

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

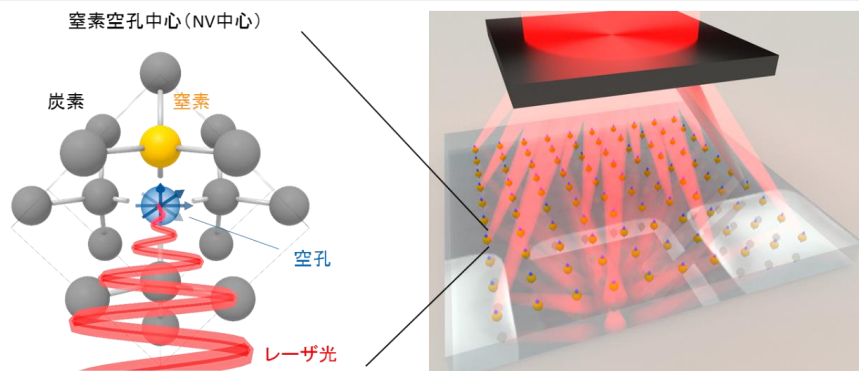
世界初！量子集積チップに道を開く光スピン制御の 新原理を実証

～量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に～

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と関口雄平研究員は、ダイヤモンド中の窒素空孔中心 (NV中心) に存在する単一電子スピンをレーザー光で自在に、正確に操作する新原理を発見し実験で実証することに、世界で初めて成功しました。マイクロワットという小さな光パワーを用いながらも、従来の約 100 倍速い 1 ナノ秒で、従来より約 3 倍高い精度で単一スピン操作を実現しました。

本成果によって、量子情報処理に必要な書き込み・ゲート制御・読み出しの全操作が微弱光で行えるようになり、量子集積チップの光操作が可能となります。これによる量子コンピュータや量子通信の高速化により量子テクノロジーの実用化を一気に加速します。

本研究成果は、2017年4月10日(英国時間)発行の科学雑誌「Nature Photonics」に掲載されます。なお、本研究は情報通信研究機構(NICT)高度通信・放送研究開発委託研究、科学研究費補助金基盤研究S(課題番号16H06326)、基盤研究A(課題番号24244044)、新学術領域「ハイブリッド量子科学」(課題番号16H01052)、文部科学省ポスト「京」萌芽的課題1「基礎科学のフロンティア極限への挑戦」の支援のもとに行われました。



<発表雑誌>

雑誌名 : Nature Photonics

論文題目 : Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under a zero field (幾何学的スピンの無磁場下でのホロノミック光量子ゲート)

著者 : Yuhei Sekiguchi, Naeko Niikura, Ryota Kuroiwa, Hiroki Kano and Hideo Kosaka (関口雄平、新倉菜恵子、黒岩良太、加納浩輝、小坂英男)

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 小坂 英男

Tel/Fax:045-339-4196 Email:kosaka-hideo-yp@ynu.ac.jp <http://kosaka-lab.ynu.ac.jp>

量子集積メモリに道を開く光スピン制御の 新原理実証

～量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に～

<研究背景>

量子情報計算、量子情報通信と呼ばれる量子力学の法則を利用した次世代の量子情報技術の登場によって、従来の計算能力を凌駕するコンピュータや、絶対に安全な通信を実現できることが期待されています。これらを実現させるための基盤として、量子性を持つ様々な物質系が提案されています。中でもダイヤモンド中の電子スピン^[1]を情報の単位（量子ビット）として扱う方法は、情報の保持と集積化の観点で優れていることが知られています。ダイヤモンドに集積配列された電子スピンを量子制御するためには、スピン一つ一つを個別に、自在に、正確に制御する技術が求められます。レーザー光の局所電場を利用することで電子スピンの選択的制御が可能ですが（図 1）、これまでに提案、実証されている制御手法では、限られた制御しかできないうえに、制御の忠実度も高くありませんでした。

