

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04653

研究課題名（和文）ダイヤモンドNV中心の量子状態高度制御による量子センシング顕微鏡計測研究

研究課題名（英文）Quantum sensing research by utilizing the quantum state of NV centers in diamond

研究代表者

水落 憲和（Mizuochi, Norikazu）

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：00323311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではダイヤモンド中の発光中心の優れた特性に注目し、それらを用いた量子センシング顕微鏡計測装置、及び量子センシング手法の開発を行った。低周波信号の新規高感度量子センシング手法開発、多次元NMR計測のための新たな量子センシング手法開発、微小ナノダイヤモンド量子センサで温度計測、高品質ダイヤモンド材料作製技術開発などを独自に行って成果が得られた。また、磁場感度や温度感度の高感度化を実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核磁気共鳴応用のための新たな量子センシング手法を考案した点は、NV中心を用いた微小領域における構造解析において学術的意義のある成果と考えられる。ナノダイヤモンドにおける世界最小径での感度見積もりの成功は、今後、細胞内などの微小領域での量子センシングが期待され、生命科学分野における応用に道を拓き、学術的意義のある成果と考えられる。ターシャリブチルホスフィンを用いて高品質なリンドープn型ダイヤモンドが合成できた点は、量子センシングのみならず、パワーエレクトロニクスなど、幅広いダイヤモンドの応用分野において意義があり、社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on the excellent properties of the color centers in diamond, and developed a quantum sensing microscope and quantum sensing method using these. We independently developed a new highly sensitive quantum sensing method for low-frequency signals, a new quantum sensing method for multidimensional NMR measurement, temperature measurement with a micro-nanodiamond quantum sensor, and technology development for producing high-quality diamond materials, and achieved results. We also achieved high sensitivity in magnetic field sensitivity and temperature sensitivity.

研究分野：応用物理

キーワード：量子センサ ダイヤモンド NV中心 スピン 発光中心 量子計測 ナノダイヤモンド

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド中の窒素-空孔複合体 (NV) 中心は優れたスピン特性及び光学特性を有する。特筆すべき点は、通常のアンサンブル系のみならず単一スピンも室温において光検出・操作でき、且つ量子状態を室温で制御し、活用できる点である。室温動作、極めて長いスピンコヒーレンス時間 (T_2) やナノダイヤモンド粒子の安定性、回折限界を超えた超解像蛍光観測手法の適用実証などから、他の既存センサや他の材料に比べ、感度と空間分解能において、際立って優れた性能を有している。感度は室温で超伝導量子干渉計センサ (SQUID) 並みの磁気感度も期待でき、空間分解能は、ナノレベルの空間分解能も可能である。図1に磁場センサの応用例を示したが、生体系を含め幅広い分野での応用が期待されている。

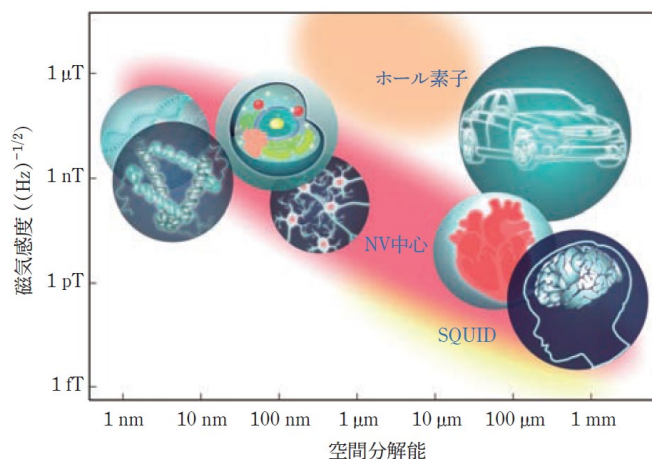


図1. NV中心センサの磁気感度と空間分解能からみた応用例. 脳磁、心磁、車載センサ、細胞内計測、タンパク質物質の構造解析等. ピンク色の領域がNV中心で期待される磁気感度と空間分解能を示した領域. (応用物理, 87, 251-261 (2018).)

