

研 究 報 告 書

「SWNT の電子構造/カイラリティ制御に向けた精密合成法の探索」

研究期間:平成19年10月～平成23年3月

研究者:吾郷 浩樹

1. 研究のねらい

単層カーボンナノチューブ(SWNT)は、最新のリソグラフィ技術をはるかに超える微細な直径と、優れた結晶性を有する炭素原子のみからなる一次元材料である。SWNTは、 $79,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ もの高いキャリア移動度(シリコンは $1,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)や高い熱伝導度、機械的柔軟性など優れた物性を有する。複合材料など従来の炭素繊維が利用されてきた分野への応用も積極的に検討されている一方、SWNTの優れた電子輸送特性を応用した集積回路やフレキシブルトランジスタ、透明電極など次世代エレクトロニクス材料としての展開に大きな期待がもたれている。

SWNT を利用したエレクトロニクスの実現のためには成長時の SWNT の集積化、ならびに電子構造(金属-半導体的バンド構造)やカイラリティ(グラフェンシートの巻き方)を制御した合成法の開発が非常に重要となってくる。集積化については、後述する単結晶表面の原子配列やガスフロー等を利用した水平配向、及び触媒のパターニング技術など着実に進展してきている。それに対し、金属-半導体のバンド構造やカイラリティの作り分けは、その重要性にも関わらず未だに解決の方向性さえ明確になっていないのが現状である。近年、複数の界面活性剤と超遠心分離などを併用した合成後の分離処理法が発展しつつあるが、分散過程で SWNT に欠陥が導入されて短尺化し、かつ界面活性剤等による汚染が避けられないなどの問題点がある。そのため、SWNT 合成時に直接的に構造を制御できるような革新的な方法を開発できれば、大きなブレークスルーとなり、SWNT をはじめとしたカーボンを基盤とするエレクトロニクス応用が大きく発展することが期待される。

そこで、本研究では電子構造あるいはカイラリティの選択合成を最終的な目標として、SWNTの精密成長法の開発に関する研究を行ってきた。特に、我々が2005年に見出したサファイア($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)単結晶上でのSWNTの自己組織的な水平配向成長技術を発展させ、直径やカイラリティ制御のためのSWNTの精密合成に関する探索的な研究を行うとともに、水平配向のさらなる高度化を目指して研究を展開した。

また、一次元の炭素材料であるSWNTに加え、理想的な二次元材料として注目されているグラフェンについても、エピタキシャル CVD 成長という新たなコンセプトに基づいて、高品質な単層グラフェンの合成と成長メカニズムに関する研究も行なった。

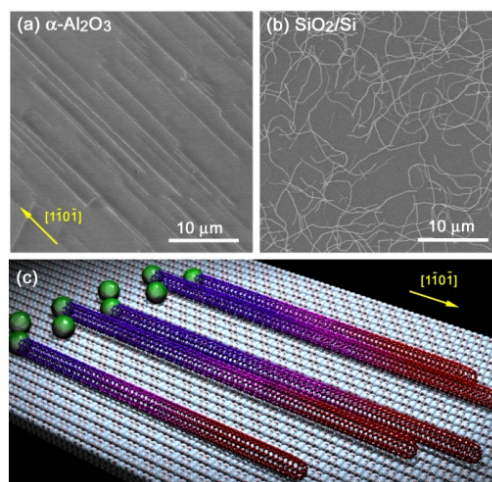


図1 (a)サファイア r 面と(b)シリコン基板上に成長させたSWNTのSEM像。(c)サファイア上の水平配向SWNTのイメージ。

2. 研究成果

2.1. SWNTのカイラリティ/電子構造制御

(1) 配向メカニズムの解明

図1に示すように、シリコン(SiO_2/Si)基板上ではSWNTはランダムな方向に成長するが、サファイア上ではSWNTは基板に接しながら特定の結晶方位に沿って成長する。このSWNTの水平配向成長は、その配向方向が基板の特定の結晶方位に沿うことから、SWNTは強く基板の影響を受けて成長していると推測される。この配向が、基板-触媒粒子、あるいは基板-SWNT間の相互

作用のどちらに由来するかを知ることは、配向メカニズムの理解だけでなく、SWNTの構造を制御しようとする点で非常に重要である。

そこで、サファイア上でSWNTが配向成長するメカニズムを明らかにするため、CVD中のSWNTの成長過程を炭素同位体によって可視化することを試みた。具体的には、CVD中に原料ガスを $^{13}\text{CH}_4$ から $^{12}\text{CH}_4$ に切り替えて合成し、成長後のSWNTの同位体分布をラマンマッピング測定によって行った。 ^{13}C 同位体への切り替えによるラマンシフトの変化は、 $\nu(^{13}\text{C}) = \sqrt{12/13} \nu(^{12}\text{C})$ で表わすことができる。例えば、Gバンドと呼ばれるグラファイト格子由来の振動では ^{12}C -SWNTの 1592 cm^{-1} の波数が、 ^{13}C -SWNTの 1530 cm^{-1} に大きくシフトすることから、このシフトを利用して炭素同位体の長軸方向の分布を調べた。実験の結果、多くのSWNTで、触媒が根元にとどまったまま成長する「根元成長」が起きていることが明らかとなった。これはサファイア表面をSWNTがスライディングしながら成長することを示唆しており、SWNT-サファイア間の相互作用が配向成長に重要であることを示すものである。

(2) 配向 SWNT のキャラクタリゼーション

基板から強い影響を受けて配向成長するSWNTについて、その直径やカイラリティ、電子輸送特性に対してサファイア基板が与える影響は非常に興味深い。まず、一本のSWNTに電極を取り付け、ゲート電圧を印加することで電流の変調が起こるかどうかを調べた(図2)。その結果、半導体的な特性と金属的な特性の二つが観測され、その分布は理論的に予測される統計的な分布(2/3が半導体、1/3が金属)に近かった。このことから、水平配向SWNTにおいても、金属と半導体的なものは混在して成長していると結論づけた。

次に、配向したSWNTの直径についてラマン分光を用いて検討した。配向成長が観察されるサファイアa面およびr面では直径が比較的均一なSWNTが得られるのに対して、SWNTが配向しないサファイアc面や SiO_2/Si 基板上ではナノチューブの直径が大きなものも生成され、かつ

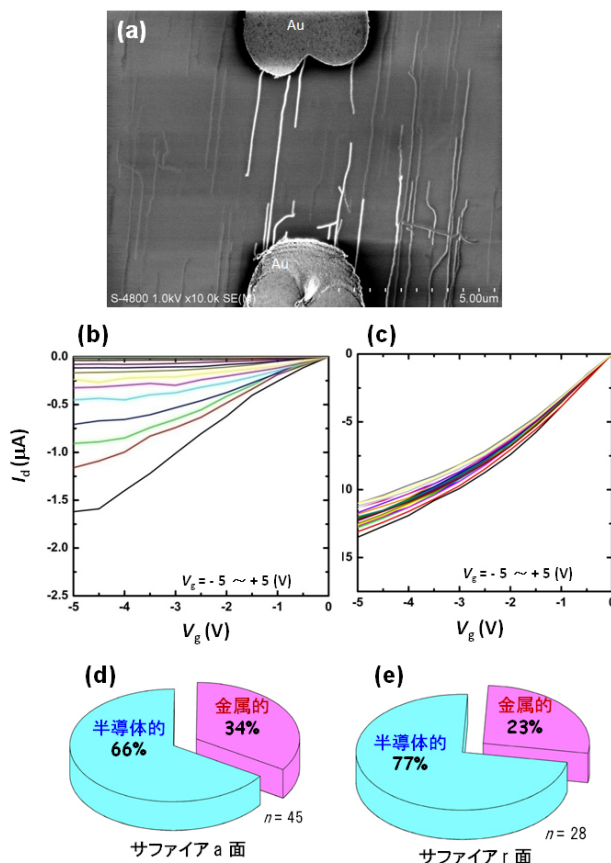


図2 (a) Au電極間に架橋した1本のSWNTのSEM像と典型的な(b)半導体と(c)金属的なデバイスの特性。(d)、(e)はサファイアa面とr面上での半導体的SWNTと金属体的SWNTの分布。

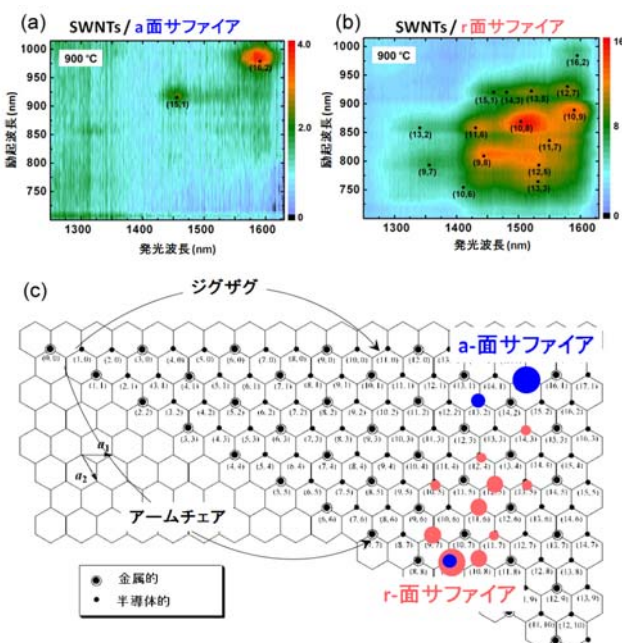


図3 サファイアa面(a)とr面(b)に配向したSWNTからの近赤外PLマップ。(c) ナノチューブの展開図上に蛍光の強さを表したものの。

直径分布も広がることが分かった。さらに、カイラリティ分布を近赤外フォトルミネッセンス(PL)分光によって直接的に測定することを試みた。波長可変のTi-サファイアレーザーを励起光として用い、InGaAs検出器を用いて近赤外の発光スペクトルを測定した。SWNTの配向方向にPLの偏光が観測されたものの、基板からの強い影響を反映して、概してPL強度は非常に小さく、スペクトルはブロードであった。図3に実際に得られたPLマップと、その強度分布をカイラルマップの円の大きさと表わしたものを示す。r面では一般的なSWNTに見られるアームチェア寄りのPLが強く観測されたのに対して、a面上の配向SWNTはジグザグ寄りに発光が強く観測された。この結果は、a面上においてSWNTのカイラリティが従来と異なることを示しており、サファイアの結晶面がSWNTの構造に影響を与えていると解釈できる。

図4に、異なるCVD温度で合成されたa面、およびr面上の配向成長SWNTについて、PLマップから求めたナノチューブ直径とカイラル角との相関を示す。この図からもジグザグ寄りのSWNTがa面上で優先的に生成する傾向があることが分かる。なお、両方の基板において、CVD温度が低くなるにつれて、直径が小さくなる傾向があることも確認でき、これは他の実験結果とも一致する。この低温化による細径化は、金属ナノ粒子触媒の熱による凝集やオストワルド熟成の軽減により説明できる。今回観察された結晶面に依存したPLの違いは、均一な直径のSWNT合成法の開発と組み合わせることで、基板との相互作用を利用したSWNTのカイラリティ制御に発展することが期待できる。

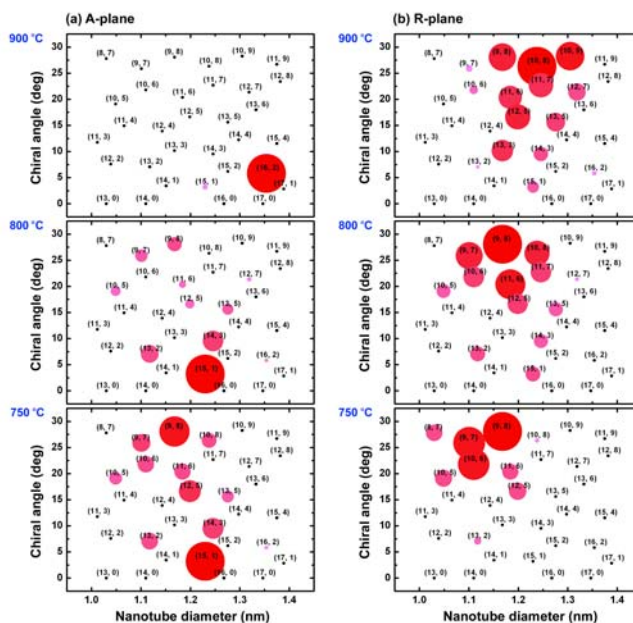


図4 サファイアa面(a)とr面(b)上に水平配向したSWNTのPL強度の分布。異なるCVD温度(上から900, 800, 750 °C)の結果を比較して示している。

2. 2. SWNTの方向制御の発展

(1) SWNTの折り曲げ成長

2005年にサファイア(我々のグループと南カルフォルニア大学)と水晶(イリノイ大学)でSWNTの水平配向成長が見出されて以降、主に密度の向上を目的として研究がおこなわれてきた。しかし、今後のSWNTに基づくデバイス応用を考える上では、密度に加えて、集積化を見据えたさらに高度な配向方向の制御などが望まれる。また、このような試みは、SWNTと結晶基板との相互作用について、さらなる知見を得る可能性も期待できる。そこで本研究では、サファイアのステ

