

令和元年5月29日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26247051

研究課題名(和文)量子ホールエッジチャンネルの非平衡電荷ダイナミクス

研究課題名(英文)Nonequilibrium charge dynamics in quantum Hall edge channels

研究代表者

藤澤 利正 (Fujisawa, Toshimasa)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：20212186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、強磁場中の半導体二次元電子系のエッジチャンネルにおける電荷・無電荷輸送などの顕著な量子多体系の観測により、人工的な低次元構造中における非平衡電荷状態の動的制御方法を確立することを目的とした。計画どおりに、【1】人工的構造を用いた朝永ラッティンジャー流体の挙動(スピン電荷分離など)、【2】電荷を伴わない無電荷熱輸送の検出と解明、【3】エッジチャンネルと他自由度との相互作用に関する研究を順調に進めるとともに、より発展的な内容として、局所分数量子ホール領域での分数電荷トンネルや電子フォノン結合系の研究を含めて、プラズモン集積回路や量子情報伝達チャンネルとしての可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、低次元電子系、特にカイラル次元電子系に特有の電荷輸送・非電荷輸送を探求したという点に、学術的意義がある。通常の3次元系と異なり、非平衡状態が準安定的に存在できることは驚くべき結果であり、可積分モデルである朝永ラッティンジャー流体の特徴をよく表している。このような顕著な非平衡ダイナミクスは、様々な発展形が期待される。例えば、カイラル次元系、可積分次元系の性質は、プラズモン集積回路や量子情報伝達チャンネルとして応用できる可能性を秘めている点で波及効果の高い内容になっており、社会的意義をもたらす可能性が十分にある。

研究成果の概要(英文)：This project is aiming at understanding quantum many-body effects in charge and chargeless transport in edge channels of two-dimensional semiconductor systems in high magnetic fields and controlling non-equilibrium states in artificial low-dimensional electronic systems. We have successfully investigated Tomonaga-Luttinger behaviors like spin-charge separation, chargeless heat transport, and coupling to other degrees of freedom (phonons), as proposed initially. Extended works on fractional charge tunneling through a local fractional quantum Hall region and electron-phonon hybrid quantum systems were also performed. These works clearly encourage further studies on plasmon integrated circuits and quantum information channels in such systems.

研究分野：低次元電子系

キーワード：メソスコピック系 量子ホール効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高い電子移動度を有する半導体二次元電子系に強磁場を印加すると、整数量子ホール効果や分数量子ホール効果が現れることが知られている。これらは、試料中央のバルク領域は伝導に寄与せず、試料端に形成される一方向に伝導する一次元のエッジチャンネルによってよく説明される。この特徴的な振る舞いから、エッジチャンネルは散逸の少ないコヒーレント伝送路としての応用が期待されている。物理的にも、ランダウ量子化によって運動エネルギーが消失されている状況において、電子系は電子相関が支配的な領域になり、分数量子ホール状態(エニオン)に代表される多体現象が多く観測されている。従来の研究では、極低温における電子系の基底状態の相転移に注目した研究が多かったが、研究開始当初は、非平衡輸送における特徴的な相関現象が注目され始めている時期であった。

例えば、直流伝導では相互作用の無視できる電子伝導として説明される整数量子ホール系においても、高周波伝導では長距離の相互作用が顕著に現れ、電荷の集団励起であるプラズモン(電荷密度波)として伝搬することが知られていた。磁場によってエッジチャンネルに局在しているためエッジマグネトプラズモンと呼ばれ(以下、簡単のためプラズモンと称することにする)相互作用によってフェルミ速度よりも1~2桁速い電荷速度を示す。我々の研究を含め、エッジチャンネル間の相互作用が重要視されるようになり、チャンネル間相互作用に起因した相関現象が観測されるようになり注目されていた。そこで、本研究では、量子ポイント接合などの素子を用いて、エッジチャンネルに非平衡電子分布を形成し、チャンネル間の相互作用によって、電流を運ぶ電荷輸送モード、電荷を伴わない無電荷熱輸送モードの詳細を明らかにすることを目的とした。

