

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(C)  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24540322  
研究課題名(和文)メソスコピック系の量子スピンホール効果  
  
研究課題名(英文)Quantum Spin Hall 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  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では量子スピンホール(QSH)効果と関連する種々のトポロジカル現象を広範囲に調査した。QSH絶縁体は回転磁場励起によりギャップの開いたエッジ状態を介してトポロジカルポンピングを可能とする。同時に誘起されるスピン流は逆QSH効果により励起領域外部に電気分極を形成する。トポロジカル絶縁体(TI)表面では面内磁化との交換結合は $U(1)$ ゲージ場に等価であり、量子異常ホール(QAH)効果に起因して電荷誘導ならびに電気分極をもたらす。薄膜TIは非磁気的乱れにより普遍的にQSH状態に相転移する。この相転移は乱れの3次元性を考慮した有効モデルの枠組みで乱れによるバンド反転で説明される。

研究成果の概要(英文)：The quantum spin Hall (QSH) effect and its related topological phenomena are investigated extensively. Topological pumping is realizable due to a rotating magnetic field through gapped edge states of a QSH insulator. The induced spin flow causes a longitudinal electric polarization analogous to the inverse QSH effect. An emergent gauge field coupled to surface magnetization gives rise to charge induction and polarization on the surface of a topological insulator (TI) via the quantum anomalous Hall (QAH) effect, enabling a local evaluation of the QAH transport without Hall measurements. Nonmagnetic disorder generically forces thin-film TIs into the QSH phase. The phase transition is accounted for by a disorder-induced band inversion in terms of the effective two-dimensional (2D) model into which the realistic 3D nature of disorder potential is absorbed.

研究分野：固体物理

キーワード：量子スピンホール効果 量子異常ホール効果 トポロジカル絶縁体 メソスコピック系 スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

量子スピンホール (QSH) 効果は量子ホール (QH) 効果のスピナナログである。QH 状態では外部磁場により時間反転対称性が破られるが、ゼロ磁場で生じる QSH 状態では時間反転対称性は保持される。実際、QSH 状態は2つのスピン部分系で生じる QH 状態の時間反転対称な合成と見なせる。QSH 系の周縁にはヘリカルなギャップレスエッジ状態が形成される。ヘリカルエッジ状態は逆向きスピンを逆方向に輸送する時間反転対称なクラマース対で構成され、任意の時間反転対称な摂動に対し本質的にロバストである。このような QSH 効果は理論的提唱と HgTe 量子井戸での実験的検証が相次いで成された。研究はさらに3次元への拡張に向かい、境界にマスレスディラック状態を有するトポロジカル絶縁体 (TI) の概念が生まれるとともに、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 系でその実験的実現が達成された。このような背景から、研究開始当初、QSH 効果に代表されるトポロジカル現象とその応用可能性に多大な関心が持たれた。

## 2. 研究の目的

QSH 状態は反対符号のチャーン数を有する2つの QH 部分系で構成され、系全体では時間反転対称性が保持されている。この系に時間反転対称性を破る十分に強い外場を加えると、一方の部分系の QH 状態は解消され、他方の QH 状態のみが存続する。結果として、系は量子異常ホール (QAH) 状態に転移する。本研究ではメソスコピック系の QSH 効果とその類縁の QAH 効果、ならびにこれらと密接に関連する各種トポロジカル現象の物理的解明を目的とする。さらに応用を見据え、メソスコピック系のトポロジカルポンピングやトポロジカル電荷誘導などの実現可能性を検証する。本研究からは、メソスコピック物理、半導体スピン物性、トポロジカル絶縁体物性、スピントロニクス応用への広範な波及効果が期待される

## 3. 研究の方法

(1) QSH 系のトポロジカルポンピング：ヘリカルエッジ状態を介したトポロジカルポンピングについて、非平衡グリーン関数を駆使して任意パラメータに対する厳密解を導出する。さらに格子グリーン関数を用いて自由粒子に対するエッジ分散の線形性を保持した精密な数値計算を実行する。数値計算では、各種パラメータ (ポンプ強度、周波数、空間プロファイル、フェルミエネルギー、乱れの強度など) を様々に変え、系の物理量 (局所スペクトル関数、ポンプカレント、電荷密度、スピン密度など) を詳細に調べる。

