京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

令和 8 年 11 月 17 日
国立大学法人 京都工芸繊維大学

水溶性量子センサの簡便な合成法を確立
―量子生命科学・高感度イムノアッセイを加速―

1．発表者：

大津 翔生（京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士前期課程）【筆頭著者】
平田 隼也（京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士前期課程）
戸村 圭太（京都工芸繊維大学 工芸科学部）（研究当時）
吉田 裕美（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）（研究当時）
外間 進悟（京都工芸繊維大学 分子化学系 准教授）【責任著者】

2．発表のポイント：

◆細胞内の温度・磁場の計測や、ウイルスなどの高感度検出に役立つ量子センサ[注 1)]を開発
◆不活性ガスを使わず、空気中でナノダイヤモンドの表面処理を行う簡便な手法
◆蛍光特性を維持しながら、水や塩を含む溶液中で安定した分散を実現
◆ワンポット[注 2)]処理や他のナノ粒子にも適用可能で、生体計測用ナノ材料の調製工程の簡略化に期待

3．発表概要：

京都工芸繊維大学の大津翔生 博士前期課程学生（大学院工芸科学研究科）、分子化学系 外間進悟 准教授らの研究グループは、量子センサなどに利用されるナノ粒子を、水中で分散しやすくする簡便な表面処理法を開発しました。

量子センサは、細胞内の温度や磁場などの微小な変化を捉えることができ、生命現象の解明や病気の早期発見、医薬品の効果の評価などへの応用が期待されています。しかし量子センサに用いるナノ粒子は水中で凝集しやすく、生命環境で安定して利用するための表面処理が課題となっていました。

本研究では、ナノ粒子を水になじみやすくする高分枝ポリグリセロール（HPG）[注 3)]による表面処理を、不活性ガスを使わず、空気中で簡便に行う手法を実現しました。処理したナノダイヤモンドは、塩を含む溶液中でも良好な分散性を示し、量子センサに必要な蛍光特性も維持されました。さらに、同じ反応容器で表面に新たな機能を付与できるほか、炭化ケイ素や磁性ナノ粒子にも適用できることを確認しました。

本成果により、量子センサ材料の調製に必要な設備や操作の負担が軽減され、生命科学分野での利用が広がることが期待されます。将来的には、細胞内の微小な温度・磁場変化の計測を通じた病気の兆候の把握や、薬の作用解明、再生医療に用いる細胞の状態評価など、これまで捉えることが難しかった生命現象の可視化・解明につながる可能性があります。

本研究成果は、2026 年 10 月 27 日付で英国王立化学会の学術誌『Nanoscale』にオンライン掲載されました。

４．発表内容：

研究の背景

細胞の内部や周囲では、温度や磁場、化学物質の量など、さまざまな環境情報が生命活動と関わっています。こうした微小な環境を調べるため、ナノメートルサイズの粒子を用いた計測技術の開発が進んでいます。特に、結晶内部の窒素－空孔中心（NV センタ）の量子状態を読み取る蛍光ナノダイヤモンドは、量子センサとして注目されています。

ナノ粒子を生体計測へ応用するには、水や塩を含む溶液の中で粒子同士が凝集しにくいことが重要です。そのため、粒子の表面を水になじみやすい高分子で覆う表面修飾が用いられます。HPG はこの目的に有用で、さらに別の分子を結合させる足場にもなります。一方、その合成では不活性ガスによる置換や雰囲気の維持が慣例的に行われ、装置の準備や操作を増やしていました。

研究内容

本研究グループは、HPG の原料であるグリシドールが、反応原料と粒子を分散させる液体の両方を兼ね、粒子に対して大過剰に存在することに着目しました。この条件であれば、空気中の水分などによる副反応が起こっても、HPG の形成が進む可能性があると考えました。

