

2015年3月23日

(報道発表資料)

日本電信電話株式会社
大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所
国立大学法人 大阪大学
独立行政法人 情報通信研究機構

量子センサを実現するダイヤモンド中電子スピンの寿命の改善法を確立 ～量子センサの感度が桁違いに向上～

日本電信電話株式会社（本社：東京都千代田区、代表取締役社長：鶴浦博夫、以下 NTT）と大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所（東京都千代田区、所長：喜連川 優 以下、NII）、国立大学法人 大阪大学（大阪府吹田市、総長：平野 俊夫 以下、大阪大学）、独立行政法人 情報通信研究機構（東京都小金井市、理事長：坂内 正夫 以下、NICT）は、ダイヤモンド中に閉じ込められた電子スピンの超伝導磁束量子ビット^{*1}を結合させることにより、ダイヤモンド中の電子スピンの寿命が約10倍に伸びることを世界で初めて示しました。

ダイヤモンド中の電子スピンは、数十ナノメートル程度の局所領域に閉じ込めることが可能であり、磁場や電場や温度を高い精度で検出できることから、ナノスケールの物質構造などを高精度でイメージできるとされる量子センサ^{*2}への応用が期待されています。本研究成果によって電子スピンの寿命が改善することで十分な計測時間の確保が可能になるため、計測感度の向上が期待されます。さらに将来的に、超伝導磁束量子ビットと複数のダイヤモンド中電子スピンの間に量子絡み合いを生成することができれば、従来の精度を凌駕する量子絡み合いセンサを実現できる可能性があります。この量子絡み合いセンサが実現すれば、人や動物の脳の活動情報を高い精度で読み取って病変を特定したり、数十ナノメートル程度の極小物質の三次元構造を明らかにするなど医療分野・材料工学分野に貢献すると考えられます。

この成果は、2015年3月23日に「Physical Review Letters」で公開されます。

なお本研究の一部は、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）、JSPS 科研費 No. 25220601、NICTの委託研究「量子もつれ中継技術の研究開発」により得られたものです。

1. 研究の背景

物質の持っている磁場、電場、温度などといった情報をいかに高精度で検知するかといった研究は、医療、生体、材料工学などの分野で興味を持たれ盛んに行われています。例えば、核磁気共鳴画像法（MRI）は磁場をセンシングすることで物質の三次元的な内部情報を得ることができ、工学の分野で用いられています。また人や動物の脳から生じる電気活動を検知することで脳の状態を計測する脳電図なども、医療や生体の分野で重要な役割を果たしてきています。より小さい領域を、さらに高い感度で検知できるセンサの開発が待ち望まれています。

近年、既存のセンサの感度と空間分解能を上回る「量子センサ」を実現するための研究が、世界中で行われています。中でも、ダイヤモンド中の電子スピンは、マイクロ波の印加によりその方向を制御し

て量子的な重ね合わせ状態を生成することができ、光を照射することで方向の読み出しもできることや長寿命であること、また、数十ナノメートルという極小ダイヤモンドで電子スピンを作ることができることから局所的なセンシングが可能になるとして、量子センサへの応用が期待されています（図 1）。しかし、ノイズが存在する環境下では寿命が短くなることから十分な計測時間の確保ができず、センサとしての感度が劣化するという問題点がありました。そのため、ダイヤモンド中の電子スピンの寿命の向上は大きな課題となっています。

NTT 物性科学基礎研究所、NII、大阪大学、NICT の研究チームでは、2011 年に複数のダイヤモンド中の電子スピンと設計自由度が広く拡張性が高い超伝導磁束量子ビットという 2 つの異なる系をハイブリッド化した量子メモリの実現に成功しました。この成果を活かし、ハイブリッド系を用いたダイヤモンド中の電子スピンの長寿命化に向けて研究に取り組んできました。

