

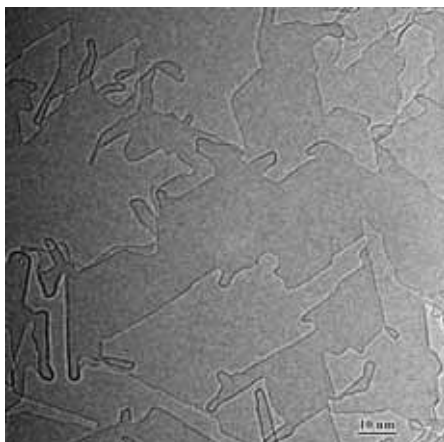
【電子・情報通信技術特集】

数層グラフェンの昇華で連結ナノ構造の形成と自己被覆を発見（米国）

ペンシルベニア大学、サンディア国立研究所およびライス大学の技術者達は、数層グラフェン(few-layer grapheme)のシートを電流を用いて加熱し昇華させるという、簡易な集積化プロセスによって、グラフェン基板上で、相互結合したカーボンナノ構造が形成されることを実証した。この発見は、最終的にカーボンベースの集積デバイスを構築するための新しいパラダイムをもたらす可能性がある。

曲線状のナノ構造（カーボンナノチューブやフラレンなど）は特別な性質を持っている。しかし、合成後は、ピックアップやマニピュレーション（操作）、デバイスへの集積が極めて難しい。ペンシルベニア大学の材料科学者 Ju Li とサンディア国立研究所の科学者 Jian Yu Huang は、グラフェンに直接結合した曲線状のナノ構造を形成するという、新しい発想を考え付いた。これは、極薄の二次元シートであるグラフェンが、開いたエッジが切断された後には容易に屈曲し、別の開いたエッジと永久的に融合できるという事実を利用している。

電子顕微鏡内で行われた今回の実験において、「ナイフ」と「溶接トーチ」として使用されたのは、ナノファクトリーの走査プローブから生じる電流であった。この電流により、最大で 2,000 の熱が生じた。数層グラフェンに電流を用いた際、その場観察(in situ)^{注1}で以下のものが形成された： 相互結合した多数の曲線状のカーボンナノ構造（例えば、「フラクショナルなナノチューブ」のようなグラフェンの二層エッジなど）、 「アンチ量子ドット(anti quantum-dots)」に相当する、グラフェン上の二層エッジの環(ring)、グラフェンの複数層に結合している、ナノチューブの二層エッジの集積。



グラフェン基板上で、相互連結したカーボンナノ構造が形成される様子を示した電子顕微鏡写真。将来の電子デバイス作製に利用できる可能性がある。

（Copyright © ペンシルベニア大学）

注1 イン・シツ、イン・シチュともいう。原位置で、あるがままの状態、現場での意。

驚くべきことに、昇華中に形成されたグラフェンのエッジ部分の99%以上が、平面的な単層ではなく、曲線状の二層エッジとなったことを研究者達は観察した。このことは、高温下でのグラフェンの安定したエッジが、二層エッジであることを示している。また、これは対称性を考慮しエネルギー計算を基にした予測とも一致している。さらに理論上では、これらの二層エッジ、すなわち「フラクショナルなナノチューブ」が、それ自身で新しい性質を持っているとの予測もなされており、デバイスへの利用法が見つかる可能性がある。

今回の研究は、2009年6月23日号の米国科学アカデミー紀要(Proceedings of the National Academy of Sciences)^{注2}に発表された。これらのナノ構造の製造については、関連するウェブサイト参照されたい^{注3}。

LiとHuangは、電流の熱と高解像度の透過型電子顕微鏡を用いて、これらの相互結合したカーボンナノ構造が形成されるのを観察した。この電流はグラフェン層を通過した後、結晶の品質と、グラフェンの表面清浄度を改善する。どちらもデバイス製造には重要である。

数層グラフェン(例:10枚積層など)の昇華は、単層グラフェンの昇華よりも長所がある。数層グラフェンの場合は、導電性があり拡張した最外層(1~2枚)のグラフェンシート上でナノ構造が形成されるとともに、層が自然に融合する。

加熱の間、平面的なグラフェンシートと、自己で被覆するナノ構造(二層エッジとナノチューブなど)の双方が、デバイスへの利用にとって重要な独特の電子物性を持っている。これまでエンジニアにとって最大の障壁は、カーボンの性質を最大限に引き出すために、構造のコントロールと、これらのナノ構造の集積化を行うことであった。自己集積化する新しいカーボンナノ構造の発見によってこれらの障壁が克服され、グラフェン系電子デバイスの新たな手法がもたらされる可能性がある。

研究者達は、ジュール加熱を用いて多層グラフェンの昇華を誘導した。多層グラフェンのエッジ部分の炭素原子を、気相に移動させるために熱力学的に好適な条件下においた。固体に残ったグラフェンには新たなエッジが露出する。残ったグラフェンのエッジ部分は屈曲し、多くの場合、結合して二層エッジを形成する。研究者達はこの反応を、自然の原動力が原因だと考えている。つまり、増加した曲げエネルギー(bending energy)が費やされて、単層グラフェンの開いたエッジにおけるダングリングボンド^{注4}(キャピラリーエネルギー(capillary energy))が低減されるためと考えられる。

注2 PNAS2009年6月23日号:「In situ observation of graphene sublimation and multi-layer edge reconstructions」<http://www.pnas.org/content/early/2009/06/10/0905193106.full.pdf+html>
<http://www.pnas.org/content/early/2009/06/10/0905193106.abstract>

注3 <http://www.youtube.com/user/MaterialsTheory>

注4 dangling bond: 原子における未結合手。

「今回の研究は、拡張して導電性がある平面的なグラフェン上に、曲線状のナノ構造を直接作製して相互結合させられることを実証した」とペンシルベニア大学の工学・応用科学部、材料工学学科の Li 准教授は話す。「その上、この事実は、複数枚のグラフェンシートを意図的に相互結合させられることを実証している。さらに、「配管」のクオリティは、これまでにカーボンナノチューブとの電気接続に用いられてきたいかなるものよりも、ずば抜けて高い。私達は現在、グラフェンの二層エッジ、二層エッジの環、およびナノチューブの二層エッジ連結に関する基本的性質を調査している。」

この研究は以下の研究者により実施された:ペンシルベニア大学の Li および Liang Qi、サンディア国立研究所ナノテク総合センターの Jian Yu Huang および Ping Lu、ライス大学機械工学・材質科学学科の Feng Ding および Boris I. Yakobson である。また、以下の機関から支援を受けている:国立科学財団(National Science Foundation)、空軍科学研究所(AFOSR)、ホンダ・リサーチ・インスティテュート、米国エネルギー省(DOE)、および海軍研究事務所(ONR)。

編集: NEDO 総務企画部、原訳: 大釜 みどり

出典: <http://www.upenn.edu/pennnews/article.php?id=1666>

(Copyright © University of Pennsylvania, All rights reserved. Used with Permission.)