

## 世界初、ダイヤモンド中の量子メモリによる量子誤り訂正に成功 ～誤り耐性のある量子コンピュータへの道を拓く～

### 本研究のポイント

- 量子コンピュータを大規模化するためには、量子インターフェースによって量子ネットワークに接続し、分散処理化することが必要である。
- 分散処理にはタイミング制御が不可欠であり、一時的に量子状態を保持する量子メモリを備えた量子インターフェースが必要である。
- 一時的に保持した量子メモリに発生するエラーを自動的に量子誤り訂正することで、誤り耐性のある量子コンピュータやグローバルな量子インターネットへの道を拓く。

### 【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小坂 英男 教授らは、ダイヤモンド中の窒素および複数の炭素同位体からなる量子メモリをゼロ磁場下で制御することで、量子誤り訂正に世界で初めて成功しました。

研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV中心）<sup>注1</sup>（図1）を構成する窒素原子とその周囲にある複数の炭素同位体原子の核スピン<sup>注2</sup>集団を、量子情報を長時間保持するための論理的な量子メモリ<sup>注3</sup>として用い（図2）、操作エラーによって破壊された量子状態を自動的に訂正できることを実証しました（図3）。ゼロ磁場下のスピン集団を用いた量子誤り訂正は世界初です。

本研究により、ゼロ磁場下で動作する超伝導量子コンピュータを量子ネットワークに接続するために必要な量子インターフェースに、量子誤り耐性のある量子メモリを内蔵することができ、誤り耐性のある分散型量子コンピュータや大規模量子コンピュータネットワーク、さらにはグローバルな量子インターネットを実現するために不可欠な量子中継器<sup>注4</sup>の実現に道を拓きます。

本研究成果は2022年4月27日（英国時間）に、Nature Portfolioが発行するCommunications Physicsのオンライン版で公開されます。

### 【研究の背景と経緯】

近年、ゲート型汎用量子コンピュータの開発競争が日米欧中で繰り広げられています。しかしながら、現状の方式ではNISQ（Noisy Intermediate Scale Quantum）と呼ぶエラー耐性のない1000ゲート程度の中規模な量子コンピュータは実現可能なものの、その実用性は限定的です。実用性を格段に高めるためには、通常のデジタルコンピュータと同様にエラー耐性を獲得する必要があります。エラー耐性の獲得には、非現実的な8桁程度の精度の量子ゲート操作を実現しない限り、100万ゲート級の大規模量子ビット<sup>注5</sup>を開発するしかありません。ところが、現在最も開発が先行している超伝導量子ビット100万ゲート分を1つの冷凍機内に収め、集中的に処理することは物理的に不可能です。その解決策として、中規模計算用量子ビットを量子的な光で接続し、

分散的に処理する誤り耐性型量子コンピュータの開発が望まれています。この分散型量子コンピュータは一か所にまとまっている必要はなく、ある程度距離のある大規模量子コンピュータネットワークに発展させることができ、さらにグローバルになれば量子インターネットに発展する可能性も秘めています。量子コンピュータの応用は主に高速計算ですが、量子コンピュータネットワークあるいは量子インターネットでは、秘匿量子計算と呼ぶ安全性を確保しながら秘匿性のある情報を分散的に処理することができます。また、株取引など地球規模でありながら同時性が担保されるべきユースケースで、唯一公正なツールを提供できる可能性があります。

分散処理を実現するには、超伝導量子など計算用の量子ビットと通信用の光量子ビットを量的に変換する量子変換が必要であり、これを実現するキーデバイスが量子インターフェースです。しかしながら、量子インターフェースにおける量子変換に誤りがあつては、誤り耐性を持つ大規模量子コンピュータを構築できません。そこで、量子インターフェースには量子メモリを内蔵し、変換の際に生じる誤りを訂正する量子誤り訂正の機能が不可欠です。

ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）中心は、4桁以上の精度で量子ゲート操作が可能な電子スピンと1分程度の長寿命を持つ核スピンからなる量子メモリを備え、マイクロ波や光波とも相互作用するため、量子インターフェースを担う物理系として優れた性質を持ちます。しかしながら、従来の手法では、NV中心のスピンを制御するために強い磁場を印加せざるを得ず、強い磁場で超伝導状態が破壊され正常な動作ができなくなる超伝導量子ビットと光量子ビットとの量子変換をNV中心で行うことは不可能でした。従って、完全なゼロ磁場下で動作する量子誤り訂正技術の開発が課題となっていました。

