

令和元年9月5日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02088

研究課題名(和文)ダイヤモンドによる超高感度・超高分解能量子ナノセンサ

研究課題名(英文)Diamond quantum nano-sensor with high sensitivity and high resolution

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) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンド中の単一窒素 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し、超高感度量子センサとして期待される。その感度はコヒーレンス時間が長いほどよくなる。今回我々は、リンドーピング型ダイヤモンドを用いた研究で、室温で最長となる非常に長いコヒーレンス時間を有するNV中心が存在することを見出した。このコヒーレンス時間はNV中心のみならず、固体系の電子スピンにおいて室温での世界最長となる。長くなる理由は複合欠陥の生成が抑制されたためと考えられる。更に、交流磁場感度を測定し、室温での単一NV中心の感度としてはこれまでで一番良いことを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでNV中心は電気を通さない絶縁体ダイヤモンドで主に研究されてきた。今回、リンをドーピングしたダイヤモンド半導体中のNV中心で、固体系で室温において最長となるコヒーレンス時間を達成した事は、今後の半導体デバイス応用という観点から意義深い。医療分野、化学物質構造解析分野、各種電子デバイス評価センサ分野等への応用が期待されるNV中心において、将来の超高感度量子センサの実現、及び更なる高感度化へ貢献したという観点から、本研究結果の社会的意義は大きいと言える。また磁気ノイズ源となりえるリンをドーピングしたにも拘わらず、コヒーレンス時間が伸びた点は学術的に重要で、ダイヤモンド高品質化に貢献する結果である。

研究成果の概要(英文)：Solid-state single spins are promising resources for quantum sensing, quantum-information processing and quantum networks, because they are compatible with scalable quantum-device engineering. Here, we demonstrate the synthesis and application of phosphorus-doped n-type single-crystal chemical vapour deposition diamond with remarkably long spin-coherence times. Contrary to widespread belief, the doping with an impurity (phosphorus) reduced the magnetic noise from the residual paramagnetic defects. Being placed in such a spin-free lattice, single electron spins show the longest inhomogeneous spin-dephasing time and Hahn-echo spin-coherence time ever observed in room-temperature solid-state systems. Also, we show that they have the best magnetic-field sensitivity with a single electron spin at room temperature. From analysing the noise spectrum, while not being limited by nuclear spins, the decoherence is probably dominated by residual impurities and defects.

研究分野：応用物理

キーワード：ダイヤモンド 量子センサ NV中心 コヒーレンス時間 T2

## 1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド中の単一窒素空孔複合体 (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、固体系では唯一、単一スピンを室温において光検出・操作できる点である。その単一スピンをプローブとし、単一の NV 中心を用いた磁気センサ、電場センサ、温度センサに関して、近年では優れた実証研究がなされてきた。応用の際には室温動作する点は非常に重要である。また、極めて優れたスピン特性 (= 長いスピンコヒーレンス時間) やナノ粒子の安定性等から、他の既存センサに比べ、感度と空間分解能において、際立った性能を有している。

近年、単一 NV 中心を用いて表面付近の核スピンの検出が実証されたが、単一タンパク構造解析などに必須となる多次元 NMR はまだ実現されていない。主な克服すべき課題としては、ナノレベルの表面からの深さにある NV 中心の  $T_2$  の短時間化・不安定化、電荷状態の不安定化といった物質科学的な理由や、精密な装置と手法の未開発などが挙げられる。そこで、更なる高感度化のためには物質科学と物理的手法開発・装置開発の両面からの改善が必要である。

