

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22325

研究課題名（和文）固体におけるスピン挙動の量子イメージング

研究課題名（英文）Quantum imaging of spin behavior in solids

研究代表者

佐々木 健人（Sasaki, Kento）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：90883504

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド中の窒素空孔中心の単一電子スピンを量子センサとして利用して物質の磁場や温度を計測する手法を開発、実証した。NV中心のスピン準位や光学遷移の物理モデルに基づく高精度な測定技術の開発、機械学習による正確な磁場測定の原理実証に成功した。また、磁性体材料等の測定においては、温度波の可視化、漏れ磁場分布のイメージング、マグノンの検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子センサによる材料の磁場や温度の可視化技術の実証は、量子センシングを原理実証から実応用へステップアップさせるために意義がある。量子センサの利点である測定精度をさらに向上する成果は、物性計測応用に対するポテンシャルを引き上げる意義がある。磁性体中のスピンの励起であるマグノンは、ボーズアインシュタイン凝縮のような基礎研究から情報処理デバイスへの応用研究まで幅広い領域で注目されているため、その精密な検出と調査を行う成果は学術的および社会的に意義がある。

研究成果の概要（英文）： We developed and demonstrated the magnetic field and temperature measurement by using a single electron spin of a nitrogen-vacancy center in a diamond as a quantum sensor. We developed a highly accurate measurement based on physical models of spin levels and optical transitions and demonstrated accurate magnetic field measurement using machine learning. In measuring magnetic materials, etc., visualization of temperature waves, imaging of stray magnetic field distribution, and detection of magnons were also successfully achieved.

研究分野：量子工学

キーワード：量子センシング 磁気共鳴 ダイヤモンド スピントロニクス NVセンタ

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初の2020年、ダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心の有する電子スピンを、高感度かつ高空間分解能な量子センサとして利用する技術の物性計測応用が検証され始めていた。アメリカ、フランス、スイスの有力研究機関を筆頭に、磁性体の磁化の可視化、マグノンの検出、超伝導体ボルテックスの可視化などが報告されていたが、日本国内機関からの報告はほとんどない状況であった。

申請者は、2017年から2020年までに日本学術振興会の特別研究員(DC1)として行った「ダイヤモンド中の窒素空孔欠陥を用いた核磁気共鳴センシング」において、①独自開発した三次元的な核スピンの位置決定技術の実証[Phys. Rev. B **98**, 121405 (R) (2018)]、②最新の磁場測定手法によるミリヘルツを超える周波数分解能の実証[J. Appl. Phys. **123**, 161101 (2018)]、③ナノスケールの核磁気共鳴が検出可能なテーブルトップ型測定装置の開発[AIP Adv. **10**, 025206 (2020)]などの成果を挙げた。これらの研究を通して、申請者はスピンの検出に対する量子センサの高いポテンシャルを示し、その応用として以下の目的を掲げた。

2. 研究の目的

本研究「固体におけるスピン挙動の量子イメージング」の目標は、量子センサによる磁場・温度の計測手法を物性計測手法として確立することを目的である。量子センサでしかアプローチできない微小な領域のマグノンの挙動を解明することを目標にした。

原子サイズであるNV中心は、原理上、磁性体と数ナノの距離まで接近させることが可能であるため、極めて高い空間分解能と感度が得られる。これは今までの測定法に無い利点であり、磁性の基盤である微小領域のスピン挙動を解明するために有用である。

3. 研究の方法

量子センサを物性計測へ応用するために、1)NV中心の制御や解析手法の工夫による高精度測定の実証、2)物質の漏れ磁場や温度の可視化の実証を行った。

単結晶ダイヤモンドやダイヤモンドナノ粒子(ナノダイヤモンド)中のNV中心の集団の磁気共鳴信号を光学的に測定することで磁場・温度イメージングする装置を開発した。NV中心の測定方法や解析方法に独自のアイデアを取り入れることで、測定精度向上に成功した。その原理実証実験として典型的な材料であるガラス、テフロンでの温度測定、磁性体多層膜からの漏れ磁場の可視化、イットリウム鉄ガーネット(YIG)薄膜のマグノンの検出に成功した。

