

今と未来を明るくする 有機エレクトロニクス

有機・高分子物質専攻
森 健彦 研究室

森 健彦 教授 1957年愛知県生まれ。東京大学大学院理学研究科化学専攻修了。2006年より、東京工業大学有機・高分子物質専攻教授。



森研究室では有機エレクトロニクスの研究を行なっている。有機エレクトロニクスとは有機半導体をベースとした電子工学のことであり、近年とても注目されている分野の一つである。本稿ではその中でも代表的な有機半導体と、あわせて有機超伝導に注目して紹介する。また、森研究室ではどのようなアプローチで研究に取り組んでいるかということについても触れていく。

身近にあふれている材料

身の回りの製品はいろいろな材料から作られている。材料は有機材料、無機材料、金属材料の3つに大きく分けることができる。その中でも有機材料は、材料自体が安く、環境への影響が小さいという点で非常に注目されている。

一口に有機材料と言ってもいろいろな種類があり、その中でも近年特に注目されているのが、有機エレクトロニクスという分野の材料である。この分野の材料を応用した製品では、有機Electro-Luminescence（以下有機ELとする）という現象を利用して作られた製品がもっとも普及している。

ここで、有機ELの仕組みについて簡単に説明する。まず、有機物に電圧をかけることによって有機物内に電子とホール（正孔）が注入される。そしてこれらが再結合して安定化する際に生じるエネルギーが光として放出される、という物理現象が有機ELである。

有機エレクトロニクスの材料が注目されている理由は、軽くて薄いという利点があることだ。有機エレクトロニクスの製品で開発されているものとしては、有機ELディスプレイやスキャナがある。有機ELディスプレイは40インチのものになると、同じ大きさの液晶ディスプレイの半分の重さになると言われている。また、有機ELディスプレイとして機能している部分自体の厚さは1 μ mもない。厚さのほとんどはディスプレイを支えるためのものである。

さらに、有機エレクトロニクスを利用した製品の一番の特長は曲がるということであり、この利点を生かしたスキャナも開発されている。このようなスキャナが実用化されれば、今の方法では難しい、曲面のスキャンを綺麗に簡単に行うことができるようになるのだ。

そして、有機エレクトロニクスにおける最大の目標は、印刷エレクトロニクスの確立である。印刷エレクトロニクスとは、印刷法によって、有機

薄膜を利用した電子デバイスを作成する技術である。印刷法とは、インクジェット印刷やスクリーン印刷などの印刷技術である。印刷エレクトロニクスの利点は、柔軟性があるものの上にも大面積の電子デバイスを作れるということである。

現在、ICカードのICチップには高価な単結晶無機半導体が使われている。しかし、有機半導体を使い、印刷法でICチップを作成すると、作成にかかる費用を大幅に減らすことができる。そのため、印刷法によるICチップ印刷技術の確立が期待されているのだ。しかし、ICチップには高性能の半導体が必要であり、費用を抑えるためには、それを有機の半導体で作らなければいけないという課題が残っている。

有機エレクトロニクスはとても将来性がある分野である。無機半導体のような高性能な有機半導体を作成するとともに、印刷エレクトロニクスの確立を目指した研究が行われている。

トランジスタの研究

有機エレクトロニクスの分野では、有機ELとトランジスタ、太陽電池がいわゆる御三家となっている。そして、森先生の研究室では、その中でも主に有機トランジスタについての研究をしている。

トランジスタとは、簡単に言うと電気の流れのオン、オフを制御する素子である。有機トランジスタはまだ製品の中では使われていないが、無機薄膜トランジスタは多くの製品の中で用いられている。トランジスタには機能や特性によってさまざまな種類があり、先生が主に研究しているのは

有機電界効果トランジスタである。

まず、有機電界効果トランジスタの構造を説明する（図1）。一番下にSiの土台があり、その上にSiO₂がある。この部分をゲート電極として用いる。そして、その上に有機半導体があり、有機半導体の上の左右両側にソース電極とドレイン電極と呼ばれるものがある。

次に、このトランジスタの原理を紹介する。まず、ソース電極またはドレイン電極とゲート電極の間に電圧をかける。するとSiO₂は絶縁体なので、有機半導体とゲート電極との界面にそれぞれ符号が逆の電荷がたまる。その状態でソース電極とドレイン電極の間に電圧をかけると、有機半導体側にたまっているホールまたは電子が電流の担い手となり電気が流れる。ゲート電極間との電圧を切ってしまうと、電荷は界面にたまらないので、ソース電極とドレイン電極の間に電圧をかけても電気は流れない。

