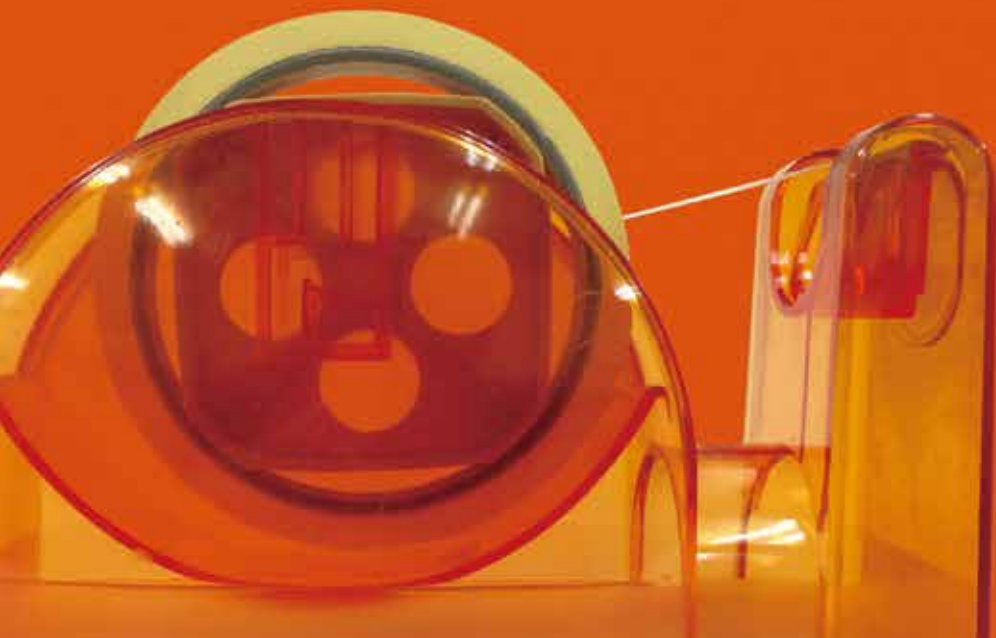


ジグザグ型グラフェン ナノリボンの作り方

未来のエレクトロニクス材料「グラフェン」の実用化を目指して



東北大学原子分子材料科学高等研究機構
准教授

一杉太郎 = 文

鉛筆の芯とセロテープでノーベル賞!?

「鉛筆の芯とダイヤモンドは、どちらも炭素原子でできた結晶である」という話は、皆さんどこかで聞いたことがあるのではないだろうか。確かに両者とも炭素でできているが、結合の仕方(結晶構造)が違うことで、見た目も性質も大きく異なっている。ダイヤモンドは、その名もダイヤモンド構造とよばれる3次元の規則正しい構造でできており、透明で硬い性質を持つ。一方、鉛筆の芯に使われている炭素材料はグラファイトと呼ばれ、炭素原子が蜂の巣上に並んだ層が、幾重にも重なった構造を持つ(図1)。

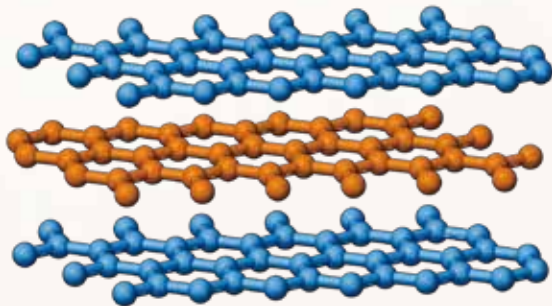


図1: グラファイトの構造

鉛筆の芯とダイヤモンド、同じ大きさだったらどちらが欲しいか、と言われれば、多くの人がダイヤモンドを選ぶのではないだろうか。現在での金銭的価値は、ダイヤモンドの方が大きく上回っており、なにより美しいので、それも当然だろう。しかし、一見値段のあまり高くなさそうな黒い塊のグラファイトには、実は世の中を大きく変える可能性が秘められている。

