

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	WU HENGKAI
論文題目	Carbon nanotube-based spectrally selective absorber for efficient solar thermal energy conversion (高効率太陽熱エネルギー変換に向けたカーボンナノチューブ分光選択吸収体)		
(論文内容の要旨) 本論文は、構造分離された単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 集積体を用いた、分光選択性太陽熱吸収体 (SSA) の設計と光学制御技術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)、実験方法 (第 3 章)、本論 3 章 (第 4—6 章) と結論 (第 7 章) より構成されている。 第 1 章では本研究の背景として、気候変動問題に対する再生可能エネルギーの重要性、特に太陽熱変換技術における選択吸収体の重要性と、SWCNT の特性活用を探究する本研究の動機を説明している。 第 2 章では、本研究の基礎事項として、太陽光熱変換の原理、分光選択性太陽熱吸収体の設計指針、および材料となる SWCNT の物理的・光学的特性についてレビューしている。 第 3 章では、本論文全体を通じて使用された実験装置の構成、サンプルの作製方法、および光学応答予測のための数値シミュレーション手法について説明している。 第 4 章では、デバイス設計の基盤となる、吸引ろ過法で作製された単一構造 SWCNT 薄膜の異方的な光学応答 (複屈折性) について述べている。偏光および入射角度に依存した分光計測を駆使することで、これまで未解明であった面外方向の複素屈折率スペクトルを実験的に決定することに成功している。 第 5 章では、Dallenbach 型の誘電体・金属タンデム構造を用いた高性能な SSA の設計と実証について述べている。複数種の SWCNT を混合し、吸収層の有効屈折率を理論上の理想値に近づける設計戦略を提案した。さらに、単純な二層構造でありながら優れた分光選択性と太陽熱変換性能が得られることを実験的に実証した。 第 6 章では、実用化を見据えたコストパフォーマンスに優れた SSA の作製可能性について述べている。前章で用いた高コストな構造分離 SWCNT の代替として、安価な未分離の商用 SWCNT 試料を用いた場合の有効性を検討した。その結果、ある程度の性能低下はあるものの、商用材料によって低コストかつ十分に高性能な SSA が作製可能であることを示した。 第 7 章においては、最終的に本研究で得られた知見を要約し、SWCNT を用いた太陽熱変換デバイス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 の光物性を最大限に活かした光学制御手法を確立するとともに、高効率かつ簡便な太陽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、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を用いた分光選択性太陽光吸収体 (SSA) の設計と製作、およびその光学特性の評価に関する研究について述べている。太陽光熱変換技術は、広帯域の太陽光利用が可能な有望なエネルギー技術であるが、高いエネルギー変換効率を達成するには、太陽光を最大限吸収しつつ熱放射を抑制する高性能な SSA が不可欠である。従来の SSA は複雑な構造によるコストや耐久性が課題であったが、本研究では、擬一次元励起子共鳴に由来する鋭い吸収端を持つ SWCNT の光物性に着目し、簡便な構造で優れた分光選択性を持つ SSA を実現することを狙い、得られた主な成果は以下の通りである。

1) 偏光・角度分解分光計測により、単一構造 SWCNT 集積薄膜の異方的な光学応答 (複屈折性) を詳細に調査した。これにより、光学設計の基盤となる面内および面外方向の複素屈折率スペクトルを明らかにし、SWCNT-SSA の精密設計を可能にした。

2) 金属層上に極薄の SWCNT 層を積層した Dallenbach 型の誘電体・金属タンデム構造を提案した。複数の異なる構造を持つ SWCNT を混合し、理想的な複素屈折率プロファイルを近似することで、単純な二層構造でありながら、高い太陽光吸収率と低い熱放射率を両立できることを示し、実証実験によりその優れた太陽光熱変換性能を明らかにした。

3) 実用化を見据え、高コストな SWCNT 分離精製プロセスを排した未分離の商用 SWCNT 試料と、安価なアルミニウム基板を用いた SSA の作製可能性を検討した。その結果、優れた分光選択性を維持しつつ、低コストかつ簡便なプロセスで高性能な SSA が作製可能であることを示した。

以上のように、本研究で得られた知見は、大気中二酸化炭素の高付加価値な固定先として期待されている SWCNT の光物性を最大限に活かした太陽光熱変換デバイスの設計指針を与えるものであり、今後のカーボンニュートラル社会の実現に資する、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 27 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