



電子1個のスピン情報の長距離伝送・検出に初めて成功 ～単一電子スピントロニクスの実現へ～

1. 発表者： 樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授／
理化学研究所 創発物性科学研究センター 部門長)
山本 倫久 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師)
トリストアン・ムニエル (仏ニール(NEEL)研究所 研究員)

2. 発表のポイント：

- ◆単一電子を周囲の電子から隔離したまま、遠く離れた量子ドット(注1)間で電子スピン(注2)の情報を保って伝送することに初めて成功しました。
- ◆単一電子スピンの制御に基づいた量子情報処理技術(注3)と単一電子スピンの伝送技術とを組み合わせた“単一電子スピントロニクス”への道を初めて拓きました。
- ◆単一電子スピントロニクスでは、暗号解読や最適化問題などを得意とする量子計算と、情報の散逸によるエネルギー損失を伴わないスピン情報伝送の実装が可能になります。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の山本倫久講師(JSTさきがけ研究者兼任)と樽茶清悟教授(理研創発物性科学研究センター量子情報エレクトロニクス部門長兼任)、ニール研究所(仏国グルノーブル市)のトリストアン・ムニエル研究員らの研究グループは、電子のもつスピンと呼ばれる情報を保ったままひとつの電子だけを周囲の電子から隔離して長距離伝送して検出することに初めて成功しました。

現代のエレクトロニクスは、電荷の流れである電流に加えてスピンを利用するスピントロニクス技術の開発によって、飛躍的な発展を遂げてきました。最近では、電子のスピンを電子1個単位で量子力学的に制御することによる量子情報処理の研究も注目を集めています。量子情報処理においては、この単一電子スピンを制御するために、電子を量子ドットと呼ばれる小さな箱に閉じ込めて周囲の電子から隔離する方法がよく用いられます。このような仕組みを集積するためには、単一スピンの情報を遠く離れた量子ドット間で伝送する技術が不可欠ですが、その開発は技術的な難しさから進んでいませんでした。本研究グループは、2011年に、結晶表面を伝わる音の波(表面弾性波、注4)を利用して単一電子を周囲から隔離したまま離れた量子ドット間で長距離移送することに成功していましたが、単一電子移送の際のスピンの情報までは、検証できていませんでした。

本研究では、移送の際のスピンの反転を抑制できるような単一電子移送方法を新たに開発しました。そして、量子ドット間を伝送する前後の単一電子スピンを測定し、スピンの情報を離れた量子ドット間で移送できることを初めて示しました。これにより、単一スピンの伝送と量子情報操作の技術とを融合させた“単一電子スピントロニクス”への道を初めて拓きました。

4. 発表内容：

現代のエレクトロニクスは、電子の自転の方向に対応するスピンと呼ばれる情報を積極的に利用することによって飛躍的に発展してきました。情報が維持される不揮発性という大きな特長を有するスピンをエレクトロニクスに組み込んだスピントロニクスの研究は、世界中で進め

られています。一方で、こうしたスピントロニクス素子の動作原理は基本的には量子力学ではなく古典力学的な法則に基づいており、スピンの本来持つ量子力学的な性質を十分に生かし切れているとは言い難いものです。スピントロニクス技術の開発と並行して、最近では量子力学の原理に基づいて情報の操作や伝送を行う量子情報処理の研究が大きな注目を集めています。この量子情報処理技術は、盗聴のおそれがない量子暗号器（注5）、ある種の演算において従来の計算機に比べて桁違いの処理能力を有する量子計算機（注6）などへと応用できることから、次世代の技術として注目を集めています。量子情報の基本単位は量子ビットと呼ばれ、量子力学的に定義される二準位系（二つの状態を基底、注7とする系）がそれに相当します。その中でも、集積化が可能な固体中の電子スピンは理想的な量子二準位系であり、将来の量子情報処理を担う量子ビットの有力な候補とされています。

電子スピン量子ビットの制御を半導体中で行うためには、周囲に影響されやすい電子を周囲から孤立させて制御することが必要です。これは、単一電子を量子ドットに閉じ込めることによって実現できます。しかし、量子情報素子の集積化においては、電子スピン間の相互作用を自在に制御したり、単一電子の持つ量子情報であるスピンの情報を遠く離れた量子ドット間で伝送したりする技術が不可欠です。また、単一スピンの情報を損なうことなく伝送する技術は、スピントロニクスの観点ではスピンの損失に伴うエネルギー損失というボトルネックの回避につながり、デバイスの更なる低消費電力化を促すものです。

本研究グループは、2つの離れた量子ドットを空乏化した（電子が取り払われた）電子の通り道で接続し、表面弾性波（物質表面の音波）を利用して量子ドット間で単一電子を周囲の電子から完全に隔離したまま伝送する技術を2011年に開発しました。しかし、量子ドットから単一電子を取り出し、離れた量子ドットへと伝送する過程において電子スピンの状態を保持できるかどうかの検証はできていませんでした。

同グループは、本研究において、スピンの情報を保持したまま4マイクロメートル（マイクロメートルは百万分の一メートル）離れた量子ドット間で単一電子を移送できることを初めて示しました（図1）。まず、単一電子を量子ドットから取り出して伝送するために、加える表面弾性波のパルスの長さを可能な限り短くし、量子ドットの形状をそれに合わせて短時間で電圧操作することにより、高速で電子を移送できるようにしました。その結果、単一電子が量子ドットから取り出される前に、量子ドット内で表面弾性波の影響を受けてスピンの反転するプロセスをある程度抑制することができました。そして、量子ドットにおける単一電子のスピンの読み出し技術を用いて、電子移送前後のスピンの状態の測定を行いました（図2）。それにより、電子の移送後もスピンの情報が65%程度残っていることを確認しました。

更に、表面弾性波パルスの長さや磁場などのパラメータを変化させることにより、スピン情報の損失要因を調べました。調査の結果、スピン情報の損失（スピンの反転）は、電子移送の前と後に量子ドット内で表面弾性波の影響によって起こっていることがわかりました。このスピン反転機構は今回使用した量子ドットの形状に特徴的なもので、原理的には量子ドットの形状を変えれば抑えることができます。一方で、電子が量子ドット間を伝送する間のスピンの情報の損失は無視できる程度であることがわかりました。したがって、本研究では4マイクロメートルでしたが、単一電子を数10マイクロメートル程度伝送しても電子スピン情報の損失はほぼ変わらないと考えられます。

本研究により、単一電子をスピンを保ったまま遠く離れた量子ドット間で長距離伝送できることがわかりました。これにより、単一電子スピンの伝送と単一電子スピン単位の量子情報操作を融合させた“単一電子スピントロニクス”への道が拓かれました。単一電子スピントロニ

クスでは、暗号解読や最適化問題などを桁違いの速さで解くことができる量子計算と、情報の散逸によるエネルギー損失を伴わないスピン情報伝送の実装が可能になります。

本成果は、独国ルール大学ボーフム校、理化学研究所 創発物性科学研究センターとの共同研究によって達成されました。また、JST戦略的創造研究推進事業（さきがけ）研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」研究課題名「単一電子量子回路の集積化へ向けた基盤技術の開発」、文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）「量子サイバネティクス」、JST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）「トポロジカルエレクトロニクス」、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）「トポロジカルエレクトロニクス」、文部科学省科学研究費補助金（No. 26247050, 26220710）などの研究の一環として行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Nanotechnology」

論文タイトル：Fast spin information transfer between distant quantum dots using individual electrons

著者：B. Bertrand, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, T. Meunier

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
教授 樽茶 清悟（タルチャ セイゴ）

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
講師 山本 倫久（ヤマモト ミチヒサ）

<機関窓口>

東京大学大学院 工学研究科 広報室

理化学研究所 広報室 報道担当

7. 用語解説：

（注1）量子ドット

電子を閉じ込める、ナノメートルサイズの微小な空間。量子力学で記述される離散的な電子状態を持ち、原子との類似性から人工原子とも呼ばれる。半導体中ではゲート電圧を用いて電氣的に形成することが可能である。

（注2）電子スピン

電子が電荷のほかに持つ、上向きと下向きに対応する磁石のような性質（磁気モーメント）のこと。これは古典力学的には電荷を持つ電子の自転運動によって理解される。外部から磁場をかけてこの磁石としての向きをそろえることで、物質は磁性を持つ。また単一の電子スピンの状態は量子力学によって表されるので、量子情報に応用できる。

（注3）量子情報処理

量子力学では、異なる状態の重ね合わせや量子力学に特有の粒子間の相関（量子もつれ）状態のような古典力学では許されない状態を取り得る。このような量子力学特有の状態もリソースとして情報処理に利用するのが量子情報処理である。盗聴のおそれがない量子暗号器（注5）、ある種の演算において従来の計算機に比べて桁違いの処理能力を有する量子計算機（注6）などが代表的な応用例である。

（注4）表面弾性波

物質の表面を伝播する波。地震波などはその一例である。本研究では、半導体基板上の結晶の歪みの波が表面に集中して伝播することを利用している。この結晶の歪の波は、電子系の静電ポテンシャルに影響を与える。言い換えると、表面弾性波は、電子系から見ると動く静電ポテンシャルの波として振る舞う。本研究では、この表面弾性波に電子を乗せて、サーフィンのように単一電子を運んだ。

（注5）量子暗号器

異なる状態を重ね合わせた状態を取ることができる量子力学では、状態の観測によって状態が変化してしまう。この原理に従いながら、盗聴されずに情報をやり取りすることを可能にする装置を量子暗号器と呼ぶ。