そこで、ナノダイヤモンドとグリシドールを 140°C で 24 時間加熱する際に、従来のアルゴン雰囲気と、容器を空気に開放した条件を比較しました（図 1）。赤外分光、熱重量分析により、いずれも HPG の被覆形成を支持する結果が得られました（図 2a、b）。また、未修飾の粒子が凝集するリン酸緩衝生理食塩水（PBS）中でも、空気中で処理した粒子は分散性を示しました（図 2c）。ナノダイヤモンドでは、加熱反応を 1 時間に短縮した条件でも、HPG に由来する赤外吸収と水・PBS 中での分散性を確認しました。

蛍光ナノダイヤモンドに本手法を適用すると、アルゴン雰囲気で処理した場合と同様に、NV センタに特徴的な蛍光スペクトルが得られました（図 2d）。さらに、HPG の形成後、同じ反応容器へ試薬を加える「ワンポット法」により、カルボキシ基またはトリメチルアンモニウム基を導入しました（図 3）。粒子表面の電荷の指標であるゼータ電位は、HPG 修飾後の約－20 mV から、それぞれ約－32 mV、約＋45 mV へ変化し、負方向・正方向への調節を確認しました。

本手法は、粒径や製法の異なるナノダイヤモンドに加え、炭化ケイ素ナノ粒子、磁性ナノ粒子にも適用でき、HPG に由来する表面の変化と PBS 中での分散性が確認されました。適用には、反応の起点となる表面官能基と加熱・空気に耐えられる材料であることが必要ですが、不活性ガスの設備や操作を省くことで、さまざまなナノ材料の調製を行いやすくします。

今後の展開

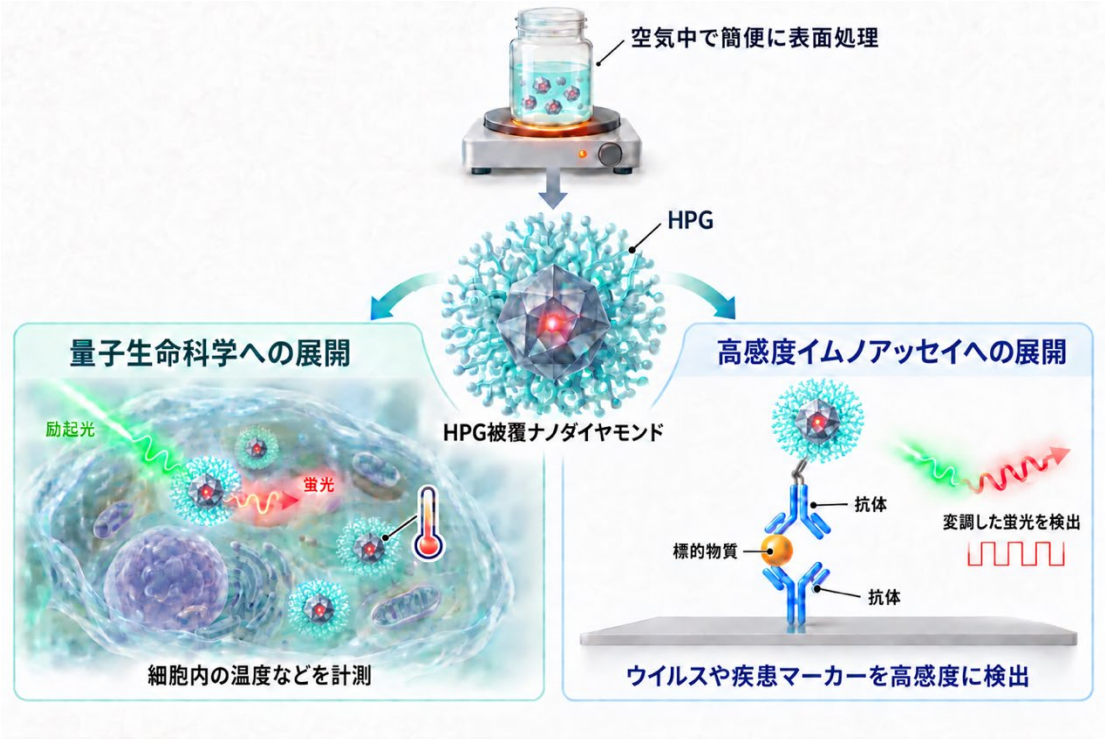
■量子生命科学への展開

私たちの体の中では、細胞がエネルギーをつくるときに熱が生じ、病気や炎症、細胞のはたらきの変化にともなって、細胞内の温度や、神経や心臓の活動が生む微弱な磁場がわずかに変わると考えられてい

