

研究終了報告書

「並列二重ナノ細線と超伝導体の接合を用いた無磁場でのマヨラナ粒子の実現」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：松尾 貞茂

1. 研究のねらい

トポロジカル超伝導体では表面にマヨラナゼロモード(MZM)が存在する。MZMは自身と反粒子が等しく、複数個のMZMの組み換え操作で初期状態と異なる状態へ変化する(非可換統計性)ためトポロジカル量子コンピュータへの応用が期待されており、研究が活発に行われている。将来的なMZMの非可換統計性の実証にとってゲート制御性や高速制御が重要であるとの観点から、超伝導体と単一の半導体ナノ細線を用いた研究が注目されている。超伝導体と強いスピン軌道相互作用を持つ半導体ナノ細線の接合を作り、細線に平行な磁場を印加するとナノ細線端にMZMが出現する。この理論提案に対応する実験的兆候が報告されているが、強磁場中で超伝導性を維持する必要があり、超伝導ギャップが鈍ってしまう。これによりMZMの特性を明瞭に検出することが困難となる。そのため、ゲート制御可能な半導体材料中に無磁場でMZMを実現できれば、MZMの基礎研究とその応用上での発展に関して革新をもたらす技術と知見を提供することが可能となる。

そこで、二重ナノ細線と超伝導体との接合を用いて無磁場でトポロジカル超伝導を実現し、MZMの検出を行うことを目指した計画を実施した。異なる大きさのスピン軌道相互作用を有するナノ細線が並行に配置された構造を並列二重ナノ細線(DNW)と呼ぶことにする。DNWと超伝導体の接合では、超伝導体中のクーパ対を形成する二電子が分離して異なる細線へとトンネルするクーパ対分離が起き、非局所的な超伝導相関がナノ細線間に形成される。この非局所超伝導相関のエネルギーが局所超伝導相関よりも大きいという条件がMZMを実現するための必要条件の一つである。もう一つの必要条件は超伝導体直下のDNW領域(近接領域)の制御を行い、フェルミエネルギーをスピン軌道相互作用により特徴づけられるエネルギーに調整することである。この二つの条件が成立した時、DNWと超伝導体の接合の端に、無磁場においてもMZMが実現される(Phys.Rev.B 90,045118(2014))。このDNW構造のジョセフソン接合を作製し、近接領域の電気制御の実現、および輸送特性への影響を評価し、シャピロ階段の測定を行うことでトポロジカル超伝導性とMZMの検出を行うことが本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究計画では、当初予定していたMZMの検出に関わる成果に加え、当初予定になかった非局所超伝導相関に関する成果が得られた。

当初計画に関する成果として主に4件の結果が得られた。まず、InAs単一ナノ細線のジョセフソン接合に高周波電波を照射したところ、通常は量子化電圧値の整数倍にのみ出現するシャピロ階段が半整数倍にも出現することを発見し、この半整数倍のシャピロ階段がナノ細線中の弾道的な電子輸送特性に起因したものであることを解明した。また、この単一ナノ細線ジョセフソン接合に対して面直磁場を印加した際に10 mT程度で超伝導電流が増加する現象を観測し

た。この超伝導電流の増強は先行研究で MZM の兆候であると説明されている。我々は詳細な測定から、増強現象は MZM 起源ではなく、磁束渦で準粒子がトラップされるために電子温度が実効的に低下するためであることを明らかにした。また、二重ナノ細線において高効率のクーパ対分離を実現するために必要な強い電子間相互作用の評価を InAs 細線中で行った。さらに、3 次元トポロジカル絶縁体ジョセフソン接合においてシャピロ階段測定を行い、MZM の検出に必要なデバイス構造や電磁場環境に関する知見を得た。これらの結果により MZM 検出に関する物理や技術の確立には成功したが、二重ナノ細線接合における MZM の検出には至らなかった。