（注6）量子計算機

異なる状態の重ね合わせや状態間の量子力学特有の相関を保持したまま状態を操作することによって演算を行う計算機。このような演算は並列処理になるため、問題によっては現在の最先端のスーパーコンピュータと比べても桁違いの速さで解を求めることができる。

（注7）基底

あらゆる状態は、基底となる状態にある定数をかけたものを足し合わせる（線形結合する）ことによって表現できる。

8. 添付資料：

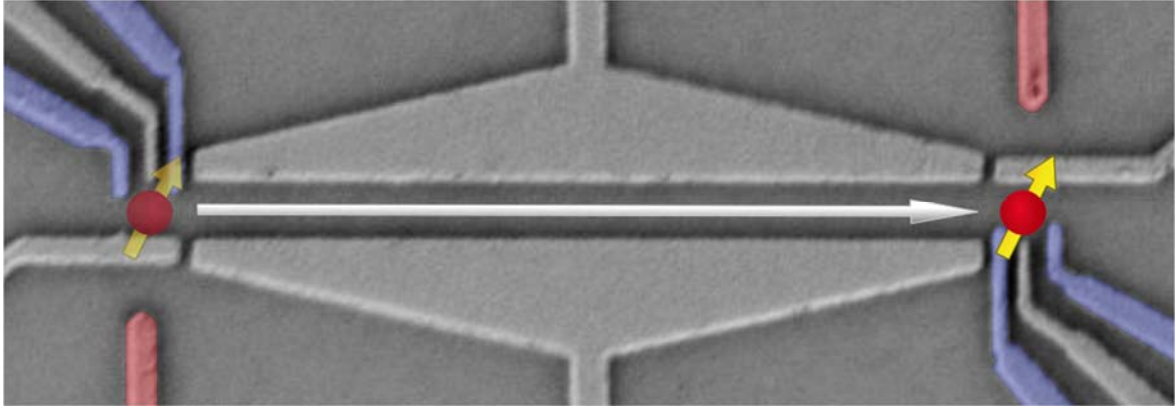


図1：スピン伝送に用いた試料の電子顕微鏡写真と模式図。

半導体表面にゲート電極を配することにより、二つの量子ドットとそれらを結ぶ電子の通り道が形成されている。量子ドットには、電子を1個単位で閉じ込めることができる。量子ドット内に1個だけ閉じ込められた電子を赤丸で、そのスピン情報（電子の自転の回転軸の方向）を黄色の矢印で表現した。表面弾性波を加えることにより、白い線に沿って電子がもう一方の量子ドットへと移送される。移送前後の電子スピンは、近傍に配した電荷検出計（薄赤色のゲート電極で形成される）を用いて測定できる。

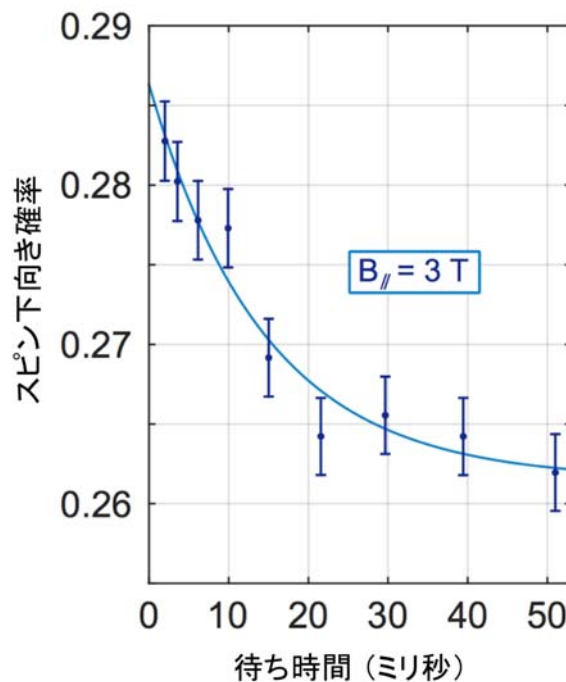


図2：スピン伝送の検証実験。

単一電子移送の実験では、まず電子を図1の左側の量子ドットへと入れる。3テスラの磁場が加えられているため、エネルギーの低いスピン上向き状態が安定であり、時間とともに電子がスピン下向き状態を取る確率は下がっていく。その後、表面弾性波のパルスを加え、電子を右側の量子ドットへと移送し、スピンを測定する。図2は、右側の量子ドットでスピンを測定して下向きスピンを得られる確率を左側の量子ドットにおける待ち時間の関数として表示してある。右側の量子ドット

で検出されるスピンの向きが左側の量子ドットにおける待ち時間に依存することから、スピン情報を保ったまま電子が移送されたことがわかる。