

日本複合材料学会会誌原稿

2001.8.23.

カーボンナノチューブの弾性的性質

電気通信大学・電子工学科 齋藤 理一郎

Elastic Properties of Carbon Nanotubes

R. Saito, Univ. of Electro-Communications

和文要旨

カーボンナノチューブの基礎、生成方法，材料としての性質を概観し、ナノチューブの弾性材料としての可能性を議論する。また話題となっている多岐にわたる応用についても紹介する。多くの分野の人が興味をもって，新たにナノチューブ研究に参加されることを期待している。

英文要旨

Basic concept, synthesis and solid properties of carbon nanotubes are overviewed. We introduce many possible applications especially for new elastic materials. Many reseachers are very welcome to join the nanotube field from different new fields.

1 ナノテクノロジーで使える材料と道具

最近ナノテクノロジーという言葉をよくの機会に耳にする。バイオ、環境、IT と並ぶ、わが国の四つの『重点科学政策』のひとつになっているナノテクノロジーとは、マイクロメートルから一歩進んで、ナノメートル nm (10 億分の 1m) の大きさで新技術を展開することである。単に大きさを 1000 分の 1 にすることではあるが、ムーアの法則 (素子の密度が 4 年毎に 2 倍になっていく法則) のようにスケールを変えるだけで済むわけではない。一般に 1km と 1m, 1m と 1mm, 1mm と 1 μ m と 1000 倍違う世界では、全く異なる力学が存在し、扱う道具の形状も大きく異なる。従って nm の世界も従来の概念が通じない新奇な世界である。新奇な世界だからこそ何を試しても期待以上の驚くべき結果が得られる。まずは nm で通用する材料と道具が必要になろう。本稿はナノテクノロジーから語ることにする。本題に入る前の駄文に少し辛抱していただければ幸である。

1nm は 10⁻⁹ m であり、原子の大きさである 1 \AA の 10 倍である。1nm の大きさの物質は、原子の数が 10 個から 11 個に変化したとき、物質の性質が同じである保証はない。例えば、直鎖炭素分子でメタン、エタン、プロパンと炭素原子数が 1 個ずつ変わるだけで、その化学的な性質は大きく変化する。従って nm の大きさで特定の機能

を設計していくには、物質の立体構造を明確に決まっている必要がある。『原子の並び方がものいう世界』なのである。これが $1\ \mu\text{m}$ より大きな世界であれば、 $1.1\ \mu\text{m}$ であろうと、 $1.2\ \mu\text{m}$ であろうと、シリコンはシリコンであり材料としての性質に変化がない。原子の大きさが無視できる世界では連続体の近似が有効である。逆に連続体の近似の使えない世界では、離散化された物理量がものをいう。物理量が 1 個 2 個と数えられる量子の世界である。

シリコン半導体技術の最先端でも、一原子層を積み上げて新しい物質を作る、いわゆるアトミック・レイヤー・エピタキシ (原子層成長) が可能になってきた。その意味で原子を並べて人工的に新しい物質を作ることは『手慣れた技術』であり、ひとつのナノテクといえる。しかし線状の物資 (ワイヤー) で原子の並び方が明確に決まるものは多くない。またそういう人工的構造は非定常状態であり、一般に不安定である。構造が不安定であることから性質が時々刻々変化しては、集積回路の中にナノ材料として組み込むことはできない。『構造が明確に定義でき、しかもその構造が安定な物質』が、『ナノテクノロジーの材料』として必須な条件である。これから話すナノチューブは、そういう性質をもっている。

