したとき、速度限界の理論を、量子系の理論 (K. Suzuki and K. Takahashi, Phys. Rev. Res. 2, 032016(R) (2020)) を拡張することで導き、トレース距離の上界が、幾何学的測度で表されることを示した。そして、実際の分布 $p(t)$ と各時刻 t での瞬間定常分布 $p^{\text{st}}(t)$ とのトレース距離について、以下の不等式を得た：

$$D(p(t), p^{\text{st}}(t)) \leq \frac{1}{2} \int_0^t ds \sqrt{J^{\text{st}}(s)}$$

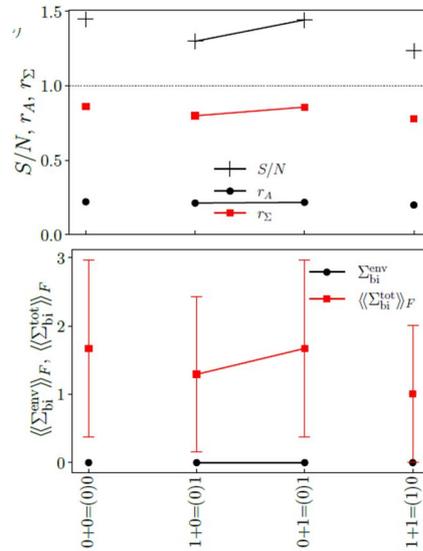


図 3 4 通りの計算過程での (上) 計算時間の信号雑音比と (下) エントロピー生成。

・ Yasuhiro Utsumi, Dmitry S. Golubev, Ferdinando Peper, "Thermodynamic cost of Brownian computers in the stochastic thermodynamics of resetting", The European Physical Journal Special Topics volume 232, 3259–3265 (2023).

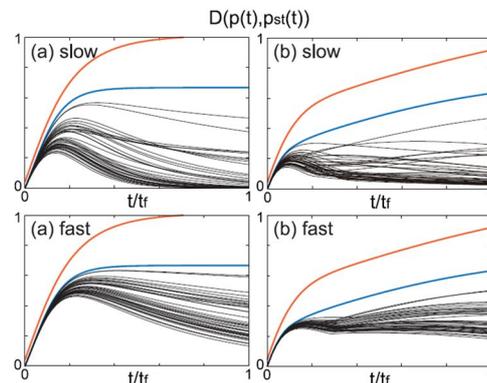


図 アニーリング・プロトコルでの理想的な分布と実際の分布のトレース距離。左が誤差 0 に到達しやすく (「簡単な」問題) 右が到達しにくい (「困難な」問題) に対応する。上がゆっくり、下が早く操作する場合に対応する (図は成果論文から引用)。

ここでフィッシャー情報計量 $J^{st}(t) = \sum_n \dot{p}_n^{st}(t)^2 / p_n^{st}(t)$ は 2 つの似通った分布の違いを測る相対エントロピーであり、情報理論的な意味を持つ。特にアニーリング・プロトコルの場合は、右辺はエネルギーの分散 $\Delta E = \langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle$ の $1/2$ を $\beta(0)$ から $\beta(t)$ まで積分した熱力学的量 ($\beta(t) = 1/(k_B T(t))$ は時刻 t での逆温度) であり、つまり内部エネルギー変化で与えられる。図 1 は 3 状態系を例に遷移行列を変えて駆動した場合の誤差の時間変化である。左が「簡単な」問題、右が「困難な」問題に対応する。赤線が上界であり、時間がたつにつれて距離 1 に飽和する。これは導出の際に無視した緩和効果等を取り入れることで改善できると考えられる。成果は以下に発表している。

・ Kazutaka Takahashi and Yasuhiro Utsumi, “Generalized speed limits for classical stochastic systems and their applications to relaxation, annealing, and pumping processes”, *Physical Review Research* 5, 013217-1-9 (2023).

