

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

世界初！誤り耐性のある量子ビットを開発

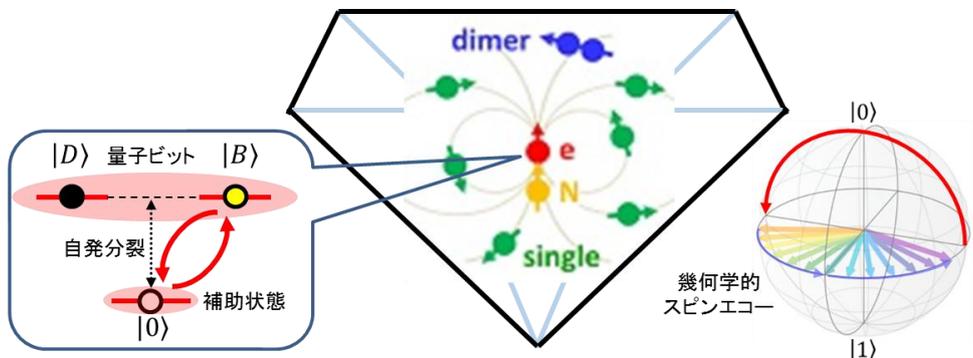
～幾何学的エコーで自律安定する量子メモリー／量子センサーへ～

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君（博士課程前期）は、量子通信、量子計算、量子計測^[注1]に用いられる誤り耐性のある量子ビット^[注2]の構成法とこれを自律的に安定化させる新原理を実証することに、世界で初めて成功しました。

今回の成功は、量子情報処理の基本要素である量子ビットとして有望な、ダイヤモンド中の単一欠陥の電子スピン^[注3]を用い、誤り耐性のある量子ビット構成を考案し、従来の動的エコーとは全く異なる幾何学的スピンエコー^[注4]と呼ぶ新原理の安定化技術で自律的に安定化できることを示した画期的な発見です。

今回得られた結果は、磁場を完全に排除した無磁場環境下で、量子ビットを破壊する原因となる環境ノイズや制御エラーを自律的に排除できることを示すもので、誤り訂正の不要な量子メモリーや究極の感度を持つ量子センサーに道を開くものと期待されます。

本研究成果は、2016年5月19日（英国時間）発行の科学雑誌「Nature Communications」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、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）ならびに科学研究費補助金基盤研究 A（課題番号 24244044）の支援のもとに行われました。



<発表雑誌>

雑誌名：Nature Communications
論文題目：Geometric spin echo under zero field（無磁場下における幾何学スピンエコー）
著者：関口雄平、幸村雄介、三島将太、田中統太、新倉菜恵子、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@ynu.ac.jp http://kosaka-lab.ynu.ac.jp

世界初！誤り耐性のある量子ビットを開発

～幾何学的エコーで自律安定する量子メモリー／量子センサーへ～

<研究背景>

量子情報科学は、これまでの情報を担ってきた古典力学的な情報単位（古典ビット）を量子力学という新しい物理法則に従う量子力学的な情報単位（量子ビット）に拡張する新時代の情報科学です。現在でも、量子効果を情報処理デバイス内部で利用しているものは多くありますが、情報の入出力にまで量子効果を許すことで、今までにない計算能力を持った量子計算機や、原理的に安全な量子通信を実現できるといわれています。また、超高感度なセンサーなどを実現する量子計測にも応用できるとして期待されます。これらを実現するためには、量子ビットを正確に操作し、安定に保持する必要があります。しかし、これまでに提案されている量子ビットは操作誤りが累積し、またこれを安定に保持することは極めて困難でした。

<今回の成果>

今回、小坂英男教授と博士課程前期の関口雄平らは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）の電子スピン対に着目し、誤り耐性のある量子ビットの構成法とこれを自律的に安定化する新原理を実証することに、世界で初めて成功しました。NV 中心はダイヤモンド中の窒素不純物と炭素欠損が隣接して対となったもので、真空中の孤立原子と同様に安定な量子媒体となり、この空孔に局在した電子スピン対は量子ビットとしての応用が期待されています（図 1）。従来の量子ビットはこれを構成する二つの量子状態[注 5]だけを利用していましたが、今回の量子ビットはこれらの二つの量子状態以外に補助となる第三の量子状態を利用することで、誤り耐性のある量子ビットを構成し、従来の動的スピネコーとは全く異なる幾何学的スピネコーと呼ぶ新原理の安定化技術により、磁場を完全に排除した無磁場下でこの量子ビットが自律的に安定化できることを示しました。量子の状態が持続する時間を量子コヒーレンス時間と呼びますが、この量子コヒーレンス時間が通常の 0.6 マイクロ秒から約 140 倍の 83 マイクロ秒に延びることを示しました（図 2）。本結果は、磁場を完全に排除した無磁場環境下で、量子ビットを破壊する原因となる環境ノイズや制御エラーを自律的に排除できることを示すもので、誤り訂正の不要な量子メモリーや究極の感度を持つ量子センサーに道を開くものと期待されます。