## 2. 研究の目的

センサ感度の向上には  $T_2$  の長時間化が必要となる。例えば、ショットノイズ限界領域における検出最小磁場 ( $\delta B$ ) は  $\delta B \propto 1/C\sqrt{ntT_2}$  ... (式 1) と表される。ここで  $C$  は読み出しのコントラスト、 $n$  は NV 中心の個数、 $T_2$  はスピンコヒーレンス時間である。式 1 から、 $T_2$  が長ければ長いほど、検出最小磁場が小さい、つまり感度が良くなるといえる。そこで、如何に  $T_2$  を長時間化するかという点が重要となる。本研究では、物質科学によるアプローチとしては連携研究者と共に、究極の原子レベルでの平坦 (ステップフリー) 表面によるナノレベルの深さに存在する NV 中心の  $T_2$  の長時間化や半導体 n 型ダイヤモンドを用いた電荷状態の安定化やコヒーレンス時間の長時間化を目指す。スピン特性の評価としては、単一 NV 中心のスピンを高度に量子制御するパルス磁気共鳴が可能な共焦点レーザー顕微鏡装置の構築を行い、これにより評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) 半導体 n 型ダイヤモンドを用いた電荷状態の安定化とコヒーレンス時間の長時間化

NV 中心では発光からスピンの情報を得ている。しかし励起光照射により電荷状態が、スピン情報を得ることができる -1 価に帯電した NV 中心 ( $NV^-$ ) からスピン情報を読みだせない中性状態 ( $NV^0$ ) に変化し、スピンの情報が失われてしまうという克服すべき課題があった。一般的に励起光として使用される 532 nm による励起では、 $NV^-$  は約 70% しか存在せず、残りの 30% は  $NV^0$  に変化する。我々は連携研究者の産業技術研究所で作製した n 型ダイヤモンドを用いてバルク中の NV 中心を用いると、電荷状態は安定化し、ほぼ 100% で  $NV^-$  を維持することを明らかにした。本研究では、ナノレベルの表面付近の NV 中心においても安定化とコヒーレンス時間の長時間化を目指す。ダイヤモンドにおいては n 型半導体化が難しく、CVD 法による気層添加でのみ成功しており、他の一般的なイオン注入では成功していない。世界でも数か所しか、n 型ダイヤモンド半導体は作成できず、我々は世界に先駆けて、表面付近でも電荷が安定な NV 中心の試料を作成できる可能性を秘めている。

### (2) 原子レベルでの表面平坦化による欠陥低減と表面付近の NV 中心のコヒーレンス時間の長時間化

NV 中心のセンサ応用において NV 中心は感度向上のため数ナノレベルの浅い領域に存在している必要がある。しかし、ナノレベルでの表面付近の NV 中心の  $T_2$  の短時間化・不安定化、電荷状態の不安定化が知られており、重要な克服すべき課題である。これらの原因は、有力な候補として表面付近の常磁性欠陥 (ダングリングボンド) の存在によるものと考えられている。この克服のため、本提案では、これまで本提案代表者と連携研究者の徳田博士らが世界に先駆けて行っていた原子レベルという究極の表面平坦化技術を用いることによる  $T_2$  の長時間化、安定化を目指す。この究極の平坦化にはメサ構造の作製や (111) 面方位のダイヤモンド基板を用いるなど、様々なノウハウが必要で、我々は世界に先駆けて、際立った  $T_2$  の長時間化を行える可能性を秘めている。加工は代表者らの京大における施設等で行い、金沢大の徳田氏らの CVD 合成装置を用いて行う。 $T_2$  等の特性評価は京大で行う。

## 4. 研究成果

(1) 半導体 n 型ダイヤモンドを用いた研究では、NV 中心のみならず、固体系の電子スピンにおいて室温での世界最長となる非常に長いコヒーレンス時間を有する NV 中心が存在することを我々は発見した。試料は産業技術総合研究所 (産総研) で CVD 法により合成した試料を用いた。これまでリン濃度が  $10^{15}/\text{cm}^3$  レベルの比較的リン濃度が薄いリンドープ n 型ダイヤモンドにおいて、電子スピンのコヒーレンス時間 ( $T_2$ ) の最高値は 50 マイクロ秒で、我々は 2016 年に Physical Review B 誌に論文発表していた。今回、このダイヤモンド試料よりもリン濃度が  $10^{16}/\text{cm}^3$  以上と、比較的濃度の高い試料において、非常に長い  $T_2$  が観測された。常磁性不純物であるリンを

