

藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2026年 5月 8日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 行彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 京都工芸繊維大学

職 名 助教

氏 名 外間進悟



【提出書類】

(1) 研究実施概要報告書 (本紙)

添付書類 (A4 版 3 枚以内) : 研究状況を示す写真等の資料

(2) 収支報告書

添付書類 : 助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合 : 支払一覧表と支払部門担当者記名捺印

(1) テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

コーンコブから炭素量子ドットを合成する簡便な方法の開発

(2) 本研究の期間

(西暦) 2025年4月～2026年3月

(3) 本研究の目的

量子ドットは優れた蛍光特性を有する半導体ナノ粒子であり、LED、ディスプレイ、バイオイメージング用プローブなど、産業および生命科学の幅広い分野で応用されている。一方で、従来型の量子ドットにはカドミウムや鉛などの重金属を含むものが多く、生体毒性や環境負荷の観点から課題が残されている。特に、生体応用や医療分野への利用を考えるうえでは、低毒性かつ環境調和性に優れた蛍光ナノ材料の開発が求められている。本研究では、農業廃棄物であるコーンコブを炭素源として用い、簡便で低環境負荷なマイクロウェーブ法によりカーボン量子ドット(CQD)を合成する方法の開発、さらに、合成条件がCQDの収率、蛍光特性および温度応答性に与える影響を明らかにし、バイオイメージング・センシングに向けた新規蛍光ナノ材料としての基礎特性を評価することを目的とした。

(4) 本研究の概要

CQD合成の基礎条件を確認するため、citric acidとL-cysteineをモデル原料として用い、マイクロウェーブ合成法と水熱合成法を比較した。その結果、収量は下がるものの、マイクロウェーブ法により短時間で蛍光性CQDを合成できることを確認した。

次に、コーンコブを水中で攪拌して水溶性成分を抽出し、その抽出液をマイクロウェーブ加熱することで、コーンコブ由来CQDの合成を試みた。加熱出力および加熱時間を変化させ、得られた生成物の収量および蛍光特性を比較した。その結果、コーンコブを炭素源として蛍光性CQDを合成できることが確認され、900Wで10分間加熱した条件において比較的高い蛍光強度が得られた。

さらに、得られたCQDについて、励起・発光特性、光褪色耐性および温度依存性を評価した。コーンコブ由来CQDは青色領域(極大発光波長440nm)を中心とした蛍光を示し、加熱時間の変化により励起・発光波長が変化する傾向が見られた。また、温度上昇に伴って蛍光強度が低下し、蛍光強度と温度の間に直線的な相関が確認された。以上より、コーンコブ由来CQDは、重金属を含まない蛍光ナノ材料として合成可能であり、バイオイメージング・センシングに向けた基礎的特性を有することが示された。

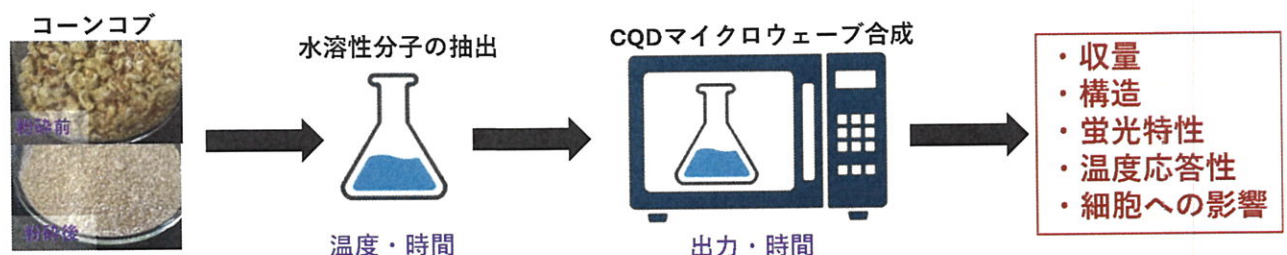


Fig1. 炭素量子ドットの合成スキームと物性評価.

