

トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

藤澤利正 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

本計画研究では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」の輸送現象に注目しています。個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることや、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としています。下記で、最近のトピックスを紹介いたします。

1. 整数量子ホールエッジと分数量子ホールエッジ間の電荷緩和現象

CJ.Lin (CO1 PD)、藤澤 (CO1 代表)、橋坂 (CO1 連携研究者)、秋保 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、図1のように、整数量子ホール系の中に分数量子ホール系が埋め込まれた複合量子ホール素子を用いて、整数エッジと分数エッジ間の電荷緩和現象を明らかにしました [1]。特に、占有率 $\nu_G = 2/3$ の分数ホール状態のエッジは、対向する整数エッジと分数エッジから形成されると考えられているものの、強い電荷緩和現象により、独立の輸送特性を観測することは困難が伴います。本研究では、分数ホール状態の散乱を観測し

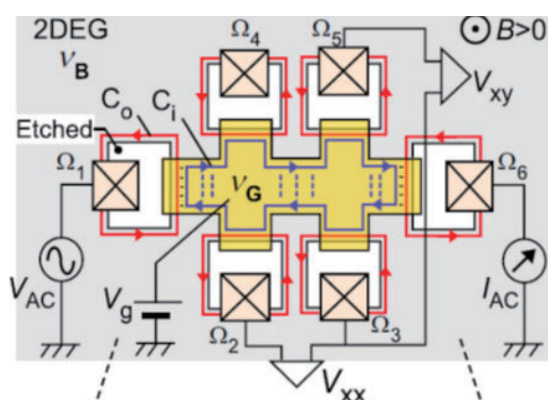


図1. 整数量子ホール系 (灰色, 占有率 ν_B) の中に形成された分数量子ホール系 (黄色, 占有率 ν_G)。例えば、 $\nu_B=1, \nu_G=2/3$ において、整数エッジ C_0 と分数エッジ C_1 間の電荷平衡化現象を調べることができる。文献 [1] より。

つつ、エッジ間の電荷緩和を評価する手法を開拓し、その有効性を示しました。本手法により、正孔分数量子ホール状態のエッジ状態の理解を深めることができるかと期待します。

2. 量子ホールエッジチャンネルの長距離弾道輸送

藤澤 (CO1 代表)、橋坂 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、量子ホール系のエッジチャンネルを輸送するホットエレクトロンを、エネルギー分光測定により解析し、電子電子散乱や電子フォノン散乱の抑制によって長距離の弾道的輸送が可能になることを明らかにしました [2]。低エネルギー領域 (< 30 meV) で支配的な電子電子散乱は、高いエネルギー領域で著しく抑制されます。高エネルギーで重要になる光学フォノン散乱はエッジ電場を弱めることで顕著に抑制されます。二重ゲート構造を用いて、エッジ電場を抑制することで、光学フォノン散乱をさらに抑制できることを示しました [3]。これらの結果は、カイラルエッジ状態における単一電子輸送回路やコヒーレント輸送の可能性を拓くものです。

3. InAs 量子ホールエッジチャンネルにおける逆方向電流の観測とその緩和長測定

秋保 (CO1 連携研究者)、入江 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、狭ギャップ半導体である InAs の量子ホール系において、磁場の向きで決まる通常のカイラルエッジチャンネルとは逆方向に流れるエッジ電流が存在することを実験的に示しました [4]。GaAs と異なり InAs では試料端でフェルミ準位が伝導帯内に固定されるため、試料内部よりも電子密度が高い領域が試料端近傍に形成します。そのため、バルクの占有率に対応した通常のエッジチャンネルに加え、順方向と逆方向のカイラリティをもったエッジチャンネルが存在する可能性があります [図 2(a)]。本研究では、3端子測定配置 [図 2(b)] を用いることで、逆方向電流の存在を示すことに成功しました [図 2(c)]。さらに長さの異なるエッジを用いることで、逆方向電流の緩和長を測定し、そのバルク占有率・ゲート

電圧・磁場に対する依存性を明らかにしました [図 2(d)]。これらの実験から、量子ホール効果が観測されるマクロな試料においても、条件によって、ミクロにはバルク - エッジ対応から予想されるよりも複雑なエッジチャンネルの構造や緩和過程が存在することが明らかになりました。

