



令和3年4月30日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所  
東北大学高等研究機構  
東北大学先端スピントロニクス研究開発センター  
東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター

### 量子ビットに適した固体中のスピン中心は？ ～ブレイクスルーへ向けた物性・材料の探索指針～

#### 【発表のポイント】

- 量子ビット<sup>注1</sup>応用に適した固体中のスピン中心の物性と、今後ブレイクスルーが期待される物性や材料を系統的に示した
- 「ニューノーマル」の時代及び「Society5.0」での活躍が期待される、従来技術では困難な問題の解決が期待される量子コンピューター<sup>注1</sup>や、絶対に盗聴されない量子通信等の研究・開発を加速

#### 【概要】

量子コンピューターが商用レベルで実用化されるなど、量子現象がますます身近なものになりつつあります。固体中のスピン中心は、量子コンピューターを構成する「量子ビット」と呼ばれる量子情報担体を構成する物理系の中でも、室温で量子情報を保持可能であり、大きな注目が集まっています。近年、固体中のスピン中心を用いることにより、極めて高感度の電磁場検出や、量子テレポーテーション、原理上盗聴が不可能な量子通信が実現されている他、多様な量子現象を実験実証するプラットフォームとして利用されてきました。

東北大学電気通信研究所の金井駿助教は、シカゴ大学及びアルゴンヌ研究所(米国)のDavid D. Awschalom 教授を中心とする研究グループとの共同研究により、固体中のスピン中心の量子ビット応用に必要な物性をまとめ、今後材料工学等によりもたらされ得るブレイクスルーを系統的に示しました。本成果では、量子機能性とその実現に必要な物性を改めて精査すると共に、量子ビット中で両物性が果たす役割やその機能を更に向上・発展させることを主な目的の一つとして、「どの固体中のスピン中心材料を次世代の量子ビット向けに研究すべきか」を考える基準を示しました。

本研究成果は、量子コンピューターや、センシング、及び量子通信などの次世代の量子応用研究及び、新奇量子物性の探索に関する基礎研究を大きく加速するものです。

本成果は2021年4月26日付で英国の科学誌「Nature Reviews Materials」で公開され、関連する図面が表紙に採用されました。

## 【詳細な説明】

### 背景 — 固体中のスピン中心を用いた量子ビット —

現代の情報社会では、情報を古典ビットと呼ばれる「0」または「1」の決定論的な2値で表現して演算・記憶を行っています。例えば、コンピューターやスマートフォンにはプロセッサと呼ばれる情報処理装置が備えられており、素子の電荷量に対応したビット情報に基づいた論理演算の繰り返しにより複雑な計算を実現しています。

古典ビットでは常にビットの情報は「0」または「1」のどちらかに決定されています。一方で、ビットを構成する系を小さくした場合、例えば電子1つの状態は量子力学的な制約により多くの場合1つに定められず、複数の状態が重ね合わされた状態を取ります。この「不確定性原理」や「重ね合わせの原理」を利用して、ビットに「0」かつ「1」の2つの情報を同時に持たせた量子ビットや、それを応用した量子コンピューターが1980年代に提案されました。量子ビットの2つの情報を同時に保持できる性質を利用することで、量子コンピューターは古典コンピューターと比較して格段に高速に問題を解決できる場合があることが分かり、「量子優越性」の実例として大きな注目を集めています。

量子コンピューターに関する研究は、その後様々な物理系で実証研究が進められ、超電導体を用いた量子コンピューターは既に商用レベルで実用化されています。量子コンピューターとしての応用や、超伝導量子ビット以外にも、イオン捕捉、固体中のスピン中心、半導体を用いた系で量子ビットが実現されており、多様な機能・特徴を持った量子ビットの研究が盛んに行われています。

固体中のスピン中心の代表例として、ダイヤモンド窒素—空孔中心(NV 中心)<sup>注2)</sup>を用いた量子ビットがあります。ダイヤモンド中のNV 中心はスピンを生じる源となり、スピン状態を重ね合わせて保持する量子ビットを構成することが可能です。このように母体材料(ダイヤモンド)中にスピンの源となる別の構造(NV 中心)を生じさせたものを固体中のスピン中心と呼びます。

固体中のスピンドイナミクスに関する研究の歴史は古く、直接的な実験研究は1950年代のスピン共鳴に関する研究まで遡ります。ダイヤモンドやNV 中心以外にも量子ビットとして応用可能な母体材料とスピン中心の組み合わせは有り得ますが、例えば室温での量子情報保持時間が長く、量子ビット操作が可能であるなど、応用上優れた様々な特性を持つことから、量子ビット応用についての研究の多くがダイヤモンド NV 中心を用いて行われてきました。近年は、後述する通り、近年ダイヤモンド NV 以外の材料開発の進展も目覚ましく、これらを加味した上での包括的な研究課題の整理が強く望まれていました。