nm を扱う道具は、 nm 以下の精度で動作しなければならない。しかし nm の下には、原子を 1 個 1 個数える

の世界だから有効数字は多くなくて良い。幸にしてピエゾ(圧電)素子を電氣的に扱おうと、の精度も測れるようである。問題は、測る道具の大きさ自体を小さくできないことである。はさみでナノチューブを切ることはできない。しかし世の中には、ショベルカーで生卵を割ることができるような達人がいるそうなので、当面はマイクロメータで培った技術をもちいて何とか nm を克服していくことであろう。ただし光を使った細工(リソグラフィー)は、nm が光の波長よりはるかに短いので使えない。『電子、原子のもつ波をつかう』ことが必要がある。複合材料学会の皆様は、機械的な特性が専門の方が多いと思う。例えば 100nm の大きさを 1nm 動かすことができる道具を作るための技術的問題などを議論いただけることと思われる。可能であるならば、ナノチューブを手足とするような『ナノロボット』をつくることができる。だいぶ前置きが長くなったが、ナノ材料として注目されているカーボンナノチューブの紹介をしたい。

2 ナノチューブの基礎

1991年に飯島(NEC)はアーク放電の陰極堆積物の中に、黒鉛(グラファイト)面が同心円筒の形状をなす多層ナノチューブを高分解能透過電子顕微鏡(TEM)で見いだした。アーク放電とは溶接等で用いられる、まばゆい光を発す

る直流の電流放電であり、簡単に高温 (2000C 以上) を得ることができる。飯島が用いた試料を作成した安藤 (名城大) の実験でも市販の溶接用の電源 (20V, 120A) を使い、電極となる炭素棒を 500Torr のアルゴン中で蒸発させて、急速 (msec - sec) に冷やすことによって準安定な黒鉛状材料を得た。煤として得られる中には C₆₀ などのフラーレンが、またかえりみられることのなかった陰極にはナノチューブが存在したのである。同心円筒状の黒鉛状物質としては、気相合成炭素繊維 (vapor grown carbon fiber, VGCF) が遠藤 (信州大) らによって作られていたが、飯島らの見たナノチューブは直径が約 2nm、長さが約 1 μ m 程度の大きさであり、肉眼でも見える VGCF に比べると著しく小さい。ただし VGCF の中にも『ひげとして』ナノチューブの大きさもあったようだ。重要な発見とは、存在の有無よりも存在の重大な価値を見いだすことに他ならない。

1991 年に著者の他多くの理論グループは、ナノチューブの立体構造を定義し、電子状態を計算をすることによってその驚くべき性質を明らかにした。飯島の発見を待たずに、ナノチューブの立体構造に関する論文を発表したのは、ドレッセルハウス教授夫妻 (MIT) である。著者は、その年の 10 月に MIT に在外研究で渡米し、運良くこの研究に着手した。それから 10 年間驚きの連続と加速度的に活発になる研究を嬉々として続けている。初期の理論

的な研究はナノチューブの重要な性質を予言した。しかしそれが実際の実験事実として確認されるのは、7年待たなければならなかった。応用研究がはじまり本当におもしろくなってきたのは、ここ2,3年というところである。

黒鉛(グラファイト)は層状物質であり、一層の原子面は六方格子(六角形が並んだ格子、亀甲模様)をしている。一つの炭素原子からは平面上に3本の手が互いに120度の結合角をもって伸びている。六方格子上では、Y字型に結合の手が伸びる原子と、Yの字を逆さまにしたように結合の手が伸びる原子が交互に並んで六方格子を作る。最近接の炭素原子間距離は、1.42 Åである。この六方格子模様の透明の紙を頭の中で丸めて欲しい。模様を無視すれば、紙は縦でも横でも斜めでも、どんな方向にでも丸めることができる。では丸めたとき亀甲模様が重なるように巻けるのは、どんな場合であろうか?

