

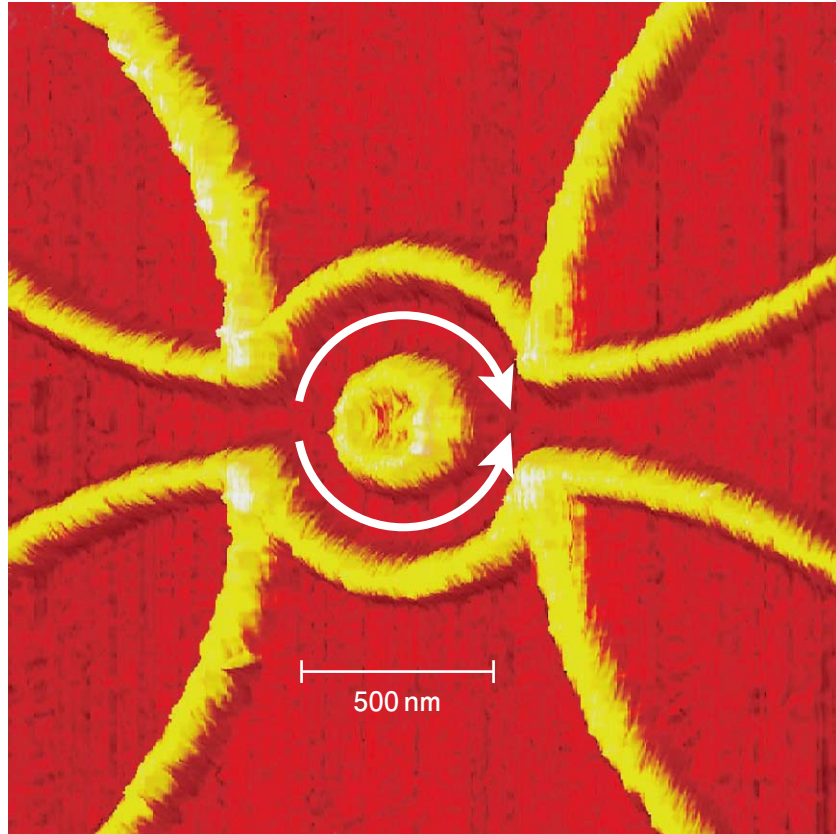


大学院工学研究科准教授

内海 裕洋

うつみや すひろ  
博士(情報科学)  
専門分野は、物性理論

この記事に関連した情報は以下のアドレスでもご覧になれます。  
<http://sites.google.com/site/utsumie/main>



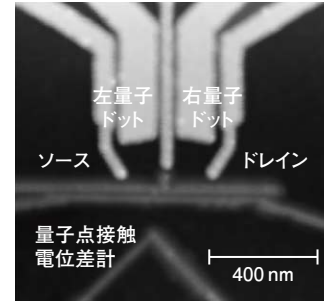
アハロノフ・ボーム干渉計(京都大学化学研究所との共同研究による)。(図1)

## ナノスケール回路内の電子を操り 新たなコンピュータの可能性をさぐる。

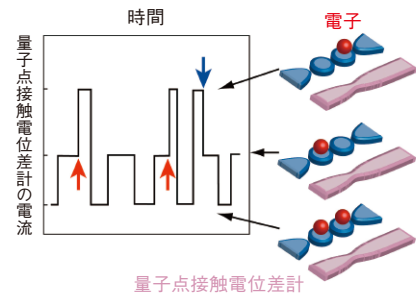
コンピュータは小型化し、今や回路の素子の大きさはナノ領域。そこでは量子力学の効果が現れ、電子は直感とは反する振る舞いをします。この量子効果が新たなコンピュータの動作原理になると考え、工学研究科では、ナノスケール回路内の電子特性を研究しています。

### 微細加工技術の進歩がひらく可能性

今やコンピュータは家電にも組み込まれ、ノートパソコンを喫茶店で気軽にインターネットにつなぐ、といったことも日常の風景となっています。このコンピュータの構成要素は電子素子(デバイス)と呼ばれ、その一つが半導体トランジスタです。半導体トランジスタは今からおよそ半世紀前に発明され、それ以来「集積されるトランジスタの数は約2年で倍増する」というムーアの法則に従って微細化が進んでいます。そして、今ではトランジスタの大きさは数10ナノメートルにまで小さくなっています。このナノスケールの世界は、量子力学によって支配されています。量子力学では不確定性原理により、電子は粒子であると同時に波です。現在使われているデバイスは量子力学の効果が小さい領域で動作をしていますが、今、量子効果を活用したデバイスが研究されています。

