

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600066

研究課題名(和文)カーボンナノコイル量子細線の電気伝導特性に対する曲げの効果とセンサー応用

研究課題名(英文)The effect of curvatures on the transport properties of coil-shaped carbon nanotubes

研究代表者

松田 健一 (MATSUDA, Ken-ichi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：80360931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、ナノテクノロジーの発展とともに、ナノメートルスケールの物性と形状変化について関心が寄せられている。本研究では、コイル状に成長したカーボンナノコイルを用いて、ナノメートルスケールの細線の曲率や形状変化が、その電気伝導特性におよぼす影響について研究を行った。コイル状の材料はある種のパネとみなす事が可能であるため、まず、その弾性力学的な特性評価を行った。その結果、そのバネ定数はおよそ1.8 N/m程度であると評価された。また変形に伴う電気抵抗の変化についても測定を行い、形状変化に伴う抵抗値変化を観測した。しかし、その特性について定量的に評価することはできなかった。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the effect of deformation on the transport properties of nano-scale devices and materials has attracted much attention in the field of nano-technologies. In this study, we investigated the effect of deformation on the electrical and mechanical properties of carbon nanocoils. To evaluate the elastic spring constant of carbon nanocoils, tensile tests were performed under prolonged stretching. It was revealed that the typical spring constant for our nanocoils was 1.8 N/m. we also investigated transport properties of carbon nanocoils under deformations, and observed changes of resistance due to the deformation. However, we could not explain the origin of such resistance changes at this stage.

研究分野：物性、電気電子材料、ナノテクノロジー

キーワード：カーボンナノチューブ カーボンナノコイル ナノデバイス 量子細線 微小変位センサー

1. 研究開始当初の背景

(1) ナノテクノロジーの進展により、半導体などを利用した一次元的な閉じ込め構造が作製可能となり、またカーボンナノチューブのような自己組織的に細線構造を形成するものも発見された。これらは量子細線として、その一次元的な構造が引き起こす特異な物性とともに、次世代のナノ電子デバイスにおける配線技術や、それ自体を発光・受光素子として用いるなど、基礎と応用の両面から注目されている。

(2) この量子細線は、ナノメートルスケールの紐のような構造であることから、空間的に曲がる自由度を持つが、これまではこの曲げの効果はあまり考慮されてこなかった。しかし、量子細線の変形の空間尺度と、波動関数の広がりと同程度になると、その曲率が電子に対して有効引力ポテンシャルとして作用することが理論的に指摘されている[1]。また、量子細線の「曲げ方」をある特定の形状にした場合、それがいわゆる無反射ポテンシャルになることも指摘されている[2]。

(3) 一方、量子細線の曲げの効果が電子の運動、従って電気伝導特性に反映されることを実験的に示した例はこれまでに無い。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、曲がった細線構造としてのカーボンナノコイルについて、その変形と電気抵抗変化を調べることで、1次元電子系に対する細線の極率の影響を明らかにすることである。

(2) また、量子細線の曲げを利用した、微小な力学的変位を検出するデバイスを提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究で用いるのは、図1に示すようなコイル構造のカーボンナノチューブである。これは、本研究の研究分担者：須田善行氏が大量に生成することにすでに成功しているものである。



図1：カーボンナノコイルの電子顕微鏡像（提供：須田善行）。

(2) この大量のカーボンナノコイルの中から1つを選定し、マイクロマニピュレーションを用いて、図2の概略図に示すように、片方の端を基板上的電極に固定することで、変形を加えながら電気伝導特性を測定することを試みる。

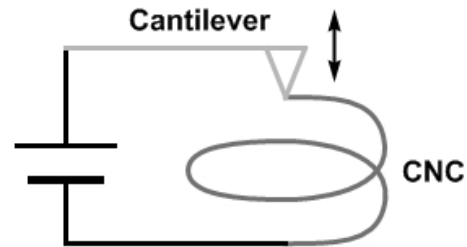


図2：実験方法の概念図。

4. 研究成果

(1) 図3に実際の実験の状況を示す。これまでの研究によって、比較的サイズの大きいカーボンナノコイルではあるが、FIBを用いて基板上に片方の端を固定し、また他方の端を、マイクロプローブを用いて操作するこ

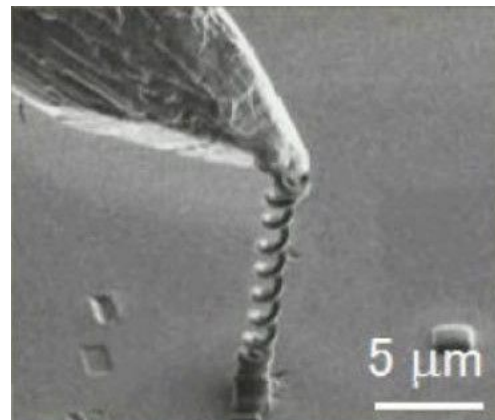


図3：実験状況の電子顕微鏡像（提供：須田善行）

とが可能となっている。この方法を用いて、力学的な変形に対する男性的な特性を測定した。いくつかの異なるナノコイルに対して実際に引き伸ばしを施すことによって、そのバネ定数を推定することに成功し、およそ 1.8 [N/m]であることが明らかとなった。この成果は、論文（論文リスト）に発表された。

(2) これらの変形に際して、電気伝導特性の変化がどうなっているか、実験的に検証を行った。それによれば、確かに変形に伴って電気抵抗の変化が生じるものの、実際の実験ではプローブの接触抵抗の変化等の効果がかかり大きいこともあり、完全に現象を理解するところまで達しなかった。しかし一連の成果は国内外の学会（学会発表リスト、）がそれに該当）で発表を行って、評価やコメントを頂くことができた。

(3) 理論的に変形と電気伝導特性の関係を明らかにすることも検討を行った。量子細線の変形、とりわけ細線の曲率が、電子にとっての引力的なポテンシャルになることは、引用文献によって示されている。従って、量子細線の曲げ方を調整することで、所望のポテンシャルを作り出すことになるため、1次元的なポテンシャル問題として取り扱うことができる。特に興味深いのは、図4に示すような形状のポテンシャルの場合である。

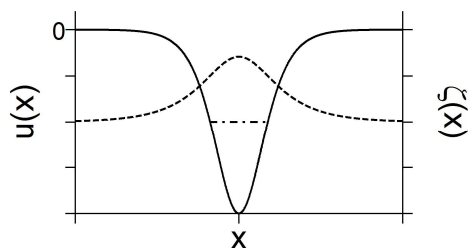


図4：量子細線の曲げによる無反射ポテンシャルの形成と、その内部の束縛状態。

このポテンシャル形状は、その内部の束縛状態が厳密に知られていることと、エネルギーが高い領域の連続状態については無反射ポテンシャルになっていることがよく知られている。連続状態に対して無反射であるということは、電気抵抗としては曲げの効果が観測されないことになる。しかしこの条件からずれた場合にはかなり大きく電子の反射が生じるはずで、その際には大きな抵抗変化が観測されると考えられる。実際に、このポテンシャル深さのみを変化させた場合の電子の透過率を計算したところ、図5に示すように、大きな電気抵抗変化が生じることが計算によって明らかとなった。

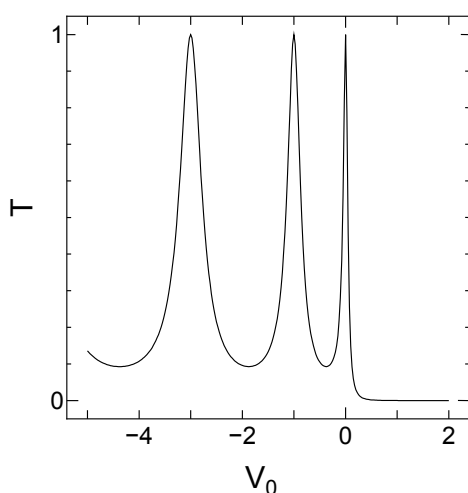


図5：曲げポテンシャルの変化に対する電子の透過率の変化。

この効果を適用すると、非常に小さな力学的な変位を、大きな電気抵抗として検出できる可能性があり、今後の継続的な研究によって実験的に検証する予定である。

(4) 前項では連続状態に着目したが、ポテンシャル内に形成される束縛状態も利用価値があり、適切に細線の曲率を設計すると、束縛状態が2つ形成されることがわかる。この2準位系をつかって光子発光の可能性があることがわかり、現在、それについても実現の可能性を検証している段階である。その成果は、学会発表リストによって発表された。

<引用文献>

R.C.T. da Costa, "Quantum mechanics of a constrained particle", Phys.Rev.A, 23 (1981) 1982.

S. Matsutani, et al., "Reflectionless quantum wire", J. Phys. Soc. Jpn., 60 (1991) 3640.

T. Yonemura, et al., "Real-time deformation of carbon nanocoils under axial loading", Carbon, 83 (2015) 183.

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1件)

T. Yonemura, Y. Suda, H. Shima, Y. Nakamura, H. Tanoue, H. Takikawa, H. Ue, K. Shimizu, and Y. Umeda, Real-time deformation of carbon nanocoils under axial loading, Carbon, 査読有, vol.83, 2015, 183-187.
DOI:10.1016/j.carbon.2014.11.034

[学会発表](計7件)

中村康史, 須田善行, 滝川浩史, 植仁志, 清水一樹, 梅田良人, 島弘幸, 単一のカーボンナノコイルを対象とした電気特性測定系の構築と電気特性に与える黒鉛化処理の影響, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月13日, 東海大学, 神奈川県平塚市。

清水慶明, 中村康史, 國本隆司, 須田善行, 滝川浩史, 植仁志, 清水一樹, 梅田良人, カーボンナノコイルを対象とした電気特性測定系の構築と電気抵抗率の評価, 応用物理学会 2014年秋季講演会, 2014年9月18日, 北海道大学, 北海道札幌市。

Yasushi Nakamura, Ryuji Kunimoto, Yoshiyuki Suda, Hirofumi Takikawa, H. Ue, K. Shimizu, Y. Umeda, Development of measurement system for electrical

properties of carbon nanocoil and relationship of resistivity with the coil shapes. 第 47 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2014 年 9 月 4 日, 名古屋大学, 愛知県名古屋市.

中村康史, 國本隆司, 須田善行, 滝川浩史, 植仁志, 清水一樹, 梅田良人, 単一のカーボンナノコイルを対象とした電気特性測定系の構築と特性評価, 平成 26 年電気学会基礎・材料共通部門大会, 2014 年 8 月 21 日, 信州大学, 長野県長野市.

Y. Suda, Y. Shimizu, H. Takikawa, H. Ue, K. Shimizu, and Y. Umeda, Synthesis of Multi-walled Carbon Nanotube/Nanocoil Hybrid by Chemical Vapor Deposition using Fe/Sn Catalyst, 2014 MRS Fall Meeting, Dec. 3rd, 2014, Boston, USA.

Y. Suda, Measurement of electric resistance of a single carbon nanocoil, International Conference on Small Science, Dec. 18th, 2013, Las Vegas, USA. (Invited Talk)

Y. Mizoguchi, S. Matsuo, K.-i. Matsuda, M. Nishida, and N. Hatakenaka, Tunable single-photon generations using the interacting KdV Soliton Scheme, Optics and Photonics Taiwan, International Conference, Dec. 5th, 2013, Zhongli City, Taiwan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 健一 (MATSUDA, Ken-ichi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 8 0 3 6 0 9 3 1

(2) 研究分担者

畠中 憲之 (HATAKENAKA, Noriyuki)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号: 7 0 3 6 3 0 0 9

須田 善行 (SUDA, Yoshiyuki)

豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 7 0 3 0 1 9 4 2