その可能性を示した研究は、グラファイトとセロテープを使って行われた。グラファイトは、先述のように炭素原子が蜂の巣上に並んで、それが何層にも重なってできているが、そのうちの1層だけを取り出した物質をグラフェンと呼ぶ。グラフェンは、電子の移動速度が速いなど、多くの興味深い性質をもつことが予想されていたが、グラファイトからきれいに1層だけはがす技術がなく、その性質を確かめることが長い間できなかった。ところが2004年、物理学者のアンドレ・ガイム博士は、グラファイトになんとセロテープを貼ってはがすことで、きれいな原子1層のグラフェンを作製することに成功した。これを契機に、グラフェンの研究が爆発的に進み、電子移動度や熱伝導率が非常に高いことが確かめられるなど、その驚くべき性質が次々と明らかになった。そして2010年、グラフェンのサンプル作製からわずか6年で、アンドレ・ガイム博士とその弟子のコンスタンチン・ノボセロフ博士は、「二次元物質グラフェンに関する革新的な実験」によって、ノーベル物理学賞を受賞した。

エッジの違いが重要

グラフェンは、短期間のうちに、なぜこれほどまで爆発的に研究が進んだのだろうか。それはグラフェンが持つ特異な性質にある。グラフェンは、原子1層でできているため非常に薄く軽いにも関わらず、非常に強靱で、それでいて加工がしやすいといった特徴をもつ。さらに、電子移動度が非常に高いため、高速かつ消費電力の低い次世代のコンピュータを構築するための重要な材料と見なされ、物理、化学、実用の面から非常に活発に研究が展開されている。その中でもとくに、最近注目を集めているのが、グラフェンナリボンと呼ばれる物質だ。

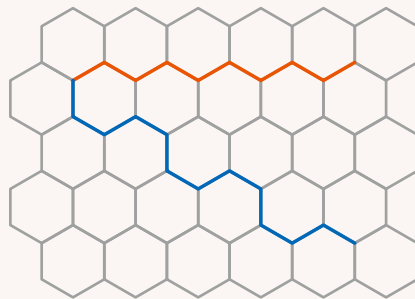


図2: ジグザグ型とアームチェア型のエッジ構造

グラフェンナリボンとは、細い線のようなリボン状のグラフェンを指す。エッジの形によって2種類に分けられ、その形から、それぞれ「ジグザグ型」「アームチェア型」と呼ばれる(図2)。なぜグラフェンナリボンが注目されているのか、それはエッジの形や大きさで、電気伝導性や磁性が大きく変わることが期待されているためだ。たとえば、エッジがジグザグ型の場合には金属的性質が現れ、アームチェア型では、その幅が広がるに従って、金属的性質と半導体的性質が交互に現れると考えられている。薄くて軽くて強靱で、かつ電気伝導性の高いグラフェンの特徴を持ちながら、形やサイズを変えることで電気伝導性や磁性を制御することができれば、現在の何倍も高速で消費電力の低い半導体やトランジスタの開発が可能となり、次世代エレクトロニクスデバイスの開発が一層加速すると期待されている。

しかし、実用化に向けては大きな問題が存在する。実は、エッジの違いによるグラフェンナリボンの物性の違いは、未だに検証されていないのだ。それは、ジグザグ型エッジを有するグラフェンナリボン合成が非常に難しいためだ。もし、ジグザグ型エッジを有するグラフェンナリボンの合成に成功すれば、グラフェンの応用や物性の理解に向けて、大きな一歩となる。そこでわれわれは、様々な分野の研究者が所属するAIMRの強みを活かし、有機合成や理論の専門家とともに、ジグザグ型エッジを持つグラフェンナリボンの合成に取り組んだ。

ボトムアップでジグザグ型の合成に成功!

