

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05796

研究課題名（和文）情報熱力学による生体情報処理の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study on biological information processing based on thermodynamics of information

研究代表者

沙川 貴大（Sagawa, Takahiro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：60610805

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 89,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、生体情報処理に情報熱力学を応用するのみならず、情報幾何やトポロジーの観点を導入しながら、情報熱力学の理論そのものを拡張することであった。その結果として、主として以下の成果を得た。まず、熱力学不確定性関係を短時間領域で定式化することで、生体情報処理の実データに適用可能なエントロピー生成の推定手法を確立した。また、情報幾何や最適輸送の観点から、確率過程や化学反応系における有限時間の熱力学についての様々な成果を得た。たとえば熱力学不確定性関係とクラメル・ラオ境界の関係を明らかにした。さらに非線形系や確率過程に特有のトポロジカル現象を見出し、その一般理論を構築することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果の学術的意義は、まず基礎物理の観点から情報熱力学の理論そのものを拡張し、新奇性の高い理論を構築したことである。情報幾何や最適輸送理論といった数理的な概念を取り入れることで、有限時間の熱力学についての新たな理論体系を構築した。さらにトポロジーについては、これまでほとんど研究されていなかった非線形系や確率過程にトポロジーの概念を拡張することに成功した。これらの成果は、生体情報処理におけるエントロピーの計測や、生体情報処理の頑健さの起源を明らかにするための基礎となるものである。また、アウトリーチや教科書の執筆を通して、研究分野の意義と展望について社会に広く発信することもできた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is not only to apply information thermodynamics to biological information processing, but also to extend the theory of information thermodynamics itself by introducing the perspectives of information geometry and topology. As a result, the following results have been obtained. First, by formulating the thermodynamic uncertainty relation in the short time limit, we established a method for estimating entropy generation that can be applied to real data in biological information processing. We also obtained various results on finite-time thermodynamics for stochastic processes and chemical reactions from the viewpoint of information geometry and optimal transport. For example, we revealed a fundamental relationship between the thermodynamic uncertainty relation and the Cramer-Rao bound. Furthermore, we found topological phenomena inherent to nonlinear systems and stochastic processes, and succeeded in constructing general theories of these phenomena.

研究分野：統計物理学

キーワード：情報熱力学 ゆらぎの熱力学 生体情報処理 情報幾何 最適輸送 トポロジー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

情報熱力学は、従来の熱力学に情報の概念を導入した物理理論である。熱力学量と情報を対等に扱う形に拡張された熱力学第二法則によって、情報処理に要するエネルギーコスト(仕事)の原理的な限界が明らかになった。最近になって、情報熱力学の生体情報処理への応用が活発になされるようになっており、生命システムの設計原理の解明に寄与することが期待されている。このような研究においては、生体情報処理の従来の意味でのエネルギー的効率(熱効率)が研究の対象になってきた。しかし実際の生命現象においては進化の過程で、エネルギー効率だけでなく、情報処理の正確性や速度、さらに頑健性など、複合的な最適化がなされているのではないかと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、情報熱力学に基づいて生体情報処理の理論的研究を行うとともに、情報熱力学の理論そのものを拡張することを目的とした。具体的には、情報幾何、リソース理論、トポロジーといった数理的な手法を活用する。とくに、情報幾何を用いて、熱効率と情報処理の速度や頑健性など、複数の最適性の指標の間の普遍的なトレードオフ関係を系統的に導く基礎理論を確立し、その生体システムにおける役割を明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

様々な系に共通した数理・物理を明らかにするために、まず情報幾何と呼ばれる枠組みに着目した。情報幾何とは、微分幾何学を用いた情報理論の定式化であり、情報理論や学習理論の諸概念を統一的に捉える理論体系である。情報幾何の手法を用いることで、上記のトレードオフ関係を情報理論の観点から幾何学的に捉えることが可能になる。そして、適切に定義された効率が高くなる条件や、複数のトレードオフ関係の間のヒエラルキーが明らかになると期待できる。関連して、熱力学不確定性関係や最適輸送理論と呼ばれる数理的枠組みを応用して、熱力学的コストの最適化について研究を行う。また本研究では、トポロジーなどの更に幅広い数理的概念によって、少ない散逸での情報処理を可能にするメカニズムを解明することを目指す。

