

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月18日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760187

研究課題名（和文）

カーボンナノコイルの構造特性を活かしたマイクロ/ナノアクチュエータ

研究課題名（英文）

Carbon nanocoil actuators driven at micro-/nano-meters area

研究代表者

平原 佳織 (HIRAHARA KAORI)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40422795

研究成果の概要（和文）：カーボンナノコイル（CNC）の特異なばね状構造や良好な電気伝導性を活かした、ナノメートル/マイクロメートル領域で動作するアクチュエータの開拓を目的とし、電子顕微鏡によるその場観察を主体としてCNC 1本レベルの構造特性評価および静電場における変形挙動観察を行うと共に、基本構造の試作を通してCNCアクチュエータを実現するために必要となる要素技術について検討がなされた。

研究成果の概要（英文）：Aiming to the exploitation of the actuator which operates in a nanometer / micrometer area, electrostatic and mechanical characteristics of individual carbon nanocoils (CNCs) were studied mainly by in-situ measurement in the transmission and scanning electron microscopes. Elemental technologies to realize the CNC-based nanoactuators were examined by constructing some prototypes of basic machinery components inside the electron microscopes and verifying their behaviors under load or electrostatic fields.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：ナノ材料科学、電子顕微鏡学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学 マイクロ材料力学

キーワード：ナノカーボン 電子顕微鏡 アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノコイル（CNC）は、コイルばね状構造を有するナノ炭素繊維である。黒鉛由来の電気伝導性やコイルばね状構造に由来する特異な力学特性を示す。しかしながら、既存のナノ材料にはない性質が予測できるにもかかわらず、その実験による検証については、凝集体もしくは複合材料の電磁波吸

収特性や力学測定以外に、ほとんど進んでいないといえる。CNCを機能材料として応用展開するためには、まず多彩な形状を持つCNC 1本1本の特性と構造との相関を明らかにすることが重要である。

2. 研究の目的

CNCの電磁気学的特性（ソレノイド）と力

学的特性（弾性ばね）の連携による、静電駆動式アクチュエータとしての機能開拓にフォーカスし、

(1) ナノコイル力学挙動の評価

(2) CNC アクチュエータ特性の評価

について、電子顕微鏡その場観察を主体に CNC 1 本レベルでの特性評価を行い、CNC のアクチュエータ素材としての可能性を探索する。

3. 研究の方法

(1) CNC の合成

Fe-Sn 系触媒を用いた化学気相成長法 (CVD 法) により、基板上に垂直配向した CNC を合成した。

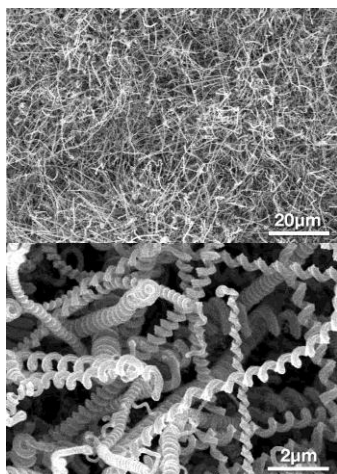


図 1. CVD 合成した CNC.

(2) CNC の評価

合成した CNC は、透過電子顕微鏡 (TEM) もしくは走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて形状観察を行い、1 本 1 本の CNC のサイズや結晶性を評価した。

(3) CNC の特性評価

TEM もしくは SEM に搭載したナノマニピュレータを用いて、1 本 1 本の CNC を観察しながら交流電場を印加することにより強制振動させ、振動特性を調べた。また、CNC を電極間に架橋し、電流耐性を評価した。

(4) CNC をアクチュエータとして機能させるための要素技術の検討

CNC を用いたアクチュエータ機構を提案し、単純化した動作機構を TEM 内で構築した。その試行結果を基に、CNC アクチュエータ動作実現のために必要な要素技術について検討を行った。

