2026 年 11 月 17 日

報道機関 各位

近赤外で光る低毒性の多元素量子ドットを実現！
～～Ag-Au-S からなり、水中でも強く安定に発光、生体深部観察材料の開発を後押し～～

【本研究のポイント】

・銀(Ag)・金(Au)・硫黄(S)からなる低毒性多元素半導体、Ag–Au–S 量子ドットを開発。
・この量子ドット表面を、インジウム、亜鉛、硫黄からなる複合金属硫化物(In-Zn-S)シェルで被覆することで、発光強度を大幅に向上させることに成功。
・粒子表面を親水性分子で修飾することで、高い発光量子収率(27.0%)を維持したまま、水中に均一に分散させることに成功。
・マウスを用いた実験では、皮膚表面から 15 mm 以上の深さに位置する深部組織・臓器から近赤外発光を検出することに成功。
・低毒性元素のみで構成される Ag–Au–S 量子ドットは、既存の量子ドットに比べて環境への負荷も極めて低いことが特徴であり、今後の産業・臨床応用に向けた「グリーン・ナノマテリアル」として幅広い分野で応用が期待される。

【研究概要】

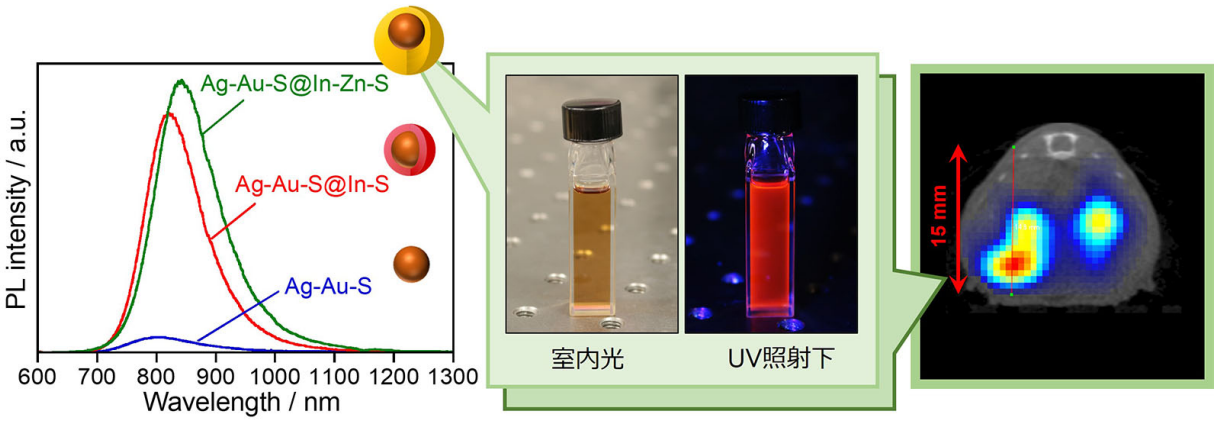
名古屋大学大学院工学研究科／名古屋大学未来社会創造機構の鳥本 司 教授、秋吉 一孝 講師 らの研究グループは、量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命科学研究所／名古屋大学 未来社会創造機構の馬場 嘉信 所長／特任教授、湯川 博 プロジェクトディレクター(PD)／特任教授、および田中貴金属工業株式会社などとの共同研究により、銀・金・硫黄(Ag–Au–S)からなる新しい近赤外発光量子ドットを開発し、生体深部イメージング用発光プローブとして利用できることを実証しました。

Ag–Au–S 量子ドットの発光波長は、Ag と Au 組成比を制御することで、745～1130 nm の広い波長範囲で変化させることができます。さらに、粒子表面を複合金属硫化物(In-Zn-S)シェルで被覆することで、発光強度を大幅に向上させることに成功しました。

粒子表面を親水性分子で修飾することで、高い近赤外発光量子収率(27.0%)を維持したまま水中で均一に分散させることができ、生体関連媒体中でも優れた発光安定性を示しました。 さらに、細胞試験で低い毒性を確認するとともに、マウスの生体深部からの近赤外発光イメージングに成功しました。

