

グラフェンの性質とその応用

大阪大学大学院基礎工学研究科教授 白石 誠司

1. はじめに

2010年のノーベル物理学賞が「グラフェンに対する新奇な実験(groundbreaking experiments)」についてマンチェスター大学の A. Geim, K. Novoselov の両教授に与えられたことは記憶に新しい。グラフェンはいわゆる「ナノ炭素」材料に分類される2次元炭素分子であり、ベンゼン状の炭素六員環を敷き詰めた形をしている(図1)。

ナノ炭素分子という意味では、 C_{60} をはじめとするフラーレン(ほぼ0次元)、カーボンナノチューブ(ほぼ1次元)などと同じ仲間であると言える。フラーレンは1985年に米英の研究者によってわずか2週間の実験で発見され、1996年にノーベル化学賞が授与された。ちなみに当初は全く異なる研究の方向性であったのだが、偶然見いだした測定データのピークに着目し実験の方針を変換したのが奏功した。これは科学上の有名なセレンディピティの1つとして認識されている。また、カーボンナノチューブは1991～1993年にかけて日本人研究者によって発見されたが、こちらにはまだノーベル賞は与えられていない。

一方で、グラフェンは2004年に「発見」されてからわずか6年でノーベル賞につながった。この短期間での受賞の理由としては、非常に多くの物理学者を魅了し、現在1年で3000本近くの論文が発表されている(図2)ことからわかるように、グラフェン研究の人気の沸騰したことが1つの理由として挙げられよう。

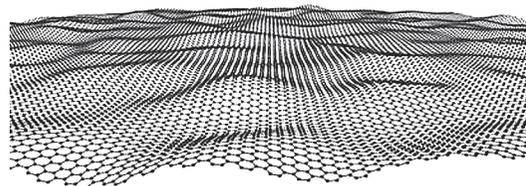


図1 グラフェン1層の分子構造の例

2. 如何にして発見されたか？

さて、前で「発見」とあえて強調したのは理由がある。このグラフェンという物質は、既に鉛筆の芯や二次電池の正極材として幅広く使われているグラファイトから1層だけ取り出したものであるが、この分子が存在することは(うまく1層を剥離することができれば、であるが)以前より知られていた。筆者の知る限りでは、グラフェンがどのような物性を持つのか理論的側面から研究した例もいくつかある。しかしながら「パイエルス不安定性(1次元や2次元といった次元性の低い材料は不安定であり、単離すると自発的に壊れていくという理論)」と呼ばれる問題から、グラフェンを取り出すことは容易ではないと考えられていた。にもかかわらず、Geimらはセロテープを使って薄いグラファイトを剥がし、それをシリコン基板に押し付けるといった驚嘆すべき容易な方法で1層だけのグラフェンを取り出すことに成功した(図3)。

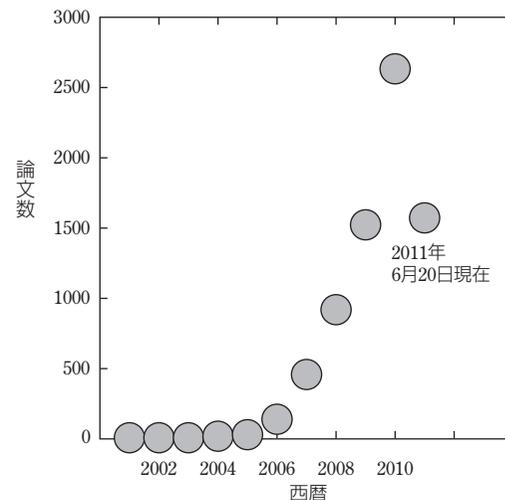


図2 グラフェンに関する論文数の変遷。トムソンロイターのデータベースを利用し、「グラフェン」[20XX年]で検索した。2011年の結果は6月20日のもの。2006年以降ほぼ倍々ゲームでのびていることがわかる。