当初計画になかった成果として、非局所超伝導相関の研究を進めて 4 件の結果を得た。まず、二重ナノ細線上に二つのジョセフソン接合を作製し、非局所的な位相差の制御によりスイッチング電流が振動する非局所ジョセフソン効果を実証した。これは非局所超伝導相関の新しい検出、制御手法を提供している。さらに、実験を進展させて量子井戸上に結合した二つの平面ジョセフソン接合を作製し、非局所ジョセフソン効果の測定を行った。その結果、非局所位相差が π になる周辺でスイッチング電流の大きさが電流の正負で異なる非相反的な超伝導輸送が観測された。これは超伝導回路中でのダイオード的な素子の実現につながると期待される。さらに、量子井戸上の結合ジョセフソン接合において局所位相差および非局所位相差に対する超伝導電流の依存性を評価する手法を考案し、実際にその手法を用いて電流位相関係を評価した。その結果、非局所位相差の制御により異常ジョセフソン効果が発現することが分かった。さらに、トンネル分光測定用の素子を用いて、各ジョセフソン接合中のアンドレーエフ束縛状態が結合したアンドレーエフ分子状態の検出と位相差に対する依存性の評価に成功した。これらの結果により、非局所超伝導相関の基礎物理の確立が進んだ。そのため、新機能超伝導素子や量子情報処理技術への応用が期待される。

(2) 詳細

研究テーマ A「電子の弾道的輸送に起因した半整数シャピロ階段」

自己形成型のナノ細線を用いた研究では単一ナノ細線ジョセフソン接合デバイスにおいてマイクロ波の照射を行い、シャピロ階段の測定を行った。通常、シャピロ階段は量子化した電圧値にのみ現れるが、我々のデバイスでは半整数量子化値にも階段が現れることがわかった(図1)。解析の結果、この階段は電子が接合内を散乱せずに輸送されていることにより生じる現象であることを明らかにした。シャピロ階段の測定はマヨラナ粒子の検出の手法でもあるため、今回の結果は将来的なマヨラナ粒子の評価手法の確立に貢献するものでもある。(代表論文 3)

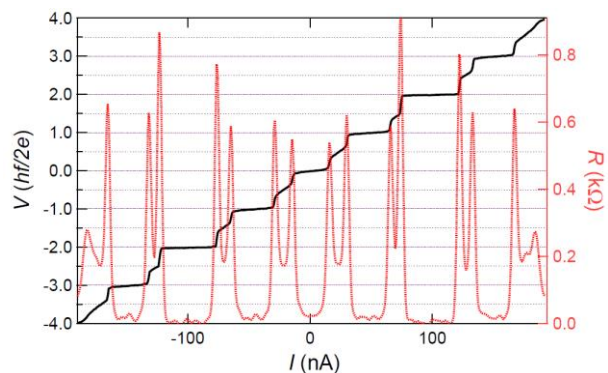


図 1: 単一ナノ細線ジョセフソン接合において得られたシャピロ階段測定結果。量子化電圧値の半整数倍に階段が出現している。

研究テーマ B「磁場によるジョセフソン超伝導電流の増強効果」

自己形成型単一 InAs ナノ細線のジョセフソン接合の磁場依存性を測定した。先行研究にて、この単一細線の接合に面直磁場を印加すると、閾磁場 B^* 以上で超伝導電流が大幅に増大するとの報告 (Nat. Commun. 8, 14984 (2017)) があり、MZM の兆候とされている。我々も同様の現象を観測し、さらに先行研究にはなかったゲート電圧依存性を測定した。その結果、ゲート電圧を制御してナノ細線の電子密度を変化させても B^* が変化しないことが分かった。さらに、 B^* よりも小さい磁場範囲で磁場掃引方向に対して明瞭なヒステリシスが観測されることを発見した。これらのことから、我々はこの現象が薄膜超伝導体内に侵入した磁束渦の中心に準粒子がトラップされることにより起きる電子温度の冷却効果に起因すると解釈した。その後、磁場の方向を面直から傾けていき、 B^* がどのように変化するかを調べると、 B^* の面直成分は磁場を傾けてもほぼ一定になっていることが分かった。これは B^* が薄膜超伝導に磁束が侵入する磁場で決定していることを意味し、MZM 起源説を否定する結果である。(代表論文2)