### 4. 研究成果

本研究では、おおむね当初計画通りに研究を進めて多くの論文を出版できたが、とくに最適輸送理論やトポロジーに関連した一般理論の構築については当初の期待を大きく上回る成果を得ることが出来た。また、教科書の執筆を通して、新たな学術領域を広く展開していくための基盤とすることができた。以下では、主要な成果に絞って詳細を述べる。

#### (1) 熱力学不確定性関係によるエントロピー生成の推定

エントロピー生成は、ゆらぎの大きな熱力学系における散逸と不可逆性を定量化し、熱力学的なエネルギーコストに結びつく重要な概念である。しかしそれを確率過程において数値的に推定することは大きなサンプル数を要するため難しく、とくに生体系の実データから推定することは困難である。一方で、熱力学不確定性関係(Thermodynamic Uncertainty Relation, TUR)と呼ばれる、速度と散逸のトレードオフを表す関係式が注目を集めてきた。TURを使うと、カレントや分散といった測定が比較的容易な量に基づいて、エントロピー生成の下限を推定することが出来る。しかし従来の手法では、そもそも理論的にも正しい値に収束しない、実データにも有効な数値的手法がない、非線形・非定常・高次元といった複雑な状況への適用可能性が不明、といった問題があった。

本研究では沙川と伊藤が共同で、短時間極限のTURを考えることにより、上記の問題をすべて解決する手法を提案した[Phys. Rev. E 2020]。とくに、ランジュバン系においてTURが短時間極限で等号達成可能であることを理論的に証明し、それを機械学習と組み合わせることで、高次元・非線形の場合にも先行研究と比べて大幅な推定精度の改善が見られることを示した。さらに沙川らは、クルバック・ライブラー情報量の双対表現などを用いることで、非定常過程における連続時間推定も高精度で可能であることを示した[Commu. Phys. 2021]。以上の成果は、生体情報処理などの複雑な確率過程において、散逸やエネルギーコストを定量評価するための理論的基礎となるだけでなく、実用的な数値的アルゴリズムを提供するものである。

#### (2) 情報幾何と最適輸送による一般理論の構築

伊藤は、確率と幾何を結び付ける数理的概念である情報幾何と最適輸送を、熱力学へと応用することで、生体情報処理のコストを明らかにする基盤となる以下のような成果を得た。これらの結果は生体系などにおいて、エネルギー散逸が状態変化に対してどれだけ必要であるかを示す普遍的な限界を与えるものである。

情報幾何による速度限界と熱力学的な不確定性関係の間のアナロジー [Phys. Rev. X 2020]

時間発展スピードに関する限界である情報幾何学的な速度限界と、ゆらぎと散逸の間のトレードオフ関係である熱力学的な不確定性関係の間の関係について議論を行った。特にクラメル・ラオ限界と熱力学的な不確定性関係の間のアナロジーについて詳しく調べた上で、情報幾何による普遍的な速度限界が分子モーターのダイナミクスの理解にも有用なことを議論した。また関連して、情報幾何学的な速度限界の結果はマクロな化学反応の速度[Phys. Rev. Res. 2021]や、進化のダイナミクスにおける進化の速度[Phys. Rev. Res. 2023]にも拡張できることを見出した。

最適輸送理論に基づく熱力学的な速度限界と不確定性関係[Phys. Rev. Res. 2021]  
最適輸送理論に基づく 2-Wasserstein 距離に基づいて、Fokker-Planck 系におけるエントロピー生成率の幾何学的な表示について調べ、幾何学的な視点から散逸とスピードのトレードオフである熱力学的な速度限界の一般化や、最適な熱機関のプロトコルなどについて調べた。また佐々らと研究を拡張して、2-Wasserstein 距離に基づく熱力学的な不確定性関係やエントロピー生成率の過剰/維持分解に関連する結果を得た[Phys. Rev. Res. 2022, Phys. Rev. E 2022]。また同様の過剰/維持分解に関連する幾何的手法が、従来の定常状態熱力学の熱力学的な不確定性関係の研究においても有用であることを沙川と共同で調べた[Phys. Rev. E 2023]。

熱力学的不確定性関係のマクロな化学反応への一般化 [Phys. Rev. Lett. 2021]  
確率性がないマクロな化学反応系のダイナミクスにおいても、ゆらぎと散逸の間のトレードオフ関係である熱力学的な不確定性関係や速度限界が拡張可能であることを示し、熱力学的なトレードオフ関係に関する生体系への適用可能性を高める研究を行なった。また最適輸送理論の知見に基づいて、さらにその結果を一般化することに成功した[Phys. Rev. Res. 2023]。

情報幾何と最適輸送に基づく非平衡熱力学の他の取り扱い[Info. Geo. 2024]  
情報幾何や最適輸送に基づいて、様々な非平衡熱力学の法則性や制約、数学的な定式化について議論した。また関連した研究として、情報幾何の射影の視点から情報熱力学第二法則を捉え直したり[Phys. Rev. Res. 2020]、緩和に関する普遍的な制約を情報幾何学から導出したり[J. Phys. A. 2022]、情報幾何学の双対性からくる非平衡熱力学の双対構造について調べたり[Phys. Rev. E. 2022, Phys. Rev. Res. 2024]、最適輸送理論に基づいて情報熱力学的な部分的な最小散逸間のゲーム理論的な競合を取り扱ったりした[Phys. Rev. Res. 2024]。

### (3) 新しいトポロジカル物理の探求

物理学におけるトポロジーの役割は、量子ホール効果やトポロジカル絶縁体といった、量子系で議論されることがほとんどであった。しかし近年、非エルミート系と呼ばれるある種の散逸系や、流体などの古典系においてもトポロジーが議論されるようになってきた。沙川は従来のトポロジカル物理を大きく拡張する研究を行い、その生物系との関係を議論した。とくに以下のような成果を得た。これらは基礎物理として重要な成果であるのみならず、生体情報処理において散逸を減らす機構や、その頑健さの起源を明らかにするための理論的基盤となると考えられる。

非エルミート系におけるバルクエッジ対応の破れ[Nature Commu. 2020]  
従来のトポロジカル物理においては、試料端(エッジ)を流れる無散逸のカレントが、試料内部(バルク)のトポロジカル数と対応するという、バルクエッジ対応が最も基本的な原理のひとつである。本研究では、非エルミート系においてはこのバルクエッジ対応が破れうることを明らかにした。具体的には、ハミルトニアンが対角化できなくなる例外点と呼ばれる新奇な機構によって、バルクのトポロジカル数がゼロであってもエッジモードが保護されることを示した。さらに、このような現象がバクテリア集団などのアクティブマターで生じることを理論的に提案した。

確率過程に固有のトポロジカル現象[Phys. Rev. Lett. 2023]  
マスター方程式で記述される古典確率過程は、生体系などを記述するうえで中心的な役割を果たすが、数理的には非エルミート系の一種であると見なすことができる。しかし一般の非エルミート系とは異なり、確率過程であることによる固有の制約が加わる。このことを考慮したとき、確率過程に特有のトポロジカル現象が存在するかどうかは未解明であった。本研究では、(走化性シグナル伝達などのモデル系となる)一次元確率過程において、トポロジカルな巻き付き数の概念が、系の緩和特性を特徴づけていることを明らかにした。これは確率過程に特有の性質であり、生体内のダイナミクスの頑健性などへの示唆を与えらる。さらに、一次元確率過程の定常状態についても巻き付き数による特徴づけが可能であることを示し(確率過程におけるバルクエッジ対応) 現在論文を投稿中である。

非線形トポロジカル同期現象の提案[Phys. Rev. Research 2022]

従来のトポロジカル物理の議論は、(非エルミート系も含めて)ほとんどすべてが線形系に限定されていた。しかし、生物系に代表される古典系においては、多彩な非線形現象が存在する。本研究ではまず、(蛍の発光の同期現象などに代表される)非線形同期現象において、トポロジーの効果を導入することで、「バルクはカオス、エッジは同期」という新しいタイプの同期現象を見出した。エッジのみで生じる同期は、非線形振動子間の結合をトポロジカルにすることで生じるものであり、トポロジカルな非線形同期現象であると言える。トポロジーに特有の頑健さにより、エッジや格子欠陥の形状をデザインすることで、同期パターンを自在に制御できることを見出した。

非線形チャーン数と非線形性誘起トポロジカル転移[Nature Phys. 2024]

さらに、非線形トポロジーの一般理論の構築へ向けて、これまでは線形系に限定されてきたトポロジカル数(とくに2次元のチャーン数)を非線形系に拡張した。そして、それを用いると非線形系に特有のトポロジカル転移(非線形性を強くしていくと生じる非線形性誘起トポロジカル転移)を予測できることを示した。これは、強い非線形領域においてもバルクエッジ対応が成り立つことを初めて示した研究である。また、さらに非線形性が強い領域において、エッジモードがカオスに転移することでバルクエッジ対応が破れることも示し、現在論文を投稿中である。