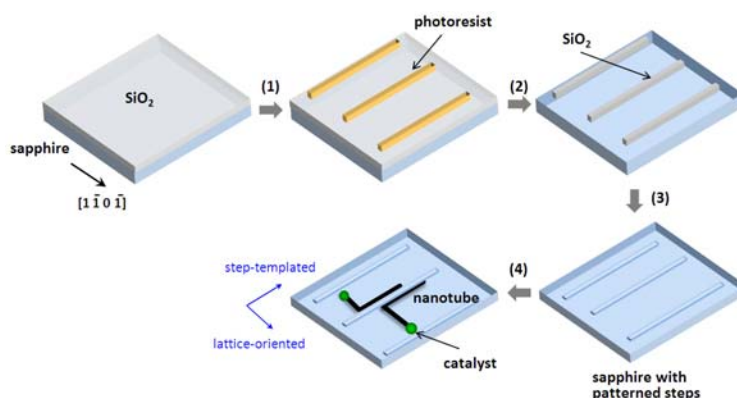


図5 サファイア表面でのトレンチ構造の作製プロセスとSWNTの折り曲げ成長のスキーム。(1) フォトリソグラフィーのパターニング、(2) SiO₂マスクのエッチング、(3) SiO₂パターンをマスクとしたサファイアのウェットエッチング、(4) CVDによるSWNT成長。

ップ構造や原子配列の対称性など、SWNT の成長方向の変化を系統的に調べた。

我々は、以前、サファイア表面上のステップが高くなると、原子配列ではなく、ステップエッジに沿って SWNT が成長することを報告している。本研究ではこの知見を発展させ、原子配列による配向成長とステップ配向を組み合わせ、成長途中で SWNT を折り曲げることを試みた。サファイア表面に、図5に示した MEMS プロセスによ

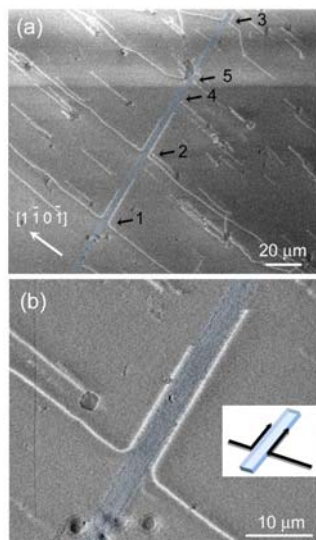


図6 トレンチ構造を作製したサファイア上で成長させた SWNT の SEM 像

って人工的なトレンチ構造を作製した。そして図6のように、SWNT が原子配列に沿って最初は配向成長するが、人工的

なトレンチに当たると、それに平行になるように折れ曲がって成長することを見出した。このように折れ曲がり成長をする SWNT の割合は 10-30%程度であり、トレンチを乗り越えるものや成長が止まってしまうものも存在していた。このように折れ曲がった SWNT の電子輸送特性を、SEM 中のプローバーを用いて解析した(図7)。その結果、直線部に比べて、屈曲部は 1桁程度高い抵抗値を示すことが分かった。これは、折れ曲がることによって SWNT に格子歪みが導入され、電子-フォノン散乱が強められたためであると解釈している。この屈曲部の Raman スペクトルは興味深く、今後の課題である。

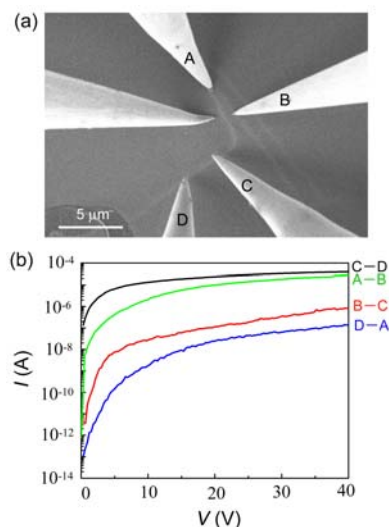


図7 折れ曲がった1本のSWNTの電気輸送特性測定結果。(a) SEM 像、(b) 各プローブ間の I - V 特性

(2) SWNT の二方向配向成長

単結晶基板上における薄膜のヘテロエピタキシャル成長は、基板のオフ角(ミスカット)の影響を受けることが知られている。そこで、我々の水平配向 SWNT について、サファイア基板のオフ角の効果を調べた。角度および方向を変えた数種のサファイア基板を用いて、CVD により SWNT 合成を行ったところ、興味深いことに、特定の方向に傾斜させた場合に、通常とは 90° 異なる方向に SWNT が配向成長することが分かった。その結果を図8に示す。(b),(c)の挿入図のモデルのように、オフ角を導入することで、別の方向に並んだ原子配列がより強く作用するようになったと考えられる。

