

筒状のものを切り開いてリボン状にする——簡単そうに聞こえるかもしれませんが、カーボンナノチューブを切り開いてリボン状のグラフェンを思いどおりに作製するとなると、話は別です。

今回は、2つの研究グループがカーボンナノチューブからグラフェンリボンを作製した技術を報じたニュース記事を取り上げます。それぞれのグループの手法の違いに注目して、読んでみましょう。

## NEWS nature news

語数：489 words 分野：材料・ナノテクノロジー

Published online 15 April 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.367

<http://www.nature.com/news/2009/090415/full/news.2009.367.html>

# Nanotubes cut to ribbons

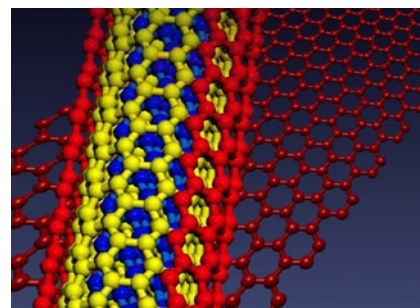
New techniques open up carbon tubes to create ribbons.

Geoff Brumfiel

- Two groups have unzipped tiny cylindrical structures called carbon nanotubes to make graphene ribbons tens of nanometres wide. Such ribbons have been touted as a promising material for everything from solar cells to computers, but have so far proved harder to produce than the tubes.
  - Graphene, an atom-thick sheet of honeycombed carbon, is one of the hottest materials around. It conducts electrons well, but is thin, transparent and strong, making it potentially useful in displays and solar panels. Ribbons of graphene could be more useful still. At widths of around 10 nanometres or less, electrons are forced to move lengthwise, and make the graphene behave as a semiconductor. Semiconducting graphene could be a boon to the electronics industry.
  - "Ribbon structures are very important structures and they're not easy to make," says James Tour, a chemist at Rice University in Houston, Texas. Early techniques used chemicals or ultrasound to chop graphene sheets into ribbons, but could not make ribbons in large amounts or with controlled widths.
  - As a solution, Tour and his co-workers, and a separate group led by Hongjie Dai of Stanford University in California, decided to try to generate ribbons from carbon nanotubes. Nanotubes are essentially rolled up sheets of graphene, sometimes nested inside each other. Researchers can already synthesize them in large quantities. The trick, says Dai, was figuring out how to open up the tubes to make one or more layers of graphene. "These things don't really have a zipper on them," he says. Both groups report their work today in *Nature*<sup>1,2</sup>.
- Making the cut**
- Dai and his colleagues opted to slice the tubes using an etching technique borrowed from the semiconductor industry. They stuck nanotubes onto a polymer film and then used ionized argon gas to etch away a strip of each tube. Once cleaned, the remaining ribbons were just 10-20 nanometres wide.
  - Tour's group, by contrast, used a combination of potassium permanganate and sulphuric acid to rip the tubes open along a single axis. The resulting ribbons are wider — around 100-500 nanometres — and not semiconducting, but easier to make in large amounts.
  - "The techniques complement each other," says Mauricio Terrones, a physicist at the Institute for Science and Technology Research of San Luis Potosi in Mexico, who was not involved in the work.
  - Both techniques are likely to be useful to researchers, and both have a variety of potential applications. Tour believes that his larger ribbons could be used in solar panels and flexible touch displays, where cheap, transparent materials are in demand. They could even be spun into lightweight, conducting fibres that might replace bulky copper wiring on aircraft and spacecraft. Dai's narrower ribbons, meanwhile, might find uses in electronics because of their semiconducting properties.
  - Dai says that his group has already used the ribbons to make basic transistors, but, he adds, it's too early to tell whether they will be commercially competitive. "It's very early in the game," he says.

#### References

- Kosynkin, D. V. et al. *Nature* **458**, 872-876 (2009).
- Jiao, L., Zhang, L., Wang, X., Diankov, G. & Dai, H. *Nature* **458**, 877-880 (2009).



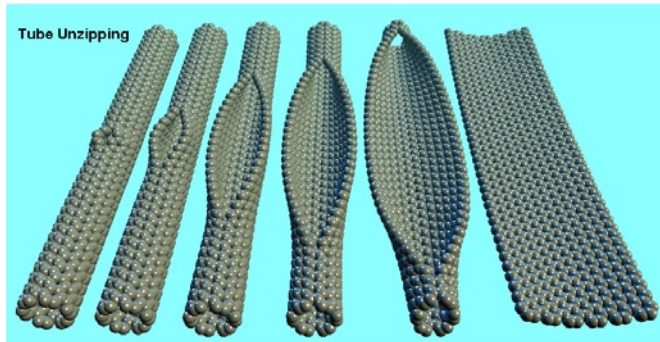
ポリマーフィルムに部分的に埋め込まれたカーボンナノチューブを、プラズマエッチングで縦方向に切り開く。

TOPICS

グラフェンとグラフェンナノリボン

グラフェンは、六角形構造の炭素原子が1層に平らに並んだシートのことである。主な特徴は次のようなものである。

- 1. 電荷キャリア(電子や正孔)の移動速度が、光速の1/300と驚くほど速い。
- 2. 炭素原子1個分の厚さにもかかわらず、不透明度が高い。
- 3. ナノデバイスに特有の1/f雑音<sup>\*1</sup>を抑制できる。
- 4. グラフェン上の電子は、質量のない相対論的粒子のようにふるまう。
- 5. 通常と異なる量子ホール効果<sup>\*2</sup>を示し、系の乱れや熱ゆらぎにもほとんど影響されず、室温でもプラトーが観測される。

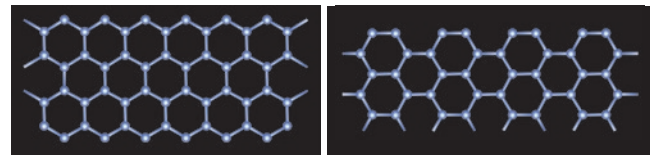


カーボンナノチューブを切り開いて、グラフェンナノリボンを作製する過程。

6. 電子のスピンと運動量の相互作用が小さく、炭素原子核の核磁気モーメントを無視できる。

グラフェンナノリボンは、グラフェンが細長いリボン状になったものである。グラフェンナノリボンでは、端の存在(幅が制限されていること)と端の形状により電子状態が大きな影響を受ける。グラフェンは通常、端がジグザグ端とアームチェア端になっているが、グラフェンナノリボンにジグザグ端が存在すると、局在スピンをもつ磁気状態(エッジ状態)となる。このためグラフェンナノリボンは、強いスピン磁性を有し、カーボンナノチューブ(下記参照)やグラフェンとは異なる電子的特性を示す。また、幅に応じて電子的特性が変化するため、大量生産できれば、カーボンナノチューブやグラフェン以上に魅力的な、コンピュータチップやデバイスの素材となる。

<sup>\*1</sup> 周波数が大きくなるにつれ小さくなる雑音。  
<sup>\*2</sup> 半導体や金属で電流が2次元平面でのみ流れている(電子の運動が二次元に制限されている)場合、垂直方向に強磁場をかけると電流と磁場に垂直な方向に起電力が起こる。この現象をホール抵抗といい、ホール抵抗がプラトーになり同時に磁気抵抗がゼロになることを量子ホール効果という。



ジグザグ端(左)とアームチェア端(右)のグラフェンナノリボン。

DMITRY V. KOSYNNIKIN

SCIENCE KEY WORDS

- 1. **carbon nanotube(s):** カーボンナノチューブ  
 グラフェンやグラファイト(複数のグラフェンが層状になったもの)が筒状になったもの。チューブの両端はキャップのように閉じている。軽くて柔軟性をもつのに強度が高いという性質のほかに、シートのねじり方によって金属的になったり半導体的になったりするので、今後の電子デバイスとして有望である。また、フラーレンや有機分子などさまざまな分子を内包でき、デバイス以外への応用も期待されている。
- 5. **etching technique:** エッチング技術  
 エッチングは、物質の表面を削って加工することであるが、特に半導体産業では、酸などの化学薬品やハロゲン化ガスやイオン化したガスを使用して基板の表面を削る技術のこと。
- 5. **polymer film:** ポリマーフィルム  
 ポリマーとは、モノマーとよばれる基本構造が重合して高分子化合物(一般的に有機化合物)となったもの。ポリマーからできたフィルムのことをポリマーフィルムという。包装用から液晶やタッチパネルまで、用途に応じた素材・厚さのフィルムがさまざまな分野で利用されている。

