



平成 26 年 1 月 29 日

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学
独立行政法人 日本原子力研究開発機構
独立行政法人 科学技術振興機構

ダイヤモンドを用いて量子コンピュータの実現に不可欠な量子エラー訂正に成功 ～量子情報デバイスの実用化・量子コンピューティングの実現に前進～

研究成果のポイント

1. 室温での固体量子ビットの量子エラー訂正に世界で初めて成功
2. 量子コンピュータに必須の「エラー訂正」をしながら計算というエラー耐性を多量子ビットへ拡張可能
3. 実用的な固体量子情報デバイス開発への道を開く

量子情報は、環境からのノイズによってたやすく壊されてしまうため、量子エラー訂正なしには量子コンピューティングは実現しないと言われてきました。

国立大学法人筑波大学(以下「筑波大学」という)磯谷順一名誉教授(筑波大学知的コミュニティ基盤研究センター・前主幹研究員)、独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という)量子ビーム応用研究部門半導体耐放射線性研究グループ大島武リーダーらは、ドイツとの共同研究により、室温での固体量子ビットの量子エラー訂正に世界で初めて成功しました。

ダイヤモンド中のカラーセンター^{*1}の1つである NV センター^{*2}の単一欠陥(単一分子に相当)を用いて、電子スピン^{*3}1 個と核スピン 3 個からなるハイブリッド量子レジスタを作成しました。これを用いて、室温動作の固体スピン量子ビットでは世界で初めて、量子エラー訂正のプロトコルの実証に成功したものです。これは、量子情報デバイス、量子コンピューティングに必須の量子エラー訂正における大きなブレークスルーです。この成果により、量子中継器など、実用的な固体量子情報デバイス開発、量子コンピュータの実現に向けて大きく前進しました。

本研究は科学技術振興機構(JST)国際科学技術共同研究推進事業(戦略的国際共同研究プログラム)日独共同研究(ナノエレクトロニクス)「ダイヤモンドの同位体エンジニアリングによる量子コンピューティング」(日本側研究代表者:磯谷順一筑波大学名誉教授、ドイツ側代表者ウルム大学 Fedor Jelezko 教授)の一環として行われました。

研究成果は NATURE 誌に 1 月 29 日付け掲載予定です。

研究の背景

(1) 量子エラー訂正

通常のデジタル情報の処理、記録、通信においてもエラー訂正は不可欠ですが、量子情報は外部からのノイズ、攪乱に対してきわめて脆弱です。ノイズによって計算が途中で台無しにされないための量子エラー訂正なしには、量子コンピューティングの多量子ビット化は実現しないと考えられています。ただし、量子情報のエラー訂正は、次の2つの理由で難しい課題です。第1の難関は、通常のビットは1か0どちらかの状態しかとらないのに対して、量子ビットは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ という2つの状態の任意の重ね合わせ状態（ただし $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ ）をとることができます。すなわち、 α β のとり得る値の組み合わせは無限となりうるのです。第2の難関は、情報を複製するために量子ビットを測定すると、 $|0\rangle$ か $|1\rangle$ のどちらかの状態になってしまうため、コピーすることができないことです（これを非クローン定理という）。

量子計算をエラーから守るアルゴリズムが存在することは、ショア (P. W. Shor, 1995 年) とスティーン (A. Steane, 1996 年) によって示されました。エンタングルメント (量子もつれ)^{*4} という量子力学特有の現象を利用すると、守りたい量子ビットの中味を知るこなしに、エラーに関する情報のみを引きだし、訂正を施すことができるのです。しかし、量子エラー訂正アルゴリズムを実証した実験例は、これまでは、イオントラップや超伝導量子ビットなど、極低温を必要とするものや、多量子ビット化の拡張において限界のある核スピンの集団を用いる NMR に限られていました。量子コンピュータを単なる原理実証から実用化の段階へ進めるには、大規模化が可能な系において、量子エラー訂正をしながら計算できることを示すことが必須となります。

(2) 日独共同研究の狙い

単一欠陥検出と単一電子スピン検出 (Gruber *et al.*, 1997)、単一電子スピンの任意の重ね合わせ状態を作る操作 (Jelezko *et al.*, 2004)、電子スピンと2個の核スピンの3量子ビット・エンタングルメント (Neumann *et al.*, 2008) などが発表されて以来、NV センターを用いた室温動作の量子コンピューティング開発への期待が高まってきました。最近では量子コヒーレンスに基づいた超高感度と単一欠陥による超高空間分解能とを併せもつセンサー (磁場・温度・電場) への応用も注目され、ドイツで始まった研究はハーバード大学、デルフト工科大学を初め世界的に広がってきています。

磯谷名誉教授が日本側代表を務めた日独共同研究は、ダイヤモンド合成^{*5}、欠陥制御などダイヤモンド材料科学において大きな蓄積のある日本チーム^{*6}と、量子操作において最先端に立つドイツチームが相補的に取り組むことで、量子コンピューティングの世界初のブレークスルーを目指しました。

研究内容と成果

原子核がマイクロな磁石として振る舞う核スピンは MRI として医療診断に、また NMR として有機分子や生体分子の構造決定に使われています。これらではシグナル検出に 10^{12} 個を超える分子集団を必要とします。

本研究グループは、固体中の単一の核スピンを量子ビットに利用し、量子エラー訂正に必要な3量子ビットまで拡張することを目指しました。核スピンを用いる量子ビットには、量子情報を保持する時間が長いという長所が

あります。しかしその一方で、単一核スピンでは初期化や読み出しが難しい上に、計算を構成するステップとなるゲートの動作速度が遅いという短所があります。エラー訂正に手間取ってしまうと新たなエラーが入り込んでまいります。そこでマイクロな磁石として強さにして3桁大きい電子スピンと組み合わせることにより、高速化を図りました。そこで着目したのが、単一の電子スピンからなる量子ビットについて、室温での光による初期化や読み出しが実現している特異的な系であるダイヤモンド結晶中の NV センターです。

窒素は核スピンをもちますが、炭素は天然存在比 1.11%の同位体 ^{13}C のみが核スピンをもちます。NV センターの単一の欠陥(単一の分子に相当)に関して、 ^{14}N (天然存在比 99.63%)に加えて、 ^{13}C を2個もつものを作製し、これを、単一の核スピン3個と単一の電子スピン1個とからなるサブナノスケールのハイブリッド量子レジスタとして用いました。NV センターという特異的な系において電子スピンとの相互作用を用いると、核スピン量子ビットの初期化、読み出し、2量子ビットゲート操作を高速に実行できます。これにより、「量子情報を保持する時間が長いことと、動作速度が速いことの両立」を室温で実現しました。

量子コンピューティングの超並列計算能力は、量子力学特有の現象で「エンタングルメント(量子もつれ)」と呼ばれる「複数の量子ビットの状態が強い相関関係をもって分離できない状態」に基づいています。私たちは、ハイブリッド量子レジスタの3個の核スピンを用いて、高品質の3量子ビット・エンタングルメントの生成に室温で成功しました。さらに、ハイブリッド量子レジスタを用いて、量子コンピューティングに不可欠な量子エラー訂正アルゴリズムの実証にも成功しました。

本研究における量子エラー訂正の成果のポイントは以下の3点です。

- ・集積化によって量子ビット数の大規模化が可能な、拡張性のある固体素子で量子エラー訂正を実現した(これまでは、固体素子では極低温を必要とする超伝導量子ビットの例があるのみだった)
- ・スピンを用いた量子ビットでの量子エラー訂正を実現した(これまでは、拡張性のない、核スピン集団の NMR の例があるのみだった)
- ・室温での量子エラー訂正を実現した(これまでは、拡張性のない、核スピン集団の液体分子 NMR の例があるのみだった)

今後の展開

(1) より確固な量子エラー訂正

今回の成果は、補助ビットを含めた3量子ビットのうち 1 ビットのビットフリップまたは位相フリップという単純なエラー発生に有効な3量子ビットコード・プロトコルの実証です。しかしこれは、5量子ビットコードへと拡張することが可能です。

(2) NV センターの配列を用いた多量子ビット化・光子を用いてリンクした量子情報ネットワーク

今回の日独共同研究の別の成果として、イオン注入による NV センター作成において、コヒーレンス時間(量子情報を保持する時間)を長くすることと収率を上げることの両方を達成し、3個の電子スピンからなる3量子ビット量子レジスタを作製しました [T. Yamamoto *et al.*, Phys. Rev. B. **88**, 201201 (R) (2013)]。この量子レジスタでは、量子ビット間の相互作用の強さ(ゲート操作の速さ)とコヒーレンス時間の積という性能指数において、極低温のイオントラップと同等の値を室温で達成しました。マスクを用いたイオン注入により、NV センターの配列を

