



ナノの世界で何が起きる!?

高柳研究室 ~ 物性物理学専攻



左から、箕田 助手、高柳 教授、谷城 助手

小さなものに対する興味とはいつ頃から生まれたのだろうか。その興味にしたがう人は技術革新を繰り返し、現在では原子サイズのものまでも扱えるようになった。これがナノサイエンスが生まれた背景である。

ナノサイエンスの初期において、その研究対象は炭素から成る物質に限られていた。そんな中、高柳先生は世界で初めて同時観測を成功させ、金ナノチューブという物質を発見したのである。

金という元素を手がかりに、先生はナノサイエンスの新たな可能性を示したのだ。



ナノサイエンスとは

この世界に存在する全ての物質は原子から成り立っており、その配列の違いによって物質は多様な性質を示す。一番身近な例としては、グラファイトとダイヤモンドが挙げられる。これらは共に炭素原子のみから成り立っている物質だが、原子の配列が異なるために、硬さや電気伝導など様々な面で異なる性質を示すのだ。原子の配列を変え、違う物質を作り出すため、昔から様々な方法が用いられてきた。ただ、今までは原子一つ一つを別々に操作することは困難だったため、現在は化学反応のように原子の集団をまとめて操作する方法が主流となっている。しかし、ここ最近になって全く新しい技術が開発されつつある。原子を直接つまみ上げるようにして動かし、役に立つ物質を作り出す技術。それがナノテクノロジーだ。

ナノテクノロジーで役に立つ性質を引き出すためには原子の配列が物質の性質にどのように影響するかを知らなければならない。それを研究するのがナノサイエンスである。ナノテクノロジーがより広く利用されるためにはナノサイエンスの発展が必要不可欠である。高柳研究室ではナノサイズで原子がどのように振舞い、それによりどのよ

うな性質が生まれるかなどの深い理解を得るため、ナノサイエンスの研究を進めている。

現在ナノサイエンスで調べられている代表的な物質に、炭素原子でできたフラーレンとカーボンナノチューブがある。こうした炭素でできた物質の性質はかなり詳しく調べられ、実際に応用できる段階まで研究が進んでいる。しかし、それ以外の元素に対する研究はあまり盛んではない。そこで高柳先生は視野を広げ、他の元素でも研究を進めようと考えた。先生が注目した元素は金だっ

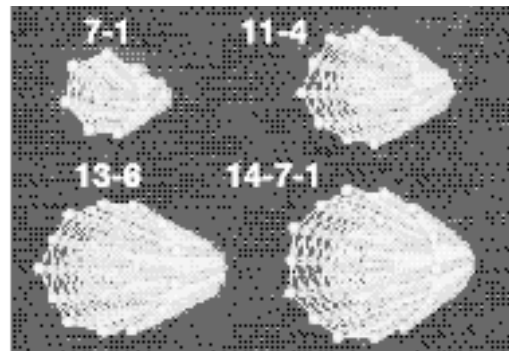


図1 金ナノチューブの構造

た。そして研究の末、世界で初めて金ナノチューブを発見したのである。

金のナノチューブの構造は図1のようになっていて、カーボンナノチューブと同じく筒状の構造をとる。金ナノチューブもカーボンナノチューブも多層構造をとることができる。この多層構造をn-n'-n"と表す。nは一番外側のナノチューブを構成している原子列の数で、n'はその一つ内側、n"はもう一つ内側の数である。実際に図1で数えて



世界初！同時観測の成功

ところで、高柳先生は数ある元素の中から何故金を研究対象に選んだのだろうか。理由の一つとして金の性質が表面科学の分野で詳しく調べられていたことが挙げられる。物体を小さくしていくにしたがい、体積に対する表面積の割合は大きくなる。そのため小さな物体を研究するナノサイエンスにとって、表面の特徴的な性質を扱う表面科学で得た知識は非常に重要になるのだ。表面科学における研究が盛んであった金は、ナノサイエンスの対象としても都合が良かったのである。

高柳先生が研究を始める以前から、STM（走査型トンネル顕微鏡）により金同士を接触させて離すとその間で特殊な現象が起きることが知られていた。先生は、このとき金の間に何か特別な物質ができていたのでは、と考えていたのである。