4. 研究成果

以上に挙げた主な内容について、それぞれ研究成果を説明する。マグノンの検出に成功し、その他、量子センサを利用する物性計測に有益な技術を開発できた。

1)「NV中心の制御や解析手法の工夫による高精度測定」

NV中心を磁性計測に利用するには、磁場検出の正確性ならびに精度を示し、向上することが求められる。

量子センシングでは、レーザー励起によってNV中心の電子スピン状態が初期化され、その瞬間の発光強度が初期化直前のスピン状態を反映することを利用する。スピンの状態を読み出せるのは初期化が完了するまでの500 ns程度であるため、その少ない時間の発光データを効率的に処理することが求められる。先行研究では、レーザー照射からの時間依存する重み付け係数を使って発光データの重要度をつける解析手法が複数示されていたが、高精度な測定には事前に多くの予備データを取得する必要がある。本研究では、発光データを物理モデルでフィッティングした結果を重み付け係数とすることで、予備データの信号ノイズ比が少ない状態でも高精度を得る手法を開発した。慶応大学、産総研との共同研究により、単結晶ダイヤモンド中の単一NV中心を用いた実験によって検証を行い、本手法は従来法よりも一桁短い予備データの取得時間で最尤推定と同等の高い読み出し精度を得られることを示した[AIP Adv. **12**, 055215 (2022)]。本手法はNV中心を用いた殆どのセンシング実験で利用できる。

NV中心が磁場センサとして稀有な点として、印加されている磁場方向が判別できることが挙げられる。先行研究では、結晶配向が異なるNV中心を組み合わせることで磁場ベクトルを決定する技術が利用されていたが、共鳴信号が複数に分散するため磁場感度的には不利である。本研究では、NV中心の共鳴信号の磁場依存性を定量的に理解することで、単一の結晶配向でも利用可能な磁場ベクトル決定手法を開発した。本研究で作製したイメージング装置(図1)において、NV中心の結晶配向が偏った特殊ダイヤモンド試料(東京工業大学との共同研究)を測定して原理実証を行った。その結果、本手法が従来手法よりも磁場感度ならびに正確性で優れた方法であることを示した[Appl. Phys. Lett. **118**, 264002 (2021)]。

量子センシングでは、磁場感度や空間分解能を高めるためにセンサと磁性体が密着する必要

がある。ナノダイヤモンドは測定対象に付着するため、この要件を容易に満たせる。一方、ナノダイヤモンドの結晶方位はランダムに配置されるため、NV 中心の異方性を含め、その共鳴信号はシンプルな物理モデルで表しきることができない。本研究では、機械学習を用いることで複雑な共鳴信号から高い正確性で磁場を決定する手法を開発した。現在、本内容について論文を投稿中である。

NV 中心による交流磁場計測はフロッケ工学として捉えることができる。高精度なヘテロダイナミック検出法を利用することで、この量子制御の精度を制限する要因を検証した。量子センサの応答は 200 次を超える高次のベッセル関数として観測され、その挙動は量子制御に用いるマイクロ波パルスの長さで制限されることを明らかにした。現在、本内容について論文を投稿中である。

2) 「物質の漏れ磁場や温度の可視化の実証」

本研究で開発したイメージング装置を典型的な物質からの漏れ磁場や温度の可視化に利用した。

単結晶ダイヤモンドセンサによってフロッピーディスクや磁性体多層膜などの磁区をイメージングすることに成功した。これらの成果は学会で報告した。量子センサと標的との距離をさらに近づけるために、単結晶ダイヤモンドの表面の平坦化等を行っている。これらの工夫によって、漏れ磁場に対してより敏感になり、回折限界に近い空間分解能まで引き上げることができる。加えて、カメラの各ピクセルにおける磁場の解析を劇的に高速化する方法についても萌芽的な成果が出ている。この技術により鮮明な磁場像の動画を作ることができるになれば、磁化のダイナミクスを調査できる。

磁性体中のスピンの励起はマグノンと呼ばれる。マグノンは、ボーズアインシュタイン凝縮のような基礎研究や、情報処理デバイスへの応用研究まで、幅広い領域で注目されている。非弾性の光学測定法はその挙動を明らかにする強力な手法として用いられてきたが、その検出は回折限界の制限を受ける。ナノスケールでのマグノン挙動を調査することは、マグノンを形成する微視的なスピンの振る舞いという基本的な疑問に答えるだけでなく、微細化したデバイスの干渉などを検討する際にも有意義である。量子センサを利用した先行研究では、マグノンの励起に伴い磁性体表面近くでノイズが生じることが報告されているが、その報告例は僅かである。本研究では、マグノン研究で標準的に利用される材料である YIG 薄膜の表面にナノダイヤモンドを散布することでマグノンとそのノイズの検出に成功した(図 2)。先行研究で示されている励起周波数、磁場の範囲から外れた領域にも、磁場強度に僅かな依存性しか持たない特異なノイズ信号を発見した。本内容については学会で報告した。このノイズ信号の由来について現在調査し、論文を執筆する予定である。