### 【研究の内容】

研究グループは、ダイヤモンド中のNV中心を構成する窒素原子とその周囲にある複数の炭素同位体原子の核スピン集団を、量子情報を長時間保持するための論理的な量子メモリとして用い、操作エラーによって破壊された量子状態を自動的に訂正できることを実証しました。ゼロ磁場下でスピン集団を用いた量子誤り訂正は世界初です。成功の鍵は、独自に開発した電子スピンのゼロ磁場下におけるホロノミック量子ゲート操作<sup>注6)</sup>です。

量子誤り訂正とは、保存したい量子状態を多数の量子メモリに分散的に保持することにより、どれか1つの量子メモリに何らかの理由でエラーが生じても、残りの量子メモリ群の持つ復元力により自動的に誤り訂正されるものです。この復元力は、多数の量子メモリが量子もつれ状態<sup>注7)</sup>にあることで発現し、量子もつれ測定<sup>注8)</sup>の結果に応じて自動的に復元されます。ゼロ磁場下では、量子メモリを構成する核スピン各々が磁場によってばらばらに回転することがなく、量子もつれ状態を長く安定に維持することができます。通常は磁場を印加しなければ電子スピンや核スピンを操作することは不可能ですが、我々の開発したホロノミック量子ゲート操作では、マイクロ波あるいはラジオ波の偏波自由度を自在に操ることで、ゼロ磁場下で電子スピンや核スピンを操作し量子誤り訂正を可能としました。

### 【今後の展開】

今回、ダイヤモンドNV中心に付随する核スピン集団を論理的な量子メモリとして用い、操作エラーによって破壊された量子状態を自動的に訂正する量子誤り訂正にゼロ磁場下で成功したことから、今後はこの量子メモリを応用し、超伝導量子ビットから光量子ビット

に量子変換する量子インターフェースの開発を行います。

量子インターフェースによって量子コンピュータを量子接続することにより、分散型量子コンピュータを開発するだけでなく、大規模量子コンピュータネットワークやグローバルな量子インターネットに発展する可能性も秘めています。その応用範囲は高速計算に留まらず、安全性を確保しながら秘匿性のある情報を分散的に解析する秘匿量子計算や、地球規模で公正な同時性を担保する量子株取引ツールなどを提供する可能性があります。

### 【本研究への支援】

本研究の一部は、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）による支援を受けて行われました。

### 【小坂PMコメント】

これまでのエラー耐性のない中規模量子コンピュータ（NISQ）の実用性を格段に高めるためには、通常のデジタルコンピュータと同様にエラー耐性を獲得する必要がある。今回の成功により、量子インターフェースに量子誤り訂正機能をもつ量子メモリを内蔵することにより、中規模な計算用量子ビットを量子的な光で接続し、分散的に処理する大規模な誤り耐性型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。

### 【付記】

本研究は、上記JST「ムーンショット型研究開発事業」、JST「戦略的創造研究推進事業 CREST」の他、日本学術振興会「科学研究費助成事業」（課題番号20H05661、20K20441）、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）の支援を受けました。