<今回の成果>

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と関口雄平研究員（博士課程 1 年）らの研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）の単一電子スピンをレーザー光で自在に、正確に制御する技術の実証に成功しました。これまでは、磁場の印加によって物理系にどれだけ大きなエネルギー差をつけるかが重要とされてきましたが、本研究では反対に、磁場を厳密に排除することにより物理系のエネルギー差を敢えてなくし、結果的に出現する空間の自由度を巧みに利用する方法を考案し、これを実験で実証しました（図 2）。従来とは真逆の発想によって、時間のかかる断熱的操作^[2]ではなく時間のかからない非断熱的操作^[2]を可能にし、ナノ秒（ 10^{-9} 秒）の速さで、忠実度が 90%以上と極めて正確かつ完全に自在な制御の実現に世界で初めて成功しました。これは、マイクロワット（ 10^{-6} W）という小さな光パワーを用いながらも、従来の約 100 倍の速さに当たり、忠実度を約 3 倍向上したことになります。これにより 10^8 個の NV スピンを光で一括制御する可能性を示しました。さらに、スピンの制御機構もノイズ耐性の低い動的位相^[3]回転からノイズ耐性の高い幾何学的位相^[3]回転へと移り変わることを理論的シミュレーションによって明らかにしました。本成果によって、量子情報処理に必要な全操作が現実的なレベルで行えるようになり、今後の量子情報実験を加速させることが期待されます。

＜動作原理と実験内容＞

本来、レーザー光によって生じる電場は、磁気的な性質を持つ電子スピンを直接制御できませんが、電気的な性質を持つ電子軌道^[註 1]は直接制御することができます。さらに電子スピンと電子軌道の間にはスピン軌道相互作用という力が働き、レーザー電場による電子スピンの間接的な制御を可能とします。上で述べたように、磁場を排除して物理系のエネルギー差をなくすと、レーザーの偏光（電場の向き）と対応して電子軌道が制御でき、スピン軌道相互作用を介して電子スピンの回転も自在に制御することが可能になります（図 2）。本研究では、制御効率の悪いスピン空間の回転を行うために制御効率の高い軌道空間の回転を利用するホロノミック^[註 4]な幾何学的位相制御を行うことで、早い回転制御と高いノイズ耐性を両立させた単一電子スピンの自在な回転制御を行い、先の論文（Physical Review Letters、2015 年掲載 小坂ら）で実証した単一電子スピンの書き込み、読み出しの技術を用いて全方位量子制御の評価を行いました（図 3）。

＜今後の展開＞

本成果によって、量子情報処理に必要な 3 つの基本要素技術である書き込み、ゲート制御、読み出しをすべてレーザー光の技術で完成することができました。これらの技術を利用し、量子情報ネットワーク^[註 5]の実現に向けて、量子テレポーテーション転写や量子もつれ測定などの発展的な量子情報技術の実証へ応用を進めていきます。また、これらの量子技術は、繊細な物理量を扱うために、超高感度な電磁場センシング、バイオイメージング技術といった応用への道も開かれています。

＜総括＞

物理系をどれだけ強制的に従わせることができるかという従来の方針とは、逆を行く発想によって、物理系の空間の自由度を巧み利用した光による完全な電子スピン制御に成功しました。マイクロ波やラジオ波を用いた制御はこれまでもありましたが、局所的な操作には向いていません。今回、光による単一電子スピン制御を完成させたことで、固体中の集積スピンを基盤とした量子情報技術が発展することが期待されます。

＜謝辞＞

本研究は情報通信研究機構（NICT）高度通信・放送研究開発委託研究、科学研究費補助金 基盤研究 S（課題番号 16H06326）、基盤研究 A（課題番号 24244044）、新学術領域「ハイブリッド量子科学」（課題番号 16H01052）、文部科学省ポスト「京」萌芽の課題 1「基礎科学のフロンティアー極限への挑戦」の支援のもとに行われました。なお、NICT 委託研究は日本電信電話株式会社（NTT）物性科学基礎研究所 清水薫主幹研究員、William Munro グループリーダー、国立情報学研究所（NII）根本香絵教授、京都大学 水落憲和教授、東京大学 中村泰信教授との、基盤研究 S は京都大学 水落憲和教授、物質・材料研究機構 寺地徳之主幹

