

世界初、光ランダムアクセス量子メモリの原理実証に成功 ～大規模集積量子メモリやダイヤモンド量子コンピュータの実現に道～

本研究のポイント

- ダイヤモンド中のスピン量子ビットを光、マイクロ波およびラジオ波を用いた画期的手法で高空間分解能かつ高忠実度に制御することに成功。
- 誤り耐性型汎用量子コンピュータに不可欠な大規模集積量子メモリや、ダイヤモンドを量子プロセッサとするダイヤモンド量子コンピュータの実現に道。
- 量子コンピュータ、大規模量子ストレージ、量子中継器などがネットワーク接続した量子インターネットの構築に向けて突破口。

【研究概要】

横浜国立大学 大学院工学研究院／先端科学高等研究院の関口 雄平 助教、小坂 英男 教授らは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV中心）からなるスピン量子ビット^[注1]を、独自の手法で高空間分解能かつ高忠実度に制御することに成功しました。

従来の手法では、量子ビットとなる電子スピンおよび核スピンは、マイクロ波およびラジオ波によって量子制御されます。しかし、この手法では高忠実度の制御はできますが、空間分解能が低いため、集積化されたNV中心を個別に制御することはできませんでした。一方で、高い空間分解能を持つ光でスピン量子ビットを量子制御する手法も研究されてきましたが、低忠実度であることや、十分に高精度な制御ができないという問題がありました。

研究グループでは、光を量子ビットの選択的なアクティブ化、非アクティブ化のランダムアクセス制御に使用し、量子制御はマイクロ波およびラジオ波で行う新しい手法（光アドレス量子ゲート）（図1）を考案しました。これにより高空間分解能と高忠実度が両立できることを実験で実証しました。この成果は、ダイヤモンドを用いた大規模集積量子メモリ^[注2]および量子プロセッサのための中核技術として、量子コンピュータ、量子通信の飛躍的な性能向上に寄与し、量子インターネットの構築に道を拓きます。本研究成果は2022年7月28日（英国時間）に、Nature Portfolioが発行するNature Photonicsのオンライン版で公開されます。

【研究の背景と経緯】

量子情報技術は、従来の情報処理の概念を超えた技術であり、量子コンピュータ、量子暗号通信など究極のアプリケーションを実現すると期待されています。近年、量子情報技術は目覚ましい発展を遂げ、1個の量子ビットを制御する時代から、どれだけ数多くの量子ビットを同時に制御できるかを競争する時代になりました。ビット数を増やすことは従来の情報処理においても重要なことですが、量子情報処理において量子ビット数を増やすことは、大まかに言えば指数関数的な性能の向上につながります。しかし、その一方で量子ビット数を増やすことは技術的に非常に難しく、世界共通の課題になっています。

ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV中心）とは、ダイヤモンド中の隣接した二つの炭素

において、一つの炭素が窒素（N）に、もう一つの炭素が空孔（V）に置換されたものです。例えば、透明なダイヤモンド中にトラップされた原子のようなものです。つまり、そのサイズはほぼ原子サイズで非常に小さいため大規模集積化に適した材料と言えます。NV中心は、20年以上前から、量子デバイスの材料の候補として世界中で盛んに研究が行われてきました。NV中心は、電子スピンや核スピンを持ち、これがスピン量子ビットとして用いられます。そのメモリ時間は、最大で1秒を超えるほどで、超伝導量子ビットや半導体量子ドットなどの他の材料に比べて非常に長いことが知られています。そのため、特に長寿命量子メモリを必要とする量子中継^[注3]器の材料として期待が寄せられています。通常、スピン量子ビットはマイクロ波やラジオ波によって量子制御されますが、それらの波は微小空間的に局在させることができないため、従来の制御手法では隣り合ったスピン量子ビットを個別に制御することが困難でした。それを解決しようと、空間分解能の高い光を使ったスピン制御手法も開発されてきましたが、忠実度が低いことや、十分に高精度な制御ができないという問題がありました。

【研究の内容】

今回、横浜国立大学 大学院工学研究院／先端科学高等研究院の関口 雄平 助教、小坂 英男 教授らは、NV中心からなるスピン量子ビットを、画期的な手法で高空間分解能かつ高忠実度に量子制御することに成功しました。研究グループは、NV中心の電子スピンおよび核スピンが持つ3準位構造^[注4]に着目し、余剰なエネルギー準位を光シュタルクシフト^[注5]によってチューニングして、スピン量子ビットの量子ゲートをアクティブ化、または非アクティブ化する新原理（光アドレス量子ゲート）（図1）を考案しました。あくまで光は、操作したいNV中心を選択するために使用され、量子制御自体は信頼性の高いマイクロ波およびラジオ波で行うため、高精度でのスピン制御が可能になります。実験では、電子スピン量子ビットの初期化、ゲート操作、読み出し、および保持の基本的な量子制御のすべてで動作を実証し、約300 nmの空間分解能と最大で95%の忠実度が得られることを示しました（図2）。これは、制御対象のNV中心から約300 nm以上離れたNV中心には影響を及ぼさずに、95%の確率で正しい制御ができることを意味します。さらに、電子スピンを媒介にして、核スピン量子ビットも光でアクティブ化できることを示し、電子-核スピン量子ビットの量子もつれ^[注6]を生成することに成功しました。この量子もつれは、量子中継の過程で光の量子情報を核スピンメモリに転写する際に必要となります。

