

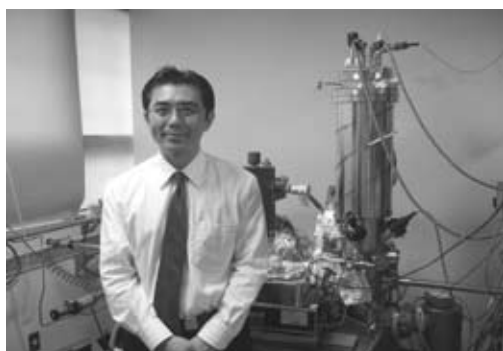


In Laboratory Now

研究室訪問 1

電子デバイスが切り拓く未来

真島 豊 研究室～電子物理工学専攻



真島 豊 准教授

これまでトランジスタというスイッチ素子の縮小化に支えられてきたコンピュータの発展は、サイズが極小になったことに起因する障壁によって阻まれようとしている。

真島先生はこの問題を、従来トランジスタに用いられてきたシリコン系半導体ではなく、分子やナノ粒子を利用する新しいデバイスを作製することで解決しようとしている。

最近スイッチ動作をすることが発見された金属内包フラーレンや、ナノギャップ電極などについて真島先生の話伺った。



半導体の限界とナノテクの要請

近年のコンピュータの発達には目覚ましいものがある。パソコンを始めとする各種コンピュータは、もはや必要不可欠な存在とも言えるまでに我々の生活に浸透してきた。そのコンピュータの発展に寄与したのは、内部集積回路の小型高性能化である。その中で特に大きな成果を上げたのは、集積回路を構成するトランジスタというスイッチ動作をする半導体素子の縮小化であった。

このトランジスタの縮小化について、ムーアの法則と呼ばれる法則がある。それは世界有数の半導体メーカー・インテルの共同創業者であるゴードン・ムーアが1965年に提唱した「集積回路におけるトランジスタの集積密度は、18～24ヵ月ごとに2倍になる」という法則であり、これは1965年当時、ムーア本人はあくまで予測として発表したものであったが、その後約40年にわたるコンピュータ業界の発展はこの予測に従うこととなった。そのため「法則」と呼ばれるのである。

以前からこの法則については、トランジスタを原子一つのサイズに縮小するまで問題なく適用が可能であると考えられていたが、ごく最近になってこれまで想定されていなかった問題が生じ始め

た。これまでは電子の動きを電流としてマクロの視点で捉えていたが、トランジスタをナノスケールにまで縮小化してしまったことで電子一つ一つの動きをミクロの視点で追わなければならなくなったのだ。

そこで問題となったのが、トンネル効果を始めとする電子の量子的振舞いである。ここでいうトンネル効果とは二つの電子軌道が2nm程度まで接近すると起こりやすくなり、図1のように二つの電子の波動関数が重なった時に、本来ならば越えられないはずのポテンシャルエネルギーの壁を越えてしまい、隣の波動関数の軌道へ電子が抜けてしまうという現象のことである。その結果として想定されない電流がデバイスに流れてしまう。この電流をトンネル電流と呼んでいる。ここでいう波動関数とは、ある時刻 t に電子が位置 x にいる確率を与える関数のことである。このトンネル電流によってデバイスが誤動作したり、正常に動作していても無駄な電力が消費されるためにデバイスが高温になってしまうなどの様々な問題が発生するのだ。

それ以外には、量子的振舞いによる問題ととも

に縮小化の際に障壁になるものとして、デバイスや素子のサイズ揺らぎ（誤差）の問題がある。トランジスタの材料として現在主流のシリコン系半導体は、リソグラフィと呼ばれる方法を利用して造られてきた。これは、シリコン素材の上に感光材を塗布して写真の現像のようにレーザー光線で回路パターンを写しこみ（露光）、不純物を照射するというような流れで集積回路を造る技術のことである。

リソグラフィを利用した半導体作製技術のように、既存の素材や装置からそれよりも小さなデバイスや素子を造る技術のことをトップダウンプロセスと呼んでいる。これには必ずナノオーダーの誤差を伴うが、デバイスの動作に深刻な影響はなかったため、従来はこの手法によって縮小化を図ってきた。

