

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月21日現在

## ダイヤモンド量子センシング

Diamond Quantum Sensing

課題番号：26220602

伊藤 公平 (ITOHI KOHEI)

慶應義塾大学・理工学部・教授



### 研究の概要

ダイヤモンド中の量子ビットである窒素-空孔(NV)ペアを高感度・高空間分解能センサーとして利用し、古典的には不可能とされる単一の原子や分子のNMR測定用ダイヤモンドチップを含む実験手法の開発と、分子生物学分野等で注目を集める単一細胞ダイナミクスにおける電位・温度分布時間変化の測定を初めて可能とするデバイスの動作原理実証を目指す。

研究分野：量子情報、固体物理学、計測技術

キーワード：量子センサー、ナノテクノロジー、磁気共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

材料・ナノテク技術の劇的な進歩により、固体中で単一の量子状態（人工原子状態）を創製することが可能になり、それを量子計算のビット（量子ビット）として応用する研究が世界中で実施されている。有用な量子計算の実現には大規模な量子ビット集積化が必要なため、量子計算の概念実証(proof of concept)が様々な固体系で実施された現在は、高集積化につなげる工学的工夫に重心が移行している。一方、数個と数百万個のギャップを埋めるべく、一個または数個の量子ビットの応用が摸索され、その結果として確立されたのが量子センサーという新概念である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、ダイヤモンド中の個々の量子ビットをセンサーとして、単一の分子や細胞の核磁気共鳴(NMR)イメージング測定や電位分布測定を室温で実現する実験手法を確立する。同位体ダイヤモンド表面近傍(数nm)に100マイクロ秒以上の量子コヒーレンス時間を有する窒素-空孔(NV)ペアを配置し、個々のNVペアに束縛された電子スピンを制御する手法を開発し、単一NV電子スピンをセンサーとしてダイヤモンド外部に置かれた単一原子の核磁気共鳴(NMR)検知を目指す。また2次元NVアレイを用いて空間分解能50nmでの磁場・電位・温度分布イメージングを実現することも目指す。並行してニューロン等の単一細胞への刺激に対する電位分布の時間発展バイオセンシングをNVアレイを用いて実現する。最終的には、量子センサーとし

ての最大の利点（古典限界を破る高感度）を保ちながら、空間分解能を10nm以下の実現を目標とし、単一分子・細胞の磁場・電場・温度イメージングを目指す。

### 3. 研究の方法

図1にダイヤモンド表面付近の単一のNV電子スピン（矢印）をセンサーとして、その上に置かれた分子中の個々の原子の核磁気共鳴を測定し（化学種の同定）、空間分布を決定するチップの例を示す。また図2にダイヤモンド表面付近に配置されたNV電子スピンアレイ中の個々のNV（矢印）をセンサーピクセルとして、その上に置かれた分子中の原子の核磁気共鳴・電位・温度の空間分布を決定するチップの例を示す。個々のNVセンサーのスピンは光学顕微鏡下におかれたチップに緑色の励起光を照射し、スピン状態に応じて得られる赤色の発光を検知することで容易に実施する。すべての測定は室温で行う。

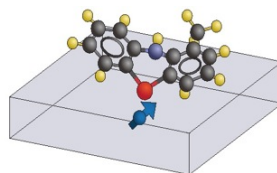


図1

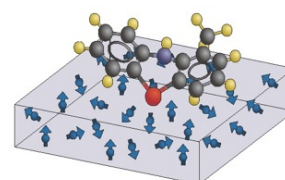


図2

### 4. これまでの成果

図1のスキーム。ダイヤモンド表面上に

測定対象とする分子を置き、その分子を構成する個々の原子核スピンから生じる磁場を、単一NVセンサー（電子スピン）で量子計測するためには、NVセンサーを表面5nm以内の浅さに配置する必要がある。また、感度はNV電子スピンの量子情報保持時間（コヒーレンス）で決まるため100  $\mu$  秒で浅さ5nm、10  $\mu$  秒で2-3nm程度が目安となる。この単一極浅・長コヒーレンスNVペア作製のためにこれまでに2種類の手法を採用した。