### 【参考情報】

プレスリリース 2019年6月27日「世界初、光子からダイヤモンド中の炭素への量子テレポーテーション転写に成功」

<https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/22445/detail.html>

プレスリリース 2021年12月10日「世界初、ダイヤモンド中の電子と光子の幾何学的な量子もつれの生成に成功」

<https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/27338/detail.html>

<参考図>

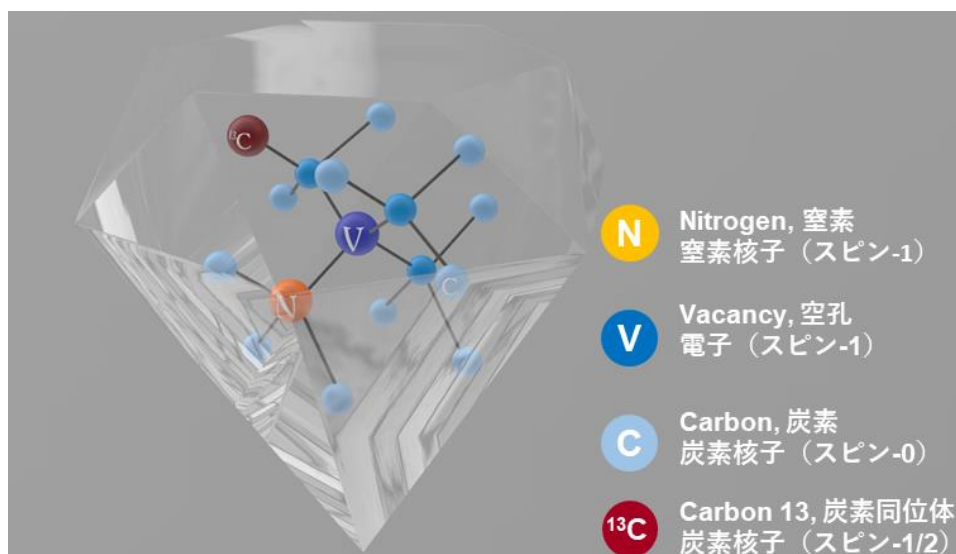


図1 窒素空孔中心 (NV中心)

ダイヤモンドに不純物や格子欠陥が入ると、光学的性質が変わってさまざまな色が着く。この欠陥構造は色中心 (カラーセンター) と呼ばれ、処理条件によって選択的に形成できる。NV中心はその一種で、ダイヤモンド中で炭素原子から置き換わった窒素原子と、炭素原子が1つ欠損した空孔とが隣接した構造をしている。空孔内の電子や窒素原子、炭素同位体原子の核子は特有のスピンと呼ぶ量子的な特性を持ち、それぞれ電子スピン、核スピンと呼ばれる。本研究では、核スピンを量子メモリとして使い、電子スピンを介してマイクロ波やラジオ波で量子操作を行った。

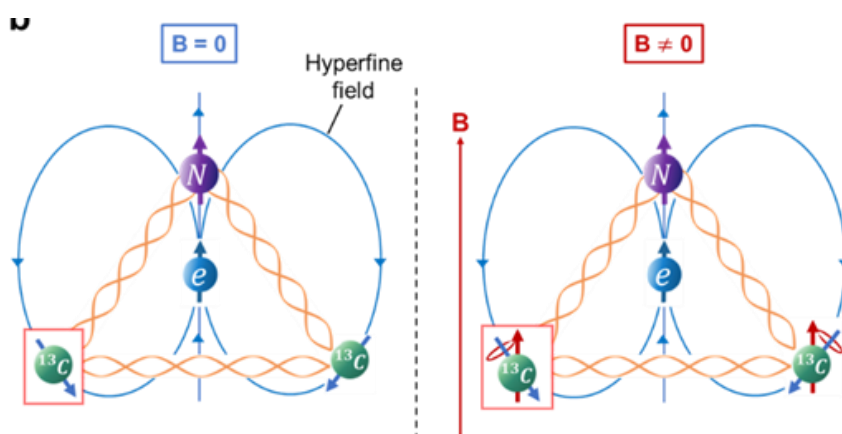


図2 量子誤り訂正のゼロ磁場下と磁場下の違いを示す概念図

炭素核スピんに印加される実効的な磁場 (四角で囲まれた矢印) の安定性が量子誤り訂正の精度を左右する。ゼロ磁場下 (左) では電子スピン (e) による超微細磁場 (青矢印) のみが印加され、安定で精度の高い量子誤り訂正が可能となる。一方、磁場下 (右) では、電子スピンによる超微細磁場 (青矢印) と外部から印加される外部磁場 (赤矢印) が合成され、電子スピンの向きに応じて実効磁場が変動するため、量子誤り訂正は不安定で精度の低いものとなる。