<動作原理と実験内容>

NV 中心の電子スピン対は、電子スピン間の相互作用により自発的に対称性が破れてエネルギー分裂し、図 3 に示すような V 型の三準位構造となります。ここでは、三状態のうちエネルギー縮退した二状態を量子ビットの 0、1 に対応させ、分裂した補助状態を操作空間

として扱います。量子ビットは、操作するマイクロ波の偏光に対応する明状態[注6]と、これに直交した暗状態[注7]に分解することができます。明状態だけをマイクロ波によって補助状態に一旦落とし、明状態に戻してくるという一往復の操作を行うことにより、明状態の複素振幅は幾何学的位相[注8]と呼ばれる180度の位相を獲得して符号が反転します。この符号反転は、明状態と補助状態で構成される操作空間では無意味ですが、量子ビット空間では明状態と暗状態を回転軸とした空間反転に相当します。通常、周囲の核スピンなどの環境ノイズによって量子ビットの位相は図4のようにランダムな振る舞いをしますが、空間反転を行うことであたかも時間が反転したような効果が働き、ばらばらになった位相が元に戻り最初の量子状態が復活します。このような効果は一般的な二準位系のスピンの場合にはスピンエコーと呼ばれ、通常の位相である動的位相[注9]で操作する意味で動的スピンエコーとも呼べます。これに対して本成果では、幾何学的位相で操作する意味で幾何学的スピンエコーと呼びました。この幾何学的スピンエコーでは、多少の操作誤りがあっても量子ビットの状態を壊すことはありません。また磁場を完全に除去することで、系全体の空間対称性が上がって電子スピンと核スピンの相互作用が時間相関を持たなくなり、孤立した同位体炭素 (^{13}C) から生じるスピンノイズを完全に除去できることを明らかにしました。しかしながら、まれに同位体炭素が隣接した核スピン対となっていることがあり、この影響で一度のエコーで復活できる量子コヒーレンスには限界があります。スピンエコーを何度も繰り返すことで、この核スピン対の影響さえも低減できる可能性も示しました

＜今後の展開＞

スピンエコーを繰り返すことを一般にダイナミカルデカップリングと呼び、環境スピンの相互作用を打ち消すことができますが、特定のスピンのみと相互作用させることもできるため、超高感度の量子センサーとしても機能することができます。我々の提案する量子ビットは、無磁場下でも高い性能を発揮するため、非侵襲なバイオイメージングや、単分子イメージングのための高感度センサーにも大いに役立ちます。

＜総括＞

今回の成果の鍵は、物質に内在する自発的な対称性の破れを巧みに利用したことにあります。自発的かつ自律的に制御する本手法は独創的であり、強制的に制御する従来の手法と比べ、簡単でありながら、理想的な量子ビットを構成できます。これらの成果は、誤り訂正の不要な量子ビットや究極の感度を持つ量子センサーに道を開くものと期待されます。

<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、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）ならびに科学研究費補助金基盤研究 A(課題番号 24244044)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、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>

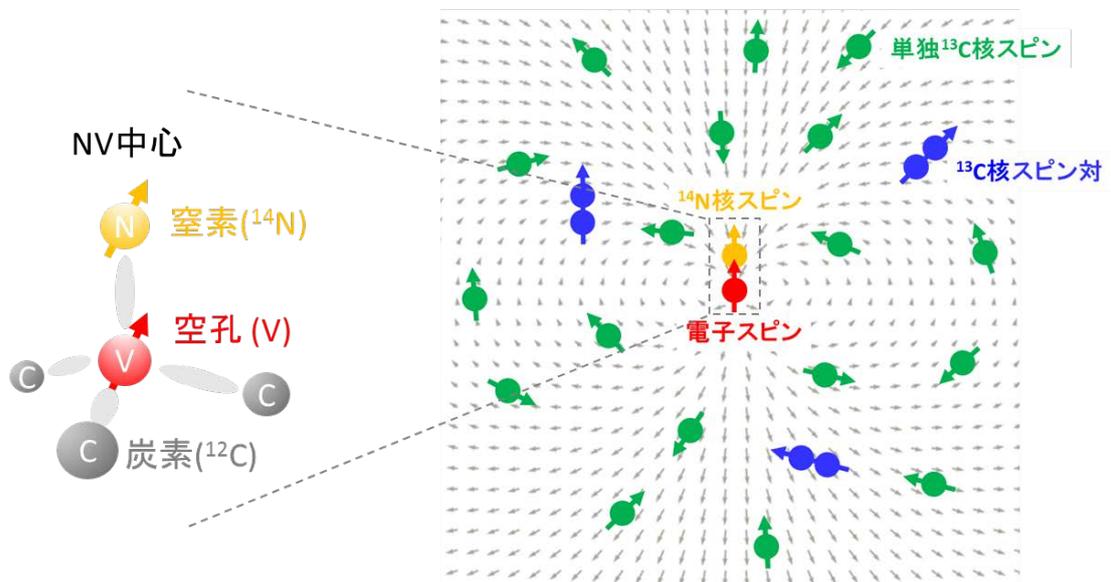


図1 ダイヤモンド中の窒素空孔中心 (NV 中心) の空孔に局在した電子スピン (e) と窒素 (^{14}N) ならびに同位体炭素 (^{13}C) の核スピン。ダイヤモンドを主に構成する炭素 (^{12}C) はスピンをもたないが、1.1%の確立で存在する同位体炭素 (^{13}C) は核スピンをもち、量子ビットとなる電子スピンを乱す環境ノイズとなる。灰色の矢印は電子スピンの作り出す磁場を示す。

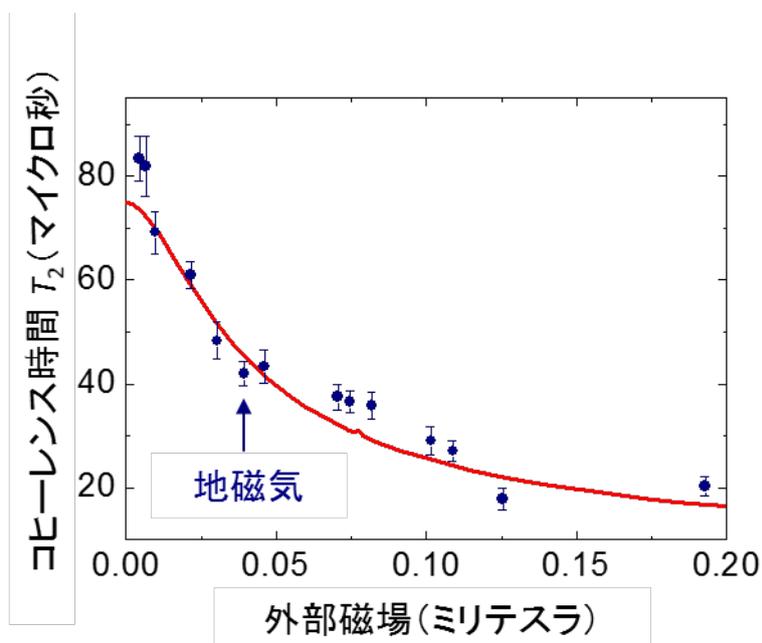


図2 幾何学的スピンエコーにより維持できるコヒーレンス時間 (T_2) の磁場依存性。コヒーレンス時間は無磁場下で最大となり、83マイクロ秒であった。

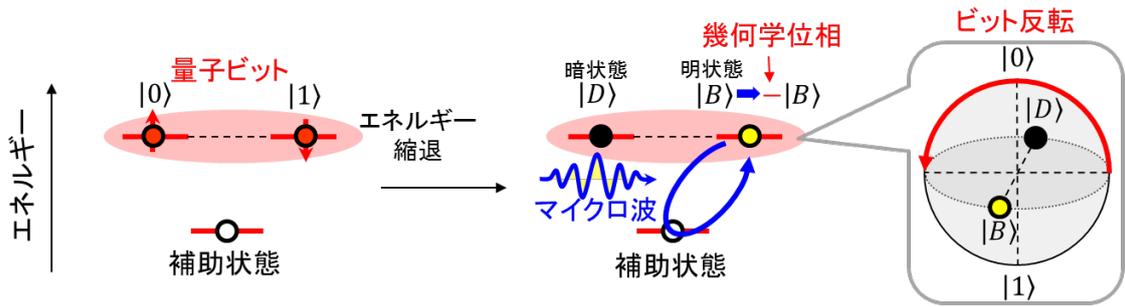


図3 ダイヤモンド中のNV中心に局在した電子スピン対で構成されるV型三準位構造とマイクロ波による幾何学的操作の原理。明状態 $|B\rangle$ は、マイクロ波による補助状態を通るループを経て、 -1 の幾何学的位相を得る。この操作は、結果として量子ビットの反転操作となる。

