

# 研究終了報告書

## 「トポロジカルエッジ状態におけるスピン・電荷ダイナミクスの観測と制御」

研究期間:2020年11月～2024年3月

研究者:鎌田 大

### 1. 研究のねらい

近年、半導体デバイスの微細化による情報処理能力の向上が限界を迎えつつあり、新しい動作原理に基づく次世代型コンピュータの実現が切望されている。特に、量子力学の原理に基づき、複数の情報を同時に符号化することで超並列計算を実行する量子コンピュータが大きな注目を集めており、その実用化に向けて、さまざまな系を用いて量子ビットや量子もつれが作られ、基本的な量子操作を実現し、多くの原理実証が行われている。このような研究の流れの中、誤り耐性のある量子計算と量子回路の大規模化は、量子コンピュータを社会実装する上での主要課題と認識されている。

一方、従来のアプローチとは異なる、マヨラナ準粒子に代表されるトポロジカル準粒子を用いたトポロジカル量子計算技術がにわかに注目を集めている。この準粒子は、非アーベリアン統計に従うとともにトポロジカルな性質をもち、局所摂動に対して耐性が高いことから、擾乱に強い量子ビットへの応用が期待されている。この準粒子を固体中で人工的に生成し、量子回路の大規模化の実現が期待される系として、半導体 2 次元トポロジカル絶縁体が挙げられる。ここでは、運動量・スピンそれぞれ逆向きの 1 次元ヘリカルエッジ状態が試料端に形成され、互いに時間反転の関係にあり、零磁場で磁性不純物が存在しない場合、時間反転対称性によって後方散乱が抑制される。そして、このエッジ状態に超伝導体を近接させたトポロジカル超伝導相において、トポロジカル準粒子が現れると予想されている。しかし、様々な物質でヘリカルエッジ状態の兆候が観測されているものの、トポロジカルに保護されているはずにも関わらず、数  $\mu\text{m}$  程度の短チャネル試料でしか観測されておらず、その散乱過程の詳細なメカニズムは実験的に明らかになっていない。

本研究では、半導体 2 次元トポロジカル絶縁体のヘリカルエッジ状態を伝播する電荷・スピンのダイナミクスを高周波電気伝導測定で観測し、トポロジカルな性質、トポロジカル状態のロバストネス、そこでの電子間相互作用を評価することを目指した。そして、トポロジカルな性質を最大限に引き出した革新的デバイス創出に向けて、この系で発現する人工的トポロジカル相を電氣的に制御する技術を確立するとともに、トポロジカル準粒子を生成するデバイスの実現可能性を検証し、トポロジカル量子計算技術への発展の可能性を探索することを目標とした。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

2 次元トポロジカル絶縁体におけるトポロジカルエッジ状態の物性解明に向けて、半導体 2 次元トポロジカル絶縁体の母材となる InAs/InGaSb 複合量子井戸において、電子・正孔それぞれの領域のカイラルエッジチャネルにおけるプラズモン(エッジマグネトプラズモン)伝導を時間領域で観測可能とする電気伝導測定手法を提案・実証した(研究テーマ A)。バンド非反転試料では、本時間分解測定手法を用いることにより、電子・正孔それぞれの領域において、エッ

ジマグネトプラズモンが逆向きのカイラリティで伝播する様子を観測した。そして、伝播速度を測定することにより、バルク内の電荷パドルによる影響を議論することが可能になった[主な研究成果 1]。

次に、バンド反転した InAs/InGaSb 複合量子井戸を用い、電子と正孔が共存する系でエッジマグネトプラズモンの時間分解測定を行い、バンド反転によるヘリカルエッジ伝導を強磁場下で観測し、伝播速度を求めることに成功した(研究テーマ B)。このヘリカルエッジ伝導は、カイラルエッジ伝導より一桁近く小さな伝播速度となり、伝播距離が大きくなるとともに散逸する振る舞いを示した。この結果は、エッジ状態間のトンネリングとバルク内の電荷パドルによる影響を取り入れたモデルで説明することができ、理想的なトポロジカルエッジ状態の実現の難しさを示唆している[主な研究成果 4, 5]。

