

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05575

研究課題名（和文）メゾスコピック量子導体における情報流・熱流・電流のゆらぎ

研究課題名（英文）Fluctuations of information, heat and charge currents

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） 3,500,000 円

研究成果の概要（和文）：メゾスコピック2端子量子導体を対象に、情報エントロピー流揺らぎ、電流揺らぎおよび熱流揺らぎの相関を研究した。片側の電極が受け取る情報エントロピーの揺らぎの分布を計算する理論を構築し、次の成果を得た。情報エントロピー流揺らぎと電流揺らぎの同時確率分布を計算し、電流測定をすればエンタングルメント（量子もつれ）を評価できる場合があることを示した。量子導体を通信路として情報を伝達したとき、最大となる通信路容量を計算した。通信路容量と非平衡定常状態におけるエンタングルメント・エントロピーとの関係を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メゾスコピック量子系の研究は、現在まで主に単一の固体量子素子で実現される新規な量子現象について、物性物理的または非平衡統計力学的な観点を中心に行われてきた。本研究成果は、情報理論の枠組みを用いて固体量子素子における量子輸送現象を解析し、情報処理素子としての観点から研究する手がかりを与えるものである。将来的に固体量子素子による情報処理装置の研究に発展させるうえで、一つの指針となりえるという学術的意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：We have investigated correlations among fluctuations of information entropy current, electric charge current and heat current flowing through a two terminal quantum conductor. We developed a framework to calculate the probability distribution of fluctuations of information entropy received by one terminal and obtained the following results. 1) By analyzing the joint probability distribution between the fluctuations of information entropy and electric charge, we demonstrated that the entanglement entropy can be deduced from the electric current measurement for a certain condition. 2) We obtained the communication channel capacity of the information transmission through the quantum conductor. We demonstrated a connection between the optimum channel capacity and the entanglement entropy in the non-equilibrium steady state.

研究分野：数物系科学

キーワード：物性理論 メゾスコピック系 非平衡量子輸送 情報通信 量子ドット 量子エンタングルメント

## 1. 研究開始当初の背景

・本研究課題の申請時における背景：エンタングルメント（量子もつれ）状態は、本質的に量子力学的な非局所相関のある状態であり、量子情報処理を行う上で重要であると考えられている。近年、固体量子素子を用いた量子情報処理の実験的研究が進展している。例えば、超伝導量子ビット集積化がなされ、エンタングルメントを用いた量子誤り訂正が実現している。また、半導体・超伝導複合ナノ構造を用い、量子もつれ状態にある電子対の生成ができるようになった。これらの発展により、固体量子素子で実現されるエンタングルメントが注目されている。メゾスコピック量子導体においては、電極にバイアス電圧 $V$ を印可すれば、量子もつれ状態にある電子・正孔対を生成できることが指摘されている（図1）[C. W. J. Beenakker, “Electron-hole entanglement in the Fermi sea”, in Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi (IOS, Amsterdam, 2006), Vol. 162.]。エンタングルメントの大きさは、もつれた状態にある、空間的に別れた2つの部分系の片方に着目した縮約密度行列について、量子力学的な情報エントロピーである von Neumann エントロピー（エンタングルメント・エントロピー）を計算することで定量化できる。

研究開始当初まで、我々は電流や熱流の確率分布を求める理論（完全計数統計 full-counting statistics）を使い、メゾスコピック量子輸送において、現代的な非平衡統計力学、とくに非平衡状態で厳密に成り立つ「揺らぎの定理」に関する研究を行ってきた。Keldysh Green 関数法に基づく完全計数統計理論と、揺らぎの定理を融合し、Onsager の相反定理を非線形応答領域の非平衡状態へ拡張する等の研究を行ってきた [K. Saito, Y. Utsumi, “Symmetry in Full Counting Statistics, Fluctuation Theorem, and Relations among Nonlinear Transport Coefficients in the Presence of a Magnetic Field”, Phys. Rev. B **78** 115429 (2008)]。