研究テーマ C「InAs 細線での朝永ラッティンジャー液体性の評価」

二重ナノ細線において弾道的なクーパー対分離を増強するために必要なのは 1 次元電子系における電子間相互作用である。これを評価するために InAs 量子井戸を細線上に加工し、輸送特性のバイアス電圧依存性と温度依存性を測定した。その結果、ユニバーサルなスケールリング関係を示すことがわかり、これが朝永ラッティンジャー液体のスケールリング関係で説明できることがわかった。スケールリング解析から朝永ラッティンジャー液体パラメータを評価したところ、非常に大きな電子間相互作用を細線中に実現できることが明らかになった。これは有効電子質量が小さいために閉じ込め効果が大きく、それによって低電子密度領域の電子状態を実現しやすいためであると考えられる。また、スピン軌道相互作用の影響を実験理論両面から評価した結果、スピン軌道相互作用はほぼ無視できることもわかった。

研究テーマ D「3 次元トポロジカル絶縁体でのシャピロ階段測定」

3 次元トポロジカル絶縁体である BiSbTe 薄膜上にアルミニウム、もしくは MoRe を用いたジョセフソン接合を作製し、シャピロ階段測定を行った。表面ディラック電子を介したジョセフソン接合が形成されていれば MZM の検出が行えると期待されるが、実験結果として MZM の兆候は得られなかった。これは、基板に STO を用いたことにより接合に対して大きな並列キャパシタが形成されてしまい、MZM の検出条件が低周波側に限定されたためであると考えられる。

研究テーマ E「二重ナノ細線を用いた非局所ジョセフソン効果の実証」

選択的領域成長型の二重ナノ細線での非局所超伝導相関の形成とそれを通じたコヒーレントな接合の制御に関する物理を解明するため、ジョセフソン接合同士のコヒーレントな結合であるアンドレーエフ分子状態 (Nano Lett. 19, 7138 (2019)) の物理に着目し、結合した二つのジョセフソン接合の輸送に関する実験を進めた。実験では二重ナノ細線のそれぞれの細線上に一つの超伝導電極を共有する二つのジョセフソン接合を作製し、そのうちの一つが超伝導体のループに埋め込まれたデバイスを作製、極低温にて測定を行った。その結果、ループの外の接合のスイッチング電流が磁場に対して 10% ほど振動することが明らかになった (図2)。こ

これは二つの接合がコヒーレントに結合していることの実験的証拠である。さらに、ループ内接合のゲート電圧制御によってループ外接合のスイッチング電流の振動振幅が変化することを確認した。これは振動が二つの接合のコヒーレントな結合に由来することを支持する。また、この干渉実験の結果を単一ナノ細線上に作製した二つのジョセフソン接合素子でも再現した。さらに、単一ナノ細線上の接合では、二つの接合間の距離を変化させたデバイスを測定し、600 nm 以上接合が離れると振動が消失することを確認した。また、ループを持たない単純な 3 端子デバイスの測定も行い、各接合の微分抵抗の同時測定から非局所的な超伝導相関が二つの接合間に存在することを確認した。(代表論文1)