本研究成果である Ag–Au–S 多元素量子ドットは、シェル被覆後も直径約 5 nm と非常に小さく、低毒性元素のみで構成されています。そのため、生体深部イメージングに加え、太陽電池、光触媒、LED、光センサー、量子医療などの広範囲な産業応用・展開が可能な新しい近赤外光機能材料と期待されます。

本研究成果は、2026 年 11 月 5 日に、米国化学会の学術誌『ACS Nano』にオンライン掲載され、オープンアクセスで公開されています。



【研究背景と内容】

・研究背景

生体深部の組織・臓器の状態を、体を傷つけることなく観察する技術は、病気の早期発見・診断、医薬品の体内動態解明などに非常に重要です。特に、波長 700～1700 nm の近赤外光(生体の窓)[注 1)]は、可視光に比べて生体組織による吸収や散乱が少なく、生体深部まで届きやすいことから、近赤外光を利用した生体イメージング技術が注目されています。この技術では、生体内で近赤外光を強く発する発光プローブの開発が重要な課題となっています。

半導体量子ドット[注 2)]は、一般に直径 10 nm 以下の微小な半導体ナノ粒子[注 2)]であり、粒子の大きさや化学組成によって光の吸収・発光特性を制御できることが特徴です。また、従来の有機蛍光色素に比べて高い発光効率や優れた光安定性を実現できる可能性があり、生体イメージング用の発光プローブとして期待されています。しかし、近赤外領域で高効率に発光する量子ドットには、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、水銀(Hg)などの有害な重金属を含むものが多く、生体への応用には安全性の面で課題があります。

こうした背景から、近年では比較的毒性の低い元素を組み合わせた多元素半導体量子ドットの開発が進められています。しかし、低毒性の材料では発光効率が十分に高くない場合が多く、さらに生体イメージングに必要な水中での分散性や、生体関連媒体中で長期間安定して発光するものはほとんど報告されていませんでした。そのため、発光波長を幅広く調整でき、水中での高い発光効率と安定性を兼ね備えた低毒性量子ドットの開発が求められています。これらの課題を解決するためには、量子ドットの化学組成だけでなく、表面や異種半導体との界面構造を精密に制御することが重要と考えられます。

・研究内容

近赤外領域で高効率に発光する低毒性量子ドットを実現するため、本研究チームでは、銀(Ag)、金(Au)、硫黄(S)からなる多元素半導体(Ag–Au–S)に着目しました。Ag–Au–S 系では、銀と金の組成比によって異なる結晶構造や電子状態が形成されることから、組成制御による発光特性の調整が期待されます。

そこで、銀と金の原料混合比を変えて量子ドットを液相合成し、その結晶構造や光学特性を詳しく調べました。その結果、銀の割合が増加すると、量子ドットの結晶構造が AgAuS、Ag_3AuS_2、Ag_2S へと変化するとともに、粒径が約 1.5 nm から 4.5 nm に増大することが分かりました。また、バンドギャップエネルギーは 1.88～1.39 eV の範囲で変化し、近赤外発光のピーク波長を 745～1130 nm の広い範囲で制御することに成功しました。

しかし、得られた Ag–Au–S 量子ドットは、そのままでは粒子表面に多数の欠陥が存在し、発光効率が十分に高くありません。例えば、Ag_3AuS_2 の組成を持つ Ag-Au-S 量子ドットでは、波長 800 nm に発光ピークを示しますが、合成直後の発光量子収率は 3.4%でした。そこで、量子ドット表面をインジウム（In）と硫黄からなる半導体層（In–S）で被覆したところ（Ag-Au-S@In-S）、発光量子収率は 33.6%まで向上しました。さらに、この表面層に亜鉛（Zn）を導入して In–Zn–S シェル層を形成させると、発光ピーク波長 840 nm で発光量子収率 38.9%を示す Ag-Au-S@In-Zn-S 量子ドットが得られました（**図 1**）。得られた量子ドットは特異なナノ構造を持ち、単純なコア・シェル構造では無く、Ag–Au–S コアが粒子中心からずれた位置にあるヤヌス型（Janus）構造に近いものでした（**図 2**）。また、ZnS 原料の添加量を最適化することで、近赤外発光の量子収率を最大 50.5%まで向上できました。詳細な構造解析と発光寿命測定から、この発光効率の向上は、Ag-Au-S コア表面に存在する無輻射再結合サイト[注 3)]をシェル被覆によって除去できるためと考えられます。

