

### 3 単電子の制御

# 電子の量子的な超高速コヒーレント振動を 検出可能な技術とその応用

単一の電子を制御しその振る舞いを観察できると、物理現象を解明しさまざまなナノデバイスを実現することに役立つ。そのための基礎研究を続けている NTT 物性科学基礎研究所（以下、物性研）フロンティア機能物性研究部 ナノデバイス研究グループでは、近年、電子の持つ量子的な特性を活用する研究に力を入れている。

## 電子を1つずつクロック制御により正確に転送する技術

単電子の制御に関する物性研の研究は、かつては主に電子の粒子的な特性に注目していた。その特筆すべき研究成果の1つが、電子を1つずつ、高速かつ正確に転送する技術だ。重要な役割を果たしたのが、NTT 研究所が長年培ってきた微細加工技術により実現した、幅わずか10nm程度のシリコン細線にゲート電極が載る構造のデバイス（図1）であった。

「2つのゲート電極の間に電子を1つ閉じ込め、ゲート電極に印加し

た高周波電圧の変化で電子のポテンシャルが上がるとその電子が電極の外に移動するという仕組みです。電圧の周期ごとに1つの電子が転送されるので、周波数がfであれば1秒間にf個の電子が流れます。」（山端氏）

このデバイスを1GHzで動作させた際に流れる電流を測定し、転送エラー率が $9.2 \times 10^{-7}$ 以下という当時世界最高の精度を実現したことを、2016年7月5日に発表した。

この研究成果は2019年に行われたアンペアの再定義と深い関係がある。この再定義により、現在は周波数fと電荷素量eで決まる電流標準



NTT 物性科学基礎研究所  
フロンティア機能物性研究部  
ナノデバイス研究グループ  
特別研究員 山端 元音氏

でアンペアを実現することとなった。実用的な電流標準は高速かつ高精度に動作する必要があるため、GHzの高周波電圧で高精度な動作を実現したことには大きな意味があった。

## 電子の量子的な振る舞いを理解する研究に注力

単電子を転送するデバイスは、見方を変えると電子の波を転送するものとも言える。この波を精密に制御することができれば、超高速な駆動が可能な量子ビットや高感度な電磁場センサの実現、光の粒であるフォトンを利用した量子力学的な実験を電子により行う電子量子光学実験な

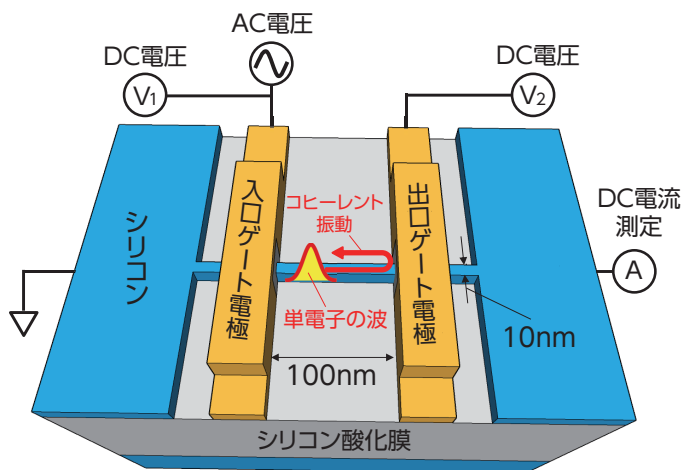
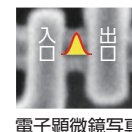
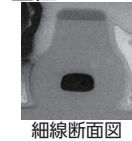


図1 単電子転送デバイスの素子構造と測定系

直径~10nm



\*nm(ナノメートル):  
10億分の1メートル

ど、さまざまなことに役立つと考えられる。そのため、電子を転送する際に量子力学的にどのような現象が起きているかを解明する研究に力を入れるようになった。

極小の領域に閉じ込められた電子が持つエネルギーは飛び飛びの値を持つ。極小空間での電子の振動は、この異なるエネルギー準位を持つ電子の波の重ね合わせによる波として説明することができる。

「量子力学の教科書に書かれているような関係式で、電子の波が電極間で振動するコヒーレント振動を説明できます。この式に電子のエネルギー値を当てはめて計算すると、我々が作製した素子のサイズでは2つのゲート電極間で250GHz程度の空間振動が発生すると予想できます。これを実験で確認することが研究のスタートでした。」(山端氏)