このような量子ホールエッジチャンネルは、プラズモン工学への発展性も期待されている。後方散乱の抑制された一方向伝搬を用いた機能的なプラズモン回路やプラズモン結晶などの研究が期待できる。我々の研究においても、プラズモンの速度制御やビームスプリッタの基本特性、非線形効果による高調波発生などの成果を得ており、集積化プラズモン素子への期待が高まっていた。そこで、本研究では、動的な検出方法(低周波電流雑音測定、超高周波輸送現象)を用いて、エッジチャンネルの非平衡輸送(電荷モード、スピンモード、無電荷輸送、準粒子伝導)の理解を深め、設計自由度の高い人工構造により多体相関現象を顕著に引き出すとともに、エッジチャンネルによる超高周波領域のプラズモン集積回路や電子波干渉素子の設計指針を与えることを目指すこととした。

### 2. 研究の目的

上記の背景から、本課題「量子ホールエッジチャンネルの非平衡電荷ダイナミクス」では、強磁場中の半導体二次元電子系のエッジチャンネルにおいて、「人工的な構造中における非平衡電荷状態の動的現象の観測により、電荷・無電荷輸送など顕著な量子多体現象を実現する」ことを目的とした。

具体的には、低周波電流雑音測定、時間分解・周波数分解の超高周波輸送現象、理論解析によって、整数及び分数量子ホール領域における、【1】人工的構造を用いた朝永ラッティンジャー流体の挙動(スピン電荷分離など)の観測、【2】電荷を伴わない無電荷熱輸送の検出と説明、【3】エッジチャンネルと他自由度との相互作用に関する研究を進めることとした。これらの非平衡電荷ダイナミクスの物性研究により、プラズモン集積回路や量子情報伝達チャンネルとしての可能性を探求することができると考えた。

### 3. 研究の方法

実験研究においては、電子ビーム露光などの微細加工技術により GaAs/AlGaAs ヘテロ構造に量子構造を形成した試料を作製し、極低温での電子輸送特性・高速パルス測定・低周波雑音測定などの手法により、低次元電子系の非平衡電荷ダイナミクスを測定した。理論研究では、ボゾン化・再フェルミオン化により朝永ラッティンジャー流体の非平衡状態を調べるとともに、相互作用をモデル化した数値計算により実験との対応を行った。

### 4. 研究成果

当初に計画していた【1】~【3】に加え、【4】当初の計画になかった発展的な研究を含めて、以下の成果を得た。

#### 【1】人工的構造を用いた朝永ラッティンジャー流体の挙動

占有率2の量子ホールエッジチャンネルにおいては、スピンアップとダウンの2つのチャンネルが並走しており、カイラル朝永ラッティンジャー流体の研究舞台として適している。チャンネル間の相互作用によって、電荷モードとスピンモードに分離する(スピン電荷分離)と予測されていたが、実験的に調べることは困難であった。

本研究では、スピン偏極時間分解電荷測定法により、電荷モード・スピンモードの特定に成功した[NaturePhys2017]。まず、高速電圧パルス印加による電荷波束の注入と、局所的に占有率1の状態をつくることで形成されるスピンフィルターを組み合わせることで、スピン偏極電荷波束を生成した。この波束は、カイラル朝永ラッティンジャー流体を伝搬するときに、電荷モードの波束とスピンモードの波束に分裂する。このスピン電荷分離を、スピンフィルターと時間分解電荷測定を組み合わせたスピン偏極時間分解電荷測定法によ

り観測した。この手法はスピン分解オシロスコープとも呼べる画期的な手法である。図1の模式図に示すように、明瞭なスピン波束と電荷波束の分離を観測することに成功した。この結果の解析から、電荷モード・スピンモードのスピンの混合比率や伝搬速度、さらにはこの系の相互作用パラメーター（3つ）を特定することにも成功し、カイラル朝永ラッティンジャー流体で本質となる全ての情報を得た。