(2) TI 表面の面内磁化による電荷誘導：TI 表

面の面内磁化と U(1)ゲージ場の等価性を明らかにし、磁壁のある系の電荷応答とスピン応答をマクミラングリーン関数により定量的に調べる。結果に基づき、QAH 効果とラフリンの思考実験との関連を考察する。さらに3次元 TI の格子ハミルトニアンを数値対角化して、表面磁化による電荷誘導と電気分極を定量的に調査する。数値計算では、各種パラメータ (面直磁化、面内磁化、空間プロファイルなど) を様々に変え、系の物理量 (局所スピン状態密度、局所電荷密度、応答電荷総量など) を詳細に調べる。

(3) 乱れた TI 薄膜の QSH 転移：HgTe 量子井戸との類似性により、表面と裏面が強く混成した TI 薄膜は乱れによりトポロジカルアンダーソン絶縁体 (TAI) に転移することが予想される。この相転移の普遍性を検証すべく、TI 薄膜の2次元有効モデルに非磁氣的乱れを導入して詳細な数値計算を行う。現実的状况で起こる乱れの3次元性は有効モデルに吸収しておく。数値計算では、各種パラメータ (膜厚、面直交換磁場、初期トポロジー、乱れの強度、系のサイズなど) を様々に変え、系の物理量 (コンダクタンス、局所状態密度、局所ホール電圧、局在長、バンド端エネルギーなど) を詳細に調べる。

## 4. 研究成果

(1) QSH 系のトポロジカルポンピング：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、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。ただし、時間反転対称性を破る磁氣的な摂動に対してはそうは言えない。時間反転対称性が破れた QSH 系では、一般にクラマース対の混合によりエッジ分散に質量ギャップが開く。ギャップの開いた2バンド系は、サウレスによって提唱されたトポロジカル量子ポンピングを可能とする。すなわち、ギャップ中にフェルミ準位が置かれたハーフフィリングの場合、動的に誘起されたバンドトポロジーに起因して、量子化された粒子カレントが充填された下部バンドを通じ非散逸的に流れる。平成 24 年度研究では、このようなポンピング機構に対し非平衡グリーン関数による詳細な理論解析を遂行し、任意パラメータ (ポンプ強度、周波数、空間プロファイルなど) に対する厳密解を導出した。また、自由粒子の線形分散を保持した巧妙な数値計算技法を考案し、ポンプ領域外部における完全スピン偏極カレントの発生と不純物散乱に対するトポロジカル量子化の安定性などを実証した。誘起されるスピン流は逆 QSH 効果に類似してポンプ領域外部に電気分極を形成する。この現象は局所的トポロジ

カルポンピングの電氣的検出に利用できる。

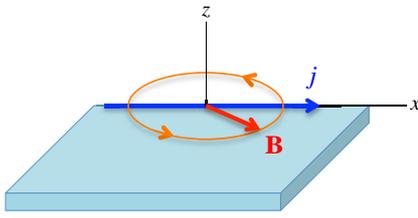


図 1 トポロジカルポンピングの模式図。QSH 絶縁体に回転磁場を照射すると、粒子カレントがバイアスなしでエッジに沿って流れる。

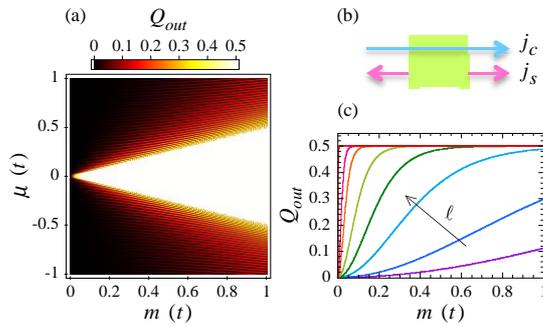


図 2 (a) 規格化されたポンプカレントの励起強度とフェルミエネルギーについての依存性。(b) ポンプされる電荷カレントとスピнкаレントの模式図。(c) 様々な励起成長でのポンプカレントのポンプ強度依存性。

