

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540320

研究課題名（和文） メゾスコピック系のスピントルク効果

研究課題名（英文） Spin Torque Effect in Mesoscopic Systems

研究代表者

服部 公則 (HATTORI KIMINORI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：80228486

研究成果の概要（和文）：

固体中の電子スピンを自由自在に操作するための方法論として、本研究ではメゾスコピック系のスピントルク効果とスピントルク効果に着目し、以下の重要な知見を得た。ラッシュバ系のスピントルク効果は巨大な純粋スピントルクをポンプする。量子ドットからポンプされるスピントルクにはスピントルク状態を反映したラビ振動が発生する。量子細線ではスピントルクを保存するスピントルク軌道結合により量子スピントルク効果が発現する。量子スピントルク系のスピントルク輸送は磁気的乱れに対してもロバストである。

研究成果の概要（英文）：

Spintronics is a burgeoning field in condensed matter physics which aims to harness electron spin in addition to charge in solid-state systems. Many ideas for achieving this goal have been proposed to date. Among these, spin torque effect and spin Hall effect in mesoscopic systems are extensively investigated in this study. We obtain the following important results. The spin torque effect occurring in Rashba spin-orbit (SO) coupled systems efficiently produces a pure spin current which is orders of magnitude larger than ordinary spin Hall currents. Reflecting time evolution of spin state, a Rabi oscillation is exhibited in transient spin current pumped from a ESR-driven quantum dot. Helical edge states are formed in a harmonic quantum wire due to the SO interaction induced by lateral confinement, yielding the quantum spin Hall (QSH) effect. Quantized charge transport in the QSH system is destroyed by any weak magnetic disorder, whereas quantized and conserved spin transport survives magnetic disorder as long as bulk insulating gap remains intact.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：固体物理

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：スピントルク、メゾスコピック系、スピントロニクス、スピントルクポンピング、量子スピントルク効果

## 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスでは、電子の電荷に加えスピン自由度の積極的な利用によって、これまでにない機能を有するデバイスの実現を目指している。強磁性金属から成る磁気デバイスは、メモリーやセンサーとして既に実用化されている。これらに加えて、より制御性に富む半導体ベースのスピン機能素子の実現は、スピントロニクスのもつ可能性を格段に押し広げるものと期待される。スピン利用を考えるならば、その前提条件として、対象とする系にスピンを注入あるいは生成する必要がある。このための方法論としてスピントルク効果は極めて魅力的である。磁気エレクトロニクス分野で広範な研究がなされているスピン移行トルクはその一例であろう。しかしながら、非磁性メゾスコピック系のスピントルク効果は本研究の開始当初ほぼ未踏の研究分野であった。

## 2. 研究の目的

非磁性体に発現するスピントルクは、系が外界からスピン角運動量を受け取る外場誘起トルクと系固有のスピン軌道結合によりもたらされる内因性トルクに分類できる。スピントルク効果によるスピンポンピングはスピン非保存の積極的利用と言える。電荷カレントを定常的に供給する電池には、電荷保存のため常に正負両極必要である。これに対し、スピンポンプからは定常的にスピнкаレントが放出される。すなわち、スピンポンプは単極のスピン電池として動作する。一方で、スピントルクが巧妙に除去される特殊なスピン軌道結合系も興味深い研究対象である。量子ドット・量子細線などの伝統的なメゾスコピック系では横方向閉じ込めポテンシャルによりスピンを保存するスピン軌道相互作用が発生する。その効果は異なるスピン状態で符号反転する面直な軌道磁場のそれと同等になり、時間反転対称性を保持した量子スピンホール効果が期待される。本研究では、メゾスコピック系に発現するスピントルク効果、それを利用したスピнкаレントのポンピング、ならびにスピントルク消去により発現する量子スピンホール効果の解明を目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) ラッシュバ系におけるスピнкаレント駆動スピンポンピング：ラッシュバ・ドレッセルハウス型スピン軌道結合系のスピントルクおよびスピнкаレントに関する解析理論の整備を進めるとともに、非平衡グリーン関数

を用いた数値計算によりスピнкаレント駆動スピンポンピング機構の定量的解明を遂行する。数値計算においては、スピン軌道結合強度、フェルミエネルギーなどをパラメータとし、リードで検出されるスピнкаレントと電荷カレント、ならびに系内部の局所物理量（電荷密度、電荷カレント密度、スピン密度、スピнкаレント密度、スピントルク密度）を詳細に調べる。