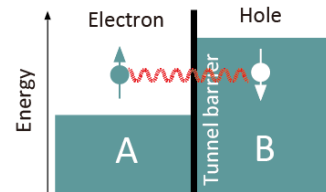


図1) 電圧 $V$ を印加したトンネル接合：電極Bの電子が電極Aにトンネルし、電極Bに正孔を残す。電子と正孔は量子もつれ状態にある。

・本研究課題の申請時における動機：揺らぎの定理を中心とする現代的な非平衡統計力学においては、熱力学的エントロピー、または熱量の揺らぎ分布が重要である。一方、情報理論では、事象 $j$ が起こる確率を $p_j$ としたとき、その事象に伴う自己情報量 $I_j = -\ln p_j$ を導入し、その期待値によって情報エントロピー（Shannon エントロピー）を定義する。自己情報量自体は揺らぐ量であり、熱力学的エントロピーと同様、揺らぎの分布 $P(I) = \sum_j p_j \delta(I - I_j)$ を考えることができる（図2）。エンタングルメント・エントロピーは、部分系の縮約密度行列を用いて定義された自己情報量演算子の期待値である。しかし、その揺らぎの分布に顕に着目した研究はなかった（縮約密度行列の固有値分布（エンタングルメント・スペクトラム）の計算は存在する）。

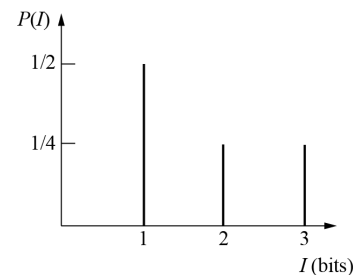


図2) 自己情報量揺らぎ分布の例：事象の生起確率は $\{p_j\} = \{1/2, 1/4, 1/8, 1/8\}$

研究開始当初、我々は、完全計数統計理論の手法を発展させて、情報量の揺らぎ分布を計算する方法を、多重経路 Keldysh Green 関数法に基づき開発し、非平衡定常状態で Rényi エンタングルメント・エントロピーを計算していた[Y. Utsumi, “Full-counting statistics of information content in the presence of Coulomb interaction”, Phys. Rev. B **92** (2015) 165312]。この理論では、部分系の自己情報量（エンタングルメント・エントロピー）と熱力学的エントロピーの揺らぎを同等に扱える。この理論を用いて、自己情報量揺らぎと、非平衡統計力学における熱力学的エントロピー揺らぎとの相関を理解する、というのが本研究課題の申請時における動機である。この理論では、自己情報量の確率分布のフーリエ変換（情報生成関数 information generating function） $\langle \exp(i\xi I) \rangle = \int dI \exp(i\xi I) P(I) = \sum_j p_j^{1-i\xi} = R_{1-i\xi}$  は、 $1-i\xi$  次の Rényi エントロピーと対応する（正確には Rényi エントロピーは $\ln R_M / (1-M)$ である）。これは Rényi エントロピーの一つの意味付けとなっている。また0次の Rényi エントロピーは $\langle e^I \rangle = R_0 = \sum_{p_j \neq 0} 1$ を満たす。この等式は、非平衡統計力学における普遍的な関係式である Jarzynski 等式に相当すると解釈できる。

## 2. 研究の目的

エンタングルメント・エントロピーを実験で測定することは難しい。本研究は、測定可能な物理量、とくに熱流や電流の測定値から、エンタングルメント・エントロピーの大きさを評価する方法を見出すことを目的とした。また微視的可逆性を考慮することで、「揺らぎの定理」を情報流（エンタングルメント・エントロピーの時間変化）を取り入れた形に拡張することを研究開始当初の目的とした。メゾスコピック量子系においては、非平衡近藤効果や量子ホール効果といった、単一の固体量子素子で実現される新規物性に関する、物性物理・非平衡統計力学

的観点からの研究が進んできた。しかし、情報処理素子としての観点からの研究はあまりなされておらず、まず情報理論の枠組を使い量子輸送を解析することを目的として取り組んだ。以下の2論文を成果を中心に説明する