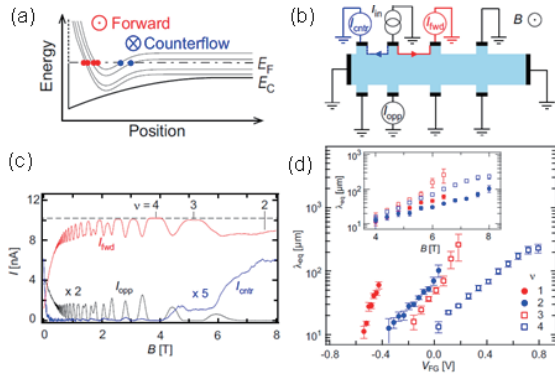


図 2.(a)InAs 試料端におけるランダウ準位の振る舞い。(b)3 端子測定配置。(c) 順方向電流 I_{fwd} と逆方向電流 I_{ctr} の磁場依存性。(d) バルク占有率 1-4 における I_{ctr} の緩和長のゲート電圧依存性。

4. スピン軌道相互作用下における電子スピンのドリフト拡散輸送ダイナミクス

好田 (C01 分担者) らは、GaAs/AlGaAs 量子井戸構造において、ドリフト・拡散運動に伴うスピンダイナミクスについて時間空間分解カー回転法を用いて明らかにし、スピン軌道相互作用の強さを定量評価できることを示しました [5,6]。電子スピンのドリフト拡散輸送下でスピン軌道相互作用に起因する有効磁場が存在する場合、電子スピンは有効磁場の周りを歳差運動しながら伝搬します。電子スピンのドリフトと拡散双方の影響を同時に受けるときに、この 2 つの影響を分離評価する手法を確立しました。図 3(a) に示すように円偏光ポンプ光で励起した電子スピンをプローブ光で空間スキャンすることで電子スピンの時間・空間ダイナミクスを調べることが可能です。図 3(b),(c) に異なる結晶方向にドリフト輸送させた電子スピンの時間・空間発展の様子を示します。時間と共に $+x(+y)$ 方向に電子スピンは移動しながら歳差運動し、外部磁場と結晶方位に依存する有効磁場の向きにより歳差運動周波数が図 3(b) と (c) で異なることが分かります。同時に、スピン拡散により歳差運動周波数が空間的にも変調を受けていることを明らかにしました。モンテカルロシミュレーションを用いてスピンの時空間発展を良く再

現でき、ラシュバおよびドレッセルハウススピン軌道相互作用係数を定量評価できることを明らかにしました。それ以外にも、単層 MoS_2 のバレー偏極・コヒーレンスの光学的制御や CoFeB /エピタキシャル Ta 系におけるスピン軌道トルクに関する研究を進めました [7,8]。

5. 磁性ワイル半金属の有効 2 軌道模型の導出と解析

野村 (C01 分担者) らは、最近発見された磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の電子状態を記述する有効ハミルトニアンを導出しました [9]。 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は Co の作るカゴメ格子と Sn および S のつくる三角格子の積層です。我々はフェルミ準位近傍の Co の d 軌道と Sn の p 軌道からなる有効模型によってワイル点近傍の電子状態を記述することに成功しました。さらにカゴメ格子模型を用いて電場印加による磁壁の駆動を理論的に検証しました [10]。その結果フェルミ準位近傍の状態密度が小さくジュール熱の発生は金属にくらべ質的に少ないにもかかわらず磁壁の速度は強磁性金属中のそれと同程度が大きいことを明らかにしました。さらにスピントルクは内在的ピンニングを引き起こさないタイプの非断熱的トルクであることがわかりました [10,11]。これによってバンドトポロジーに由来する低損失磁化制御が可能であることを示唆しました。