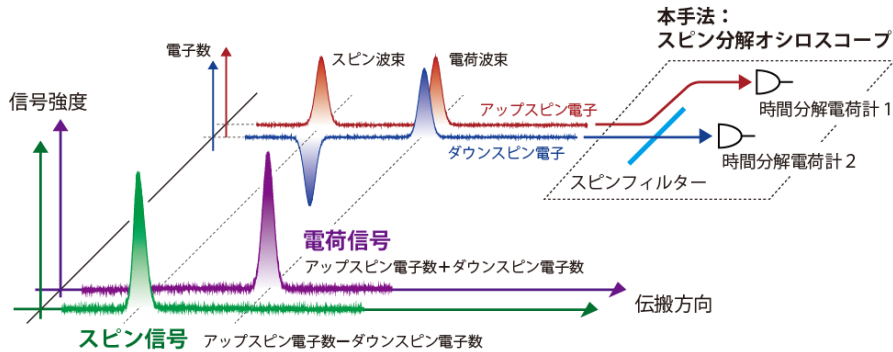


図1 スピン分解オシロスコープによるスピン電荷分離の観測(模式図)。下図のスピンモードの信号と電荷モードの信号は、上図のスピン分解の電荷信号(電子数)のように観測することができる。

さらに、朝永ラッティンジャー流体の特徴は、このモデルの可積分性(厳密に解くことのできる多体系)に起因して、準安定の非平衡状態があることである。従来、可積分系の性質を調べることのできる実験系は、冷却原子などの極限状態に限られていたが、量子ホールエッジチャンネルによる朝永ラッティンジャー流体で、準安定非平衡状態の観測に成功した[PhysRevLett2018]。まず、図2(a)のように量子ドット接合(QPC)からスピン偏極した電子を朝永ラッティンジャー流体に注入することで初期状態[図2(b)の(i)(ii)]を形成した。この初期状態は、相互作用によりスピン電荷分離を起こし、一見すると、2つのチャンネル間のエネルギー移動で熱平衡状態に近づくようにも思われる。しかし、可積分性ゆえに、熱平衡状態に達することはなく、長寿命の準安定非平衡状態に留まる[図2(b)の(i')(ii')]。この様子を、量子ドットによるエネルギー分光器でエネルギー分布関数を測定したところ、熱平衡状態のフェルミ分布関数とは異なり、高エネルギー側に裾をもつ arctan 型のエネルギー分布関数を示すことを明らかにした[図2(b)の(ii')(ii'')]。この様子は、理論予測とよく一致しており、数  $10\mu\text{m}$  の長い距離を伝搬することができる。この準安定非平衡状態は多くの保存量を有していると考えられ、様々な応用が期待される。

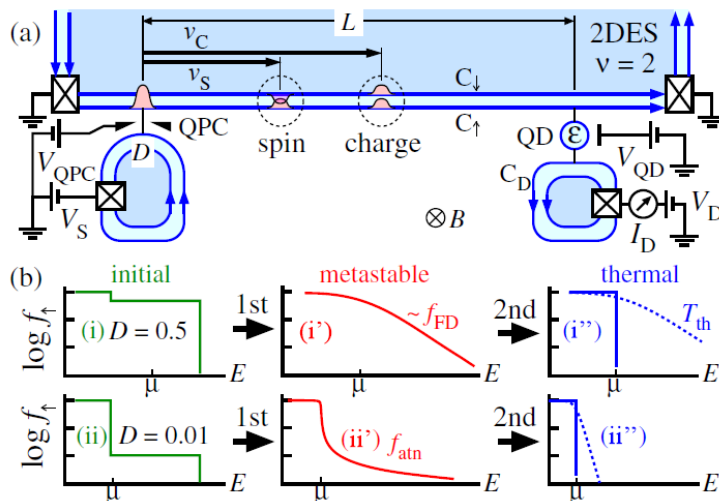


図2 量子ドット分光による準安定非平衡状態の観測。(a)試料の模式図。(b)エネルギー分布関数の模式図。透過率  $D$  の大きい条件(i)(i')(i'')と、小さい条件(ii)(ii')(ii'')の伝搬距離依存性を表している。

