

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	檜作（川上） 未央子
論文題目	Optical Engineering Based on Structure-Sorted Carbon Nanotube Assemblies for Energy Applications (構造分離カーボンナノチューブ集積体を用いた光学制御とそのエネルギー応用)		
(論文内容の要旨) 本論文は、高温エネルギー応用を目指した、構造分離された単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 集積体に基づく熱光学制御の学理開拓と技術開発に関する研究について述べたものであり、序論（第 1 章、第 2 章）、本論 4 章（第 3—6 章）と結論（第 7 章）より構成されている。 第 1 章では研究背景として、カーボンニュートラル社会に向けた熱エネルギー変換技術の重要性を述べ、高温環境下で特異な量子物性を示す SWCNT を基盤とした、高度な熱光学制御技術を構築する本研究の目的と意義を説明している。 第 2 章では、本研究の基礎事項として、SWCNT の励起子特性を含む基本的な光物性、構造分離・分散技術の近年の進展や、薄膜形態における熱放射特性に関する先行研究の概況をまとめている。 第 3 章では、高温での分光選択エミッタへの応用を見据えた第一段階として、室温における近赤外完全吸収体（放射体）の設計指針について述べている。構造分離 SWCNT 薄膜の強い励起子共鳴を利用し、全誘電体複層構造によって複雑な微細構造を用いずに近赤外域での完全吸収が実現可能であることを示している。 第 4 章では、前章の原理を高温動作へ拡張するための基盤として、高純度 SWCNT 集積体の広帯域複素屈折率スペクトルの温度依存性を実験的に解明している。得られた光学定数をモデル化することで、高温下における SWCNT 光学素子の精密な設計を可能にした。 第 5 章では、前章で確立した温度依存性の知見に基づき、(7,5) SWCNT を用いた多層構造エミッタの設計と評価を行っている。850 K における熱放射測定により、近赤外放射率の顕著な増強を実証し、さらに、より大直径の SWCNT を用いることで、放射効率と熱的堅牢性をさらに向上させうる設計指針を提示している。 第 6 章では、これまでの章で得られた知見を統合し、数値シミュレーションにより、輻射損失を抑えつつ太陽光を効率的に吸収できる、新たな全誘電体デバイスの概念を提案している。 第 7 章においては、本研究で得られた知見を要約し、高温熱光エネルギー変換システムにおける SWCNT 集積体応用の今後の展望について述べている。 以上のように、本論文は、構造分離 SWCNT の励起子光物性を最大限に活かした高温熱光学制御手法を確立するとともに、高効率な熱エネルギー変換デバイスへの応用指針を示したものであり、エネルギー科学の学術上、および實際上寄与すると考えられる。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、熱光起電力発電 (TPV) 等のエネルギー変換応用に向けた、構造分離単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 集積体を用いた光学制御技術の構築に関する研究について述べている。本研究では、構造分離 SWCNT 集積体の、高温安定で強い近赤外励起子光学応答に着目し、SWCNT の特徴的な光物性を応用し、従来の微細加工技術に頼らず室温から高温にわたる高度な吸収・放射制御を実現することを目指したものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1) 構造分離 SWCNT 薄膜の強い励起子共鳴を利用することで、従来、既存材料物性の制約から近赤外域では困難であった、吸収層、透明誘電体層、金属反射層からなる平面複層完全吸収体 (Salisbury スクリーン) を、近赤外域で実現できることを示した。さらに SWCNT 薄膜を金属反射層の代替となる波長選択反射層としても利用する全誘電体複層構造を提案し、金属も複雑な微細構造も用いずに、0.9 を超える高吸収率を達成できることを示した。

2) 高温下での光学設計を実現するため、構造分離 SWCNT 薄膜の複素屈折率の温度依存性を 300 K から 800 K の広い温度域で解明した。温度に依存する励起子共鳴のレッドシフトや線幅増大を経験的モデルにより定式化し、任意温度での光学スペクトル推定を可能にした。これにより、高温下で動作する SWCNT 光学素子の熱光学設計が初めて可能となった。

3) 上記の知見を統合し、SWCNT 全誘電体複層構造による高温熱放射制御を実証した。まず、850 K の高温条件でも、単層膜の理論限界を大幅に超える放射率増強が可能であることを示した。さらに、より直径の太い SWCNT を用いることで、既存素子を上回る高い波長選択性を持つエミッタや、高い太陽光吸収率と低輻射損失を両立する全誘電体太陽熱吸収体を、簡便で大面積化も容易な平面積層構造で実現可能であることを示した。

本研究で得られた知見は、先進材料である構造分離 SWCNT の光物性を最大限に活かした新たな熱光学デバイスの設計指針を与えるものであり、熱エネルギー変換技術の発展に資する、エネルギー科学分野における重要な貢献が認められる。よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 8 年 1 月 28 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 令和 年 月 日以降