ます。これらを細胞の中で直接測れれば、病気の早期の兆候をつかんだり、薬が細胞にどう効くかを調べたり、再生医療に使う細胞の状態を確かめたりすることにつながります。量子センサはそのための有力な道具ですが、実際の研究では、水や塩を含む生体の環境で粒子を安定に扱うための調製が負担になっていました。本手法はこの調製を空気中の簡便な操作で行えるようにするもので、細胞計測や生命科学の研究に量子センサ材料をより多くの研究者が使えるようになることが期待されます。

■高感度イムノアッセイへの展開

蛍光ナノダイヤモンドを標識に用いるイムノアッセイは、NV センタがマイクロ波や磁場に応じて蛍光の強さを変える性質を利用して背景の光を除くことで、従来の標識より高感度に検出できるとして、英国や台湾の研究グループを中心に研究が進んでいます［B. S. Miller et al., Nature, 587, 588–593 (2020); A. Thomas DeCruz et al., Nature Communications, 16, 8778 (2025); Y. Y. Hui et al., Analytical Chemistry, 93, 7140–7147 (2021); T.-N. Le et al., Analytical Chemistry, 98, 4562 (2026),］。一方、粒子の凝集や非特異的な吸着によって目的の物質がなくても蛍光が生じてしまうと、どこまで微量なものを検出できるか（検出限界）を下げにくくなります。HPG による表面処理は、粒子の分散を保ち、非特異的な吸着を抑える方法として知られていますが、不活性ガスを使う煩雑な操作が必要で、専用の設備や経験のない研究室や検査開発の現場では取り入れにくいものでした。本手法は、この確立した表面処理を空気中の簡便な操作で行えるようにするもので、高感度イムノアッセイ用の標識粒子を、より多くの研究者が調製できるようになると期待されます。今後は、抗体を結合させた粒子による検出性能の評価を進めていきます。



５．発表雑誌：

雑誌名：Nanoscale（英国王立化学会）
論文タイトル: Inert-Gas-Free Hyperbranched Polyglycerol Modification and One-Pot Functionalization of Diverse Nanoparticles
著者：Kai Otsu, Junya Hirata, Keita Tomura, Yumi Yoshida, Kohji Maeda and Shingo Sotoma*
DOI 番号：10.1039/d6nr03179j
アブストラクト URL：https://pubs.rsc.org/nr/article/doi/10.1039/d6nr03179j/1373870/Inert-gas-free-hyperbranched-polyglycerol
受理日：2026 年 10 月 19 日
オンライン公開日：2026 年 10 月 27 日

６．用語解説：

注 1）量子センサと蛍光ナノダイヤモンド

電子スピンなどの量子状態を利用して、温度や磁場など周囲の環境情報を読み取るセンサです。蛍光ナノダイヤモンドは、結晶中の炭素原子の一つが窒素に置き換わり、その隣が空孔となった窒素－空孔中心（NV センタ）を含む微小なダイヤモンド粒子です。NV センタの蛍光を使って量子状態を読み取ります。本研究では、表面処理後の蛍光スペクトルを評価しました。

注 2）ワンポット法

反応途中の生成物を取り出すことなく、一つの容器で複数の反応を進める方法です。本研究では、HPG の形成後に同じ容器へ試薬を加えて、カルボキシ基またはトリメチルアンモニウム基を付与しました。

注 3）高分枝ポリグリセロール（HPG：hyperbranched polyglycerol）

多数の枝分かれと水酸基を持つ、水になじみやすい高分子です。ナノ粒子の表面を覆うことで、水や塩を含む溶液での分散性を高めます。また、水酸基を足場として別の分子や官能基を付与できます［N. Komatsu, Accounts of Chemical Research, 56, 106–116 (2023)］。この粒子は、粒子の形を保ったまま水中に分散します。