量子ホール系での研究をカイラルでない通常の朝永ラッティンジャー流体に適用するため、占有率2の量子ホール系を2つ用意して、静電的に結合することでノンカイラルな朝永ラッティンジャー流体を実現した。この場合においては、4つのモード：右向き・左向きの電荷・スピンモードに分裂することが期待される。この人工的な朝永ラッティンジャー流体においても、準安定非平衡状態が出現することを明らかにした[PhysRevB2016]。解析では、再フェルミオン化の近似により、二つの温度の電子液体が共存する状態として理解できることを示し、実験結果との良い一致を確認した。可積分性による保存量の多さを反映している結果として注目される。

## 【2】電荷を伴わない無電荷熱輸送の検出と解明

量子ホール系のエッジチャンネル間の相互作用により、電荷を伴わない無電荷熱輸送モードが出現しうる。その代表的な例は、【1】の成果で明らかになったスピンモードである。図1のスピン分解オシロスコープによる結果は、電荷のない(小さい)モードが存在していることを明瞭に検出できている。また、図2の量子ドット分光においても、理論との一致は無電荷輸送の存在を支持するものであり、朝永ラッティンジャー流体モデルの正当性を示している。このように、整数量子ホール系の無電荷輸送の検出と解明が十分になされたと考えている。

より顕著な無電荷熱輸送は、分数量子ホール系で期待されている。例えば、占有率  $2/3$  の分数量子ホール系で、通常のカイラリティと逆方向に伝搬する熱輸送モードがあると考えられている。しかし、分数量子ホール系の無電荷輸送モードは寿命が短く、その詳細を測定することは容易ではない。本研究では、まず、正確な寿命を評価するため、占有率  $1$  の整数量子ホール系の中に占有率  $2/3$  の分数量子ホール系が存在する入れ子式のホールバナー構造を考案し、無電荷輸送モードの寿命を測定することに成功した[PhysRevB2019]。従来、無電荷輸送モードの寿命測定には、バルク状態に散乱がないことが前提になっていたが、短い寿命を測定する試料では、必ずしもこの前提は成り立たない。我々の手法では、バルクの散乱と無電荷輸送モードの寿命の両方を評価できるため、幅広い条件下で無電荷輸送モードを評価することができる。

また、占有率  $2/3$  の無電荷モードと相補的な関係にある新規な系を探索するため、占有率  $1$  の整数量子ホール状態と占有率  $1/3$  の分数量子ホール状態が狭い領域で接合した構造を作製し、自発的に対向エッジ状態が生じることを明らかにした[学会発表、論文準備中]。分数エッジ状態による信号伝送を解明するために、量子ホール接合系が有用な実験プラットフォームとなることと考えられる。

さらに、整数量子ホール系で培った実験技術(高速パルス実験、エネルギー分光実験)を適用することで、分数量子ホール系の無電荷輸送モードを同定できるものと期待される。無電荷輸送モードの寿命を延ばす工夫、短い伝搬距離での測定を可能にする実験技術の開発に取り組んでおり、今後の進展を目指す。

## 【3】エッジチャンネルと他自由度との相互作用に関する研究

上記の【1】【2】においては、低エネルギー( $10\mu\text{eV}$  から  $1\text{meV}$  程度)の電子励起に注目して、電子間のクーロン相互作用に起因する多体効果を探求してきた。それ以上高いエネルギー領域での相互作用については、これまであまり注目されていなかった。通常、エネルギーが高いほど、電子電子散乱が顕著になり、緩和を測定することも難しくなる。本研究では、さらに高いエネルギー( $10\text{meV}$  から  $200\text{meV}$  程度)の電子励起に着目し、電子電子散乱や光学フォノンとの散乱に関する知見を得た[PhysRevB2019]。興味深いことに、エネルギーが高いほど電子電子散乱が抑制される。これは、エッジチャンネルの緩やかに変化するポテンシャルに起因して、運動量保存による抑制効果と、電子間の距離が増大することによるクーロン相互作用の減少が効いていると考えられる。光学フォノン散乱については、エッジポテンシャルの傾き(電場)に依存しており、電場の抑制によって光学フォノン散乱を抑制できることを示した。

