

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740289

研究課題名(和文)熱が関わる輸送現象における輸送形態の分類、揺らぎ、制御の統計力学的研究

研究課題名(英文)Statistical mechanical study on classification, fluctuation and control in energy-related phenomena

研究代表者

齊藤 圭司 (Saito, Keiji)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：90312983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題において主に3つの問題を扱った。第一に、一次元系の熱輸送現象に見られる異常輸送現象の問題、第二に時間反転対称性を破った系での熱伝効率の理論的限界の問題、第三に非平衡定常状態での熱流ゆらぎの問題である。第一の問題に関しては、異常輸送のメカニズムを現象論的に理解するために、異常拡散現象の典型的な数学的モデルであるレビーウォークを使って実験と一貫する結果を得た。第二の問題では磁場を入れた系での電子輸送を考え、熱が仕事に変換される熱効率を考えて、時間反転対称性のある系で許される限界を超えることが出来ることが示された。第三の問題では、3次元系の具体的なモデルで相加原理という予想を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we considered three problems. The first problem is to study on anomalous energy transport in low-dimensional systems, and the second one is on theoretical bound in heat-to-work conversion in thermoelectric transport in systems without time-reversal symmetry. The third one is a problem on non-equilibrium current fluctuation. In the first problem, we discussed anomalous transport with use of Levy walk model which is the typical mathematical model for discussing anomalous diffusion, and we succeeded in reproducing experimental findings. In the second problem, we showed that thermoelectric efficiency under magnetic fields can exceed the bound which is strictly holds for systems with time-reversal symmetry. In the third problem, we showed that Additivity principle, which was expected to hold, really exists in heat transport via specific systems.

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：輸送現象 熱現象 非平衡基礎論

1. 研究開始当初の背景

平衡状態の相転移現象の分類が可能な背景には、相転移点近傍でのゆらぎの特徴に普遍性があるからである。非平衡現象、特に非平衡定常状態において、その流れに普遍的なゆらぎが存在するか？という問いは現代物理学における重要な問いである。非平衡研究における大きな知的前進である、ゆらぎの定理や非平衡仕事定理の発見以降、非平衡定常状態における普遍性の探求が、理論実験ともに活発である。このような背景の中で、我々は特に熱が伴う物理現象に着目し研究した。最も単純な熱が伴う現象として、熱輸送現象がある。近年大事な物理現象として、低次元系で普遍的に見られる異常熱輸送現象があげられるが、そのメカニズムの定性的定量的理解はまだ完全にはなされていない。また、熱流のゆらぎにみられる普遍性に関しても実験はおろか理論的なレベルで分かっていないのが現状である。熱だけでなく電子も同時に流れる場合には、熱が電流に変換されるいわゆる熱電機関としての統計力学的問題が存在し、近年その効率をめぐって理論実験両方から研究が盛んになってきている。

2. 研究の目的

異常輸送現象には、いくつかの特徴がある。熱伝導度が系の大きさのベキで発散してしまうこと、定常温度プロファイルが非線形になることなどである。これは単純に考えてミクロな熱拡散が異常であるからと考えられる。ミクロなエネルギー拡散が異常であることを仮定してどこまで実験で観測される異常熱輸送現象が説明されるのか？これを明らかにすることが第一の目的である。つぎに第二の目的として、熱流ゆらぎにおいて普遍的に成立するかもしれない相加性原理とよばれる予想を検証することにかかげる。相加原理とは、高次の熱流ゆらぎに幾つかの制約が課されるという普遍性のことである。高次の熱流ゆらぎは、線形応答領域の熱伝導度と平衡系のゆらぎさえ分かれば一意的に決定される。最後に、電流と熱流が同時に流れる電子輸送系における熱電効果を考え、特に時間反転対称性を破る効果が熱効率にどう現れ得るかを見ること、これが第三の目的である。

3. 研究の方法

第一の目的、つまり異常輸送現象をミクロな異常拡散から説明することに関しては、レビーウォークを数学的な道具として使う。レビーウォークとは、ランダムウォークに似ているが、向きを変えるまでの時間がベキ的に分布しているものを言う。エネルギーが拡散するさまをあたかも粒子が拡散するかのよう

に扱い、どの程度マクロな熱現象と似ているかを考えるのである。第2の目標、つまり、熱伝導系における熱流ゆらぎに関する相加性原理を検証するためには、3次元ランダム調和格子を使う。3次元調和格子は、一様な系では単に弾道的な輸送が見られるだけであるが、ランダムネスを入れると異常輸送系や正常輸送現象を示すので、熱流ゆらぎをそれぞれ異なる輸送形態で見ることが可能となる。形式的な熱流ゆらぎを生成するキュムラント生成関数を導出し、それを数値計算して相加原理の予想を見る、というのが手順である。第三の問題、つまり熱電効果において、時間反転対称性を破る効果が熱効率にどう影響を及ぼすかという問題に関しては、相互作用のない電子系を考え、ランダウアー・ブッティカーの散乱行列理論を使って議論する。