加えると磁場ノイズ源が増えて  $T_2$  が短くなるとが考えられたが、その常識とは異なり、 $T_2$  が長くなったことは驚きであった。そこで産総研の共同研究者に、リン濃度が  $10^{15}/\text{cm}^3$  程度、 $10^{16}/\text{cm}^3$  の前半と半ば程度、 $10^{17}/\text{cm}^3$  の前半と半ば程度の試料を系統的に合成してもらい、 $T_2$  測定を行った。リン濃度以外の合成条件は同じ条件で合成してもらった。測定の結果、 $10^{16}/\text{cm}^3$  の半ば程度の試料で一番  $T_2$  が長くなった。これまで室温における電子スピンの  $T_2$  の最長報告値は 1.8 ミリ秒であったが (Nature Materials 2009) 我々は 2.4 ミリ秒を実証した。また自由誘導減衰の持続時間である  $T_2^*$  の測定も自由誘導減衰測定を行うことにより見積もった。最長報告値はこれまで 0.47 ミリ秒であったが (Science 2010) 我々は 1 ミリ秒以上を実証した。これまでアンドープ試料および窒素ドープ試料において NV 中心の研究がなされ、スピンコヒーレンス時間を短くする磁場ノイズ源の原因の候補として複数の空孔や不純物などからなる複空孔欠陥が考えられていたが、n 型ダイヤモンドによる  $T_2$  長時間化は、合成中の空孔欠陥が電荷を帯び、それらの間にクーロン反発が生じ、複合欠陥の生成が抑制されたためと考えられる。

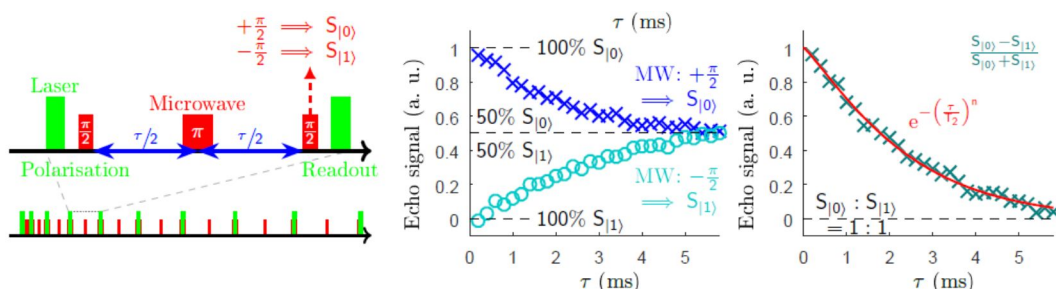


図1 ハーンエコー法による  $T_2$  測定結果：【左図】ハーンエコー法のパルス系列。Common-mode ノイズを除去するためにはハーンエコー法の最後のパルスの符号を 180 度変えて測定する。【中央図】最後のパルスの符号を 180 度変えて測定した結果 (青とシアン)【右図】青とシアンを引き算して、右図の結果が得られる。結果として 2.4 ms の  $T_2$  が見積もられた。