しかし、従来の技術ではその物質の正体を調べることができなかった。そこで、高柳先生は「同時観測」と呼ばれる技術の開発に取り組んだ。こ

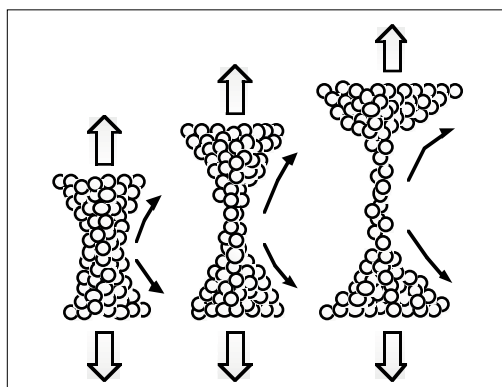
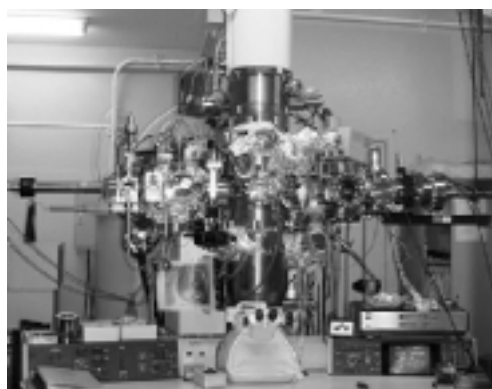


図2 金ナノチューブの生成過程

もらうのが一番分かりやすいと思う。しかし、金ナノチューブとカーボンナノチューブの間にはいくつかの構造上の違いが見られる。例えば、カーボンナノチューブは中空の単層の場合があるのに対して、金ナノチューブは中空のものは確認されていない。他にもカーボンナノチューブは3つの構造をとるが、金はらせん構造しかとらないという違いがある。



STMを組み込んだ電子顕微鏡

れは、STMと電子顕微鏡の二つを同時に用いて物質の挙動を調べる画期的な方法である。この「同時観測」を用いることにより、高柳先生は世界で初めてその物質が金ナノチューブであることを確認したのだ。

この際用いたSTMは、少し変わった顕微鏡である。その先端に付いているプローブという針に電圧をかけ試料に近づけると、トンネル効果（COLUMN参照）によりプローブと試料の間の空間を飛び越えて電流が流れる。この電流を測定することで試料表面の構造を調べる顕微鏡だ。

同時観測が成功したおかげで、電子顕微鏡でプローブと試料の間の空間を調べることができるようになった。STMのプローブを金製にし、電子顕微鏡でその空間を観測しつつプローブを金の試料に接触させてから離す。そうすると、金原子がチューインガムのように伸びて（図2）、金ナノチューブが生成されることが確認されたのだ。



金ナノチューブの性質

同時観測によって金ナノチューブの存在が確認されただけでなく、いくつかの性質も明らかになっている。その性質を見てみよう。

STMのプロブを金に接触させて離すと、金ナノチューブができる。その状態でプロブを試料から離していくと、ナノチューブは次第に細くなっていく。例えばはじめに外側と内側の原子鎖の数が13-6のナノチューブができていたとすると、まず11-4次に7-1、5と細くなり最後には切れてしまう。単原子鎖の存在は考えない、つまり7-1の1はナノチューブではない、とすると外側と内側で原子鎖の本数が7本違っている。

この7という数字には一体何が隠されているのだろうか。高柳先生は金ナノチューブが2層以上あるとき、外側と内側が「ぴったりくっついている」ためにこの7本という差が生まれるのではないかと考えている。金原子の直径をdとすると、「ぴったりくっついている」ことから内側と外側の直径の差が常に2dになる。原子鎖の数が2、3のものが含まれる金ナノチューブは実験では発見されていないため除いて考えると、原子鎖の数が4、5、6、7の金ナノチューブの直径から他の全ての直径が一意的に決まる。例えば、原子鎖が13のときの直径は6のときの直径に2d加えた値になり、これ以外の値はとらない。つまり、原子鎖の数が決まれば直径も一意的に決まるのだ。この7という数字を魔法数という。

また、金ナノチューブが細くなっていくときにプロブと試料の間に電圧をかけて電流を測っておけば、金ナノチューブのコンダクタンスを求めることができる。コンダクタンスとは抵抗値の逆数で、電流の通り易さを表す値である。しかし、この値は単に電流の大きさを測定するだけでは求められない。何故なら、プロブと試料の間に金ナノチューブがない状態でもトンネル効果で電流が流れ、コンダクタンスは存在するからだ。つまり、同時観測で金ナノチューブの存在を確認してからでないと、真に金ナノチューブのコンダクタンスが測定できたとは言えないのである。

図3はその測定した値をグラフにしたものである。ナノチューブが細くなるにしたがいコンダク

タンスも階段状に減っていることが分かるだろう。しかも、その値は全て $1/(12.9k) = (2e^2/h)$ の整数倍しかとっていない。これをコンダクタンスの量子化と言う。このグラフでは時間の経過ともないプロブが試料から離れ、金ナノチューブはだんだんと長くなっていく。このとき、太さが同じ間は長さが変わってもコンダクタンスは一定で、その逆数である抵抗も変化しない。これは、一般的に導線の抵抗は長さに比例し断面積に反比例することに反している。ここにもナノサイズの世界独特の性質が表れている。