量子ドットを生体イメージングに応用するためには、水中で均一に分散し、長期間にわたって発光特性を維持することが

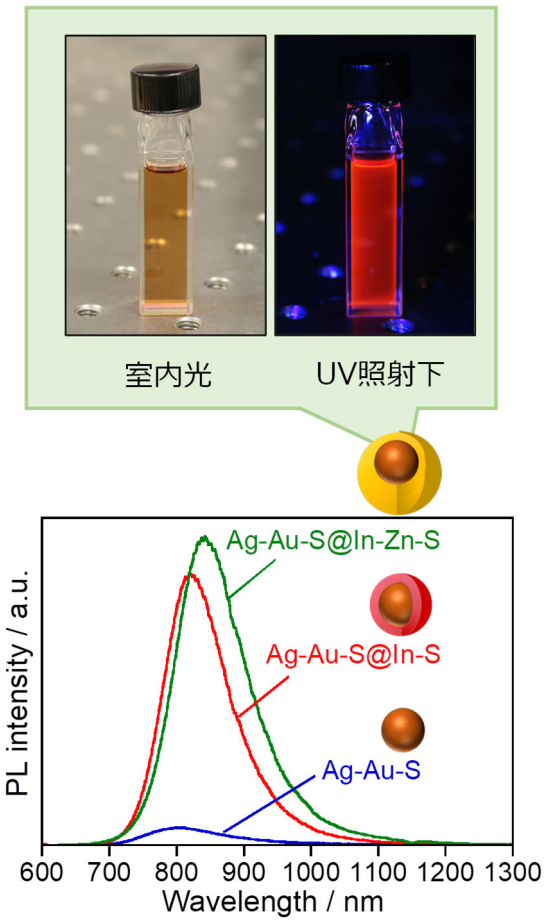


図 1 Ag-Au-S@In-Zn-S 量子ドット溶液の UV 照射による発光の様子（上段）と、シェル被覆による Ag-Au-S 量子ドットの発光スペクトル変化（下段）。

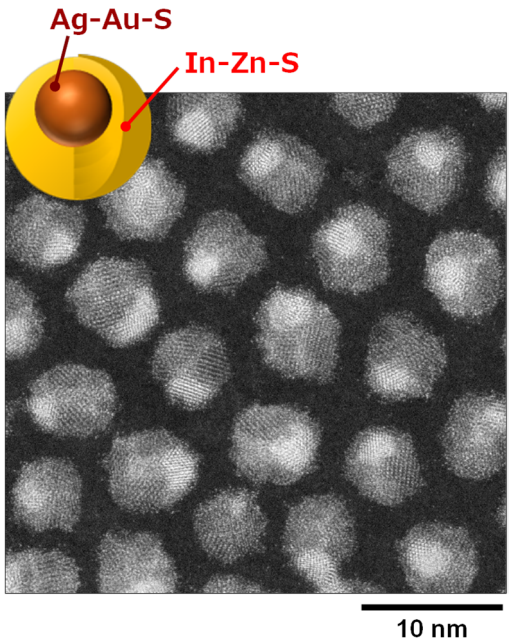


図 2 Ag-Au-S@In-Zn-S 量子ドットの HAADF-STEM 像。Ag-Au-S コア（白色部分）が粒子の中心からずれており、Janus 構造となっている。

重要です。そこで、Ag-Au-S@In-Zn-S 量子ドット表面をメルカプトプロピオン酸（MPA）で化学修飾して水溶化させました。得られた量子ドットは、水溶液中でも強い近赤外発光を示し、その発光量子収率は 27.0%と高い値を維持していました。さらに、4 ℃、暗所、窒素雰囲気下での保存試験において、発光強度の半減期は、水中で約 230 日、リン酸緩衝生理食塩水（PBS）中で約 150 日と非常に長いものでした。これらの結果は、In–Zn–S 表面層が量子ドットの発光効率を高めるだけでなく、水中での長期発光安定性の向上にも有効であることを示しています。

