

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25103003

研究課題名(和文)非平衡量子系の輸送ダイナミクス

研究課題名(英文)Transport Dynamics in Nonequilibrium Quantum Systems

研究代表者

小林 研介(Kobayashi, Kensuke)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：10302803

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 89,100,000円

研究成果の概要(和文): 微細加工技術によって作製される極小の固体素子は、平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御できるため、非平衡量子系を定量的に取り扱える理想的な舞台である。我々は、このような固体素子を念頭におき、非平衡ダイナミクスを取り扱う方法論の創出を目指して研究を行ってきた。特に、量子液体の非平衡ダイナミクスやスピン流にともなう電流ゆらぎを実験的に解明した。理論面でも、量子孤立系における振動外場による熱化現象、熱力学的不確定性原理の分類、孤立量子多体系におけるゆらぎの定理等を研究した。以上の成果は、今後の非平衡ダイナミクスの定量化の研究に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文): Mesoscopic systems offer us an ideal unique opportunity to explore non-equilibrium quantum many-body effects in a tunable and precise way, as we can continuously tune them from equilibrium to out-of-equilibrium. We performed experimental and theoretical study for mesoscopic systems in order to construct new methods to deal with their non-equilibrium dynamics. Last five years, we have experimentally clarified the universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids and the current fluctuations induced by nonequilibrium spin accumulation. Theoretically, we successfully addressed the energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, the universal trade-off relation between power and efficiency for heat engines, fluctuation theorem for many-body pure quantum states, and so on. Our achievements will contribute to deepen our understanding on non-equilibrium dynamics of quantum many-body systems through quantification of them.

研究分野：量子物性

キーワード：ゆらぎ 非平衡雑音 エントロピー 量子情報 熱輸送 量子多体系

## 1. 研究開始当初の背景

現在、強相関量子科学・スピントロニクスなどの研究分野では、多体量子効果を積極的に利用した固体素子の研究が活発に進められている。一般に、トランジスタのような能動素子を実現するには、系の平衡状態だけでなく、非平衡状態に対する定量的な理解が必須である。しかしながら、現在注目されている固体素子の母体となる多体量子系において、その非平衡状態を定量的に理解することは、研究者にとって大きな挑戦となっている。

外場に対する系の応答を記述することは、長年にわたる物理学の中心テーマの一つとなってきた。特に、1950年代に成立した線形応答理論は、幅広い現象を定量的に説明し予言することに成功してきた。しかし、一方で、その適用範囲が平衡状態近傍に限られているため、その限界を超えて非平衡系を定量的に理解しようという試みも長年行われてきた。中でも有望とされている成果が1993年に見いだされたゆらぎの定理である。近年、この定理を軸とすることによって、非平衡多体系の定量化が可能であるという機運が高まってきた。

## 2. 研究の目的

本研究の主題は非平衡多体系の定量化である。微細加工技術を駆使して作製される固体量子素子は、非平衡量子多体系を定量的に取り扱うことのできる理想的な舞台である。本研究は、線形応答理論の限界を超えて、固体素子における非平衡多体ダイナミクスを明らかにする新しい方法論の創出を目的とする。具体的には、非平衡電流ゆらぎ測定を様々な素子に適用し、量子系におけるゆらぎの定理の検証とその有用性を確立する。

本研究は、未だ理解が不十分な非平衡量子多体系をより定量的に議論することを可能にするばかりではなく、量子測定理論と統計物理の融合につながる可能性を持つ。

## 3. 研究の方法

本研究では、代表者(実験)と分担者(理論2名)とが連携しながら進める。

実験面の核となるのは固体量子素子における高精度の電流ゆらぎ測定である。電流ゆらぎ測定は、素子を通過した電流の平均値だけでなく、そのゆらぎを測定するものであり、通常の電気伝導測定では得られない非平衡ダイナミクスの情報を得ることができる。代表者は、世界有数の高感度を持つ電流ゆらぎ測定系を開発し、分担者らとゆらぎの定理の検証実験などを行ってきた。

一方、理論面では、量子測定理論と完全計数統計理論を組み合わせることにより、新たな輸送理論の構築を行うと同時に、固体量子素子を用いた実験の提案と遂行を行う。

## 4. 研究成果

我々の班では、このような固体素子を主たる

舞台として、非平衡ダイナミクスを取り扱う方法論の創出を目指して研究を行ってきた。5年間で得られた主要な成果を以下に記載する。

### (1) 量子液体の非平衡ダイナミクスの定量化

近藤効果は、1960-70年代にかけて解明された量子多体効果であり、半世紀にわたって数多くの研究が行われてきた。理論的には近藤状態は「局所フェルミ液体」として記述されることが確立しており、近藤状態の振る舞いを研究することは、強い電子相関に支配される量子液体を研究することと等価である。小林らは、カーボンナノチューブに作製した量子ドットにおける近藤効果を研究した。

本研究によって、近藤状態においては、一粒子の伝導過程だけでなく、二個の粒子が関与する伝導過程もあり、それによって電流ゆらぎが通常値よりも増大することが分かった。この電流ゆらぎから、量子液体を特徴づける量(ウィルソン比)を求めることができ、量子ドットが極めて強い量子多体状態にあることを実証した。さらに、これまでに知られていなかった非平衡スケールング則を実験的に確立した。また、対称性の異なる近藤状態の間の連続的な遷移にともなうウィルソン比の変化を定量的に抽出することにも成功した。

以上の成果は、非平衡量子多体系の精密な定量化に成功したものであり、今後の理論・実験の発展を促すものと期待される。

### (2) スピン流に伴う電流ゆらぎの検出

1918年、ショットキーは真空管を流れる電流に注目し、そのゆらぎが素電荷と電流の平均値に比例するという普遍的な性質を持つと指摘した。このゆらぎは真空管の陰極からランダムに放出される電子の分配過程と電荷の離散性に起因した現象で、ショット雑音と呼ばれる。ところで、電子は電荷だけでなくスピンという自由度も持つため、スピンの離散性も電流のゆらぎに影響を与えるのではないかと考えるのは自然である。しかし、スピンに起因するショット雑音については理論的な提案があったものの、実験的な検証は行われてこなかった。

小林らは、トンネル接合にスピン流を印加し、それに伴うショット雑音の検出に成功した。具体的には、強磁性半導体(Ga,Mn)Asと非磁性半導体GaAsからなるトンネル接合にスピン流を印加し、電流ゆらぎ測定を行った。図に示すように、トンネル接合に流れるスピン流と電流を独立に制御することで、ショット雑音に含まれる電流とスピン流の寄与を分離して評価した。その結果、スピン流の絶対値が求まると同時に、ショット雑音とスピン流の比例関係が実証された。この結果はトンネル過程において電荷とスピンの一体となってトンネルしていることの直接的な帰

結である。今後、本検出手法がスピン流の研究を進展させていくと期待される。

### (3) 量子ホール端状態の非平衡ダイナミクス

量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合では、量子ホール状態が完全に混じりあう結果、接合の両側への電子の分配過程の存在が推察されていたが、このことを直接的に実証した報告はなかった。小林らは、ゲート電極を組み合わせるにより pn 接合を形成可能なグラフェン試料を作製し、低温強磁場下において高精度な電流ゆらぎ測定を行った。その結果、量子ホール状態で pn 接合のある場合にはショット雑音が発生するのに対し、pn 接合のない場合にはショット雑音が発生しないことを明らかにした。観測されたショット雑音の大きさが、理論予想とほぼ一致することも実証した。

この成果は、量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合で起こる電子分配の微視的特性を初めて定量的に確立したものである。

### (4) 熱機関における熱効率と仕事率の関係

齊藤は、非平衡系の熱力学を理解する上で避けて通れない、熱機関の熱効率と仕事率の関係について議論した。平衡熱力学は準静的な変化に対する理論であるが、その場合仕事率は消失する。仕事率を増やそうとすれば必然的に、準静的過程を離れた非平衡状態を考察しなければならない。齊藤らは、マルコフ過程の範囲内で熱効率と仕事率の間に成立する普遍的なトレードオフ関係式を導いた。それにより熱効率がカルノー効率に近づく際の仕事率のふるまいなどが定量的に議論できるようになった。

### (5) 量子孤立系における、振動外場による熱化現象

近年、冷却原子が示す量子ダイナミクスを実験的に観測できるようになり、統計力学の基礎に関する議論も盛んになっている。孤立した量子系はどのように熱的な状態に近づいて行くだろうか？最も簡単な熱化現象は、振動外場で量子系を温める熱化現象である。この場合の定常状態は温度無限大のランダム状態である。

齊藤は、このような熱化過程に段階的な緩和が存在することを、フローケマグナス展開の手法を用いて示した。緩和過程では、初期段階で準保存量にトラップされ、遅い緩和が生じる“Floquet Prethermalization”という現象が生じることを明らかにした。

### (6) 熱力学的不確定性原理の分類

近年、電流や熱流などの熱力学的な流れには、ある種の不確定性が存在することが示唆されてきている。例えば、古典的な電流におけるファノファクターとエントロピー生成にはある種のトレードオフ関係があること

がマルコフ過程の範囲で議論されている。齊藤は、この種の議論を広範囲のダイナミクスで考え、熱伝導現象や、電流における熱力学的不確定性関係を議論した。磁場のある系や量子系では、マルコフ過程において議論されていた結果を変更しなければならないことが分かった。

### (7) 自律的な情報熱機関の研究

近年、「ゆらぎの定理」に代表される非平衡熱力学と、情報理論との融合が進んでいる。沙川らは、自律的な情報処理の熱力学の一般的な理論を構築し、それを生体情報処理へと応用した。

一般論については、連続的な情報流を含む形に一般化されたゆらぎの定理と熱力学第二法則を導き、さらに情報流についてもオンサーガ相反定理が成立することを示した。

生体情報処理への応用としては、上記で得られた一般化第二法則によって化学走性のノイズに対する頑健性を定量化できることを示した。

また沙川らは 2015 年に自身らの成果を中心にまとめた情報熱力学のレビューを出版した。

### (8) 孤立量子多体系におけるゆらぎの定理

量子力学から熱力学が如何に創発するかは、19世紀以来議論されてきた統計力学の基礎として重要なだけでなく、非平衡量子系のダイナミクスを理解する上でも重要な問題である。

沙川らは、統計力学の概念であるカノニカル分布を仮定せずに、量子力学だけに基づいて熱力学第二法則とゆらぎの定理を証明した。そのさい、熱平衡化のメカニズムとして近年注目を集めている固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH) が重要な役割を果たした。なお ETH に数学的な証明はないが、沙川らは弱い形の ETH を証明することに成功した。

## 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 62 件)

K. Brandner, T. Hanazato, K. Saito, Thermodynamic Bounds on Precision in Ballistic Multiterminal Transport, Phys. Rev. Lett., 120 (2018) 090601/1-6.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.090601  
S. Tamaki, M. Sasada, K. Saito, Heat Transport via Low-Dimensional Systems with Broken Time-Reversal Symmetry, Phys. Rev. Lett., 119 (2017) 110602/1-5.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.110602  
E. Iyoda, K. Kaneko, T. Sagawa,

Fluctuation Theorem for Many-Body Pure Quantum States, *Phys. Rev. Lett.*, 119 (2017) 100601/1-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.100601  
M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, K. Kobayashi, Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-Correlated Quantum Dot, *Phys. Rev. Lett.*, 118 (2017) 196803/1-5.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.196803  
N. Shiraishi, K. Saito, H. Tasaki, Universal Trade-Off Relation between Power and Efficiency for Heat Engines, *Phys. Rev. Lett.*, 117 (2016) 190601/1-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.190601  
T. Mori, T. Kuwahara, K. Saito, Rigorous Bound on Energy Absorption and Generic Relaxation in Periodically Driven Quantum Systems, *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 120401/1-5.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.120401  
K. Kobayashi, What can we learn from noise? -Mesoscopic nonequilibrium statistical physics-, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 92 (2016) 204-221.  
DOI: 10.2183/pjab.92.204  
M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, K. Kobayashi, Universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids, *Nature Phys.*, 12 (2016) 230-235.  
DOI: 10.1038/nphys3556  
J.M.R. Parrondo, J.M. Horowitz, T. Sagawa, Thermodynamics of information, *Nature Phys.*, 11 (2015) 131-139.  
DOI: 10.1038/nphys3230  
S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, K. Kobayashi, Edge mixing dynamics in graphene p-n junctions in the quantum Hall regime, *Nature Communications*, 6 (2015) 8066/1-6.  
DOI: 10.1038/ncomms9066  
S. Ito, T. Sagawa, Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback loop, *Nature Communications*, 6 (2015) 7498/1-6.  
DOI: 10.1038/ncomms8498  
T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, K. Kobayashi, Shot noise induced by nonequilibrium spin accumulation,

*Phys. Rev. Lett.*, 114 (2015) 016601/1-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.016601

〔学会発表〕(計 347 件)

小林研介:「量子多体系における対称性とゆらぎ」、シンポジウム「非平衡系におけるゆらぎと構造」、日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年)(東京理科大学野田キャンパス、千葉、2018 年 3 月 22 日 - 25 日)

K. Kobayashi, "Spin-dependent Current Fluctuations in Mesoscopic Conductors", 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech IX) (Fukuoka, Japan, June 4-8, 2017).

小林研介:「メゾスコピック系におけるスピン依存伝導と非平衡電流ゆらぎ」、応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「新規スピントロニクス現象と応用の可能性」(名古屋国際会議場、名古屋、2015 年 9 月 13 日 - 16 日)

K. Kobayashi, "Non-equilibrium Fermi Liquid in a Kondo-correlated Quantum Dot Probed by Shot Noise", the 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) (Sendai, Japan, July 26-31, 2015)

K. Kobayashi, "Fluctuation Theorem in a Quantum Coherent Conductor", the 25th International Conference on Statistical Physics of the International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP) (StatPhys25) (Seoul National University, Seoul, Korea, July 22 - 26, 2013).

〔図書〕(計 1 件)

沙川 貴大, 上田 正仁「量子測定と量子制御」サイエンス社(発行年: 2016、ページ数: 224)

〔その他〕

ホームページ等

小林研究室

<http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

齊藤研究室

<https://sites.google.com/keio.jp/keijisaito-group>

沙川研究室

<http://noneq.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 研介 (KOBAYASHI, Kensuke)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号: 10302803

(2)研究分担者

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

(3)研究分担者

沙川 貴大 (SAGAWA, Takahiro)  
東京大学・大学院工学系研究科 (工学部)  
)・准教授  
研究者番号：60610805