一方、フランス ENS の研究グループとの共同研究において、半導体 HgTe/CdTe 2 次元トポロジカル絶縁体の量子ホール領域および量子スピンホール領域において、GHz 帯プラズモン伝導の高周波電気伝導測定を行い、それぞれの領域におけるプラズモン伝導の位相速度を求めた(研究テーマ C)。ここでは、印加するサイン波の周波数に対して測定される位相は線形に変化し、位相速度と群速度が等しくなるため、低エネルギー励起領域では線形な分散関係をもつことがわかる。本研究においてもバルク内の電荷パドルがプラズモン伝導に影響を与え、それが位相速度に現れることが明らかになった。[主な研究成果 2]。

## (2) 詳細

### ■研究テーマ A 「バンド非反転 InAs/InGaSb 複合量子井戸におけるエッジマグネトプラズモン伝導のオンチップ時間分解測定」

従来、GHz 帯域のプラズモンに対する電気伝導測定では、サンプリングオシロスコープやスペクトラムアナライザを用いて時間領域・周波数領域で測定する方法が主流であった。しかし、測定感度や測定系による高周波信号の歪みにより、試料内部における本来のプラズモン波形を観測・評価することが困難であった。本研究では、過去に研究者が独自に開発した、半導体 GaAs/AlGaAs 2 次元電子系におけるオンチップ時間分解測定法を基に、ナローバンドギャップ半導体である InAs/InGaSb 複合量子井戸において、試料内部におけるエッジマグネトプラズモン (EMP) の波形を時間領域で観測することに成功した。

図1に本測定で用いた試料および測定系の模式図を示す。左下の微小電極 (Injection gate) に電圧パルス  $V_{inj}(t)$  を印加し、パルス状 EMP を励起する。この EMP は、量子ホール領域では、磁場の向きと電荷キャリアで決まるカイラリティで試料端に沿って伝播する。時間分解測定のために、中央の電極 (Detection gate) に時間差  $t_d$  をもつ電圧パルス  $V_{det}(t - t_d)$  を印加する。ここで、右下のオーミック電極において、時間差  $t_d$  に対して電流  $I$  を測定することにより、局所的な EMP の波形を観測することができる。キャリアタイプおよびキャリア密度はグローバルゲート電極に印加する電圧  $V_{GG}$  で制御する。図 2 は、電子・正孔領域において磁場  $\pm 11$  T で観測された EMP の波形であるが、それぞれの領域で一方向の磁場でのみパルス状 EMP の波形が観測されていることがわかる。この結果は、それぞれの領域において EMP が同等の速度で逆向きに伝播していることを示している。

一方、EMP の伝播速度やカイラリティをゲート電圧や磁場で制御できることは、プラズモンを情報担体として用いる「プラズモニクス」において有力なプラズモン伝播制御技術になると期待される。