７．研究助成：

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業（JP26K01357、JP26K22687）、科学技術振興機構 創発的研究支援事業（JPMJFR2428）の支援を受けて実施されました。ナノダイヤモンドへの電子線照射にあたり、量子科学技術研究開発機構の大島武 博士、阿部浩之 博士の協力を得ました。

8．添付資料：

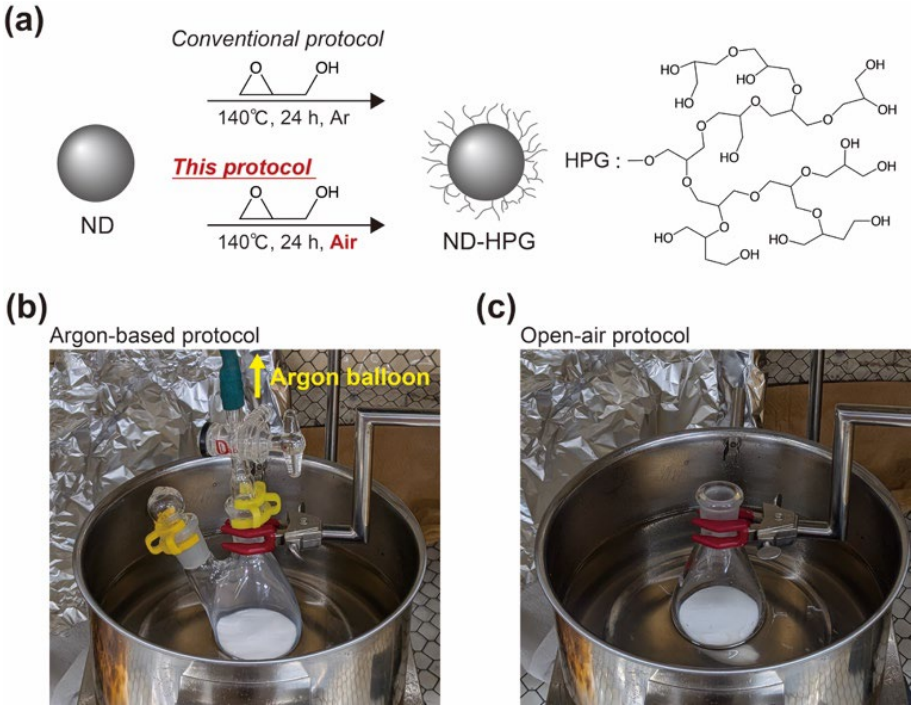


図 1. 従来のアルゴン雰囲気での表面処理と、空気に開放した本手法の比較。(a)反応の模式図。(b)アルゴンを用いる従来の装置。(c)不活性ガスを使わない本手法の装置。グリシドールを加熱することで、粒子表面に親水性の HPG 層を形成します（論文 Fig. 1）。