### 250GHzの振動を観測するため新たな測定手法を考案

既存の技術で検出できる電子の高速振動は100GHz程度が限界と考えられ、この限界を突破する新たな検出手法を考案した。理解のため電子の振動の検出を、バネで振動する

箱のスナップショットに例える(図2)。振動により左右に移動する箱がカメラから遠いときには小さく、近いときには大きく写るようなスナップショットを撮影したいが、箱の高速な動きを捉えることが可能なほどシャッターが高速に動かない、すなわち高速に電流をスイッチングする技術がまだないことが、本研究の難しさであった。

「シャッターを開いたままなんとか動きを捉えることを考えました。スリットを用意してそこにカメラを設置し、箱がバネで動く仕掛けの方をスリットの前で上下方向に高速に移動させます。さらにスリットの位置を移動させることで、箱の位置が異なるスナップショットをそれぞれ撮影できるのではないかと考えました。」(山端氏)

### 共鳴準位による超高速サンプリング(図3)

電子の波を箱の振動にたとえるアナロジーでは、左右方向の箱の振動がゲート電極間における電子のコヒーレント振動、カメラが電流計、上下方向の箱の移動が電子のポテンシャルエネルギーの変化に相当す

る。単電子転送デバイスは捕獲した電子のポテンシャルエネルギーが上がることで電子が放出される仕組みであり、上下方向の箱の移動に相当する仕組みをもともと備えている。またスリットの役割を果たす「共鳴準位」について、山端氏は次のように述べている。

「簡単に言えば、共鳴準位のエネルギーと単電子のエネルギー準位が一致したときに電子が出口側のゲート電極から放出されます。共鳴準位を持つデバイスを意図的に作り出すのは難しいのですが、我々が作製したデバイスにはある確率で存在するため利用しています。またゲート電圧を調節することにより共鳴準位を上下させられます。これがスリットを移動させることに相当します。振動により共鳴準位と電子の位置関係が変化し、電子が共鳴準位に近ければ電子が放出されやすく、遠ければ放出されにくくなるため、電子の放出による電流は増減します。」

この関係を利用し、電流の増減を観測することにより電子がどのように振動しているかを知る、というのが物性研による新たな手法だ。

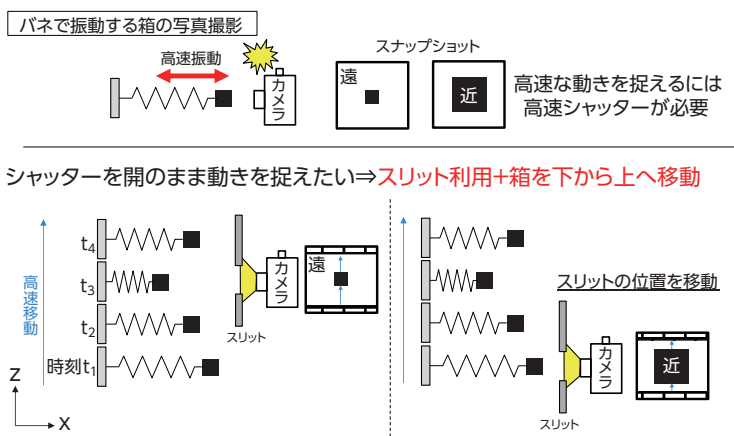


図2 アナロジーを用いた測定手法のイメージ

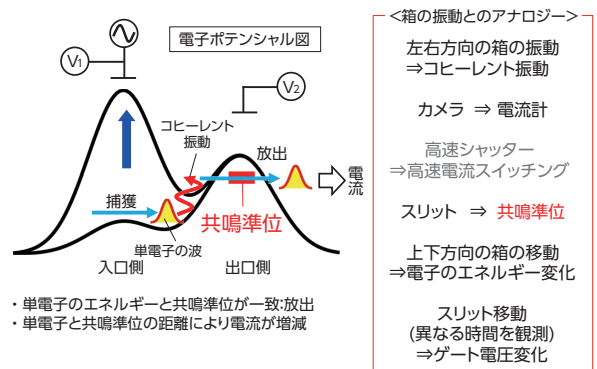


図3 共鳴準位による超高速サンプリング

## 超高速コヒーレント振動の 時間分解検出に成功

この手法による実験の結果を図4左に示す。グラフにおいて青と赤で示されている電流の変化が電子の振動を表している。この実験結果は図4右に示すシミュレーションの結果と一致している。

