2025 年度年次報告書

先端国際共同研究推進事業
【2023 年度採択　次世代のための ASPIRE　量子分野】

【研究課題名】
ダイヤモンド量子情報技術の基盤構築

研究代表者：
鹿野 豊（筑波大学 システム情報系 教授）

主たる共同研究者：
藤原 正澄（岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 教授）

相手側研究代表者：
Tim Schroeder（Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Humboldt University of Berlin Professor）
Oliver Benson（Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Humboldt University of Berlin Professor）

1. 研究進捗状況と成果

本研究課題「ダイヤモンド量子情報技術の基盤構築」では、ダイヤモンド中の NV（Nitrogen-Vacancy）センター、特にナノダイヤモンド（ND）中の NV センターを用いた量子センシングの基盤技術を日独国際共同研究として推進している。ナノダイヤモンドは、生体内・細胞内の複雑な環境へアクセス可能なモバイル量子センサーとして注目されるが、バルクダイヤモンドと比較して格子歪み・表面誘起ノイズ・スピン不純物等により、NV スピン特性が著しく制限されるという根本的課題がある。本年度は、これらの材料的制約の物理機構を系統的に解明し、「量子グレード」ナノダイヤモンドの実現に向けた材料設計指針の確立を中心的テーマとして研究を推進した。

研究構想の面では、①材料開発（量子グレード ND の合成・表面制御）、②デバイス開発（マイクロ流体センシングデバイス、ダイヤモンドアレイ量子センサー）、③量子情報理論（量子計測・もつれ理論）、④生体応用（線虫 C. elegans の生理学的計測）の 4 テーマを有機的に連携させ、ナノダイヤモンド量子センシングの基盤構築を推進した。

国際頭脳循環の促進については、大島慶介博士（岡山大学）がドイツ・フンボルト大学ベルリン（HU Berlin）の量子光学実験室に長期滞在し（2024 年 4 月～2026 年 3 月）、日独の実験技術の融合・移転を実現した。また、HU Berlin からは Maarten van der Hoeven 氏（博士課程）が岡山大学に 2026 年 2 月～4 月まで訪問研究を行い、Marco Stucki 氏（博士課程）が同年 4 月～6 月に訪問予定である。これらの人材交流を通じ、ナノダイヤモンド材料・デバイス研究において日独双方向の技術循環が実現している。

2. 代表的な成果事例

1. Oshimi, K., Ishiwata, H., Nakashima, H., Mandić, S., Kobayashi, H., Teramoto, M., Tsuji, H., Nishibayashi, Y., Shikano, Y., An, T., Fujiwara, M. Bright Quantum-Grade Fluorescent Nanodiamonds. ACS Nano 2024, 18, 35202‑35213.

概要：^{12}C 同位体濃縮・低歪みナノダイヤモンドを用いて、細胞環境で十分な輝度を持ちながら、市販型 NDs 比で T_1を約 5 倍、T_2を約 10 倍向上させた「量子グレード」ナノダイヤモンドを実現した。また、マイクロ波パワーを約 20 分の 1 に低減できる高コントラスト ODMR 特性を示した。2024 年 12 月 23 日にプレスリリース。

2. Rathi, A., Oshimi, K., Sasaki, K., Kobayashi, K., Shikano, Y., Benson, O., Schröder, T., Chang, S.L.Y., Fujiwara, M. Engineering nanodiamonds for quantum sensing: material constraints at the nanoscale. ACS Nano (submitted).

概要：ナノダイヤモンド中の NV センターの量子センシング性能を制約する材料物性（格子歪み・表面ノイズ・スピン不純物・電荷状態不安定性・粒子形態）の物理機構を包括的に整理し、「量子グレード」ND 実現のための設計指針をまとめたパースペクティブ論文。日独 ASPIRE 共同研究の成果として日独英豪の国際共著。

3. Zou, Y., Shikano, Y., Fujiwara, M. et al. Chemosphere 2024. （プレスリリース：2024 年 5 月 9 日）

概要：ポリグリセロール修飾ナノダイヤモンドの線虫 C. elegans への毒性評価を行い、表面電荷と生体毒性の相関を明らかにした。

4. Mandic, S., Fujiwara, M. et al. Scientific Reports 2025.

概要：ナノダイヤモンドの表面処理最適化と NV スピン特性向上に関する実験的研究成果。