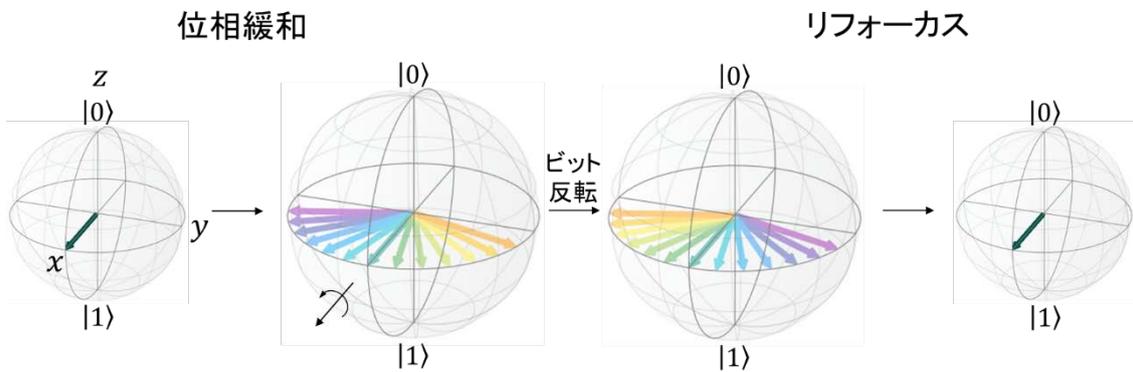


図4 幾何学的スピンエコーの動作原理を示す概略図。量子ビットの状態を0と1を北極・南極とする地球儀内の矢印で示す。最初の状態が図のx方向にあるとすると、時間とともに赤道面内ではらつきが生じる（位相緩和）。幾何学的操作によりx軸周りに180度反転する操作（ビット反転）を加えることで、ばらついていた状態がひっくり返る。ばらつきの速度が変わらなければ、状態は同じ時間で元の位置に戻る（リフォーカス）。やまびこに例えてエコーと呼ばれる。

<用語解説>

注1) 量子通信、量子計算、量子計測

量子通信とは、量子力学の原理を応用し、共通の秘密鍵を離れた2者間に安全に配送する技術。この秘密鍵を用いて秘匿通信を行うことができる。量子鍵配送のイニシャルをとり QKD と呼ばれる。この技術の延長線上には、量子の超並列処理特性を利用した量子計算がある。これらの技術は究極の感度を持つ量子センサーとしても応用される。

注2) 量子ビット

現在の情報科学では、0か1を示すビットが情報を担うが、量子情報科学では、0か1だけではなく、その重ね合わせ状態も示すことのできる量子ビットが情報を担う。実際には、2つの量子状態[注5]を0、1に対応させ、量子ビットとして扱う。量子状態は、一般に操作が難しいことに加え、環境からのノイズによって壊れやすいが、量子ビットは、操作性とノイズ耐性の二つの相反する性質を持たなければならない。

注3) 電子スピン

コマのような自転回転に例えた電子の量子状態。上向き(↑)と下向き(↓)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もつ。

注4) 幾何学的スピンエコー

幾何学的位相[注8]を巧みに利用したスピン反転によるスピンエコー。スピン反転は、環境ノイズを空間反転するが、スピンに時間反転の効果を与えるため、環境ノイズによって壊されたスピンの量子状態が復活する。

注5) 量子状態

ものの状態は、その状態がどのような物理量を持つかによって定義されるが、量子力学的な状態は、物理量が離散的な値をとる。そのときの状態、もしくは、それらの重ね合わせ状態(物理量の複数の値を同時に持つ状態)を量子状態という。

注6) 明状態

マイクロ波によって変化させることのできるスピンの状態。歴史的な背景から、明るい状態として名付けられている。

注7) 暗状態

マイクロ波によって変化させることのできないスピンの状態。歴史的な背景から、暗い状態として名付けられている。

注8) 幾何学的位相。

量子状態が状態を変化させる中で得る位相。その位相は、状態が辿ってきた経路にのみ依存し、時間には依存しない。

注9) 動的位相

量子状態が時間とともに得る位相。その状態のエネルギーと時間に比例して位相は大きくなる。