(2) パルス ESR で駆動された量子ドットからのスピンポンピング：パルス ESR により量子ドットからポンプされるスピнкаレントの実時間ダイナミクスの解明を試みる。スピнкаレントの連続の式あるいはスピンブロッホ方程式の構造を考えれば、時間依存スピнкаレントとスピン状態の時間発展との直接対応が期待される。すなわち、スピンポンピングはドットスピンのリードアウト技術ともなり得る。理論計算においては、非平衡グリーン関数および縮約密度行列を用いて、時間依存スピнкаレントの励起強度、温度、クーロン相互作用などに対する依存性、ならびにスピン状態の時間発展との対応を詳細に調べる。

(3) 量子細線における量子スピンホール効果：スピン軌道結合による量子スピンホール効果の理論的検討に着手する。対象は量子ドット・量子細線などの伝統的メゾスコピック系である。これらの系では横方向閉じ込めによりスピンを保存するスピン軌道結合が発生し、時間反転対称性を保持した量子スピンホール効果の実現が期待される。量子スピンホール系では、逆向きスピンを逆方向に輸送するヘリカルエッジ状態が形成され、同時にスピンホール抵抗が整数量子化される。時間反転対称なクラマースペアで構成されるヘリカルエッジは時間反転対称な摂動に対して本質的にロバストとなる。このような諸特性は非平衡グリーン関数による数値計算にて定量的に検証する。

(4) 磁氣的に乱れた量子スピンホール系の電荷・スピン輸送：量子スピンホール系における電荷・スピン輸送特性の理論解析に取り組む。まず、スピン非保存系のランダウアー公式について各種バイアス環境を想定した理論的な整備を行う。次に、磁氣的乱れを導入した量子スピンホール系の電荷・スピン輸送特性を非平衡グリーン関数に基づいて詳細に数値解析する。加えて、外部磁場による軌道効果でスピン分裂した量子スピンホール系についても同様な解析を試み、電荷・スピン輸送およびスピニコヒーレンスの観点において定量的理解と物理的洞察を進める。

#### 4. 研究成果

(1) ラシュバ系におけるスピнкаレント駆動スピンプンピング：スピノ軌道結合系において、一般にスピンは保存量でなく、スピノカレントの連続の式にはソース（あるいはシンク）項としてスピントルクの寄与が現れる。本研究では、反転対称性の欠如した2次元電子系に生じる k-linear なラシュバ・スピノ軌道結合系では、スピントルクもまた k-linear であり、スピントルクとスピノカレントの間には単純な線形関係が存在している。スピノカレントの連続の式からは、この場合、スピノカレント注入による静的状況でのスピノカレント生成という興味深いスピントルク効果の発現が予測される。