六角形の辺に対して縦や横に巻くと模様が重なるのは自明であろう。一般的な答えは、どんな方向にでも丸めて重ねることができるというものである。つまり円筒軸に対する六角形の向きは自由に変えることができる。これは六方格子の性質ではなく、任意の2次元の格子で可能な性質である。その向きを変えたとしても、弾性的な差異はほとんどないこともわかっている。このことを理解するために、逆につなぎ目のない亀甲模様の円筒面を

展開することを考えてみよう。円筒面状に一つの原子 O を定め、 O を通り円筒軸に平行に切目を入れて展開する。 O の原子は切目にあるので広げた紙の両端に現れる。この両端に現れた 2 つの点を O と A とするとベクトル OA が円筒の『赤道』になる。一方切目となる両端の線は、赤道に垂直な 2 本の平行線 (直線) になる。『2 つの格子点を通る平行線と六方格子の交わる線で切った』ことになる。

このことを頭にいれて次に展開図から任意の円筒面をつくってみよう (図 1)。六方格子上で任意の等価な (Y の字) 2 つの原子 O と A を選び、直線で結びそれを赤道とする。赤道に垂直に O と A を通るような平行線 (OB, AB') を切目とすると、2 つの平行線と六方格子は等価な点で交わるので、そこでハサミをいれて丸めたときに六角形の形を変えずにつなげることができる。言葉では良く解らない場合には 図 1 をコピーして実際に切って丸めていただくと納得できる。ナノチューブは、ベクトル OA の種類だけ (つまり無数の) 立体構造が可能である。

2 次元のベクトル OA は、2 つの成分を指定することで一意に決まる。六方格子の基本格子ベクトルの a_1, a_2 の線形結合で表すと、 $OA = na_1 + ma_2$ (n, m) と二つの整数で表すことができる。チューブの直径は、 OA の大きさを a で割って得られる。例えば (10,10) ナノチューブの直径は約 1.4nm である。また螺旋角 θ も、 $\tan \theta =$

$3m/(2n+m)$ と n, m の関数として定義する。六方格子は 60 度の回転に関して対称であるので、 m を $-n$ から n の整数に限って話をしよう。

いろいろな (n, m) に対して立体構造が決まるが、そのうちナノチューブの軸に対して鏡映の対称性を持つ場合が 2 種類ある。一つは、 $m=n$ の場合で、円筒面の切口の形状からアームチェアナノチューブと呼ぶ (図 2(a))。もう一つの場合には $m=0$ の場合でジグザグナノチューブ (図 2(b)) と呼ぶ。それ以外の場合には、立体構造は本質的に螺旋でありカイラルナノチューブ (図 2(c)) と呼ぶ。

実際の実験では、ナノチューブの (n, m) を決めて作ることはできないので、試料にはいろんな (n, m) の値を持ったナノチューブが混在している。1 本のナノチューブを取り出せば、 (n, m) を測ることができる。走査トンネル顕微鏡 (STM/STS) や電子線回折、さらに最近では共鳴ラマン効果を用いて (n, m) を決定することが可能になっている。この詳細は基本文献を参照いただきたい。

3 ナノチューブの電気的性質

著者らが驚いたのは、この (n, m) で指定されたナノチューブは金属にも半導体にもなることであった。この理由は説明が長くなるので省略するが結果は簡単である。 $(n-m)$ が 3 の倍数の場合には金属、それ以外の場合には半導体

になる。例えば (9,0) は金属であるが、(9,1) や (10,0) は半導体である。このように1周上の炭素原子の数が1個かわると、金属が半導体になってしまうのである。これも『ナノの世界』の特徴といえる。現在このような性質をもったナノチューブはカーボンナノチューブしかない。さらに半導体のナノチューブのエネルギーギャップの大きさは、半径の逆数に比例して連続的に変えることができる。従来の半導体材料で、エネルギーギャップを変えるのは至難の技であった。ナノチューブの世界では、(n,m) が異なればすべてエネルギーギャップの値を 1eV から 0eV まで自由に変えることができる。赤外線領域に対応するので、太陽電池への応用が考えられる。