【今後の展開】

今回、実証した手法によって、密集したNV中心の一つ一つを高精度で制御することが可能になりました。今後は、長寿命量子メモリを搭載した大規模集積量子メモリの実現に向けて、複数NV中心の同時制御を試みます。その次には、大規模量子ストレージによる高速な量子中継技術を確立し、量子暗号通信や分散型量子計算、秘匿量子計算の通信基盤となる量子インターネットの実現を目指します。

【本研究への支援】

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）ムーンショット型研究開発事業ムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」（プログラムディレクター：北川 勝浩 大阪大学 大学

院基礎工学研究科 教授) 研究開発プロジェクト「量子計算網構築のための量子インターフェース開発」(プロジェクトマネージャー (PM): 小坂 英男 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授/量子情報研究センター センター長) (課題番号JPMJMS2062)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(研究総括: 荒川 泰彦 東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授) (課題番号JPMJCR1773)、日本学術振興会「科学研究費助成事業」(課題番号20H05661、20K2044120)、総務省「ICT重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」(課題番号JPMI00316) による支援を受けて行われました。

【小坂PMコメント】

量子コンピュータの大規模集積化のためには、量子プロセッサのみならず、量子メモリの集積化も重要である。今回の成功により、個別制御可能な量子メモリの密度およびビット数を圧倒的に向上させることが可能となり、誤り耐性型汎用量子コンピュータの開発に向けて大きな一歩を踏み出したと言える。

【参考図】

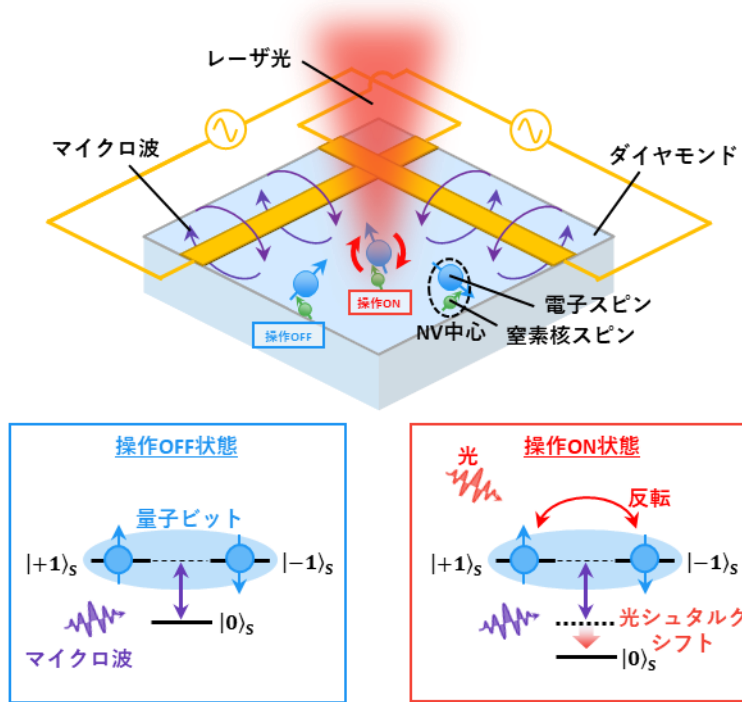


図1 光アドレス量子ゲートの概念図

ダイヤモンド表面のアンテナから広範囲のNV中心にマイクロ波が印加される。そのマイクロ波のみでは、各NV中心のスピ量子ビットにはスピ状態を保存して補助準位と共鳴するだけで量子ゲート操作は発動しない。一方で、レーザ光が照射されたNV中心は光シュタルクシフトを受け、離調が発生することにより、異なるスピ状態に遷り量子ゲート操作が発動する。

