

【ナノテクノロジー特集】ナノエレクトロニクス

## ナノエレクトロニクスにおける電位の On-Off スイッチを 研究者らは発見 (米国)

カリフォルニア州、バークレー - 電子回路は、シリコンウェハー上に微細にエッチングされたラインから、特性解析が困難なまでに小型化している。こうした中で米国エネルギー省(DOE)のローレンスバークレー国立研究所(Berkeley Lab)とコロンビア大学の研究者らは、分子接合、すなわち金原子と単分子を接触させるナノサイズの回路素子を介した電子の流れを研究している。彼らの研究結果は、この接合を通じた電気抵抗は、その接合部を押したり引いたりすることで簡単にオンとオフすることができること、すなわち、ナノスケール電子デバイスのスイッチとして使用することができることを明らかにした。

「分子スケールにおける回路素子をデザインするためには、私達は、分子または接合部の固有特性が、測定された抵抗値に実際にはどのように関係しているのかを理解することが必要である」とバークレー研究所にある米国 DOE (エネルギー省) のユーザー用設備で世界中のナノ科学研究者の支援を行っている Molecular Foundry (分子工場)<sup>注1</sup> の中の一施設である、Theory of Nanostructured Materials Facility (ナノ構造物質理論施設) の管理者の Jeff Neaton は語った。「単分子結合中における全ての原子の位置を把握することは、現段階の実験においては不可能である。これらのサブナノメートルスケールが接合した時は分子理論で対処できないため、抵抗測定を解釈し、理解することを手助けできるのは、一部の原子理論だけである。」

従来のデバイスにおいて電荷を運ぶ電子は、周知の方式で回路に沿って拡散し、エネルギーのゲインやロス、電子が出会う不純物あるいは他の粒子との相互作用により生じる。

しかし、ナノスケールにおける電子は、量子トンネル現象と呼ばれるメカニズムで移動することができる。長さが微少であるために粒子は、エネルギーを消費することなしにエネルギー障壁を通じて消失したり、突然反対のサイドに出現したりすることが可能となる。

ナノスケールデバイス中の個々の分子を通じたそのような電子の トンネリング を追跡することは、難しいことが分かっている。「10 年以上、研究者らは、個々の分子による “配線の接続” と電気伝導度の測定を行っている」と Neaton は語った。「ナノ構造とワニ口クリップ導線との信頼性のある接続を行うことは、極めて挑戦的である。これは実験 (結果) をどう説明するのかを困難にした。その結果、実験と理論による伝導性がしばしば一定単位規模またはそれ以上のオーダーで異なっていた。しかし、理論と明確に定義された

---

注1 全米に5拠点あるDOE Nanoscale Science Research Centers(NSRC)の1つでバークレー研究所内にある。6つのナノ科学施設から成り立っており、ナノテクノロジー関連の研究に取り組む大学・政府・企業などの研究機関の研究者などに最先端の装置・技術・そして専門スタッフを提供している。

接点の実験との定量的な比較の時が来ていた。」

Molecular Foundry のユーザープログラムを通して、Neaton とコロンビア大学の実験的研究者の Latha Venkataraman と共に働いたポストドクター研究員の Su Ying Quek は、走査型トンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscope) を使用して、伝導性金チップで、材料表面の電流の変化を精査した。先行研究によると、金の STM チップを使用することにより、チップと分子溶液を含んだ金の表面との繰り返し、押したりおよび引いたりすることが可能となり、チップと金の表面間の接触部分をネックレスのように単一ストランド (一本鎖) にできる。

この鎖構造が最終的に切断したときに、直ぐ近くの分子は、鎖構造と金電極接点間のギャップに飛び込むことができ、その結果、伝導性が急激に変化する。この技術を使用することで、Brookhaven 国立研究所の Venkataraman および彼の同僚の Mark Hybertsen らは、金電極と接触するアミン (アンモニアが関係する分子グループ) を含む分子の伝導性が確実に測定されうることを最近見出した。

「今や我々は、私達の理論をベンチマーク (評価) する再現可能で矛盾のないデータセットを手に入れた」と Quek は語った。「このデータセットを比較することで、私達は、以前は見逃していた重要な電子の相互効果を発見した。私達はこれらのデータセットが追加されたときに、実験の結果に対して初めて定量的な合意を見いだした。」

それらの新しい理論的なアプローチを利用し、Quik、Neaton、Hybertsen と共同研究者のカリフォルニアバークレーの大学の Steven G. Louie および韓国の Yonsei 大学の Hyoung Joon Choi は、金電極と窒素を含むベンゼンリング状のビピリジンとの間における接点の導電性の研究を始めた。その実験データは、以前とは異なる 2 つ安定した伝導性を示した。Venkataraman らと協力して仕事をした Quek は、接合内の異なる構造に伴う二つの状態に対応してピークが表れると仮説を立てた。次に、Quek と Neaton は、二つの金分子の間に、垂直に配置され、角度をなして挟まれた接合の伝導性について説明する理論を細心の注意を払って組み立てた。