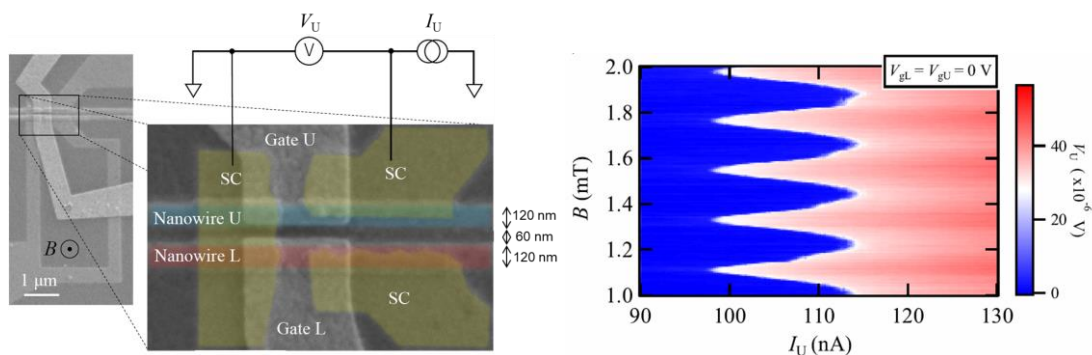


図 2：左図は実験に用いたデバイスの電子線顕微鏡写真。右図はバイアス電流と磁場に対する電圧差の依存性。スイッチング電流の振動が現れている。

研究テーマ F「量子井戸上の結合ジョセフソン接合における非相反的な超伝導輸送」

高品質な量子井戸上の結合ジョセフソン接合について、そのうち片方の接合がリングに埋め込まれた素子を作製した。この素子において非局所ジョセフソン効果の測定を行ったところ、スイッチング電流の振動が 50%ほどまで増加することを発見した。さらに、磁場により非局所位相差を制御した結果、スイッチング電流が電流方向の正負において異なる、非相反的な超伝導輸送が観測された。非相反性は非局所位相差が π になる点の周辺で大きく出現することが分かった。また、接合の電気制御を行ったところ、この電流の大小関係は接合の電子密度には無関係であることがわかった。このことは非相反的な超伝導輸送現象が接合同士の結合の微視的機構により決定されていることを意味している。この結果は将来的に超伝導ダイオード的な素子への応用につながる可能性がある。

研究テーマ G「結合ジョセフソン接合における異常ジョセフソン効果」

高品質な量子井戸を用いることで接合の電気制御が容易になる他、より複雑なデバイスを作製することが可能となる。我々は結合した二つのジョセフソン接合 U と L を含む 4 つのジョセフソン接合と二つの超伝導ループで形成されたデバイスを作製し、極低温において測定を行った。その結果、接合 U を流れる超伝導電流が接合 U および L の位相差に対してどのような依存性を持つのかを評価することに成功した。図 3 の結果は接合 U の超伝導電流が接合 U の位相差のみならず接合 L の位相差にも依存することを示している。さらに、この図 3 は局所位相差がゼロであっても非局所位相差がゼロでなければ有限の超伝導電流が接合 U に流れることを示している。この現象は異常ジョセフソン効果と呼ばれるものであり、位相バッテリーとし

での応用可能性が提案されている。これまで異常ジョセフソン効果の実現には大きな外部磁場や強磁性体が必要と思われてきたが、今回の研究により、対称性の破れが接合間の結合によって引き起こされるために、非局所位相差の制御によって実現可能であることが解明された(論文準備中)。

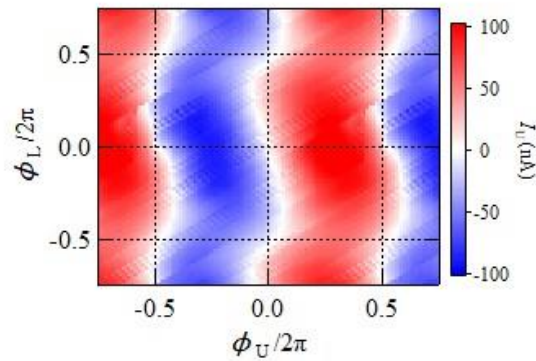


図 3：結合した接合のうち一方を流れる超伝導電流が局所、および非局所位相差に対し依存性を持つ様子を示した結果。

研究テーマ H「アンドレーエフ分子状態のトンネル分光」

ジョセフソン接合同士の結合の微視的機構は、接合それぞれのアンドレーエフ束縛状態が超伝導電極を介してコヒーレントに結合し、アンドレーエフ分子状態を形成することにある。アンドレーエフ分子状態をトンネル分光測定により検出するために、量子井戸上に結合ジョセフソン接合を作製し、接合端に電氣的に形成したトンネルプローブを設置した。この素子において接合のトンネル分光測定を行ったところ、単一の接合の分光結果として磁場に対する周期的なアンドレーエフ束縛状態の変化が観測されたが、結合した接合においては全く異なる結果を得た。さらに、ある位相差において、超伝導ギャップが消失することも観測された。この結果はアンドレーエフ分子状態の形成を示した結果であり、結合した接合の物理を進展させるうえで基礎となる重要なものである。

3. 今後の展開

二重ナノ細線での MZM の検出に関わる実験の成果については、今後単一および複数のナノ細線超伝導接合におけるトポジカル物性の探索にとって有益な知見や技術を提供すると考えている。ナノ細線超伝導接合における MZM については、現在実験結果の解釈について疑義が唱えられており(Nat. Rev. Phys. 2, 575 (2020))、得られた実験結果が MZM 起源によるものかどうかを判定することは MZM に関する研究分野の今後の健全な発展において極めて重要であり、我々の得た結果はこれに貢献するものである。現在我々は二重ナノ細線超伝導接合を高品質な素子に加工することが可能になってきたので、今後 1 年以内にシヤピロ階段の測定を行い、MZM の実現可能性を評価する。

非局所ジョセフソン効果については、現在までに得られた成果により、結合ジョセフソン接合の電流位相関係、異常ジョセフソン効果の発現、非相反的な超伝導輸送など、輸送特性に

関しては基礎物理の確立に必要な知見の十分な蓄積と将来的な超伝導新機能デバイスへの応用可能性の提案を成し遂げている。今後必要なのはジョセフソン接合同士の結合を担うアンドレーエフ分子に関する物理を確立することであり、そのための実験が研究テーマ H である。この実験でアンドレーエフ分子の形成は確認されているが、いまだスピン軌道相互作用の役割などの詳細な物理はわかっていない。さらに、面内磁場により導入されるゼーマン効果に対する依存性も興味深い。単一平面ジョセフソン接合に面内磁場を印加するとトポロジカル転移が起きると提案されており、実証実験も行われている (Nature 569, 92 (2019), Nature 569, 89 (2019))。結合した平面ジョセフソン接合におけるトポロジカル転移の調査は、MZM と非局所超伝導相関の物理の解明につながると期待でき、今後研究を進展させる予定である。

4. 自己評価

本研究計画の大きな目標であった無磁場における MZM の検出を成し遂げることは叶わなかった。しかし、MZM の検出に関わる研究成果や単一細線での MZM 起源と解釈されていた現象についての正しい理解の提供など、MZM の物理を探求、確立するうえで重要となる成果は研究期間内に得ることができた。ナノ細線超伝導接合における MZM については、現在実験結果の解釈について疑義が唱えられており、得られた実験結果が MZM 起源によるものかどうかを判定することは今後の健全な MZM 研究分野の発展において極めて重要であり、我々の得た結果はこれに貢献するものである。したがって研究目的の達成状況は 50%といえる。

研究計画を進めるにあたり、当初予定していた自己形成型のナノ細線を用いた実験については、デバイスの高品質化と歩留まりの向上が困難であったことから 2020 年度終わりに使用を停止した。これに代わる、より高品質な二重ナノ細線超伝導接合の実現が可能な選択的領域成長型の二重ナノ細線サンプルの提供と共同研究をカリフォルニア大学に提案し、2019 年度夏から開始した。これにより、高品質な超伝導接合を用いた実験が可能になった。また、2019 年度終わりに希釈冷凍機を購入したことにより、実験の効率が大幅に上がった。これにより、研究テーマ E に記載した結果を得ることに成功した。さらに、2020 年度終わりから研究テーマ E をさらに発展させるために高移動度量子井戸を用いた実験を開始した。これにより非局所超伝導相関の物理を開拓し、研究テーマ F-H にある結果を得ることに成功した。

研究テーマ E-H に関する結果は当初計画した研究ではなかったが、選択的領域成長型の二重ナノ細線を用いて、希釈冷凍機で実験を行うことで得られた予期せぬ結果を発展させたものである。これら非局所超伝導相関の物理に関する結果は今後の新機能超伝導デバイスや量子情報処理デバイスへの応用が期待されるものであり、該当分野で重要な役割を担っていくと考える。予期せぬ結果を発展させ、一つのまとまりのある成果として提供することができたことは、さきがけ事業の掲げる「科学技術のイノベーション源泉」を提供することに成功したといえる。