グラフェンのエッジの制御方法には、2種類ある。1つは、半導体リソグラフィ技術を活用したトップダウン型のアプローチ。もう1つは、分子から出発して化学反応で分子をつなげていくボトムアップ型のアプローチである。半導体リソグラフィ技術を応用した方法は、これまでも試みられてきたが、作製の際にどうしても欠陥ができてしまう。そこで我々は、後者のボトムアップ型のアプローチを活用したエッジの制御を目指し実験を行った。

まずは、グラフェンナノリボンのもととなる二臭化ピアントラセン化合物という分子を、銅基板上に蒸着させた。そして、500度で10分程度基板を保つ。その後、原子1つ1つが識別可能な走査型トンネル顕微鏡を活用して生成する分子を観察すると、ジグザグ型のエッジを有するグラフェンナノリボンが生成することがわかった(図3)。わずかこれだけの非常にシンプルな方法で、なぜジグザグ型が生成可能なのだろうか。詳しく調べたところ、銅の表面上で二臭化ピアントラセン化合物分子が決まった方向に並ぶことにより、特異的な化学反応が起きたため、ジグザグ型エッジ構造を有するグラフェンナノリボンが生成することが分かった。つまり、ジグザグ型エッジのボトムアップ型生成には、基板が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

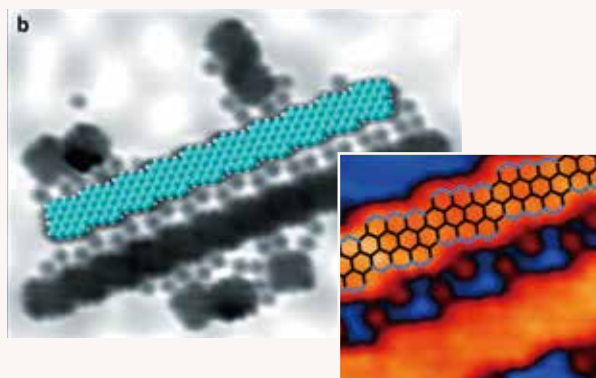


図3: グラフェンナノリボンの走査型トンネル顕微鏡像(左)とジグザグ型エッジ部分の拡大図(右)

今回われわれが提案した方法により、長さやエッジの形を制御しながらグラフェンナノリボンの生成を行うことが可能となった。先にも述べた通り、グラフェンナノリボンは高い電気伝導性と熱伝導性といった特性から、集積回路の配線材料としての応用が考えられる。また、エッジのみに現れる強磁性状態を活用した新規デバイスへの展開も視野に入る。このように、今回の研究成果は、新規エレクトロニクスデバイスやスピントロニクスデバイス創製につながる事が期待される。今後、様々な長さ、幅、エッジ形状を有するグラフェンナノリボンの合成を行い、新規物性開拓と実用研究に取り組む予定である。

台湾国立交通大学と ジョイントワークショップを開催

AIMRは、2014年9月22日から23日にかけて、台湾国立交通大学(NCTU)と合同でワークショップを開催した。

台湾の新竹市にある国立交通大学で行われた本ワークショップは、AIMR主任研究者の寒川誠二教授とNCTUのYiming Li教授が10年に渡って行ってきた共同研究をベースに、ナノ材料、ナノデバイスと数学との融合研究を両大学の間で広く推進するために企画された。AIMRとNCTUより各分野の1線で活躍する研究者が講演者として招かれ、AIMRからは小谷機構長、寒川教授をはじめ12名の研究者が発表を行い、それぞれの最新の研究成果や、数学との融合研究について活発な議論が行われた。



基調講演を行うSimon M. Sze博士

ERATO磯部プロジェクト実験施設 グッドデザイン賞受賞

磯部寛之AIMR主任研究者が研究統括を務める、JST ERATO磯部縮退 π 集積プロジェクトの実験施設が、2014年度グッドデザイン賞を受賞した。受賞対象は、片平キャンパスにあるAIMR本館内の5階実験室と3階居室となる。化学分野の修士号を持つ建築家が、自らの研究経験をもとに理想的な環境を備えた実験施設を設計したもので、異分野研究者が参画する「分野融合」を念頭に、機能性を損なうことなく「美しさ」を追求したプロジェクトに相応しい設計となっている。



photo: Takumi Ota