この、同じ太さならば長くなっても抵抗値が変わらないという性質から、金ナノチューブの内部には抵抗がないと考えられている。通常の物質では電気抵抗が0になる現象は極低温でしか観測されていなかったため、その厳しい温度条件から応用が難しかった。金ナノチューブ内では室温という今までにないほど高い温度で抵抗が0になるので、ナノサイズの電気回路等への応用が期待されている。

高柳先生が世界で初めて同時観測に成功して以来、色々な組み合わせの顕微鏡で同時観測が行われるようになってきている。それは、金ナノチューブに限らず既に知られている物質も同時観測により新しい性質を発見できる可能性があるからだ。同時観測の成功はナノサイエンスにとって大きな進歩となったと言える。

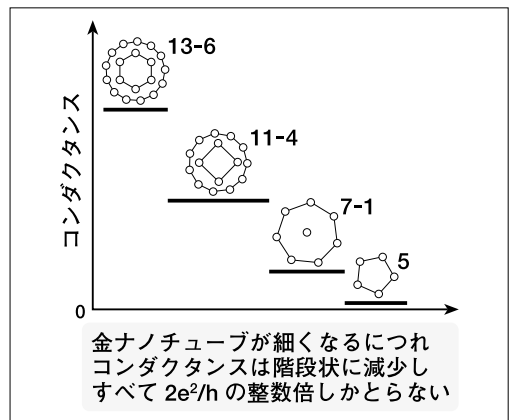


図3 コンダクタンスの量子化



これからの高柳研究室の展望

前の章で述べた通り金ナノチューブの性質は調べられてはいるが、まだまだ分からないことが残っている。それらを解明するため、現在高柳研究室では金ナノチューブの性質についてさらに二つの研究を進めている。

その一つ目は、金ナノチューブの中では電気抵抗がないということに注目したものだ。電気抵抗は、電子が原子核によって散乱されることで生じている。つまり、金ナノチューブの場合は内部でこの散乱が起きていないため、電気抵抗がないと考えられるのだ。このことについて、現在二つの説が唱えられている。一つは金の結晶中で電子が散乱を起こす最短距離の平均が10nmであることから、金ナノチューブも10nm以上の長さになれば電子の散乱が起り、抵抗が生じるようになるという説。そしてもう一つが、どんな長さになっても金ナノチューブに抵抗は生じないとする説である。どちらの説が正しいのかは、現在ではまだ数nmの長さの金ナノチューブしかできていないために確認されていない。そのため、現在は10nmという長さを目指して金ナノチューブの研究を行っている。

二つ目の研究は、金ナノチューブの構造に注目したものだ。図1に示した金ナノチューブは、数本の筒が「びったりくっついた」形をしている。この金原子の場合、同じ筒の原子同士の結合力は強く、異なるものでは弱い。これに対し、金の結晶中での金原子の結合力はあらゆる方向に対してほとんど同じである。

何故金ナノチューブの結合力は結晶のときと違うのだろうか。これらの構造を解明するためにも、高柳研究室では最も特異的な金原子の一次元鎖の結合について調べている。図4を見てほしい。これが、金原子が一直線状に並んだ一次元鎖と呼ばれる構造である。この構造の特徴として、原子核同士の距離が異常に長いということが挙げられる。金の結晶中では、原子核が結合を保てる距離は0.29nmが上限なのだが、この場合には原子間距離が0.40nmもあるにもかかわらず結合が保たれているのだ。この金原子の一次元鎖は実験的

に発見される以前から理論研究が行われていて、一次元鎖の原子間距離が0.30nm以上になれば原子の結合は切れてしまうと予測されていた。理論による予想が覆えられてしまったため、この金原子間にはどのような力が働いているのかを考え直す必要が出てきたのである。

これまでのナノサイエンスでは、炭素についての研究が盛んであり、炭素原子からなるナノサイズの物質についての性質のみ実験で調べられてきたといっても過言ではない。高柳研究室でなされた金ナノチューブの発見や、様々なアプローチからなされている物性の研究はナノサイズの世界をより深く理解することにつながっていくだろう。例えば、将来金や炭素以外の元素からなるナノチューブが生成されたとき、カーボンナノチューブと金ナノチューブの性質を比較することによって、それがどのような性質を示すのか予想を立てることも可能になるだろう。