(参考: <https://meetings.aps.org/Meeting/MAR19/Session/C27.7>)。

「情報エントロピー流揺らぎと電流揺らぎの同時確率分布の理論 Yasuhiro Utsumi, "Full counting statistics of information content and particle number", Physical Review B 96, 085304 (2017) [18pages] DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.085304>」における研究の目的:

2端子量子ドット(図3(a))を対象に、1つの電極の情報エントロピー流の揺らぎと電流の揺らぎの同時確率分布を計算する手法を構築し、その相関を明らかにすることを目的とした。量子導体を部分系AおよびBに分割する(図3(a))。初状態では部分系AとBは分離されており、それぞれが平衡状態にあるとする。時刻 $t=0$ に、2つの部分系を結合させると、部分系の間を電子が移動することで、部分系の上にエンタングルメントが生成する。観測時間 $\tau$ 後まで時間発展させた後、部分系Aに着目した縮約密度行列を使って自己情報量の演算子を定義する。

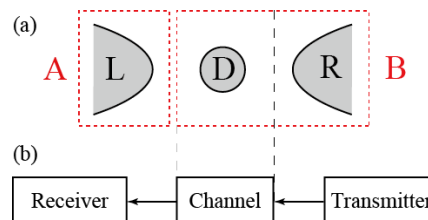


図3) 2端子量子ドット(a)および通信系(b)の模式図。

定常状態では、部分系Aの粒子数が異なる状態の重ね合わせが実現している。ところが、粒子数の異なる状態の重ね合わせは、部分系Aだけで局所的に生成できず、部分系Bの電子のやり取りが必要である。よって部分系Aの粒子数が異なる状態の重ね合わせは、エンタングルメントに寄与しない(局所粒子数超選択 local particle-number super-selection)。実際、粒子数が異なった状態について、縮約密度行列に非対角要素がないこと、つまり異なる粒子数の状態間の混合状態となっていることが、粒子数保存則から示される。実際のエンタングルメント・エントロピーは条件付き自己情報量、 $J = I + \ln P(N_A)$  ( $P(N_A)$ は部分系Aの粒子数が $N_A$ である確率)の期待値となる。論文では、部分系Aの粒子数について測定を行った後の縮約密度行列を用いて、Rényi エンタングルメント・エントロピーを定義し、自己情報量および粒子数の同時確率分布および条件付き自己情報量の分布を調べることを目的とした。

「量子導体を通信路とする情報転送における最大通信路容量の理論 Yasuhiro Utsumi, "Full-counting statistics of information content and heat quantity in the steady state and the optimum capacity", Physical Review B 99, 115310 (2019) [18pages] (Editors' Suggestion) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.115310>」における研究の目的:

通信の問題は情報理論において基本的であり、Shannon による 1948 年の論文「通信の数学的理論」でも主要なテーマとされている。通信系のモデルは送信機(transmitter)、通信路(communication channel)、受信機(receiver)等で構成される(図3(b))。通信系の性能を測る量は通信路容量 $C$  (capacity)であり、単位時間あたりに誤りなく送ることのできる情報量である。この通信路容量は、量子力学等の物理法則によって根本的な制約を受けることが 1960 年代より知られている。情報がフェルミ統計に従う電子により伝達される場合、帯域幅 $B$ 、信号周波数 $f$ かつ信号電力 $P$ の狭帯域量子通信路の最大通信路容量は $C_{NB} = B H_2(P/(hfB))$ となり、2値エントロピー $H_2(p) = -p \ln p - (1-p) \ln(1-p)$ で表される。広帯域量子通信路の最大通信路容量は、信号電力の二乗根に比例し、 $C_{WB} = \sqrt{\pi P/(3 \hbar)}$  となる。これら最大通信路容量は、量子輸送理論によるアプローチ、および量子情報理論によるアプローチを用いて導出されている。前者のアプローチでは、信号電力を熱流として求め、情報流との関係から最大通信路容量と導く。後者のアプローチでは、最大通信路容量は通信路の von Neumann エントロピーの最大値であり、それは信号電力に依存する利用可能なモードの数の分割数となることが示されている。これら異なる2つのアプローチが、同じ結果を導く理由は明らかでない。本研究では情報流と熱流揺らぎの同時確率分布を解析し、2つのアプローチの関係を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