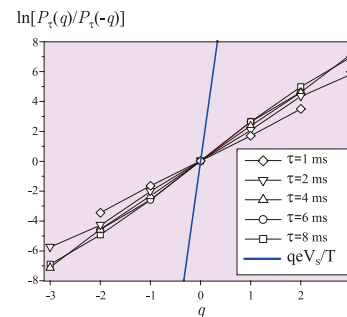
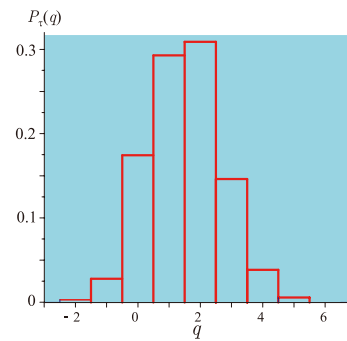


2重量子ドットおよびオンチップ量子点接触電位差計による単一電子実時間計数のセットアップ(スイス連邦工科大学との共同研究による)。(図2)



2重量子ドット(青)およびオンチップ量子点接触電位差計(紫)の模式図(図3)

電子(赤丸)が右の量子ドットにいるか(右図上)左の量子ドットにいる(右図中)かまた両方にいるか(右図下)で、電位差計を流れる電流が時間的に変動する(左図)。



電流分布の測定結果(上)と揺らぎの定理の確認(下)(NTT-BRLとの共同研究による)。(図4)

### 応用を目指した基礎研究

ナノスケールのデバイス内の電子を操る第一歩は、まずその性質を理解することです。それを研究する分野は「メゾスコピック系の物理」とよばれています。メゾスコピックとは巨視的(マクロスコピック)および微視的(ミクロスコピック)の中間の意味で、メゾスコピック領域では電子は量子力学により波として振る舞いながらも、人が操ることのできる程度の大きさとなります。そのため、メゾスコピック系は数々の量子力学の実験を行うことのできる、新たなフロンティアとして世界中で活発に研究されています。図1はその例で、高電子移動度トランジスタ内の2次元電子系をベースにつくられたアハロノフ・ボーム干渉計の写真です。これは電子波の通り道を二つに分けることで、出口で電子波を干渉させて、電気信号の振動を観測するデバイスです。我々は理論のグループですが、ドイツの理論グループや国内外の実験のグループと共同研究を行い、理論の予言の検証を行っています。

### 電子を数え、信号の揺らぎを調べる

近年、製造プロセスの微細化が進んだ反面、リーク電流や動作クロックの高速化に伴う発熱・消費電力の増大が深刻な問題となっています。その対策として、信号を担う電流を極力小さくするナノデバイスが考えられています。その一例が量子ドットで、これは数ナノメートルの領域に電子を一つだけ閉じ込めた微細構造です。量子ドットにソース電極およびドレイン電極をつなげることで、電子1個が信号を担うトランジスタができます。しかし電流がここまで小さくなると、信号とノイズ(信号分布の幅)の大きさが同程度となるため、デバイスの特性評価のためには信号分布そのもの、つまり電流揺らぎの確率分布をまず理解する必要があります。図2-図4はNTT 物性科学基礎研究所(NTT-BRL) およびスイスの実験グループとの共同研究で、二つの量子ドットを並べ、そこを流れる電子を一つひとつ数えて、その分布を測った実験です。電子の動きは二つの量子ドットのそばに作った、量子点接触電位差計と呼ばれるナノデバイスで、逐一モニターすることができます(図2、図3)。図4が実験で得られた分布ですが、分布の幅がシャープなほど信号の質が良いということになります。しかし、常に「揺らぎの定理」と呼ばれる物理法則を満たさなくてはならない上、電子の粒子であることから、信号分布の幅はある値以下に小さくならないことが明らかになりました(図4)。

### ナノデバイスが拓く、新たな機能

現在は半導体だけでなく、単一原子、分子、超伝導、磁性体などのさまざまな物質を用いたナノデバイスが作成されています。また、量子コンピュータや、電子の持つスピンの自由度を利用したスピントロニクスなど、その研究対象は多彩な広がりを見せています。今のところ量子効果を観察するためには10分の1ケルビン(室温の3000分の1)といった低温で実験しなくてははいけません。ただし、それに関して最近イギリスのアンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボセロフが、グラフェン(炭素のシート)を用いて作成したナノデバイスでは、室温で量子効果が現れることを示し、将来のブレイクスルーにつながる研究として注目を集めています。我々の研究は基礎研究の段階であり、現在はあらゆる可能性を試みているところで、実用化のためにはまだ数々のブレイクスルーが必要です。しかし、今は掌に載るコンピュータも、その黎明期には10トン以上もありました。今後どのようなブレイクスルーが現れるかは未知数です。我々は一步一步、ナノデバイスの基礎的な特性を明らかにすることで、将来のイノベーションにつながればと期待して研究を進めています。