(2) TI 表面の面内磁化による電荷誘導：時間反転対称性が保持されている場合、3次元 TI の表面状態はマスレス 2次元ディラック電子系と見なせる。磁気ドープあるいは強磁性体との接触により時間反転対称性を破ると、ディラック分散には質量ギャップが開く。このとき、TI 表面は無磁場の QH 効果、すなわち QAH 効果を発現する。時間反転対称性が破れた QAH 状態は時間反転対称な QSH 状態の部分系が顕在化したものと言え、両者の包括的理解は必須である。本研究では、TI 表面の表面磁化が  $U(1)$  ゲージ場を誘起することに着目した。磁化とゲージ場の対応はバルクでは非自明であり、低エネルギーの有効表面ハミルトニアンにおいてのみ見られる特異な現象である。ゲージ場は QAH 効果を介してトポロジカルな電荷応答をもたらす。平成 25 年度研究では、TI 表面のゲージ場による電荷誘導と電気分極をコンパクトに定式化するとともに数値計算を用いて定量的に実証した。これらの現象は、QH 効果を説明するラフリンの思考実験と本質的に等価である。ただし、表面ホール系に作用するベクトルポテンシャルは磁束挿入ではなく表面磁化により局所的に生成できる。すなわち、本研究で見いだされた電荷誘導・電気分極は、TI 表面の局所的 QAH 効果を、ホール測定によらず

検出する術を提供する。

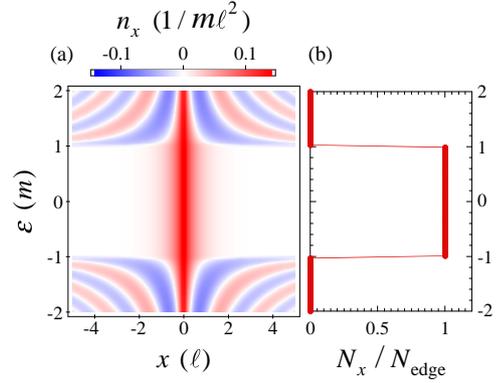


図 3 TI 表面の磁壁に形成されるカイラルエッジ状態のスピンスピン状態密度。

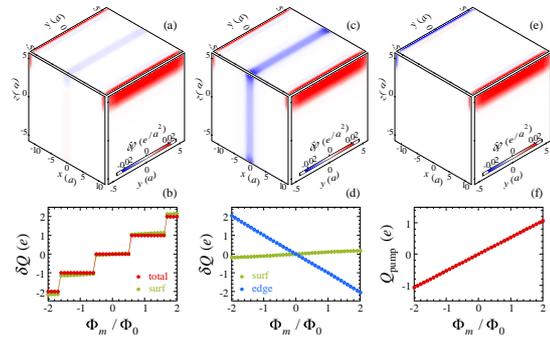


図 4 誘導電荷の表面分布（上段）および応答電荷の総量と表面磁化が担う有効フラックスの関係（下段）。(a)と(b)は大正準分布、(c)と(d)は正準分布での計算結果である。ともに中央に磁壁が仮定されており、そこで質量は符号反転している。(e)と(f)は一樣磁化（一樣質量）での計算結果である。これに関しては大正準分布と正準分布の差異はなく、両端には電気分極が生じる。

(3) 乱れた TI 薄膜の QSH 転移：TI を薄膜化すると表面と裏面のディラック状態がトンネル結合して質量ギャップが開く。の大きさと符号は膜厚に依存し、適度な膜厚範囲で自明なバンド絶縁体 (OBI) あるいは非自明な QSH 状態が実現される。QSH 状態は反対符号のチャーン数  $C=\pm 1$  を有する 2 つの QH 状態に分解できる。薄膜 TI に面直交換磁場  $m$  が作用した場合、ギャップは実質  $\pm m$  になる。 $m$  が十分大きければ、一方の部分系の QH 状態は解消され ( $C=0$ ) 他方の QH 状態のみ存続する ( $C=\pm 1$ )。結果として、薄膜は QAH 状態に転移する。このような薄膜に乱れを導入すると、HgTe 量子井戸系との類似性から TAI 転移が期待される。平成 26 年度研究では薄膜 TI における不純物効果を定量的に検証した。その結果、2 端子コンダクタンスと系内部の局所ホール電圧の両面より TAI 転移が確認され、TAI 相は常に QSH 状態であることが実証された。これは乱れない初期状態のトポロジーにはよらない。つま