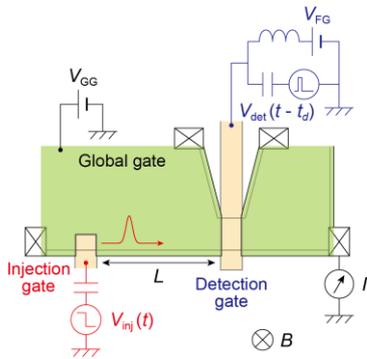


図 1: 試料および測定系の模式図。

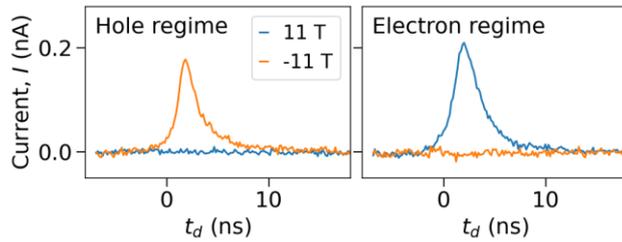


図 2: 正孔(左)・電子(右)領域で観測された EMP の波形。

### ■研究テーマ B 「InAs/InGaSb 2次元トポジカル絶縁体におけるエッジマグネトプラズモン伝導の時間分解測定」

従来、2次元トポジカル絶縁体におけるヘリカルエッジ状態の兆候は、量子化伝導を観測することによって捉えられていたが、トポジカルに保護されているはずにも関わらず、数 $\mu\text{m}$ スケールの短チャネル試料でしか量子化伝導は観測されておらず、その散逸過程の詳細なメカニズムは明らかになっていない。このヘリカルエッジ状態は、それぞれ逆向きの電子と正孔のカイラルエッジ状態を重ね合わせたものと同様であるとみなすことができる(図 3)。ここで、バンド反転した InAs/InGaSb 複合量子井戸を用い、電子と正孔が共存する系で EMP の時間分解測定を行い、バンド反転によるヘリカルエッジ伝導を世界で初めて時間領域で観測し、伝播速度を求めることに成功した。このヘリカルエッジ伝導は、カイラルエッジ伝導より一桁近く小さな伝播速度となり、伝播距離  $L$  が大きくなるとともに散逸する振る舞いを示した(図 4)。この結果は、エッジ状態間のトンネリングとバルク内の電荷パドルによる影響を取り入れたモデルで説明することができる。

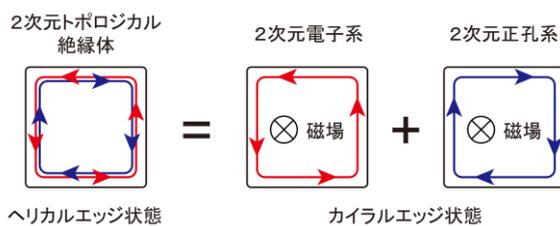


図 3: ヘリカルエッジ状態とカイラルエッジ状態。

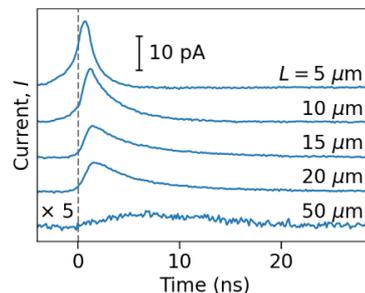


図 4: 観測された EMP の波形。

### ■研究テーマ C 「HgTe/CdTe 2 次元トポロジカル絶縁体におけるエッジマグネトプラズモン伝導の周波数分解測定」

半導体 HgTe/CdTe 2 次元トポロジカル絶縁体の量子ホール領域および量子スピンホール領域において、GHz帯の EMP に対してヘテロダイン検出による高周波電気伝導解測定を行い、それぞれの領域における EMP の位相速度を求めた。ここでは、EMP を励起するサイン波の周波数に対して測定される位相は線形に変化し、位相速度と群速度が等しくなるため、低エネルギー励起領域では線形な分散関係をもつことがわかる。図 4 は、測定された EMP の位相速度の

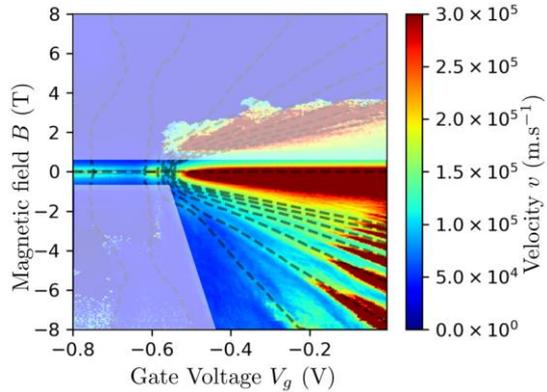


図 4: 測定された EMP の位相速度の磁場およびゲート電圧依存性。

磁場およびゲート電圧依存性であるが、強磁場領域ではカイラリティを示すとともに、磁場に対して位相速度が振動していることがわかる。この振動は、バルク内の電荷パドルによる影響がランダウ占有率とともに変化し、それが位相速度に現れていると理解することができる。

ゆえに、InAs/InGaSb 2 次元トポロジカル絶縁体での実験的研究と同様に、現在の実験技術で得られる試料品質では電荷パドルによるエッジ伝導への影響を無視することができず、この結果は理想的なトポロジカルエッジ状態の実現の難しさを示唆している。