相転移に代表されるように、温度は統計量である磁化の特性を決める重要なパラメータである。NV 中心は磁場だけでなく温度も測定できるため、材料上にナノダイヤモンドを散布することで温度分布をイメージングする原理実証は複数報告があるものの、材料の物性パラメータまで決定する応用例は皆無であった。本研究では、ガラスやテフロンといった典型的な材料の熱拡散率を量子センサで決定する実証を行った。材料の端にヒーターを配置して交流電流を印加し、試料上の温度分布をロックイン検出する、いわゆるロックイン・サーモグラフィを実装した。得られた温度振幅や位相の分布から決定した熱拡散率は、文献値と同じオーダーであった。原理上、超高分解能顕微鏡と組み合わせることで個々のナノダイヤモンドごとの温度を計測できるようになり、ナノスケールの空間分解能が得られるようになる。もちろん、温度を磁性と同時に測定することは磁性体の相転移の調査にも有用である。現在、本内容について論文を投稿中である。

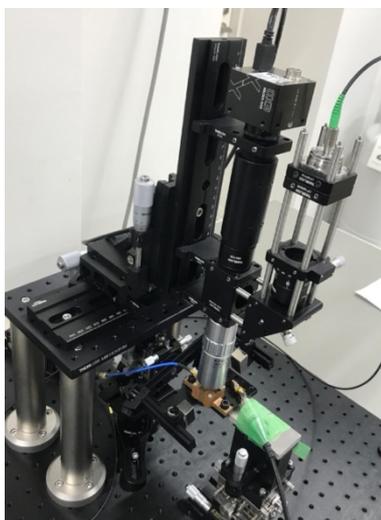


図 1 イメージング装置

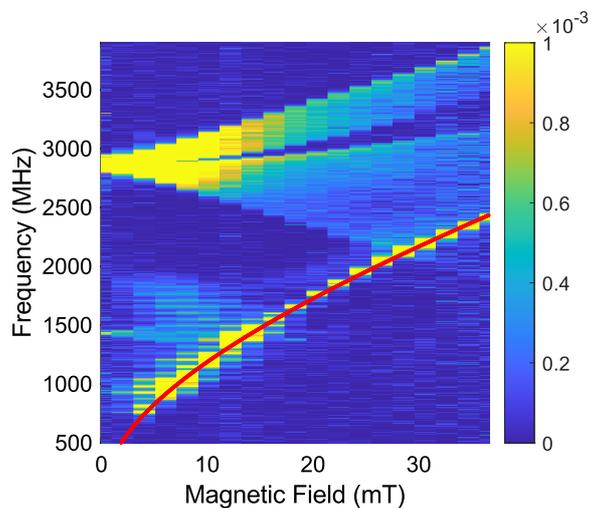


図 2 マグノン信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakamura Yuki, Watanabe Hideyuki, Sumiya Hitoshi, Itoh Kohei M., Sasaki Kento, Ishi-Hayase Junko, Kobayashi Kensuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Optimization of optical spin readout of the nitrogen-vacancy center in diamond based on spin relaxation model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 055215 ~ 055215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0090450	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 Tsukamoto Moeta, Ogawa Kensuke, Ozawa Hayato, Iwasaki Takayuki, Hatano Mutsuko, Sasaki Kento, Kobayashi Kensuke	4. 巻 118
2. 論文標題 Vector magnetometry using perfectly aligned nitrogen-vacancy center ensemble in diamond	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 264002 ~ 264002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0054809	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 佐々木 健人	4. 巻 10
2. 論文標題 <講義ノート>ダイヤモンド中空窒素-空孔中心のセンサー応用と物性計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 物性研究・電子版	6. 最初と最後の頁 none ~
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14989/269381	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Yuki Nakamura, Hideyuki Watanabe, Kohei M. Itoh, Kento Sasaki, Kensuke Kobayashi, and Junko Ishi-Hayase
2. 発表標題 Optimizing optical readout of a nitrogen-vacancy center with spin relaxation model
3. 学会等名 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Nishimura, Kohei M. Itoh, Junko Ishi-Hayase, Kento Sasaki, and Kensuke Kobayashi
2. 発表標題 Demonstration of large amplitude Floquet engineering with diamond qubit
3. 学会等名 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kento Sasaki
2. 発表標題 Application of nitrogen-vacancy centers in diamond for sensing
3. 学会等名 Trans-scale Materials Science Workshop (Physics) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Sasaki, Hideyuki Watanabe, Hitoshi Sumiya, Kohei M. Itoh, and Eisuke Abe
2. 発表標題 Detection and control of a single proton spin in a diamond thin film with a single quantum sensor
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Moeta Tsukamoto, Kensuke Ogawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Hayato Ozawa, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Kento Sasaki, and Kensuke Kobayashi
2. 発表標題 Magnetic domain structure imaging using diamond quantum sensor
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kensuke Ogawa, Moeta Tsukamoto, Kento Sasaki, and Kensuke Kobayashi
2. 発表標題 Development of temperature imaging technique using diamond quantum sensor