しかし、サイズが数 nm にまで小さくなると、露光の際の誤差が無視できなくなってしまった。デバイス自体がナノサイズになることで、サイズ揺らぎがそのままデバイス自体の安定な動作を揺るがす程のものになったのである。

これらの障壁によってムーアの法則は 2020 年頃に限界を迎えるとされており、それにちなんで 2020 年問題と呼ばれている。従来使用してきたシリコン系半導体を用いたままこの問題を解決しようという考え方もあるが、真島先生は新たに分子やナノ粒子を用いたデバイスでの解決に挑んでいるのだ。

先生が分子やナノ粒子の利用を考えたのには主に二つの理由がある。一つは分子やナノ粒子の構造が一意的であるためだ。原子や分子はその種類によって大きさや結合距離が決まっており、同じ種類のものは全て同じ特性を持つことになる。そのような性質を持つ分子を部品として組み合わせてデバイスを構成すれば、部品自体にサイズ揺らぎがないためデバイス自体も揺らぎのない安定したものができるのである。このように、先に分子やナノ粒子といった極小の部品を用意してデバイスを組み上げる技術のことをボトムアッププロセスと呼んでおり、前述のトップダウンプロセスとは逆の考え方をしているものである。もう一つは、1959 年に物理学者ファインマンが行った「There's Plenty of Room at the Bottom」という講演だ。この講演でファインマンは「原子や分

子にはデバイスとしての利用可能性がある」と述べており、量子的振舞いを利用してナノサイズデバイスを作製することを提案した。これはナノテクの概念を初めて導入した講演とされるが内容は理論的なものが多かった。その理論を元に具体的なデバイスを作製し、2020 年問題を乗り越えようというのが先生の試みである。

シリコン系半導体においては、縮小化のために何をすればいいのかがわかった上で、それをどう実現するかというのが研究の対象であった。しかし、分子やナノ粒子の場合はそれら自体の特性はもちろん、その特性をデバイスにどう利用したらよいのかなど不明な部分が多い。そのため先生は分子やナノ粒子を扱う上で、以下のような 4 つのプロセスで研究を進めている。

- (1) 一つの素子として安定に動作させる
- (2) 素子を集積させるプロセスを確立する
- (3) 集積化の際の揺らぎ、誤差を克服する
- (4) 具体的なデバイスとして組み上げ、実際に利用できるようにする

現在はまだ (1) の段階から (2) に入ろうというところで、真島研では分子デバイス・ナノ粒子デバイスという新たな分野を開拓することで 2020 年問題に立ち向かっているのである。

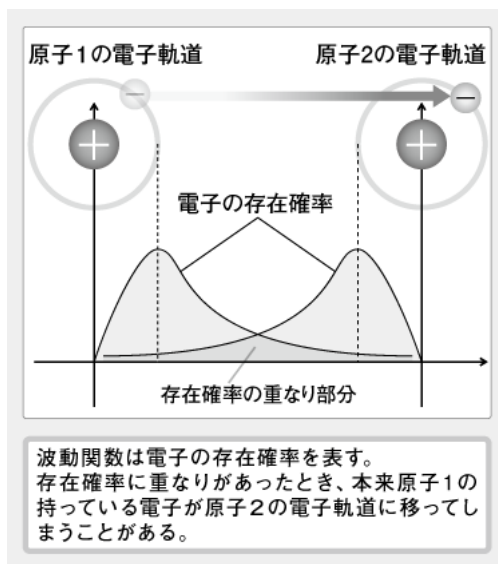


図1 トンネル効果の説明



単一分子スイッチの発見

炭素の同素体の一つに炭素原子の六員環と五員環が組み合わさったフラーレンと呼ばれるものがある。一番有名なものは炭素原子 60 個からなるサッカーボール状の分子で、とても対称的な構造をしている。フラーレンは構造の似ているカーボンナノチューブとともに、ナノテクノロジー分野での素材として大変期待されている。

