

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19054014

研究課題名（和文） カーボンナノチューブのメカニクス

研究課題名（英文） Study on carbon nanotube mechanics

研究代表者

秋田 成司 (AKITA SEIJI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60202529

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノチューブ・フラーレン、電子顕微鏡、ナノマシン、超精密計測、格子欠陥、塑性変形、電気伝導、接合

1. 研究計画の概要

優れた機械的・電気的特性を持つカーボンナノチューブ(CNT)をナノデバイスとして応用するために CNT の基本的機械的特性（ナノメカニクス）や熱伝導特性の解明を目的とする。具体的には以下のような研究を行う。

(1) カーボンナノチューブの機械的エネルギー散逸機構

エネルギー散逸と層間相互作用及び欠陥の関係について、片持ち梁ナノチューブの振動特性から調べる。

(2) 格子振動の伝播

欠陥の有無による格子振動の伝播過程及びフォノンの散乱過程を調べる。

(3) 分子動力学解析

欠陥の有無や層間相互作用について理論的な解析を行い、実験結果の理解を深める。

(4) 塑性変形・接合のダイナミクス

ナノチューブの塑性変形及び接合について、その構造変化過程を詳細に調べる。

(5) ナノチューブの欠陥と電気伝導

塑性変形等でナノチューブにトポロジカル欠陥を導入し、電気伝導に与える影響を調べる。

2. 研究の進捗状況

(1) カーボンナノチューブの機械的エネルギー散逸機構

片持ち梁構造の多層ナノチューブ振動が光学的に検出できることを示し、大気等との

相互作用による損失および機械的なエネルギー散逸が低温で抑圧されることを実験的に証明した。さらに、片持ち梁構造のナノチューブが共振している際の振動スペクトルの温度依存性を計測し、vdW 界面および欠陥の影響について詳細に検討した。また、単層や2層ナノチューブの両持ち構造の梁の振動を温度変化可能でかつ電気的検出系を構築した。

(2) 格子振動の伝搬

通電加熱時の放射光はナノチューブ軸方向に偏光するがスペクトルの角度依存性は無いことを明らかにした。通電加熱時の到達温度の過渡変化について実験的に検討し、理論通り 100ns 以下の高速応答することを実証した。

(3) 分子動力学解析

エネルギー散逸について古典的なポテンシャルを用いた分子動力学計算を行い解析した。温度依存性および欠陥量依存性について検討した結果、層間 vdW 相互作用が大きく寄与しており、ヤング率の温度依存性が実験結果と定性的に良い一致を示した。

(4) 塑性変形・接合のダイナミクス

CNT のオイラー座屈を解消し、曲げ角の大きい塑性変形を導入するプロセスと、曲げ角の小さい塑性曲げ変形が緩和して直線にするプロセス、それぞれに必要な温度の測定に成功した。これらからそれぞれの活性化エネルギーを 5.4 ~ 6.1eV および 5.8eV と見積もれた。CNT 内でのナノカプセル輸送につい

て見出し、更に外部電場によってカプセルが動く現象を見いだした。また、接合について、太いCNT先端に細いCNTを接合形成する条件探索を行った。

(5) ナノチューブの欠陥と電気伝導

塑性曲げ変形による導電性変化を計測した。また、TEM内でナノチューブのオーミック接触形成法を開発した。さらに、ナノチューブ延伸塑性変形について、5-7欠陥伝播によるカイラリティ変化の理論解析から、延伸による捻れ歪みが残るほどに欠陥の伝搬距離は短いことが推察された。これにより金属-半導体-金属接合形成の可能性が示唆された。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している

先に示した通り、ほぼ当初の研究計画通り進捗している。計画に加えてナノチューブの光学的振動観察による評価法の確立や、これを用いたCNTと気体分子との相互作用による損失の解明などを可能とした。また、ナノカプセル輸送など新たな現象を見いだした。

4. 今後の研究の推進方策

(1) カーボンナノチューブの機械的エネルギー散逸機構

細いナノチューブについてエネルギー散逸と層間相互作用の関係を調べ、光照射や酸化等で局所的に欠陥を導入しその影響を調べる。また、理論予測された単層ナノチューブと共鳴光との光誘起の輻射力を計測する。

(2) 格子振動の伝搬

欠陥の量の異なるナノチューブの定常状態の昇華温度について、熱伝導率の変化の観点から調べ、欠陥におけるフォノンの散乱過程を検討する。

(3) 分子動力学解析

分子動力学計算によりエネルギー散逸における欠陥・層間の影響に関して片持ちはりの支持部の影響も含めて検討する。

(4) 塑性変形・接合のダイナミクス

通電加熱による塑性変形および接合について、ナノチューブのカイラリティをパラメータとして、構造変化および反応の活性化エネルギーを調べる。上記プロセスにおける電子線照射の効果も調べる。さらにCNT内カプセル輸送デバイスに適用し、輸送現象におけるカイラリティの効果も調べる。

(5) ナノチューブの欠陥と電気伝導

延伸塑性変形や曲げ変形、接合によって作製した欠陥を含むナノチューブについて、変形による電気的特性への影響を調べる。変形

によって導入された欠陥の量や位置を結晶構造モデルから推測し、実験的に得られた電気的特性の変化を考察する。また、金属-半導体-金属、ナノチューブカプセルをスイッチに適用したデバイスを作製し、その電気特性を調べる。

更に、当初計画に加えて a) 理論予測されている単層ナノチューブと共鳴光との光誘起の輻射力について実験的な検証を行う。b) 新規なナノメカトロニクス素子に展開可能な「ナノカプセル輸送現象」を新規に発見したので、研究項目として追加した。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

1) A. Nagataki, T. Kawai, Y. Miyamoto, O. Suekane, Y. Nakayama, Controlling Atomic Joints between Carbon Nanotubes by Electric Current, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 176808. 査読有

2) S. Fukami, T. Arie, S. Akita, Effect of Gaseous Dissipation of Oscillating Cantilevered Carbon Nanotubes, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 06FG04. 査読有

3) K. Hata, Y. Nakayama, S. Akita, Response of Carbon Nanotube Field Effect Transistors to Vibrating Gate Determined by Scanning Gate Microscopy, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 04C202. 査読有

4) H. Somada, K. Hirahara, S. Akita, Y. Nakayama, A Molecular Linear Motor Consisting of Carbon Nanotubes, NANO LETTERS 9 (2009) 62. 査読有

5) H. Somada, Y. Yoshikawa, A. Nagataki, K. Hirahara, S. Akita, Y. Nakayama, Energy Barrier for Disappearance of Buckling to Form a Plastic Bend in Carbon Nanotubes, Jpn. J. Appl. Phys. Exp. Lett. 46 (2007) L1055. 査読有

[学会発表] (計55件)

[その他]

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe4/index.html>