我々は、更に交流 (AC) 磁場感度測定を行った。 $T_2$  の長さが最長の 2.4 ミリ秒の NV 中心において、数ナノテスラ/(Hz)<sup>1/2</sup> の感度が見積もられ、単一 NV 中心における世界最高の AC 磁場感度を実証した。また、磁気シールドを施すことにより、 $T_2^*$  が最長で 1.5 ミリ秒の観測をすることができた。ノイズスペクトロスコーピー及び  $T_1$  測定によるノイズ源の評価を行った。リン濃度よりも常磁性不純物欠陥の量が多いことが分かった。これは今後の高品質合成に指針を与える重要な結果である。また、得られていた最適リン濃度と同程度のリン濃度を持つ 3 つのダイヤモンド試料を新たに測定し、同様に 2 ミリ秒以上の  $T_2$  が観測され、再現性が得られた。シングルショット測定による電荷測定も行い、 $T_2$  の長い NV においても電荷状態が 100% であることが確かめられ、リンドープによる電荷状態安定化とコヒーレンス時間の長時間化の両立を実証した。n 型ダイヤモンド半導体は NV 中心を用いたデバイスには必須となるため、その n 型ダイヤモンドにおいて最長のコヒーレンス時間が得られたことは、将来の応用研究にとって非常に意義深い基盤研究成果と言える。本成果は特許出願し、論文は Nature Communications 誌に掲載された。

(2) 原子レベル表面平坦ダイヤモンド試料の研究では、窒素ドープ量と NV 中心の生成量の最適条件や表面状態と安定性を調べるため、表面平坦化と同条件で作製した試料にて、数十 nm から数百 nm 程度の深さに存在する NV 中心を調べた。一般に、ダイヤモンドの水素終端表面においては正孔が表面付近に生成する。正孔の面密度やバルク中の不純物濃度にも依存するが、数ナノ以上の深さで、この成功は存在し得る。原子レベル表面平坦化は水素終端により実現するが、もし原子レベル平坦表面でも同様に正孔が存在すれば、 $NV^0$  に変化するなどして  $NV^-$  の電荷状態が不安定になることも懸念された。そこで我々は、電荷状態をフォトルミネッセンススペクトルやシングルショット電荷状態測定により評価した。結果として、適度な窒素がドープされている事で電荷状態が安定に  $NV^-$  になっていることが確かめられ、今後の研究につながる結果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

E. D. Herbschleb, H. Kato, Y. Maruyama, T. Danjo, T. Makino, S. Yamasaki, I. Ohki, K. Hayashi, H. Morishita, M. Fujiwara, N. Mizuochi, “Ultra-long coherence times amongst room-temperature solid-state spins”, *Nature Communications*, 査読有, **10**, 3766 (2019), DOI: 10.1038/s41467-019-11776-8  
S. Saijo, Y. Matsuzaki, S. Saito, T. Yamaguchi, I. Hanano, H. Watanabe, N. Mizuochi, J. Ishi-Hayase, “AC Magnetic Field Sensing Using Continuous-Wave Optically Detected Magnetic Resonance of Nitrogen Vacancy Centers in Diamond”, *Applied Physics Letters*, 査読有, **113**, 2018, 082405. DOI: 10.1063/1.502440

K. Hayashi, Y. Matsuzaki, T. Taniguchi, T. Shimo-Oka, I. Nakamura, S. Onoda, T. Ohshima, H. Morishita, M. Fujiwara, S. Saito, N. Mizuochi, "Optimization of temperature sensitivity using the optically detected magnetic-resonance spectrum of a nitrogen-vacancy center ensemble", *Physical Review Applied*, 査読有, **10**, 2018, 034009 DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.034009

T. Kurita, N. Mineyuki, Y. Shimotsuma, M. Fujiwara, N. Mizuochi, M. Shimizu, K. Miura, "Efficient generation of nitrogen-vacancy center inside diamond with shortening of laser pulse duration" *Applied Physics Letters*, 査読有, **113**, 2018, 211102 DOI: 10.1063/1.5054730

M. Shimizu, T. Makino, T. Iwasaki, K. Tahara, H. Kato, N. Mizuochi, S. Yamasaki, M. Hatano, "Charge state control of ensemble nitrogen vacancy center by n-i-n diamond junction", *Applied Physics Express*, 査読有, **11**, 2018, 033004 DOI: 10.7567/APEX.11.033004