炭素だけで金属と半導体が両方作れるのは、ナノテクにとってこんなにありがたいことはない。『木に竹をつく』という言葉があるように、物質の界面ほど性質を複雑にするものはない。界面の構造によらない性質であることが望ましい。『原子の並び方がものいう世界』なので、できれば同じ原子で金属半導体(ショットキー)接合が望まれる。2000年にヤオ(デルフト工科大)らはこういうナノチューブ接合の部分を探し出して、ダイオードの性質(電流が一方通行に流れる整流作用)を見いだした。一方2001年にコリンズ(IBM)らは、空気中で金属と半導体の混在する試料に電流を流すと、金属ナノチューブにだけ電流が流れるので金属ナノチューブだけ熱くなり(ジュー

ル熱) 燃えることを見いだした。この方法を利用して半導体だけ選択的に残し、半導体デバイス(電界効果トランジスター)を作ってみせた。いわれてみれば簡単なアイデアであるが、nmの世界でできないと思われた金属と半導体ナノチューブを簡単に選別したので『なるほど!』と筆者をうならせた。『ナノの世界は力づくというよりアイデア勝負』である。現在はシリコンでのマスクパターンに代る集積回路の作り方が模索中である。何か良いアイデアはないだろうか?

4 ナノチューブの弾性的性質

ナノチューブの研究が進むにつれ、多くの試料が必要になってきた。上記で説明したアーク法以外にも、炭素棒にYAGレーザを照射して蒸発させる、レーザアブレーションを用いて効率よくSWNTを合成する方法や、炭化水素分子を触媒金属とともに気相で熱分解して得る化学的気相合成(CVD)法などが知られる。湯村(物質研)らは、CVD法を用いて1日に2.4Kg程度のナノチューブを合成したと報告している。工業的に大量合成することができれば、ナノチューブの利用価値は一気にシリコンに匹敵するところになると思われる。そのもっとも有力な応用が機械的な性質である。

グラファイトの面は sp^2 結合と呼ばれ、面を作るその

結合はダイヤモンド骨格の sp^3 結合よりも強く、化学結合で最強の結合といえる。この面で作ったナノチューブの引っ張り強度は非常に強い。ヤング率は 1060GPa また引っ張り強度は 50GPa 以上と評価されている。鋼鉄の数倍の大きさを持つ。一方その比重は鋼鉄の 1/10 以下であるから、同じ重さでは 100 倍の強度をもつといえる。しかも化学的に非常に安定で、特に酸やアルカリと反応しないので対腐食性という点で金属より格段に優れている。また酸素がなければ、摂氏 1200 度ぐらいでも十分強度が保てるので、高温での材料として他に変えがたい性質をもつ。ここまでの性質は、カーボンファイバーでも同じであり、すでにテニスラケットなどの反発強度を強めるために樹脂やコンクリートの中に入れられ実用化されている。ナノチューブの特徴は、単層であることであり特にチューブの曲げに対して、非常にしなやかであることである。10 nm 程度に曲げない限り折れ曲がることはない。折れ曲がってもゴムホースのように復元することが、電子顕微鏡の中で観測されている。従って通常のマクロな世界ではそのようなまげは実現できないので、その引っ張り強度を最大限に利用することができる。樹脂に混ぜる場合でも細いのでより均質にはいる。ミクロにはナノチューブを『かた結び』や『布として織る』ことが実現できればその強度をマクロで見ることができると推定する。

またナノチューブの円筒形の特徴として、弾性に『ねじれ』のモードがあるということである。従って音響モードは通常の3つ(縦波1つ、横波2つ)の他に『第4の波』としてねじれ音響モードが存在する。また黒鉛には面外振動の復元力が小さくこの音速が非常に遅いが、ナノチューブの場合には純粋な面外振動の音響モードは存在しない。従って4つすべての音響モードの音速は sp^2 の結合を反映して、15-20km/s と通常の方法より著しく大きい。これに関連して熱伝導率もダイヤモンドなみに大きいという評価がある。例えばレーザーの光を $1\mu\text{m}$ に絞って 20mW ぐらいの出力をかけると通常の方法は空気中で燃えてしまうのだが、単層ナノチューブだけは燃えない。これは熱伝導率が非常に良いことが原因であると考えられている。現在の段階では、音速や熱伝導率の理論的な予想はあるが実験的に検証はされていない。