研究員との共同研究です。

<添付資料>

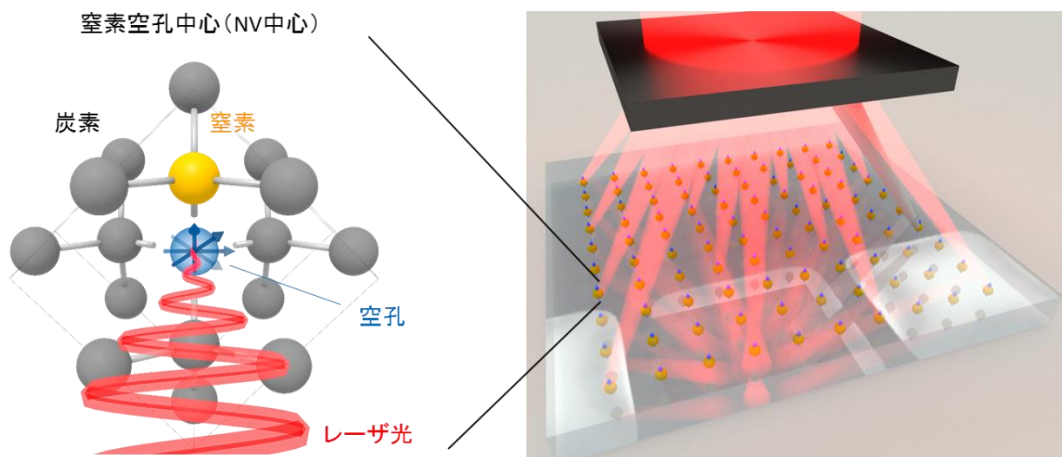


図1：ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）とレーザー光による電子スピン制御の概略図

ダイヤモンド中の炭素が窒素と空孔に置換されたものを NV 中心と呼びます。空孔には電子スピンの局在しています。レーザー光は集光できるため、狙った電子スピンだけを選択的に制御することができます。

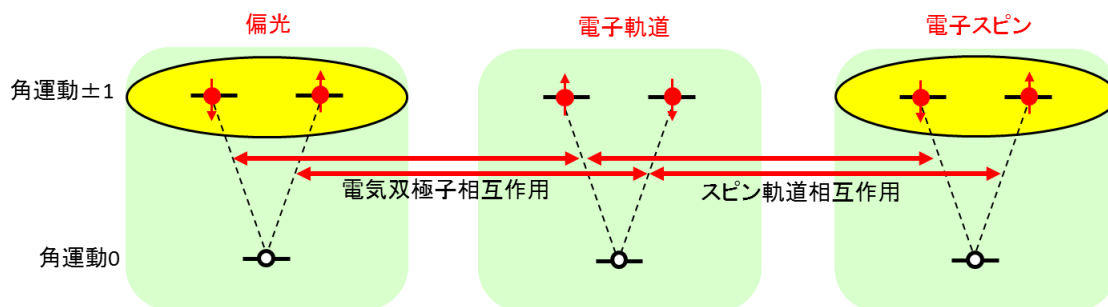


図2：偏光、軌道、スピンのエネルギー準位図

無磁場下では、光の偏光、電子の軌道、スピンの角運動量とエネルギーが対称的な構造を形成します。偏光とスピンの間には、軌道を介した電気双極子相互作用とスピン軌道相互作用が働き、偏光と電子スピンの回転軸が一對一に対応することになります。

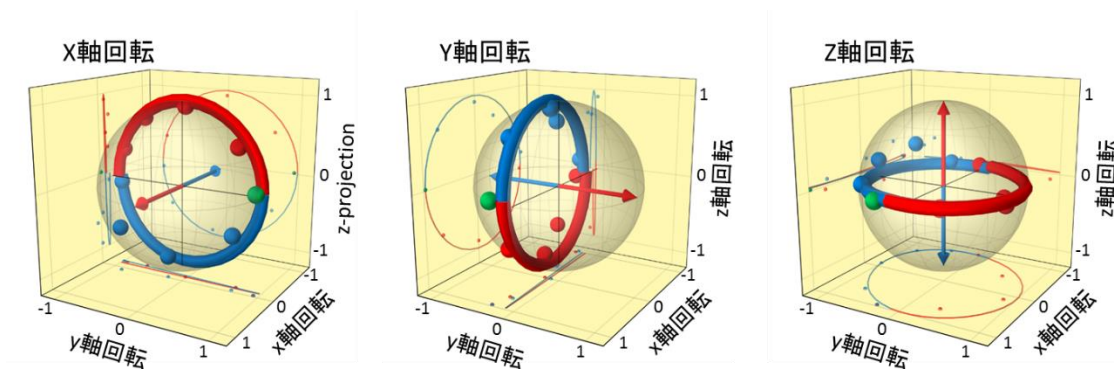


図3：光による電子スピン幾何学回転の軌跡を光による電子スピン状態トモグラフィ測定によって可視化

電子スピンを+y、+x、+x 状態に初期化（緑点）した後、それぞれ x、y、z を軸として反時計回り（赤点）、時計回り（青点）に回転した状態の x、y、z 成分を読み出し、再構成しています。プロット点はスピンの方向を表しています。球面上の点は純粋な（量子性を保持した）状態を示しており、原点に近づくほど不定な（量子性が失われた）状態を意味します。