### 成果 — 量子ビット向け固体スピン中心のガイドライン —

今回、東北大学とシカゴ大学、アルゴンヌ研究所、ブダペスト工科大学、阿城大学などからなる共同研究チームは、スピン中心を量子応用する際に注目すべき物性、特に(1)スピン特性(2)光学特性(3)電荷特性 等を系統的に整理し、これらがどのように実現されてきたのか、今後どのような課題に取り組む必要があるか、更にもどのような材料がスピン中心として有望かを包括的に示しました。固体スピン中心の物性は、多くの場合スピン中心とそれを覆う母体材

料や隣接材料が複雑に影響を及ぼし合い、様々な機能性を創出します。図1は、スピン中心の量子ビット応用として重要な特性の一つである電子スピン位相緩和時間<sup>註3)</sup>の母体材料依存性です。量子ビット向け固体スピン中心においては、位相緩和時間は母体材料により支配的に決められることが分かってきました。これまでの実験での報告が丸で示されています。棒グラフは 2005 年頃から行われるようになったクラスタ相関拡張法(CCE)による理論計算による報告値で、これらが良い一致を示すことが最近分かってきました。また、最新の研究報告に基づき、ダイヤモンドや炭化シリコン(SiC)といった、実験報告のある材料に加え、これまでに実験報告のない機能性材料についてもその位相緩和時間を示しました。青で示された  $T_2$  が Hahn エコーと呼ばれる手法により測定される位相緩和時間で、「量子情報をどれだけの時間保持できるか」という指標として用いられます。一方、オレンジで示された  $T_2^*$  は Rabi 振動と呼ばれる現象により測定される位相緩和時間で、「量子情報をどれだけの時間操作できるか」という指標として用いられます。これらから、ダイヤモンドや SiC 等、現在固体中のスピン中心として主に用いられ材料以外にも、スピンの位相緩和時間の観点からは有望な材料が存在していることがわかります。論文では、この他にも様々なスピン特性、加えて、光学特性、電荷特性、材料工学上の観点からの特徴と、今後期待されるブレイクスルー等が系統的に示されています。

## 成果の意義と今後の展望

2010 年に発表された理論予測及びガイドラインに従い、2011 年に SiC が新たに室温動作量子ビットとして実験実証されました。SiC はダイヤモンドと比較して人工的な製造や加工が容易であり、例えばトンネルダイオードを作製することで電気的な量子状態の制御が 2019 年に達成されるなど、固体中のスピン中心の量子応用研究は新たな展開を迎えています。この技術が発展し、電気的な検出、電気的な制御が可能になると、スケーラブルな量子ビットに向けた研究が一層加速することが期待されます。また、SiC が既存のパワー半導体材料であることから産業界からも大きな注目を集めており、多くの研究者の精力的な研究により、新たな機能が実証され続けています。本プレスリリースで紹介した物性はごく一部ですが、本研究成果では、最新の研究結果まで含めた様々な研究結果を、広く系統的に包括しました。今後実現されることが望まれる機能性や、研究上の課題とブレイクスルーの可能性についてまとめた本研究成果により、量子ビット研究周辺の研究分野での知の共有を加速し、スピン中心を用いた高性能量子コンピューター、量子センシング、量子通信の開発がより一層加速されることが期待されます。

本研究の一部は、丸文財団 交流研究助成、電気通信研究所 若手リーダー研究者海外派遣プログラム、文部科学省 研究大学強化促進事業、日本学術振興会 科学研究費助成事業 国際共同研究強化(B)19KK0130、基盤研究(B)20H02178 などの支援を受けて行われたものです。また、東北大学はシカゴ大学との海外サテライト協定を結んでおり、本研究の推進により国際共同研究が一層強化され、更なる世界的成果の創出が期待されます。

【図面】

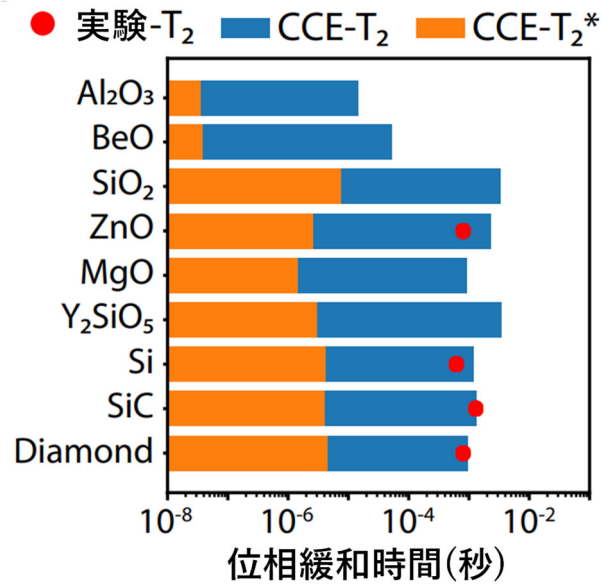


図 1) スピン中心の量子ビット応用上重要な特性の一つである位相緩和時間の材料依存性。丸は実験報告値、棒グラフはクラスタ相関拡張法(CCE)による理論報告値を示す。 $T_2$  (青、赤)は Hahn エコー測定により決まる位相緩和時間(「量子情報の保持時間」)、 $T_2^*$  (オレンジ)は Rabi 振動により決まる位相緩和時間(「量子情報の操作可能時間」)を示す。

