

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14564

研究課題名（和文）カーボンナノチューブ内部における一次元炭素鎖の構造制御と物性解析

研究課題名（英文）Structural Control and Property Analysis of Linear Carbon Chains inside Carbon Nanotubes

研究代表者

姜 天水（Kang, Cheon-Soo）

長野工業高等専門学校・情報エレクトロニクス系・助教

研究者番号：70884443

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、一次元炭素鎖（LCC）をカーボンナノチューブ（CNT）内部に合成したLCC@CNTを用いて、熱処理によるLCCの構造制御法を確立させると共に、制御された各々の構造を有するLCCの物性を解明することを目的とした。実験では、LCC@CNTに対して高温熱処理を行い、その構造変化をRaman分光分析で観察した。高温熱処理によりLCCのRamanスペクトルが変化したことから、LCCが融合して鎖長が長くなったことが示唆された。また、本研究では半値幅の小さいLCCのRamanスペクトルが得られており、効果的な構造制御手法であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高温熱処理によるLCCの構造制御に関する新しい知見を得ることができた。この成果に基づき、将来にはこれまで実験的に解明されていなかったLCCの超電導特性やエネルギーギャップ変調などのユニークな物性に対する新しい理論を見出すことが可能になると考える。これはLCC分野の基礎的な知識の蓄積だけでなく、高機能な分子ワイヤーや電子デバイスの実現にも繋がるため、エレクトロニクス分野への波及効果も期待できる。

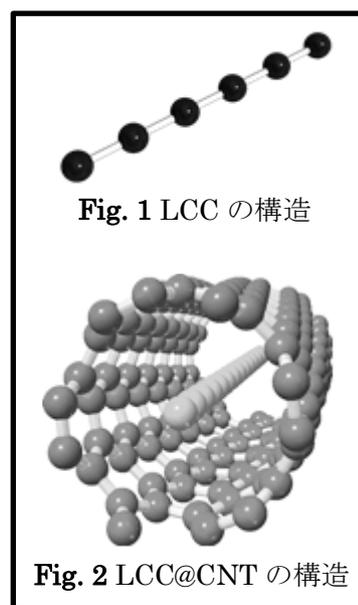
研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a method for controlling the structure of linear carbon chains (LCCs) synthesized inside carbon nanotubes (CNTs) through thermal treatment and to elucidate the physical properties of LCCs with controlled structures. In the experiments, high-temperature thermal treatment was applied to LCC@CNT, and the structural changes were observed using Raman spectroscopy. The changes in the Raman spectra of the LCCs due to the high-temperature treatment suggest that the LCCs fuse, resulting in longer chain lengths. Furthermore, the study obtained Raman spectra of LCCs with narrower peak widths, indicating that the method is effective for structural control.

研究分野：ナノカーボン材料

キーワード：一次元炭素鎖 Linear Carbon Chain LCC 高温熱処理

1. 研究開始当初の背景

一次元炭素鎖 (Linear Carbon Chain: LCC)は sp 混成軌道を有する炭素原子で構成された一次元物質である (Fig.1)。理論計算によると、LCC は他のナノカーボンよりも優れた機械強度と電子移動度を有することが予測されている。また、その特異な電子構造から超電導特性やエネルギーギャップの変調などのユニークな諸特性が期待されている。しかし、LCC は非常に高い反応性を有するため、実験的な構造・物性解析はほとんど進展しておらず、LCC に関する研究の多くは理論計算に留まっている。LCC の構造安定化のためには様々な方法が試みられてきており、その一つとしてカーボンナノチューブ (CNT)内部のナノ空間に LCC を導入・合成する方法 (LCC@CNT) (Fig.2)がある。CNTの内部に存在するLCCはCNTによって保護されるため安定性が優れ、LCC を研究する上で特に有用であり、この分野の発展が期待されている。



2. 研究の目的

LCC@CNT により透過型電子顕微鏡 (TEM)及び Raman 分光分析を用いた LCC の構造解析は大きく進展した。しかし、CNT 内部に異なる構造の LCC が混在しているなどの問題点から、電子輸送特性や電気化学特性の諸特性を実験的に解明した研究はまだ進展していない。従って「理論計算によって予測された超電導特性など、LCC の優れた諸特性は実際に発現するのか、更にその構造・物性は制御可能であるのか」という当該分野における問いは依然と存在している。この間に答えることは LCC 研究分野の発展にとって急務である。従って、本研究では CNT 内部における LCC の構造制御法の確立及び制御された各々の構造を有する LCC の物性解明を目的として研究を遂行した。

3. 研究の方法

高温熱処理はナノカーボン材料の構造制御に用いられる一般的な手法であるが、LCC の不安定さのため、これまで熱処理による構造制御が困難であった。本研究では CNT 内部の LCC に対して高温熱処理が構造変化に有効であることに着目し、熱処理による LCC の構造制御法の確立を目指した。