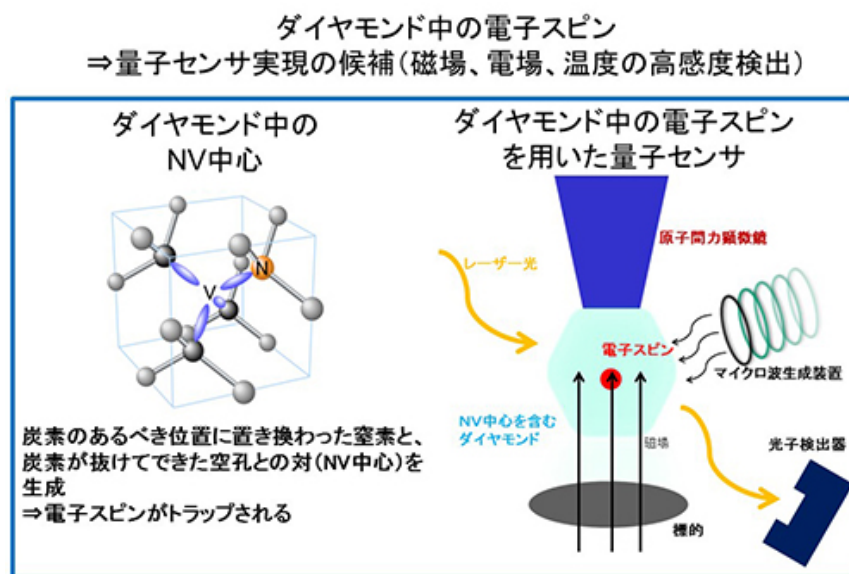


図 1 ダイヤモンド中の電子スピンとそのセンシングへの応用

2. 研究の成果

NTT 物性科学基礎研究所、NII 根本香絵教授、大阪大学大学院基礎工学研究科 水落憲和准教授、NICT 仙場浩一上席研究員らによる研究チームでは、100 マイクロ秒程度の寿命を持つダイヤモンド中の電子スピンと短寿命（10 マイクロ秒程度）な超伝導磁束量子ビットを結合させるハイブリッド化（図 2）により、電子スピンの寿命が約 10 倍となる 950 マイクロ秒にまで長くなるという、常識からは予想できない現象を世界で初めて理論的に見出しました。これは、ダイヤモンド中の電子スピンを用いた量子センサの感度が一桁近く向上することを意味しており、高い効率で物質のイメージングが可能になると期待されます。

また、ダイヤモンド中の電子スピンはマイクロ波の印加といった外部からの要因を用いることで長寿命化を行っていましたが、本成果は、ダイヤモンド中の電子スピンを超伝導磁束量子ビットに置くだけで寿命を約 10 倍に長くできるという、超高感度量子センサ実現に向けた全く新しいアプローチです。

【理論提案の詳細】

- ① 超伝導磁束量子ビットの寿命を下げることなく共鳴エネルギーを変化させることが可能である「ギャップ可変型」と呼ばれる素子を使い、ダイヤモンド中の電子スピンのエネルギーと共鳴させる。
- ② ダイヤモンド中の電子スピンに特定の方向へマイクロ波を印加することで、励起状態と基底状態の重ね合わせの状態を生成する。
- ③ 一定時間の経過後、マイクロ波を再び印加してから、光の照射によりダイヤモンド中の電子スピンの状態を読み出す。
- ④ 超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピンの結合系を効率的にシミュレートできる手法を開発し、数値計算を行うことで上の実験を行うと、超伝導磁束量子ビットとの結合が存在しない場合に比べて、ダイヤモンド中の電子スピンの寿命が改善されることを示した。

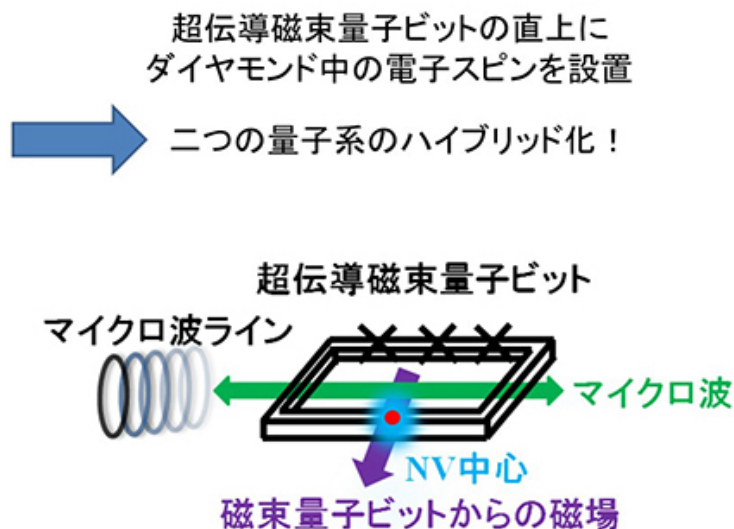


図2 超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピンの結合

3. 技術のポイント

超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中電子スピンの結合系の理論的な解析は一般的には難しく、現状で最速のワークステーションを用いても完全な数値計算は行えません。そこで研究チームは効率的なシミュレーションを実装するために、計算にかかるリソースを減らし、かつこの結合系の本質を損なうことのない近似法を開発することに成功しました。その結果、系の振る舞いを正確に予想できるようになり、本成果に結びつきました。

(1) 超伝導磁束量子ビットとの結合による長寿命化のメカニズムの解明 (図3)

ダイヤモンド結晶中で、本来は炭素のあるべき位置に置き換わった窒素と、炭素が抜けてできた空孔との対から構成されるものを NV 中心^{※3}と呼び (図1 左)、単一の NV 中心には同じエネルギーを持つ 2

