

グラフェンの科学

2010年度のノーベル物理学賞に寄せて

静岡大学名誉教授 相原 惇一

黒鉛 (graphite) は、多数の炭素原子でできた平面のシートが積み重なった構造になっている。各シートの炭素原子は六角形を敷き詰めたハチの巣の形に配列している (図1)。この、黒鉛を構成する1枚1枚のシートをグラフェン (graphene) という。graphene という名前は、graphite の語尾を、多くの芳香族炭化水素の名前に使われている語尾 ene に変えたものである。

2010年度のノーベル物理学賞は、2004年に黒鉛のかたまりから単層のグラフェンシートを初めて分離し、その特異な性質の解明に努めた英国・マンチェスター大学の研究者ガイム (Andre Geim, 52歳) とノボセロフ (Konstantin Novoselov, 36歳) に贈られた (図2)。お二人はロシア生まれのロシア人で、ガイムの現在の国籍はオランダ、ノボセロフは英国とロシアの二重国籍ということである。

黒鉛中のグラフェンシート同士はゆるく結合しているので、単層のシートを容易に取り出せそうであるが、ガイムら以前には、だれもそうは思わなかった。有限の大きさのグラフェンは、周辺に位置する炭素原子の結合の手が余っていて、不安定だと考えられたのである。そのようなわけで、ガイムとノボセロフが採った分離方法は、はなは

だ素朴で意表を突くものだった。彼らはスコッチテープで黒鉛の薄片をはさみ、そのテープを引きはがすという簡単な操作を繰り返すことにより、単層のグラフェンを得たのである。

その後、グラフェンの製法がいくつか開発され、現在では実用的なサイズのグラフェンを容易につくることができる。その代表的な製法にプラズマ化学気相成長 (CVD) 法がある。この方法では、メタンをマイクロ波で分解し、銅箔などの表面にグラフェンシートを成長させる。また、炭化ケイ素 (SiC) の基板を真空中で高温処理すると、表面のケイ素原子だけが昇華し、そのあとにグラフェンシートを生成させられる。

単層グラフェンはごく薄のシートで、その厚さは炭素原子1個分 (約0.335 nm, 1 nmは10 Å) しかない。図1からわかるように、多数のベンゼン環が隣り合わせた構造になっているので、化学的には究極の芳香族分子と見なすことができる。

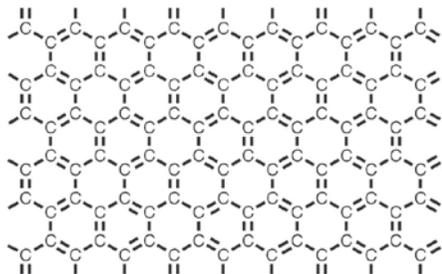


図1 グラフェンの分子構造



A. ガイム (撮影: Prolineserver) K. ノボセロフ (撮影: Sergey Vladimirov)

図2 グラフェンの発見者

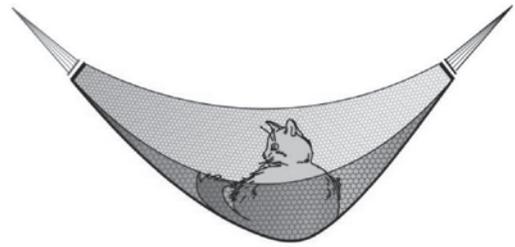
各炭素原子の4個の価電子は3個の sp^2 混成軌道と $2p_z$ 軌道に分布し、 $2p_z$ 軌道を占める価電子は自由電子となって、シート内を自由に行き来している。そのため、グラフェンはバンドギャップのない半導体または半金属と見なされる。

グラフェンの本格的な研究はまだ始まって間もないが、これまでの研究から、電気的にも、熱的にも、力学的にもきわめて興味ある材料であることがわかった。その代表的な性質を下に紹介する。もちろん、安価で加工性がよいこともグラフェンの大きな特徴である。

(1) 現在知られている物質のなかで、室温の電気伝導度と熱伝導度が最大である。電子の移動度が最も大きい物質の1つで、電子移動に伴うエネルギーの損失がごくわずかであるので、配線材料や放熱材料として最適である。理想的な単層のグラフェンシートでは電子の有効質量はゼロになる。
 (2) 現在知られている物質の中で最も軽く、最も丈夫な物質である。同じ厚さの鉄のシートに比べて約100倍もの強度があり、 1 m^2 のグラフェンシート (0.77 mg) でハンモックをつくれれば、約4 kgのネコを支えられる勘定になる (図3)。また、適当なプラスチックにグラフェンを混入すると、強度の大きな導電性プラスチックが製作できる。

(3) 単層グラフェンは、可視光に対してほぼ透明 (透過度98%) なので、液晶パネル、タッチパネルなどの透明電極として利用できる (図4)。現在は酸化インジウムスズ (ITO) が透明電極として用いられているが、レアメタルであるインジウムの使用を減らすという意味でも、グラフェンの使用は有意義であろう。

(4) グラフェンシートは本来バンドギャップをもたず、金属的な電気伝導を示すが、図5のように、シートを2枚重ねて、それに垂直に電場を加えるとバンドギャップが生じる。このような半導体グラフェンは、シリコン (ケイ素) をしのぐチャンネル (電子の通路) 材料として、超高速トランジスタや高密度集積回路の製作に利用でき、すで



(2010年度ノーベル物理学賞のプレスリリースより引用)
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/

図3 グラフェンシートでつくった仮想のハンモック

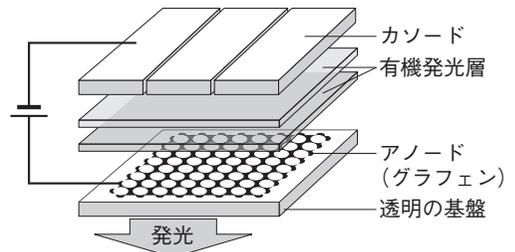


図4 グラフェンを用いた有機電場発光素子

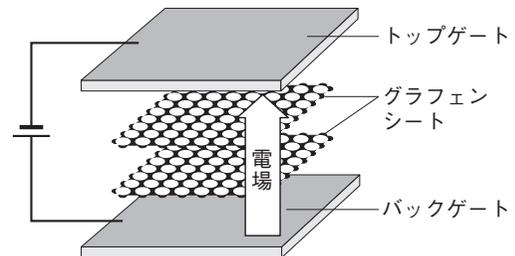


図5 半導体特性を示す2層グラフェン

にいくつかの試作品も報告されている。

これらからわかるように、グラフェンは大きな可能性を秘めた夢の電子材料である。グラフェンの性質は、シートの形状を変えたり、格子欠陥を導入したり、不純物を吸着させたりしても、大きく変えられそうである。今回のノーベル物理学賞は、このようなグラフェンという素材が内包する非常に大きな可能性に対して与えられたと考えてよい。

本稿の執筆に際して有益なご教示を賜った静岡大学理学部の三重野哲教授に御礼申し上げます。