有機トランジスタは無機トランジスタと違って、ソース電極とドレイン電極の間に電気を流すためにはゲート電極に高い電圧をかける必要があった。そこでソース電極とドレイン電極に金を使った有機トランジスタが登場した。多くの有機トランジスタはホールを電流の担い手として動かすことが多いので、金のようなイオン化傾向の小さな金属を使うのが有機エレクトロニクスでは好都合で標準的なのだ。

だが、金の電極の上に有機半導体をつけると抵抗が大きくなり、金の利点が活かせなくなってしまった。金の上に有機半導体が素直に接着しないためである。そこで先生は、ドーブした有機物を

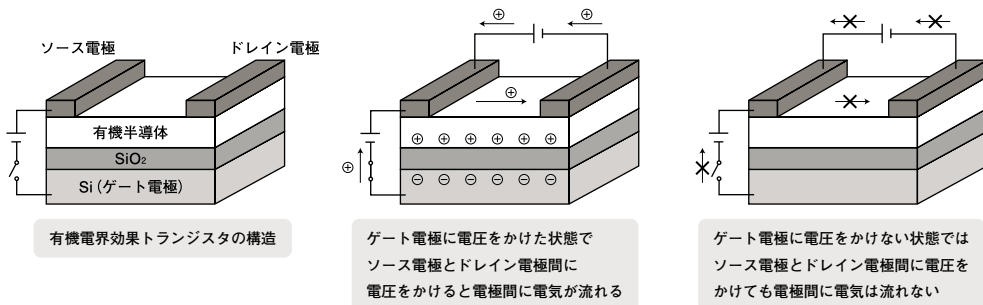


図1 有機電界効果トランジスタの構造と仕組み

有機電界効果トランジスタは、ゲート電極にかかる電圧を制御することでソース電極とドレイン電極の間の電気の流れを制御できる。

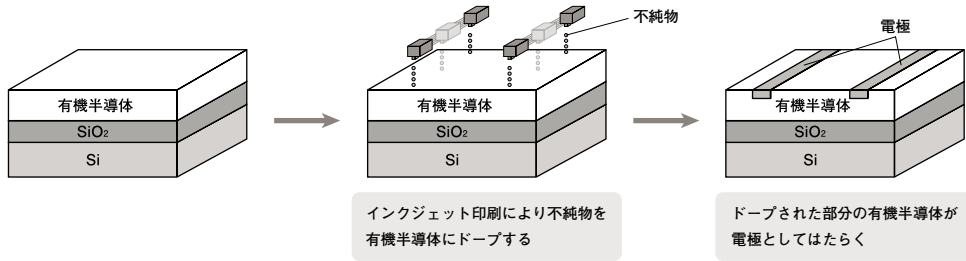


図2 セルフコンタクト有機トランジスタの作り方と構造

有機半導体に不純物をドーピングすることで、その部分が電極としてはたらくようになる。これがセルフコンタクト有機トランジスタである。

電極に使う、すべて有機物からなるトランジスタを開発しようと考えた。ドーピングとは、ある物質の性質を変化させるために、少量の不純物を添加することである。現時点では、ドーピングした有機物を電極に使う、金電極のものと同程度の性能をもつデバイスを作ることが目標となっている。

また、先生は電極にさまざまな有機物を用いるのではなく、一種類の有機物でトランジスタを作ろうと考えた。これをセルフコンタクト有機トランジスタと呼んでいる(図2)。セルフコンタクト有機トランジスタでは、有機半導体にドーピングした部分が電極としてふるまうのだ。有機物にドーピングする際には、インクジェット印刷などの印刷法も使われている。そのため、電極の接着の手間を省くことができるので、金電極を使ったときのような、接着がうまくいかないという問題が起らないのだ。

一方、新しいセルフコンタクト有機トランジスタを見つけていくには難しい点がある。セルフコンタクト有機トランジスタは、電極用の有機物と半導体用の有機物に同じ物質を使っている。しかし、半導体用の有機物にドーピングしても、電極としてあまり電気を流さないうえに化学的に安定ではないため、一般的には電極としては不向きである。よってドーピングしたときに安定した物質で、しかも有機半導体として性能の良いものでないと、半導体用の有機物からセルフコンタクト有機トランジスタは作れないのだ。先生の研究室では有機合成の研究も行なっているので、そのような物質を作ろうとしている。

先生はこの研究の途中で、いくつかの物質でセルフコンタクト有機トランジスタを作れることを

発見した。しかし、それらはすべてもともと電極としての性能が良く、後から半導体としても使えるとわかってセルフコンタクト有機トランジスタに用いられたものである。そこで先生は逆を考えてみた。つまり、半導体として良い性能をもつ有機物で、電極としても使える物質を探そうとしているのである。