さらに、オフ角をつけたサファイア基板の前処理について検討したところ、水素中でアニールすることで、図 8(c)の配向方向の変化が元に戻る、つまり方向が図8(b)のように変化できることも分かった。この知見を活かし、オフ角とアニール時間を制御することで、図 8(b)と(c)の二方向に同時に SWNT を水平配向させることを試みた。図9に示すように、四角形の触媒パターンから二方向に、しかも1回の CVD で直接的に成長させることに成功した。二方向に成長する場合には、従来は単結晶基板やガスフローによる配向を組み合わせる手法がとられるが、本方法は、単結晶基板の異方性原子配列のみに依存しており、SWNT の方向制御の可能性をさらに広げるものと考えている。

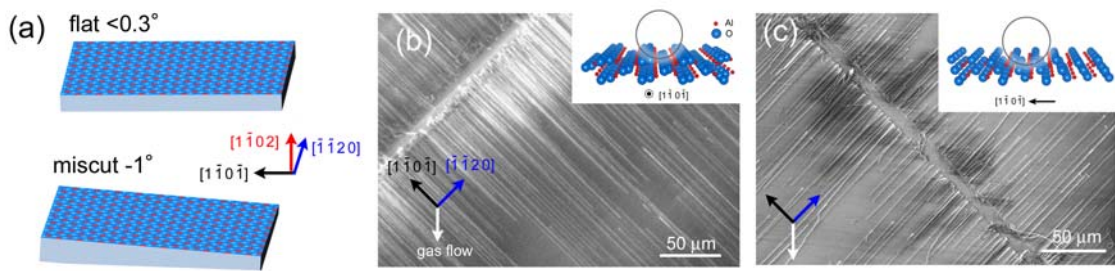


図8 (a)オフ角のないサファイア基板(上)とオフ角をつけた基板(下)のイメージ。(b)オフ角のない基板上で配向したSWNTのSEM像とその模式図(挿図)。(c) -1° のオフ角のある基板上に配向したSWNTとその模式図。オフ角を入れることで、配向方向が 90° 変化することが分かる。

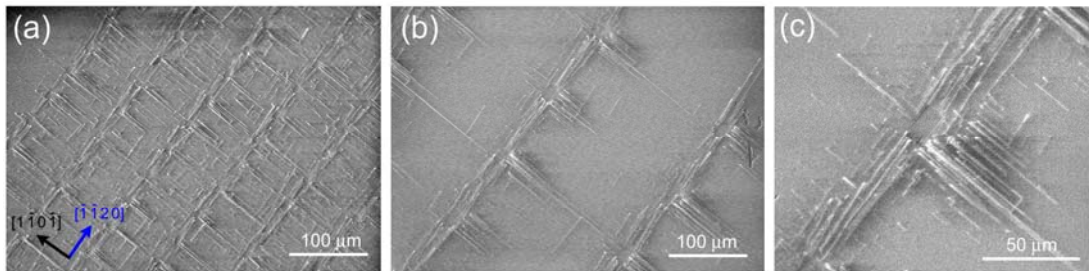


図9 オフ角とアニール条件を制御して、二方向に成長させたSWNTのSEM像。触媒パターンのピッチが狭いもの(a)と広いもの(b)から成長したSWNT。(c)は(b)の高倍率像。

(3) SWNTの片方向成長

サファイア上での配向成長は、 r 面と a 面のみで観測されるが、 a 面に比べると r 面の原子配列の対称性は低い。この低い対称性を反映して、 r 面上においては、SWNTが触媒ラインの片方向だけに成長する現象も見出している(図10)。 a 面の原子配列は点対称性を有しており、このような片方向成長が見られなかったことから、表面の原子配列がSWNTの成長の向きにまで影響を与えることが分かった。

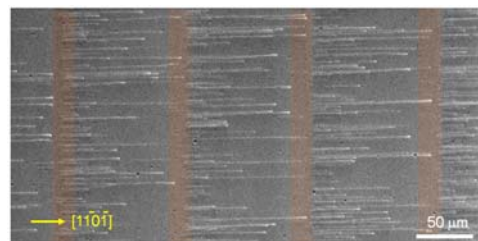


図10 サファイア r 面上で観察される、片方向成長したSWNT。縦の触媒ラインから右側のみに向かって成長する。

上記の水平配向SWNT成長制御に加え、高温アニールによる基板からSWNTへのホールのドーピングや、触媒ナノ粒子のパターニング法などについても成果を得た。他にも、粉末の担持触媒を用い、成長過程での水蒸気導入によるSWNT直径の細径化や、金を触媒としたナノチューブ合成などについても調べ、いくつかの興味深い結果を得ることができた。