更にそのスピンをプローブとし、磁場のみならず、電場、温度、pHを計測でき、同時にこれらを測定できるセンサは他にない。電場測定では細胞膜における活動電位測定、温度計測においては細胞内の化学反応追跡、生命維持の仕組み解明などの研究が期待される。近年の生命科学分野の研究では、一つ一つの細胞が幅広い多様性、乱雑さを有していることが明らかになり、その個別の振る舞いを通して生命の本質に対する理解が深まると考えられ、NVによる革新的計測技術実現による科学発展への寄与は大きいと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、量子状態高度制御技術開発、高感度量子センシング計測技術開発、材料作製技術開発により、磁場、温度等の更なる高感度化を室温で実現し、ダイヤモンド中の発光中心を用いた革新的バイオ計測実現へ研究を展開することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、全反射照明蛍光顕微鏡を基本構造とする、ダイヤモンド中のNV中心を用いた高感度量子センシング顕微鏡装置を自作し、これにより、計測を行った。顕微鏡装置の真と試料付近概略図を図2に示した。本装置では、パルス核磁気共鳴 (NMR) を行えるようにした。また、スピンを励起するための振動磁場に関して、コイルを設計して改良を行った。温度計測に関しては温調システムの導入により、改良した。

ダイヤモンド合成は既存設備である化学気相法合成装置 (CVD法) を用いて行った。リンドープn型ダイヤモンド合成では、一般にはフォスフィンを用いるが、より安全性の高いターシャルブチルフォスフィンをドーピングガスとして用いた。窒素濃度やNV中心の生成効率などの特性評価は、代表者グループの既存設備である電子スピン共鳴装置、自作共焦点レーザー顕微鏡システムや、分光器を導入して行った。各プロセスにおけるNV生成量やスピンコヒーレンス時間 (T_2) 等の評価情報をフィードバックしながら、最適な材料作製最適条件を探索した。爆轟法ナノダイヤモンドはダイセル社との共同研究により得られたものを用いた。

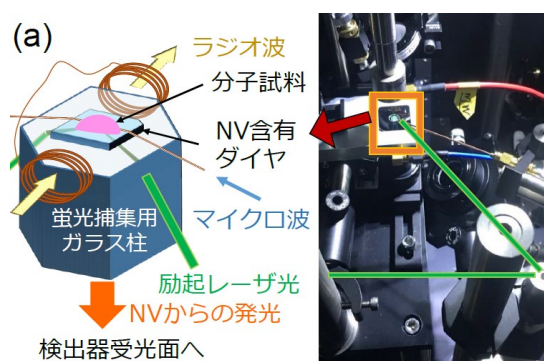


図2. (a) NVを用いた独自の自作高感度量子センシング顕微鏡装置の写真(右)と試料付近概略図(左).

4. 研究成果

本研究ではダイヤモンド中の NV 中心を用いた量子センシング顕微鏡計測の開発を行った。各研究テーマの成果を以下に記す。

【低周波信号の新規高感度量子センシング手法開発】

本研究では核磁気共鳴 (NMR) 応用のための新たな量子センシング手法を考案した。近年、量子ヘテロダイン (Qdyne) 法とよばれる、原理的にはスペクトル線幅を任意に先鋭化可能な手法が提案された。この手法により、NV 中心による核磁気共鳴 (NMR) 計測において、構造解析を行えるようなスピン間結合が観測できるほどのレベルの先鋭なスペクトル線幅が得られることが実証された。しかし、Qdyne 法での交流磁場計測では、数十 kHz 程度の周波数で最大感度を有し、周波数が変わると著しく感度が落ちるといった欠点があった。本研究では、周波数にほぼ依存せず、高感度を維持する新たな量子センシング手法を考案した。本手法では、自由誘導減衰信号計測を繰り返し、信号 (磁場) 強度に応じてスピニコヒーレンスの位相の変化が計測され、信号 (磁場) 強度を計測する。考案した手法と既存の手法の感度の周波数依存性をシミュレーションにより比較した結果を図 3 に示す。更に本研究では、この手法を用い、図 4 に示したように、水分子の水素を低周波数 (数 Hz) で実験的に計測した。これまで NV 量子センサを用いて計測した NMR 信号の線幅としては世界最小線幅 (1.6 Hz) を実証した。本成果は、Phys. Rev. Appl 誌に掲載され、論文は Editors' Suggestion に選ばれた。今回開発した手法は NMR 以外にも、低周波領域など幅広い周波数領域での応用研究で用いられることが期待される。