- 5. **ionized argon gas:** イオン化したアルゴンガス  
 アルゴン(Ar)は希ガスの1つ。無色無臭の気体。希ガスは化学的に安定で反応性に乏しいため、自然にイオン化したり、化合物を作ったりすることはほとんどない。ここでは、人工的にアルゴンをイオン化して、高いエネルギー状態(高反応性状態)にして利用している。
- 6. **potassium permanganate:** 過マンガン酸カリウム(KMnO<sub>4</sub>)  
 濃い赤紫色の固体で、水やメタノールによく溶ける。強力な酸化剤として知られる。
- 6. **sulphuric acid:** 硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)  
 不揮発性で無色、酸性の液体。やや粘性がある。濃硫酸(重量パーセント濃度90%以上)は強い酸化作用と脱水作用があり、熱を加えるとさらに酸化力が高まる。希硫酸は、強酸性であるが酸化作用や脱水作用はない。
- 9. **transistor(s):** トランジスタ  
 増幅作用やスイッチング作用をもつ半導体素子。n型半導体(negative; 電子が過剰状態)とp型半導体(positive; 電子が不足状態<正孔>)が、pnpまたはnpnのようにサンドイッチ状態になっている。

WORDS AND PHRASES

タイトル **cut to ribbons:** 「切り開いてリボンにする」  
 cut to ribbons は「(相手方、敵を) 壊滅させる、完敗させる」という意味だが、ここでの用例は、むしろ cut to pieces に由来している。つまり、cut to pieces には「(相手方、敵を) 壊滅させる、完敗させる」という意味のほかに「~を切り刻む、寸断する」という意味があり、pieces の代わりに、この記事のテーマである ribbons を使ったのである。

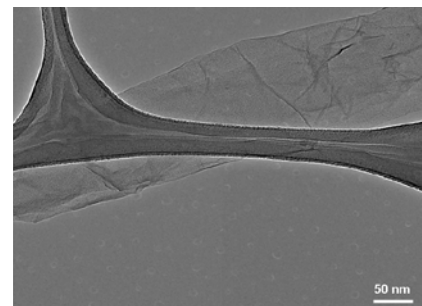
- 1. **(have) unzip(ped):** 「切り開く」  
 「zipper(ファスナー)を開く」という意味だが、ここでは、ナノチューブの分子構造をファスナーのかみ合わせ構造になぞらえている。
- 1. **cylindrical structure(s):** 「円筒状構造体」
- 1. **(have been) touted as ~:** 「~ともてはやされる」
- 2. **boon:** 「朗報」  
 このほかに、「恩恵」「利益」「好材料」といった意味もある。
- 4. **nested inside each other:** 「入れ子になっている」  
 この記事では、直径が異なる同形のナノチューブが順に組み入れられた状態のこと。

- 5. **opt(ed) to ~:** 「~することに決める」
- 5. **etch away:** 「エッチングによって切り開く」  
 etch(エッチングする)とaway(切り離す)が組み合わさっている。
- 6. **rip the tubes open along a single axis:** 「単一軸に沿ってナノチューブを切り開いた」  
 rip ~ open は、「~を破って開く」「~を裂いて開く」という意味。
- 7. **complement each other:** 「相互補完する」
- 8. **have a variety of potential applications:** 「さまざまな用途が考えられている」
- 8. **in demand:** 「需要がある」「求められる」
- 8. **be spun into lightweight, conducting fibres:** 「軽量の導電ファイバーに紡ぐ」
- 8. **bulky copper wiring:** 「かさ高い銅線」  
 bulky とは、重量や容積が大きいこと。
- 8. **find uses in ~:** 「~において利用される」
- 8. **properties:** 「特性」