4. 研究成果

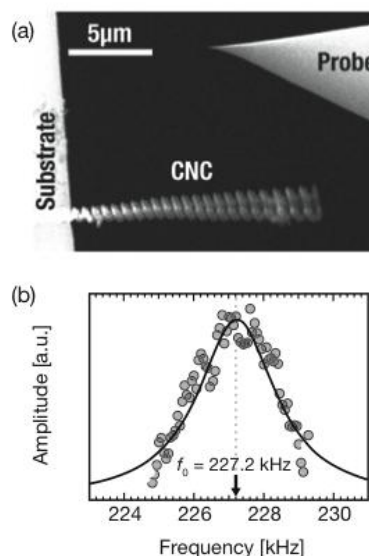


図 2. (a) CNC1 本の共振実験. (b) 得られた Q カーブ.

(1) ナノコイル力学挙動の評価

TEM 内で CNC のそばに電極を配置して交流電場を印加し、交流周波数をスイープさせながら CNC が共振した時の周波数と振幅の関係、すなわち Q カーブを計測した。得られた Q カーブからは、共振周波数と Q 値が見積もられた。その結果、Q 値については、個々の CNC の横弾性係数（剛性率）に依存することが示された。電子回折を用いた構造解析によって CNC の結晶性と剛性率の関係を明らかにし、CNC を形成する炭素層の構造・結晶性が振動時に生じるエネルギー散逸量を強く支配することが示唆された。また、CNC の形状依存性についても調べられ、弾性領域の振動特性の記述は連続体近似が適用できることが確かめられた。CNC の形状は、コイル径、線径、ピッチ、長さなどのパラメータがあり、振動特性には長さが最も大きく影響することが確かめられた。基板上に配向合成された CNC 中にもある程度の形状のばらつきが認められるが、この結果は、ある程度長さの揃った CNC を用いれば、配向シート全体でおおよそ均一の振動特性が得られることを保証する結果である。

(2) CNC アクチュエータ特性の評価

ナノコイルを帯電させたときの静電引力によりコイル自身を変形させ、運動へ置換するアクチュエータを作製するための、様々な基礎技術構築に取り組んだ。電子顕微鏡内で直径 200~500nm 程度のナノコイルに静電場を印加したときの伸びを観察した。このようなナノコイル 1 本レベルの変形実験から、ナノコイルをアクチュエータとして用いるた

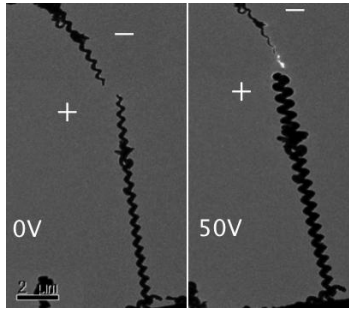


図3. CNC 間への TEM 内電界印加実験.

めには、個々のナノコイルが接触したときショートによる破損や、高電圧印加時の電界放出による破損を防ぐ手法を確立することが重要な鍵となることが明らかになった。その解決として、ナノコイルを薄く絶縁体コートする方法を検討した。結果として、ゾル-ゲル法による SiO_2 コートが有効であるという見通しを得た。この手法を用いれば、CNC のような複雑な形状でも均一にかつ数 nm という薄さで SiO_2 層を形成することが出来る。これによって CNC の耐電圧特性が劇的に向上し、長さ数 μm の CNC に 60V 程度まで CNC を破損することなく電圧を印加でき、そのとき $1.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ の電流密度で電流が流せることを実証した。

