

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840024

研究課題名（和文） 情報処理を伴う非平衡定常系における統計力学の理論的研究

研究課題名（英文） Nonequilibrium Statistical Mechanics of Nonequilibrium Steady States with Information Processing

研究代表者

沙川 貴大 (Sagawa Takahiro)

京都大学・白眉センター・助教

研究者番号：60610805

研究成果の概要（和文）：測定やフィードバックを含む情報処理過程に適用できる形に、非平衡関係式や熱力学第二法則を一般化する統一的な枠組みを構築することに成功した。それを用いて、情報処理を行う分子機械のモデルの非平衡定常状態におけるエントロピーと情報の生成を求め、両者の関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：By constructing a unified theoretical framework, I have generalized the nonequilibrium relations and the second law of thermodynamics for information processing processes including measurement and feedback. Based on it, I have derived the production rates of entropy and information in nonequilibrium steady states of a molecular information machine.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、数理物理・物性基礎

キーワード：ゆらぎの定理、非平衡定常系、フィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

近年の非平衡統計力学の進展により、ナノメートルからマイクロメートルのスケールの微小系において、熱ゆらぎの性質を厳密に規定する理論が明らかになり、実験的にも精密に検証されるようになってきた。一方で、情報と熱力学の関係は、Maxwellによる「デーモン」の提案以来、熱力学・統計力学の基礎にかかわる問題として研究されてきた。さらに近年、この二つの研究を統一し、非平衡系

における情報処理の性質を明らかにする研究が進められている。

2. 研究の目的

本研究では、情報と熱力学を関係づける一般的な理論の構築をめざして、定常的な情報とエネルギーの流れがある状況下での非平衡統計力学の理論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、数値的な手法と解析的な手法の両方を用いて行った。数値的な手法は確率動力学シミュレーションを用い、解析的な手法は、非平衡等式(ゆらぎの定理やJarzynski等式)を用いた。

4. 研究成果

主として以下のような成果を得た。

(1) 多数回の測定・フィードバック(連続測定・フィードバックを含む)された非平衡系において、非平衡等式(ゆらぎの定理・ジャルジンスキー等式)の拡張と、それを展開して得られる線形応答関係式について、理論的に研究した。その際、情報量の尺度として、entropy transferとして知られる相互情報量の一般化が重要な役割を果たすことを明らかにした。

この成果はPhysical Review Eから出版された。

(2) 非平衡定常状態間の遷移において、どのような熱力学ポテンシャルがダイナミクスを特徴づけるかについては、測定やフィードバックを含まない場合についてさえ、線形応答を超えた領域では、これまであまり明らかになっていなかった。そこで、情報との関係を研究するための準備として、まずは測定やフィードバックを含まない場合の、非平衡定常状態間の遷移について研究した。その結果、平衡状態間の遷移とは対照的に、準静的過程でのエントロピー生成を特徴づけるスカラーポテンシャルは一般には存在しないことを明らかにした。そして、ベクトルポテンシャルが非平衡定常状態間の準静的遷移を特徴づけることを明らかにした。

得られた結果は、従来なされてきたスカラーポテンシャルに基づく研究が一般には適用できないことを明らかにした意義も持つ。さらに、量子力学におけるベリー位相と共通の数学的構造をもっているという点でも興味深い。この研究は、これまで知られていなかった非平衡ダイナミクスに特有の性質を明らかにする第一歩であり、情報との関係を研究するうえで重要な役割を果たすことが期待される。

この成果はPhysical Review Eから出版された。

(3) 測定やフィードバックなどの情報交換プロセスにおいて、普遍的に成立する「揺らぎの定理」の一般化と、熱力学第二法則の一般化を導出した。これらの一般化においては

、情報交換プロセスにおけるエントロピー生成と、交換された相互情報量が対等に扱われる形になっている。またこの結果を導出する際、測定とフィードバックを統一的に扱う枠組みを定式化した。これによって、測定とフィードバックは、お互いにお互い「双対的」なプロセスであることが明らかになった。

さらにこの結果は、測定とフィードバックに限らない一般的な情報交換プロセスにおいて成立する。

この成果はPhysical Review Lettersから出版された。またこの成果は、下記の研究を行う上で、基礎となる理論的枠組みとなった。

(4) 自律的な情報処理を行う分子マシンが形成する、情報の流れを伴う非平衡状態についての研究を行った。その結果、定常状態における相互情報量(相関)の生成レートやエントロピーの生成レートを明らかにした。そして、通常の(情報処理を行わない)分子機械の場合と異なり、有限速度で動いているときにエントロピー生成がゼロになることを発見した。これは情報処理を伴う非平衡定常系に特有の、顕著な性質であると考えられる。この成果は論文にまとめられて、現在Physical Review Lettersに投稿中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

① Ryotaro Inoue, Shin-Ichi-Ro Tanaka, Ryo Namiki, Takahiro Sagawa, and Yoshiro Takahashi, Unconditional Quantum-Noise Suppression via Measurement-Based Quantum Feedback, Physical Review Letters 110, 163602(1)-163602(5) (2013). 査読有. DOI:10.1103/PhysRevLett.110.163602

② Tatsuro Yuge, Takahiro Sagawa, Ayumu Sugita, and Hisao Hayakawa, Geometrical pumping in quantum transport: Quantum master equation approach, Physical Review B 86, 235308(1)-235308(10) (2012). 査読有. DOI:10.1103/PhysRevB.86.235308

③ Takahiro Sagawa and Masahito Ueda, Fluctuation Theorem with Information Exchange: Role of Correlations in Stochastic Thermodynamics, Physical Review Letters 109, 180602(1)-180602(5)

(2012). 査読有.