「情報エントロピー流揺らぎと電流揺らぎの同時確率分布の理論」における研究の方法:

微視的なハミルトニアン(2端子量子ドット(図3(a))のハミルトニアン)から出発して Rényi エンタングルメント・エントロピー $R_M$ を計算する。このためにレプリカ法および多重経路 Keldysh グリーン関数の方法を用いた。以下、研究方法を述べる。まず正の整数次 $M$ の Rényi エンタングルメント・エントロピー $R_M$ を、Keldysh 経路を $M$ 個つなげた多重経路(図4)を導入し、Keldysh 分配関数の形で表す。そして Keldysh 分配関数を $2M \times 2M$  Keldysh Green 関数行列を用いて計算する。次にレプリカ空間での周期性に着目し、 $2M \times 2M$  Keldysh Green



関数行列を離散 Fourier 変換し、 $2 \times 2$  Keldysh Green 関数行列に書き直す．この Keldysh Green 関数行列は完全計数統計理論における、1 回測定プロトコルの計数場で修正された  $2 \times 2$  Keldysh Green 関数行列となっている．ただし計数場は離散的であり、コピーされた Keldysh 経路間を移動する粒子を数える役目を果たす．

さらに、粒子数の計数場に依存した位相因子  $\exp(i\lambda/M)$  (図 4 黒丸) を付け加え、部分系 A の粒子数を  $N_A$  に制限した．以上の手続きに従った後、通常の Keldysh Green 関数法の基づく完全計数統計理論の手法を使って、Rényi エンタングルメント・エントロピー  $R_M$  を計算した．

「量子導体を通信路とする情報転送における最大通信路容量の理論」における研究の方法：

「電流と情報エントロピー流の同時確率分布」で説明した研究方法を拡張した．左電極が受信機、量子ドットが量子通信路、右電極が送信機とし (図 3 (b))、送信機側を部分系 A、通信路および受信機を部分系 B に分ける．受信機の熱雑音の影響を除外するため、部分系 A の温度を絶対零度にする．次に、部分系 A における縮約密度行列を、部分系 A のエネルギーを  $\tau P_A$  に固定して計算する．この拘束条件は、エネルギーについての計数場に依存した位相因子 (図 4 黒丸) を付けて加えて取り入れる．

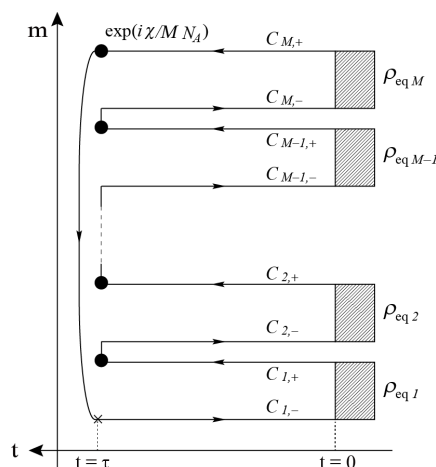


図 4) Keldysh 経路を  $M$  個つなげた多重経路．横軸は時間、時刻  $t = 0$  の斜線の箱は、始状態の密度行列．

#### 4. 研究成果

「情報エントロピー流揺らぎと電流揺らぎの同時確率分布の理論」における主な成果：

- 1 ) 条件付き自己情報量の確率分布を得た．入射電子数が  $N_{\text{att}} = \tau eV/h = 1$  の場合 ( $V$  は印加電圧), 波動関数は、電子が部分系 A にいる状態と部分系 B にいる状態の重ね合わせ  $|1\rangle_A |0\rangle_B + |0\rangle_A |1\rangle_B$  となる (図 5 (a) 挿入図)．この重ね合わせ状態に対する条件付き自己情報量の確率分布は、デルタ分布  $P(J) = \delta(J)$  となる．この結果は 1 粒子の重ね合わせ状態は、量子もつれ状態ではないことを意味する．透過電子数が  $N_{\text{att}} = 2$  の場合、分布は  $P(J) = (T^2 + (1-T)^2)\delta(J) + 2T(1-T)\delta(J - \ln 2)$  となる．右辺第 2 項は、量子もつれ状態 (Einstein-Podolski-Rosen state) が形成されることにより、エンタングルメント・エントロピーが  $\ln 2$  となることを意味している (図 5 (a) 挿入図)．定常状態、つまり観測時間  $\tau$  が十分長く、入射電子数が  $N_{\text{att}} \rightarrow \infty$  となると、利用できるエンタングルメント・エントロピーは電子の透過確率  $T$  および反射確率  $1-T$  で表される 2 値エントロピーの入射電子数倍  $\langle J \rangle = N_{\text{att}} H_2(T)$  に近づく (図 5 (a))．