このようなナノチューブを、せん断力(はさみ)で切ることはできない。切ることができるためには『原子レベルの鋭さ』が必要であるが現時点ではそういう道具は存在しない。気相成長炭素繊維(VGCF)をはさみで切ることができるが、切った断面を観察すると最も内側のナノチューブだけ切れていないで『ひげ』のように残っている。現在唯一切る道具はSTMの先端に大電流を流して溶かす方法である。瞬間的に非常に大きな電流($10^9\text{A}/\text{cm}^2$)を流す必要がある。シリコンでは $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の電流を

流すと、マイグレーションと呼ばれる原子移動がおこって集積回路の配線が切れる現象があるが、ナノチューブではその 1000 倍の電流を流す必要がある。逆にいえば断面積が小さくても同等の電流を流す素子を作ることが可能である。しかも熱伝導性がよいので、集積回路の熱を逃がす部品として使うことも可能である。

いずれの場合でも、1 本のナノチューブの強度や熱伝導度を正確に測定したという例はない。弾性的な性質を把握するためには、新しい装置の開発が必要であろう。現在中山 (阪府大) らはナノチューブのチップの STM をもちいて、ナノチューブの片端を押ししたり引っ張ったりする実験を行っている。2 つのナノチューブをくっつけるのは、電子線によって可能である。電子線でナノチューブの交差点をなぞると、電子線のあたっているところには、空気中の炭素の不純物 (コンタミ) がつき 2 つのナノチューブをくっつけることができる。しかしその結合は、原子の並び方までわかっているような並び方ではない。このようなナノチューブの機械的強度の実験は依然として『シヨベルカーで卵を割る』ようなレベルといえる。もっとスマートに原子レベルで切ったりつなげたりできないものであろうか？

5 ナノチューブの特徴を生かした材料応用

黒鉛はリチウムイオン電池の負極材料として広く実用化されている。通常の電池は正イオンになる金属を負極材料として使うのが一般的であるが、リチウムの場合には化学反応性に富むので、充電により負極に表面積の大きな形で金属が再付着するのは危険である。その代わりにアルカリ金属を黒鉛の層間に吸着し電荷移動する性質を利用して、安定した2次電池を開発した。現在はパソコンの高性能電池などに広く利用されている。従って市販のリチウムイオン電池は、負極に黒鉛などの炭素材料を用いる。このときの炭素材料の条件は、(1) 表面積が大きいこと、(2) リチウムイオンの移動が容易であること、(3) 炭素材料が『固く』何回もの充放電でも電極がこわれないこと、(4) 可逆な部分が大きいことなどが必要である。ナノチューブは、表面積の観点でいえばこれ以上の物質は存在しない。しかし多くの実験では、黒鉛の理論値 (362 mAh/g) より3～4倍大きな値を示すのであるが、その多くの部分は非可逆で不定形炭素材料よりも著しく性能の良いものはまだ得られていない。実際ナノチューブをすりつぶす方が性能がよいということで、どうやってすりつぶすかが議論の対象にさえなっている。材料として一定の性能を示したものではないので、克服すべき課題は多い。