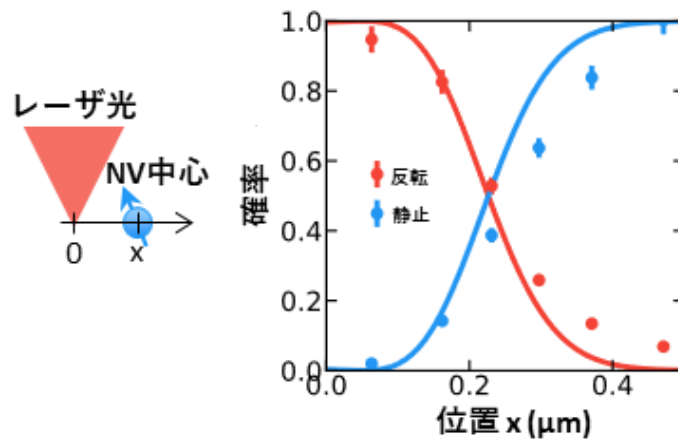


図2 量子ゲートの空間分解

レーザ光の焦点位置が、操作対象となるNV中心位置と一致する場合には、スピ量子ビットに対して反転操作が正しく行われる。一方で、それらの相対距離が大きくなるに従って反転操作の作用は弱まり、スピ量子ビットは静止する。図は量子ゲートの一つであるビット反転ゲートの位置特性を示す。

【用語解説】

注1) スピン量子ビット

量子ビットは量子コンピュータや量子暗号通信などの量子情報処理における基本単位。通常の計算機ではビットは0か1のどちらかを表すが、量子コンピュータの基本単位となる量子ビットは、0と1の「重ね合わせ状態」を取ることができる。また、この重ね合わせ状態は異なる量子ビット同士で量子的な相関（量子もつれ）を持つことができる。本研究でのスピン量子ビットとは、スピンと呼ばれる磁気的な物理量で0と1を表す量子ビットのこと。スピンを持つ粒子として電子、陽子、中性子などがある。

注2) 量子メモリ

量子情報を長時間保持することができる量子ビット。ダイヤモンドNV中心の電子スピンは1秒以上、核スピンでは1分以上のメモリ時間がこれまでに報告されている。

注3) 量子中継

光子が届かない遠方に量子情報を送るための手段。光子は光ファイバーを透過する際に距離に応じて損失する。通常の光通信では減少した光の強度を通信途上で補完するという中継方法が取られているが、量子通信においては光の最小単位である光子に乗せた量子情報が原理上複製できないことから同様の方法は取れない。ここでいう量子中継とは、これまでの中継とは本質的に異なった、いわゆる量子テレポーテーションを動作原理とする新たな中継方法のことを指している。量子テレポーテーションとは、空間的に離れた地点で共有された量子もつれを資源にして、一方の地点から他方の地点に量子情報を瞬時に転送する原理である。

注4) 3準位構造

量子系がとり得る状態をエネルギーの大きさで並べて準位と表現することがある。NV中心の電子スピンおよび核スピンは、それぞれ三つのエネルギー準位を持つ。各スピンは、3準位のうち、2準位を量子ビットの0と1に対応させ、残った1準位を操作のための補助準位として役立てる。

注5) 光シュタルクシフト

通常のシュタルクシフトは、量子系に外部電場を与えた際に量子系の準位にエネルギーシフトが起こる現象だが、光シュタルクシフトは、光によってエネルギーシフトが起こる現象である。このときの光は、量子系の2準位の共鳴周波数から離調させるため、2準位間の光学遷移は起こらない。エネルギーシフト量は、光のパワーに比例し、離調に反比例する。

注6) 量子もつれ

量子もつれとは、二つの量子の間に量子的な相関がある状態であり、この状態にある二つを別々に記述することはできない。量子的な相関とは、片方の測定結果と他方の測定結果に、測定の種類に関わらず依存関係があること。量子テレポーテーションの資源となる。

【掲載論文】

“Optically addressable universal holonomic quantum gates on diamond spins”
(ダイヤモンドスピンを用いた光学アドレス可能なユニバーサルホロノミック量子ゲート), Yuhei Sekiguchi, Kazuki Matsushita, Yoshiki Kawasaki, and Hideo Kosaka, Nature Photonics, DOI: 10.1038/s41566-022-01038-3

【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

小坂 英男 (コサカ ヒデオ)

横浜国立大学 大学院工学研究院 教授／先端科学高等研究院 主任研究者 (兼務) /
量子情報研究センター センター長 (兼務)

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台7-9-5 総合研究棟S棟306号室

Tel/Fax : 045-339-4196

E-mail : kosaka-hideo-yp[at]ynu.ac.jp

<JST事業に関すること>

犬飼 孔 (イヌカイ コウ)

科学技術振興機構 ムーンショット型研究開発事業部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel : 03-5214-8419 Fax : 03-5214-8427

E-mail : moonshot-info[at]jst.go.jp

<報道担当>

横浜国立大学 学長室 広報・渉外係

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台7-9-1

Tel : 045-339-3027 Fax : 045-339-3179

E-mail : press[at]ynu.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp