

## 第2回 8月25日(火)

# ナノテクノロジーの功罪

講師：大学院地球環境科学研究所・教授・古月文志

ナノテクノロジーとは、原子や分子等のようなオンゲストロームスケール ( $10^{-10}$ メートル) の粒子を、「材料」として発現するための最小限のサイズ、通常、ナノメートル ( $10^{-9}$ メートル) までに集合させたり配列させたりする技術の総称です。ナノテクノロジーを駆使することにより、新しい性質を持つ材料や優れた機能を持つデバイス等を作り出すことができます。実際、ナノテクノロジーは、既に、材料、環境、エネルギー、情報、バイオ、医療等、数多くの分野に進歩と利益をもたらしています。

カーボンナノチューブ (Carbon nanotubes, CNTs) は、ナノテクノロジーの誕生と発展に対して、最も密に関連した特別な「ナノ素材」です。ナノ素材は、「物質の一次粒子の直径が 100 ナノメートル以下である」と定義されています。CNTs は、単層カーボンナノチューブ (single-walled carbon nanotubes, SWCNTs) および多層カーボンナノチューブ (multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) に分類されています。飯島澄男博士により、1991年に MWCNTs、1993年に SWCNTs が、それぞれ、発見されました。SWCNTs も、MWCNTs も、炭素原子だけにより構成されています。炭素原子同士は、黒鉛 (graphite、鉛筆の芯などに使われている) を構成する一次粒子であるグラフェン (graphene) と、まったく同じく、 $sp^2$  結合の方式で連結し、六角形のパターン(ハチの巣のような構造)を形成します。但し、平面であるグラフェンと対照的に、CNTs は、繋ぎ目のない「筒」の形をしています。SWCNTs は一枚のグラフェンの筒、MWCNTs は2枚以上の同心グラフェンの筒を有しています(図1)。

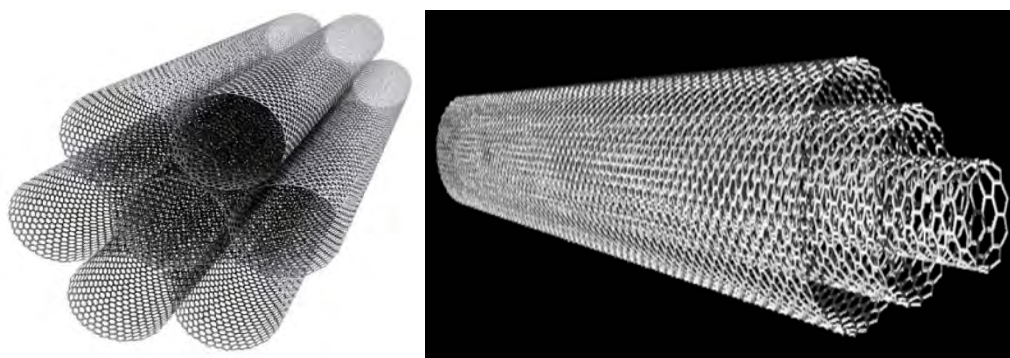


図1 単層カーボンナノチューブ(左図)および多層カーボンナノチューブ(右図)の模式図。

CNTs の直径は、SWCNTs が～2 ナノメートル、MWCNTs が～80 ナノメートル、一方、長さは、両方とも、最長の場合、数センチメートルにも及びます。長さとの直径の比は「アスペクト比」と呼びます。CNTs は、現段階では、～ $10^7$  オーダーのアスペクト比を有する唯一の「人工素材」です。大きなアスペクト比を有する CNTs は、「理想の一次元ワイヤー」として振る舞い、材料の量子力学レベルの革新をもたらすことが期待されています。

CNTs は、重量(真の密度、 $1300\sim 1400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )が鋼鉄(真の密度、 $7874\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )の6分の1程度しかありませんが、引っ張り強度が鋼鉄より100倍も強く、今まで作られたすべての合成繊維の中で最大の引っ張り強度を持っています。長いCNTsを創る技術がもし開発されたら、他の星と地球との間を連結する「宇宙エレベーター」を作り出すこともできます「米国 Rice 大学 Smalley 教授のご提案。同氏はフラーレンの発見の功績で1996年度のノーベル化学賞を授与された」。