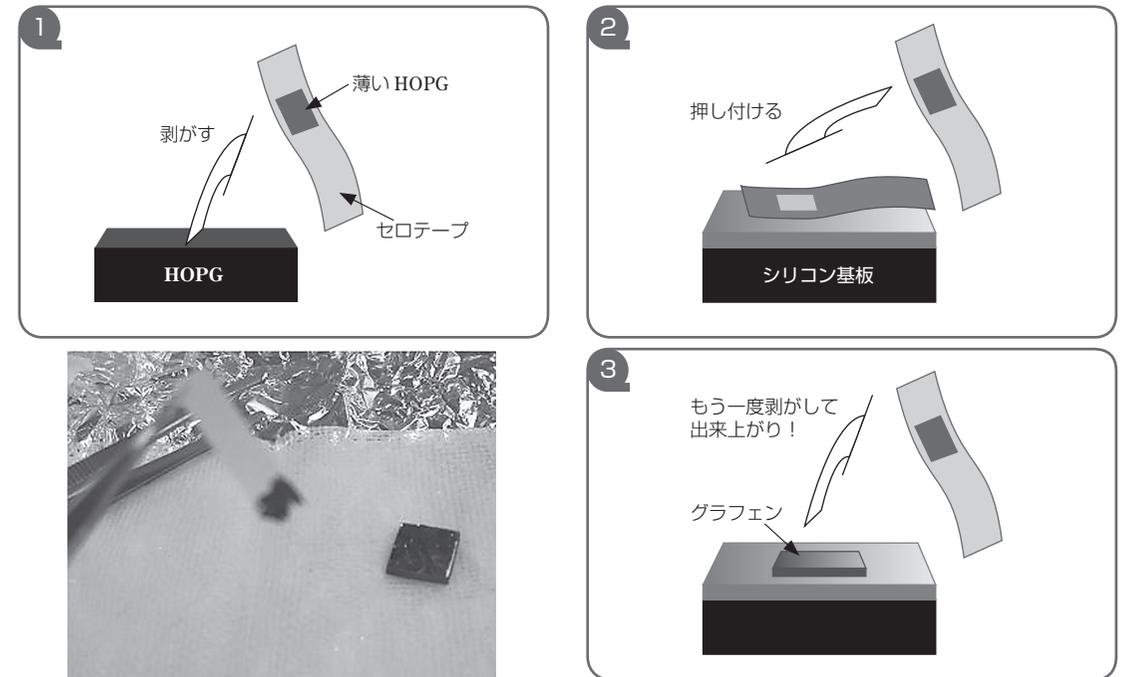


図3 グラフェン1層の作製プロセス(白石研究室のもの)の模式図。(1)高配向グラファイト(HOPG)にセロテープを押しつけて剥がすとセロテープに薄いHOPGが付いてくる (2)セロテープをシリコン基板に押しつける (3)もう一度剥がすとシリコン基板にグラフェンが残っている。左下の写真は実際の実験の様子。

筆者はノーベル賞受賞の発表直後に某放送局からインタビューを受けた際、レポーターから「こんなに簡単な方法で出来るなら誰でも受賞できたんじゃないですか!？」と尋ねられたが、その通り誰でも受賞できる可能性はあったと思っている。

実は、グラフェンを剥離するための出発材料である高配向グラファイト(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)という材料は様々な実験で広く使われている材料であり、特に表面が非常に平坦なためにトンネル顕微鏡などを用いて試料を観察するために非常に適している。そして、平坦で清浄な表面を出すためにセロテープを使って古くなった表面を剥がして綺麗な表面を出す、という作業をするのであるが、そのセロテープに付着した薄いグラファイトはそれまでただ捨てられていた。Geimらはその捨てられていた方に着目して、グラフェン1層を取り出すことに成功したわけで、まさにコロンブスの卵のような逆転の発想であり、見事という他ない。