高柳先生が行っている金ナノチューブについての研究は、いろいろな物質の性質を扱うナノサイエンスにとっては一つの出発点にすぎないのかもしれない。これからは他の元素についても未知の物質、さらにはその性質までもが明らかになっていくだろう。しかしそんな中においても、高柳先生の同時観測技術の成功と金ナノチューブの発見がナノサイエンスの大きな発展であることは変わらないのだ。

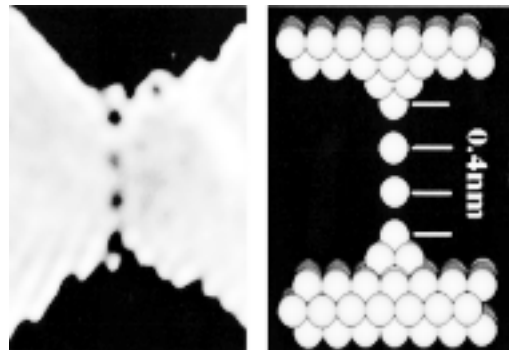


図4 一次元鎖の金ナノチューブ
左：電子顕微鏡像 右：模式図

COLUMN トンネル効果

ある粒子に図5のようなポテンシャルが与えられているとする。ポテンシャルとは粒子がその場所に存在するために必要なエネルギーのことである。エネルギー保存が成り立つときは、粒子がポテンシャルの高い所に入るとその分だけ運動エネルギーが減り、速度も小さくなる。今エネルギー保存が成り立つとして、点Aに静止している粒子が右側に進行しようとするとき、この粒子はどのような振る舞いをするだろうか。

古典力学によると、粒子は点Aと同じ高さの点Bまでしか行けず、それ以上ポテンシャルが高い所まで行くことはない。そのため、粒子が点Cに到達できるはずはないと考えられる。それに対して、量子力学では粒子がポテンシャルの壁をすり抜けて点Cに到達することもあり得ると考える。この現象は粒子があたかもポテンシャルの壁にトンネルを掘っているように見えることから、トンネル効果と呼ばれている。

一般に、物質は粒子的な性質だけではなく波動的な性質も示すことが知られている。トンネル効

果はこの波動性により起こると考えられている。この性質は原子や電子のような非常に小さな粒子に顕著に現れ、逆に我々が目で見ることのできるマクロの世界では波動性による効果はほとんど無視できる。古典力学で記述できるのはマクロの世界だけなので、我々が実際に目にするような大きさでは物体が壁をすり抜けてしまうなどという奇妙な現象は起こらない。

さて、STMはトンネル効果を利用していると本文中で述べた。STMの機構は、プローブから試料に向かって電子が放たれると考えればよい。ここでプローブと試料の間には隙間があるのだが、この隙間がポテンシャルの壁に相当するのだ。直観的にも分かるように、隙間が広いほどポテンシャルの壁は厚い。そのため、隙間が広いほど電子が透過しにくくなり、電流値が小さくなる。試料を調べている間電流値が同じ大きさになるようにSTMを設定しておけば、プローブと試料表面との距離が一定になり、試料表面の凹凸が分かるという仕組みなのである。

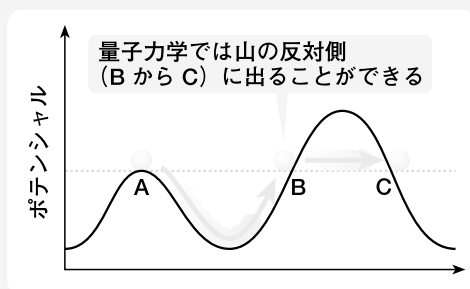
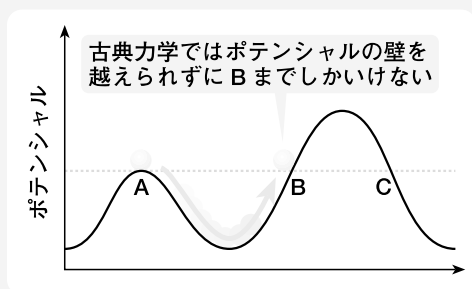


図5 トンネル効果

ナノサイエンスについて全く無知であった私に、高柳先生はナノの世界で起こる不思議な現象の数々を丁寧に説明して下さいました。それだけではなく、雑談では大学生活へのアドバイスもして頂き、大変勉強になりました。

また取材は毎回思い出深かったのですが、初めて先生の研究室に伺ったときが一番印象に残っています。そのとき先生に「ナノサイエンスの中で面白いと思う所はどこですか」と質問したとこ

ろ、先生は「研究している事自体が面白いんだよ」と、にこやかに答えて下さいました。これを聞いて高柳先生の研究に対する姿勢は素晴らしいなど感動したのを覚えています。

最後になりましたが、お忙しいところ度重なる取材に快く応じていただいた高柳先生には非常に感謝しております。ありがとうございました。

(滝上 義康)