水溶化した Ag–Au–S@In–Zn–S 量子ドットは、細胞毒性をほとんど示しませんでした。量子ドットをマウスに静脈注射して近赤外発光イメージングを行ったところ、体内に分布した量子ドットからの近赤外発光を明瞭に観察することができました。特に、近赤外発光像と X 線 CT 像を組み合わせた三次元イメージングにより生体内部の発光分布を詳細に調べたところ、皮膚表面から 15 mm 以上の深さに位置する肝臓からの近赤外発光を明瞭に検出することに成功しました（**図 3**）。これらのことから、開発した量子ドットが生体イメージングに利用でき、生体深部の観察に特に力を発揮する材料であると言えます。

本研究では、銀（Ag）と金（Au）の組成比による発光波長の制御と（粒子組成制御）、異種半導体による表面被覆を組み合わせることで（粒子ナノ構造制御）、高い発光効率と優れた水中安定性を備えた低毒性の近赤外発光量子ドットを実現しました。この成果は、生体深部イメージング用の発光プローブの開発に加え、近赤外光を利用する光センサーや発光デバイスなど、幅広い産業分野への応用につながると期待されます。

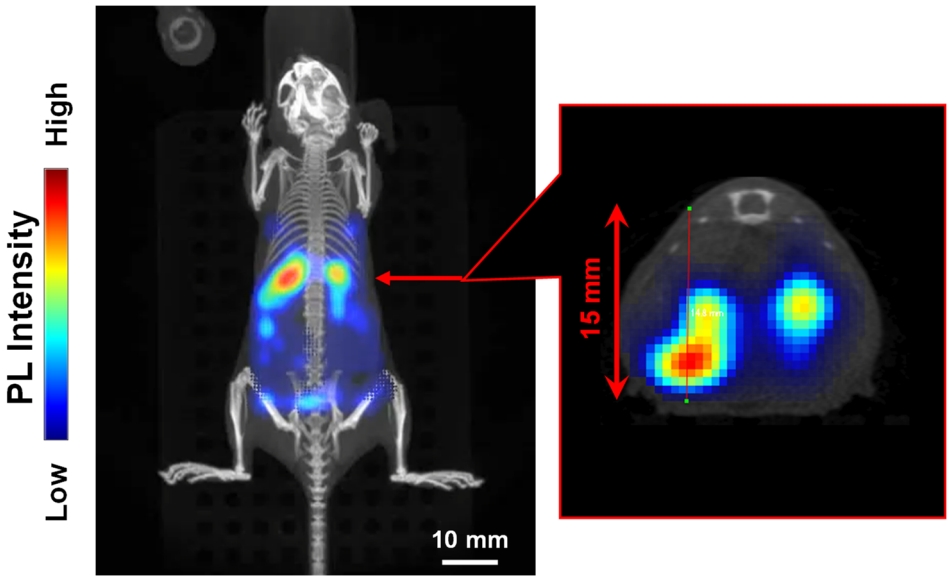


図 3 親水性 Ag-Au-S@In-Zn-S 量子ドットを用いるマウスの生体深部の近赤外発光イメージング（X 線 CT 画像と発光像をマージ）。

【成果の意義】

本研究では、Ag-Au-S 量子ドットの化学組成とナノ構造を精密に制御することで、近赤外発光の波長調整、高効率化、水中での長期発光安定性を実現しました。特に、銀（Ag）と金（Au）の組成比によるバンドギャップ制御と、異種半導体被覆による表面欠陥の抑制を組み合わせることで、従来は両立が難しかった複数の発光特性を改善できることを示しました。また、水溶化後も高い発光効率を維持し、生体深部からの近赤外発光を検出できることを実証しました。