これの一種に、C82 フラーレンの内部にテルビウムという金属を埋め込んだ、テルビウム C82 というものがある。このようにフラーレン内に金属原子を埋め込んだものを、金属内包フラーレンと呼んでいる。C82 という名前から分かるように、これは 82 個の炭素原子で構成されており、C60 とは異なり対称性が低くなっている（図2）。そのため分子内に電氣的に安定な場所とそうでない場所が生じ、金属を内包させるとその金属は最も安定な、対称軸上の 1 点に固定される形になる。すると分子内に電荷の偏りが生じることになり、分子全体で極性を持つようになる。真島研究室では、この極性の利用によって金属内包フラーレン分子をスイッチとして動作させられるということの世界で初めて発見した。

その際に使用した測定機器が、STM（走査型トンネル顕微鏡）と呼ばれる顕微鏡である。これ

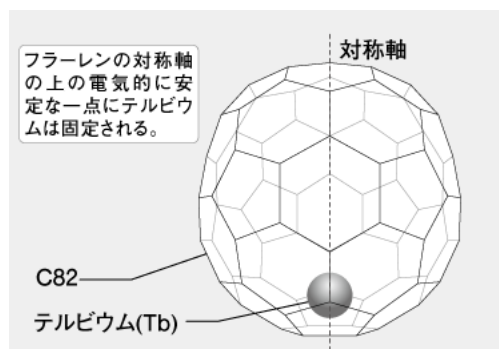


図2 Tb@C82 の分子構造

は、学校の理科の授業で使用するような試料の拡大画像を直接観察するものとは異なる。図3左に示すように、先端が原子一個レベルの極細の針を試料に近づけ、針と試料側の基板の間に電圧を印加した（かけた）際に試料から針先の原子へと生じるトンネル電流を検出しているのだ。

この STM には二つの利用法がある。一つは試料と針の間に印加する電圧は一定にした状態でこの間に流れるトンネル電流が一定になるようにフィードバックをかけて針を前後左右に動かし、試料の構造を調べることだ。もう一つは針の位置を固定した状態で印加電圧を変化させてトンネル

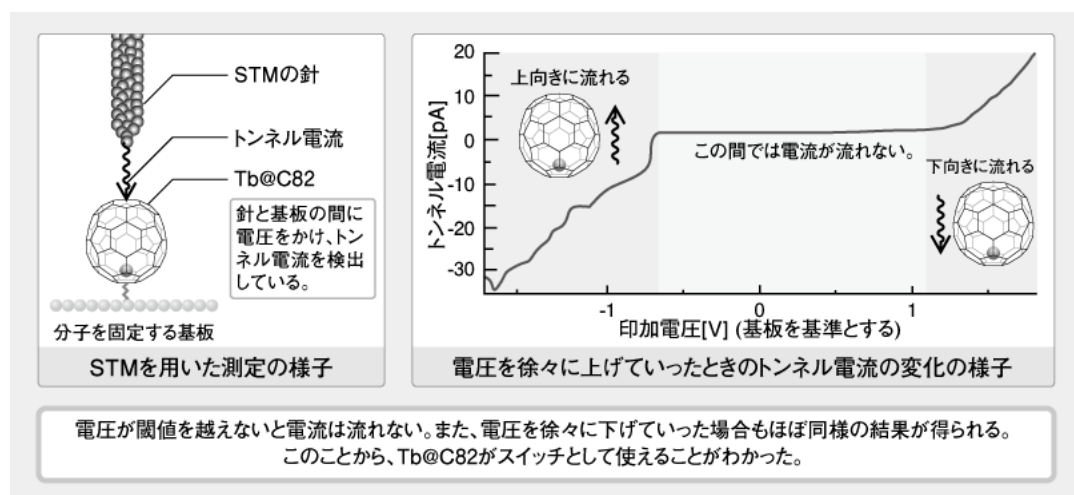


図3 STM によるフラーレンの電流電圧特性の測定結果

電流の流れ方、すなわち電流－電圧特性を測ることである（図3右）。いずれの利用法でも針と試料の間の距離がとても重要になってくる。例えば、距離を0.1 nm ずらすだけで電子の存在確率が1桁変わるため、トンネル電流が流れるかどうかの確率が大きく変わってしまう。従ってこの測定にはナノオーダーでの精度を要求されることになるのだ。それを満たして正確なSTM計測ができるようにした点が、先生の研究における最大の特徴である。

