

[ゼロエミッションエネルギー研究拠点 共同利用・共同研究]

## 光温度計測を可能とするカーボンナノチューブの発光熱特性

青田 駿

### 1 目的

兵庫県では「兵庫県地球温暖化対策推進計画」を策定し、2050年にCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロを目指している。CO<sub>2</sub>排出原因となるエネルギー消費量の背景として、近年のデジタル社会の拡大が指摘されている。デジタル社会において増加しているIoT機器、ネットワーク機器、データセンターなどで多く使用される半導体集積回路(以下半導体)の数と密度は、爆発的に増加している。更に近年は情報機器だけではなく、電力の制御や変換に対して使用されるパワー半導体も同様の傾向にある。今後、半導体産業は国内においても拡大していくことが予想されていることから、兵庫県も「ひょうご経済・雇用戦略」に従い、半導体産業を成長産業の競争力強化のため支援をしている。

CO<sub>2</sub>排出抑制のためエネルギー消費量を低減させる方法として、半導体の消費電力削減が考えられる。消費電力の主な損失原因が“熱損失”である。その原因は、半導体の電気伝導に伴う導通損失、ON/OFF時の切り替え遅れに伴う損失、微細化に伴うトンネル効果による漏れ電流による損失、が考えられる。この熱損失の解析のために、半導体内部の発熱部位特定やその熱分布状態を直接観察する温度計測はよく実施されている。一般的な温度計測の方法としてまとめた結果を表1に示す。

表 1. 温度計測方法の一覧

	放射温度計	サーモグラフィカメラ	温度計	熱電対	光温度計
外観					
取得データ	スポット	画像	スポット	スポット	画像
原理	熱輻射	熱輻射	電気抵抗	ゼーベック効果	発光
測定方法	非接触 遠隔	非接触 遠隔	接触 配線あり	接触 配線あり	接触 遠隔
空間分解能	1 cm	～ 50 μm	2 mm	10 μm	～ 1 μm

遠隔から温度測定ができることから、放射温度計は利用される。また、特定の場所に簡単に貼り付けることで測定できる熱電対もよく利用される。一方で、発熱箇所が不明な測定対象に対して発熱部位を観察するにはスポット的測定ではなく2次元画像での観察が望まれる。従って、放射温度計と熱電対のどちらも画像形式のデータ取得が難しいため、遠隔かつ画像で温度計測可能な方法としてサーモグラフィカメラを用いられることも多く、電子機器の熱分布測定として利用されている。しかしながら、空間分解能の原理限界から、集積化した半導体内部における微細領域の熱分布測定は難しい。

そこで、画像で温度計測ができるだけでなく、サーモグラフィカメラより空間分解能を凌駕する計測方法として、発光材料を用いた光温度計が期待されている。この温度計は、材料の発光に関するパラメータ(発光強度、発光波長、発光寿命など)が温度に伴って変化する特徴を利用することで、温度計測を行う測定方法である。現在、発光を利用した光温度計として、色素や希土類ナノ材料などを用いた研究

開発事例があるが、本研究では過去報告例のないカーボンナノチューブの発光を用いた光温度計への可能性を検討する。

## 2 実験方法と結果

半導体型単層カーボンナノチューブ(図 1(a))を孤立分散させた水溶液<sup>2)</sup>を、吸引ろ過を用いて極薄膜化したシート(図 1(b))を作製した<sup>3)</sup>。このシートを加熱させながら、アップコンバージョン発光<sup>4-5)</sup>スペクトルを測定した。発光スペクトルは自作構築した光学系<sup>6)</sup>を利用した。試料の発光スペクトルの温度依存性を図 1(c)に示す。カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光は温度増加に伴って、増加する特性をもつ。従って、この発光を利用することで温度を推定できることがわかった。

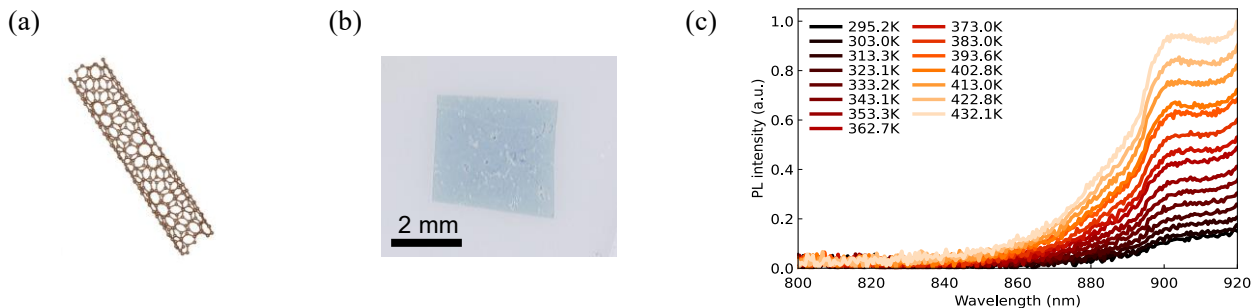


図 1. (a) 単層カーボンナノチューブの化学構造(直径が約 0.7 nm), (b) 作製した極薄膜シートの外観写真, (c) カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光スペクトルの温度依存性。

## 3 結論

カーボンナノチューブシートのアップコンバージョン発光が温度に対して増加するため、光温度計測として応用が出来ることがわかった。詳細な実験結果や展望に関しては参考文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

### 謝辞

本研究は、京都大学 エネルギー理工学研究所 ゼロエミッションエネルギー研究拠点 共同利用・共同研究(ZE2023B-43)に支援頂きました。

### 参考文献

- 1) 経済産業省. “半導体・デジタル産業戦略”. 2023,  
[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/semiconductors\\_and\\_digital.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semiconductors_and_digital.pdf)  
(2024 年 8 月 27 日取得)
- 2) Y. Yomogida, T. Tanaka, M. Tsuzuki, X. Wei, and H. Kataura, ACS Appl. Nano Mater. 3, 11, 11289-11297, 2020.
- 3) T. Nishihara, A. Takakura, M. Shimasaki, K. Katsuda, T. Tanaka, H. Kataura, and Y. Miyauchi, Nanophotonics 11, 5, 1011-1020, 2022.
- 4) N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, Nat. Commun. 6, 8920, 2015.
- 5) S. Aota, N. Akizuki, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, Appl. Phys. Express 9, 045103, 2016.
- 6) 京都大学エネルギー理工学研究所. “令和 5 年度 (2023) 成果報告書”. 2023,  
[https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero\\_emission/research/houkokusho.html](https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission/research/houkokusho.html)  
(2024 年 8 月 27 日取得)

(問合せ先 青田 駿)