

Title	Nanosized electromechanical devices consisting of carbon nanotubes
Author(s)	Senga, Ryosuke
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27531
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

【118】

氏名	せんがりょうすけ 千賀亮典
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 26184 号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科機械工学専攻
学位論文名	Nanosized electromechanical devices consisting of carbon nanotubes (カーボンナノチューブを用いたナノ電子機械デバイス)
論文審査委員	(主査) 教授 中山 喜萬 (副査) 教授 濫谷 陽二 教授 高谷 裕浩

論文内容の要旨

ナノデバイスはマクロスケールでは実現できない機能を発現し得ることから広い分野で注目を集めている。このナノデバイスを構成する材料として、優れた機械特性、ユニークな電気特性などからカーボンナノチューブ(CNT)が注目されている。しかし、CNTを一分子レベルで操作、加工、評価することの困難さから、実験的に性能検証された例は極めて少ない。本研究では、CNTの性質を最大限に活用する三つのデバイス、(1)ナノ高周波数振動子、(2)回転式アクチュエータ、(3)生体分子用計測センサーの構築・実現に向けて、基礎となる現象およびメカニズムの解明と製作に必要な要素技術の研究に取り組んだ。実施内容および成果は以下のとおりである。

ナノ高周波数振動子は、CNT表面のなめらかさを活用したデバイスで、両端が太くなったダンベル型CNTの内部に内包したカプセル状CNTがGHz以上の高周波数で往復運動することが期待される。本研究では、両端を閉じた空間内のカプセル状CNTの往復運動に関して、透過電子顕微鏡(TEM)内でその温度依存性を調べ、カプセル状CNTの往復運動が熱エネルギーによって駆動していること、その速度が極めて速い可能性を見出し、目的とするデバイスが十分実現可能であるとの見通しを得た。さらにTEM内における通電加熱と引張塑性変形によりダンベル型CNTの作製に成功し、デバイス実現に向けて重要なCNTの加工技術を構築した。

回転式アクチュエータは、捻じれを伴った扁平CNTの一端を固定し、これに扁平・円筒状態遷移を導入することにより自由端に回転往復運動を与えるものである。扁平・円筒状態間の可逆遷移は、本研究で見いだしたCNTの新物理現象であり、電流により制御できる。分子動力学シミュレーションにより、状態遷移が熱エネルギーによって誘起されることを明らかにし、また、高出力($\sim 5\text{nN}\cdot\text{nm}$)かつ高速応答($\sim 10\text{GHz}$)の回転式アクチュエータが実現可能であるとの見通しを得た。

CNTを使った生体分子用計測センサーでは、生体一分子レベルの計測を可能にするCNTアームの加工手法を研究した。CNTアームには液中における力計測、振動計測に耐えうる剛直な部分と生体一分子のみを捕捉するための細い先端部分が必要である。これらの要求を満たすため、先鋭化手法、直径の大きいCNTと細いCNTの接合手法、CNTと基板を C_{60} 分子で固定する手法を構築した。これらの技術により作製したCNTアームは、タンパク質間相互作用力計測に使用され、一分子同士の反応を捉えることに成功し、一分子計測におけるCNTアームの優位性を示した。

論文審査の結果の要旨

ナノテクノロジーの重要な点は、微小スケールの構造を制御して新しい機能を創出するところにある。カーボンナノチューブ(CNT)はこれを担う素材として注目されており、その優れた機械特性と特徴的な電気特性から微小サイズの電子機械デバイスを構築する上で魅力的かつ重要な素材である。しかし、CNTを一分子レベルで操作、加工、評価することの困難さから、実験的な研究例は極めて少ない。本研究は、CNTの性質を最大限に活用する三つのデバイスを取り上げ、これらの実現に向けて基礎となる物理現象とその機構を解明するとともにデバイス製作に必要な要素技術の構築に取り組んだものである。主な成果を要約すると以下のとおりである。

- 両端を閉じたCNT空間内に内包したカプセル状CNTが自由空間内を室温で往復運動することは、透過電子顕微鏡(TEM)により観察されているが、その運動の駆動源については未解明であった。試料温度を高くすると運動が激しくなることを明示し、電子線エネルギーや温度勾配ではなく、熱エネルギーが駆動源であることを明らかにした。これにより、すり鉢状がテンシャルをもつ両端が太いダンベル型CNTの内部に内包されたカプセル状CNTがGHz以上の高い周波数で振動し得ること指摘した。さらに、このナノ高周波数振動子の実現に向けて、TEM内において通電加熱し引張塑性変形を施すことによりCNTをダンベル状に加工する技術を構築した。
 - 一定以上の内径の太いCNTは扁平状態にあるが、電流の増減により扁平・円筒状態間を可逆的に遷移することを実験的に見だし、その状態遷移が熱エネルギーによって誘起されることを分子動力学シミュレーションにより明らかにした。また、この現象を利用した回転式アクチュエータを提案した。捻じれを伴った扁平CNTの一端を固定し、これに扁平・円筒状態遷移を導入することにより自由端に回転往復運動を与えるというもので、高出力($\sim 5\text{nN}\cdot\text{nm}$)かつ高速応答($\sim 10\text{GHz}$)が見込めることを示した。
 - 生体一分子レベルの力計測と質量計測を可能にするCNTアームの加工手法を構築した。CNTアームには液中における力計測、振動計測に耐えうる剛直な部分と生体一分子のみを捕捉するための細い先端部分が必要である。これらの要求を満たすため、CNT先端の先鋭化手法、太いCNTと細いCNTの接合手法、CNTと基板を C_{60} 分子により固定する手法を構築した。これらの要素技術を基に作製したCNTアームは、タンパク質間相互作用力計測に使用されて一分子間の反応を捉えることに成功し、一分子計測におけるCNTアームの優位性が確認された。
- 以上のように、本論文では、新しい素材であるCNTが発現する物理現象とその機構を明らかにすると共にCNTの加工要素技術を構築し、微小サイズのCNT電子機械デバイス開発への道を拓いた。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。