

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05587

研究課題名(和文)熱輸送をともなうゆらぐ微小系の統計力学

研究課題名(英文)Statistical physics of small systems with thermal flow

研究代表者

齊藤 圭司 (Saito, Keiji)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：90312983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱的にゆらぐ微小系は、コロイド粒子を光学的にトラップした実験や、量子ドットを介した電子系など、様々な物理系に現れる。本研究者はこれらの現実的な系を意識して、熱機関として諸々の物理現象をとらえ、自然界が課す熱力学的な制限を研究した。一般的に時間の要素がない熱力学に、時間の要素を加えたという点が研究の大きな枠組みであり、熱力学的スピード限界の一般論、熱緩和現象における情報論的な制約、熱機関における幾何学量の導入などが主な成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、広い意味で熱の流れが存在する際の物理現象が示す一般的な性質を研究するものです。自然界に明確に存在する、できることとできないことの区別をより明確に定量的に行うことにより、熱、量子、情報などのキーワードがより強く結びついていることが本研究により明確になったことの意義は大きいと言える。研究全体として熱機関を意識していることから、発電などエネルギー問題を通して、社会との接点は広い意味で存在する。

研究成果の概要(英文)：In recent experiments, it is quite common to observe thermally fluctuating small systems, such as colloidal particles in water, electric flow via quantum-dos in nano-scale. Having these experimental situation in mind, we have studied on thermodynamic constraints. We consider on this subject based on heat engines. While thermodynamics is static theory, we made attempt to involve time in this framework. Main results in this direction include general theory of speed limit of thermodynamics, information-theoretical constraint in thermal relaxation processes, and introduction of geometry in heat engines.

研究分野：非平衡統計物理学

キーワード：熱輸送 熱機関

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、研究者個人に帰属されます。

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 熱伝導現象は、熱力学的な時間の矢と深く関係する基礎現象の一つである。3次元空間に住む我々にとって、熱伝導現象の基礎的な性質はフーリエの法則である。フーリエの法則は、熱流が温度勾配に比例しその比例係数が物質固有の値(熱伝導係数)となることを主張する。しかしながら、この経験則は低次元系になれば破綻することが知られており、その異常性から「異常熱輸送現象」と呼ばれ実験的にも理論的にも、また数学の分野も巻き込んで研究が進んでいる。異常熱輸送は低次元系ではむしろ異常ではなく、普遍的にみられる現象なのであるが、系の持つ対称性に応じた普遍性が明らかになっておらず、深い理解のためにも対称性に応じた普遍性の解明が求められている。

(2) 広い意味での熱の流れに伴う統計物理学的な現象として、熱機関がある。近年では原子サイズの熱機関なども実験的に実演されるなど、サイズもエネルギースケールもこれまでに研究されてこなかった領域で、熱と仕事の間関係を研究できる状況になってきた。そのような現状において、とくに準静的変化に近いサイクルをもつ熱機関の熱効率と仕事率との間に成立する普遍性などが実験的にも重要な課題になってきている。

### 2. 研究の目的

(1) 異常熱輸送現象における系の持つ対称性を变化させた時の普遍性を理解する。特に、系のダイナミクスに時間反転対称性がないとき、どのような熱輸送形態が出現するかを探る。メゾスコピック電子輸送系では磁場の印加にともなって、対称性が変わるにより電流のゆらぎなどが変化することが知られている。粒子流を伴わない熱流にそのような対称性の变化に伴う異常熱輸送の変化が現れるであろうか?これを明らかにすることが目的である。また、相互作用に長距離相互作用が存在するときの効果も興味深い問題である。熱輸送現象が異常であるということは、エネルギーの拡散が異常であることが示唆される。どのような異常性が定量的に存在するのであろうか?これらを解明したい。

(2) さらに熱機関において、準静的変化に近い遅いスピードでサイクルを变化させるとき、熱が仕事にどのように変換され、また熱が熱浴に流れていくのかを考察する。そして熱効率と仕事率の間関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 時間反転対称性を破った系のダイナミクスとして、磁場を挿入した系を考える。このとき電荷の配置によっては、音波モードを消失させることができると予想できる。磁場を入れたダイナミクスで音波が消失することから、これまでとは異なるタイプの輸送が出現すると予想される。これは興味深い問題であるが、この問題を非線形ポテンシャルのまま研究するのは大変困難に思える。明快な答えを見つけるために、重要な保存量を保ちつつ線形ポテンシャルのまま議論できる、「磁場付きの速度交換モデル」を提唱しその解析をおこなっていく。速度の交換は、ポアソン過程に従って行う。最大の焦点は、時間相関がべき的な減衰を示すか?示すとしたらそのべきは既存のべきと同じかどうか?そして音波が存在しないことによる決定的な効果はなにか?である。一般の非線形ポテンシャルを持つ系に対する流体力学的非線形学的ゆらぎの理論の解析では、エネルギーの相関関数が時間の $2/3$ 乗か $3/5$ 乗の2種類でスケールされることが分かっている。また、特に時間反転対称性がある系での我々のモデルは、厳密に $2/3$ になることも既に分かっている。そこで磁場を印加して時間反転対称性を奪った系で、時空相関のスケールリングが何になるべきかについて系統的に調べていく。まず数値計算からスケールリングが何乗でスケールされるべきかを予測し、それを踏まえてボルツマン方程式の理論を使ってそのべきを正当化していくことにする。