CNTs は、その軽さと強さという特徴に加え、炭素原子の並べ方の違いにより、金属性又は半導体性を持つ、まったく性質の異なる素材となります。金属性 CNTs は、銅より1000倍の電流を流せるので、送電の高効率化や電気ケーブル(電線など)の脱メタル化および軽量化の実現を大きく前進させることができます。一方、半導体性 CNTs は、エレクトロニクスおよびコンピュータ産業において、既に「革命」を引き起こし始めています。

CNTs は、太さがナノメートルですので、CNTs 同士を連結することにより、目に見えない導電性ネットワーク、いわゆる、透明導電膜を、ガラスや透明フィルムなどの表面又は内部に作り出すことができます。ITO(インジウムスズ酸化物、現在、透明導電膜を作るための素材)代替を可能にする主役として、CNTs の応用が広がっていく一方です。実際、CNTs に秘められている用途は更に増える性があります。まさに、「産業革命を引き起こす夢のナノ素材」です。

日本は、ナノテクノロジーの推進に対して極めて積極的な国です。日本科学技術政策協議会によれば、2005年、810億円のナノテクノロジーのための予算を投じて、世界で第2位のナノテクノロジー開発国となっています。米国は、ナノテクノロジーの推進に関して日本以上に積極的に行っている国です。2000年、米国は「ナノテクノロジー国家戦略宣言」を行い、材料および製品の「精密化」および「軽量化」のナノテクノロジー/ナノ素材による実現と次世代産業基盤の整備を、国家レベルで走り出しました。因みに、数多くのナノ素材/ナノテクノロジーの中、CNTs が最も重要視されています。Rice University にある Smalley Institute for Science and Technology は、米国のナノテクノロジーの研究開発を牽引する、いわゆる、「内燃機関」となっています。

しかし、CNTs には「凝集問題」と呼ばれている固有の問題があります。この「凝集問題」は、CNTs の各種用途への展開を妨げる最大な障害となっています。CNTs の凝集は、その表面の原子が配位的に不飽和となっているため、隣接同士の CNTs に配位して、ファン・デル・ワールス力による安定化エネルギーを獲得することによって起こる、ナノ素材に共通する現象です。この現象は CNTs を構成する全原子に比べて、表面原子の数が多ければ多いほど深刻となります。SWCNTs は、すべての原子は表面に存在するので、凝集問題は最も深刻となります。MWCNTs の場合でも、数ミリメートルの集合体(2次粒子)までに凝集するケースが多いですが(図2)、SWCNTs の場合と比べ、凝集傾向がさほど強くありません。

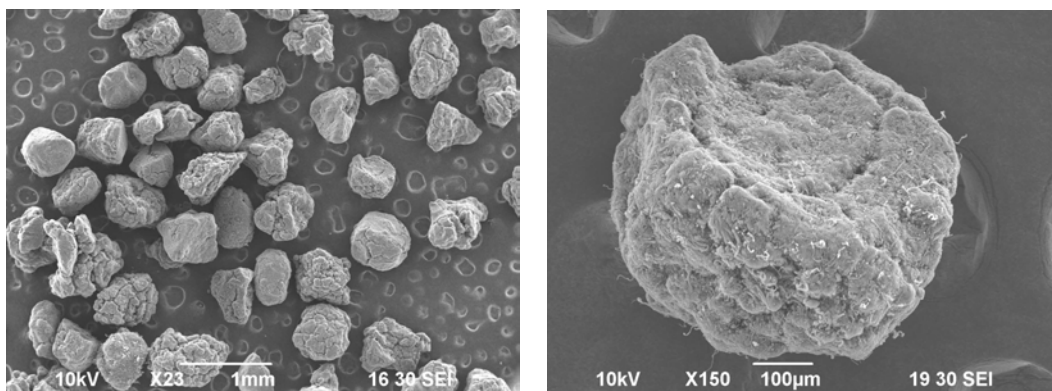


図2 いわゆる「as-growth」のMWCNTsの電子顕微鏡写真、カーボンナノチューブ同士がファン・デル・ワールス力でしっかり固まって、～ミリメートルサイズの凝集体を形成している様子がわかる。