また表面積を利用した吸着効果を利用する応用は水素吸蔵材料として早くから注目を集めている。ナノチューブの端には、『キャップ(帽子)』と呼ばれるのフラーレンの半球がついているが、15% 過酸化水素水で穏やかに酸化することで選択的に取り除くことができる。開口部から、気体分子に限らず液体や固体も入ることが報告されている。『ウナギの寝床』である。ナノチューブの円筒面は単原子層であるが、6 員環の大きさは原子が通過できるほど大きくはない。従って水素を含むすべての原子を円筒面内に閉じ込めることができる。円筒面と気体分子との間には弱い物理的引力が存在するので、水素分子などを液体に匹敵する濃度で蓄えることができるというのが、水素吸蔵としての応用での『売り』である。自動車の燃料電池の材料として、水素を安全に貯蔵する材料は重要である。しかも自動車に積み込むためには、『軽い』ことが必要である。母材となる炭素は軽い元素であり、現在各国の研究のデータを見ると、全体の重量の5% ぐらいは貯蔵(100 気圧) できるようである。重量の5% とは炭素 12 グラムで、水素 0.6 グラムであるから標準状態で 8 リットルぐらいの水素を閉じ込めることができる。もとより、表面積の多い炭素材料は活性炭として吸着材料として広く応用されてきた。活性炭は、水素や酸素によって、炭素材料を『ボロボロ』にした物質であるが、ナノチューブは『すべてが表面』なので、究極の活性炭という

ことができる。

6 ナノチューブで作るボルトとナット

最近では、開口部から昇華した C_{60} などのフラレンを入れることも成功している (図 3)。さやえんどう豆 (ピーポッド、peapod) と呼ばれるこの構造は、1 次元のナノチューブと 0 次元のフラレンの合成した新しい炭素だけから構造であり、それぞれの弾性的な性質の長所が生かされることが期待される。さらにピーポッドに電子線や紫外線をあてると、 C_{60} どうしが重合し、『無限にならんだお団子』を作ることができる。まだ重合した C_{60} 鎖を取り出した例は無いが、ナノチューブを『1 次元の合成反応容器』として使うことを示している。

坂東 (名城大) らは、ピーポッド 1200 度ぐらいで 48 時間ぐらい加熱をすると、内側の C_{60} だけがこわれて、2 層のナノチューブを作ることを見いだした。これは単層ナノチューブから、2 層ナノチューブを作る新しい画期的な方法ということができる。例えば、内側に金属ナノチューブ、外側に半導体チューブになるような 2 層ナノチューブを作れば『被覆電線』になるし、3 層ナノチューブを M-S-M のように作れば、コンデンサー (メモリー) を作ることができる。このように炭素だけで回路に必要な素子を作ることができる。元島 (岐阜大) らはコイル状に成長

するナノチューブを作成している。ただただ驚くばかりである。

著者らはいろいろな螺旋度のナノチューブを組み合わせて、2層のナノチューブを理論的に作り、内側と外側の間の力を計算した。その多くの場合には、内側と外側のナノチューブで共通の周期性を持たない非整合の構造であり、内側のナノチューブをピストンのように滑らかに動かすことができる。『シリンダーとピストン』や『軸受け、ベアリング』としての滑らかな面の利用が考えられる。ところが特殊な (n,m) のナノチューブの組み合わせをとると非整合であるにも関わらず、ボルトとナットの組み合わせのように、滑らかに動かすことができる方向が螺旋状になるものや、ポテンシャルの谷が並んでラチェットのように離散的に動かすことができるものが存在する(図3参照)。このような動きを伴う形でいろいろなポテンシャルが存在することは大変興味があり、実にいろいろな応用が考えられる。まずは実験で検証して次に機械的な応用を目指したいところである。ナノ構造で可動する部分ができることは大変重要である。さらにこれを電気化学的に『人工筋肉』のように動かすことができることをポーマン(アライドケミカル)らが示し一気にその分野が大きな産業に発展する可能性がある。『一寸法師』のように、口から入って血管中で作業をするようなロボットができることも原理的にまったく不可能ではない。このような

分野の研究への大きな展開はまだないが、水面下で多くの研究者が動き始めていると申し上げたい。

7 多岐にわたる応用と展望

まだこの他にも先が細いことを利用した、走査プローブ顕微鏡のチップへの応用や壁掛けテレビとしてのフィールドエミッタへの応用などが、従来の同等品の性能を遥かに凌駕するものとして報告され、企業レベルで組織的に応用研究が進んでいる。研究の焦点は、ナノチューブの大量生産と価格だけともいわれ急速に実現に向けて動いている。