さらに、CNC 1 本レベルの電磁気特性を活用した新奇ナノアクチュエータとして、ステッピングモータの動作原理を基にした基本

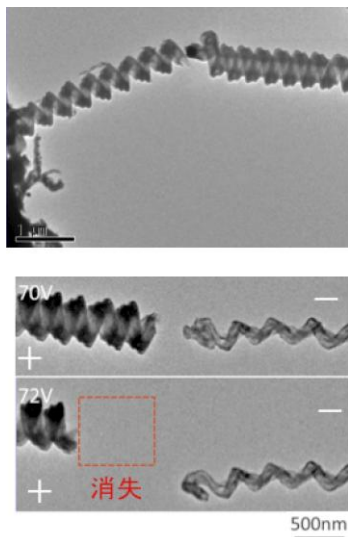


図4. (上) 100nm 以下まで近接した 2 本の CNC 間への TEM 内電界印加. (下) 電界印可による

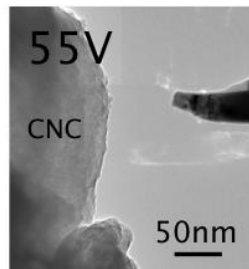
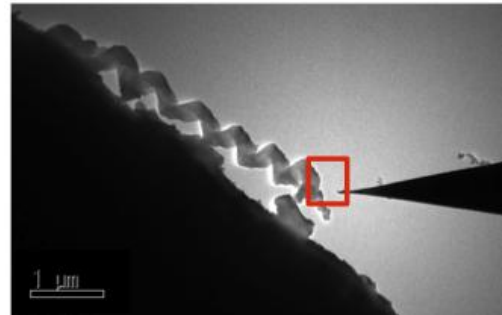


図5. (上) SiO_2 コートした CNC への電界印加. (下) 図右のプロブを SiO_2 コート CNC へ約 60nm の距離に近づけて 55V 印加した時の TEM 像.

機構を考案した。コイル径 500nm 程度の密巻き状 CNC を電極に架橋し、長さ 500nm 程度の棒状磁性体を CNC 近傍へ一点支持した状態で配置した極薄型アクチュエータモデルについて、 $30\mu\text{A}$ の電流を流したときに磁性体ロータが十分回転可能なトルクが得られると予測された。このモデルの基本動作検証を行うため、通電可能な電子顕微鏡試料ホルダのステージを改造し、架橋した CNC への通電とナノマニピュレータによる磁性体ロータの移動・取り付けが同時に行える実験系を構築した。検証実験の結果から、ナノアクチュエータ実現に向けて解決の必須な課題として、磁性体ロータの作製方法や低摩擦支持方法、密巻き状の CNC を選択したときの隣接

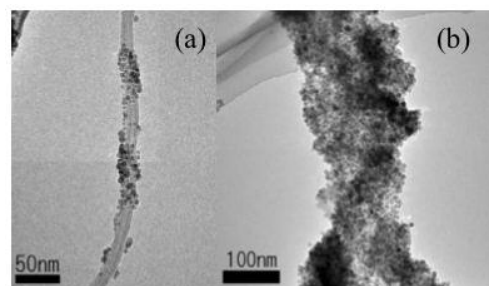


図6. 磁性体ナノ粒子をコートした(a)ナノスプリングおよび(b)ナノコイルの試作.

線間ショート防止などの様々な要素が明確となった。そのうち、磁性ロータについての基礎知見として、カーボンナノチューブを芯材としてナノ磁性粒子を凝集させることによって、芯材と凝集量を制御しながら任意の形状の磁性体ロッドを作製する手法を見いだした。

5. 主な発表論文等

(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 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 松野智彦, 平原佳織, 「カーボンナノコイル電磁アクチュエータ機構の考察と基本動作検証」日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会、2012年3月15日、大阪。
- ② 平原佳織, 「HRTEMによるカーボンナノチューブの構造特性と機能」、東北大学金属材料研究所ワークショップ「分野融合型格子欠陥研究の発展にむけて」2011年10月27日、仙台。
- ③ 近藤天、中山喜萬、平原佳織, 「カーボンナノコイルを用いた静電アクチュエータ」日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会、2011年3月18日、京都。
- ④ 中田健人, 平原佳織, 中山喜萬, 「カーボンナノコイルの結晶性と振動特性」2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会、2010年9月16日、長崎。

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計◇件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平原 佳織 (HIRAHARA KAORI)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40422795