り、OBIとQAH絶縁体はともにQSH状態にTAI転移する。薄膜のTAI転移は乱れの3次元性を考慮した2次元有効モデルへの乱れの効果の繰り込みで解析的に説明できる。TAI領域の局在長からは、開放境界系でエッジ状態の非局在性と周期境界系で臨界固定点の存在が見いだされた。臨界点直上では、スケールリング則より熱力学的極限でのバルク局在長のべき発散が確認される。つまり、薄膜TIは通常のQH系に類似の局在非局在転移を起こす。これはQSH部分系が非自明なユニタリークラスに属することに符合する。

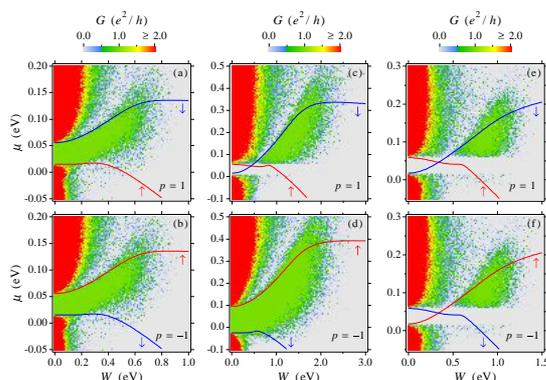


図5 コンダクタンスの乱れの強度とフェルミエネルギーについての依存性。上段と下段は各部分系 ( $p = \pm 1$ ) での計算結果である。初期条件は (a)と(b)でQSH状態、(c)と(d)でQAH状態、(e)と(f)でOBI状態である。実線は自己無撞着ボルン近似より計算されたバンド端である。

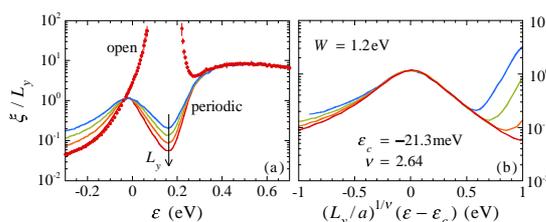


図6 規格化された局在長とそのスケールリングプロット。

## 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3件)

(1) Kiminori Hattori: “Edge States in a Thin Film of Disordered Topological Insulator”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 84, No. 4 (The Physical Society of Japan, March 3, 2015) 044701-1~8.

(10.7566/JPSJ.84.044701, 査読有)

(2) Kiminori Hattori: “Charge Induction and Polarization on the Surface of a Topological Insulator due to an Emergent Gauge Field”,

Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 83, No. 3 (The Physical Society of Japan, February 12, 2014) 034704-1~5.

(10.7566/JPSJ.83.034704, 査読有)

(3) Kiminori Hattori: “Topological Pumping of Spin-Polarized Currents through Helical Edge States due to Dynamically Generated Mass Gap”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 82, No. 2 (The Physical Society of Japan, January 23, 2013) 024708-1~6.

(10.7566/JPSJ.82.024708, 査読有)

〔学会発表〕(計3件)

(1) 服部公則: 「乱れたトポロジカル絶縁体薄膜の量子伝導」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 領域 4: トポロジカル絶縁体 (中部大学春日井キャンパス, 2014 年 9 月 8 日)。

(2) 服部公則: 「トポロジカル絶縁体表面上のカイラルエッジ状態と量子電荷誘導」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 領域 4: トポロジカル絶縁体 (徳島大学常三島キャンパス, 2013 年 9 月 25 日)。

(3) 服部公則: 「ヘリカルエッジ状態の局所ギャップを介した量子ポンピング」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 領域 4: トポロジカル絶縁体 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 20 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