当研究室は、CNTs の凝集体、(以下、CNTs 塊と略称する)を短時間且つ大量に、1本1本までにはぐす技術、所謂、「CNTs の孤立分散」技術を開発しました。この技術は、i) 濡れ処理、ii) 分散処理、および iii) 安定化処理を基本とする複合型のプロセスです。両性イオンミセルを「濡れ剤/分散剤」として用いることは、本技術の特徴となっています。図3は、両性イオンミセルを形成する代表的な界面活性物質、CHAPS と CHAPS の分子構造を示します。

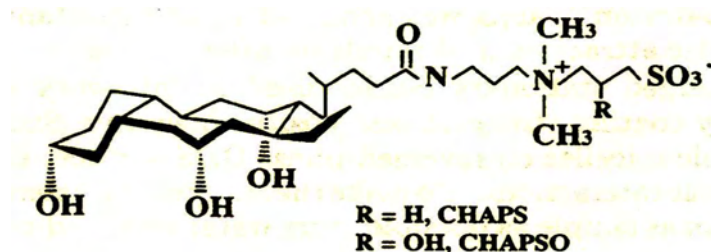


図3 CHAPS と CHAPSO の分子構造

CHAPS と CHAPSO はプラスの電荷とマイナスの電荷部位を同時に持つ、いわゆる両性イオン界面活性物質です。両性イオン界面活性物質は他の種類の界面活性物質（すなわち、陽イオン性界面活性物質、陰イオン性界面活性物質および中性界面活性物質）と比べ、優れた「濡れ性」を持っています。そのため、「CNTs 塊」の「芯」までに浸透することができます。CHAPS と CHAPSO は内部から「CNTs 塊」をほぐす力があります。CHAPS と CHAPSO は、「CNTs 塊」の内部に浸透した後、カーボンナノチューブの表面で自己組織化し、自己組織単分子膜を形成します。この自己組織単分子膜は、互いに、双極子/双極子相互作用に基づき結合する傾向があります。このような双極子/双極子相互作用は、内在的な力となって、「CNTs 塊」を内部から解体することに対して大きく寄与することになります。当研究室が開発した「CNTs 塊」を1本1本のカーボンナノチューブまでに分散する技術(特許第3855007号)は、共同研究企業により量産スケールまでにプロセス化され、CNTs の産業応用のための機能性材料の作りのために貢献しています。

当研究室は、CNTs の安全性評価に関する研究も積極的に取り込んでいます。ナノ素材の量産化およびその関連した機能性材料の商品化が急速に進んでいます。ナノ素材、ナノテクノロジーは、他の化学素材、他のテクノロジーの場合と同様に、ヒトの健康や生態環境に対して、大きなリスクをもたらす可能性があり得ます。CNTs の場合では、これまでのげっ歯類を用いた実験では、炎症、上皮肉芽腫、繊維症、肺内の生化学的/毒性学的変化などを誘発する可能性を示唆する一連のデータが得られ、報告されています。CNTs によるこれらの症状の誘発は、「アスベスト」の場合と類似した部分が観察された報告がありましたので、ナノ素材の安全性に対する関心が一段と高くなってきました。CNTs には、製造過程が特殊のため、触媒として使われた金属、通常、ニッケル、鉄、コバルト、モリブデン、イットリウム、又はこれらの複合体が含まれています。いわゆる「CNTs の毒性」は、これらの残留金属がどれほど寄与しているかについては、様々な論説が発表されています。いずれにしても、“as-growth CNTs” および CNTs を用いた製品由来の CNTs は、ヒトの健康や生態環境に有害な影響を及ぼす可能性があることが否定することができません。作業環境や使用条件など、CNTs にかかわるすべての過程を、厳重管理することにより、ナノ素材/ナノテクノロジーのアドバンテージを最大限に発揮させることができる一方、ナノ素材/ナノテクノロジーのリスクを最大限に回避することもできます。