

(平成 25 年度 研究実施報告)

国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム)

(研究領域「ナノエレクトロニクス」)

研究課題名「トポロジカルエレクトロニクス」

平成25年度実施報告書

樽茶清悟

(東京大学大学院工学系研究科・教授)

1. 研究実施内容

1-1. 研究実施の概要 公開

樽茶グループ

マヨラナ束縛状態の研究では、NbTiN/InSb ナノ細線ジョセフソン接合の超伝導電流を中心に、その作成方法など技術開発と同時に超伝導電流とシャピロステップの測定を進めたところ、超伝導電流の磁場依存性において特異な振る舞いが観測され、永長Gとトポロジカル相の存在の可能性について検討を進めている。

非局所エンタングラーは、量子もつれ電子対を空間的に分離することによって電子対の独立な量子操作を可能にする概念であり、固体系量子情報処理技術にグレークスルーをもたらすことがねらいである。本研究では、これを InAs 量子ドットやグラフェンと超伝導体との接合や表面弾性波によって運ばれる電子対を用いて実現することを目指している。InAs 量子ドットを使ったクーパー対もつれ生成では NbTiN を電極とする量子ドットジョセフソン接合の作製法をほぼ確立するとともに並列2重量子ドットジョセフソン接合の作製も行い、非局所トンネルに起因すると思われる超伝導電流を検出しつつある。グラフェン-超伝導体接合に関しては、グラフェン量子ドットと超伝導体を用いたクーパー対分離に向けた試料作製と h-BN で挟まれた清浄なグラフェンと超伝導体を接合させてバレーの自由度を用いてクーパー対を分離するための予備実験を進めた。表面弾性波によって運ばれる電子対の分離に関しては、架橋構造を用いた試料の作製と量子もつれの確認方法の検討を行った。

二経路干渉計に関しては、近藤雲を捉えるために経路が長い干渉計を設計して、その評価を行った。また、前年度の実験で得られた近藤雲による散乱における位相変化の結果をより詳細に理論計算と比較した。

また Molenkamp グループの 3次元トポロジカル絶縁体と樽茶グループの極低温高周波測定というどちらも世界有数の独自の実験技術を組み合わせ、マヨラナフェルミオンの探索とスピンプンピングの実験を行った。

永長グループ

トポロジカル超伝導体とそれに伴うマヨラナフェルミオンは基礎物理学からだけではなく、量子情報を中心とする応用の観点からも関心が集まっているが、この問題を理論的な観点から探究した。一つは、トポロジカル絶縁体に電子をドーブした $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のバルク超伝導状態とその表面状態の問題である。バルクの超伝導の性質として帯磁率の磁場・温度依存性によりクーパー対の識別ができることを明らかにし、さらにアンドレーエフ束縛状態、および常伝導体との接合における微分コンダクタンスの解析的式を導出した。また、常伝導状態から存在するトポロジカル絶縁体由来の表面 Dirac-Cone がペアポテンシャルに与える影響を明らかにした。微分コンダクタンスに関連して、s+p ペアリング超伝導におけるアンドレーエフ反射の問題を Trauzettel グループと共同で研究を行っており、論文を執筆中である。また、磁性体とs波スピナー重項の超伝導体との接合系におけるトポロジカル超伝導を理論的に予言した。つまり、磁性体のスピン構造としてスパイラル状態に対しては p_x -ペアリング状態、つまり1次元の Kitaev 模型の2次元版が、スキルミオン結晶に対しては p+ip-ペアリング状態が形成することを見出した。磁性体におけるトポロジカルエレクトロニクスとしては、カイラル磁性体中のスキルミオンが素子や回路といった制限された空間中でどのように運動するか、また、生成・消滅過程するかという問題を Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式の数値解により解明した。また、グラフェンにおけるバレーホール効果の研究を樽茶グループと共同で行い、有限系の電流下での定常分布を求めることで、非局所抵抗の計算を実行中である。

新田グループ

永久スピン旋回とベリー位相(スピン幾何学的位相)の電場制御の実現を目指して研究を行っている。スピン

緩和の抑制された永久スピン旋回状態を実現するには、Rashba スピン軌道相互作用・と Dresselhaus スピン軌道相互作用・を等しくすることが必要である。レーゲンスブルグ大学と共同で半導体細線の面内磁場の角度依存性から Rashba スピン軌道相互作用・と Dresselhaus スピン軌道相互作用・の比をフィッティングすることなく求めることが可能であることを提案してきた。平成 $\cdot\cdot$ 年度は InGaAs 細線を用いて実験的に実証し、Richter 教授のグループがより詳細理論解析を行った。永久スピン旋回状態が実現すると、[-110]方向の細線では Rashba スピン軌道相互作用・と Dresselhaus スピン軌道相互作用・が打ち消し合うことにより異方性が消失することを見いだした。今後は、ゲート電場によって制御された永久スピン旋回状態と逆永久スピン旋回状態の実現を目指す。

これまでスピン干渉デバイスを用いてゲート電場によりスピンの動的位相(歳差回転角度)が制御可能であること、実験的に確認してきた。一方、スピン軌道相互作用に起因した有効磁場の方向がブロッホ球上を作る立体角(スピン幾何学位相)の観測は困難であった。平成 $\cdot\cdot$ 年度はスピン干渉デバイスに面内磁場を印可することにより、Aharonov-Casher 効果による干渉の位相がシフトすることを見いだした。レーゲンスブルグ大学の理論的解析によりスピン幾何学的位相が制御されたことによる位相シフトであることを確認した。今後は、スピン幾何学的位相の電場による制御方法の確立を図る。

大野グループ

細線加工した片側変調ドーブの(001)GaAs/AlGaAs 単一量子井戸における擬一次元電子のスピンダイナミクスを TRKR 測定により評価した。電子スピンアンサンブルの緩和時間が細線方向に大きく依存する結果が得られ、本試料構造で Rashba と Dresselhaus スピン軌道相互作用(SOI)が等しい PSH 状態に近い状態が実現できていることがわかった。特に SOI 有効磁場が打ち消される[110] 細線において、緩和時間は 1.2 ns となり、二次元電子スピンの緩和時間 30 ps 程度と比べてスピン緩和時間を数十倍に延長することができた。また、プローブ走査型時間分解 Kerr 回転測定系を構築することで、電子スピンの空間分布とその時間変化が観測可能となった。励起された電子スピンは拡散しながら、運動方向に依存する SOI 有効磁場を受けて空間的に歳差運動するため、Rashba と Dresselhaus SOI の大きさとの比によってスピン状態の空間分布が変化し、特に PSH 状態ではスピンは空間的なアップダウンのストライプパターンを形成する。作製した片側変調ドーブの(001)GaAs/AlGaAs 単一量子井戸において、そのスピンのストライプパターンが観測され、本試料構造が PSH 状態に近い条件であることが直接的に確かめられた。そして外部磁場を印加した時のスピン空間分布の時間変化を測定することで、波数に依存する SOI 有効磁場と依存しない外部磁場の釣り合いから、SOI の強さを評価できた。

2. 研究実施体制 公開

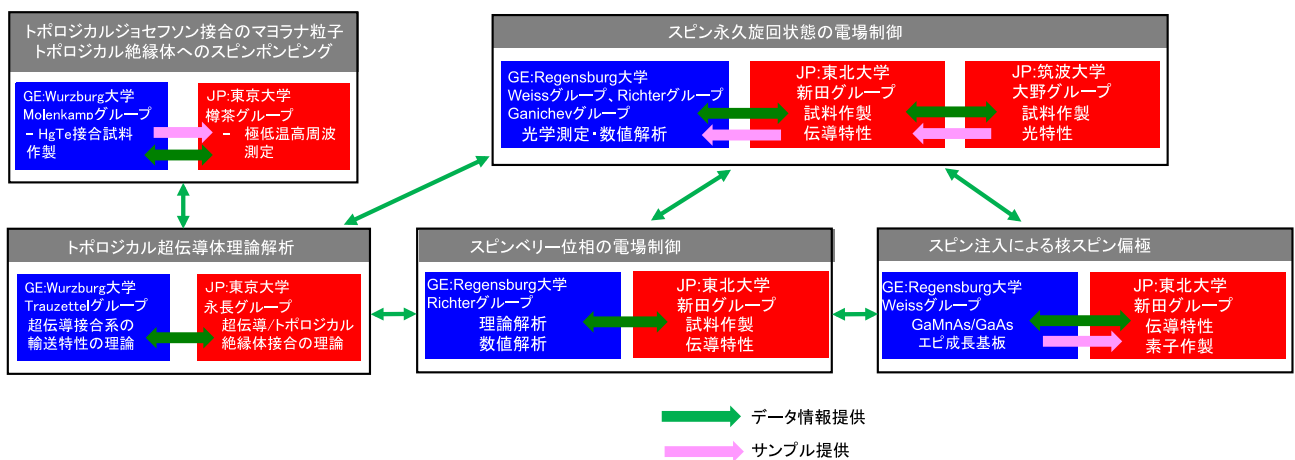
2-1. 日本側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	樽茶 清悟	東京大学	大学院・工学系研究 学科	教授
主な共同研究者	永長 直人	東京大学	大学院・工学系研究 学科	教授
主な共同研究者	新田 淳作	東北大学	大学院工学研究科	教授
主な共同研究者	大野 裕三	筑波大学	大学院工学研究科	教授

2-2. 相手側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	Laurens W. Molenkamp	Würzburg University	EP3	Prof.
主な共同研究者	Björn Trauzettel	Würzburg University	TP4	Prof.
主な共同研究者	Dieter Weiss	Regensburg University	<i>Institut für Experimentelle und Angewandte Physik</i>	Prof.
主な共同研究者	Sergey Ganichev	Regensburg University	Faculty of Physics	Prof.
主な共同研究者	Klaus Richter	Regensburg University	Institute of Theoretical Physics	Prof.

2-3. 両国の研究実施体制



3. 原著論文発表 公開

3-1. 原著論文発表

① 発行済論文数

	うち、相手側チームとの共著 (※)
国内誌 1 件	(0 件)
国際誌 19 件	(2 件)
計 15 件	(2 件)

※本共同研究の相手側チーム研究者との共著に限る

(樽茶 G)

- A1. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayar, C. Bäuerle and T. Meunier, “Fast and efficient single electron transfer between distant quantum dots”, *Journal of Applied Physics* 113, 136508 (2013).
- A2. S. Takahashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha, “Electrically tunable three-dimensional g-factor anisotropy in single InAs self-assembled quantum dots”, *Phys. Rev. B* 87, 161302(R)1-5 (2013).
- A3. 山本倫久、高田真太郎、樽茶清悟, “固体量子情報の長距離移送と量子電子光学実験への挑戦”, *日本物理学会誌*, vol. 68, 288-295 (2013).
- A4. H. Shioya, S. Russo, M. Craciun, M. Yamamoto and S. Tarucha, “Straining graphene using thin film shrinkage methods” *Nano Letters* 14, 1158-1163 (2014).
- A5. T. Bautze, C. Süssmeier, S. Takada, C. Groth, T. Meunier, M. Yamamoto, S. Tarucha, X. Waintal and C. Bäuerle, “Theoretical, numerical, and experimental study of a flying qubit electronic interferometer”, *Phys. Rev. B* 89, 125432 (2014).

(永長 G)

- B1. Isobe Hiroki and Nagaosa Naoto, "Renormalization group study of electromagnetic interaction in multi-Dirac-node systems ", *Phys. Rev. B* 87, pp.205138-1-7, 2013(DOI: 10.1103)
- B2. *Junichi Iwasaki, Masahito Mochizuki and Naoto Nagaosa, "Current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries", *Nature Nanotechnology* 8, pp.742–747, 2013 (DOI:10.1038)
スキルミオンを用いた素子の設計に向けて、制限された空間でのスキルミオンの電流駆動ダイナミクスと生成消滅過程を Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式の数値解を用いて調べた。
- B3. Akira Furusakia, Naoto Nagaosa, Kentaro Nomura, Shinsei Ryue and Tadashi Takayanagi, "Electromagnetic and thermal responses in topological matter: Topological terms, quantum anomalies and D-branes", *Comptes Rendus Physique* 14, pp. 871–883, 2013 (DOI: 10.1016)
- B4. *Sho Nakosai, Yukio Tanaka and Naoto Nagaosa, "Two-dimensional p -wave superconducting states with magnetic moments on a conventional s -wave superconductor", *Phys. Rev. B* 88, pp.180503-1-5, 2013(DOI:

10.1103)

s波スピン一重項超伝導体と磁性体の接合によって生じるギャップ内のスピンレス超伝導の理論を発展させ、特に磁性体のスピン構造がスキルミオン結晶である場合にはカイラルトポロジカル超伝導が実現することを見出した。

- B5. Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura, "Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions", *Nature Nanotechnology* 8, pp.899–911, 2013(DOI:10.1038)
- B6. Sho Nakosai, Yukio Tanaka and Naoto Nagaosa, "Theoretical modeling and properties of class DIII topological superconductors", *PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES*, 55, pp37-41, 2013(DOI: 10.1016)
- B7. Junichi Iwasaki, Aron J. Beekman and Naoto Nagaosa, "Theory of magnon-skyrmion scattering in chiral magnets", *Phys. Rev. B* 89, pp.064412-1-7, 2014(DOI: 10.1103)
- B8. T. Hashimoto, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato, and Y. Tanaka, "Bulk electronic state of superconducting topological insulator", *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 82, 044704_1-11, 2013.
- B9. A. Yamakage, M. Ezawa, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, "Charge transport in pn and npn junctions of silicon", *Physical Review B*, Vol. 88, 085322_1-8, 2013.

(新田 G)

- C1. *F. Nagasawa, D. Frustaglia, H. Saarikoski, K. Richter, and J. Nitta, "Control of the spin geometric phase in semiconductor quantum rings", *Nature Communications* 4, 2526-1 - 2526-7 (2013)

(DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms3526>)

スピンの幾何学的位相を面内磁場で制御することに成功した。実験により得られた位相シフトは理論と良い一位を示した。実験結果は東北大学で行い、数値計算、理論解析はレーゲンスブルグ大学で行った。

- C2. Y. Nishihara, S. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ono, M. Kohda, and J. Nitta, "Shot noise at the quantum point contact in InGaAs heterostructure", *AIP Conference Proceedings* 1566, 311-312 (2013)
(DOI: 10.1063/1.4848410)
- C3. J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, D. Bougeard, T. Nojima, J. Nitta, and D. Weiss, "Giant enhancement of spin detection sensitivity in (Ga,Mn)As/GaAs Esaki diodes" *Physical Review B* 89, 081307(R)-1 1 081307(R)-5 (2014)

(大野 G)

- D1. J. Ishihara, M. Ono, Y. Ohno, and H. Ohno, "A strong anisotropy of spin dephasing time of quasi-one dimensional electron gas in modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", *Applied Physics Letters*, Vol. 102, 212402 2013
- D2. Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct mapping of photoexcited local spins in a modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, 04EM04 (3 pages), 2014
- D3. Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct imaging of gate-controlled persistent spin helix state in a modulation-doped GaAs/AlGaAs quantum well", *Applied Physics Express*, Vol. 7, 013001 2014.

② 未発行論文数

	うち、相手側チームとの共著 (※)
国内誌 1 件	(0 件)
国際誌 0 件	(0 件)
計 1 件	(0 件)

※本共同研究の相手国チーム研究者との共著に限る

B1. S. Takami, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka, “Quasi-classical theory of tunneling spectroscopy in superconducting topological insulator”, Journal of the Physical Society of Japan, (2014). accepted

以上