#### (4) 他の成果

以上が当初計画に直接関連した主要な成果であるが、それ以外にも多くの成果を得たため、それらについても簡単に述べる。まず沙川は以下のような成果を得た。

「量子情報の流れ」の概念を導入することで、量子連続測定・フィードバック制御下に熱力学第二法則とゆらぎの定理を拡張した[Phys. Rev. Lett. 2022]。

熱力学リソース理論の観点から、対称性の存在下でのみ熱平衡状態として振舞う「対称性に保護された熱平衡状態」を、量子状態として完全に同定した[Phys. Rev. X 2022]。

熱力学リソース理論と量子エルゴード理論を融合させることにより、量子仮説検定におけるSteinの補題を拡張することで、マクロ量子熱力学における熱力学ポテンシャルの存在を証明した[Phys. Rev. Lett. 2019, J. Phys. A 2021]。

同様に熱力学リソース理論の観点から、相関のある「触媒」の存在下における、量子熱力学ポテンシャルの存在を証明した[Phys. Rev. Lett. 2021]。

量子推定理論を応用することで、量子誤り抑制の普遍的なコスト限界を解明した[Phys. Rev. Lett. 2023]。

また、伊藤は以下のような成果を得た。

情報流が、相転移近傍でどのような振る舞いを起こすかを調べた[Phys. Rev. E. 2021]。

また情報流の視点に基づいて、岡田らと共同で膜輸送現象についてのモデルを構築して、情報熱力学的な議論を行った。特に多体間の情報流の流れ方に応じて、能動輸送と受動輸送という輸送モードの違いが定量化可能であることを数値計算によって調べ、情報熱力学第二法則によって膜輸送のモードの違いが理解可能であることを見出した[Phys. Rev. Res. 2022]。

熱力学的な駆動力と相互相関関数の非対称性の間の新しい熱力学的なトレードオフ関係を見出した。特に体内時計のコヒーレントな振動の回数と熱力学的な駆動力に関する一般的な予想を解決することで、緩和現象を表現するレート行列の固有値の虚部と実部の比が熱力学的な駆動力で制限されることや、オンサーガー相反関係の破れがどの程度起きうるかを熱力学的な駆動力で制限されることを見出した。またこの結果が化学ポテンシャルで駆動される生体系のモデルにおいて、非対称な情報の流れの限界を与えていることを見出した[Phys. Rev. Lett. 2023]。

熱力学的な緩和と定常状態の散逸の関係を表す、スペクトル摂動に関する新しい熱力学的なトレードオフ関係を見出した。特に酵素反応などで記述される系の緩和現象において、定常状態における散逸の有無が緩和のスピードや、減衰振動する振動モードの多寡に影響を与えることを調べた[Phys. Rev. Res. 2024]。

#### (5) 教科書の執筆

『非平衡統計力学：ゆらぎの熱力学から情報熱力学まで』(共立出版)という教科書を沙川が執筆し、2022年に出版した。これは本新学術領域全体の背景となる理論的概念をまとめた教科書であり、とくに情報熱力学に関する記述は世界でも例のないものになっている。売り上げも好調であり(たとえば東京大学生協本郷書籍部で総合ジャンル年間4位)、新しい学術領域を開拓するという目的に資することが出来ていると考えられる。沙川は他にも熱力学リソース理論についての英語の教科書を執筆し、2022年にSpringerから出版されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計44件（うち査読付論文 43件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 43件）