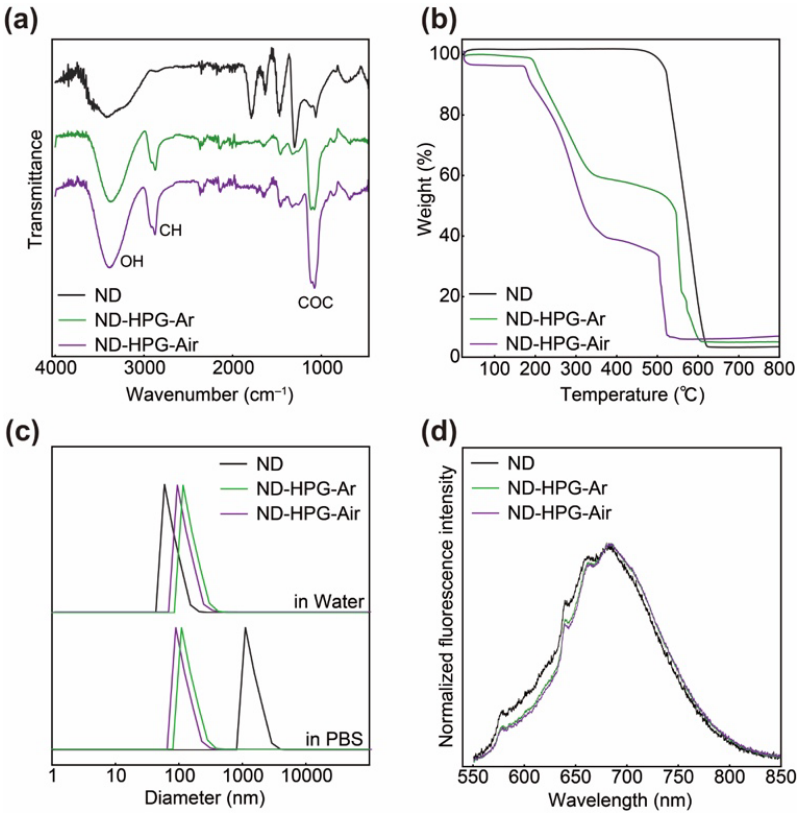


図 2. 従来法と本手法で処理したナノダイヤモンドの評価。(a)赤外吸収スペクトル。(b)熱重量分析。(c)

水およびリン酸緩衝生理食塩水（PBS）中の粒径分布。(d)蛍光スペクトル。空気中での処理でも HPG の被覆形成を支持する結果が得られ、分散性と蛍光が維持されました（論文 Fig. 2）。

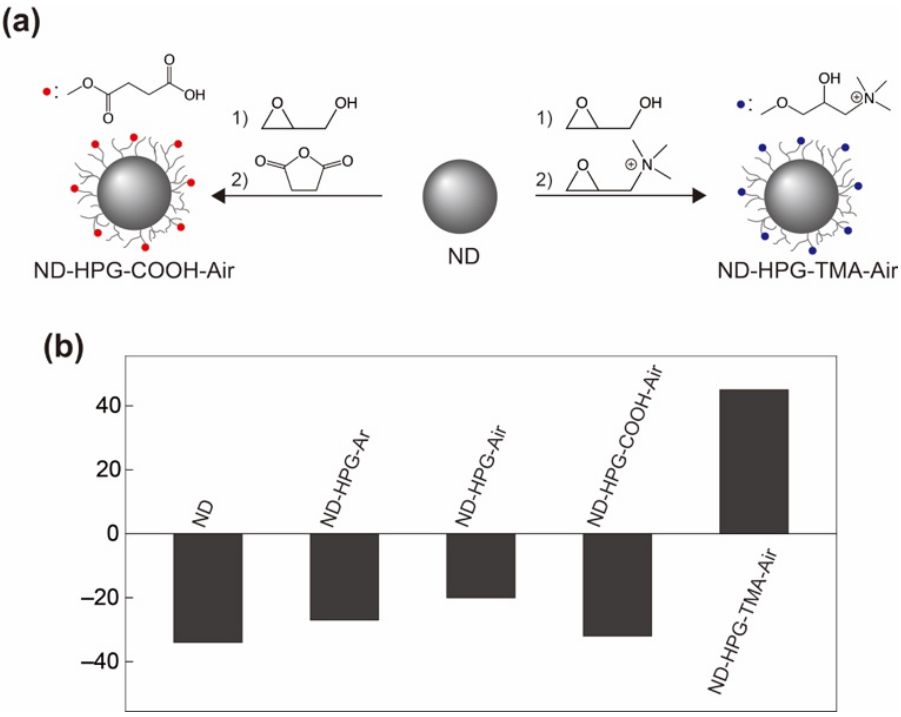


図 3. ワンポット法による表面機能化。(a)カルボキシ基（COOH）またはトリメチルアンモニウム基（TMA）を付与する反応の模式図。(b)粒子表面の電荷状態を反映するゼータ電位。表面修飾により、負方向・正方向への調節が可能であることを示しています（論文 Fig. 3）。