T. Murai, T. Makino, H. Kato, M. Shimizu, D. E. Herbschleb, Y. Doi, H. Morishita, M. Fujiwara, M. Hatano, S. Yamasaki, N. Mizuochi, "Engineering of Fermi level by n-i-n diamond junction for control of charge states of NV centers", *Applied Physics Letters*, 査読有, **112**, 2018, 111903 DOI:10.1063/1.5010956

K. Hayashi, Y. Matsumura, S. Kobayashi, H. Morishita, H. Koike, S. Miwa, N. Mizuochi, Y. Suzuki, "Electron paramagnetic resonance study of MgO thin-film grown on silicon", *Journal of Applied Physics*, 査読有, **121**, 2017, 213901 DOI: 10.1063/1.4983752

D. Kikuchi, D. Prananto, K. Hayashi, A. Laraoui, N. Mizuochi, M. Hatano, E. Saitoh, Y. Kim, C. A. Meriles, T. An, "Long-distance excitation of nitrogen-vacancy centers in diamond via surface spin waves" *Applied Physics Express*, 査読有, **10**, 2017, 103004 DOI: 10.7567/APEX.10.103004

T. Shimo-Oka, Y. Tokura, Y. Suzuki, N. Mizuochi, "Fast Phase-manipulation of the Single Nuclear Spin in Solids by Rotating Fields", *Physical Review A*, 査読有, **95**, 2017, 32316 DOI: 10.1103/PhysRevA.95.032316

Y. Matsuzaki, T. Shimo-Oka, H. Tanaka, Y. Tokura, K. Semba, N. Mizuochi, "Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond", *Physical Review A*, 査読有, **94**, 2016, 52330 DOI: 10.1103/PhysRevA.94.052330

M. Fujiwara, K. Yoshida, T. Noda, H. Takashima, A. W. Schell, N. Mizuochi, S. Takeuchi, "Manipulation of single nanodiamonds to ultrathin fiber-taper nanofibers and control of NV-spin states toward fiber-integrated  $\lambda$ -systems", *Nanotechnology*, 査読有, **27**, 2016, 455202 DOI:10.1088/0597-4484/27/45/455202

Y. Matsuzaki, H. Morishita, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, N. Mizuochi, S. Saito, "Optically detected magnetic resonance of high-density ensemble of NV<sup>-</sup> centers in diamond", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 査読有, **28**, 2016, 275302 DOI:10.1088/0953-8984/28/27/275302

N. Fukui, H. Morishita, S. Kobayashi, S. Miwa, N. Mizuochi, Y. Suzuki, "Ferromagnetic resonance induced electromotive forces in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>p-type diamond", *Solid state commun*, 査読有, **243**, 2016, 44 <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2016.06.001>

〔学会発表〕(計 35 件)

〔招待講演〕水落憲和、「ダイヤモンド量子センサにおける高感度化研究」技術情報協会セミナー、東京(2019.1)

〔invited〕N. Mizuochi, "Quantum sensors using NV centers in diamond" 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures in conjunction with the 26st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ACSIN-14/ICSPM26) Sendai, Japan (2018.10)

〔invited〕N. Mizuochi, "Quantum sensors using NV centers in diamond" 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures in conjunction with the 26st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ACSIN-14/ICSPM26) Sendai, Japan (2018.10)

E. D. Herbschleb, Y. Maruyama<sup>1</sup>, T. Danjo, I. Ohki<sup>1</sup>, H. Kato, T. Makino, K. Hayashi "Magnetic AC sensing with nitrogen-vacancy centres in phosphorus-doped diamond" 第79回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋市(2018.9.18~21)

Hiroki Morishita, Satoshi Kobayashi, Masanori Fujiwara, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino<sup>14</sup>, Satoshi Yamasaki, Norikazu Mizuochi, "Room-Temperature Electrical Detection and Control of <sup>14</sup>N Nuclear Spin Coherence in NV centers" ACSIN2018, Nagoya(2018.9.18~21)