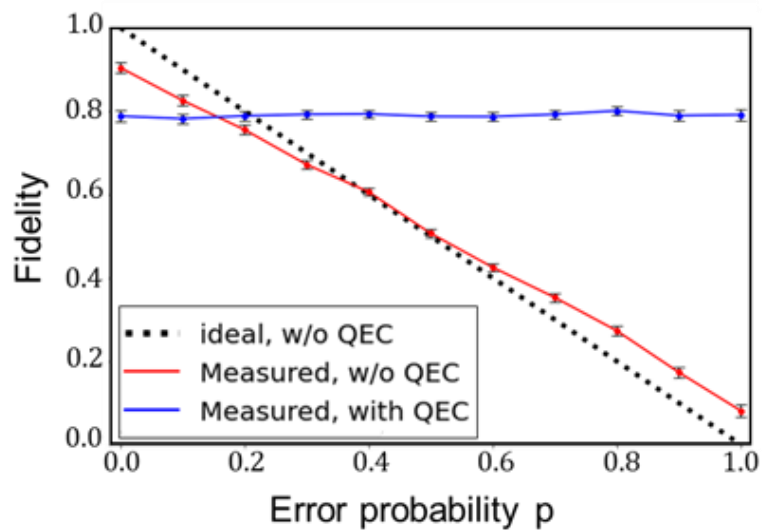


図3 量子誤り訂正の誤り耐性を示す実験結果

量子誤り訂正をしない場合（赤）と量子誤り訂正をする場合（青）における、量子メモリ忠実度のエラー確率依存性を示す実験結果。点線（黒）は量子誤り訂正をしない場合のシミュレーション結果を示す。エラー確率が15%以上の時には、量子誤り訂正を行うことで量子メモリの忠実度が80%程度まで復活することがわかる。本実験における忠実度は、状態の準備と読み出しの忠実度を含み、量子誤り訂正自体の忠実度はさらに高い。

## 【用語解説】

### 注1) 窒素空孔中心 (NV 中心)

ダイヤモンドに不純物や格子欠陥が入ると、光学的性質が変わってさまざまな色が着く。この欠陥構造は色中心 (カラーセンター) と呼ばれ、処理条件によって選択的に形成できる。NV 中心はその一種で、ダイヤモンド中で炭素原子から置き換わった窒素原子と、炭素原子が1つ欠損した空孔とが隣接した構造をしている。空孔内の電子や窒素原子の核子は特有のスピンに対応した量子自由度を持ち、それぞれ電子スピン、核スピンと呼ばれる。

### 注2) スピン

こまのような自転回転に例えられる磁気的な性質を持った量子状態。上向き ( $\uparrow$ ) と下向き ( $\downarrow$ ) だけでなく、これらの量子的重ね合わせ状態である  $\uparrow + \downarrow$ 、 $\uparrow - \downarrow$  など位相の自由度を持つ。NV 中心の電子スピンや窒素の核スピンは複数のスピンの組み合わせによって1体のスピンであるかのように振る舞う特殊な状態にある。その結果、単に上向きや下向きといった磁気的な性質のみならず、光子の振動の方向を意味する偏光と似た幾何学的な性質を持つ。

### 注3) 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4) 量子中継器

光子が届かない遠方に量子情報を送るための手段。光は伝達媒体である光ファイバーを透過する際、減衰作用を受けるため、光子の伝達成功率は距離に応じて下がってしまう。通常の光通信ではこの減少した光子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送受信される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。

### 注5) 量子ビット

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。

### 注6) ホロノミック量子ゲート操作

曲率を持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を利用した量子ゲート操作。量子の性質を表す幾何学的な空間における特有の性質を利用しているため、幾何学的量子ゲート操作とも呼ぶ。

#### 注7) 量子もつれ状態

量子もつれとは、2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2つを別々に記述することはできない。量子的な相関とは、片方を測定したとき、その測定の種類に関わらず他方も同じ測定をしたときと一対一に対応する結果を得るもの。代表的なものにベルの4状態というものがある。

#### 注8) 量子もつれ測定

2つの量子状態に対して個別の測定はせずに、2つの量子状態の相関のみを測定する方法。2量子もつれ状態であるベルの4状態の中の1つに区別する。量子誤り訂正に欠かせない要素技術。

#### 【掲載論文】

“Quantum error correction of spin quantum memories in diamond under a zero magnetic field”, Takaya Nakazato, Raustin Reyes, Nobuaki Imai, Kazuyasu Matsuda, Kazuya Tsurumoto, Yuhei Sekiguchi, and Hideo Kosaka, Communications Physics (Nature Portfolio journals) DOI: 10.1038/s42005-022-00875-6

#### 【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/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