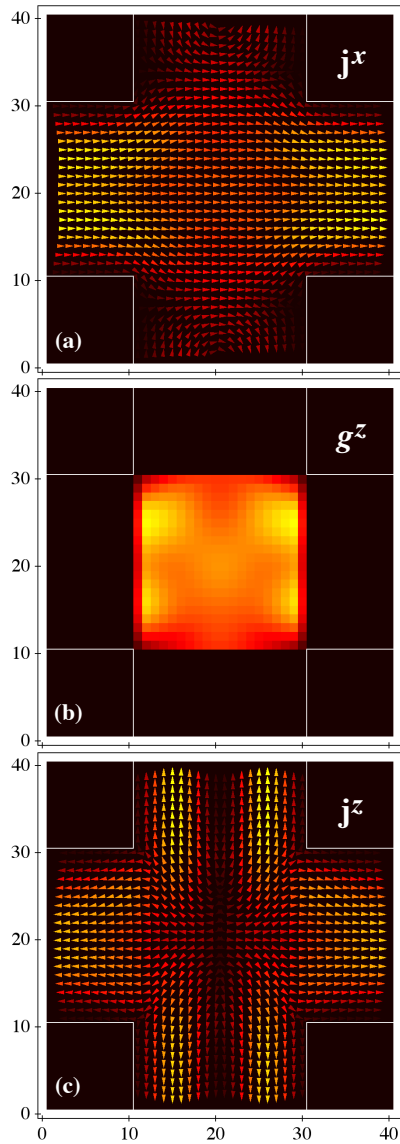


図1 4端子ラシュバ系の局所スピノカレントと局所スピントルク

本研究では、スピノ偏極リードを取り付けたラシュバ・スピノ軌道結合系について非平衡グリーン関数解析を実行し、局所スピントルクと局所スピノカレントの微視的対応関係を明らかにするとともに、スピントルク効果により系外部にポンプされる純粋スピノカレントが通常のスピノホール効果に比して桁違いに大きくなることを示した。図1は4端子系の局所スピノカレント  $\mathbf{j}^{x,z}$  と局所スピントルク  $g^z$  の計算結果の一例である。左右のリードは  $S^x$  方向にスピノ偏極しており、これらの間にスピノ偏極した電荷カレントが流れている。注入されたスピノカレント  $\mathbf{j}$  は、中央のスピノ軌道結合部分においてスピントルク  $g^z$  を誘起し、これに伴い発散的なスピノカレント  $\mathbf{j}$  が生成されている。上下のリードは無偏極であり、そこで純粋なスピノカレントが検出される。

(2) パルス ESR で駆動された量子ドットからのスピノポンピング：量子ドットに捕獲された電子のスピノ操作およびスピノ測定に関しては、量子情報処理並びにスピノトロニクス応用の観点から、これまでに広範な研究がなされている。このコンテキストにおける共通の課題は異なるスピノ固有状態のコヒーレントな任意の重ね合わせをオンデマンドで構成することである。パルス ESR はそのための標準的方法論として位置づけられ、実際、ESR 磁場に駆動されたコヒーレントなスピノ Rabi 振動は電荷コンダクタンスのサンプリングによりモニターされている。一方、ESR 磁場は系のスピノ保存を破り、スピントルクに起因したスピノカレントが量子ドットから流出する。ただし、CWESR で生成されるスピノカレントは直流であり、そこからドット電子の有意なスピノ情報は読み取れない。本研究では、パルス ESR でポンプされるスピノカレントの実時間ダイナミクスを、非平衡グリーン関数および縮約密度行列を用いて定量的に解明し、時間依存スピノカレントとドットスピノの時間発展との対応関係を明らかにした。この対応は、スピノカレントの連続の式あるいはブロッホ方程式の必然的帰結として理解される。図2はパルス ESR により量子ドットから流出する時間依存スピノカレントの励起強度依存性である。パルス幅は  $\tau = 6/\Gamma$  に設定されている。パルス照射に伴い、ドットスピノは回転磁場の Larmor 周波数  $\omega_1$  で Rabi 振動する。この振動は過渡的スピノカレント  $J^z(t)$  に直接反映されている。Rabi 振動はリードとの結合  $\Gamma$  により次第に減衰し、対応して  $J^z(t)$  は CW 値に向け緩和していく。パルス照射後 ( $t > \tau$ ) に見られる  $J^z(t)$  の指数関数的減衰はスピノに関する一種の放電現象である。