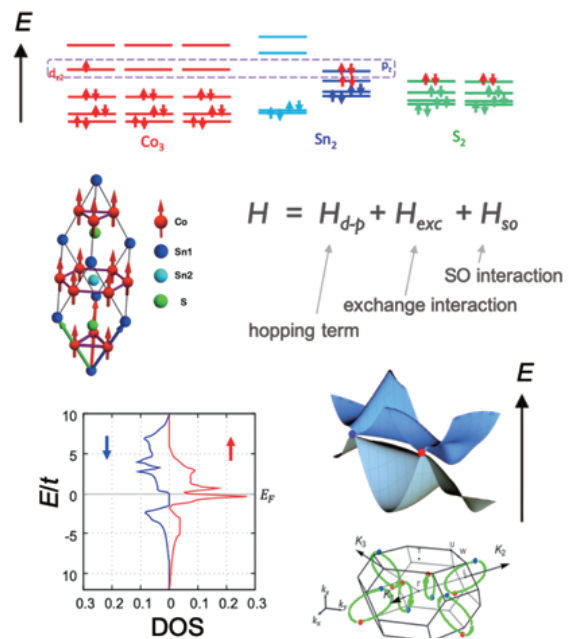


図 4. 磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の電子状態。

TOPICS

6. 電気回路を用いたマヨラナの物理

江澤 (CO1 分担者) は、高次トポロジカル超伝導体の研究を行いました。高次トポロジカル超伝導体はトポロジカル超伝導体の拡張であり、面やエッジではなく、それらの境界であるヒンジやコーナーにマヨラナ状態が現れることが特徴です。特に、電気回路でキタエフの p 波トポロジカル超伝導体模型をシミュレートする事により、マヨラナ・コーナー状態が実現している事を予言しました [12]。この系では、コンデンサーが電子バンドを、コイルがホールバンドを、オペレーショナル・アンプリファイアが超伝導カップリングをシミュレートしています。マヨラナ・コーナー状態はインピーダンス共鳴で観測する事が可能です。また、マヨラナ・コーナー状態のブレイディングを計算する事により、この状態がイジング・エニオンである事を示しました (図 5)。これは将来的には電気回路を用いてトポロジカル量子計算が実現可能である事を示す成果です [13]。

この他、トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象に関する実験・理論研究を進めました [14-31]。

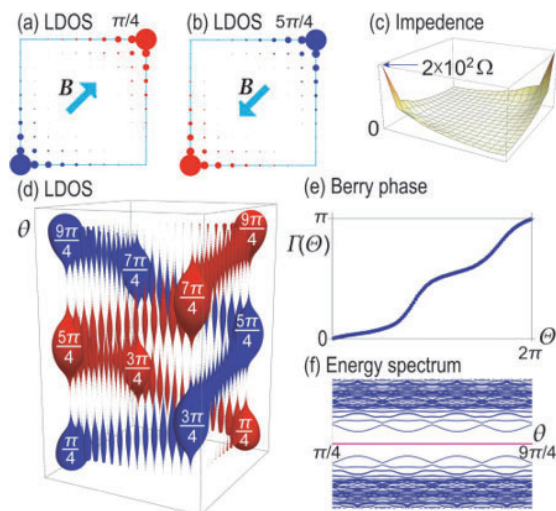


図 5. 電気回路を用いたマヨラナ・コーナー状態の生成とブレイディング。ブレイディングにより、2つのコーナー状態を2度交換すると、位相 (π) を獲得することを示している。

[1] "Charge equilibration in integer and fractional quantum Hall edge channels in a generalized Hall-bar device", [Chaojing Lin](#), Ryota Eguchi, [Masayuki Hashisaka](#), [Takafumi Akiho](#), [Koji Muraki](#), and [Toshimasa Fujisawa](#), Phys. Rev. B **99**, 195304-1-9 (2019).

[2] "Spectroscopic study on hole-electron transport in a quantum Hall edge channel", Tomoaki Ota, Shunya Akiyama, [Masayuki Hashisaka](#), [Koji Muraki](#), and [Toshimasa Fujisawa](#), Phys. Rev. B **99**, 085310-1-8 (2019).

[3] "Ballistic hot-electron transport in a quantum Hall edge channel defined by a double gate", Shunya Akiyama, Taichi Hirasawa, Yuya Sato, [Takafumi Akiho](#), [Koji Muraki](#), and [Toshimasa Fujisawa](#), Appl. Phys. Lett. **115**, 243106 (2019).

[4] "Counterflowing edge current and its equilibration in quantum Hall devices with sharp edge potential: Roles of incompressible strips and contact configuration", [T. Akiho](#), [H. Irie](#), K. Onomitsu, and [K. Muraki](#), Phys. Rev. B **99**, 121303(R) (2019).

[5] "Simultaneous evaluation of drift- and diffusion-induced spin orbit fields in a (001) GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas", Takahito Saito, Asuka Aoki, [Junsaku Nitta](#), and [Makoto Kohda](#), Appl. Phys. Lett. **115**, 052402 (2019).

[6] "Transient diffusive spin dynamics in intrinsic In-GaAs/InAlAs quantum wells", Kohei Kawaguchi, Toshiki Fukasawa, Ichirota Takazawa, Hiroki Shida, Yasuhito Saito, Daisuke Iizasa, Takahito Saito, Takahiro Kitada, Yoshihiro Ishitani, [Makoto Kohda](#) and Ken Morita, Appl. Phys. Lett. **115**, 172406 (2019).

[7] "Detection of both optical polarization and coherence transfers to excitonic valley states in CVD-grown monolayer MoS₂", E. Asakura, M. Suzuki, S. Karube, [J. Nitta](#), K. Nagashio and [M. Kohda](#), Appl. Phys. Exp. **12**, 063005 (2019).

[8] "Enhancement of spin current generation in epitaxial a-Ta/CoFeB bilayer", H. Gamou, Y. Du, [M. Kohda](#), and [J. Nitta](#), Phys. Rev. B **99**, 184408 (2019).