つの励起状態が存在します。そのため、環境からノイズが加えられると、ノイズのエネルギーが小さいものであっても 2 つの励起状態の間に遷移を起こしてしまうため、寿命が短くなることが知られています。

研究チームは、単一 NV 中心に量子ビットを結合させると、単一 NV 中心の励起状態をエネルギー的に分離することができることを理論的に示しました。NV 中心の持つ 2 つの励起状態のうち、片方の励起状態は量子ビットと結合するためにエネルギーシフトが起こります。しかし、もう片方の励起状態は量子ビットと結合しないために、エネルギーに変化が起こりません。このメカニズムにより NV 中心の励起状態間にエネルギー差が生じて、低エネルギーのノイズからの影響を受けづらくなります。そのため、環境からのノイズに対して耐性を持ち、寿命が向上します。

(2) 数値計算を用いたダイヤモンド中の電子スピンの寿命の評価 (図 4)

研究チームは、単一 NV 中心に量子ビットを結合させると、単一 NV 中心の励起状態をエネルギー的に分離することができ、ノイズ耐性を向上できることを理論的に示しました。具体的には、超伝導磁束量子ビットを単一 NV 中心に結合させた場合の振る舞いを数値計算により予測し、10 マイクロ秒程度の超伝導磁束量子ビットを結合させると、100 マイクロ秒程度の寿命を持っていた単一 NV 中心が 900 マイクロ秒以上の寿命を持つようになることを突き止めました(図 4)。これは単一 NV 中心の量子センサの実現を目指す際には、感度が一桁近く向上することに相当します。将来的には、超伝導磁束量子ビットの設計を変えて単一 NV 中心の結合を増強することで、さらなる感度の上昇も可能です。

また一般的には、超伝導磁束量子ビットと単一 NV 中心のハイブリッド化は、結合が弱いために難しいと考えられていました。しかし我々の研究では、ハイブリッド化が難しいと考えられている弱結合^{*4}の領域でも、寿命の改善が見られることが明らかになりました。そのため、本成果により、超伝導磁束量子ビットと単一 NV 中心の結合に要求される技術的なハードルが大きく下がりました。

超伝導磁束量子ビットと NV 中心の結合系に関するシミュレートは一般的には難しく、現状の最速のコンピュータを用いても完全なシミュレートはできないことが知られています。研究チームでは、超伝導磁束量子ビットと NV 中心集団のハイブリッド化に成功しているため、この結合を記述するシミュレーション法に習熟しています。本研究では、これまで我々が用いてきた理論を、単一 NV 中心の場合にも適用できるように拡張を行いました。その結果、超伝導磁束量子ビットと単一 NV 中心の結合を効率よく解析できるような理論モデルを構築している点が、大きな強みです。特にこの結合系に影響を与えるノイズのモデルは、多くの自由度を持つ量子系を環境として取り扱わなければいけないため、一般的に解析が難しいとされますが、我々はモデルの本質を損なうことなく単純化することに成功し、本成果を得ることができました。

・エネルギーダイアグラムの解析⇒ノイズ耐性を持つ状態を予言！
 (結合により、ノイズの原因となる状態 $|B\rangle$ をエネルギー的に切り離せる)

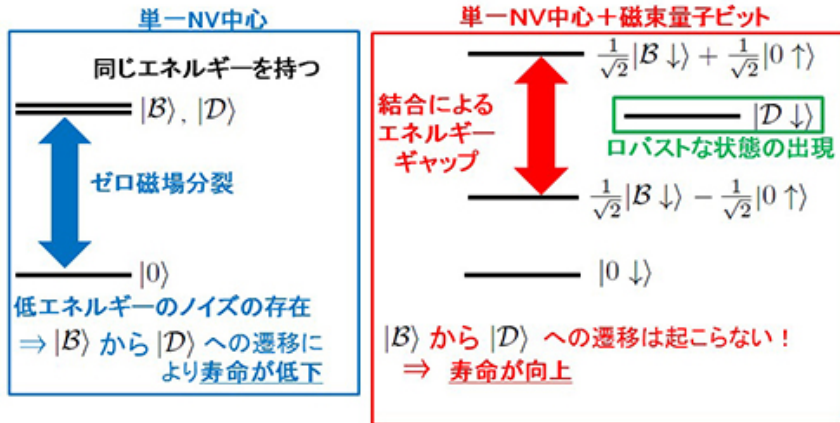


図 3 超伝導磁束量子ビットとの結合によるダイヤモンド中電子スピンの長寿命化のメカニズム

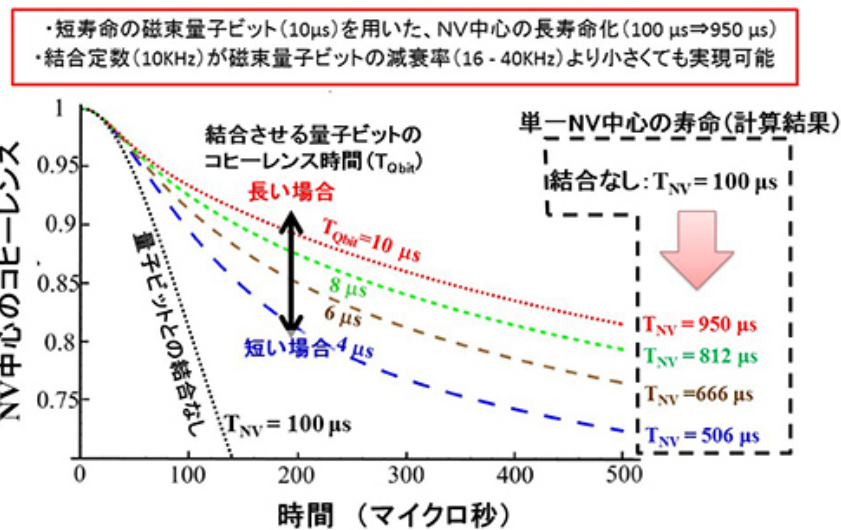


図 4 数値計算を用いたダイヤモンド中の電子スピンの寿命の評価

4. 今後の展開

単一の NV 中心を実際に超伝導磁束量子ビットに結合させ、寿命の向上を実証する実験に取り組みます。また、このハイブリッド素子を用いた高感度量子センサの実現に向けた研究も進めます。特に将来的には、局所的な領域に複数の NV 中心を閉じ込め、さらにその NV 中心間に量子的な絡みあいを生成し、古典限界を超える感度のセンシングの実現を目指します。このような量子センサが実現すると、数十ナノメートル程度の局所領域での磁場、電場、温度などといった情報を高効率で検知できるようになります。

その結果、人や動物の脳の活動情報を高い精度で読み取って病変を特定したり、数十ナノメートル程度の極小物質の三次元構造を明らかにすることで製薬開発に応用することが、将来的には可能になります。

【論文掲載情報】

Yuichiro Matsuzaki, Xiaobo Zhu, Kosuke Kakuyanagi, Hiraku Toida, Takaaki Shimo-Oka, Norikazu Mizuochi, Kae Nemoto, Kouichi Semba, William J. Munro, Hiroshi Yamaguchi, and Shiro Saito, “Improving the coherence time of a quantum system via a coupling to a short-lived system” Physical Review Letters (2015)

【用語解説】

※1 超伝導磁束量子ビット

超伝導を示す物質を用いて回路を作ると、そこに永久電流が流れます。その永久電流の向きによってビット情報を蓄えることができ、そのような素子を超伝導磁束量子ビットと呼びます。特に、永久電流が回路を右回りに流れている状態と、左回りに流れている状態の、量子的な重ね合わせの状態を作れる点に大きな特徴があります。

※2 量子センサ

重ね合わせや絡み合いといった、古典系に現れない量子系特有の性質を用いることで、古典を超える感度の計測を実現する手法のことを指します。

※3 NV 中心

図 1 左図 に示す ダイヤモンド結晶中の複合欠陥の一種。不純物原子である 窒素 (N: nitrogen) と 空孔 (V: vacancy) が隣り合った格子点に存在する場合、この複合欠陥のカラーセンターを NV 中心と呼びます。NV 中心に捉えられた電子のエネルギー準位は、付近のダイヤモンド格子の歪みから、図 1 右図のように零磁場でも基底状態が約 2.88GHz 分裂しており、超伝導量子ビットのエネルギー分裂に近いため、NV センターと超伝導量子ビットを共鳴させるには非常に好都合です。

※4 弱結合

2つの系をハイブリッド化する場合、その系のノイズによる減衰率と、2つの系の結合の強さを表す結合定数との比を取ることで、ハイブリッド化のしやすさが定量化されます。特に、結合定数が減衰率よりも小さいような場合を、弱結合と呼びます。

<本件に関する問い合わせ先>

日本電信電話株式会社
先端技術総合研究所 広報担当
a-info@lab.ntt.co.jp
Tel.046-240-5157

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

国立情報学研究所

広報チーム

kouhou@nii.ac.jp

Tel : 03-4212-2164

国立大学法人 大阪大学

大学院基礎工学研究科・庶務係

ki-syomu@office.osaka-u.ac.jp

Tel : 06-6850-6131

独立行政法人 情報通信研究機構

広報部 報道担当

publicity@nict.go.jp

Tel : 042-327-6923