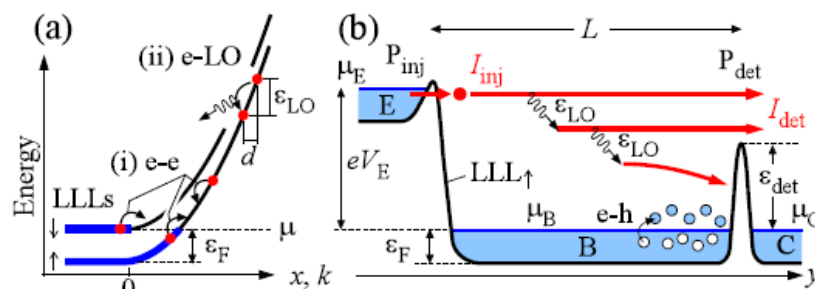


図3 エッジチャンネルの電子電子散乱と光学フォノン散乱の解析 (a) エッジチャンネルのポテンシャルと緩和過程(模式図): (i)電子電子散乱と(ii)光学フォノン散乱。(b)ホットエレクトロン分光測定の様式図

理論研究では、朝永ラッティンジャー流体において、通常は無視されるスピン軌道相互作用の効果について検討を行った。群速度などが繰り込まれる効果があるものの、基本的な特性はほとんど変化しない事がわかった。

さらに、エッジチャンネルがもたらす時間的な摂動がそれと結合した量子ドットの伝導にどのような影響を与えるかについて理論的な解析を加えた。特に断熱的変動の場合に現れる幾何学的効果による輸送を明らかにした。また量子ドット近傍に局在した非平衡フォノン分布が量子ドットのダイナミクスに与える影響を調べた。また従来その起源が不明であったエッジチャンネルの固有減衰レートを古典的な解析ではあるが、エッジ電流が作る局

所磁場の効果を取り入れることにより初めて理論的な解析を加えた。

#### 【4】当初の計画になかった発展的な研究

整数量子ホール効果と分数量子ホール効果は、異なる磁場領域(占有率)で現れるため、両者が共存する効果を観測するためには工夫が必要である。本研究では、整数量子ホール領域における量子ポイント接合の中に、微小な局所分数量子ホール領域が出現し、分数電荷トンネルが生じることを明らかにした[PhysRevLett2015]。電流の相互相関雑音特性により、電荷  $e/3$  のショット雑音が発生していることを見出した。この結果は、バルクが整数量子ホール領域であっても、分数電荷に関わる実験が可能になった点で、意義が高く、発展性のある内容である。

通常、電子系とフォノン系の結合は、緩和などの好ましくない効果をもたらす。本研究では、電子フォノン結合を積極的に活用するため、フォノンを閉じ込めるフォノン共振器の中に、電子を閉じ込める量子ドットを配置することで、フォノン版の共振器電磁気学の研究を推進した[ScientificReport2015]。GaAs 表面に周期的電極を形成することでブラッグ反射型の表面弾性波フォノンの共振器を作製し、二重量子ドットのフォノン支援トンネルが共振器によって増強される様子を観測することに成功した。電子とフォノンがコヒーレントに結合できる可能性がある点で、興味深い結果である。

さらに、二電子系の二重量子ドットを用いることで、電子とフォノンがコヒーレントに結合したラビ分裂を観測することに成功した[PhysRevB2017]。二電子系のパウリスピン閉塞の条件下において、スピン保存トンネルに関するラビ分裂を、弱いスピン反転トンネルによって観測する手法を考案し、電子系の測定によってラビ分裂を観測できる点でも興味深い。さらに、GaAs 上の金属修飾を選ぶことで、フォノン共振器特性を向上でき、真空ラビ分裂を観測できる可能性があることを示唆した。

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 31 件)