このように、従来物理のモデルで考えられていたような系が、実現可能なレベルでしかも『何でも作ることができる』という印象がナノチューブの研究者の間で定着してきた。しかも得られる結果が、『常に驚異的』ということが、多くの人をして『巨像の断面』を熱く語らしめている。しかし全体像を語るのは、すでに難しくなってきた。ナノチューブはそれだけで一つの科学になり始めている。カーボンナノチューブ以外にもBNのナノチューブもあり、そのほかの層状物質のナノチューブファミリーも続々と報告があり、nmの領域では構造の決定されている。

このようなナノチューブ研究は、市販されているナノ

チューブを購入すれば、今日からでも研究を開始できる。また小さすぎて見えないところを、『見てきたように説明する』理論家も著者を含めて充実してきた。また、解説書や本などの蓄積もこの10年でだいぶ増えた。従って『右も左もわからないことはない』と思う。読者の方も是非ご自身の視点でナノチューブの研究をしてみただければ、新たな挑戦が始まることであろう。もし研究に取っ掛かるのなら、まずはナノの道具立てのいらない、マクロな材料としてナノチューブを試されるのが良いと思われる。これまでも多くの大学、会社のかたから相談をうけお話をする機会があった。ご提案の中に『ナノチューブ1本』を扱うような研究はあまりうまくいっていないのが現実である。少なくとも時間がかかる。サンプルをお渡ししても、最初の苦情が『ナノチューブが見えない』ことである。透過電子顕微鏡でも単層ナノチューブ一本を観測できる人は日本でもそう多くはないと思う。まして電子顕微鏡下でマニピュレートすることができる人は、世界でもまだ限られている。そういう精密工具を作ることなどは、日本のお家芸であろうからナノチューブの研究の発展と共に盛んになることを期待している。

謝辞: 本稿に関連するナノチューブの研究の一部は、文部省科学研究費の援助による成果である。

[文献] 以下に代表的な本と関連する解説を紹介する。ナノチューブの文献数が非常に多いので、正確な文献の

引用は省略した。以下の書籍、特集号や解説の文献、Web等を参考されたい。

- 1) “Physical Properties of Carbon Nanotube”, R. Saito, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, Imperial College Press London (1998). ナノチューブの基礎
- 2) “カーボンナノチューブの基礎” 齋藤 弥八、坂東 俊治 著、コロナ社 (1998). 試料の生成の説明が詳しい
- 3) “Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes”, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. C. Eklund, Academic Press, New York (1995).
- 4) “Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications”, Eds. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. Avouris, Springer-Verlag (2001) 最新の本。
- 5) 最近のナノチューブの特集号として、(a) 『特集: カーボンナノチューブ – 期待される材料開発』、機能材料 5月号, <http://www.cmcbooks.co.jp>. (2001.5), (b) 『カーボンナノチューブ – ナノデバイスへの挑戦』、化学フロンティア 2, 田中一義編、化学同人 (2001.1) 化学関連中心解説特集号。(c) 信学技報, ED2000-274-281, (2001.3), 電気情報通信学会、などがある。
- 6) P.G. コリンズ, P. アボリス, 日経サイエンス 3月号, p.52 (2001). 7) この他に齋藤の解説として, 科学 68, p661 (1998), 真空 Vol. 42, p711 (1999): 季刊フラーレン

Vol.7, p147 (1999), 化学工業 Vol. 50 No. 1, p34 (1999),
機能材料 No.5 p.6 (2001) , 応用物理 (2001) No. 10, 材
料科学 Vol.38 No.6 (2001) などがある。

<http://flex.ee.uec.ac.jp/rsaito> に著者の Home Page .

