

原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能
2020 年度採択研究代表者

2021 年度 年次報告書

丸山 茂夫

東京大学 大学院工学系研究科
教授

単層 CNT に基づく一次元ヘテロナノ構造の制御合成と物性・機能設計

§ 1. 研究成果の概要

我々は、まず定まったカイラリティを持つ単層カーボンナノチューブ (CNT) をテンプレートに用いた一次元ファンデルワールス(vdW)ヘテロ構造の制御合成と構造評価を行った。これは一次元ヘテロ構造合成の前に、CNTを分散、精製、再堆積、洗浄することで実現する。液中に分散された5種類のCNT試料を用いて、界面活性剤を除去することで構造の定まったCNTテンプレート上に一次元ヘテロ構造を作製可能であることを確認した。

新たな vdW ヘテロ構造種の創成に向け、BNNT をテンプレートとして炭素層の化学気相成長を実施した。STEM 分析や X 線吸収分光法等により炭素層の形成と BNNT 構造の維持を確認し、合成温度の調整と合成時間の延長により比較的高い G/D 比を示すサンプルを得た。並行して、高結晶性ヘテロナノチューブの高効率な合成と TEM による直接分析に向けて、高温で使用可能かつ孤立 SWCNT が配列したテンプレートサンプルの構築手法を確立した。

また、BNNT をテンプレートした合成により、これまで理論的な議論のみに限定されていた単層の二硫化モリブデン (MoS_2) ナノチューブにおける発光特性の実験的検証を行った。二次元の単層 MoS_2 は直接遷移半導体のため強い蛍光が生じる一方で、ナノチューブにすると間接遷移になると考えられてきた。今回、BNNT の外側に成長した単層 MoS_2 ナノチューブから高強度の蛍光を観測するとともに、密度汎関数法を用いた計算により、一見して定説に反する結果を包括的に説明できた。

構造解析の観点では、ヘテロナノチューブにおいて、電子顕微鏡を用いたナノメートルスケールでの可視光領域スペクトルの取得を行い、その局所励起スペクトルと原子レベル構造との関連付けを行った。マクロスコピックな情報である光学スペクトルとの比較から、構成する各々のナノチューブの直径や面方位もしくは近接する異種ナノチューブの電子状態 (金属・半導体) などの情報とともにスペクトル微細構造を検証する手法となることが期待される。

§ 2. 研究実施体制

(1) 丸山グループ

- ① 研究代表者:丸山 茂夫(東京大学・大学院工学系研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ ヘテロナノチューブの合成制御
 - ・ ヘテロナノチューブの物性評価
 - ・ ヘテロナノチューブを用いたデバイス開発

(2) 末永グループ

- ① 主たる共同研究者:末永 和知 (大阪大学・産業科学研究所 教授)
- ② 研究項目
 - ・ヘテロナノチューブの超高分解能電顕観察および局所元素分析
 - ・ナノカーボン材料の成長過程観察
 - ・デバイス中ナノ構造の局所物性測定

(3) 項グループ

- ① 主たる共同研究者:項 栄 (東京大学・大学院工学系研究科 准教授)
- ② 研究項目
 - ・ ヘテロナノチューブの合成制御
 - ・ ヘテロナノチューブの構造解析
 - ・ ヘテロナノチューブの制御メカニズム

(4) 井ノ上グループ

- ① 主たる共同研究者:井ノ上 泰輝 (大阪大学・工学研究科 助教)
- ② 研究項目
 - ・ 合成・観察用の特殊構造基板作製
 - ・ 電気特性・光電特性の計測
 - ・ 電子・光電デバイス作製・評価, 薄膜形成

【代表的な原著論文情報】

- 1) M. Liu, K. Hisama, Y. Zheng, M. Maruyama, S. Seo, A. Anisimov, T. Inoue, E. I. Kauppinen, S. Okada, S. Chiashi, R. Xiang, S. Maruyama*, Photoluminescence from Single-Walled MoS₂ Nanotubes Coaxially Grown on Boron Nitride Nanotubes, *ACS Nano*, (2021), 15-5, 8418-8426.
- 2) K. Hisama, M. Maruyama, S. Chiashi, S. Maruyama* and S. Okada*, Indirect-to-direct band gap crossover of single walled MoS₂ nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, (2021), 60-6, 065002-1-065002-1.
- 3) S. Cambre*, M. Liu, D. Levshov, K. Otsuka, S. Maruyama*, R. Xiang*, Nanotube-based one-

dimensional heterostructures coupled by van der Waals forces, *Small*, (2021), 17-38, 2102585-1-2102585-26.

- 4) M. G. Burdanova, M. Liu, M. Staniforth, Y. Zheng, R. Xiang, S. Chiashi, A. Anisimov, E. I. Kauppinen, S. Maruyama, J. Lloyd-Hughes*, Intertube excitonic coupling in nanotube van der Waals heterostructures, *Adv. Funct. Mater.*, (2022), 32-11, 2104969-1-2104969-7.