2. 3. グラフェンの触媒成長

グラフェンは、二次元的に広がった炭素原子のネットワークからなり、単一原子の厚さを有する世の中の材料の中で最も薄い二次元シートである。直線的なバンド分散を反映して、その薄さにもかかわらずキャリアがグラフェン中を非常に高速で移動でき、室温での量子ホール効果など物理的に興味深い物性を示すことが知られている。基板の影響がないときには $200,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ もの高い移動度が報告されており、またシート一枚の透過率は97%と非常に高く、トップダウンによる加工も可能であることから、透明電極や集積回路など、SWNTと同様にエレクトロニクス応用が期待される物質である。グラフェンは、従来、グラファイトからスコッチテープを使って剥離・転写して

得られていたが、サイズが小さく、膜厚も不均一で、実際の応用には適していなかった。

そのような中、2009年から遷移金属の薄膜を触媒として、CVD法によってグラフェンを合成する試みが世界中で活発に研究されるようになってきた。しかし、図11(a)に示すように、これまで用いられてきた金属触媒は多結

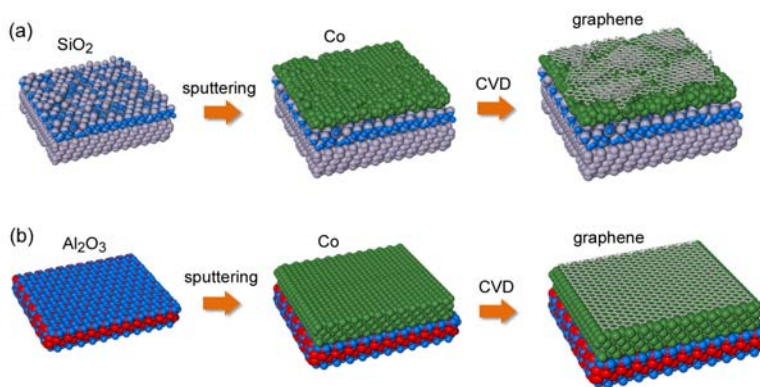


図11 (a) 従来のシリコン基板を用いる触媒 CVD 法と (b) 今回検討した単結晶基板を用いたエピタキシャル金属による CVD 法

晶であり、生成するグラフェンが多数のドメインからなり、さらにそのドメインの無秩序な向きを反映してグラフェンの向きはランダムであるという問題があった。また、Niのような高い炭素溶解度を有する金属では多層グラフェンが単層グラフェンと一緒に析出してしまい、不均一なグラフェン膜しか得られないという問題もあった。我々は、金属触媒の結晶性が、グラフェンの CVD 成

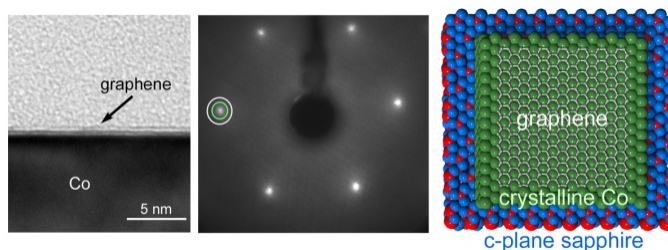


図12 エピタキシャル成長させたCo金属上に成長した単層グラフェンのTEM像とLEED像、及びCo格子とグラフェン方位の関係のイメージ図

長に重要であると考え、サファイア単結晶上にヘテロエピタキシャルに金属膜を堆積させて、それを触媒として用いることを試みた(図11(b))。今回用いたサファイア基板は、近年のLEDマーケットの発達を反映して、4インチまでの大きな基板が、比較的安価に入手できる材料である。

実験結果を図12に示す。炭素溶解度の高いCoやNiでも単層グラフェンの優先的な成長を実現できることが、断面TEM、Raman分光、SEM、光吸収、光学顕微鏡測定等から分かった。この結果は、従来困難と考えられていたCoやNiでも、結晶性を高めることで単層グラフェンの合成ができることを示しており、CVD触媒の可能性が広がることが期待される。一方、SiO₂上に堆積させたCo膜は多結晶で多くのグレインバウンダリーを有するため、バウンダリーからのグラフェン析出を制御できず、層数が不均一なグラフェンしか合成できなかった。このCo/SiO₂の結果は、我々の推測を裏付けるものであった。