## 参考訳

## ナノチューブを切り開いて リボンにする

カーボンナノチューブをリボン状に切り開く新技術が開発された。  
ジョフ・ブラムフィール



還元されたナノリボンの顕微鏡画像。

- 2つの研究グループが、カーボンナノチューブという微小な円筒状の構造体を切り開いて、幅が数十ナノメートルのリボン状のグラフェンを作製した。グラフェンリボンは、太陽電池からコンピュータまで、あらゆる用途で有望な材料としてもはやされているものの、その作製はナノチューブよりもむずかしいとされていた。
  - グラフェンは、原子1個分の厚みしかない炭素シートで、炭素原子がハチの巣のように結合した構造になっている。グラフェンは、現在最も注目されている材料の1つである。電子伝導性が高い一方で、薄く、透明で、強度があるため、ディスプレイやソーラーパネル（太陽電池板）に利用できる可能性がある。グラフェンがリボン状であればもっと便利である。グラフェンの幅が約10ナノメートル以下になると、電子は縦方向に移動するようになり、グラフェンは半導体としてふるまうようになる。半導体グラフェンは、エレクトロニクス産業への朗報となるかもしれない。
  - ライス大学（米国テキサス州ヒューストン）の化学者 James Tour は、「リボン構造体は非常に重要な構造体ですが、簡単には作れません」と話す。これまでも、化学物質や超音波を用いてグラフェンシートをリボン状にする技術はあったが、リボンを大量に作製したり、その幅を制御したりすることはできなかった。
  - こうした問題点を解決するため、Tour の研究グループとスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の Hongjie Dai をリーダーとする研究グループは、カーボンナノチューブからリボンを作製することに挑戦しようと決めた。ナノチューブは、基本的にはグラフェンシートが巻き上がったものであり、複数のシートが巻き上がって入れ子になっていることもある。ナノチューブの大量合成は既に可能となっている。残る課題は、このナノチューブを切り開いて、1層または数層のグラフェンシートにする方法を考案することだった、と Dai は話す。「実際、ナノチューブにはファスナーなどついていませんからね」と彼はいう。両グループは本日、*Nature* 誌上でそれぞれの研究成果を報告する<sup>1,2</sup>。
- 切れ目を入れる**  
Dai の研究グループは、半導体産業のエッチング技術を借りてナノチューブを切り開くことにした。彼らは複数のナノチューブを1枚のポリマーフィルムに貼り付け、イオン化したアルゴンガスを使ったエッチングにより、それぞれのナノチューブの一部を細く切り取っていった。それを洗浄すると、幅10～20ナノメートルほどのリボンが得られた。
  - これに対して Tour の研究グループは、過マンガン酸カリウムと硫酸を組み合わせて使い、単一の軸に沿ってナノチューブを切り開いた。こうして作製されたリボンは Dai らのリボンよりも幅が広く（約100～500ナノメートル）、半導体ではないが、大量に作製するにはこちらのほうが容易である。
  - メキシコのサンルイスポトシ州にある科学技術研究所の物理学者 Mauricio Terrones は、これらの研究には関与していないが、「2つの技術は、お互いの短所を補い合う関係にあります」と話す。
  - いずれの技術も研究者の役に立つ可能性が高く、さまざまな用途が考えられている。Tour は、自分たちが作製した幅広リボンは、低コストで透明な材料が求められるソーラーパネルやフレキシブルなタッチディスプレイに使える可能性がある、と考えている。また、このリボンを紡いで軽量の導電ファイバーにすれば、航空機や宇宙船内のかさ高い銅線の代わりに利用できるかもしれない。一方、Dai の細いリボンは、半導体としての性質をもつことから、エレクトロニクスの分野で利用されるようになるかもしれない。
  - Dai の研究グループは、既にこの細いリボンを使って簡単なトランジスタを作製したが、商業的競争力の有無を判断するのは時期尚早だと話す。「勝負はまだ始まったばかりなのです」と彼はいう。