この作業は実に簡単であり、剥離したグラフェンは光学顕微鏡で観察することができる(薄さから考えると不可能であるが、光の干渉条件との関係から、

ある特定の条件下では観測可能である。図4)ので、実際に学校で実験することも可能である。もちろん、これまで述べたことだけが受賞の理由ではなく、グラフェンには大変豊かな物理があり、Geimらがその物理を取り出したことが受賞の大きな理由であるのは当然であるが…。

3. グラフェンに内包される物理とは？

では何がこれほど多くの物理学者を魅了したのであろうか。それを理解するには特殊相対性理論が必要となる。

特殊相対性理論とは、アインシュタインが1905年に作り上げた理論であり、光速に近い速度で運動する系においては様々な物理現象がニュートン物理学とは異なって観測される、というものである。例としては時間がゆっくり進む、重さが増す、長さが縮む、などの効果がある。また、これをさらに一般化(非等速運動する系でも成立するように拡張)した理論が一般相対性理論である。どちらも日常生活には縁遠い理論のように思えるが、船や車に搭載されているGPSシステムの構築には必須の理論であり、

この相対性理論の効果を取り入れないと車の場所は1日に25～30kmもずれて表示されてしまう。

さて、相対性理論における運動方程式をディラック方程式という(古典物理ではニュートン方程式、量子力学ではシュレディンガー方程式が運動方程式について名前であるが、いずれも運動を記述する方程式であることは同じである)。特に、質量がゼロの粒子であるニュートリノの運動を記述する方程式をワイル方程式と呼んでいる。実は、グラフェンの中を運動する電子などの運動方程式は、このワイル方程式とある近似の下で全く同じ形をしている。つまり、グラフェンの中を動く電子は、ニュートリノと同じく質量ゼロの粒子と見なすことができる、ということになる。すなわち、グラフェンは鉛筆の芯の中にさえ存在している非常に身近な材料であるにも関わらず、その中には特殊相対性理論というきわめて日常感覚とは離れた現象が観測できるという、特異な材料であるということがわかる。それゆえに主に物理をバックグラウンドに有する人々にとって非常に魅力ある材料であるというわけである。

実験的にも、この相対性理論の効果を反映した結果が次々と報告されており、電子の運動速度も光速の1/30程度という非常に速い運動が可能となっていることがわかっている。こういった高速運動ができるということは電子の散乱が少ないということでもある。このような材料系ではホール効果が量子化されるという現象が発現する(整数量子ホール効果と呼ばれ、さらに電荷が分数化したように見える分

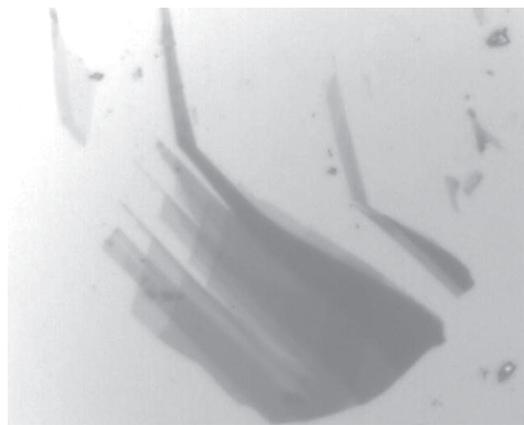


図4 シリコン基板に貼付けたグラフェンの光学顕微鏡写真。層の数に応じて色が変化している。最も薄い色に見える部分がグラフェン1層の部分

数量子ホール効果も存在する)。従来の材料系では通常低温でしか発現しない整数量子ホール効果がグラフェンでは室温でも観測できることがわかっており、これはグラフェンという材料のもつ優れた特性を反映したものである。ちなみに、整数量子ホール効果の現れ方には上述の相対性理論効果がちゃんと反映されていることも特筆すべきことであろう(いささか専門的になるが、ベリー位相と呼ばれる幾何学的位相の効果により、量子化された伝導度の現れ方が異なる)。