このように先生は、試行錯誤を繰り返し、新たな視点からより良い性能の有機トランジスタを作ろうとしている。

有機超伝導の研究

森研究室では超伝導の性質を示す有機物についても探求している。超伝導とは極低温で電気抵抗がゼロになる性質のことである。

そもそも超伝導の性質を示す有機物は数少ない。今見つかっているもの以外に超伝導の性質を示す有機物が見つかれば、それ自体が非常に画期的なものとなるだろう。

超伝導になる物質を見つけるために、先生は超伝導を示す物質の特徴を探そうとした。その研究の結果、超伝導になるための条件はおそらく二つあるだろうと考えた。

一つ目は、酸化された後に化学的に安定である分子を作らなければならないということだ。この条件を満たす分子というのはHOMOのエネルギーが高いものである。HOMOとは電子が存在している軌道のうち、一番エネルギーの高い軌道のことである。HOMOのエネルギーが高いと、イオン化エネルギーが小さくなり、酸化されやすく、酸化された後の分子が安定になるので、超伝

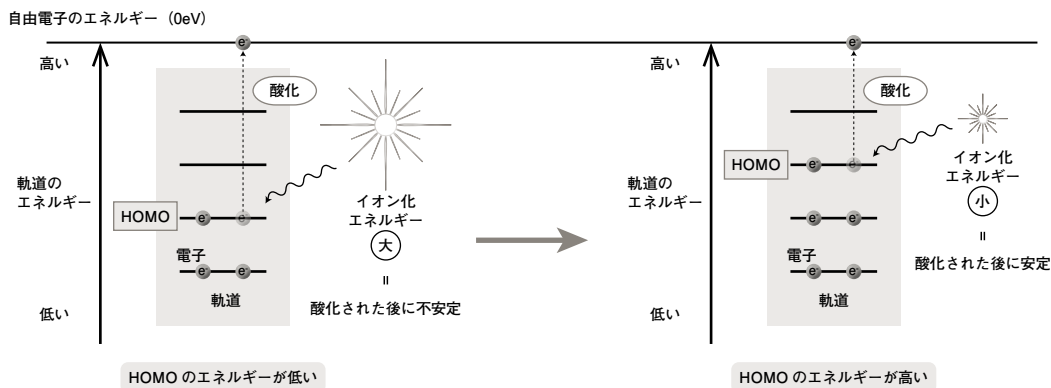


図3 HOMOのエネルギーとイオン化エネルギーの関係

HOMOのエネルギーが高いとイオン化エネルギーが小さくなり酸化しやすく、酸化された後の分子が安定になる。

導になるのだ (図3)。

二つ目は、一次元伝導体ではなく二次元伝導体の物質が超伝導になりやすいということである。一次元伝導体とは、ポリアセチレンのように一直線に原子が並んでいるものである。このような場合、結合が一直線のため、単結合と二重結合の区別が付きやすいのだ。それに対して二次元伝導体はグラフェンのように平面上に縦横無尽に結合が並んでいるため、一次元伝導体のように簡単には結合の区別がつかない (図4)。

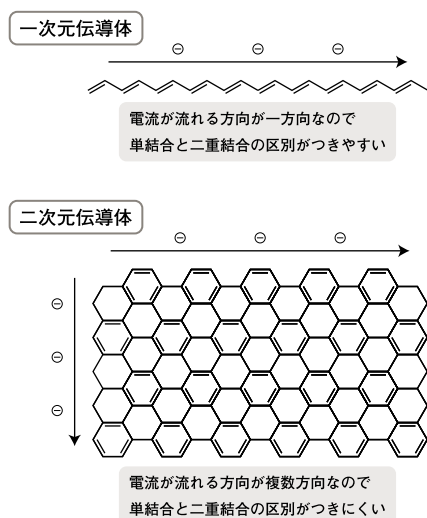


図4 一次元伝導体と二次元伝導体

電気が流れる方向が複数方向だと単結合と二重結合の区別が付きにくく、超伝導になりやすい。

電気の流れやすさは電子の原子間の移動しやすさに依存する。一次元伝導体は、結合の区別がつくことによって温度を低くしていくと電子がもつエネルギーが小さくなり、電子がエネルギーギャップを超えて移動しにくくなる。そのため電子が一つの原子にとどまるようになり、極低温で絶縁化しやすいのだ。しかし二次元伝導体だと簡単には結合の区別がつかないため、極低温になったときも電子は一つの原子にとどまるということはなく、そのため超伝導になりやすいのだ。

したがって、結晶になったときに、二方向に電子を流すような分子は超伝導になりやすい。通常、いくつかの分子が積み重なっているとき、その重なった方向に電気が流れる。また、分子の側面に硫黄などが多く、そのπ軌道が横の分子のπ軌道と重なることにより、分子間を電子が行き来し、電気が流れるのだ。このように分子間で縦と横の二方向に電気を流す分子は二次元伝導体に分類され、超伝導の性質を示しやすいのだ (図5)。

先生はこのことに学生時代から目を向けており、博士論文では分子間の軌道の重なりを量子化学計算によって求めた。電子やホール動きやすさというのは軌道の重なりで決まるので、軌道の重なりを求めれば、その物質が一次元伝導体なのか二次元伝導体なのか分かるのである。

このように先生は学生時代から超伝導について考え続け、将来超伝導の性質を示す有機物を探し当てようと日々研究を進めている。

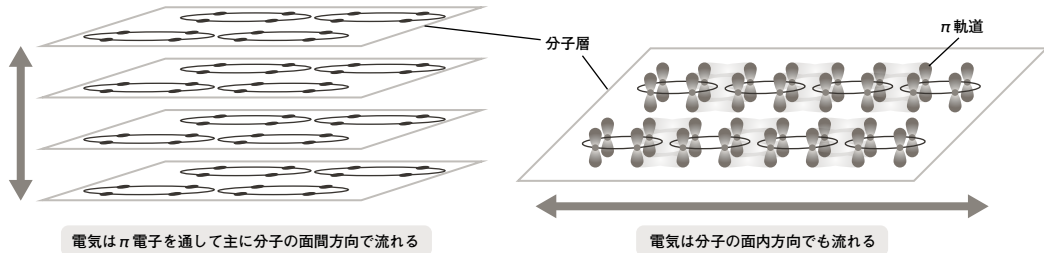


図5 結晶内の分子の面間方向と面内方向の二方向に電気を流す分子

分子の面間と、面内を電子が行き来している。このような分子も二次元伝導体である。

先生の研究に対する姿勢

ここまで森先生のトランジスタや超伝導の研究を紹介してきたが、どの研究も順調に進んだわけではない。意図に沿った性質をもつ材料を作るとは、とても難しいのである。材料の性質は分子そのものの性質だけでなく、その分子の結晶を作ったときに、結晶内で分子がどういう配置をとるかでも変わってくる。特に有機物ではそれが顕著なのだ。そこが有機物の研究をするうえで難しいところであり、おもしろいところでもあると先生は考えている。

有機エレクトロニクスは、まだしっかりと体系化されていない分野である。現段階では、複雑な分子がどのような結晶構造をとるかというのは、スーパーコンピュータを用いてもわかるものではない。そのため現状では、ある程度思いつきで数多くの物質を作ることが、結果として最良の方法である。現在、有機エレクトロニクスには革新的な発見があるだろうと多くの研究者が思っており、全世界で活発に研究がされている。

また、先生は原理的なところまで自分の研究分野を突きつめていくことをポリシーにして研究に向かっている。企業はほかの企業に負けないように、商機になりそうなところを探し必死に研究している。そこで大学は、企業が目をつけていないところ、つまり基礎的な研究をするべきではないかと先生は考えている。トランジスタでの例を挙げると、トランジスタのはたらく原理を解明することや、温度変化によるトランジスタ特性を見ることなどだ。このような研究は、企業の目を引かず、製品化には直結しない遠回りの道である。し

かし、性能の良いトランジスタを作るには、そうした研究も必要だと先生は考えている。

先生が思う科学の望ましい姿は、ある科学の分野が産業として応用されていく中で、その分野の基礎的な学問もともに前進していく、または、そこに新しい展開があるというものだ。産業に応用されている分野の中でも、基礎的な部分の多くは案外研究されずに残っていることがある。しかし最近では、市場の興味が新しいものへとすぐに移り変わってしまい、学問として深く理解される前に流行が去る傾向にあるのだ。

また、一つの研究を長く進めていったときに、それが行きづまってしまう場合があるということも問題として挙げられる。同じ研究を続けていくと途中で似たようなものが多く出てきて、前のものを超えるものは簡単には出てこなくなる。そのようなときには大きな発想の転換が必要である。科学を学問的に突き詰めようとするときにも、新しいことを常に考えていかなければならないと先生は考えている。新しい考えをもたなければ、新しいものは生まれないのだ。

執筆者より

取材では、私たちにわかりやすく丁寧にお話をしていただき、とても参考になりました。また、森先生の有機エレクトロニクスに関する研究内容だけでなく、先生の研究に対する姿勢についても伺うことができました。最後になりますが、お忙しい中、度重なる取材などに快く応じてくださった森先生に心より御礼申し上げます。

(柳沢 佑)