出てきた情報は驚くほど詳細であった。もし、ビピリジンが角度を持ち接合したときは、ビピリジンが垂直に接合した時よりも多くの電流が流れる。ビピリジンの伝導性は、接合中の分子配向にリンクしていたことを意味すると Quek は説明した。STM の実験では、徐々に引いていけば、金の最後のストランドが切断され、復帰した垂直のギャップはビピリジンにとって大きすぎず、それゆえ、あるアングルで繋がっている。ギャップが増大するにつれ、分子は垂直構造になり、伝導性が急落する原因となる。最終的に、さらに分子がまっすぐになり、そして、接触して破壊される。「一旦、我々がこれ (この理論) を決めた時に、不思議に思った。この挙動を逆転させることが出来るのか？」と Quek は語った。

Venkataraman との共同チーム、Quek と Neaton は、角度を持つ接合を押ししたり、まっすぐ引いたりすることで、なぜ伝導度を繰り返し変化させることができるのかを実証し、明確な on と off 状態になる機械的なスイッチを作製した。「この実験における興味深い点の一つは、ワニ口クリップを制御することがどの程度まで可能かということである」と Neaton は語った。「このビピリジンという特定の分子のために、実験では再現可能で信頼性のある方法で原子スケールの特性を交互に変化させ、接点における伝導性を切り替えることができる。」

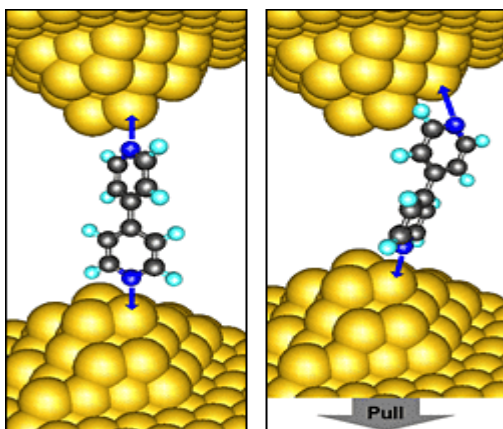
Quek と Neaton は、彼らの理論的骨組みを精査し、さらに複雑な分子接合に応用して例えば、有機薄膜太陽電池における太陽エネルギー変換などに有望なシステムの研究に対して役立てることを望んでいる。

「単分子接合における電子の移動を理解することが第一ステップである」と Neaton は述べた。「有機 無機界面は、ナノサイエンスのあらゆるところに見られるもので、ハイブリッド材料システムにおける電荷輸送のより良い図式を開発することは、電子デバイスの改良と新規発見を確実にリードするであろう。」

Su Ying Quek、Maria Kamenetska、Michael L. Steigerwald、Hyoung Joon Choi、Steven G. Louie、Mark S. Hybertsen、J.B. Neaton および L. Venkataraman による『機械的に制御された単分子接合の双方向（二元）伝導性スイッチ』は Nature Nanotechnology 誌に掲載されており、また Nature Nanotechnology のオンラインサイトでも入手出来る。

この研究の一部は、DOE 科学局の基礎科学部門および国立科学財団 ( National Science Foundation:NSF ) のナノ科学技術イニシアティブにより援助されていた。Molecular Foundry は、5 つの DOE ナノスケール科学研究センター ( Nanoscale Science Research Centers ( NSRCs )) の一つで、ナノスケールの学際研究のための最初の国立ユーザー施設である。同時に NSRCs は、ナノスケール材料の製造、加工、特性評価およびモデル作成のための最先端技術を研究者に提供する一連の補完的施設からなっており、National Nanotechnology Initiative の最大の基幹施設を含んでいる。NSRCs は、DOE のアルゴンヌ、ブルックヘイブン、ローレンス・バークレー、オークリッジ、サンディアおよびロスアラモスの各国立研究所に位置している。DOE NSRCs に関する情報は、<http://nano.energy.gov> を参照されたい。

バークレー研究所は、米国は、カリフォルニア州バークレーに位置する DOE の国立研究所で、機密扱いされていない科学研究を行い、カリフォルニア大学によりマネジメントされている。Website は、<http://www.lbl.gov> を参照のこと。



イラスト図は、“ Vertical(垂直線)”と“ angled (角のある)”の二つの機械的に誘導されたスイッチのための分子接合構造配置。研究は、こうした接合を通して、電気抵抗が on と off できることを明らかにしている。単純に、押すこと(左図)で構造が垂直になり、引っ張ることで構造に角度を付ける。



Molecular Foundry の Theory of Nanostructured Materials 施設の管理者の Jeffrey Neaton

翻訳 NEDO (担当 総務企画部 土橋 誠)

出典:

<http://www.bnl.gov/cfn/news/PRdisplay.asp?prID=922>

(Copyright 2009 Brookhaven National Laboratory. Used with Permission)