図 5 (b) は定常状態における条件付き自己情報量の確率分布である．揺らぎの最小値は  $J = 0$  であり、全ての電子が透過または反射する場合に実現される．最確値つまりピーク位置は、利用できるエンタングルメント・エントロピーと一致する．揺らぎによる最大値  $J = N_{\text{att}} \ln 2$  は、半数の電子が透過する場合に実現する．

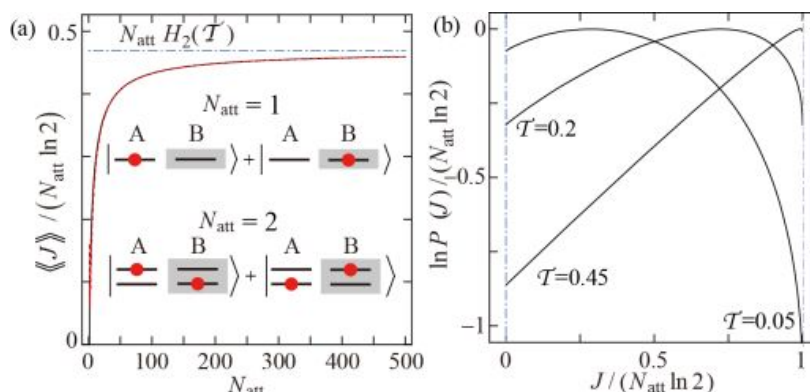


図 5) (a) 条件付き情報量の期待値 (利用できるエンタングルメント・エントロピー) の時間依存性．挿入図は入射電子数が  $N_{\text{att}} = 1$  および  $N_{\text{att}} = 2$  の場合における波動関数．(b) 非平衡定常状態におけるいろいろな透過確率での条件付き自己情報量の確率分布．

- 2 ) 透過率がエネルギーに依存しないとき、透過電子数  $\Delta N_A$  と自己情報量  $I_A$  は線形相関  $I_A = -\Delta N_A \ln T - (N_{\text{att}} - \Delta N_A) \ln(1-T)$  する．これは、電流を測定することでエンタングルメント・エントロピーが求まることを意味する．また情報伝送の効率の確率分布を求め、一つの電子が運ぶことのできる情報量と、その揺らぎのトレードオフを見出した．

「量子導体を通信路とする情報転送における最大通信路容量の理論」における主な成果：

-1) 0 次の Renyi エンタングルメント・エントロピーは分割数となり、量子情報理論のアプローチにおける最大通信路容量を再現することを示した： $R_0 = (\tau P / \hbar^2 \text{の分割数}) = \exp(\tau C)$ 。この関係式は、非平衡熱統計力学における普遍的な関係式である Jarzynski 等式に対応する。最大通信路容量は帯域幅  $B$  が狭い極限では  $C_{NB}$  (図 6 一点鎖線)、広い極限では  $C_{WB}$  (図 6 点線) を再現する。

-2) 狭帯域と広帯域量子通信路において、熱量 (信号エネルギー) と条件付き自己情報量の確率分布の表式を得た。完全透過の場合、確率分布はデルタ分布になる。狭帯域通信路では、最大通信路容量は、利用できるモードに与えられた信号量子を配置する組み合わせの数となり、分布は  $P(J) = \delta(J - \tau C_{NB})$  となる。一方、広帯域通信路では  $P(J) = \delta(J - \tau C_{WB})$  となる。これらは量子輸送理論のアプローチにおける最大通信路容量の結果を再現する。