〔招待講演〕水落憲和、「NV中心を用いた高感度量子センサ」第三回ダイヤモンド技術交流会、千葉(2018.8)

〔招待講演〕水落憲和、「ダイヤモンド高感度量子センサ」第307回新規事業研究会、東京(2018.6)

丸山祐一、檀上拓哉、加藤宙光、牧野俊晴、山崎聡、森下弘樹、藤原正規、水落憲和「n型ダイヤモンドにおけるNV中心の長いコヒーレンス時間の実現」第65回応用物理学会春季学術講演会、東京都(2018.3.17~20)

三間大輔、森下弘樹、田嶋俊之、加藤宙光、牧野俊晴、山崎聡、藤原正規、水落憲

- 和「ハイブリットセンサ実現に向けたダイヤモンドNV中心におけるドレスト状態生成によるコヒーレンス時間の長時間化」第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会、東京都 (2018.3.17~20)
- 檀上 拓也、丸山 祐一、加藤 宙光、牧野 俊晴、山崎 聡、森下 弘樹、藤原 正規、水落 憲和「リンドーブ<sub>n</sub>型ダイヤモンド中の NV 中心を用いた交流磁場測定」、第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会、東京都 (2018.3.17~20)
- [招待講演] 水落憲和、「量子計測・センシング」日本学術振興会 先端ナノデバイス・材料テクノロジー第 151 委員会、和光 (2018.1)
- [招待講演] 水落憲和、「ダイヤモンド・SiC における量子情報素子・量子センサ研究の現状と展望」日本学術振興会 ワイドギャップ半導体光・電子デバイス 第 162 委員会 第 106 回研究会「新規発光材料・新構造デバイスの最前線と今後の展開」、静岡 (2017.12)
- 芦田貴紀、林寛、谷口尚、森下弘樹、藤原正規、波多野睦子、水落憲和、「ダイヤモンド量子センサの高感度化のための窒素ドーピング制御」ダイヤモンドシンポジウム、大阪府 (2017.11.20~22)
- [招待講演]水落憲和、「ダイヤモンド高感度量子磁気センサ」日本磁気学会 第 5 回岩崎コンファレンス「社会基盤の向上につながる磁気センサとその活用」、東京 (2017.11)
- 芦田貴紀、林寛、谷口尚、森下弘樹、藤原正規、波多野睦子、水落憲和「ダイヤモンド量子センサの高感度化に向けた窒素不純物制御」第 78 回応用物理学会秋季学術大会、福岡市 (2017.9.5~8)
- K. Hayashi, Y. Matsuzaki, T. Shimo-Oka, I. Nakamura, H. Morishita, M. Fujiwara, S. Saito and N. Mizuochi "Temperature sensing with an ensemble of nitrogen vacancy centers" ICDS2017, Japan(2017.08)
- [invited] N. Mizuochi, "Electrical control of spin coherence of NV center in diamond", The 20th meeting of the International Society of Magnetic Resonance (ISMAR), jointly with the Rocky Mountain Conference on EPR, Quebec, Canada (2017.7)
- [招待講演] 水落憲和、「ナノダイヤモンド中の NV 中心の魅力とセンサ応用」ナノ学会第 15 回大会、北海道 (2017.5)
- [招待講演] 水落憲和、「NV 中心の物理と応用への魅力」第 64 回 応用物理学会春季学術講演会、神奈川 (2017.3)
- [招待講演] 水落憲和、「NV 中心を用いた量子情報と量子センシング」第 55 回電子スピサイエンス学会年会、大阪市立大学(2016.11)
- 21 [invited] N. Mizuochi, "Quantum information and sensing devices by diamond semiconductor" 2016 The Materials Research Society (MRS) Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA(2016.11)
- 22 [招待講演] 水落憲和、「ダイヤモンドを用いた量子情報と量子センシング」JEITA 講演会、一般社団法人 電子情報技術産業協会、東京(2016.10)
- 23 [受賞記念講演] 福井貴大、土井悠生、宮崎剛英、宮本良之、加藤宙光、松本翼、牧野俊晴、山崎聡、徳田規夫、波多野睦子、坂川優希、森下弘樹、田嶋俊之、三輪真嗣、鈴木義茂、水落憲和 "Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy centers in diamond"第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟(2016.09)
- 24 [招待講演]森下弘樹、水落憲和、「ダイヤモンド中のスピン依存性電気特性」第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟(2016.09)
- 25 [チュートリアル] 水落憲和、「ダイヤモンド NV 中心の基礎と応用」第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟(2016.09)
- 26 T. Murai, T. Makino, H. Kato, Y. Doi, Y. Suzuki, M. Hatano, S. Yamazaki, M. Shimizu, H. Morishita, M. Fujiwara, N. Mizuochi, "Control of charge states of NV center in diamond by nin junction" PASPS9, Japan(2016.08)
- 27 S. Kobayashi, H. Morishita, Y. Matsuzaki, S. Miwal, Y. Suzukil, and N. Mizuochi, "Electron spin coherence time of NV center under an external electric field" PASPS9, Japan(2016.08)
- 28 [invited] H. Morishita and N. Mizuochi, "Diamond magnetometry based on an electrically detected magnetic resonance" INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PURE & APPLIED CHEMISTRY (ISPAC) Kuching, Sarawak, Malaysia (2016.08)
- 29 [招待講演] 水落憲和、「ダイヤモンド NV 中心の量子物性と応用」応用物理学会関西支部 平成 28 年度第 1 回講演会、産総研関西センター (2016.06)