「量子ブラウン型計算理論の構築」

・「CMOS-NAND ゲートにおける計算の熱力学」

LSI 論理回路では、その端子電圧の高低により 1 と 0 の 2 値情報をエンコードする。シリコン集積回路の回路素子には金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET)、とくに相補型 MOS (CMOS) 回路が使われている。この回路は待機状態で p 型と n 型の MOSFET のどちらかオフであり、高電圧源から低電圧源への散逸電流はない。エネルギー消費は、0 と 1 の切り替え時に起こる。ここでは具体的に CMOS 回路において、論理演算に必要な熱力学的コストを解析した。とくに NAND ゲート (図 1 左) を例にとり、確率熱力学により拡張された計算の熱力学理論における、ランダウアー・コスト、ミスマッチ・コストと残留エントロピーに着目した。また電子数変化が 10 程度の微細領域を対象にして、揺らぎの定理とコンシステントなサブレスショルド領域 MOSFET の確率熱力学を用い、ショットノイズ (非平衡揺らぎ) を熱力学的に正しく扱った。

2 つの入力電圧 $V_{in,A}$ および $V_{in,B}$ は、それぞれ p 型と n 型 MOSFET のゲート端子に印可される。出力電圧 V_{out} は、p 型と n 型 MOSFET がつながるノードにとる。室温では出力端子の電荷 q_{out} および 2 つの n 型 MOSFET に挟まれたノードの電荷 q_{in} が揺らぐ (図 1 中)。図 1 右は、4 通りの入力値に電圧を急激に変化させた後に定常状態に落ち着くまでの論理ミスマッチ・コストの時間変化である。とくに 1 NAND 1=0 演算において、2 つの n 型 MOSFET がオフになるとき、その値が大きくなっている。電圧が小さいため、揺らぎつまり誤差が大きい領域での動作であるが、スイッチ・コストは $10 \sim 100zJ$ 程度と、準静過程で実現されるランダウアー限界 $10k_B T \ln 2 \approx 3zJ$ に近い値にまで抑えられている。以上の成果は以下の論文に発表され、News Comments で解説されている。

・ Daigo Yoshino, and Yasuhiro Tokura, “Thermodynamics of Computation for CMOS NAND Gate”, *Journal of Physical Society Japan* 92, 124004-1-10 (2023), selected as Editors’ Choice.

・ Yasuhiro Utsumi, “Fundamental Energy Costs of Logic Operations in CMOS Circuits” on “Thermodynamics of Computation for CMOS NAND Gate”, *JPSJ News and Comments* 21, 03 (2024).