作製する多量子ビット化実現への道を開いたと考えられます。今回のエラー訂正は、配列中のそれぞれの NV センターに適用することができます。また、長い量子情報保持時間の量子ビットをもち、正確な量子操作をするハイブリッド量子レジスタをユニットとして光子を用いて結合する量子情報ネットワークへと発展させることが可能です。

用語解説・注

- *1 カラーセンター:ダイヤモンドなどの結晶において、規則的な結晶格子中であるべき原子がない状態、不純物原子で置換された状態、格子位置にあるべき原子や不純物原子が格子間位置を占めた状態などを点欠陥といいます。この点欠陥は本来なら透明な結晶を着色させる要因になることがあるのでカラーセンター(色中心)と呼ばれます。
- *2 NV センター:ダイヤモンドでは、炭素を置換した窒素(N)とその隣に原子空孔(V)が存在するカラーセンターを NV センターと呼びます(図1参照)。NV センターと光を組み合わせると、低温にしないとそろえられない向きにスピンの状態をそろえる(初期化ということ)が室温でできます。また、NV センターに光を照射すると波長の異なる光が返ってきますが、その強度からスピンの状態を読み出すことが室温でできます。こうした性質から、量子コンピュータのプロセッサの一部となる量子レジスタへの有力な候補となっています。
- *3 電子スピン、核スピン:電子は右回りか左回りかに自転しており、上向きか下向きに磁場を発生して磁石のようにふるまう性質を電子スピンといいます。磁場の中で 2 つのエネルギーの異なる状態をとります。電荷をもつ原子核が回転(スピン)すると磁場が発生し、磁石のようにふるまう性質を核スピンといいます。
- *4 エンタングルメント(量子もつれ):量子力学では、エンタングルメント状態にある2つの粒子において、一方の粒子の量子ビットが観測されて値が 0 か 1 に確定すると、もう一方の値もその瞬間に確定します。
- *5 量子レジスタの土台となるダイヤモンド結晶を高品質化(同位体濃縮・高純度化)してエラーの発生そのものを減らす研究は、独立行政法人物質・材料研究機構のグループ(先端材料プロセスユニット・超高压グループ 谷口尚リーダー、光・電子材料ユニット寺地徳之主任研究員)が取り組みました。
- *6 今回の研究における日本チームの主要な貢献:電子線照射による NV センターの作成
ダイヤモンドに電子線を照射し、熱処理をすることにより、不純物として含まれていた窒素から NV センターを作ることができます(図2)。今回の実験では、特別な組成(^{12}C 99.8%)の同位体濃縮であり、不純物窒素が炭素原子~10 億個に 1 個の割合程度しか含まれていない高純度の結晶を用いると同時に、 ^{13}C 核スピン 2 個がよい配置をもつ NV センターを探し出すために十分な数の NV センターを作成することが求められました。窒素濃度の低い結晶では、電子線を過剰にあててしまうと、NV センターの生成量が極端に減少する上に、元の状態に戻すこともできません。ピンポイントの照射条件の選択に、1990 年代から続けてきた筑波大学と JAEA との照射欠陥制御の共同研究の経験が活かされました。
日独共同研究では、様々な窒素濃度のダイヤモンド結晶に電子線を照射し、特性(コヒーレンス時間)を劣化させずに様々な濃度の NV センターを作成する技術開発も行いました(JAEA グループは高温電子線照射

容器を開発、筑波大学グループは 0.1ppb まで定量できる窒素濃度の高感度測定法を開発)。

参考図

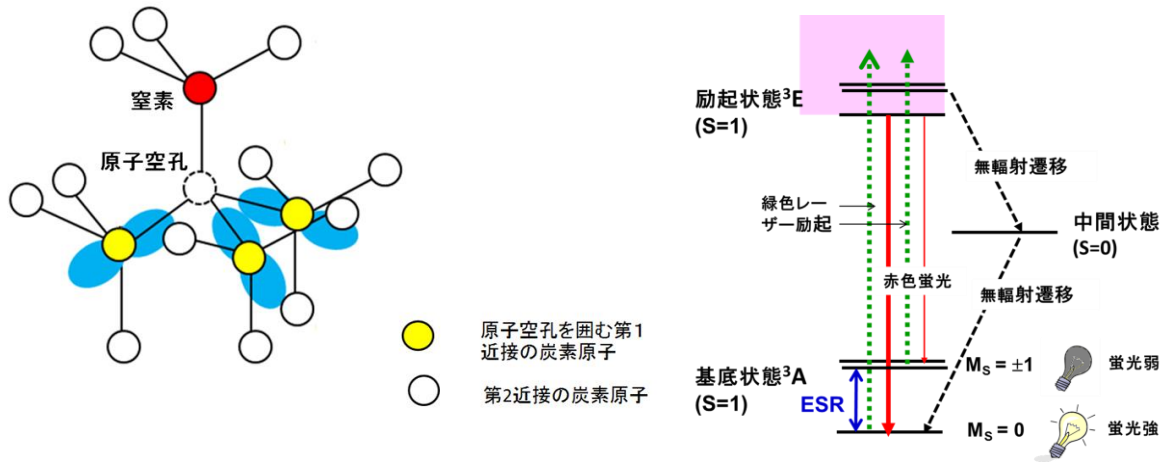


図1: ダイヤモンド中の NV センターの構造とエネルギー準位

NV センターは、炭素を置換した窒素と隣接する格子位置の原子空孔とのペアで電荷 -1 、電子スピン $S=1$ をもちます。有機色素なみに光を強く吸収し、赤色の蛍光を強く発光しますので、励起レーザー光(緑色)の焦点を小さなスポット(径 ~ 300 nm)に絞り、その位置からの蛍光のみを観測できる共焦点顕微鏡を用いると室温で単一欠陥を観測することができます。蛍光強度がスピン副準位 ($M_s=0, \pm 1$) に依存することを用いて、単一欠陥の単一電子スピンについて $M_s=0$ であるか $M_s = \pm 1$ であるかを読み出すことができます。光をあてることにより、室温で $M_s=0$ の状態にすることができます(光による初期化)。