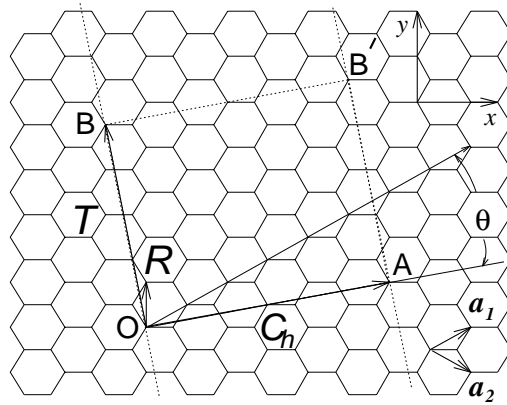


図 1: ナノチューブの構造。O と A、B と B' を結ぶと (4,2) のナノチューブ (本文参照) ができる。

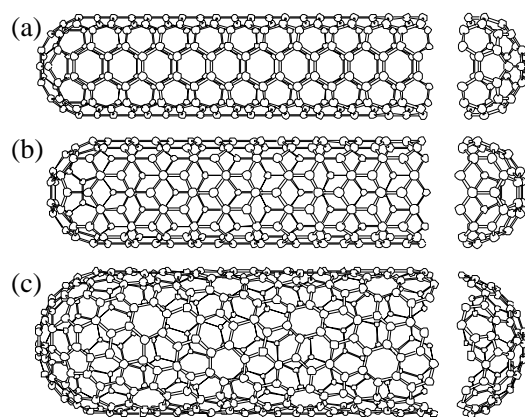
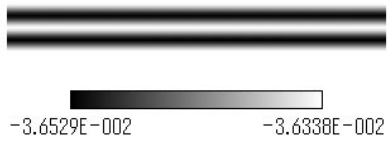
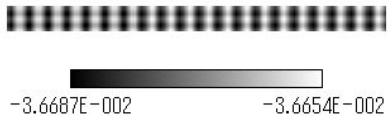


図2 ナノチューブにはさまざまな立体構造がある．立体構造は2つの整数 (n,m) で指定される．図は (a) $(5,5)$ アームチェア型, (b) $(9,0)$ ジグザグ型 and (c) $(10,5)$ カイラル型という名前がついている．(a), (b) は金属、(c) は半導体になる。

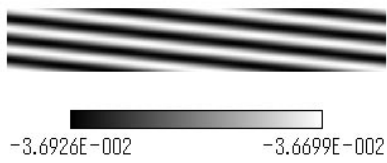
(a) (9,0)-(18,0)



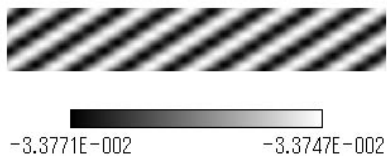
(b) (5,5)-(10,10)



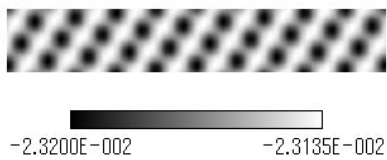
(c) (8,2)-(17,2)



(d) (8,2)-(12,8)



(e) (8,-2)-(14,5)



(f) (9,0)-(15,4)

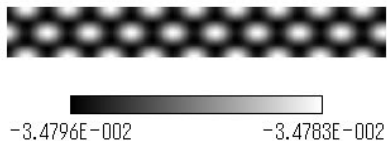


図3. 2層ナノチューブの断熱ポテンシャル。濃度の濃いところが安定な部分。縦方向は軸方向、横方向は赤道方向に外側の層を内側に対してずらしたものである。ポテンシャルの大きさの単位は eV/atom である。(a) 赤道方向にずれる組み合わせ、(b) 軸方向にずれる組み合わせ、(c,d) ボルトとナットのようにずれる組み合わせ。(e) ポテンシャルに極小点がある場合(ラチェット型) (f) ポテンシャルに極大点がある場合(逆ラチェット型)。