(2) 熱機関の問題に関しては、断熱過程近傍での分布関数の展開を使い、温度の変化とハミルトニアンのパラメータ変化を伴う熱機関を考える。そのことにより、熱機関における熱効率と仕事率の関係を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 磁場下での低次元異常熱輸送を速度交換をともなう有効モデルを導入して解析を行った。典型的な場合として三種類のケースを考える。Case 0: 電荷がない場合、Case I: 各サイトに一定の電荷がある一様電荷の場合、Case II: 電荷が交互に並ぶ場合である。このモデルに対して、局所エネルギーの定義と熱流の定義がなされ、久保公式に現れる熱流に関する自己相関関数の厳密解を導出することに成功した。Case 0とCase IIでは、これまでと同様の普遍クラスに属する異常熱輸送現象が現れるが、Case Iでは、新しい普遍クラスの異常性が発現することが報告されている。この様子は、図1に示される。

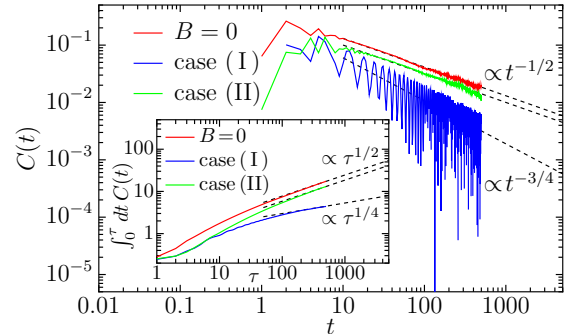


図1: Case 0-IIの時間相関関数

(2) 準静的な変化に近い熱機関では、分布関数の形式的な展開が可能であることから、一般論を展開することができた。我々は、熱効率と仕事率の一般的な関係を導くことに成功した。特に熱力学長が重要になることを示した。これは、熱機関において幾何学量を導入した最初の例になり、これからのさらなる進展が期待できる基礎になると期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Robert S. Whitney and Keiji Saito	4. 巻 6
2. 論文標題 Thermoelectric coefficients and the figure of merit for large open quantum dots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SciPost Physics	6. 最初と最後の頁 012-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhys.6.1.012	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 Ken Funo, Naoto Shiraishi and Keiji Saito	4. 巻 21
2. 論文標題 Speed limit for open quantum systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 013006-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1367-2630/aaf9f5">https://doi.org/10.1088/1367-2630/aaf9f5</a>	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 Keiji Saito	4. 巻 174
2. 論文標題 Fundamental relation between entropy production and heat current	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 433-468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s10955-018-2180-0">https://doi.org/10.1007/s10955-018-2180-0</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 Keiji Saito and Makiko Sasada	4. 巻 361
2. 論文標題 Thermal conductivity for coupled charged harmonic oscillators with noise in a magnetic field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications in Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 951-995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s00220-018-3198-5">https://doi.org/10.1007/s00220-018-3198-5</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 Abhishek Dhar, Keiji Saito, and Anjan Roy	4. 巻 120
2. 論文標題 Energy current cumulants in one-dimensional systems in equilibrium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 220603-1-5
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/PhysRevLett.120.220603">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.220603</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 Tsuyoshi Yamamoto, Masanari Kato, Takeo Kato and Keiji Saito	4. 巻 20
2. 論文標題 Heat transport via a local two-state system near thermal equilibrium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093014-1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1367-2630/aadf09">https://doi.org/10.1088/1367-2630/aadf09</a>	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 Shuji Tamaki and Keiji Saito	4. 巻 98
2. 論文標題 Nernst-like effect in a flexible chain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 052134-1-13
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/PhysRevE.98.052134">https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.052134</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 Shuji Tamaki, Makiko Sasada, and Keiji Saito	4. 巻 119
2. 論文標題 Heat transport via low-dimensional systems with broken time-reversal symmetry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110602-1-5
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/PhysRevLett.119.110602">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.110602</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 Giuliano Benenti, Giulio Casati, Keiji Saito, and Robert S. Whitney	4. 巻 694
2. 論文標題 Fundamental aspects of steady-state conversion of heat to work at the nanoscale	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics reports	6. 最初と最後の頁 1-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.05.008">https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.05.008</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 Kay Brandner, Taro Hanazato, and Keiji Saito	4. 巻 120
2. 論文標題 Thermodynamic Bounds on Precision in Ballistic Multi-Terminal Transport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 090601-1-5
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/PhysRevLett.120.090601">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.090601</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

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Keiji Saito
2. 発表標題 Uncertainty relations in implementation of unitary controls
3. 学会等名 Motors and Engines (Seoul, Korea) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Saito
2. 発表標題 Several effects induced by magnetic fields in low-dimensional heat conduction
3. 学会等名 Non-equilibrium behavior of isolated classical and quantum systems (Trieste, Italy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Saito
2. 発表標題 Heat transport via low-dimensional systems with broken time-reversal symmetry
3. 学会等名 Dynamics Days Central Asia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiji Saito
2. 発表標題 Several trade-off relations in thermodynamics
3. 学会等名 The 3rd KIAS Workshop on Quantum Information and Thermodynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤圭司
2. 発表標題 熱力学的コストと非平衡定常ゆらぎにおけるトレードオフ関係
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----