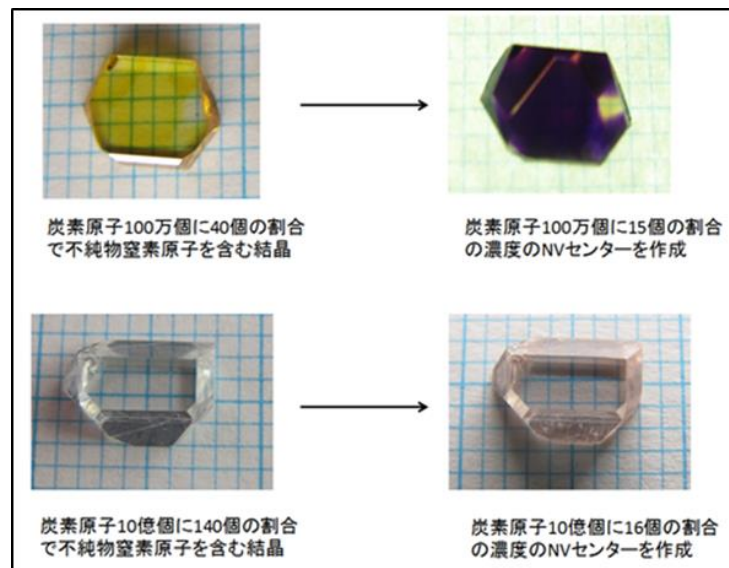


図2: ダイヤモンドの電子線照射・熱処理による NV センター作製

写真は住友電工が合成した天然存在比の結晶。

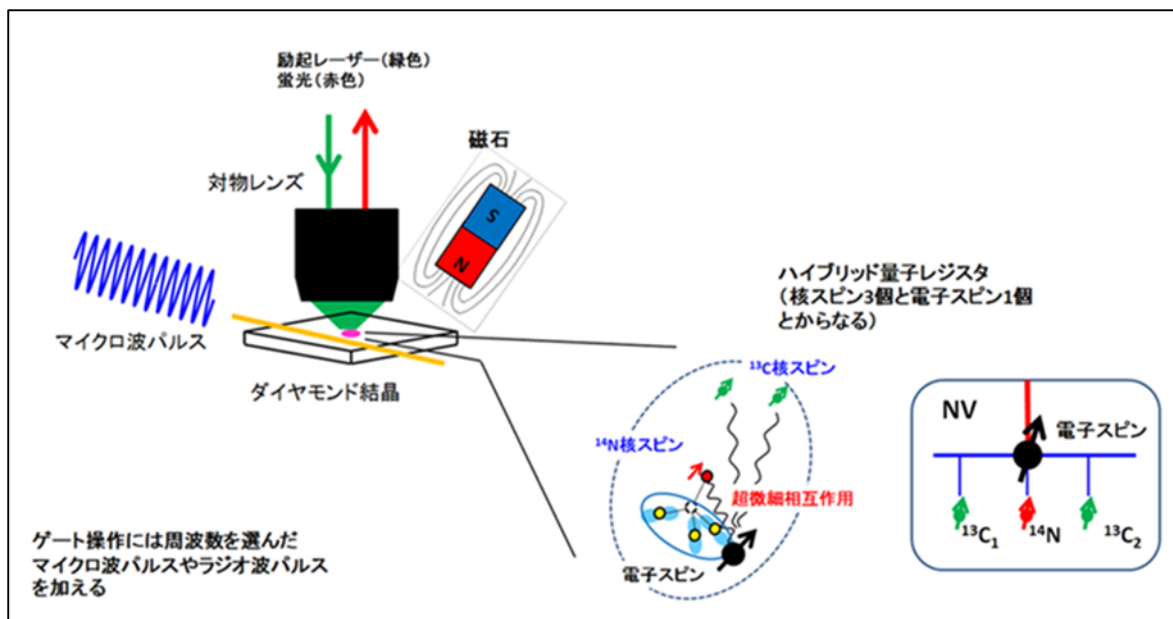


図3:ダイヤモンド中の NV センターを用いた量子情報保持時間の長い核スピンと高速な量子操作・光による読み出しが可能な電子スピンを組み合わせたハイブリッド量子レジスタ

電子スピンの初期化やスピンの読み出しには光を用います(蛍光の収集効率を高めるためにソリッド・イメージョンレンズを用いました)。核スピンの初期化には電子スピンとの SWAP ゲートを用い、シングル・ショット読み出しで確認します。スピンの量子操作には、周波数を選んだ(あるいは異なる周波数を組み合わせた)マイクロ波パルス、ラジオ波パルスをダイヤモンド表面に作成したコプレーナ導波路を用いて外から加えます。ハイブリッド量子レジスタはサブナノスケールの大きさです。高磁場(~620 mT)を用いました。

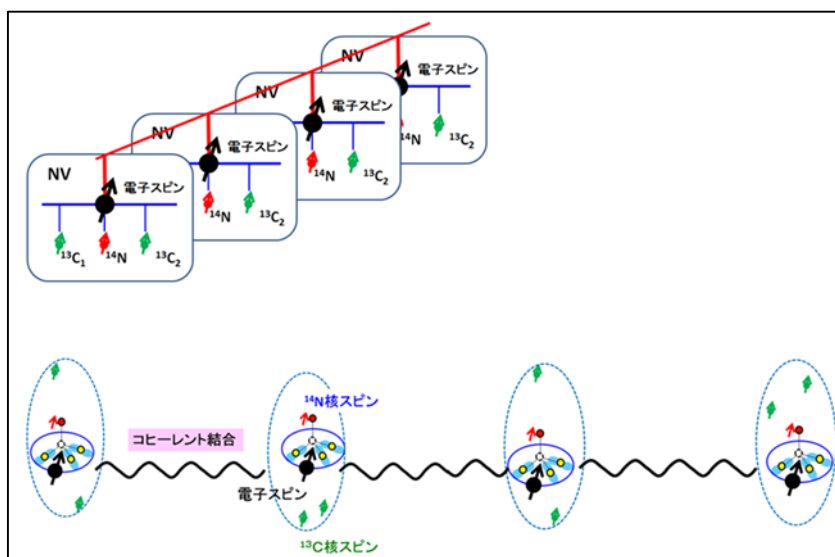


図4:長い量子情報保持時間をもつ核スピンと高速・正確な量子操作をする電子スピンを組み合わせたハイブリッド量子レジスタをユニットにした大規模化・量子情報ネットワーク化

掲載論文

題名 Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register

「固体ハイブリッド量子レジスタを用いた量子エラー訂正」

著者 G. Waldherr¹, Y. Wang¹, S. Zaiser¹, M. Jamali¹, T. Schulte-Herbrüggen², H. Abe³,
T. Ohshima³, J. Isoya⁴, J. Du⁵, P. Neumann¹, and J. Wrachtrup¹

¹ シュツットガルト大学（ドイツ）、² ミュンヘン工科大学（ドイツ）、

³ 日本原子力研究開発機構、⁴ 筑波大学、⁵ 中国科学技術大学

発行日 Nature

問い合わせ先

磯谷順一（いそや じゅんいち）

筑波大学知的コミュニティ基盤研究センター前主幹研究員・名誉教授

大島 武（おおしま たけし）

日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門半導体耐放射線性研究グループ・リーダー