## 【用語解説】

### 注1) 量子ビット、量子コンピューター

ある物質のサイズを小さくしていくと、量子的性質が発現することがあります。例えば「スピン」と呼ばれる磁性の源の持つ量子的性質はナノメートル(10のマイナス9乗メートル)以下のスケールで顕著に見られ、微細加工技術の進展とともに様々な関連現象が発見されてきました。この量子的性質には古典物性とは異なる様々な特徴があります。その一つに「2つの量子状態を同時に取ることができる」という性質があります。

電子には、磁性の源となるスピンという性質があります。上向きと下向きの2つの状態を取ることができ、これがビットの「0」と「1」の状態に対応します。ハードディスクなどの磁性メモリでは、たくさんの電子スピンの揃っており、そのスピン方向が古典ビットに対応します。これらのデバイスでは、電子スピンが最低でも数万というオーダーで集まっており、量子的性質は見られません。一方で、スピン中心のように単一か、それに近い数のスピンでは、スピンは上向きと下向きの状態両方を「同時に取る」ことができます。

量子ビットのこの2つのビット状態を「同時に取る」ことが可能な性質を利用し、2状態を重ね合わせた状態を同時に計算するのが量子計算や量子コンピューターです。本文中で言及されている通り、量子コンピューターは古典コンピューターと比較して桁違いに高速に問題を解決することができる場合があることが示されています。例えば古典コンピューターが苦手とし、現代の暗号通信の基盤となっている素因数分解を高速に計算するアルゴリズムが開発されています。

### 注2) ダイヤモンド窒素—空孔中心(NV 中心)

ダイヤモンドは炭素で構成されていますが、ある部分で1つの炭素原子が窒素原子で置き換わり、置き換わった窒素原子に隣接する炭素原子に更に欠損(空孔)が生じた部分を窒素—空孔中心(省略して NV 中心)と呼びます。自然界でもまれに「ピンクダイヤモンド」として析出することがありますが、現在は欠陥を含まないダイヤモンドから効率的に作製する技術が確立されています。

このダイヤモンド NV 中心は、(1)基底状態が三重項状態を取る(2)電子スピン緩和時間が長い(3)レーザー光により容易に量子状態を初期化可能 という量子ビットとして優れた性質を有しており、これまで最も精力的な研究が行われてきました。

### 注3) (電子スピン)位相緩和時間

ビット「0」と「1」の状態間に相互作用がある場合、各状態は完全には区別することができません。スピン中心の場合、この状態間、あるいは別の状態を介した相互作用の ON/OFF をレーザーや高周波磁場により高度に制御することで初期化や量子操作を行います。実際の材料では、これらの意図的に与える外場の他、結晶との熱的な相互作用、原子核の持つスピンとの磁氣的相互作用、結晶中の電荷による電氣的相互作用等の意図しない相互作用が存在します。これらの相互作用は常に量子状態を混ぜるため、ビットの区別の精度を悪化させます。初期化してから状態が混ざるまでの時間

を位相緩和時間と呼び、その時間は主にスピン中心を構成する母体材料で決定されます。位相緩和時間よりも長い時間では、上記ビットの判別可能性の問題により量子計算が不正確になるため、量子操作時間よりも十分に長い位相緩和時間が要求されます。

#### 【論文情報】

Title:	“Quantum guidelines for solid-state spin defects” (固体中のスピン中心の量子ビットの指針)
Authors:	Gary Wolfowicz, F. Joseph Heremans, Christopher P. Anderson, Shun Kanai, Hosung Seo, Adam Gali, Giulia Galli, David D. Awschalom
Journal:	Nature Reviews Materials
DOI:	<a href="https://doi.org/10.1038/s41578-021-00306-y">https://doi.org/10.1038/s41578-021-00306-y</a>

#### 問い合わせ先

- 研究に関すること  
東北大学電気通信研究所  
助教 金井 駿  
電話 022-217-5555  
E-mail skanai@tohoku.ac.jp
- 報道に関すること  
東北大学電気通信研究所 総務係  
電話 022-217-5420  
E-mail somu@riec.tohoku.ac.jp