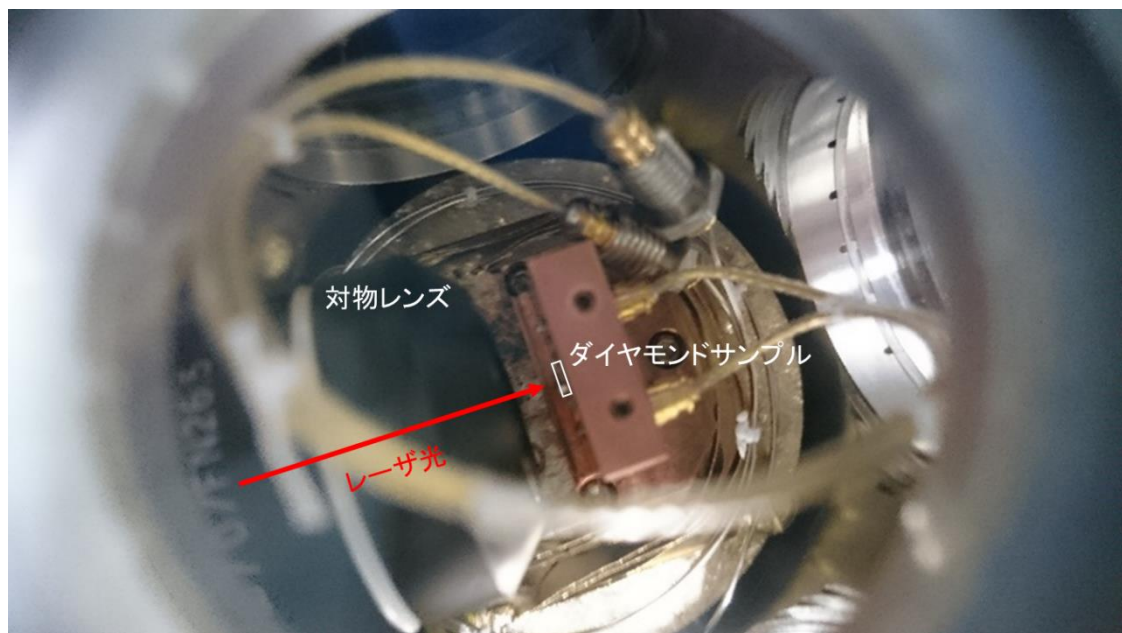


図4：実験写真

ダイヤモンドサンプルは 5K (-268°C) の冷凍機の中に固定されています。レーザー光は、対物レンズによってダイヤモンド中の単一 NV 中心に焦点を結んで局所的な制御を行います。

<用語解説>

注1) 電子スピンと電子軌道

電子の自転運動に例えられる量子状態を電子スピンと呼び、電子の公転運動に例えられる量子状態を電子軌道と呼ぶ。電子スピンは磁気的な性質をもつのに対し、電子軌道は電気的な性質をもつ。

注2) 断熱的操作と非断熱的操作

量子状態の時間発展が制御場の変動に対して十分ゆっくりである操作を断熱的操作と呼ぶ。断熱的操作とは対照的に、量子状態が制御場の変動に対して追従できない速い操作を非断熱的操作と呼ぶ。断熱的操作は、量子状態が固有状態に維持されているため安定であるという利点をもつ一方、長い操作時間の間でノイズの影響を受けてしまう。

注3) 動的的操作と幾何学的操作

量子状態がもつエネルギーによって回る位相（動的位相）を利用して操作する手法を動的的操作と呼ぶ。量子状態が時間発展する際に辿った経路によって定義される位相（幾何学位相）を利用した操作を幾何学的操作と呼ぶ。幾何学的操作は、状態の辿った経路のみが操作を決定しているため、誤り耐性があるといわれている。

注4) ホロノミック

曲率をもつ平面内をベクトルが平行移動で巡回したときに、ベクトルの向きが元に戻らない性質。量子力学的なホロノミーを幾何学位相と呼ぶことができる。

注5) 量子情報ネットワーク

現代物理学である量子力学によって体系づけられた量子情報科学に基づく情報ネットワーク、量子暗号通信や量子コンピューティングなどの次世代の情報を扱う。