### 3. 今後の展開

本さがけ研究で明らかにしたように、通常の2次元トポロジカル絶縁体(量子スピンホール絶縁体)において、理想的なトポロジカルエッジ状態を実現することは実験的には難しく、現時点での実験技術ではこのヘリカルエッジ状態を実社会で有用なデバイス創出に発展させることは困難であると考えられる。しかし、基礎物性研究の観点では、本さがけ研究で確立した時間分解電気伝導測定手法は、グラフェンをはじめとする、さまざまな物質に適応可能であり、試料の材質によらない普遍的な電気伝導測定手法として物性研究全般に大きな波及効果が見込まれる。

例えば、磁性トポロジカル絶縁体では、自発磁化によってカイラルエッジ状態が試料端に形成され、非散逸な 1 次元伝導を可能とする。量子ホール絶縁体では、カイラルエッジ状態形成のために強磁場を印加する必要があるが、磁性トポロジカル絶縁体では零磁場でカイラルエッジ伝導を実現可能とするため、超伝導状態との共存が可能となり、通常の超伝導体と組み合わせることにより、人工的トポロジカル超伝導相への発展が期待される。ここで、研究者が本さがけ研究で行ってきた高周波電気伝導測定技術を磁性トポロジカル絶縁体に適応し、そこでのプラズモン伝導を観測することにより、エッジ状態の空間的構造やそこでの電子間相互作用、プラズモンの速度や分散関係など詳細な議論が可能となり、技術的に有用な量子技術への発展が期待される。

また、超伝導体/グラフェン複合素子において、トポロジカル準粒子であるパラフェルミオンの実現を目指した実験的研究が海外の研究グループより報告されているが、パラフェルミオンを実現するためには 1 次元電子系における電子間相互作用を精密に制御する必要があり、この系における電子間相互作用を実験的に評価する手法は確立されていない。ここで、このような複合素

子においてプラズモン伝導の高周波電気伝導測定を行うことにより、通常の DC 電気伝導測定では直接評価することが難しい電子間相互作用の評価が可能となり、トポロジカル準粒子実現のための試料構造に対する設計指針が得られると期待される。

一方、バンド非反転の InAs/InGaSb 複合量子井戸では、ゲート電極でフェルミエネルギーを制御することにより、2 次元電子系と 2 次元正孔系を単一の試料でそれぞれ独立に実現することができる。量子ホール領域では、電子と正孔は逆向きのカイラリティで伝播するため、プラズモンを情報担体として用いる「プラズモニクス」において有力なプラズモン伝播制御技術になるとともに、より複雑なプラズモニクス回路の設計が可能になると期待される。

いずれの実験的研究も基礎研究の段階にあり、実社会で有用なトポロジカル量子計算技術を確立するためには、大きなブレイクスルーがない限り、少なくとも 10~20 年以上の年月を要すると推測される。

#### 4. 自己評価

本さがけ研究の主な実験的研究は、NTT 物性科学基礎研究所・量子固体物性研究グループで実施し、試料作製は同グループの研究協力者が行い、研究者は主に試料設計、高周波電気伝導測定、データ解析、成果発表を行った。本研究費で導入した任意波形発生器、高速 A/D 変換ボード、直流電圧源、ロックインアンプ等を用いることにより、普遍的な時間分解電気伝導測定手法を確立し、半導体 InAs/InGaSb 2 次元トポロジカル絶縁体のヘリカルエッジ状態における電荷のダイナミクスを観測することに成功した。

トポロジカル物性科学の分野において、世界的に数多くの研究グループが新奇トポロジカル物質の開拓に注力している中、電気伝導測定によるトポロジカル物性の評価手法は、主に DC 電気伝導測定がほとんどであり、本時間分解測定手法は独創的である上に、新たなトポロジカル物性の議論を可能とする測定手法である。本さがけ研究では、当初計画していたトポロジカル準粒子の検出には至らなかったが、これまでに得られた研究成果はトポロジカル物性研究を加速させるものになると期待される。ゆえに、本さがけ研究の達成度は 70 %と自己評価した。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

##### 1. H. Kamata, H. Irie, N. Kumada, and K. Muraki,

“Time-resolved measurement of ambipolar edge magnetoplasmon transport in InAs/InGaSb composite quantum wells”,

Phys. Rev. Res. **4**, 033214 (2022).