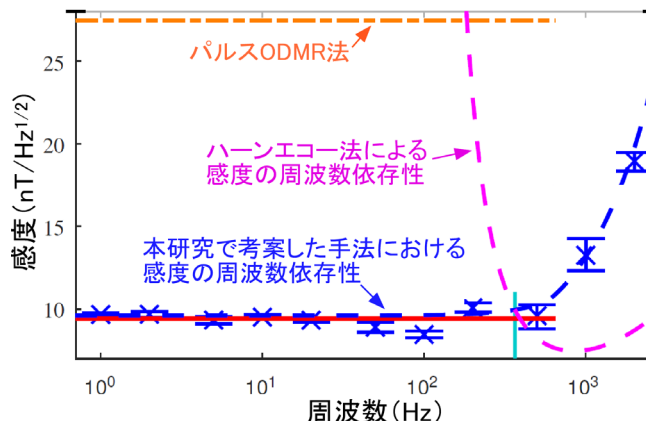


図 3. 新規低周波交流磁場の測定法による感度の周波数依存性。青色で示した点線がシミュレーション結果で青色の×点が実験結果。従来技術であるハーンエコー法による感度の周波数依存性 (ピンク色点線) とパルス光検出磁気共鳴法 (オレンジ色点線) との比較 (シミュレーション) も含めて示している。

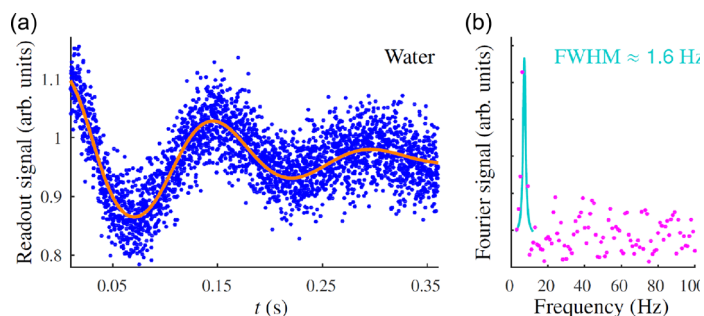


図 4. 新規手法により NV 中心によって計測された水分子の NMR 計測。(a) 水分子の水素核スピンの自由誘導減衰 NMR 信号、(b) (a) をフーリエ変換して得られた NMR スペクトル。

【多次元 NMR 計測のための新たな量子センシング手法開発】

本研究では、多次元 NMR 計測のための新たな量子センシング手法を考案した。NV 中心を用いた NMR 計測の先行研究における手法の課題として、ヘテロダイン検波を元としているものの、単相検波であることが挙げられる。単相検波では、基準周波数からのずれが測定値として得られ、高低どちらのずれかは原理的に不明である。そこで本研究では、受信機位相を任意に設定可能な量子測定手法を新たに考案した。これにより、NV 中心を用いた極少量 NMR (NV-NMR) において直交検波が可能となり、更に従来 NMR において使用される位相系手法の NV-NMR への導入が実現する。今回、交流磁場測定を行い、直交検波を実証した。また僅かな位相、振幅ずれによる誤差を修正する手法を導入して補正を検証した。更に、二次元 NMR での位相回しによるコヒーレンス選択を行い、シミュレーション結果と比較して期待通りの結果を得た。

【微小ナノダイヤモンド量子センサで温度計測】

また、本研究ではイメージングにも重要となるナノダイヤモンド (ND) の中でも、小粒径の ND を安価かつ大量に得られる爆轟法 ND (DND) に注目し、DND 中の NV 中心、シリコン-空孔 (SiV) 中心、ゲルマニウム-空孔 (GeV) 中心を用いた温度センシングを実施した。実験結果を図 5 に示す。本研究では、独自に開発した DND において、強く安定した光検出磁気共鳴 (ODMR) 信号を持つ NV 中心を多数計測することに成功した。これは、電子スピン共鳴スペクトルから、表面の不純物が多く存在していることが示唆され、それらを除くすれば光検出磁気共鳴信号強度が強くなるのではないかと着想し、72 時間という長時間の熱混酸処理を行った結果として得

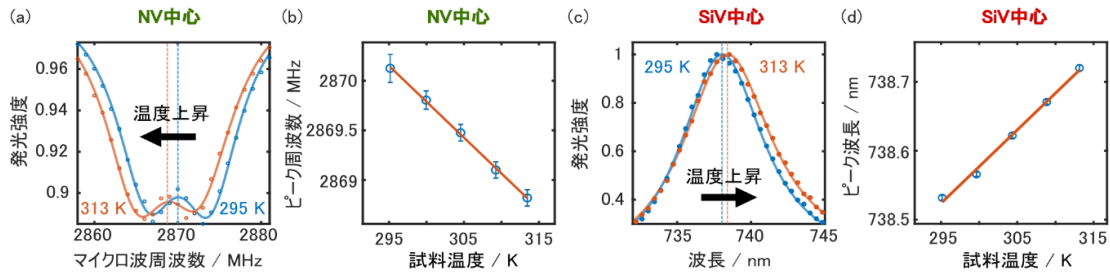


図5. (a) DND中のNV中心に対して2つの温度で測定したODMRスペクトル. (b) ODMRスペクトルピーク周波数の温度依存性. (c) Si-DND中のSiV中心に対して2つの温度で測定した発光スペクトル. (d) 発光スペクトルピーク波長の温度依存性.

られた。これにより、NV中心を含むDNDでは初めて温度感度計測を実現した。これまでに温度感度が計測されたNDの最小粒径は、NV中心を含むもので約50 nmであった。細胞核等の細胞小器官への導入には粒径30 nm以下が望まれていたが、本研究で用いたDNDは透過型電子顕微鏡による粒径分布からDNDの平均粒径は11.2 nmと確認し、温度感度を計測したダイヤモンドセンサとして世界最小径である。感度測定では、DNDの凝集体で $0.36 \text{ K}/(\text{Hz})^{1/2}$ と良い温度感度を有することが確認された。

今回、図5にも示したように、NV中心とSiV中心が同時に入ったDNDにおいても温度センサとして利用できることを確認できた。DND中にNV中心だけでなく、NV中心よりも長波長側(740 nm付近)に鋭い発光スペクトルを示すSiV中心も存在することは、互いに異なる発光を利用でき、多角的な温度計測ができるといった観点で重要となる。生命科学分野では、NV中心を含むナノダイヤモンドを細胞核やミトコンドリア等の細胞小器官に導入できれば、微小領域における高感度計測が期待されるが、これまで生体計測に用いられてきたナノダイヤモンドの粒径は100 nm前後で、細胞膜や核膜へのダメージを抑えて細胞深部に導入するには粒径30 nm以下が要求される。図6に、本研究で計測した温度感度とそれらのナノダイヤモンドの粒径、及び他のグループの結果を記載している。我々の結果が、温度感度を計測したダイヤモンドセンサとして世界最小径であることが分かる。本研究で実証した発光中心を含んだ爆轟ナノダイヤモンドを用いることで、今後、細胞内などの微小領域での量子センシングが期待される。

【高品質ダイヤモンド材料作製技術開発】

ダイヤモンド材料技術開発に関しては、高品質ダイヤモンドの合成を行った。近年、リンドーピングn型ダイヤモンド中のNV中心で、室温下固体系中の電子スピンで最長のスピンコヒーレンス時間($T_2 \approx 2.4 \text{ ms}$)が報告された。また、リンドーピングダイヤモンドでは、NV中心の負電荷状態の安定性が改善されることも本研究の代表者グループから報告している。これらの成果から、NV量子センサの高感度化の観点でダイヤモンドへのリンドーピングの重要性が高まっている。リンドーピングn型ダイヤモンドは京大でのCVD合成装置により合成した。リンドーピングダイヤモンド合成における課題として、リンのドーピングガスとして一般的にホスフィン(PH_3)が用いられているが、 PH_3 は非常に危険なガスの為、導入・運用に少々難点がある。そこで比較的 안전한ターシャリブチルホスフィン(TBP)を用いてのリンドーピングダイヤモンド合成を試みた。結果として合成条件を最適化することにより、ダイヤモンド中の不純物を、微量のリンが取り込まれつつ、窒素混入を抑制できたことを二次イオン質量分析法等により確認した。異なる圧力で合成した試料中の不純物濃度を図7に示した。また、図8に示したように、室温における単一NV中心の T_2 は自作共焦点レーザー顕微鏡により、ハーン・エコー法によって測定した。合成した試料において、従来報告されている室温での世界最長値($T_2 = 2.4 \text{ ms}$)に匹敵する $T_2 (2.23 \text{ ms})$ を有する単一NV中心が生成していることを確認した。更に、NV軸の配向性についても、[111]方向への高い配向性を確認し、高品質ダイヤモンド合成に成功した。今後の量子センサ感度向上に資する結果である。

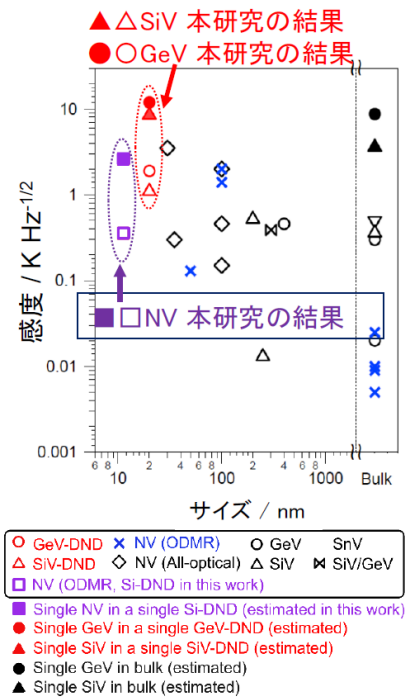


図6. 本研究で計測した温度感度(縦軸)と、それらのナノダイヤモンドの粒径(横軸). 紫で記載した点が、本研究で計測したDND中のNV中心の結果. 赤で記載した点がDND中のSiV中心、GeV中心の結果. その他は他のグループの結果を記載. 詳細はAPL Materials 12, 051102 (2024)に記載.

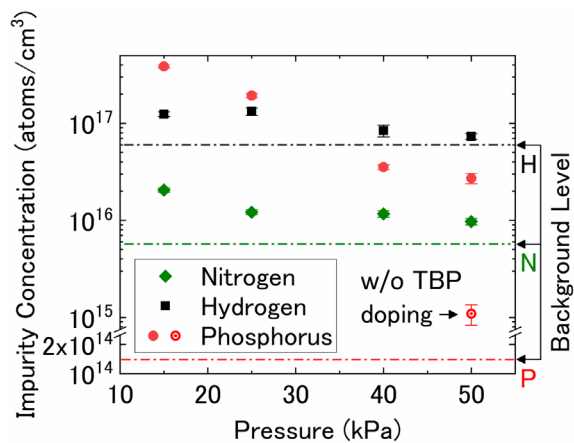


図7. 異なる圧力で合成した試料中の不純物濃度. 不純物濃度は二次イオン質量分析法により見積もった.

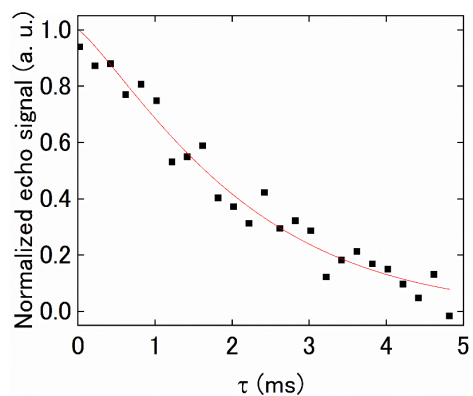


図8. エコー信号計測結果(黒点). 赤線によるフィッティングにより、 $T_2 = 2.23$ msが見積もられた.

また、本研究ではリンドーピング n 型ダイヤモンドの電気的特性の評価も行った。高温ホール測定による結果と解析から、 PH_3 と遜色無い室温移動度 $580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られた。これは TBP 起因による室温移動度において世界最高値であり、高品質なリンドーピング n 型ダイヤモンドが合成できていることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 6件）