さて、金属内包フラーレン分子に対して印加する電圧の値を変化させてSTMでトンネル電流を検出させたところ、電圧の絶対値によってトンネル電流が流れるかどうかを制御できることが分かった。

電流の制御が可能になったのは二つの理由によると考えられている。一つは、フラーレン分子の向きによるトンネル電流の流れやすさに違いがあるためである。炭素原子で構成される籠と内包されている金属では、内包金属のほうに電荷の偏りによって電子を受け取りやすい。電子は電界と逆向きに動こうとするので、フラーレン分子の向きによってトンネル電流が流れるかどうかの差異が生じるのである（図4）。そのため、フラーレン分子をトンネル電流の流したい向きに応じて回転させることで、トンネル電流が流れるかどうかを制御できることになる。

もう一つの理由は、量子化という現象によって電流が流れない状態が生じてしまうためである。量子化とは、エネルギーなど、連続的な値を持つ物理量が飛び飛びの値しかとれなくなることだ。この量子化だが、今回の印加電圧が閾値を超えないとトンネル電流が流れないという現象には、二つの要因となって現れてくる。一つはクーロンブロック現象と呼ばれる現象であり、これは電子の持つエネルギーが量子化することにより、外部から与えるエネルギーが閾値を越えないと電子が分子やナノ粒子に乗らない、という状態を作り出せるというものである。もう一つは分子の持つエネルギー値が量子化することにより、印加電圧を逆向きにしたら閾値を越えれば回転に必要なエネルギーを得て分子が回転し、トンネル電流が逆向きに流れるというものである。つまり、印加電圧を逆向きにしても閾値を超えなければ分子は回転できず、トンネル電流は流れないのだ。

現在のところは、金属内包フラーレン分子がスイッチ動作をすることが分かっただけで、分子をどうやって回路に組み込んでデバイスとして動作させるのかという部分に関しては課題が残っている。特に、分子とドナー（電子供与体）・アクセプター（電子受容体）をどう繋ぐかというのが問題である。共有結合させることができれば構造上は安定するが、外部電圧によって分子を回転さ

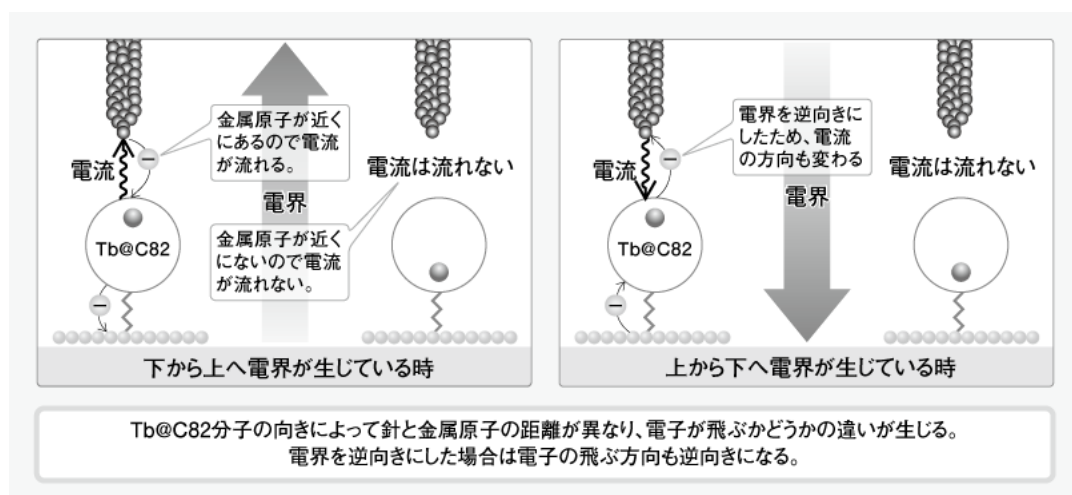


図4 金属内包フラーレン分子配向スイッチの原理



ナノギャップ電極とナノデバイス

前章で述べたようなスイッチ動作をする分子を実際にデバイスとして利用するためには、分子一個程度の幅に対して電圧を印加するための電極を用意しなければならない。そこで真島研究室では、電極間の幅が数 nm の電極、すなわちナノギャップ電極の作製も行っている。