半導体 2 次元トポロジカル絶縁体の母材となる InAs/InGaSb 複合量子井戸において、電子・正孔それぞれの領域におけるエッジマグネトプラズモンのカイラル伝導を時間領域で観測可能とする電気伝導測定手法を提案・実証した。本測定手法を用いることにより、電子・正孔それぞれの領域において、エッジマグネトプラズモンが逆向きのカイラリティで伝播する様子を観測するとともに、伝播速度を測定することにより、バルク内の電荷パドルによる影響を議論すること

が可能になった。

2. Alexandre Gourmelon, Elric Frigerio, Hiroshi Kamata, Lukas Lunczer, Anne Denis, Pascal Morfin, Michael Rosticher, Jean-Marc Berroir, Gwendal Fève, Bernard Plaçais, Hartmut Buhmann, Laurens W. Molenkamp, and Erwann Bocquillon,  
“Velocity and confinement of edge plasmons in HgTe-based 2D topological insulators”,  
Phys. Rev. B **108**, 035405 (2023).

半導体 HgTe/CdTe 2次元トポロジカル絶縁体の量子ホール領域および量子スピンホール領域において、GHz 帯プラズモン伝導の高周波電気伝導測定を行い、それぞれの領域におけるプラズモン伝播の位相速度を求めた。ここでは、位相速度と群速度が等しく、低エネルギー励起領域では線形な分散関係をもつ。本研究においてもバルク内の電荷パドルがプラズモン伝導に影響を与え、それが位相速度に現れることが明らかになった。

3. H. Bartolomei, R. Bisognin, H. Kamata, J.-M. Berroir, E. Bocquillon, G. Ménard, B. Plaçais, A. Cavanna, U. Gennser, Y. Jin, P. Degiovanni, C. Mora, and G. Fève  
“Observation of Edge Magnetoplasmon Squeezing in a Quantum Hall Conductor”,  
Phys. Rev. Lett. **130**, 106201 (2023).

量子化抵抗 (~25 kΩ) をもつ GaAs 系量子ホールエッジ状態において、エッジマグネトプラズモン (EMP) モードのスクイーピングを実証した。ここでは、量子ポイントコンタクトをビームスプリッターとして用い、ボーズ粒子的に振る舞う EMP の非線形性により、EMP のスクイーズド真空状態が生成され、そのノイズが量子真空ゆらぎより 18% 小さくなる様子を観測した。この結果は、メゾスコピック系において、EMP 共振器による量子バスの実現につながるものになると期待される。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件 (特許公開前のものは件数にのみ含む)

## (3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

### 国際会議

4. “Time-resolved measurement of edge magnetoplasmons in InAs/InGaSb composite quantum wells” (招待講演),  
Hiroshi Kamata,  
German-Japanese Workshop “Trends in Quantum Materials and Beyond”, Würzburg, Germany (February 26, 2024).
5. “Time-resolved helical edge transport in the quantum Hall regime of electron-hole bilayer systems” (口頭発表),  
H. Kamata, H. Irie, S. Sasaki, N. Kumada, and K. Muraki,  
The 25th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-25), Grenoble, France (July 10, 2023).

国内学会

6. 「2次元トポロジカル絶縁体におけるエッジマグネトプラズモン伝導の時間分解測定」(招待講演),  
鎌田 大,  
日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月 19 日.

総説・解説

7. “Time-resolved Measurement of Ambipolar Plasmon Transport in Semiconductor Composite Quantum Wells”,  
Hiroshi Kamata, Hiroshi Irie, Norio Kumada, Koji Muraki,  
NTT Technical Review, Vol. 21, No. 5, 34-39 (2023).
8. 「2次元電子・正孔系におけるプラズモン伝導の時間分解測定」,  
鎌田 大, 入江 宏, 熊田倫雄, 村木康二,  
NTT 技術ジャーナル Vol. 35, No. 3, 28-31 (2023).