(5) 本研究の内容及び成果

本研究ではまずコーンコブから水溶性分子の抽出を行った。1 g のコーンコブに水を加え攪拌し、時間、加熱に対する抽出条件を比較した。その結果、破碎後に 80 度の熱水で 30 分間抽出する条件が最も効率的であり、40mg の分子を得た。この抽出された分子を FTIR で評価したところ、リグニン・セルロース・ヘミセルロースなどの分子が主であることが示唆された。なお、攪拌時間は 24 時間に延長しても収量に変化は見られなかった。続いて、マイクロウェーブ合成法による CQD の合成条件を検討した(Fig. 2a)。その結果、特に 900 W で 10 分間加熱した条件において最も高い蛍光強度を示す CQD が得られた。以上より、コーンコブから抽出した水溶性成分を前駆体として、簡便なマイクロウェーブ処理により蛍光性 CQD を作製できることを確認した。

次に得られた CQD の蛍光特性を評価した。水溶液は無色透明であるが、UV で励起すると明瞭な青色発光を示した。より詳細な蛍光特性を 2D 励起-発光マップから評価した。330nm 程度に極大励起、430nm 程度に極大発光波長を持つことが確認された。この発光波長は合成時における加熱時間に応じて 325nm~360nm の範囲で変化した。得られた CQD の量子収率と蛍光寿命を評価したところ、その値はそれぞれ、0.4% および 4.3ns であった。この結果は、マイクロウェーブ加熱条件によって CQD の発光特性を制御できる可能性を示すものである。

得られた CQD について、光褪色耐性および温度応答性を評価した。Fig. 2d は CQD の蛍光スペクトルの温度依存性を示している。温度に依存して蛍光強度が低下していることが明らかとなった。この蛍光強度の低下は温度の影響以外に光褪色の可能性も有しているため、光褪色の影響を評価した。その結果、光照射 5 分程度で 87% 程度に蛍光強度が低下し、それ以降は一定の光安定性を有することが確認された(Fig. 2e)。これは、CQD に光褪色しやすい発光源とにくい発光源の 2 種類が存在することを示している。そこで、5 分間の光照射の後に温度依存性を調べることで、CQD の温度計としての性質を評価した。Fig. 2f は温度上昇に伴って極大発光強度をプロットしたものである。蛍光強度と温度の間には良好な直線関係が見られ、その感度は約 $-0.85\%/^{\circ}\text{C}$ であった。この値は化学的に合成された CQD の値と同等である。さらに、温度サイクル測定においても温度変化に応じた蛍光応答が再現的に観察され、コーンコブ由来 CQD が蛍光温度センサとして機能し得ることが示された。また、HeLa 細胞培養液に CQD を添加したところ、HeLa 細胞の形態に影響は見られず、生体親和性が高いことが確認された。これらの結果から、本研究で作製したコーンコブ由来 CQD は、低環境負荷なバイオマス由来蛍光材料であるだけでなく、バイオイメージング・温度センシングへ応用可能な基礎特性を有することが示された。