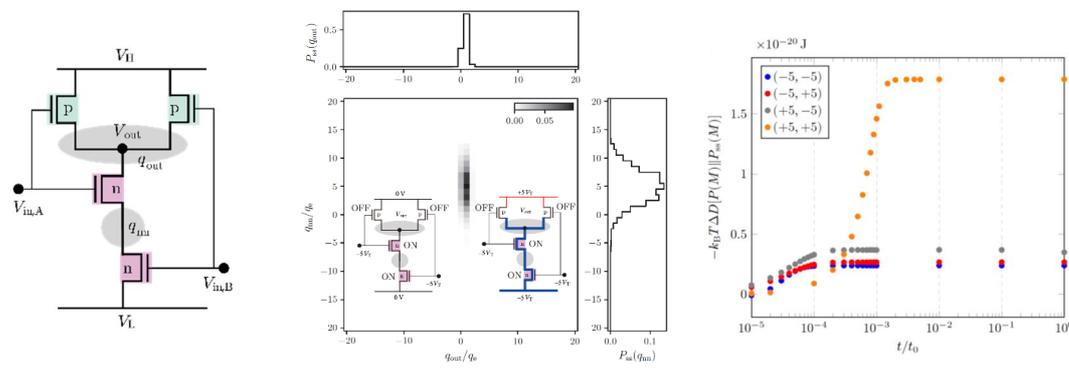


図 1 (左) CMOS-NAND ゲートの回路図。(中) 0 NAND 0 演算時の 2 つのノードの電荷の同時確率分布。(右) 論理ミスマッチ・コストの時間依存性。レジェンドは入力電圧 ($V_{in,A}/V_T, V_{in,B}/V_T$) を示し、正・負の電圧がそれぞれ 1 と 0 に対応する。 $V_T = (k_B T)/e \approx 26\text{mV}$ は室温の熱電圧である。浮遊容量の値は数 fF 程度 (図は成果論文から引用)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Utsumi Yasuhiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Fundamental Energy Costs of Logic Operations in CMOS Circuits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 JPSJ News and Comments	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJNC.21.03	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kato Takemitsu, Utsumi Yasuhiro, Entin-Wohlman Ora, Aharony Amnon	4. 巻 159
2. 論文標題 Electronic and spin states at edges of finite p-orbital helical atomic chain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 244101 -1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0160051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakajima Satoshi, Utsumi Yasuhiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Symmetric-logarithmic-derivative Fisher information for kinetic uncertainty relations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 054136-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physreve.108.054136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Utsumi Yasuhiro, Golubev Dimitry, Peper Ferdinand	4. 巻 232
2. 論文標題 Thermodynamic cost of Brownian computers in the stochastic thermodynamics of resetting	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Special Topics	6. 最初と最後の頁 3259-3265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjs/s11734-023-00981-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inada Akihiro, Eto Mizuki, Isokawa Teijiro, Utsumi Yasuhiro, Nakade Sho, Peper Ferdinand	4. 巻 1443
2. 論文標題 Brownian Circuits: From Computation to Neural Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Intelligent Systems and Computing	6. 最初と最後の頁 23-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-0688-8_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hoernedal Niklas, Carabba Nicoletta, Takahashi Kazutaka, del Campo Adolfo	4. 巻 7
2. 論文標題 Geometric Operator Quantum Speed Limit, Wegner Hamiltonian Flow and Operator Growth	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Quantum	6. 最初と最後の頁 1055 ~ 1055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22331/q-2023-07-11-1055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazutaka, del Campo Adolfo	4. 巻 14
2. 論文標題 Shortcuts to Adiabaticity in Krylov Space	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 011032-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevx.14.011032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazutaka	4. 巻 57
2. 論文標題 Adiabatic theorem for classical stochastic processes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 135002 ~ 135002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ad3189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshino Daigo, Tokura Yasuhiro	4. 巻 92
2. 論文標題 Thermodynamics of Computation for CMOS NAND Gate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124004-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.124004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kamimura Shunsuke, Yoshida Kyo, Tokura Yasuhiro, Matsuzaki Yuichiro	4. 巻 131
2. 論文標題 Universal Scaling Bounds on a Quantum Heat Current	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 090401-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.090401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazutaka	4. 巻 24
2. 論文標題 Quantum lower and upper speed limits using reference evolutions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 065004 ~ 065004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ac7607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazutaka	4. 巻 380
2. 論文標題 Dynamical invariant formalism of shortcuts to adiabaticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20220301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2022.0301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazutaka	4. 巻 380
2. 論文標題 Counterdiabatic driving for periodically driven open quantum systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20210276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2021.0276	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazutaka, Utsumi Yasuhiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Generalized speed limits for classical stochastic systems and their applications to relaxation, annealing, and pumping processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013217-013217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Utsumi Yasuhiro, Kato Takemitsu, Entin Wohlman Ora, Aharony Amnon	4. 巻 62
2. 論文標題 Spin Filtering in a p Orbital Helical Atomic Chain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Israel Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 e202200107-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ijch.202200107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakajima Satoshi, Utsumi Yasuhiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Speed limits of the trace distance for open quantum system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 095004 ~ 095004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ac8eca	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taniguchi Tomohiro, Ogihara Amon, Utsumi Yasuhiro, Tsunegi Sumito	4. 巻 12
2. 論文標題 Spintronic reservoir computing without driving current or magnetic field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10627-10627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-14738-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kamimura Shunsuke, Hakoshima Hideaki, Matsuzaki Yuichiro, Yoshida Kyo, Tokura Yasuhiro	4. 巻 128
2. 論文標題 Quantum-Enhanced Heat Engine Based on Superabsorption	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 180602-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.180602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Tsuyoshi, Tokura Yasuhiro, Kato Takeo	4. 巻 106
2. 論文標題 Heat transport through a two-level system under continuous quantum measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205419-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.205419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ueki Yudai, Kamimura Shunsuke, Matsuzaki Yuichiro, Yoshida Kyo, Tokura Yasuhiro	4. 巻 91
2. 論文標題 Quantum Battery Based on Superabsorption	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124002-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.124002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Nakajima and Yasuhiro Utsumi	4. 巻 104
2. 論文標題 Asymptotic expansion of the solution of the master equation and its application to the speed limit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 054139-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.054139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Hatano, Toshihiro Kubo, Shinichi Amaha, Yasuhiro Tokura and Seigo Tarucha	4. 巻 14
2. 論文標題 Coexistence of parallel and series current paths in parallel-coupled double quantum dots in nonlinear transport regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 105001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac25c5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Pablo Bayona-Pena and Kazutaka Takahashi	4. 巻 104
2. 論文標題 Thermodynamics of a continuous quantum heat engine: Interplay between population and coherence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 042203-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.042203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazutaka Takahashi	4. 巻 91
2. 論文標題 Bifurcation-based quantum annealing with nested spins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044003-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.044003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Yoshida and Kazutaka Takahashi	4. 巻 105
2. 論文標題 Dynamical Lee-Yang zeros for continuous-time and discrete-time stochastic processes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 024133-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.024133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Utsumi Yasuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Fluctuation of information content and the optimum capacity for bosonic transport	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Special Topics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjs/s11734-021-00074-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Utsumi Yasuhiro, Entin-Wohlman Ora, Aharony Amnon	4. 巻 102
2. 論文標題 Spin selectivity through time-reversal symmetric helical junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.035445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hatomura Takuya, Takahashi Kazutaka	4. 巻 103
2. 論文標題 Controlling and exploring quantum systems by algebraic expression of adiabatic gauge potential	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 012220-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.012220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Entin-Wohlman Ora, Aharony Amnon, Utsumi Yasuhiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Comment on "Spin-orbit interaction and spin selectivity for tunneling electron transfer in DNA"	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 077401-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.077401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 鳩村拓矢、高橋和孝	4. 巻 76-05
2. 論文標題 断熱ショートカットとダイナミクスの構造	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 270-277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 加藤健晃, 内海裕洋, Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman
2. 発表標題 CISS効果により有限分子鎖両端で誘起される電子状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takemitsu Kato, Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 Analysis of electronic states at the ends of a finite chiral molecular chain
3. 学会等名 MRM2023/IUMRS-ICA2023, 京都 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤健晃, 内海裕洋, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 有限カイラル分子鎖の端における電子状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内海裕洋, Jukka P. Pekola, Dmitry S. Golubev
2. 発表標題 超伝導単一電子ターンスタイル素子の完全計数統計と運動論的不確定性関係
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 2023年
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuhiro Utsumi, Yasuchika Ito, Dmitry Golubev, Ferdinand Peper
2. 発表標題 Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28, 東京 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takemitsu Kato, Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 Spin-filtering in a p-orbital Helical Atomic Chain
3. 学会等名 Gordon Research Conference (Electron Spin Interactions with Chiral Molecules and Materials), New Hampshire, United States (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村俊介、吉田恭、都倉康弘
2. 発表標題 Universal scaling bounds on a quantum heat current
3. 学会等名 12th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence effect and Quantum Information, 那須 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Kanimura, H. Hakoshima, Y. Matsuzaki, K. Yoshida, Y. Tokura
2. 発表標題 Quantum enhanced heat engine by superabsorption
3. 学会等名 APS March meeting 2024, Minneapolis, USA (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤健晃, 内海裕洋, Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman
2. 発表標題 CISS効果により有限分子鎖両端で誘起される電子状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤 健晃, 内海裕洋, Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman
2. 発表標題 CISS効果により有限分子鎖両端で誘起される電子状態の解析
3. 学会等名 ISSPワークショップ「カイラル物質科学の新展開」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中嶋慧, 内海裕洋
2. 発表標題 量子開放系におけるスピード限界：エントロピー生成と相互作用描像でのトレース距離
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤健晃, 内海裕洋, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 カイラル分子の螺旋対称性とCISS効果
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y Utsumi, Y Ito, D Golubev, F Peper
2. 発表標題 Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits
3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2022 (FQMT'22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海裕洋
2. 発表標題 ブラウニアン計算機の計算時間ゆらぎと熱力学的不確定性関係
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Nakajima, Y. Utsumi
2. 発表標題 An asymptotic Expansion of Solution of Master Equation and its Application to Speed Limits
3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies ISNTT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony
2. 発表標題 Spin Selectivity through Time-reversal Symmetric Helical Junctions
3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies ISNTT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋慧, 内海裕洋
2. 発表標題 計算時間と発熱量との関係について：マスター方程式からのアプローチ
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Giorgos Giavaras, Keiji Ono, Yasuhiro Tokura
2. 発表標題 Double quantum dot physics in a Si MOSFET
3. 学会等名 Workshop of Silicon Quantum Electronics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ozawa, K. Yoshida and Y. Tokura
2. 発表標題 Interaction-induced thermodynamics cycle in chiral edge channels
3. 学会等名 Joint Conference: EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 都倉康弘
2. 発表標題 断熱条件近傍の非マルコフ的ポンプ流の特性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ueki, S. Kamimura, Y. Matsuzaki, K. Yoshida, and Y. Tokura
2. 発表標題 Quantum Battery with Superabsorption Quantum Heat Engine
3. 学会等名 ISNTT2021 Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kamimura, H. Hakoshima, Y. Matsuzaki, K. Yoshida, and Y. Tokura
2. 発表標題 Quantum Enhanced Heat Engine by Superabsorption
3. 学会等名 ISNTT2021 Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hayashi, Y. Tokura, and K. Nishiguchi
2. 発表標題 Temperature Dependence of Low-frequency Capacitance Due to Variable-range Hopping
3. 学会等名 ISNTT2021 Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Tokura
2. 発表標題 Characteristics of non-adiabatic and non-Markovian pump current
3. 学会等名 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman, Yasuhiro Utsumi
2. 発表標題 Breaking Time-Reversal Symmetry and Spin Selection in chiral molecules
3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 Spin selectivity through time-reversal symmetric helical junctions
3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村俊介、箱嶋秀昭、松崎雄一郎、吉田恭、都倉康弘
2. 発表標題 超吸収量子熱機関とその実装に向けた理論・数値解析
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植木雄大、上村俊介、松崎雄一郎、吉田恭、都倉康弘
2. 発表標題 超吸収量子熱機関を用いた、量子バッテリー
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤康親, 内海裕洋, Ferdinand Peper
2. 発表標題 ブラウニアン加算器の計算時間分布
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 Chirality induced spin selectivity through time-reversal symmetric helical molecular junctions
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内海裕洋, O. Entin-Wohlman, A. Aharony
2. 発表標題 時間反転対称ならせん分子接合におけるスピンフィルター
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高瀬恵子, 内海裕洋
2. 発表標題 量子ドットのsuper-Poissonian shot noiseにおけるスピン・フリップ効果を取り入れた解析解導出と数値計算マッピング
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺谷義道, 内海裕洋, Dmitry S. Golubev
2. 発表標題 数値くりこみ群によるボゾンの粒子浴に接続された超伝導量子ビットの解析
3. 学会等名 日本物理学会大76回年次大会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村俊介, 箱嶋秀昭, 松崎雄一郎, 吉田恭, 都倉康弘
2. 発表標題 超吸収現象を用いた量子熱機関
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高橋和孝	4. 発行年 2023年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 496
3. 書名 熱力学・統計力学 熱をめぐる諸相 (KS物理専門書)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	都倉 康弘 (Tokura Yasuhiro) (20393788)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	
研究 分担者	高橋 和孝 (Takahashi Kazutaka) (70415214)	三重大学・工学研究科・特任准教授(研究担当) (14101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------