4. 研究成果

第一の問題において、我々は異常輸送をレビーウォークで厳密に記述することに成功した。定常状態においてレビーウォークのパラメーターによって、熱伝導度が系の大きさのベキで発散することや非線形な温度プロファイルを再現することに成功した。これらにより、レビーウォーク的熱拡散は実験で観測されている事実と無矛盾であることが分かった。

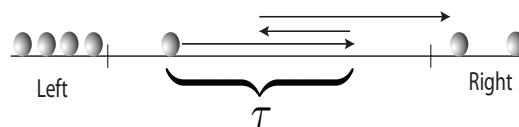


図1：レビーウォークを使った輸送の概念図。

第二の問題では、大規模な数値計算により相加性原理をハミルトン系で初めて実証することに成功した。弾道的輸送現象では相加原理は成り立たないが、正常輸送現象では成立することが確認できた。非自明な結果として、異常輸送現象を示す時にも相加原理は良い近似になっていることが分かった。

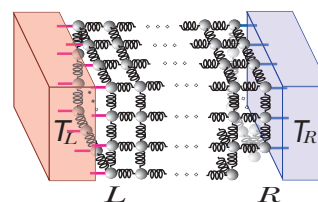


図2：相加性原理検証のために使った、3次元調和格子。

第三の問題では、三端子系を考えることにより、時間反転対称性のある系では許されないような熱効率を、磁場を入れることにより可能となることを世界で初めて示した。具体的には、線形応答領域で最大仕事率下での最大熱効率がカルノー効率の4/7倍の大きさにまでなり得ることを示した。これは時間反転対称な系において許されるカルノー効率の半分（クルゾン-アルボン効率）を凌駕しているという意味で興味深い。このことにより、磁場は熱機関の効率を上げるための一手段になり得ることが分かったことになる。

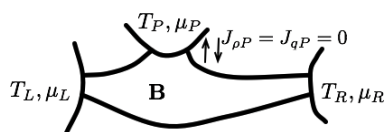


図3：時間反転対称性の破れが熱電効果にどう影響するかを議論するために用いた擬2端子系。3端子目は、散逸源としての役目を持つ。

#### 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 13 件)

1. K. Brundner, Keiji Saito and U. Seifert, Phys. Rev. Lett. vol. 110, 070603 (2013) 査読有.

2. A. Dhar, Keiji Saito and B. Derrida, Phys.Rev.E vol. 87, 010103(R) (2013) 査読有.

3. A. Dhar, Keiji Saito and P. Hanggi, Phys. Rev. E vol. 85, 011126 (2012) 査読有.

4. 齊藤圭司、「熱伝導と統計力学」～異常輸送と拡散～数理科学 12月号 No.594 (2012) 査読なし.

5. 齊藤圭司、非平衡系における相加性、物理学会誌第67巻第9号 650 (2012)

査読なし.

6. Keiji Saito, G. Benenti, G. Casati and T. Prosen, Phys. Rev. E vol. 84, 201306 (R) (2011) 査読有.

7. Keiji Saito and A. Dhar, Phys. Rev. E vol. 83, 041121 (2011) 査読有.

8. Keiji Saito and H. Tasaki, J. Stat. Phys. vol. 145, 1275 (2011) 査読有.

9. S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, Keiji Saito, Y. Utsumi, A.C.Gossard, Phys. Rev. B vol. 83, 155431 (2011) 査読有.

10. A. Dhar, O. Narayan, A. Kundu and Keiji Saito, Phys. Rev. E vol. 83, 011101 (2011) 査読有.

11. Keiji Saito and A. Dhar, Phys. Rev. Lett. vol.107, 250601 (2011) 査読有.

12. Keiji Saito, G. Benenti and G. Casati, Chem. Phys. vol. 375, 508 (2011) 査読有.

13. G. Benenti, Keiji Saito and G. Casati, Phys. Rev. Lett. vol. 106, 23602 (2011) 査読有.

[学会発表] (計 2 件)

1. 「アハラノフ・ボームリングにおける非平衡揺らぎ関係」、西原禎孝, 中村秀司, 知田健作, 荒川智紀, 田中崇大, 小野輝男, 内海裕洋, 齊藤圭司, R. Leturcq, K. Ensslin, D. 小林研介 日本物理学会 年次大会 (2012).

2. 「非平衡ゆらぎの統計力学的展開-熱輸送を中心に-」 齊藤圭司, 日本物理学会 秋季大会 (2012).

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.keio.ac.jp/faculty/ksaito/syousai/index-saito.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤圭司 (Saito, Keiji)

慶應大学理工学部物理学科

研究者番号：90312983

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：