ゲート電圧の変化がスリットの移動に対応する関係から、電流と時間の関係を導き出したものが図4下のグラフだ。このグラフで確認できる電流の周期は250GHz程度であり、計算から導き出した予想と一致する。こうして超高速振動を検出する新たなサンプリング技術の有効性が証明された。

「共鳴準位さえ準備できれば我々が考案した手法で超高速な量子現象の検出が可能です。高速な電流スイッチングが不要、かつDC電流を測定することで実効的な時間分解測定が可能なこの手法により、周波数1THz程度までの振動検出も可能と期待しています。この成果は超高速駆動が可能な量子ビットの実現などに繋がる可能性があると考えています。」(山端氏)

## 単電子飛行量子ビット

こうした研究を経て現在取り組んでいるのが「単電子飛行量子ビット」の実現に役立つ研究だ。単電子飛行量子ビットは、単一の電子を閉じ込めて安定に伝搬できる経路を用意し、そこに単一の電子を伝搬してその状態を観測することで、量子コンピュータのビットとして利用するというものだ。

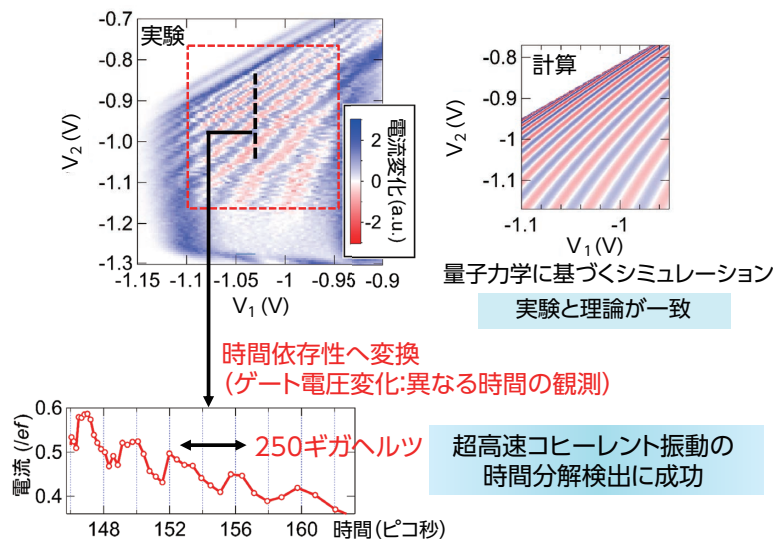


図4 実験結果

単電子飛行量子ビットのメリットとして、量子コンピュータの実装に関する問題を挙げることができる。実用化に向け研究が進む既存の量子ビットは高周波信号を必要とするため、個々の量子ビットに高周波電圧の配線が必要であるという問題だ。

「大量の量子ビットを使う量子コンピュータではこの配線が問題になると予想しています。単電子飛行量子ビットの動作には高周波信号が不要なため、配線を大幅に簡素化できる可能性があります。」(山端氏)

## シリコン内における単電子の クーロン相互作用を確認

単電子飛行量子ビットの実現に向けた研究の第一歩は、電子の衝突による「クーロン相互作用」の解析であった。GaAsなどの物質中における実験は報告例があるものの、シリコンデバイスを用いた報告例はなかった。

物性研は図1に示すようなデバイスにゲート電極を追加し2つの領域を作ること、転送後の電子の挙動を観察する実験を行った。

「2つ並んだ領域の右側に電子を

1つ捕獲した状態で、左側の領域から別の電子を1つ転送します。電子が無いところへ単電子を転送する場合と、すでに単電子が存在するところへ単電子を転送する場合の電流を比較すると、後者の方が余分に電流が流れることを観測できました。このことから、通常なら捕らえられたまま移動しない電子が、他の電子とのクーロン相互作用により移動することが確認できました。」(山端氏)

## 今後の研究活動

今後の研究活動について山端氏は次のように述べている。

「電子の波の幅を非常に狭く保てると、使いやすい量子デバイスの実現に役立つ可能性があります。このことに共鳴準位による超高速サンプリングと同様の仕組みを利用できるのでは、と考えています。基本的には主に単電子飛行量子ビットの実現に向けた基礎研究を進めますが、その他にも、たとえばこれまでの研究成果を高精度な電磁場センサの実現に活かすといったことを考えています。」