この電極を造る際には無電解めっきという方法を用いている。まず、電子線リソグラフィを用いてめっき前の金電極対を作製する。そして金をヨウ素に溶かした溶液を用いて、これを金めっきする。この方法では溶液に元の素材を浸すだけで、溶液の還元作用によって金表面にだけめっきされる。すると、図5に示すようにギャップ長が5 nm 以下の電極が作製された。さらに、このギャップ長はたとえ過剰にめっきしようとしてもほぼ一定に保たれた。この理由としては様々な仮説があるが、まだはっきりとは分かっていない。しかし、めっきによってギャップ長を固定できるようになり、できあがった電極で導通試験を行ったところ短絡が起こらないものが多かったのだ。なお、5 nm 程度のギャップ長ならばトンネル電流はとても流れにくい。最終的にギャップ長が5 nm 以下で短絡もしないものは4割以上であった。これは化学的操作を用いてナノギャップ電極を作製することとしてかなり高水準な再現性があるといえる。

このギャップ長の固定は何に役立つのだろうか。前述の通り、ナノデバイスはサイズ揺らぎが問題なので、サイズを固定できるというのは大きな強みになる。このギャップ内へ、やはりサイズ揺らぎのない分子やナノ粒子というものを組み込むことができれば、サイズ揺らぎが非常に小さいデバイス作製の可能性があるのだ。

また、真島研究室ではナノギャップ電極の作製に成功したことから、ギャップ内に複数の金原子で構成されるナノ粒子を埋め込み、デバイスとして動作するかどうかの研究も行っている。そこで、クーロンブロッケード現象の利用などにより、

単一電子トランジスタと呼ばれる電子一つ一つを通すか通さないかを制御するスイッチ素子が作製可能であることが分かった。こちら、前章で紹介したフラーレン分子配向スイッチ同様、シリコン系半導体に代わる新たな素子として期待されている。

ナノテクに関係する研究室では、前章で述べたような分子の特性の分析か、本章で述べたような実際のデバイス造りに直結する部分の研究のいずれかを主としているところが多いそうである。その中で、真島研究室は双方を研究対象とし、物性分野とデバイス分野の橋渡しをするような研究を行っているところが最大の特徴である。今はまだ分子やナノ粒子がスイッチ素子として働くことが分かっただけであるが、これが具体的にデバイスとして利用できるようになれば2020年問題を解決することが期待される。近い将来訪れる問題を解決するため、真島研究室は日々研究を続けている。

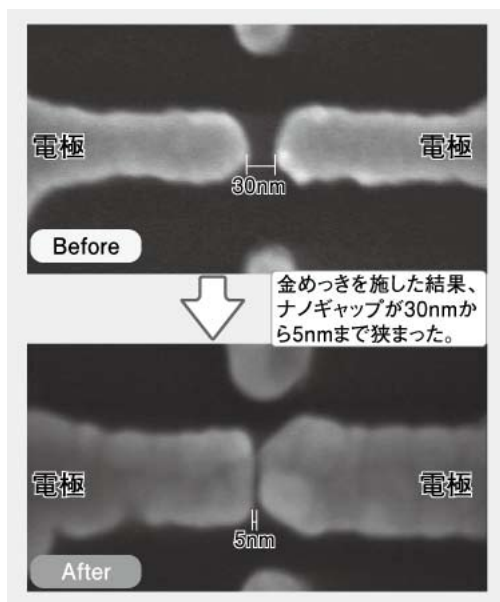


図5 無電解めっきにより作製したナノギャップ電極

今回の取材で伺ったナノデバイスに関するお話は大変興味深いものばかりでした。お忙しい中、

度重なる取材に快く応じてくださった真島先生に厚くお礼申し上げます。(秋葉 一記)