- [1] Chaojing Lin, Ryota Eguchi, Masayuki Hashisaka, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, "Charge equilibration in integer and fractional quantum Hall edge channels in a generalized Hall-bar device", Phys. Rev. B 99, 195304-1-9 (2019). 査読有
- [2] Tomoaki Ota, Shunya Akiyama, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, "Spectroscopic study on hot-electron transport in a quantum Hall edge channel", Phys. Rev. B 99, 085310-1-8 (2019). 査読有
- [3] Kosuke Itoh, Ryo Nakazawa, Tomoaki Ota, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, "Signatures of a Nonthermal Metastable State in Copropagating Quantum Hall Edge Channels", Phys. Rev. Lett. 120, 197701 (2018). 査読有
- [4] Y. Sato, J. C. H. Chen, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Two-electron double quantum dot coupled to coherent photon and phonon fields", Phys. Rev. B 96, 115416 (2017). 査読有
- [5] M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki and T. Fujisawa, "Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Luttinger liquid", Nature Physics 13, 559-562 (2017). 査読有
- [6] K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, and T. Fujisawa, "Long-lived binary tunneling spectrum in the quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquid", Phys. Rev. B 93, 075304 (11 pages) (2016). 査読有
- [7] J. C. H. Chen, Y. Sato, R. Kosaka, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Enhanced electron-phonon coupling for a semiconductor charge qubit in a surface phonon cavity", Sci. Rep. 5, 15176 (2015). 査読有
- [8] M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Shot-noise evidence of fractional quasiparticle creation in a local fractional quantum Hall state", Phys. Rev. Lett. 114, 056802 (2015). 査読有

〔学会発表〕(計 87 件)

- [1] (INVITED) Y. Tokura, "Adiabatic and diabatic dynamics in quantum systems" Int. Symp. Frontiers of Quantum Transport in Nano Science (QTNS) (2018)
- [2] (INVITED) T. Fujisawa, "Non-equilibrium dynamics in a quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid", The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2018) (2018).
- [3] (INVITED) T. Fujisawa, "Double Quantum Dot Coupled with a Phonon Resonator", International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics (ISNTT2017) (2017).
- [4] (INVITED) T. Fujisawa, "Non-equilibrium charge and spin dynamics in a quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid", Topological Material Science TOPO MAT Meeting (2016)
- [5] (INVITED) Y. Tokura, "Dynamical quantum transport in nanostructures", 6th Int.

Quantum Science Symposium Europe-2016 Meeting, Peterhouse, (2016).

[6] (INVITED) M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Time-domain observation of spin-charge separation in copropagating quantum Hall edge channels", The 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-22) (2016).

[7] (INVITED) M. Hashisaka, "Fractional quasiparticles in a local quantum Hall system", Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR) (2016).

[8] (INVITED) T. Fujisawa, "Cavity quantum acoustics with a double quantum dot", SPICE Workshop Quantum Acoustics - Surface Acoustic Waves meets Solid State Qubits (2016).

[9] (INVITED) T. Fujisawa, "Charge dynamics in quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid", China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2016) (2016).

[10] (INVITED) M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa, "Time-domain observation of spin- and charge-wave packet separation in chiral one-dimensional channels", Energy Material Nanotechnology (EMN) meeting on Optoelectronics (2016).

[11] (INVITED) T. Fujisawa, D. Imanaka, S. Sharmin, M. Hashisaka, and K. Muraki, "Exchange-induced spin blockade in a double quantum dot", O-12, International Workshop : Quantum Nanostructures and Electron-Nuclear Spin Interactions (2015).

[12] (INVITED) M. Hashisaka, "Fractional charge tunneling through a local fractional quantum Hall system measured using cross-correlation noise measurements", New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPMSP) (2015).

[13] (INVITED) M. Hashisaka, "Creation of Fractional Quasiparticles in a Tunneling Process through a Local Fractional Quantum Hall System ", Kwant workshop (2015).

〔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〕

ホームページ等

藤澤利正研究室

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>

都倉康弘研究室

<http://www.u.tsukuba.ac.jp/~tokura.yasuhiro.ft/index.html>

量子固体物性研究グループ

<http://www.brl.ntt.co.jp/group/butsuryo-g/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：都倉 康弘

ローマ字氏名：Yasuhiro TOKURA

所属研究機関名：筑波大学

部局名：数理物質系

職名：教授

研究者番号(8桁)：20393788

研究分担者氏名：橋坂 昌幸

ローマ字氏名：Masayuki HASHISAKA

所属研究機関名：日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所

部局名：量子電子物性研究部

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：80550649

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：秦 徳郎

ローマ字氏名：Tokuro Hata

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。