[図書](計 1 件)

1. 科学立国 日本を築く Part , 榊裕之 監修, 第 3 章 3.3, 122 (2017) "ダイヤモンドを用いた量子情報素子の研究", 水落憲和 (日刊工業新聞社)

[その他]

1. 応用物理学会誌, 水落憲和 "NV 中心の物理と応用への魅力", 87, 251-261(2018)

2. ニューダイヤモンドフォーラム会誌, 森下弘樹, 小林悟士, 藤原正規, 加藤宙光, 牧野俊晴, 山崎聡, 水落憲和, "NV 中心の窒素核スピンコヒーレンスの制御と電氣的検出", 34, 14 (2018)
3. ニューダイヤモンドフォーラム会誌, 下岡 孝明, 水落憲和, "ダイヤモンドを用いた量子情報技術開発研究", 33, 32 (2017)
4. ニューダイヤモンドフォーラム会誌, 波多野睦子, 岩崎孝之, 田原康佐, 牧野俊晴, 水落憲和, 波多野雄治, 原田慶恵, 安田晋 "ダイヤモンド磁気センサの高感度化技術 スケーラブルな応用を目指して", 33, 7 (2017)
5. ニューダイヤモンドフォーラム会誌, 小林悟士, 森下弘樹, 松崎雄一郎, 三輪真嗣, 鈴木義茂, 水落憲和, "ダイヤモンド NV 中心における電界によるスピンコヒーレンス時間の長時間化", 32, 11 (2016)
6. 水落研究室ホームページ: <http://mizuochilab.kuicr.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究連携者

研究連携者氏名: 山崎 聡  
ローマ字氏名: Satoshi Yamasaki  
所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所  
部局名: 先進パワーエレクトロニクス研究センター  
職名: 総括研究員  
研究者番号(8桁): 80358241

研究連携者氏名: 加藤 宙光  
ローマ字氏名: Hiromitsu Kato  
所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所  
部局名: 先進パワーエレクトロニクス研究センター  
職名: 主任研究員  
研究者番号(8桁): 00415655

研究連携者氏名: 徳田 規夫  
ローマ字氏名: Norio Tokuda  
所属研究機関名: 金沢大学  
部局名: 電子情報学系  
職名: 教授  
研究者番号(8桁): 80462860

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。