1. 著者名 Takuya Kamijima, Sosuke Ito, Andreas Dechant, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 107
2. 論文標題 Thermodynamic uncertainty relations for steady-state thermodynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 L052101, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.107.L052101	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 Kento Tsubouchi, Takahiro Sagawa, and Nobuyuki Yoshioka,	4. 巻 131
2. 論文標題 Universal Cost Bound of Quantum Error Mitigation Based on Quantum Estimation Theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 210601, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.210601	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 Taro Sawada, Kazuki Sone, Ryusuke Hamazaki, Yuto Ashida and Takahiro Sagawa,	4. 巻 132
2. 論文標題 Role of Topology in Relaxation of One-Dimensional Stochastic Processes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 046602, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.132.046602	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 Shunsuke Daimon, Kakeru Tsunekawa, Ryoto Takeuchi, Takahiro Sagawa, Naoki Yamamoto and Eiji Saitoh,	4. 巻 63
2. 論文標題 Quantum circuit distillation and compression	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 032003, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad29d8	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 Kazuki Sone, Motohiko Ezawa, Yuto Ashida, Nobuyuki Yoshioka and Takahiro Sagawa,	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonlinearity-induced topological phase transition characterized by the nonlinear Chern number	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-024-02451-x	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 Masahiro Hoshino, Ryuna Nagayama, Kohei Yoshimura, Jumpei F. Yamagishi, and Sosuke Ito	4. 巻 5
2. 論文標題 Geometric speed limit for acceleration by natural selection in evolutionary processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023127, 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.5.023127	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 Naruo Ohga, Sosuke Ito, Artemy Kolchinsky	4. 巻 131
2. 論文標題 Thermodynamic Bound on the Asymmetry of Cross-Correlations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 077101, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.077101	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 Yuma Fujimoto, Sosuke Ito	4. 巻 6
2. 論文標題 Game-theoretical approach to minimum entropy productions in information thermodynamics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013023, 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.013023	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 Artemy Kolchinsky, Naruo Ohga, Sosuke Ito	4. 巻 6
2. 論文標題 Thermodynamic bound on spectral perturbations, with applications to oscillations and relaxation dynamics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013082, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.013082	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 Naruo Ohga, Sosuke Ito	4. 巻 6
2. 論文標題 Inferring nonequilibrium thermodynamics from tilted equilibrium using information-geometric Legendre transform	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013315, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.013315	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 Shotaro Z. Baba, Nobuyuki Yoshioka, Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 19
2. 論文標題 Deep Reinforcement Learning for Preparation of Thermal and Prethermal Quantum States	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied	6. 最初と最後の頁 014068, 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.19.014068	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 Shoichiro Tsutsui, Masaru Hongo, Shintaro Sato, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum hydrodynamics from local thermal pure states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 033059, 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.033059	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 Kazuki Sone, Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 105
2. 論文標題 Exceptional mode topological surface laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235426, 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235426	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 Kazuki Sone, Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 4
2. 論文標題 Topological synchronization of coupled nonlinear oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 023211, 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023211	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 Toshihiro Yada, Nobuyuki Yoshioka, Takahiro Sagawa,	4. 巻 128
2. 論文標題 Quantum Fluctuation Theorem under Quantum Jumps with Continuous Measurement and Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 170601, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.170601	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 Yosuke Mitsuhashi, Kazuya Kaneko, Takahiro Sagawa,	4. 巻 12
2. 論文標題 Characterizing symmetry-protected thermal equilibrium by work extraction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. X	6. 最初と最後の頁 021013, 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.021013	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 Eiki Iyoda, Kazuya Kaneko, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 105
2. 論文標題 Eigenstate fluctuation theorem in the short- and long-time regimes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 044106, 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.044106	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 Satoshi Yoshida, Yasushi Okada, Eiro Muneyuki, and Sosuke Ito	4. 巻 4
2. 論文標題 Thermodynamic role of main reaction pathway and multi-body information flow in membrane transport	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023229, 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023229	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 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa, and Sosuke Ito	4. 巻 106
2. 論文標題 Geometric decomposition of entropy production into excess, housekeeping, and coupling parts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 024125, 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.024125	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 Naruo Ohga and Sosuke Ito	4. 巻 106
2. 論文標題 Information-geometric structure for chemical thermodynamics: An explicit construction of dual affine coordinates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 044131, 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.044131	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 Kohei Yoshimura, Artemy Kolchinsky, Andreas Dechant, and Sosuke Ito	4. 巻 5
2. 論文標題 Housekeeping and excess entropy production for general nonlinear dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013017, 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013017	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 Sosuke Ito	4. 巻 7
2. 論文標題 Geometric thermodynamics for the Fokker-Planck equation: stochastic thermodynamic links between information geometry and optimal transport	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Information geometry	6. 最初と最後の頁 441-483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41884-023-00102-3	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 伊藤創祐	4. 巻 2023年1月号