1つ目はプラズマCVD成長中に、天然存在比が極めて低い<sup>15</sup>N同位体を添加することで、超微細構造の違いから、ダイヤモンドバルク中に自然に存在する<sup>14</sup>NVと、表面近傍に意図的に添加された<sup>15</sup>NVを見分けるものである。系統的な実験を行い、成長中のN/Cが約6%のときに、表面から5nm以内の浅さにコヒーレンス時間が10  $\mu$  秒以上の単一NVが生成できることを明らかにした。このコヒーレンスはマイクロ波パルス手法で100  $\mu$  秒以上に延長できるために当初目標の達成に成功した。2つ目は、ダイヤモンド表面上に意図的に堆積したSiO<sub>2</sub>薄膜をとおして窒素イオン注入を行い、ダイヤモンド表面付近（すなわち極浅の位置）に<sup>15</sup>NVを集中的に分布させる手法の開発である。このようにして添加したNVセンサーを用いて<sup>13</sup>Cと<sup>15</sup>N核スピン相互作用に基づくスペクトルが得られた。これは、単一NV電子スピンを用いて、単一窒素核スピンと、単一炭素核スピンを検知するという当初目標を達成した成果である。

図2のスキームは、複数のNV群をセンサーとして用いることで感度を飛躍的にあげる、または、NV集合体中の個々のNVをピクセルとしてイメージングに応用する提案である。この目的にも、コヒーレンスが長く、NV電子磁気共鳴幅が狭い試料を作製する必要がある。そこで産総研・渡邊がCVD成長方法を最適化し、10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>の超高濃度のNVにおいて共鳴線幅200kHzという画期的なセンサー試料を作ることに成功した。この試料においてある磁場周辺では外部から印加した静磁場の変化に対してコヒーレンスが敏感に変化し、その中でも例えば52mTを選ぶことで、1秒間の積算で最小磁場35nTが計測可能な世界最高峰の感度が得られることを発見した。この数値は当初目標（単一核スピン検知レベル）を大幅に上回る感度である。

## 5. 今後の計画

当初計画通りにセンサー技術は開発できたため、これからはセンシング装置の開発およびセンシング実験に移行する。

## 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- J. Herrmann, et. al., “Polarization- and Frequency- Tunable Microwave Circuit for Selective Excitation of Nitrogen-Vacancy Spins in Diamond,” Appl. Phys. Lett. **109**, 183111 (2016).
- H. Watanabe, et. al., “Formation of Nitrogen-Vacancy Centers in Homoepitaxial Diamond Thin Films Grown via Microwave Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition,” IEEE Transactions on Nanotechnology **15**, 614-618 (2016).
- K. Sasaki, et. al., “Broadband, Large-Area Microwave Antenna for Optically Detected Magnetic Resonance of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond,” Rev. Sci. Instrum. **87**, 053904 (2016).
- E. E. Kleinsasser, et. al., “High Density Nitrogen-Vacancy Sensing Surface Created via He<sup>+</sup> Ion Implantation of <sup>12</sup>C Diamond,” Appl. Phys. Lett. **108**, 202401 (2016).
- K. M. Itoh, “Quantum-Assisted Sensing Using Nitrogen-Vacancy (NV) Centers in Diamond,” AAPPS Bulletin **25**, 12-16 (2015). (招待解説論文)
- 伊藤公平, 「ダイヤモンド中の単一電子スピンを用いた超高感度磁場測定」, 応用物理, Vol. 84, No. 1, 52-55 (2015). (招待解説論文)
- K. M. Itoh and H. Watanabe, “Isotope Engineering of Silicon and Diamond for Quantum Computing and Sensing Applications,” MRS Communications **4**, 143-157 (2014). (招待解説論文)

以上は代表的な論文。発表論文総数は37編。

ホームページ等

伊藤公平研究室

[https://www.appi.keio.ac.jp/Itoh\\_group/jp/](https://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/jp/)

本プロジェクトの解説ビデオ

<https://www.youtube.com/watch?v=hp2j8qrIrfE>