本研究で得られた知見は、Ag–Au–S 量子ドットに限らず、さまざまな多元素半導体量子ドットの高性能化にも応用できると期待されます。今後、量子ドットの発光波長や安定性を用途に応じて最適化することで、生体内の組織や臓器の観察に利用する近赤外発光プローブの開発が進むとともに、新規な光機能材料として、近赤外発光デバイス、光センサー、太陽電池など、幅広い産業分野への展開が期待されます。

本研究は、研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム・BRIDGE（内閣府）「先端量子マテリアルが拓く生体の精密計測および機能向上」（代表者　名古屋大学　鳥本司）、科学研究費補助金（特別推進研究「光圧によるナノスケール量子個性の識別・分離・分析技術の創出」、代表者　大阪大学　石原一）、文部科学省　光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）（課題番号 JPMXS0120330644）（代表者　量子科学技術研究開発機構（QST）　馬場嘉信）、及び、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業（ARIM）次世代バイオマテリアル拠点　名古屋大学（代表者　名古屋大学　馬場嘉信）の支援の下に行われました。

【用語説明】

注 1）波長 700～1700 nm の近赤外光（生体の窓）:

医学や生体工学の分野で主に使用される用語で、光が生体組織を比較的透過しやすい波長領域を意味する。特に、近赤外光（NIR: Near Infrared）の波長帯がこれに該当する。生体組織には、光を吸収・散乱する物質（例:水、ヘモグロビンなど）が多く存在するが、以下の波長帯ではそれらの吸収・散乱が比較的少なく、光が深部まで届きやすくなることから、「生体の窓」と表現される。

生体の窓	波長範囲	特徴
第 1 の窓（NIR-I）	約 700～900 nm	最も広く利用される波長領域である。網膜などの断層画像を取得する OCT（光干渉断層画像）、酸素飽和度測定（パルオキシメータ）などに利用されている。
第 2 の窓（NIR-II）	約 1000～1350 nm	より深部まで光が届き、散乱が少ない。生体イメージング用のプローブ開発に加え、計測機器の開発が課題である。
第 3 の窓（NIR-III）	約 1550～1800 nm	深部観察が可能だが、第 2 の窓と同様に技術的課題が多い。

注 2）半導体量子ドット/半導体ナノ粒子:

量子サイズ効果を示す半導体ナノ粒子のこと。10 nm 以下の半導体粒子では、粒子中の電子および正孔がナノ空間に強く閉じ込められるためにエネルギーが増加するという量子サイズ効果が発現し、バンドギャップなどの物理化学特性が粒子サイズ

に依存して変化する。これらの半導体ナノ粒子は強く発光するために、LED やディスプレイなどの発光デバイスへの応用が試みられている。また粒子サイズによって電子エネルギー構造が変化するために、次世代太陽電池の光吸収層としての開発が進められている。現在は、CdS、CdSe、PbS などの二元素量子ドットを用いる研究が盛んであるが、高毒性元素を含むために、広範囲な応用が望めない。これに対して、毒性元素を含まない三元素以上からなる多元素量子ドットの開発が進められており、サイズの均一化と組成の均質化によって特性の高性能化が達成できれば、非常に広範囲なデバイス応用が期待されている。

注 3)無輻射再結合サイト:

半導体中で光励起された電子と正孔が、ある欠陥準位に捕捉されると、それらが持つエネルギーを光あるいは熱として放出して再結合する。このうち、熱として放出する欠陥準位を、無輻射再結合サイトと呼ぶ。

【論文情報】

雑誌名: ACS Nano
論文タイトル: Bandgap and Interface Engineering of Ag–Au–S Quantum Dots toward Bright Near-Infrared Emission and Deep-Tissue Bioimaging
著者:Kazutaka Akiyoshi, Hinako Hayashi, Mariko Hasegawa, Eunyeong Ko, Nurmanita Rismaningsih, Chie Miyamae, Hiroyuki Okada, Tatsuya Kameyama, Hiroki Sato, Yusuke Ohshima, Shota Yamada, Hiroshi Yukawa*, Yoshinobu Baba, and Tsukasa Torimoto*
DOI: 10.1021/acsnano.6c12991