2. 論文標題 化学熱力学のすすめ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 現代化学	6. 最初と最後の頁 31-32
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 無
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 Shun Otsubo, Sreekanth K. Manikandan, Takahiro Sagawa, and Supriya Krishnamurthy,	4. 巻 5
2. 論文標題 Estimating time-dependent entropy production from non-equilibrium trajectories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 11, 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00787-x	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 Takahiro Sagawa, Philippe Faist, Kohtaro Kato, Keiji Matsumoto, Hiroshi Nagaoka, and Fernando G. S. L. Brandao,	4. 巻 54
2. 論文標題 Asymptotic reversibility of thermal operations for interacting quantum spin systems via generalized quantum Stein's lemma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. A: Math. Theor.	6. 最初と最後の頁 495303, 1-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ac333c	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 Takuya Kamijima, Shun Otsubo, Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 104
2. 論文標題 Higher-order efficiency bound and its application to nonlinear nanothermoelectrics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 044115, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.044115	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 Naoto Shiraishi, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 126
2. 論文標題 Quantum Thermodynamics of Correlated-Catalytic State Conversion at Small Scale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 150502, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.150502	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 Kohei Yoshimura and Sosuke Ito	4. 巻 127
2. 論文標題 Thermodynamic uncertainty relation and thermodynamic speed limit in deterministic chemical reaction networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 160601, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.160601	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 Muka Nakazato and Sosuke Ito	4. 巻 3
2. 論文標題 Geometrical aspects of entropy production in stochastic thermodynamics based on Wasserstein distance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43093, 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043093	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 Sosuke Ito	4. 巻 55
2. 論文標題 Information geometry, trade-off relations, and generalized Glansdorff-Prigogine criterion for stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics A	6. 最初と最後の頁 54001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ac3fc2	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 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa, and Sosuke Ito	4. 巻 4
2. 論文標題 Geometric decomposition of entropy production in out-of-equilibrium systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012034, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L012034	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 Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 4
2. 論文標題 Learning the best nanoscale heat engines through evolving network topology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 45, 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00553-z	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 Kazuki Sone, Yuto Ashida, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 11
2. 論文標題 Exceptional non-Hermitian topological edge mode and its application to active matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nat. Commun	6. 最初と最後の頁 5745, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19488-0	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 Aki Kutvonen, Keisuke Fujii, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 10
2. 論文標題 Optimizing a quantum reservoir computer for time series prediction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14687, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-71673-9	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 Jae Dong Noh, Takahiro Sagawa, and Joonhyun Yeo,	4. 巻 125
2. 論文標題 Numerical Verification of the Fluctuation-Dissipation Theorem for Isolated Quantum Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 050603, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.050603	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 Shun Otsubo, Sosuke Ito, Andreas Dechant, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 101
2. 論文標題 Estimating entropy production by machine learning of short-time fluctuating currents	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 062106, 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.062106	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 Sosuke Ito and Andreas Dechant	4. 巻 10
2. 論文標題 Stochastic Time Evolution, Information Geometry, and the Cramér-Rao Bound	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 021056, 1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.10.021056	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 Sosuke Ito, Masafumi Oizumi, and Shun-ichi Amari	4. 巻 2
2. 論文標題 Unified framework for the entropy production and the stochastic interaction based on information geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033048, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033048	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 Matthijs Meijers, Sosuke Ito, and Pieter Rein ten Wolde	4. 巻 103
2. 論文標題 Behavior of information flow near criticality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 L010102, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.L010102	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 Kohei Yoshimura and Sosuke Ito	4. 巻 3
2. 論文標題 Information geometric inequalities of chemical thermodynamic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013175, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013175	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 Govind Paneru, Sandipan Dutta, Takahiro Sagawa, Tsvi Tlusty, and Hyuk Kyu Pak,	4. 巻 11
2. 論文標題 Efficiency fluctuations and noise induced refrigerator-to-heater transition in information engines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-020-14823-x	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 Philippe Faist, Takahiro Sagawa, Kohtaro Kato, Hiroshi Nagaoka, and Fernando G. S. L. Brandão,	4. 巻 123
2. 論文標題 Macroscopic Thermodynamic Reversibility in Quantum Many-Body Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 250601/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.250601	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 R. Ch&eacute;trite, M. L. Rosinberg, T. Sagawa, and G. Tarjus,	4. 巻 11402
2. 論文標題 Information thermodynamics for interacting stochastic systems without bipartite structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab47fe	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 Jae Dong Noh, Eiki Iyoda, and Takahiro Sagawa,	4. 巻 100
2. 論文標題 Heating and cooling of quantum gas by eigenstate Joule expansion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 010106/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.010106	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