4. どのような応用が可能なのか

以上は基礎物理の観点からの魅力であるが、応用の視点からはどういった魅力があるのでしょうか。上でグラフェンの中の電子の質量が非常に軽いことを述べたが、質量が軽い粒子の運動が高速になりうるとは容易に想像できる。つまりグラフェンを使えば高速デバイス(高周波デバイス)の開発が可能となるはずであり、実際アメリカの企業を中心に高周波特性の研究が精力的に進められている。

同様に、速く運動する電子とは材料の抵抗が小さいことを意味するため、グラフェンを用いた導電膜の研究が韓国を中心に進められている。グラフェン1層は極めて薄い(電子の広がりも考慮しても0.3～0.4nm程度しかない)ために、ほぼ透明な膜である。そのため、駅などで切符を買う際に日々利用されているタッチパネルへの応用が期待されている。タッチパネルの材料としては、現在主にインジウムの中

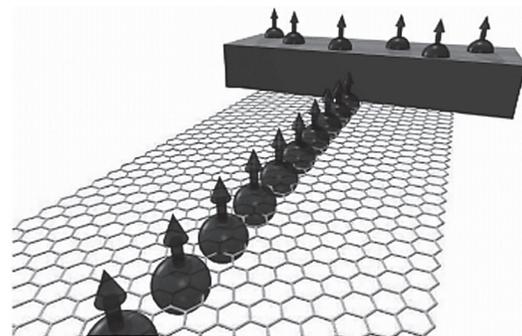


図5 グラフェンと強磁性体(磁石の機能を有するコバルトやニッケル、鉄を用いることが多い)を接合させ、強磁性体からグラフェンにスピンの向き揃った電子を注入させる実験の概念図

心にした材料が用いられているが、このインジウムは希少金属(レアメタル)であり、将来的な安定供給が危ぶまれている。そのため、レアメタルフリーなタッチパネルの開発が焦眉の急であり、グラフェンはその代替材料として現在大きな注目を集めている。試作段階ではあるが、30インチの透明導電膜が開発されており、韓国企業の出資によってさらに大型で高性能の導電膜も開発も急ピッチで行われている。

また、筆者が7月に招待されたシンガポール大学では、3000～4000万米ドルを投入して「グラフェン研究センター」を立ち上げ、世界中の研究者をスカウトして一大研究拠点を構築中であり、透明導電膜を含めた様々な分野への応用研究を国と大学が一体となって推進していた。

このようにグラフェンを用いた応用に近い研究も非常に盛んに行われている。これ以外にも、まだ実験室レベルではあるが、実に多彩な応用研究が進められているのでその一端を紹介すると、やはりグラフェン中の電子の速度が速いことから、電界効果型トランジスタ(Field Effect Transistor, FET)に用いて透明で柔らかいディスプレイなどに使おうという動きがあるほか、磁石の機能をもつ材料(強磁性体)と融合することで、電子の有するスピンという磁石の機能を利用した新しい情報処理素子(スピントロニクス素子)を生み出そうという研究も盛んになっている(図5)。

5. おわりに

グラフェンというこの極めて若く、フレッシュな材料が一気に材料科学の最前線に躍り出たことは驚嘆すべきことである。しかしながらサイエンスというものは既存の常識を超えたところに豊かなフルーツを与えるものであることを考慮に入れば、この一連の大フィーバーも納得できることであろう。

将来的にこのような第二第三の金鉱脈を探そうということ意識するならば、フラーレンの発見ストーリーからも明らかのように、如何にセレンディピティをうまく掴みとるか、そしてグラフェンでのそれからわかるように、既存の常識から如何に自由になることができるか、そしてそれまでの自身の研究歴に如何に縛られず新しい分野に飛び込む勇気を持ち続けられるか、ということが重要であろう(Geimは5年程度で次々と研究テーマを変え、そ

の研究各々で優れた業績を挙げている。必ずしも「一所懸命」が報われるとは限らない)。その意味では、これからの日本のサイエンスを担う若い人たちにうまく上記の意識付けをできるかという点で、教育の持つ責任は非常に大きい。以上を自戒の言葉としつつこの記事を終えたい。