高い内包率の LCC@CNT (C.-S. Kang, *et al.*, *Carbon*, **107**, pp.217-224, 2016)に対して 1700 °C 付近の高温熱処理を施した。次に、CNT 内部の LCC の構造変化を Raman 分光分析にて観察した。熱処理は、温度及び保持時間をパラメータとして様々な条件下で実施した。

4. 研究成果

Fig. 3 にアーク放電法によって合成された、本実験で使用した LCC@CNT の Raman スペクトルを示す (使用レーザー532nm)。1350 cm^{-1} と 1580 cm^{-1} 付近に炭素六員環構造及びその欠陥によって活性化される G-band、D-band が現れており、これらのピークは LCC を保護する役割を有する CNT に起因する。一方、1850 cm^{-1} 付近に強い C-band が現れ、このピークは LCC 構造に起因

することが先行研究によって示されている。更に、C-band は 1855、1845、1820、1790 cm^{-1} の複数のピークで構成されていることがわかる (Fig. 3 中に*で表示)。C-band のピーク位置は LCC の鎖長に起因することから、本実験で使用する LCC@CNT には様々な鎖長の LCC が混在していることが示唆された。

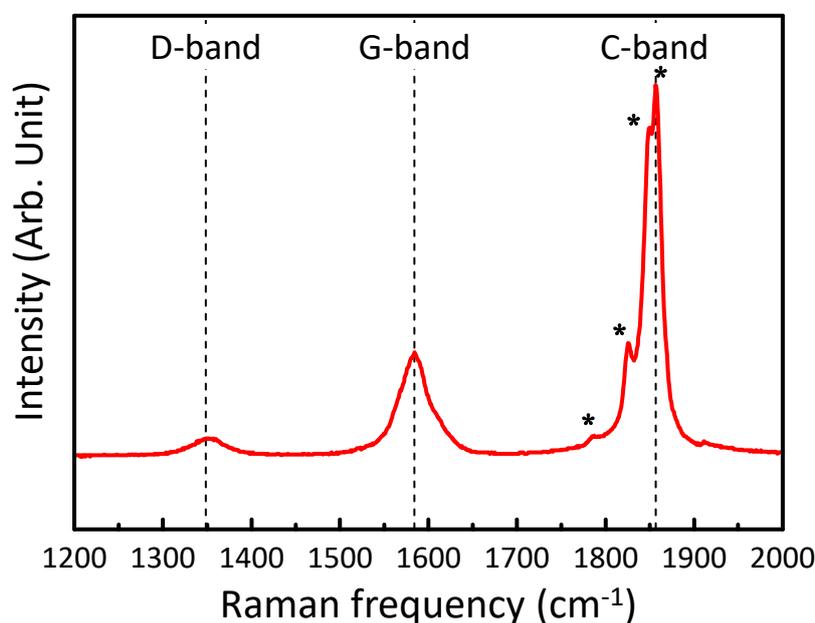


Fig. 3 LCC@CNT の Raman スペクトル

次に、熱処理温度による LCC の構造変化を調べた。熱処理温度を 1600 $^{\circ}\text{C}$ から 1750 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇させると、LCC の鎖長に起因する C-band のピーク位置に変化が見られた。特に 1855 cm^{-1} と 1820 cm^{-1} 付近のピークについて大きな変化があり、熱処理温度の上昇に伴い 1855 cm^{-1} のピークは強度が低下し、1820 cm^{-1} のピークは強度が増加した。先行研究によると 1855 cm^{-1} のピークは鎖長がおおよそ 6 nm の LCC に、1820 cm^{-1} のピークは鎖長がおおよそ 11nm の LCC に起因することが知られている。このことから本研究で得られた熱処理の温度上昇によるピーク位置の変化は、LCC の融合により鎖長が長くなったことを意味する。

また、先行研究において高圧環境下で CNT 内部の LCC が融合し鎖長が長くなったという報告がある (N.F. Andrade, *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, **119**, pp.10669, 2015)。この報告と比較すると、本研究では先行研究より半値幅が小さいシャープな Raman スペクトルが得られており、高温熱処理は他の手法よりも効果的な LCC の鎖長制御手法であることが示唆された。

以上より、本研究では高温熱処理による LCC の構造制御に関する新しい知見を得ることができた。この知見により、将来にはこれまで実験的に解明されていなかった LCC のユニークな物性に対する新しい理論を見出すことが可能になると考える。これは LCC 分野の基礎的な知識の蓄積だけでなく、高機能な分子ワイヤーや電子デバイスの実現にも繋がるため、エレクトロニクス分野への波及効果も期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 姜天水、藤澤一範、橋本佳男
2. 発表標題 高温熱処理による一次元炭素鎖の構造変化
3. 学会等名 炭素材料学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------