〔学会発表〕 計55件（うち招待講演 47件 / うち国際学会 35件）

1. 発表者名 T. Sagawa,
2. 発表標題 Resource Theory Approach to Quantum Thermodynamics
3. 学会等名 UTokyo-ANU Workshop on Quantum Control and Electronic Materials and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sagawa,
2. 発表標題 Quantum thermodynamics meets quantum information
3. 学会等名 Kick-off Workshop for Chicago-Tokyo Quantum Partnership (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sagawa,
2. 発表標題 On the existence of complete thermodynamic potentials: a resource-theoretic approach
3. 学会等名 ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information (YIPQS long-term workshop “Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity”) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 非線形系のトポロジー
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sagawa,
2. 発表標題 Thermodynamics of information
3. 学会等名 Okazaki Workshop on Molecular Machines 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 非線形系のトポロジー
3. 学会等名 界面ナノ科学研究会 (2023年度第2回) (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Geometric decomposition of entropy production rate: Wisdom from optimal transport
3. 学会等名 Workshop on stochastic thermodynamics IV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamic bound on cross-correlations for biological information processing
3. 学会等名 Building a bridge between non-equilibrium statistical physics and biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Geometric thermodynamics: Nonequilibrium thermodynamics based on optimal transport and information geometry
3. 学会等名 Statphys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 エントロピー生成率の分解のための情報幾何学的な直交性
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会, 共催シンポジウム「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 最適輸送と熱力学的トレードオフ関係
3. 学会等名 第26回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 非平衡定常状態への緩和に関する熱力学的なトレードオフ関係
3. 学会等名 京都大学物理学教室第一教室談話会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Decompositions of the entropy production rate and its application to thermodynamic trade-off relations and neural dynamics
3. 学会等名 CSH Workshop: Trade-offs between thermodynamic cost, intelligence, and fitness in living organisms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 最適輸送に基づいた熱力学
3. 学会等名 情報物理学の新展開 - ERATO情報エネルギー変換プロジェクト・キックオフワークショップ - (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 On the existence of complete thermodynamic potentials for quantum systems
3. 学会等名 Quantum resources: from mathematical foundations to operational characterization (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Quantum Fluctuation Theorems under Measurement and Feedback
3. 学会等名 Dynamic Days Asia Pacific 12 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Quantum Fluctuation Theorem with Continuous Measurement and Feedback
3. 学会等名 Stochastic Thermodynamics: Recent Developments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Non-Hermitian and Nonlinear Topology of Active Matter
3. 学会等名 Cell, Energetics, and information: New perspectives on nonequilibrium systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Three Approaches to Quantum Thermodynamics
3. 学会等名 YITP international workshop "Quantum Information Entropy in Physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Information-geometric speed limit for biochemical information processing
3. 学会等名 74th Annual Meeting of the Japan Society for Cell Biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Possible applications of optimal transport: From biological data processing to thermodynamics
3. 学会等名 Sendai 2022 An Update on Molecular Machines: Open Challenges and New Perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Optimal transport theory and stochastic thermodynamics
3. 学会等名 RIMS workshop Perspectives in random and non-autonomous dynamical systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 化学反応系における情報幾何学的な散逸の分解
3. 学会等名 生理研研究会 「第4回 力学系の視点からの脳・神経回路の理解」 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 最適輸送と熱力学的最適化
3. 学会等名 Workshop OT 2023 「最適輸送とその周辺 - 機械学習から熱力学的最適化まで」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 An introduction to resource theory of thermodynamics (Tutorial)
3. 学会等名 YITP international workshop “Quantum Information Entropy in Physics” (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 On the existence of thermodynamic potentials for quantum systems: A resource-theoretic approach
3. 学会等名 ICTS Workshop “Classical and Quantum Transport Processes: Current State and Future Directions” (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Thermodynamics of information
3. 学会等名 The 6th National Conference on Statistical Physics and Complex Systems (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 Characterizing complexity of many-body quantum dynamics by higher-order eigenstate thermalization
3. 学会等名 Quantum Many-Body Dynamics: Thermalization and its Violations (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Information geometry, thermodynamics, and biochemical information processing
3. 学会等名 MINDS-MoNET-ISE Workshop Information, Network & Topological Data Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sagawa
2. 発表標題 On the existence of a complete thermodynamic potential for quantum many-body systems