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 So Frederick T.-K., Hariki Nene, Nemoto Masaya, Shames Alexander I., Liu Ming, Tsurui Akihiko, Yoshikawa Taro, Makino Yuto, Ohori Masanao, Fujiwara Masanori, Herbschleb Ernst David, Morioka Naoya, Ohki Izuru, Shirakawa Masahiro, Igarashi Ryuji, Nishikawa Masahiro, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Small multimodal thermometry with detonation-created multi-color centers in detonation nanodiamond | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 APL Materials | 6. 最初と最後の頁 511021 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0201154 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Fujiwara Masanori, Fu Haining, Hariki Nene, Ohki Izuru, Makino Yuto, Liu Ming, Tsurui Akihiko, Yoshikawa Taro, Nishikawa Masahiro, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Germanium-vacancy centers in detonation nanodiamond for all-optical nanoscale thermometry | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 181903 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0168194 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Geng Jianpei, Shalomayeva Tetyana, Gryzlova Mariia, Mukherjee Amlan, Santonocito Santo, Dzhavadzade Dzhavid, Dasari Durga Bhaktavatsala Rao, Kato Hiromitsu, Stoehr Rainer, Denisenko Andrej, Mizuochi Norikazu, Wrachtrup Joerg | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Dopant-assisted stabilization of negatively charged single nitrogen-vacancy centers in phosphorus-doped diamond at low temperatures | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 npj Quantum Information | 6. 最初と最後の頁 110 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-023-00777-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Deguchi Hiroshige, Hayashi Tsukasa, Saito Hiroya, Nishibayashi Yoshiki, Teramoto Minori, Fujiwara Masanori, Morishita Hiroki, Mizuochi Norikazu, Tatsumi Natsuo | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Express | 6. 最初と最後の頁 062004 ~ 062004 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acd836 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Fujiwara Masanori, Uchida Gaku, Ohki Izuru, Liu Ming, Tsurui Akihiko, Yoshikawa Taro, Nishikawa Masahiro, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 198 |
| 2. 論文標題 All-optical nanoscale thermometry based on silicon-vacancy centers in detonation nanodiamonds | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Carbon | 6. 最初と最後の頁 57 ~ 62 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2022.06.076 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Herbschleb E.D., Ohki I., Morita K., Yoshii Y., Kato H., Makino T., Yamasaki S., Mizuochi N. | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Low-Frequency Quantum Sensing | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Applied | 6. 最初と最後の頁 034058-1 ~ 11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.18.034058 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Nishikawa Tetsuri, Morioka Naoya, Abe Hiroshi, Morishita Hiroki, Ohshima Takeshi, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 121 |
| 2. 論文標題 Electrical detection of nuclear spins via silicon vacancies in silicon carbide at room temperature | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 184005 ~ 184005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0115928 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kawase Riku, Kawashima Hiroyuki, Kato Hiromitsu, Tokuda Norio, Yamasaki Satoshi, Ogura Masahiko, Makino Toshiharu, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 n-type diamond synthesized with tert-butylphosphine for long spin coherence times of perfectly aligned NV centers | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 174504 ~ 174504 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101215 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Fujiwara Masanori, Inoue Shunsuke, Masuno Shin-ichiro, Fu Haining, Tokita Shigeki, Hashida Masaki, Mizuochi Norikazu | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Creation of NV centers over a millimeter-sized region by intense single-shot ultrashort laser irradiation | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 APL Photonics | 6. 最初と最後の頁 036108 ~ 036108 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0137093 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Takemura Y., Hayashi K., Yoshii Y., Saito M., Onoda S., Abe H., Ohshima T., Taniguchi T., Fujiwara M., Morishita H., Ohki I., Mizuochi N. | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 Broadband microwave antenna for uniform manipulation of millimeter-scale volumes of diamond quantum sensors | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 224501 ~ 224501 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0128406 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Mizuochi Norikazu | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Magnetometry goes nuclear | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature Physics | 6. 最初と最後の頁 1280 ~ 1281 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01798-3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Tabuchi Hibiki, Matsuzaki Yuichiro, Furuya Noboru, Nakano Yuta, Watanabe Hideyuki, Tokuda Norio, Mizuochi Norikazu, Ishi-Hayase Junko | 4. 巻 133 |
| 2. 論文標題 Temperature sensing with RF-dressed states of nitrogen-vacancy centers in diamond | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 024401 ~ 024401 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0129706 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kurita Torataro, Shimotsuma Yasuhiko, Fujiwara Masanori, Fujie Masahiro, Mizuochi Norikazu, Shimizu Masahiro, Miura Kiyotaka | 4. 巻 118 |
| 2. 論文標題 Direct writing of high-density nitrogen-vacancy centers inside diamond by femtosecond laser irradiation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 214001 ~ 214001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0049953 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Prananto Dwi, Kainuma Yuta, Hayashi Kunitaka, Mizuochi Norikazu, Uchida Ken-ichi, An Toshu | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Probing Thermal Magnon Current Mediated by Coherent Magnon via Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Applied | 6. 最初と最後の頁 64058 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.064058 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kainuma Yuta, Hayashi Kunitaka, Tachioka Chiyaka, Ito Mayumi, Makino Toshiharu, Mizuochi Norikazu, An Toshu | 4. 巻 130 |
| 2. 論文標題 Scanning diamond NV center magnetometer probe fabricated by laser cutting and focused ion beam milling | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 243903 ~ 243903 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0072973 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 So Frederick T.-K., Shames Alexander I., Terada Daiki, Genjo Takuya, Morishita Hiroki, Ohki Izuru, Ohshima Takeshi, Onoda Shinobu, Takashima Hideaki, Takeuchi Shigeki, Mizuochi Norikazu, Igarashi Ryuji, Shirakawa Masahiro, Segawa Takuya F. | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Anomalous Formation of Irradiation-Induced Nitrogen-Vacancy Centers in 5 nm-Sized Detonation Nanodiamonds | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 5206 ~ 5217 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c10466 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 D. Terada, F. T. K. So, B. Hattendorf, T. Yanagi, E. Osawa, N. Mizuochi, M. Shirakawa, R. Igarashi, T. F. Segawa | 4. 巻 in press |
| 2. 論文標題 A simple and soft chemical deaggregation method producing single-digit detonation nanodiamonds | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale Advances | 6. 最初と最後の頁 in press |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

[学会発表] 計31件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 15件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Quantum sensing with NV centers in diamond for light dark matter search |
| 3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe, Particles, and Other Applications (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Manipulation and creation of NV centers in diamond by laser irradiation |
| 3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2023) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Fujiwara |
| 2. 発表標題 Creation of nitrogen-vacancy centers in diamond over a wide region by single-shot femtosecond laser pulse |
| 3. 学会等名 The 65th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水落 憲和 |
| 2. 発表標題 超短レーザーパルスによるダイヤモンド量子センサ源の作製 |
| 3. 学会等名 多元技術融合光プロセス研究会2023年度第3回研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 森田 航希, 大木 出, 徳田 規夫, 水落 憲和 |
| 2. 発表標題 NV 中心による二次元 NMR を目指した直交検波手法の開発 |
| 3. 学会等名 応用物理学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ernst David Herbschleb, Izuru Ohki, Kohki Morita, Yoshiharu Yoshii, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Satoshi Yamasaki, Norikazu Mizuochi |
| 2. 発表標題 Coherence-based quantum sensing of low-frequency fields |
| 3. 学会等名 応用物理学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川島 宏幸, 川瀬 凜久, 加藤 宙光, 徳田 規夫, 山崎 聡, 小倉 政彦, 牧野 俊晴, 森岡 直也, 水落 憲和 |
| 2. 発表標題 TBP による(111)面リンドープ n 型ダイヤモンド膜のホール移動度 |
| 3. 学会等名 応用物理学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川瀬 凜久, 川島 宏幸, 加藤 宙光, 徳田 規夫, 山崎 聡, 小倉 政彦, 牧野 俊晴, 水落 恵和 |
| 2. 発表標題 圧力によるCVD ダイヤモンドの 不純物取り込み制御と NV中心コヒーレンス時間の改善 |
| 3. 学会等名 第37回ダイヤモンドシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川島 宏幸, 川瀬 凜久, 加藤 宙光, 徳田 規夫, 山崎 聡, 小倉 政彦, 牧野 俊晴, 森岡 直也, 水落 恵和 |
| 2. 発表標題 TBP を用いた(111)面リンドープ n 型ダイヤモンド膜のホール移動度の向上 |
| 3. 学会等名 第37回ダイヤモンドシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 E. D. Herbschleb, I. Ohki, K. Morita, Y. Yoshii, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, and N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Quantum sensing of low-frequency fields |
| 3. 学会等名 The American Physical Society's March Meeting 2024 (APS2024) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 E. D. Herbschleb, S. Chigusa, R. Kawase, H. Kawashima, M. Hazumi, K. Nakayama, N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Robust quantum sensing via statistics |
| 3. 学会等名 The American Physical Society's March Meeting 2024 (APS2024) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 神山 直也, 藤原 正規, 森岡 直也, 西川 哲理, 鈴木 智達, 神長 輝一, 五十嵐 龍治, 水落 恵和 |
| 2. 発表標題 ナノダイヤモンド中のN V 中心を用いた高感度磁気センシングに向けて |
| 3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Quantum sensing by NV centers in diamond semiconductor |
| 3. 学会等名 The International Symposium on Quantum Science, Technology and Innovation (Quantum Innovation 2022) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 High sensitive quantum sensing of NV centers in diamond semiconductor |
| 3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Quantum Sensing and Ultra-long Spin Coherence of NV Centers in Diamond Semiconductor |
| 3. 学会等名 The 20th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Quantum sensing with diamond spintronics |
| 3. 学会等名 International Workshop of Spin/Quantum Materials and Devices (IWSQMD) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンドを用いた量子センシング研究 |
| 3. 学会等名 量子科学技術研究開発機構(QST)量子機能創製拠点シンポジウム(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心の基礎と応用 |
| 3. 学会等名 ワイドギャップ半導体学会、第7回研究会(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンド中のNV中心の特徴と応用研究 |
| 3. 学会等名 日本学術振興会、アモルファス・ナノ材料と応用第147委員会、第150回研究会(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤原 正規, 井上 峻介, 升野 振一郎, 付 海寧, 時田 茂樹, 橋田 昌樹, 水落 憲和 |
| 2. 発表標題 超短パルスレーザー単一ショットによるダイヤモンド NV中心の広域形成 |
| 3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 High sensitive and high dynamic range quantum sensing with diamond semiconductors |
| 3. 学会等名 4th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems / 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (Joint Conference) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 Nitrogen-Vacancy centers in diamond for quantum sensing |
| 3. 学会等名 KEK IPNS-IMSS-QUP workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンドNV量子センサ研究の進展 |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心の量子状態制御 |
| 3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水落憲和 |
| 2. 発表標題 ダイヤモンドを用いた高感度量子センサ開発研究 |
| 3. 学会等名 次世代センサ協議会 第59回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム 量子センサ開発研究 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Izuru Ohki, Kohki Morita, Norikazu Mizuochi |
| 2. 発表標題 Micron-scale high-resolution NMR spectroscopy using Nitrogen-Vacancy centers in diamond |
| 3. 学会等名 Joint conference of 22nd International Society of Magnetic Resonance Conference and 9th Asia-Pacific NMR Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 F. T.-K. So, A. I. Shames, D. Terada, T. Genjo, H. Morishita, I. Ohki, T. Ohshima, S. Onoda, H. Takashima, S. Takeuchi, E. Osawa, N. Mizuochi, R. Igarashi, M. Shirakawa, T. F. Segawa |
| 2. 発表標題 Formation of Nitrogen-Vacancy centers in nanodiamonds: Dependence on Size and Type |
| 3. 学会等名 Joint conference of 22nd International Society of Magnetic Resonance Conference and 9th Asia-Pacific NMR Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| | |
|---------|--|
| 1. 発表者名 | K. Miyanishi, T. F. Segawa, K. Takeda, I. Ohki, S. Onoda, T. Ohshima, H. Abe, H. Takashima, S. Takeuchi, A. I. Shames, K. Morita, Y. Wang, F. T.-K. So, D. Terada, R. Igarashi, A. Kagawa, M. Kitagawa, N. Mizuochi, M. Shirakawa, M. Negoro |
| 2. 発表標題 | Room Temperature Hyperpolarization of Polycrystalline Samples with Optically Polarized Triplet Electrons |
| 3. 学会等名 | 2021 Fall Materials Research Society (MRS) meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|--------------------------------|
| 1. 発表者名 | Ernst David Herbschleb |
| 2. 発表標題 | ダイヤモンド量子センサの高感度化研究 |
| 3. 学会等名 | 応用物理学会固体量子センサ研究会 第2回研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | E. D. Herbschleb, Y. Ohki, K. Morita, Y. Yoshii, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 | Remote Nuclear Magnetic Resonance Detected by Low-Frequency Quantum Sensing |
| 3. 学会等名 | 2021 Fall Materials Research Society (MRS) meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | E. D. Herbschleb, Y. Ohki, K. Morita, Y. Yoshii, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi |
| 2. 発表標題 | High-resolution low-frequency quantum sensing at ultra-low fields |
| 3. 学会等名 | 日本物理学会 第77回年次大会 |
| 4. 発表年 | 2022年 |