上記の他にも、高分子やアモルファスカーボンを炭素原料にした真空アニールによってもグラフェンが合成できることも見出している。エピタキシャル金属膜の表面にピットが生成する際には、ピット内に優先的にグラフェンが析出し、ピットの形状によって四角形や三角形のマイクロサイズのグラフェンが得られることも分かった。

3. 今後の展開

水平配向 SWNT に関しては、結晶面に依存してカイラリティが変化する可能性を得ることが出来た。今後は、配向 SWNT の直径をより厳密に制御して、カイラル角と直径を定めたカイラリティ制御へと発展させたいと考えている。基板上では、高温の CVD プロセスにおける金属ナノ粒子触媒の凝集を回避する必要がある。新しいアイデアでこれらの問題をクリアしていく必要がある。このような基礎研究を通じて、SWNT のカイラリティあるいは電子構造を制御した配向成長法を開発できれば、大きなブレークスルーとなり、SWNT に基づいた電界効果トランジスタ、フレキシブルデバイス、LSI などエレクトロニクス応用の可能性が大きく広がると期待できる。

グラフェンについても、エピタキシャル触媒の利用により、高品質で向きの揃ったグラフェンが

成長できるようになった。今後、これをさらに発展させて、ナノリボンや二層グラフェンの成長など、グラフェンの大きな特長である高移動度をもち、かつバンドギャップを有する半導体材料へと展開していきたいと考えている。最終的には、カーボンナノチューブ、グラフェンともに、ナノスケール、あるいは原子スケールで構造を制御することにより、炭素のもつ大きなポテンシャルを十分に発揮して、次世代を担う「カーボンエレクトロニクス」へと発展していきたいと考えている。

4. 自己評価

本研究の目標である、SWNT の電子構造/カイラリティ制御は、これまでの世界中での活発な研究にもかかわらず、未だ実現されていない、ナノチューブの研究分野の中で最も重要でチャレンジングな課題の一つである。本さがけ研究では、触媒 CVD 法を用いて、これに挑戦し、水平配向 SWNT で結晶面に依存してカイラル角に特定の傾向があることを明らかにできたことは今後につながるものとして期待できる。また、炭素同位体を用いるという斬新な方法で、SWNT の成長過程を可視化し、根本成長が起こっていると示したことは、構造制御を考える上で重要な意義があったといえる。しかし、これらをさらに進めて選択合成法を確立するためには、SWNT の直径をできるだけ細く均一にする必要があったが、CVD 時の高い熱エネルギーによる触媒粒子の形状変化や凝集が大きな妨げとなって、直径の厳密な制御はできなかった。しかし、現在も種々のアプローチで研究を継続し、興味深い結果が少しずつ得られている。非常に挑戦的な課題であることを考えると、今後の継続的な研究により、最終的な目標に近づいていけると思われる。一方、高集積化を目指した SWNT の高次の配向制御は、折り曲げ成長、二方向成長、片方向成長など、ユニークで新しい知見を多く見出すことができた。グラフェンについても、さがけの研究期間の途中から開始したが、エピタキシャルに CVD で合成することができ、先駆的な研究を行えたと自負している。今後は、さがけ研究の経験を活かし、この競争の激しいナノカーボン分野の中で、オリジナリティを追究して高いレベルの研究を展開していきたいと考えている。

5. 研究総括の見解

本研究では最もチャレンジングな課題である、電子構造やカイラリティの選択合成を最終目標とし、SWNT の精密成長法に関する研究を目指した。その結果、研究者のオリジナルであるサファイア単結晶上での SWNT の水平配向成長技術を基盤に、水平配向 SWNT において、サファイア結晶面に依存してカイラル角に特定の傾向があることを初めて明らかにし、カイラル角の制御に発展できる知見を得た。また炭素同位体を用いて SWNT 成長過程を可視化するユニークな手法で、触媒が根元にとどまって成長する「根本成長」が起こっていることを解明できたことで、構造制御を考える上での重要な成果が得られた。しかしながら、これらをさらに進めて直径の制御をも含めた選択合成法を確立するまでには至らなかったが、さがけで得られた成果を基に今後の発展的な研究に期待したい。一方、集積化を目指した SWNT の高次の配向制御は、折り曲げ成長、二方向成長、片方向成長など、ユニークで新しい現象を数多く見出すことができた。さらには、さがけ研究の途中から新規に検討を進めたグラフェン成長技術に関しては、独自のエピタキシャル金属触媒を利用した CVD 法により、高品質で六員環の方向が揃った単層グラフェン膜を初めて合成できたことは、さがけ研究としては注目に値し、産業界へのインパクトがあり高く評価できる。今後の大いなる実用化展開に期待したい。