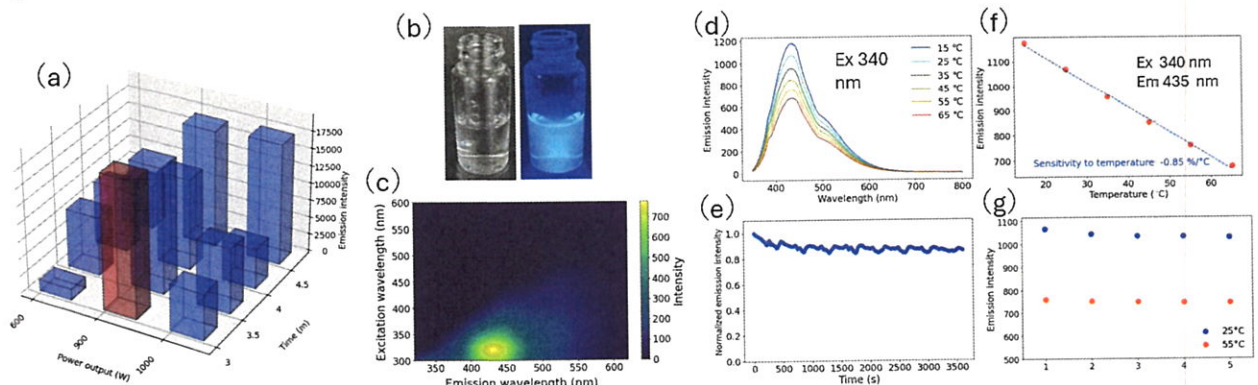


Fig 2. CQDの物性評価。(a) 合成条件の検討, (b) CQD溶液の写真, (c) 2D蛍光マップ, (d) 蛍光スペクトルの温度依存性, (e) 光褪色耐性, (f) 蛍光強度の温度依存性, (g) 繰り返し温度計測。

(6) 本研究の考察

本研究により、コーンコブ由来の水溶性成分を前駆体として、マイクロウェーブ法により蛍光性 CQD を合成できることが示された。また、得られた CQD は温度上昇に伴って蛍光強度が低下し、温度サイクル測定においても再現的な応答を示したことから、蛍光温度センサとしての基本的な性質を有することが明らかとなった。一方で、バイオイメージング・細胞内温度計測へ応用するためには、収量、発光強度、生体適合性について、さらなる改善と検証が必要である。

まず、収量については、現状のマイクロウェーブ条件ではコーンコブ 1 g あたり数十 ng 程度の生成物が得られているが、水熱合成条件では 200 mg 程度の生成物が得られることも確認している。したがって、抽出条件やマイクロウェーブ加熱条件をさらに最適化することで、収量を大きく改善できる可能性がある。

次に、発光特性については、本研究で得られた CQD の量子収率は 0.4% 程度であり、バイオイメージングに用いるにはさらなる高輝度化が必要である。一般に、CQD では合成条件や表面状態の制御により、量子収率 20% 程度まで向上することも可能であるため、今後は反応温度、加熱時間、前駆体濃度、pH、表面官能基の制御などを検討し、発光強度の改善を目指す必要がある。また、精製条件を最適化することで、未反応成分や光褪色しやすい発光成分を除去し、より安定で高輝度な CQD を得られる可能性がある。

さらに、生体応用に向けては、細胞への毒性評価をより精密に行う必要がある。本研究では、HeLa 細胞の形態に大きな影響が見られないことを確認したが、今後は CCK-8 アッセイなどを用いて、CQD 濃度および処理時間に対する細胞生存率を定量的に評価する必要がある。加えて、細胞内への取り込み効率、局在、長時間観察時の蛍光安定性を評価することで、バイオイメージングプローブとしての実用性を明らかにすることが重要である。

最終的には、収量と発光強度を改善したコーンコブ由来 CQD を用いて、細胞内での温度計測を実現することを目指す。本研究で確認された温度感度は約 $-0.85\%/^{\circ}\text{C}$ であり、化学的に合成された CQD と同等の値であったことから、材料設計をさらに最適化することで、細胞内温度センサとして十分に利用できる可能性がある。今後、低毒性、高輝度、高い温度応答性を兼ね備えた CQD を作製し、細胞内の局所的な温度変化を可視化することで、未利用バイオマスを活用した新しいバイオセンシング材料の開発へとつなげる。

(7) 共同研究者（所属機関名、役職、氏名）

京都工芸繊維大学 工芸科学部 学部生 櫻井勇騎
京都工芸繊維大学 分子化学系 教授 前田耕治
京都工芸繊維大学 分子化学系 教授 吉田裕美

(8) 本研究の成果の公表先

1. 櫻井 勇騎・前田 耕治・吉田 裕美・外間 進悟、「コーンコブ抽出物からカーボン量子ドットをマイクロ波合成する最適条件の検討」、第 85 回分析化学年会（札幌）、2025 年 9 月 24 日
2. 櫻井 勇騎・前田 耕治・吉田 裕美・外間 進悟、「コーンコブを用いたカーボン量子ドットのマイクロウェーブ合成と特性評価」、第 85 回分析化学討論会（愛媛）、2025 年 5 月 31 日

[注] この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。