〔図書〕 計3件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 監修者 佐橋政司、湯浅新治、遠藤哲郎)、分担執筆者 水落憲和 | 4. 発行年 2024年 |
| 2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 760 |
| 3. 書名 スピントロニクスハンドブック | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 荒川 泰彦、島野 亮、金光 義彦、岩本 敏、高原 淳一、立間 徹 | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 992 |
| 3. 書名 光と物質の量子相互作用ハンドブック | |

| | |
|------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 根来 誠 | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 336 |
| 3. 書名 量子センシングハンドブック | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学化学研究所無機フォトニクス材料研究領域HP
<http://mizuochilab.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>
京都大学化学研究所無機フォトニクス材料研究領域HP
<http://mizuochilab.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 白川 昌宏 (Shirakawa Masahiro) (00202119) | 京都大学・工学研究科・教授 (14301) | |
| 研究分担者 | 大木 出 (Ohki Izuru) (80418574) | 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子生命科学研究所・主任研究員 (82502) | |
| 研究分担者 | 徳田 規夫 (Tokuda Norio) (80462860) | 金沢大学・ナノマテリアル研究所・教授 (13301) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|------------------------------------|--|--|--|
| スイス | ETH Zurich | | | |
| イスラエル | Ben-Gurion University of the Negev | | | |
| ドイツ | Stuttgart University | | | |