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: 7件

1. Sadashige Matsuo, Joon Sue Lee, Chien-Yuan Chang, Yosuke Sato, Kento Ueda, Christopher J. Palmstrom, Seigo Tarucha, "Observation of nonlocal Josephson effect on double InAs nanowires", arXiv:2112.12960

2つのジョセフソン接合(JJ)の短距離コヒーレント結合は、一方のJJを流れる超伝導電流がもう一方のJJの位相差に依存性を創出する。本研究では、このコヒーレント結合の実験的証拠として、2本のInAs ナノ細線を用いた非局所ジョセフソン効果の観測を報告している。片方の超伝導電極を共有する二つの結合したJJのうち一方を測定し、非局所的な位相差を制御してスイッチング電流が振動することを見出した。この結果は、短距離コヒーレント結合を利用した新しい超伝導現象の物理の発展に向けた重要な一歩となる。

2. Yosuke Sato, Kento Ueda, Yuusuke Takeshige, Hiroshi Kamata, Kan Li, Lars Samuelson, Hongqi Xu, Sadashige Matsuo, Seigo Tarucha, "Quasiparticle trapping at vortices producing Josephson supercurrent enhancement", Phys. Rev. Lett. **128**, 0207001 (2022) selected as Editors' Suggestion

磁場を印加した際に起きる単一 InAs ナノ細線ジョセフソン接合の超伝導電流の増大はマヨラナ粒子起源として解釈されていた。本研究では、この超伝導電流の増大について、ゲート電圧依存性、磁場掃引方向依存性、そして磁場角度依存性を詳細に調査した。その結果、超伝導電流の増大はマヨラナ粒子起源ではなく、磁束渦によって準粒子が捕捉されることで起きる電子温度の冷却に起因することを解明した。本研究結果は今後のマヨラナ粒子探索について重要な知見を与え、超伝導デバイスの研究開発に貢献するものである。

3. Kento Ueda, Sadashige Matsuo, Hiroshi Kamata, Yosuke Sato, Yuusuke Takeshige, Kan Li, Lars Samuelson, Hongqi Xu, Seigo Tarucha, "Evidence of half-integer Shapiro steps originated from non-sinusoidal current phase relation in a short ballistic InAs nanowire Josephson junction", Phys. Rev. Research **2**, 033435 (2020)

ゲート制御可能なInAs ナノ細線ジョセフソン接合で観測された半整数シャピロステップについての報告。InAs ナノ細線ジョセフソン接合のシャピロ階段を観測し、従来の整数ステップに加え、半整数ステップを見いだした。このジョセフソン接合素子では、接合透過率をゲート電圧で変化させることができる。ゲート電圧と温度依存性の測定から、半整数階段の起源は輸送の弾道性に起因した電流位相関係の歪みであることが判明した。これらの結果は、MZM の検出に有益な知見を与えるとともに、短い弾道的なジョセフソン接合の基礎物理の確立に貢献するものである。

(2) 特許出願

該当なし

(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)

主な学会発表

- **(Invited) Sadashige Matsuo**, "Control of the DC and AC Josephson effects on the ballistic nanowires" CEMS Topical Meeting Online Quantum Technology meets Quantum Matter, CEMS, Riken, Japan, September 17-18, 2020
- **(Invited) Sadashige Matsuo**, "Experimental study on superconducting junctions of a double InAs nanowire" The Future of Topological Materials, Jadwin Hall, Princeton University, USA, October 2-5, 2019

受賞

- 2022 年 Editors' Suggestion article in Phys. Rev. Lett. for "Quasiparticle Trapping at Vortices Producing Josephson Supercurrent Enhancement"
- 2021 年度 Presentation award Physics II Prize, FY2021 SPDR Presentation of Research results (Riken)
- 2020 年度 第 33 回安藤博記念学術奨励賞 "並列ナノ構造における弾道的電子輸送の解明と機能開拓"
- 2019 年度 第 8 回エヌエフ基金 研究開発奨励賞 "半導体並列二重ナノ構造における電子相関の形成と制御"

プレスリリース

- 初めてクーパー対を 2 本の細線に弾道的に分離 - 1 次元電子系を用いた量子情報処理技術の新展開 - (https://www.riken.jp/press/2019/20191005_1/index.html)