[9] "Two-orbital effective model for magnetic Weyl semimetal in Kagome-lattice shandite", A. Ozawa, [K. Nomura](#), J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123703 (2019).

[10] "Electrically-driven domain wall motion in a ferromagnetic Kagome lattice", S. Kim, D. Kurebayashi, [K. Nomura](#), J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 083704 (2019).

- [11] "Theory of spin torque in Weyl semimetals with magnetic texture", D. Kurebayashi and K. Nomura, *Sci. Rep.* **9**, 5365 (2019).
- [12] "Braiding of Majorana-like corner states in electric circuits and its non-Hermitian generalization", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 045407 (2019)
- [13] 「電気回路によるトポロジカル量子計算方法」江澤 雅彦、特願 2019-209011.
- [14] "Quantum anti-dot formed with an airbridge gate in the quantum Hall regime", Ryota Eguchi, Eiki Kamata, Chaojing Lin, Hiromitsu Aramaki and Toshimasa Fujisawa, *Appl. Phys. Express* **12**, 065002-1-4 (2019).
- [15] "Determination of g-factor in InAs two-dimensional electron system by capacitance spectroscopy", H. Irie, T. Akiho, and K. Muraki, *Appl. Phys. Exp.* **12**, 063004 (2019).
- [16] "Phase diagram of a magnetic topological nodal semi-metal: Stable nodal line in an easy-plane ferromagnet", Y. Ominato, A. Yamakage, K. Nomura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 114701 (2019).
- [17] "Real-time evolution and quantized charge pumping in magnetic Weyl semimetals", T. Misawa, R. Nakai, K. Nomura, *Phys. Rev. B* **100**, 155123 (2019).
- [18] "Robust magnetotransport in disordered ferromagnetic kagome layers with quantum anomalous Hall effect", K. Kobayashi, M. T., K. Nomura, *Phys. Rev. B* **100**, 161301 (2019).
- [19] "Semi-Quantized Spin Pumping and Spin-Orbit Torques in Topological Dirac Semimetals", T. Misawa, K. Nomura, *Sci. Rep.* **9**, 19659 (2019).
- [20] "Magnetolectric Response of Antiferromagnetic Van der Waals Bilayers", C. Lei, B. L. Chittari, K. Nomura, N. Banerjee, J. Jung, A. H. MacDonald, Preprint, arXiv:1902.06418.
- [21] "Weyl superconductor phases in a Weyl-semimetal/superconductor multilayer", R. Nakai, K. Nomura, Preprint, arXiv:1911.12523.
- [22] "Simple model for second-order topological insulators and loop-nodal semimetals in Transition Metal Dichalcogenides XTe_2 ($X=Mo,W$)", M. Ezawa, *Scientific Reports* **9**, 5286 (2019).
- [23] "Non-Hermitian higher-order topological states in non-reciprocal and reciprocal systems with their electric-circuit realization", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **99**, 201411(R) (2019).
- [24] "Non-Hermitian boundary and interface states in non-reciprocal higher-order topological metals and electrical circuits", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **99**, 121411(R) (2019).
- [25] "Electric circuits for non-Hermitian Chern insulators", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 081401(R) (2019).
- [26] "Electric circuit simulations of nth-Chern insulators in 2n-dimensional space and their non-Hermitian generalizations for arbitral n", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 075423 (2019).
- [27] "Electric-circuit simulation of the Schroedinger equation and non-Hermitian quantum walks", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 165419 (2019).
- [28] "Manipulation of magnetic skyrmions in a locally modified synthetic antiferromagnetic racetrack", Renan P. Loreto, Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, Xiaoxi Liu, Clodoaldo I. L. de Araujo, *J. Magn. Magn. Mater.* **482**, 155 (2019).
- [29] "Spin torque nano-oscillators based on antiferromagnetic skyrmions", Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 042402 (2019).
- [30] "Current-driven dynamics of frustrated skyrmions in a synthetic antiferromagnetic bilayer", Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Zhipeng Hou, Wenhong Wang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, *Phys. Rev. Applied* **11**, 044046 (2019).
- [31] "Current-Induced Helicity Reversal of a Single Skyrmionic Bubble Chain in a Nanostructured Frustrated Magnet" Zhipeng Hou, Qiang Zhang, Xichao Zhang, Guizhou Xu, Jing Xia, Bei Ding, Hang Li, Senfu Zhang, Nitin M. Batra, Pedro M. F. J. Costa, Enke Liu, Guangheng Wu, Motohiko Ezawa, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Xixiang Zhang, Wenhong Wang, *Advanced Materials* 1904815, 1-8 (2019).