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村祐貴、渡邊幸志、伊藤公平、佐々木健人、小林研介、早瀬潤子
2. 発表標題 スピン緩和モデルを用いた窒素空孔中心スピンの光学的読み出し最適化
3. 学会等名 第69回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚本萌太、河口真志、林将光、佐々木健人、小林研介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサによる磁場と磁気光学カー効果の同時測定
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村祐貴、渡邊幸志、伊藤公平、佐々木健人 (発表者)、小林研介、早瀬潤子
2. 発表標題 スピン緩和モデルを用いたダイヤモンドスピンの光学的読み出し最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村 俊亮、五十川 拓哉、伊藤 公平、早瀬 潤子、佐々木健人、小林 研介
2. 発表標題 ダイヤモンド二準位系における高強度領域でのFloquet エンジニアリングの実証
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小河健介、佐々木健人、小林研介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサを用いたYIGスピン波測定
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木健人
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センシングとその応用
3. 学会等名 2021年度量子情報工学研究会 「量子情報工学の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小河健介、塚本萌太、佐々木健人、小林研介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサを用いた熱拡散イメージング測定
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚本萌太, 小河健介, 小澤勇人, 岩崎孝之, 波多野睦子, 佐々木健人, 小林研介
2. 発表標題 (111)全配向NV中心による三次元磁場イメージング
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤秀爾, 塚本萌太, 小河健介, 寺地徳之, 佐々木健人, 小林研介
2. 発表標題 高精度な磁場測定に向けたダイヤモンド量子センサの低磁場スペクトルの調査
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村俊亮, 五十川拓哉, 伊藤 公平, 早瀬 潤子, 佐々木健人, 小林研介
2. 発表標題 量子センサーを用いた交流磁場計測における非線形性と精度向上
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Sasaki, Hideyuki Watanabe, Hitoshi Sumiya, Kohei M. Itoh and Eisuke Abe
2. 発表標題 Detection and control of single proton spins in a diamond
3. 学会等名 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kensuke Ogawa, Moeta Tsukamoto, Kento Sasaki, and Kensuke Kobayashi
2. 発表標題 Development of temperature imaging technique using diamond quantum sensor
3. 学会等名 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Moeta Tsukamoto, Kensuke Ogawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Hayato Ozawa, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Kento Sasaki, and Kensuke Kobayashi
2. 発表標題 Magnetic domain structure imaging using diamond quantum sensor
3. 学会等名 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木健人, 渡邊幸志, 角谷均, 伊藤公平, 阿部英介
2. 発表標題 ダイヤモンド中量子センサによる単一プロトンスピンの検出と制御
3. 学会等名 日本物理学会 第76年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小河健介, 塚本萌太, 佐々木健人, 小林研介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサを用いた温度イメージング測定
3. 学会等名 日本物理学会 第76年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚本萌太, 小河健介, 河口真志, 林将光, 小澤勇斗, 岩崎孝之, 波多野睦子, 佐々木健人, 小林研介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサを用いた磁区構造イメージング
3. 学会等名 日本物理学会 第76年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木健人, 渡邊幸志, 角谷均, 伊藤公平, 阿部英介
2. 発表標題 ダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた単一プロトンスピンの検出と制御
3. 学会等名 スピントロニクス連携ネットワーク年次報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木健人, 伊藤公平, 阿部英介
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサーによる単一核スピンの三次元位置決定法の開発
3. 学会等名 Spin-RNJ若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------