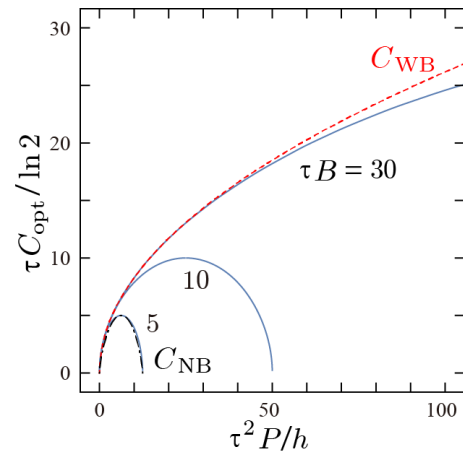


図6) 最大通信路容量の信号電力依存性。

・得られた成果の国内外における位置づけとインパクト：物性物理におけるエンタングルメント・エントロピーに関する国内外の研究の多くは、量子多体効果やトポロジカル状態を量子情報理論を用いて特徴づけるという観点から行われており、エンタングルメント・エントロピーの面積則等の話題が興味の中心である。本研究では、エンタングルメント・エントロピーを、揺らぎを含める形で拡張し、量子輸送における非平衡定常状態に適用した。本成果は、部分系の自己情報量の確率分布を顕に計算することで、大偏差統計理論に基づいた情報理論の考え方を量子輸送理論に導入し、揺らぎの定理を中心とした現代的な非平衡統計力学のアプローチとの共通性を明らかにする試み、という位置づけである。

粒子数・エネルギーについての拘束条件を与えた Rényi エンタングルメント・エントロピーが、自己情報量と粒子数・エネルギーの同時確率分布の特性関数と対応する。粒子数についての拘束条件を与えたエンタングルメント・エントロピーは測定できるため [“Probing entanglement in a many-body-localized system”, Lukin et al., Science 364, 256–260 (2019)], 実験的なインパクトも期待される。

・当初予期していない事象により得られた新たな知見：研究開始当初は、微視的可逆性を考慮することで、「揺らぎの定理」を情報流 (エンタングルメント・エントロピーの時間変化) を取り入れた形に拡張することまでを目的とした。熱量と自己情報量の揺らぎ分布の計算は、この目的達成を目指して行ったが、得られた確率分布が情報理論における通信路容量と関係するという予期しない結果を得た。さらに、「2つの分布がどのくらい近いか？」を測る、相対エントロピーの揺らぎの分布の解析も、この目的達成を目指した計算だが、微視的可逆性より背後にある解析の枠組 (大偏差理論) が、自己情報量分布の理論と揺らぎの定理と類似性の原因であるという知見を得た。

・今後の展望：解析の枠組みである大偏差理論的アプローチに着目することで、相対エントロピー揺らぎの分布を用いて、揺らぎの定理、通信路容量の理論、仮説検定の理論を統一的に捉えることができ、本研究課題の研究手法を固体電子素子温度計の分解能の評価に応用できる。本課題を機課題とする国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (A)) 「ナノスケール量子導体における熱流ゆらぎ測定の理論」 (18KK0385) と関連するものであり、今後、研究を進める。

