

(続紙 1)

京都大学	博士（工学）	氏名	MAHIMA KUMAR
論文題目	Biofunctional Carbon Quantum Dots for Fluorescent Imaging and Theranostic Modulation of Oxidaitve stress and Inflammaging (酸化ストレスと炎症老化の蛍光イメージング並びにセラノスティック調節を可能にする生体機能性炭素量子ドット)		
（論文内容の要旨） This thesis presents a set of interconnected studies on the design, synthesis, characterization, and biological application of biomass-derived carbon quantum dots (CQDs) as optically traceable nanomaterials for redox modulation. The work progresses from fundamental material development and nano-bio interaction studies to functional applications in mammalian and plant systems, establishing CQDs as versatile platforms for imaging and modulation of oxidative stress. Inflammaging is a chronic, low-grade inflammatory state associated with aging and driven by cumulative cellular dysfunction, persistent increase in pro-inflammatory mediators, including cytokines, chemokines, and acute-phase proteins, driven primarily by oxidative stress, and excessive reactive oxygen species (ROS) production. These processes contribute to the development of age-related diseases such as osteoarthritis, rheumatoid arthritis, and chronic kidney disease. Due to their intrinsic fluorescence, redox sensitivity, and tunable surface chemistry, biocompatibility, high photostability and photolumniscnce, CQDs represent promising tools for monitoring and regulating inflammatory microenvironments. The thesis is organized into six chapters. Chapter 1 introduces the biological framework of healthy aging with a focus on osteoarthritis. Inflammaging is presented as a central mechanism underlying disease progression, with emphasis on key mediators such as interleukin-6 and reactive oxygen species. The chapter outlines the rationale for employing quantum dots as nanotheranostic tools to detect and modulate inflammatory processes.			

Chapter 2 establishes the foundational principles of nano-bio interactions through an investigation of near-infrared-emitting silicon quantum dot micelles. Physicochemical properties, protein corona formation, and biocompatibility are evaluated using in vitro and in vivo models, providing methodological benchmarks relevant to subsequent CQD studies.

Chapter 3 describes the synthesis of carbon quantum dots from waste-derived biomass, specifically palm kernel shells and oyster shells. These CQDs function as biocompatible fluorescent probes capable of visualizing inflammatory states and indirectly modulating inflammatory signaling via localized redox effects.

Chapter 4 focuses on nitrogen-doped carbon quantum dots as chemically tunable platforms for enhanced bioimaging and ROS sensing. The study highlights the role of surface functionalization in governing redox-responsive fluorescence behavior and improving sensitivity to oxidative stress.

Chapter 5 reports the synthesis of coriander-derived carbon quantum dots from the ethyl acetate fraction of a methanolic extract. These CQDs demonstrate stable fluorescence, oxidative stress mitigation, and effective intracellular localization across both mammalian and plant systems, confirming the cross-kingdom applicability of biomass-derived CQDs.

Chapter 6 summarizes the overall conclusions of the thesis. The findings support nanotheranostics as a viable strategy for diagnosing and treating inflammation-related conditions by integrating imaging, sensing, and therapeutic modulation within a single nanoscale platform.

(続紙 2)

氏 名

MAHIMA KUMAR

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、酸化ストレスおよび炎症性老化、特に変形性関節症の制御を目的とし、ナノセラノスティックプラットフォームとしての炭素量子ドットの有用性を体系的に検証したものである。材料設計から生物学的評価に至るまで一貫した研究を遂行し、炭素量子ドットをイメージングおよび酸化還元制御を担う多機能プローブとして確立することに成功した。主な成果は以下のとおりである。

(1) 生細胞イメージングを目的として、水中で高い分散性を示し近赤外蛍光を発する SiQD/F127 ミセルを開発した。さらに、本ミセルとヒト IgG との分子間相互作用を解析し、潜在的な細胞毒性の制御には天然タンパク質の高次構造を攪乱しないことが重要であることを明らかにした。

(2) パーム椰子殻およびカキ殻を原料とするバイオマス由来炭素量子ドットを合成し、炎症性微小環境の蛍光イメージングと局所的酸化還元反応を介した炎症制御を実現した。

(3) 窒素ドープ炭素量子ドットの開発により、生体イメージング性能の向上および活性酸素種の高感度検出を達成するとともに、炭素量子ドット表面の化学構造が酸化還元応答挙動に与える影響を体系的に解明した。

(4) 植物由来コリアンダー炭素量子ドットについて、小胞体への選択的局在、効果的な酸化ストレス緩和作用、ならびに哺乳類細胞と植物系の双方における安定な蛍光イメージングを実証し、動植物界を横断する応用可能性を示した。

本論文は、バイオマス利用という環境調和型の観点から、量子ドット表面化学構造に着目した材料設計の観点に至るまで、多角的に量子ドットの創製方法を検討するとともに、イメージングおよび治療応用を志向し、酸化ストレスおよび炎症性老化という生体応答に基づいて機能評価を行ったものである。これらの成果は学術的意義のみならず実用的観点からも重要な知見を提供するものであり、工学分野の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。さらに、令和8年2月17日に論文内容および関連事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と判定した。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当すると判断し、公表にあたっては論文全文に代えてその内容を要約したものの公開を認める。

要旨公開可能日： 2026 年 04 月 23 日以降 → 授与日より3ヶ月以内の日付