DOI:10.1103/PhysRevLett.109.180602

④ Takahiro Sagawa and Masahito Ueda, Nonequilibrium thermodynamics of feedback control, *Physical Review E* 85, 021104(1)-021104(16) (2012). 査読有. DOI:10.1103/PhysRevE.85.021104

⑤ Takahiro Sagawa, Thermodynamics of Information Processing in Small Systems, *Progress of Theoretical Physics* 127, 1-56 (2012). 査読有. DOI: 10.1143/PTP.127.1

⑥ Takahiro Sagawa and Hisao Hayakawa, Geometrical expression of excess entropy production, *Physical Review E* 84, 051110(1)-051110(6) (2011). 査読有. DOI:10.1103/PhysRevE.84.051110

⑦ 沙川貴大, 上田正仁, 「微小非平衡系における情報熱力学」
日本物理学会誌 66, No. 11, 828-831 (2011).

[学会発表] (計 1 4 件)

①□ T. Sagawa, Energetic and Entropic Costs for Quantum Information Processing, The Fourth Nagoya Winter Workshop on Quantum Information, Measurement, and Foundations, Nagoya, Japan, 19 February, 2013. 招待講演.

② T. Sagawa, Information Thermodynamics, 第 13 回日米先端科学シンポジウム (Japanese-American Frontiers of Science Symposium, JAFoS), Irvine, California, USA, 2 December, 2012. 招待講演.

③ T. Sagawa, Second Law of Thermodynamics for Information-Heat Engines, Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2012, Seoul, Korea, 27 June, 2012. 招待講演.

④ T. Sagawa, Nonequilibrium Thermodynamics of Quantum Feedback Control, *kTLog2 Cuenca: Quantum Fluctuations and Information*, Cuenca, Spain, 24 May, 2012. 招待講演.

⑤ T. Sagawa, Nonequilibrium Thermodynamics with Feedback Control, East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2012, Suzhou, China, 18 March, 2012. 招待講演.

⑥ T. Sagawa, Thermodynamics of Feedback Control in Small Nonequilibrium Systems, Regional Bio-Soft Matter Workshop: Non-equilibrium statistical Physics in Bio-Soft Systems, Taipei, Taiwan, 28 Oct., 2011. 招待講演.

⑦ T. Sagawa, Fluctuation-Response Relation with Feedback Control, A Workshop on Non-equilibrium fluctuation-response relations, Isola del Giglio, 7 June, 2012. 口頭発表.

⑧ 沙川貴大, 情報処理プロセスにおけるゆらぎの定理, 第一回統計物理学懇談会, 学習院大学, 東京, 2013 年 3 月 5 日. 招待講演.

⑨ 沙川貴大, 少数自由度系における情報処理の熱力学, 第 85 回日本生化学会大会 シンポジウム「少数性: 生化学の新たな視点」, 福岡国際会議場, マリンメッセ福岡, 福岡, 2012 年 12 月 16 日. 招待講演.

⑩ 沙川貴大, 量子情報処理における熱力学第二法則, 情報統計力学の最前線-確率が繋ぐ自然現象と情報処理の数理- (4th YSM-SPI in Sendai/Prologue Series III of FSPI), 東北大学, 仙台, 2012 年 12 月 14 日. 招待講演.

⑪ 沙川貴大, 情報処理過程における熱力学第二法則, 「第 2 回情報ネットワーク科学研究会」, 関西学院大学大阪梅田キャンパス, 大阪, 2012 年 1 月 20 日. 招待講演.

⑫ 沙川貴大, 「量子情報処理のエネルギーコストの熱力学的下限」
領域 4, 領域 1, 領域 11 合同シンポジウム「～揺らぎ」の検出・理解・制御への挑戦～量子力学・統計力学・メゾ系の話題」, 2012 年秋季大会, 19pEA-4 (領域 4・1・11 合同), 横浜国立大学, 横浜, 2012 年 9 月 19 日. 招待講演.

⑬ 沙川貴大, 「微小系における情報処理の熱力学」
領域 12, 領域 11 合同シンポジウム「化学反応や生体高分子の構造変化における状態変化の起源を探る」第 67 回年次大会, 27pBJ-4 (領域 12・11 合同), 関西学院大学, 西宮, 2012 年 3 月 27 日. 招待講演.

⑭ 沙川貴大, 上田正仁, 「情報熱力学における普遍的な非平衡等式」
基研研究会「非平衡系の物理 - その普遍的

理解を目指して」, 京都大学, 京都, 2012年
8月2日. ポスター発表.

〔図書〕 (計3件)

① Takahiro Sagawa and Masahito Ueda, Information Thermodynamics: Maxwell's Demon in Nonequilibrium Dynamics, 181-211, as a chapter of: R. Klages, W. Just, and C. Jarzynski (Eds.), "Nonequilibrium Statistical Physics of Small Systems: Fluctuation Relations and Beyond", Wiley-VCH, Weinheim, 2013.

② Takahiro Sagawa, Thermodynamics of Information Processing in Small Systems, Springer, 2012 (ISBN: 978-4-431-54167-7).

③ Takahiro Sagawa, Second Law-Like Inequalities with Quantum Relative Entropy: An Introduction, 127-190, as a chapter of: M. Nakahara and S. Tanaka (eds.), "Lectures on Quantum Computing, Thermodynamics and Statistical Physics", Kinki University Series on Quantum Computing, World Scientific, 2012.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.taksagawa.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沙川 貴大 (Sagawa Takahiro)
京都大学・白眉センター・助教
研究者番号: 60610805

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: