様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ６ 月　 ４ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2015～2017
課題番号：１５Ｋ０５１２４

研究課題名（和文）場の理論を用いた高速駆動外場下の非平衡量子輸送の研究

研究課題名（英文）Field-Theoretic Study of Nonequilibrium Quantum Transport under Fast-Driven External Field

研究代表者
加藤　岳生（Kato, Takeo）

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：８０３３２９５６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,200,000円

研究成果の概要（和文）：ナノスケール素子の高速駆動に関する理論研究を行い、以下のような成果を得た: (1)強い周期外場のもとでの電流ゆらぎの理論を構築し、量子ドット内のクーロン相互作用の影響を議論した。(2)強磁性絶縁体と金属の界面で、スピンゼーベック効果およびスピンポンピング現象で生成されるスピン流について、その揺らぎの微視的理論を構築した。(3)リードと量子ドットからなる系で、リードの温度・化学ポテンシャルを周期的に変調させたときの電荷ポンプの理論を構築した。(4)ナノスケール素子を介した熱輸送の理論研究を行った。(5)実験家と協力し、磁性絶縁体ErFeO3の強強度テラヘルツ光による高速磁気応答を考察した。

研究成果の概要（英文）：We performed theoretical studies on nano-scale devices under fast driving: (1) We constructed a theory of current fluctuation under strong periodic external fields for quantum dots with Coulomb interaction. (2) We constructed a theory of spin-current fluctuation for spin-current generation at an interface between a ferromagnetic insulator and a metal due to spin Seebeck effect and spin pumping. (3) We constructed a theory of charge pumping in quantum dot systems under periodic modulation of reservoir parameters. (4) We studied heat transport via a nano-scale device theoretically. (5) We discussed fast magnetic response of a ferromagnetic insulator ErFeO3.

研究分野：物性理論

キーワード：メゾスコピック系　非平衡統計力学　スピントロニクス　量子輸送理論　物性理論

研究成果報告内容ファイル

１．研究開始当初の背景

ナノスケール素子において、高速デバイス制御・光電子変換素子・スピントロニクスへの応用の視点から、素子の高速外場駆動が注目を集めている。単一電子源による量子光学類似現象や、光誘起トポロジカル相の探索、マイクロ波照射によるスピンポンピングなどは、その好例である。多くの理論研究が行われている一方で、素子の量子輸送領域を非平衡領域まで調べた研究は少ない。特にクーロン相互作用やスピン交換相互作用などの効果を微視的モデルによって調べる理論研究は少なく、未解明の問題を多く残していた。

また、これまでの理論研究の多くは電流やスピン流の平均値にのみ着目していたが、電流ゆらぎやスピン流ゆらぎに輸送に関する重要な情報が含まれることが知られており、これらの物理量の揺らぎについて理論研究の深化が望まれていた。

２．研究の目的

量子ドット系に着目し、外場駆動によって非平衡状態にある系の輸送理論の一般論を構築することを主な目的として、従来相互作用のない電子系で議論されてきたフロッケ理論や断熱ポンピングの理論を拡張し、クーロン相互作用の効果を取り入れることを主な目標とした。特に非平衡定常状態のより深い理論構造を理解するために、時間依存外場による非平衡状態間の遷移とそれによって生じる「過剰熱」を考え、操作論的熱力学の考え方によって量子ドットの非平衡状態を特徴づけることができないかを考察した。

また広い視野から高速駆動素子の輸送特性を考察した。具体的には強磁性絶縁体をマイクロ波で駆動したときに生じるスピン波の非平衡時間発展や、スピン流(スピンポンピング)の非平衡ゆらぎについて考察した。

さらにナノスケール素子を介した熱輸送についても考察し、熱浴の特性によって熱コンダクタンスの温度性がどのように変化するかを系統的に考察した。

３．研究の方法

一般論の構築には非平衡グリーン関数法を用いた。非平衡グリーン関数法(およびそこから導出される線形応答理論)に基づいて、種々の解析的近似手法(マスター方程式の方法やトンネルハミルトニアンの方法)を構築した。また並行して、連続時間量子モンテカルロ法による数値計算や、ベーテ仮説法による厳密解の結果を用いた。連続時間量子モンテカルロ法による数値計算では、物性研究所共同利用スーパーコンピュータを利用した。

４．研究成果

(1)　単一準位の量子ドット系について、強い周期外場下の輸送特性を研究した(雑誌論文[5])。非平衡ブリーン関数法とフロッケ理論を組み合わせて、クーロン相互作用がある場合の光支援電流ノイズを導出した。また具体的に自己無撞着ハートリー近似による計算を行い、クーロン相互作用の効果を調べた。得られた電流ノイズの振る舞いは、有効温度を用いることでよく理解できることを示した。またバーテックス補正の大きさを評価し、強い周期外場の影響を議論した。

(2)　強磁性絶縁体と金属の界面を作成し、金属と絶縁体の間に温度差をつけると、界面にスピン流が生じることが知られている(スピンゼーベック効果, 図 1 上図)。また、強磁性絶縁体にマイクロ波を加えて強磁性共鳴を起こさせると、界面にスピン流が生じる(スピンポンピング, 図 1 上図)。このように生成されたスピン流を使った情報伝達は、電流に比べてジュール熱発生によるエネルギー損失が抑制されるため、次世代省電力電子デバイス開発の基盤となると期待されている。通常は金属・磁性体の二層膜試料界面を通過するスピン流の平均値が議論されているが、本研究ではスピン流のゆらぎに着目し、界面におけるスピン流ゆらぎの理論を構築した。界面を記述する一般的なハミルトニアンを構築し、一般にスピン保存・スピン非保存の 2 種のスピン輸送プロセスがあることを示した。界面を記述するハミルトニアンを摂動とみなし、非平衡グリーン関数法を用いて 2 次摂動の範囲でスピン流およびその揺らぎの表式を導出し

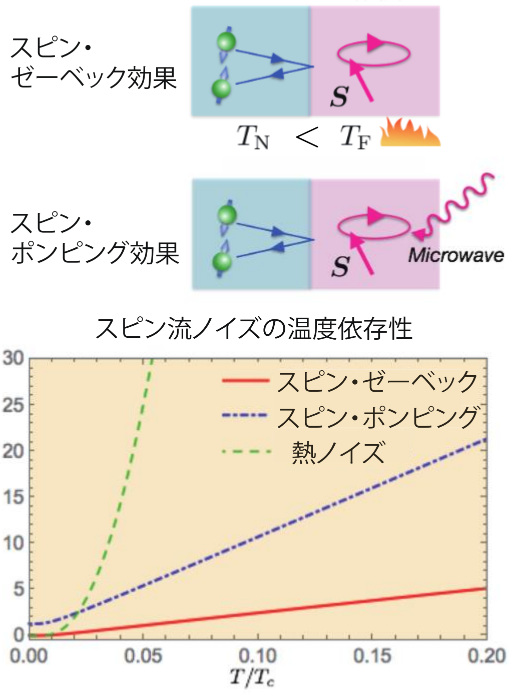

図１　２つのスピン流生成過程（上図）とスピン流揺らぎの温度依存性（下図）

た。この手法は、トンネル接合の電子輸送で用いられるトンネルハミルトニアンの方法と類似の手法である。得られたスピン流揺らぎの温度依存性を図 1 下図に示す。

スピン流ノイズを測定することにより、様々な情報をえることができる。例えば、スピンポンピングによるスピン流生成では、これまでマイクロ波照射による試料の発熱が問題となっていた。しかしスピン流とスピン流ノイズを同時に測定することで、スピンポンピングによるスピン流とスピンゼーベック効果によるスピン流を峻別することができることを初めて示した。また、スピン流ゆらぎとスピン流の平均値の比(ファノ因子と呼ばれる)を用いることで、輸送を担う素励起の有効スピンの大きさが測定できることも示した。スピン保存・スピン非保存プロセスの比はこの有効スピンの大きさから決定可能である。

スピントロニクスの分野では、金属における逆スピンホール効果を用いてスピン流を通常の電流に変換してスピン流を測定していることが多い。この逆スピンホール効果の変換効率はスピンホール角と呼ばれており、その測定はスピントロニクス分野で重要となっている。本研究では、スピン非保存プロセスが無視できる場合、ファノ因子が低温で普遍的な値になることに着目し、ファノ因子の測定から界面近傍のスピンホール角を決定できることを初めて示した。

本成果は Physical Review Letters 誌(雑誌論文[2])に出版された。

(3) ナノスケールサイズの加工・観測技術の発展により、量子ドット系での電荷や熱のポンピングが実現されるようになっている。系の緩和時間よりもゆっくりと操作を行うことで実現する「断熱ポンピング」は、周期操作の周波数に依らない一定量の電子や熱を一周期で輸送できるという特徴があり、ナノスケール回路における電流標準や冷却器といったデバイス応用を目的として活発な研究されている。一方で、断熱ポンピングでは駆動周期を系の特徴的な時間スケールより大きくとる必要がある。よって、量子ドット系で高速の断熱ポンピングを実現するには、電子浴と強く結合させて短い緩和時間をもつ量子ドットを用いるべきである。しかし、これまでの理論研究では、電子浴と量子ドットの結合が弱い領域(弱結合領域)の計算、もしくは、結合が強い領域(強結合領域)で結合強度を変化させる単純な断熱ポンピングの計算のみが行われていた。

そこで、電子浴の温度・化学ポテンシャルを時間変化させたときの強結合領域での断熱ポンピング(図 2 上図)を考え、電子浴と量子ドット内の量子準位の混成を厳密に取り込んだ上で、輸送される電荷量の計算を行った。時間変化する電子浴温度を記述するために thermomechanical field と呼ばれる、エネルギースケールを伸縮することで温度変化を実効的に記述する手法を採用した。まず電子浴のパラメータ駆動による断熱ポンピングには量子ドット内のクーロン相互作用が必要となることを示し、電子間クーロン相互作用の一次摂動の範囲で一周期あたりに輸送される電荷量を評価した(雑誌論文[4])。このタイプの断熱ポンピングでは、量子ドットが電子浴のパラメータに遅れて応答することにより電荷が輸送されることを初めて示し、その応答の遅れは量子ドットの動的抵抗によって理解できることを示した。

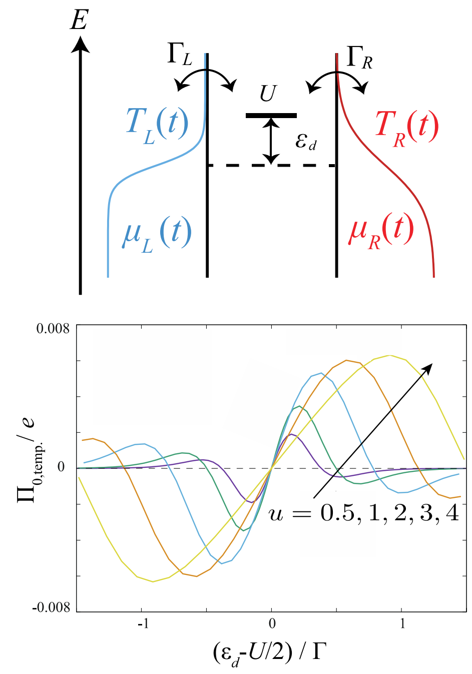

図２　考察する物理系の模式図（上図）と温度変調によるポンピング電荷量(下図) u はクーロン相互作用の強さ、横軸は量子ドットのエネルギー準位を表す

さらに、この理論研究を発展させ、任意のクーロン相互作用の強度を取り扱うことにできる一般理論を構築した(雑誌論文[1])。電子間相互作用については形式的な摂動展開を行い、任意の電子間相互作用の強さで成り立つ一般的な定式化を行った。その結果、断熱ポンピングの記述には、任意の 4 時刻に対する 2 体(4 点)グリーン関数が必要となることを初めて指摘し、その一般公式の導出に成功した。また繰り込まれた摂動論を用いて一周期あたりに輸送される電荷量を評価し、クーロン相互作用の影響をより詳細に調べることに成功した（図 2 下図)。

本研究の成果は、ナノスケール素子の輸送実験の理解に大きく寄与すると期待されるほか、コヒーレント輸送領域における非平衡統計力学の構築に寄与すると強く期待される。

(4) 近年の技術進歩に伴ってナノスケール素子を介した熱伝導測定が可能となり、ナノスケール素子の熱輸送が注目を集めている。二準位系を介した熱輸送(図 3 上図)は量子ドッ

ト系の電子輸送で現れる近藤効果などの現象と類似した輸送過程を持っていることが指摘されている。熱浴はスペクトル関数 $I(\omega)\propto\omega^s$ によって特徴付けられるが、オーミック熱浴(s=1)の理論研究が多く、サブオーミック(s<1)およびスーパーオーミック(s>1)の熱浴については十分な研究がされてこなかった。

本研究では、一般的の熱浴に対して二準位系を介した熱輸送を線形応答の範囲で考察し、熱コンダクタンスの温度依存性を連続時間量子モンテカルロ法によって評価した（図 3 下図)。また、3 つの異なる熱輸送プロセス(コトンネル過程、逐次トンネル過程、インコヒーレントトンネル過程)を考察し、それぞれの過程をよく記述する解析的な近似を構築し、数値計算と比較を行った。特にコトンネル過程の解析表式は、拡張斯波関係式から導かれるもので、本研究で初めて明らかにした普遍的な公式となっている。その結果、数値計算の結果は、この 3 つの近似的な解析表式とよく一致することを示した。さらに、インコヒーレントトンネル過程ではマルコフ近似による取り扱いが不正確な結果を与えることを見出し、非マルコフ性をとりいれた Non-Interacting Blip Approximation(NIBA)と呼ばれる手法が正しい解析表式を与えることを明らかにした。

本研究成果は、熱輸送の基礎的な理論として多くの実験結果の解釈の根拠を与えるとともに、非平衡熱輸送を考察する際の基礎を与えると期待される。本成果は現在投稿中であり、プレプリント(arXiv:1803.07987)が公表されている。

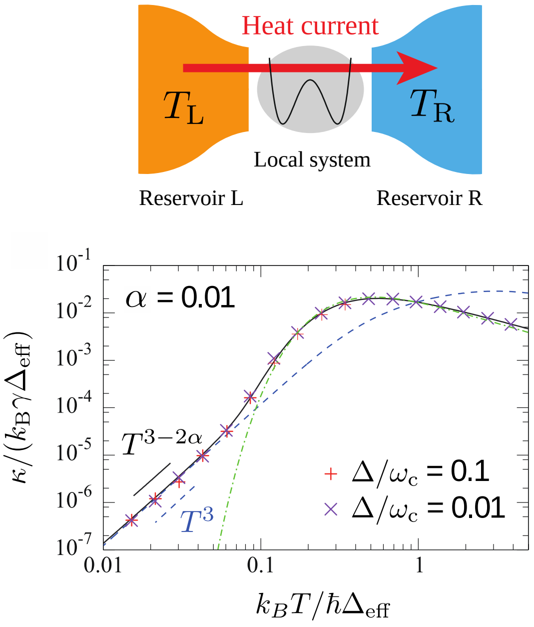

図３　考察する物理系の模式図（上図）と熱コンダクタンスの温度依存性（下図）点は数値計算、実線はインコヒーレントトンネル過程、破線はコトンネル過程、一点破線は逐次トンネル過程を表す。
子ドットのエネルギー準位を表す

(5)　強磁性絶縁体に強いテラヘルツ光を照射すると、スピンが光の磁場成分と相互作用し、磁性体の集団励起(マグノン励起)を引き起こすことが知られている。この現象は、磁性体を用いた高速駆動デバイスへの応用が期待されており、その詳しい特性評価は重要な課題となっている。磁性絶縁体 $ErFeO_3$ はマグノンの減衰が小さい物質であり、長時間のマグノン運動の観測が可能である。実験では通常のマグノン励起によるスピン歳差運動が観測されるが、それに加えて振動振幅の強弱（ビーティング)が観測された。実験家と協力して、このビーティングのメカニズム解明を試み、それがマイクロスケール磁性体の形状と強く相関することを突き止めた。本成果は Applied Physics Letters 誌に出版された(雑誌論文[3])。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

(1)　Masahiro Hasegawa and <u>Takeo Kato</u>, *Effect of Interaction on Reservoir-Parameter-Driven Adiabatic Charge Pumping via a Single-Level Quantum Dot System*, Journal of the Physical Society of Japan, vol. **87**, 044709(1-13) (2018), 査読有
DOI：10.7566/JPSJ.87.044709

(2)　Mamoru Matsuo, Yuichi Ohnuma, <u>Takeo Kato</u>, and Sadamichi Maekawa, *Spin Current Noise of the Spin Seebeck Effect and Spin Pumping*, Physical Review Letters, vol. **120**, 037201(1-5) (2017), 査読有
DOI：10.1103/PhysRevLett.120.037201

(3)　Hiroshi Watanabe, Takayuki Kurihara, <u>Takeo Kato</u>, Keita Yamaguchi, and Tohru Suemoto, *Observation of long-lived coherent spin precession in orthoferrite $ErFeO_3$ induced by terahertz magnetic fields*, Applied Physics Letters, vol. **111**, 092401(1-4) (2017), 査読有
DOI：10.1063/1.4985035

(4)　Masahiro Hasegawa and <u>Takeo Kato</u>, *Temperature-Driven and Electrochemical-Potential-Driven Adiabatic Pumping via a Quantum Dot*, Journal of the Physical Society of Japan, vol. **86**, 024710(1-13) (2017), 査読有
DOI：10.7566/JPSJ.86.024710

(5)　Takafumi J. Suzuki and <u>Takeo Kato</u>, *Effects of Coulomb interaction on photon-assisted current noise through a quantum dot*, Physical Review B, vol. 91, 165302(1-12) (2015), 査読有
DOI：10.1103/PhysRevB.91.165302

〔学会発表〕(計 16 件)

(1) 山本剛史, 加藤岳生, 齊藤圭司, *二準位系を介したフォノン輸送の連続時間量子モンテカルロ法による解析*, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018).

(2) 松尾衛, 大沼悠一, 加藤岳生, 前川禎通, *スピン流ショットノイズの理論*, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).

(3) 長谷川雅大, 加藤岳生, *単一準位量子ドットを介した断熱温度ポンピングにおけるクーロン相互作用の効果*, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).

(4) 島田典明, 加藤岳生, *量子モンテカルロ法を用いた 1 次元電子系中の不純物ポテンシャル問題の数値的研究*, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).

(5) 長谷川幸雄, Kim Howon, 永井佑紀, 加藤岳生, *Pb(111)/Mn5Ge3 界面における超伝導強磁性近接効果の STM 観察*, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).

(6) Takeo Kato, *Heat transport via a local two-state system*, Nanophysics, from fundamental to applications: reloaded (Vietnam 2017).

(7) Masahiro Hasegawa, *Formalism of temperature-driven adiabatic charge pumping via a single level quantum dot in coherent transport region*, Nanophysics, from fundamental to applications: reloaded (Vietnam 2017).

(8) 加藤聖也, 加藤岳生, 齊藤圭司, *二準位系を介した熱輸送特性における量子相転移*, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016).

(9) 長谷川雅大, 加藤岳生, *単一準位量子ドット系における断熱ポンピングの形式論*, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016).

(10) 加藤岳生, 和田義人, 桂法称, 堺和光, *近藤模型のベーテ仮設解と形状因子*, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016).

(11) Masahiro Hasegawa and Takeo Kato, *Temperature-driven and chemical-potential driven adiabatic pumping in coherent electron transport*, The 26th IUPAP International conference on Statistical Physics (STATPHYS26) (2016).

(12) Kato Masanari, Takeo Kato, Keiji Saito, *Heat transport via a local two-state system coupled to non-ohmic baths*, The 26th IUPAP International conference on Statistical Physics (STATPHYS26) (2016).

(13) 長谷川雅大, 加藤岳生, *量子ドット系における温度ポンプの理論*, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016).

(14) 加藤聖也, 加藤岳生, 齊藤圭司, *量子モンテカルロ法による二準位系を介した熱輸送特性の理論的評価*, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016).

(15) 河村光晶, Howon Kim, 長谷川幸雄, 加藤岳生, 尾崎泰助, *Pb(111)表面における原子接触領域での電気伝導の第一原理固有チャネル解析*, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016).

(16) 長谷川雅大, *量子ドット系における温度・化学ポテンシャル駆動断熱ポンピングの理論*, 理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」(2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
○出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
プレプリント：
Tsuyoshi Yamamoto, Masanari Kato, Takeo Kato, Keiji Saito, *Heat transport via a local two-state system near thermal equilibrium*, arXiv:1803.07987 (2018)
https://arxiv.org/abs/1803.07987

研究室ホームページ：
http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/kato_group.html

プレスリリース：
スピン流の雑音から情報を引き出す 〜スピン流高効率制御に向けた新手法〜
http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=4157

授賞：
共同研究者の長谷川雅大さんが理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」において最優秀ポスター賞を授賞。
http://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/TQFT/html2016/poster2016.html

６．研究組織
(1)研究代表者
加藤 岳生 (KATO, Takeo)
東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：80332956

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
阪野 塁 (SAKANO, Rui)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：00625022

(4)研究協力者
なし