また経路積分表示による多重経路 Keldysh 法を構築し、フェルミ粒子とボーズ粒子の場合において、Rényi エンタングルメント・エントロピーと完全計数統計理論との関係を示し Yasuhiro Utsumi, “Full counting statistics of information content”, The European Physical Journal Special Topics volume 227, 1911 – 1928 (2019) [DOI: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2018-800043-4>], さらにボーズ粒子が情報伝達を担う場合の最大通信路容量の解析も行っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Utsumi Yasuhiro	4. 巻 227
2. 論文標題 Full counting statistics of information content	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Special Topics	6. 最初と最後の頁 1911-1928
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1140/epjst/e2018-800043-4">https://doi.org/10.1140/epjst/e2018-800043-4</a>	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 Naoki Sasao, Hiroki Okada, Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, and Amnon Aharony	4. 巻 88
2. 論文標題 Spin-Current Induced Mechanical Torque in a Chiral Molecular Junction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 06470-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.064702">https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.064702</a>	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 Y. Utsumi	4. 巻 96
2. 論文標題 Full counting statistics of information content and particle number	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085304-1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.085304">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.085304</a>	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 Philip Wollfarth, Yasuhiro Utsumi, and Alexander Shnirman	4. 巻 96
2. 論文標題 Analysis of the conditional average and conditional variance of dissipated energy in the driven spin-boson model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064302-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064302">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064302</a>	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 Tomohiro Taniguchi, Takahiro Ito, Sumito Tsunegi, Hitoshi Kubota, and Yasuhiro Utsumi	4. 巻 96
2. 論文標題 Relaxation time and critical slowing down of a spin-torque oscillator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024406-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.024406">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.024406</a>	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16件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 井谷大樹, 内海裕洋
2. 発表標題 スピントルク振動器の結合におけるスピン蓄積ダイナミクスの効果
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会 2019年9月10日 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤康親, 内海裕洋, 鈴木義茂
2. 発表標題 ブラウニアン半加算器の計算時間分布
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 2019年9月10日 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内海 裕洋
2. 発表標題 Full-counting statistics of information content and the optimum capacity
3. 学会等名 FQMT19 (Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman, Yasuhiro Utsumi
2. 発表標題 Spin current and torque in chiral molecules
3. 学会等名 Chirality-induced spin selectivity and its related phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内海裕洋
2. 発表標題 Quantum of information and its fluctuations in a conductor heat current; Focus session “Quantum Thermodynamics and Resource Theories”
3. 学会等名 APS (American Physical Society) March Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹尾直希, 岡田大輝, 内海裕洋, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony
2. 発表標題 カイラル分子における伝導電子スピンによって誘起された力学的トルク
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Sasao, H. Okada and Y. Utsumi
2. 発表標題 Spin-current induced mechanical torque in a chiral molecular junction
3. 学会等名 International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science
4. 発表年 2018年



1．発表者名 岡田大輝，内海裕洋
2．発表標題 量子輸送における輸送効率の揺らぎの評価
3．学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4．発表年 2018年

1．発表者名 内海裕洋
2．発表標題 量子ドットの熱量と情報量の同時確率分布
3．学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4．発表年 2018年

1．発表者名 内海裕洋
2．発表標題 情報流および熱流揺らぎの透過率依存性
3．学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会 岩手大学（上田キャンパス）
4．発表年 2017年

1．発表者名 笹尾直希，内海裕洋
2．発表標題 一本鎖DNAのスピン依存伝導の計算
3．学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会 岩手大学（上田キャンパス）
4．発表年 2017年

1. 発表者名 内海裕洋
2. 発表標題 量子ドットの熱流と通信路容量の上限
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会(2018年) 東京理科大 野田キャンパス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田大輝, 内海裕洋
2. 発表標題 量子輸送におけるエクセルギー効率の揺らぎ
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会(2018年) 東京理科大 野田キャンパス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田大輝, 内海裕洋
2. 発表標題 The fluctuation of efficiencies of charge-spin and charge-heat conversions
3. 学会等名 SpinTEC IX, Fukuoka International Congress Center (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Okada
2. 発表標題 Fluctuation of conversion efficiencies between charge, spin, and heat currents
3. 学会等名 YITP (Yukawa Institute for theoretical physics) Workshop, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Utsumi
2. 発表標題 Full-counting statistics of information content
3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT2017) (Prague, Czech Republic) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究協力者	岡田 大輝  (Okada Hiroki)	三重大学  (14101)	
研究協力者	笹尾 直希  (Sasao Naoki)	三重大学  (14101)	
研究協力者	ゴリューベフ ディミトリ  (Golubev Dmitri)	アールト大学	
研究協力者	高橋 和孝  (Takahashi Kazutaka)	東京工業大学  (12608)	
研究協力者	小林 研介  (Kobayashi Kensuke)	大阪大学  (14401)	