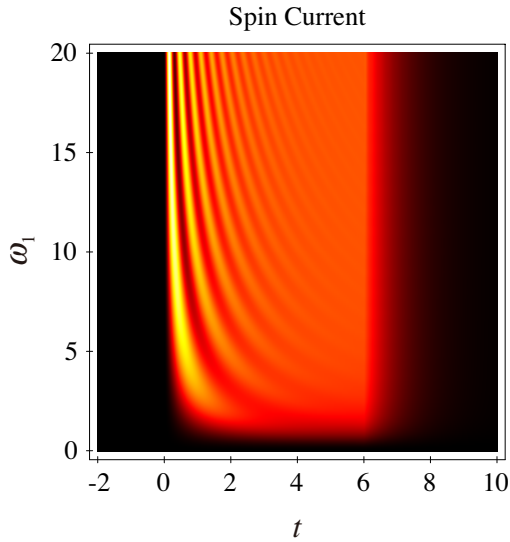


図 2 量子ドットからポンプされる時間依存スピントレントの励起強度依存性

(3) 量子細線における量子スピンホール効果：スピン軌道相互作用の一般形は  $H_{so} = (\lambda/\hbar)\nabla U \cdot (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{p})$  であり、これから軌道自由度と結合するベクトルポテンシャル  $\mathbf{A} = (m\lambda/\hbar)\boldsymbol{\sigma} \times \nabla U$  を定義できる。2次元電子が感じる静電ポテンシャル  $U(x,y)$  に対しては実質  $\mathbf{A} = (m\lambda/\hbar)(\mathbf{e}_z \times \nabla U)\boldsymbol{\sigma}_z$  でありスピン  $S_z$  は保存量となる。対応する仮想磁場は  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{e}_z (m\lambda/\hbar)\nabla^2 U \boldsymbol{\sigma}_z$  と書かれ、結果としてスピンの依存した軌道効果が発現する。本研究では、このような機構に基づく量子細線の量子スピンホール効果に着目した。量子細線構造のスピン軌道結合は横方向閉じ込めポテンシャルに起因する。調和ポテンシャルの場合、空間的に一様な軌道磁場はランダウ量子化をもたらすと同時に、時間反転対称性を反映した（逆向きスピンを逆方向に輸送する）ヘリカルなエッジ伝搬モードを形成する。その自然な論理的帰結としての正逆量子スピンホール効果の発生は、非平衡グリーン関数による数値計算で定量的に実証された。また関連して、電荷→スピンおよびスピン→電荷変換たるこれら一対の効果が（オンサガの相反定理によらず）スピン保存の必然として等価になることを明らかにした。図 3 は縦コンダクタンス  $G_{13,13} = G_{13,13}^{++} = G_{13,13}^{--}$  とスピンホール抵抗  $R_{13,42} = R_{13,42}^{+-} = R_{13,42}^{-+}$  のフェルミエネルギー依存性である。符号  $\pm$  はそれぞれ電荷・スピン成分を表す。計算では、量子細線にホールプローブを取り付けた4端子配置において、電荷（スピン）カレントを端子13間に流し、スピン（電荷）バイアスを端子42間で検出するケースを想定している。スピン保存に基づく電荷・スピンの相反性のため、正逆スピンホール効果は互いに等価となっている。

$\eta = \lambda/\ell^2$  は閉じ込め長  $\ell = \sqrt{\hbar/m\omega_0}$  で規格化したスピン軌道結合強度である。 $\eta \approx 1$  において、スピンホール抵抗の量子化  $R_{13,42} = h/ve^2$  ( $v=1,2,3,\dots$ )が見られる。

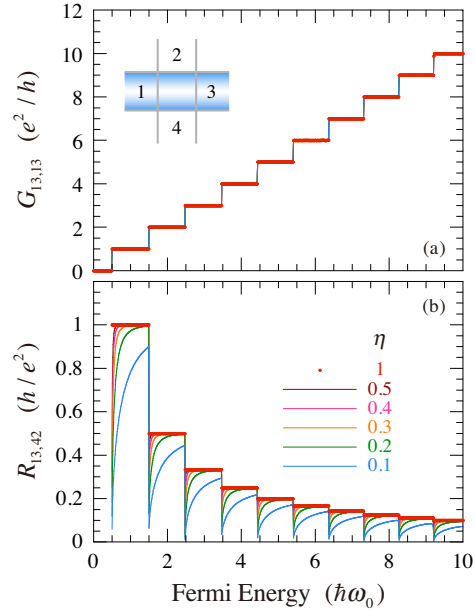


図 3 縦コンダクタンスとスピンホール抵抗のフェルミエネルギー依存性

(4) 磁氣的に乱れた量子スピンホール系の電荷・スピン輸送：量子スピンホール (QSH) 系では逆向きスピンを逆方向に輸送するヘリカルエッジ状態が形成される。この状態は量子ホール (QH) 系に存在するカイラルエッジ状態の時間反転対称な合成と見なせる。一般に、ヘリカルエッジ状態は時間反転対称な摂動、例えば非磁性不純物による散乱に対してロバストである。しかしながら、時間反転対称性を破る磁氣的な乱れに対してはそうは言えない。本研究では、磁氣的に乱れた QSH 系の電荷・スピン輸送を、非平衡グリーン関数を用い定量的に調査した。図 4 は QSH 系と QH 系における電荷・スピンコンダクタンスのフェルミエネルギー依存性である。計算にはランダウ準位モデルを採用し、磁氣的な乱れはランダムな局所磁場で導入している。このように、QSH 系の電荷コンダクタンス (a) は磁氣的な乱れに極めて鋭敏であり、量子化は熱力学的極限において任意の弱い乱れにより崩壊する。一方、スピンコンダクタンス (c) に関しては、特定のバイアス環境のもと（バルクギャップが存続する限り）量子化が維持される。これら対照的特徴は、ヘリカルエッジ状態に許容なスピン反転後方散乱の物理的帰結として理解できる。このタイプの散乱では、電荷フラックスは反転するがスピンフラックスは反転しないからである。なお、スピンコンダクタンスの量子化は、ヘリカルエッジモードに固有な S 行列のユニタリティに結びつけられるため、散乱過程の詳細には

依存しない。図 5 には磁氣的に乱れた QSH 系の局所状態密度を示している。ランダウ準位モデルではエッジ分散がギャップ中に縮退点をもたないため、エッジ状態が磁氣的散乱により混合してもギャップは開いていない。このようなヘリカルエッジ状態の安定性は本研究で提唱された QSH 効果の特徴である。

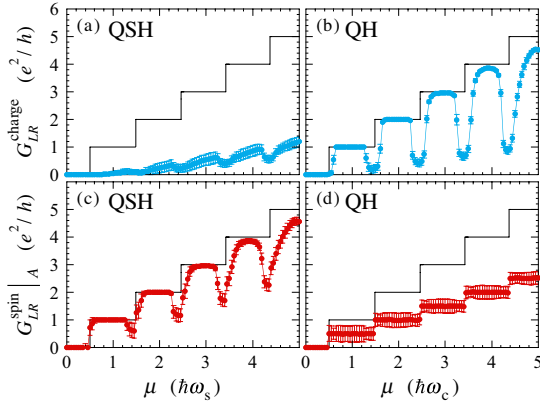


図 4 電荷・スピコンダクタンスのフェルミエネルギー依存性

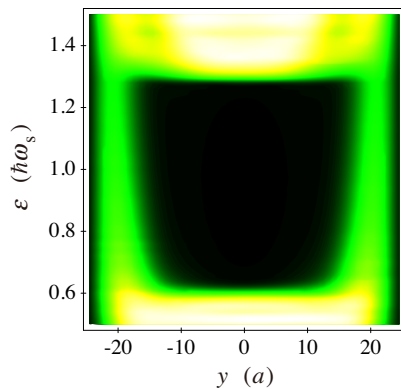


図 5 磁氣的に乱れた QSH 系の局所状態密度

## 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 4 件)

(1) Kiminori Hattori: “Quantized Spin Transport in Magnetically-Disordered Quantum Spin Hall Systems”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 80, No. 12 (The Physical Society of Japan, December 2, 2011, 査読有) 124712-1~5: *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* (<http://www.vjnano.org/>), Vol. 25, Issue 1, (American Institute of Physics and American Physical Society, January 2, 2012).

(2) Kiminori Hattori: “Quantum Spin-Hall Effect in a Quantum Wire”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 79, No. 10

(The Physical Society of Japan, October 12, 2010, 査読有) 104709-1~5: *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* (<http://www.vjnano.org/>), Vol. 22, Issue 18, (American Institute of Physics and American Physical Society, October 25, 2010); The top 20 most downloaded articles in *J. Phys. Soc. Jpn.* (October 2010).

(3) Kiminori Hattori: “Spin Current Generated from a Quantum Dot Driven by Pulsed Magnetic Resonance: Real-Time Spin Dynamics”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 79, No. 6 (The Physical Society of Japan, May 25, 2010, 査読有) 064706-1~6: *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* (<http://www.vjnano.org/>), Vol. 22, Issue 2, (American Institute of Physics and American Physical Society, July 12, 2010).

(4) Kiminori Hattori: “Spin-Current-Driven Spin Pumping in Rashba Spin-Orbit Coupled Systems: A Spin Torque Effect”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 78, No. 8 (The Physical Society of Japan, July 27, 2009, 査読有) 084703-1~7.

[学会発表] (計 4 件)

(1) 服部公則: 「磁氣的な乱れを有する量子スピンホール系におけるスピン輸送」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 領域 4: トポロジカル絶縁体 (富山大学五福キャンパス, 2011 年 9 月 24 日).

(2) 服部公則: 「量子細線の量子スピンホール効果」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 領域 4: トポロジカル絶縁体 (新潟大学五十嵐キャンパス, 2011 年 3 月 26 日).

(3) 服部公則: 「パルス ESR で駆動された量子ドットからのスピンポンピング: 実時間ダイナミクス」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 領域 4: 量子ドット (大阪府立大学中百舌鳥キャンパス, 2010 年 9 月 24 日).

(4) 服部公則: 「ラッシュバスピ軌道結合系におけるスピカレント駆動スピンポンピング」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 領域 4: 半導体スピン物性 (熊本大学黒髪キャンパス, 2009 年 9 月 27 日).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

服部 公則 (HATTORI KIMINORI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 80228486