3. 学会等名 CSH Workshop "Stochastic thermodynamics of complex systems" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 リソース理論による量子熱力学--非平衡ポテンシャルの存在証明を中心に--
3. 学会等名 第43回量子情報技術研究会 (QIT43) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 高次の固有状態熱化仮説
3. 学会等名 量子多体系の熱力学 --数理の発展と展望 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沙川貴大, Philippe Faist, 加藤晃太郎, 長岡浩司, Fernando G.S.L. Brandao
2. 発表標題 リソース理論によるマクロ熱力学ポテンシャルの存在証明
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Information geometry, thermodynamics, and biochemical information processing
3. 学会等名 CSH Online Workshop Stochastic thermodynamics of complex systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keita Ashida, Kazuhiro Aoki, and Sosuke Ito
2. 発表標題 Information-geometric method to quantify the thermodynamic cost of ERK MAPK activation
3. 学会等名 The 58th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 The projection theorem in information geometry and the entropy production
3. 学会等名 RIGOROUS STATISTICAL MECHANICS AND RELATED TOPICS II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 創祐
2. 発表標題 熱力学における幾何学：情報幾何学と最適輸送理論
3. 学会等名 統計物理学懇談会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芦田慶太, 青木一洋, 伊藤創祐
2. 発表標題 情報幾何に基づいた生細胞内での熱力学的速度限界の実験的検証
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Sagawa
2. 発表標題 Thermodynamic resource theory of quantum many-body systems
3. 学会等名 Mini-Workshop on Quantum System Engineering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sagawa
2. 発表標題 Characterizing complexity of many-body quantum dynamics by higher-order eigenstate thermalization
3. 学会等名 ICTS Workshop "Thermalization, many-body localization and hydrodynamics"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sagawa
2. 発表標題 Second law and eigenstate thermalization in isolated quantum many-body systems
3. 学会等名 Fundamental Aspects of Statistical Mechanics and the Emergence of Thermodynamics in Non-Equilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 情報処理の熱力学
3. 学会等名 新世代研究所 第3回 スピントロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 リソース理論によるマクロ熱力学ポテンシャルの存在証明
3. 学会等名 量子論の諸問題と今後の発展 (QMKEK7) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沙川貴大
2. 発表標題 Thermodynamic resource theory of quantum many-body systems and generalized quantum Stein's Lemma
3. 学会等名 MINI WORKSHOP ON CLASSICAL AND QUANTUM RESOURCES (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamics of information geometry
3. 学会等名 Data analysis and machine learning in dynamical systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamic interpretation of information geometry and thermodynamic uncertainty relationships
3. 学会等名 2nd MBI-UBI Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamics of information geometry and a generalization of the Glansdorff-Prigogine criterion for stability
3. 学会等名 The East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamics of information geometry and a generalization of the Glansdorff-Prigogine criterion for stability
3. 学会等名 Workshop on Recent Progress in Mathematical and Statistical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Thermodynamics of information geometry and a generalization of the Glansdorff-Prigogine criterion for stability
3. 学会等名 UBI-NanoLSI Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 The Fisher information and the entropy production
3. 学会等名 Combining Information-theoretic Perspectives on Agency (CIPA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Stochastic thermodynamics and information geometry
3. 学会等名 Statistical physics of complex systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosuke Ito
2. 発表標題 Stochastic thermodynamics and information geometry
3. 学会等名 Statphys 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 Glansdorff-Prigogineの安定性規準と情報幾何の熱力学
3. 学会等名 日本物理学会 2019年 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 生体内での情報と熱の物理法則
3. 学会等名 シンポジウム 「生物物理の新展開」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤創祐
2. 発表標題 情報理論と確率的な熱力学
3. 学会等名 駒場物性セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 沙川貴大	4. 発行年 2022年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 192
3. 書名 非平衡統計力学 ゆらぎの熱力学から情報熱力学まで	

1. 著者名 沙川貴大, 上田正仁	4. 発行年 2022年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 221
3. 書名 量子測定と量子制御 [第2版]	

1. 著者名 Takahiro Sagawa,	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 160
3. 書名 Entropy, Divergence, and Majorization in Classical and Quantum Thermodynamics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

沙川研究室 <a href="https://noneq.c.u-tokyo.ac.jp/">https://noneq.c.u-tokyo.ac.jp/</a> 伊藤研究室 <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/itogroup/lab/">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/itogroup/lab/</a> 新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」 <a href="https://infophys-bio.jp/">https://infophys-bio.jp/</a>
--

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	伊藤 創祐  (Ito Sosuke)  (00771221)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授    (12601)	

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			
スウェーデン	Stockholm University			
米国	California Institute of Technology			
オランダ	NWO Institute AMOLF			
スペイン	ポンペウ・ファブラ大学			