6. 主要な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. H. Ago, N. Ishigami, N. Yoshihara, K. Imamoto, K. Ikeda, M. Tsuji, T. Ikuta, K. Takahashi
Visualization of horizontally-aligned single-walled carbon nanotube growth with $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopes
J. Phys. Chem. C (Letter), **112**, 1735–1738 (2008).
2. N. Ishigami, H. Ago, K. Imamoto, M. Tsuji, K. Iakoubovskii, N. Minami

Crystal plane dependent growth of aligned single-walled carbon nanotubes on sapphire

J. Am. Chem. Soc., **130**, 9918–9924 (2008).

3. N. Ishigami, H. Ago, T. Nishi, K. Ikeda, M. Tsuji, T. Ikuta, K. Takahashi
Unidirectional growth of single-walled carbon nanotubes
J. Am. Chem. Soc. (Communication), **130**, 17264–17265 (2008).
4. H. Ago, T. Nishi, K. Imamoto, N. Ishigami, M. Tsuji, T. Ikuta, K. Takahashi
Orthogonal growth of horizontally-aligned single-walled carbon nanotube arrays
J. Phys. Chem. C, **114**, 12925–12930 (2010).
5. H. Ago, Y. Ito, N. Mizuta, K. Yoshida, B. Hu, C. M. Orofeo, M. Tsuji, K. Ikeda, S. Mizuno
Epitaxial chemical vapor deposition growth of single-layer graphene over cobalt film crystallized on sapphire
ACS Nano, **4**, 7407–7414 (2010).

(2)特許出願

研究期間累積件数:3件

(PCT 出願 1 件、国内出願 2 件)

【国内出願】

発 明 者:吾郷浩樹、田中伊豆美、辻正治

発明の名称:グラフェン薄膜とその製造方法

出 願 人: JST

出 願 日: 2009/8/31

(3)その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

【受賞】

1. 吾郷浩樹, 平成 20 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞, 「カーボンナノチューブの成長と機能化の研究」, 2008/4/15
2. 吾郷浩樹, ナノ学会第 6 回大会 産業タイムズ社賞, 「表面原子配列によってプログラムされた単層カーボンナノチューブの配向成長/炭素同位体を用いた単層カーボンナノチューブの水平配向成長の可視化」, 2008/5/9
3. 吾郷浩樹, 平成 22 年度九州大学 研究・産学連携活動表彰, 2010/11/1

【解説記事】

1. 吉原直記, 吾郷浩樹, 辻正治
「ナノチューブの成長メカニズム –水の添加効果とその化学–」
ナノ学会会報(ナノ学会誌), **7**, 39–44 (2008).
2. 石神直樹, 吾郷浩樹, 今本健太, 辻正治, K. ヤクボヴスキー, 南信次
「サファイア上で水平配向した単層カーボンナノチューブの結晶面に依存した成長」
ナノ学会会報(ナノ学会誌), **7**, 45–51 (2008).
3. 吾郷浩樹
「カーボンナノチューブの水平配向成長 集積化への新しい可能性 シリコン LSI との融合も期待」
Semiconductor FPD World(プレスジャーナル社), **12**, 98–100 (2008).
4. 吾郷浩樹
「単層カーボンナノチューブの水平配向成長とデバイス応用」
化学工業(化学工業社), **60**, 348–353 (2009).

【依頼(招待)講演】

1. 吾郷浩樹, 「水平配向カーボンナノチューブの新展開」, 2008 年秋季 第 69 回応用物理学学会学術講演会シンポジウム「カーボンナノチューブ エレクトロニクス」(愛知), 2008/9/2
2. Hiroki Ago, "Synthesis and Characterization of Horizontally-Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes", IUMRS-ICA 2008 (The IUMRS International Conference in Asia 2008) (Nagoya) , 2008/12/11
3. Hiroki Ago, "Growth Mechanism, Characterization, and Structure Control of Aligned Carbon Nanotubes", CNTNE2009 (International Symposium on Carbon Nanotube Nanoelectronics 2008) (Sendai) , 2009/6/11
4. Hiroki Ago, "Controlled synthesis and application of horizontally-aligned carbon nanotubes", Carbon Materials for Energy Devices and Environmental Protections (CSE2009) (China), 2009/8/31
5. 吾郷浩樹, 「単層グラフェンのエピタキシャル CVD 成長」, 2011 年春季第 58 回 応用物理学関係連合講演会 シンポジウム「グラフェンエピタキシーの現状と将来展望」(神奈川), 2011/3/25

【学会発表】

国際23件、国内25件