

解禁時間（テレビ、ラジオ、Web）：平成 20 年 6 月 6 日（金）午前 3 時（日本時間）  
（新聞）：平成 20 年 6 月 6 日（金）付朝刊

平成 20 年 6 月 3 日  
筑波大学

固体素子で量子もつれの生成に初めて室温で成功  
～ ダイヤモンド素子で量子コンピュータ実現に一步前進 ～

## 概 要

筑波大学（学長 岩崎洋一）大学院図書館情報メディア研究科の水落憲和講師、磯谷順一教授、産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門の山崎聡主幹研究員、ドイツ・シュトゥットガルト大学ヴァフトップ教授を中心とするグループは、宝石の王様といわれるダイヤモンド中のスピンを用いて、量子コンピュータの実現に一步近づく成果となる、室温での量子もつれ状態<sup>\*1</sup>の生成に成功しました。

量子コンピューティングは近年非常に注目され、既存の計算を遥かに凌ぐ超高速並列計算の実現が期待されています。量子コンピューティングでは、スピン等による量子力学的状態をビット（量子ビット）<sup>\*2</sup>として用い、その複数の状態が互いに相関を持つ量子もつれ状態と呼ばれる状態が超高速計算に大きな役割を担います。従って量子もつれ状態を生成できる、一つでも大きな量子ビット数の素子の実現が求められ、その開発研究が世界中で活発に行われています。集積化が期待される固体素子での量子もつれ状態の生成は容易ではなく、これまで 2 量子ビットでの量子もつれ状態が極低温で超伝導体を用いて報告されているだけでした。今回、ダイヤモンド中の単一窒素-空孔複合体<sup>\*3</sup>（NV 中心、図 1）における電子スピンと核スピンを用いて 3 量子ビットでの量子もつれ状態の生成に成功しました。これは固体では初めてで、3 量子ビットの壁を室温で破ったことは将来の実用化の観点から非常に重要です。

本成果は米国科学雑誌「*Science*（サイエンス）」の 2008 年 6 月 6 日号（オンライン版）に掲載されます。

<本研究は科学研究費補助金及び科学技術振興機構（JST）戦略的国際科学技術協力推進事業日独研究交流から支援を受けています。>

## 研究の背景と経緯

量子コンピューティングは近年非常に注目され、既存の計算を遥かに凌ぐ超高速並列計算の実現が期待されています。量子コンピューティングでは、スピンや光子などによる量子力学的状態を計算の最小単位であるビット（量子ビット）として用います。その複数の状態が互いに相関を持つ量子もつれ状態と呼ばれる状態が超高速計算に大きな役割を担います。従って量子もつれ状態を生成できる、一つでも大きな量子ビット数の素子の実現が求められ、その開発研究が世界中で活発に行われています。

量子もつれを実現した例としては気相中での原子（イオントラップ）を用いた研究があり、また、液相の分子における核磁気共鳴（NMR）による研究もよく知られていますが、実用化を考えると固相中における多量子ビットの実現が期待されています。

しかし固体素子での量子もつれ状態の生成は容易ではなく、これまで2量子ビットでの量子もつれ状態が極低温で超伝導体を用いて報告されているだけでした。一方で近年、ダイヤモンド中のNV中心と呼ばれる不純物（図1、発光中心）も関心が持たれていました。眩い輝きを持つダイヤモンドは宝石の王様と言われていますが、量子情報素子への応用という観点でも様々な優れた性質を持っています。例えば、量子重ね合わせ状態を保持する時間が室温にもかかわらず非常に長いため室温動作が期待できる点、量子ビットとなりえる電子スピンを持つ点、電子スピン状態を光により操作できる点（初期化）、一つ一つのスピンを操作する技術が存在することなどが挙げられます。NV中心ではこれまで室温で2量子ビットにおけるCNOTゲート<sup>\*4</sup>の実現や、単一NV中心からの単一光子<sup>\*5</sup>発生の実証などがなされていました。

今回我々は量子ビットとなりえる核スピんに注目しました。ダイヤモンドは炭素からできていますが、天然のダイヤモンドでは、この炭素の約99%は質量数が12の炭素(<sup>12</sup>C)で、これは核スピンを持ちません。一方、残りの約1%は質量数が13の炭素(<sup>13</sup>C)で、これは核スピンを持ちます。今回、核スピンを持つ<sup>13</sup>Cの割合を増やしてマイクロ波プラズマ化学堆積法という方法で合成した人工の高品質ダイヤモンドを用いることにより、複数の核スピンとNV中心が持つ電子スピンの相互作用したNV中心を初めて観測できました。また期待通りに核スピンを量子ビットとして用いたことにより、量子重ね合わせ状態を保持する時間が室温にもかかわらず非常に長いことも確認されました。本研究ではこの核スピンを量子ビットとして利用し、スピンを操作するパルス磁気共鳴による手法を駆使して、量子もつれ状態の生成を行うことができました。

## 研究成果

ダイヤモンド中のNV中心における電子スピンと核スピンを用いて、室温での量子もつれ状態の生成に固体素子で初めて成功しました。3量子ビットの壁を室温で破ったことは将来の実用化の観点から非常に重要です。今回の成果をまとめますと以下ようになります。

$^{13}\text{C}$ の割合を増やしてマイクロ波プラズマ化学堆積法という方法で合成した人工の高品質ダイヤモンドを用いることにより、複数の核スピンとNV中心が持つ電子スピンの相互作用したNV中心を初めて観測できました。今回は3つの最近接炭素原子のうち、2つが $^{13}\text{C}$ からなる単一NV中心を利用しました。

核スピン2つを用いた2量子ビットによりベル状態<sup>\*6</sup>と呼ばれる量子もつれ状態の一つを室温で生成しました。固体において2量子ビットでのベル状態の生成は超伝導体素子で実現していましたが、これは極低温での実現でした。今回は固体において室温で初めての実現です。さらに、電子スピンと核スピン2つを用いた3量子ビットにより、ベル状態に加え、GHZ状態<sup>\*7</sup>及びW状態<sup>\*8</sup>と呼ばれる量子もつれ状態の生成に成功しました。(図3) これらの生成は固体では初めてで、室温で行われた点は特筆すべき点です。

忠実度<sup>\*9</sup>と呼ばれる量子もつれ状態の品質の高さの尺度(1が最高の値)はベル状態で0.97, GHZ状態で0.87, W状態で0.85と見積もられ、これまでのイオントラップ法で報告されていた値と同レベルの非常に高い忠実度が固体で生成されました。

## 今後の展望

今回の成果から、 $^{13}\text{C}$ を用いた多量子ビット化が有効であることを示しましたが、今回用いたNV中心以外にもさらに多くの核スピンと電子スピンの相互作用したNV中心を既に観測しており、さらなる多量子ビット化を行います。

将来の実用的な量子コンピュータでは多数の量子ビットが必要ですが、近年、量子数を増やすことに関してはいくつか提案がなされてきています。例えば、数個の量子ビットを持った量子プロセッサを単一光子で生成した量子もつれ状態で繋ぐことにより量子数をいくらかでも増やせるというモデルも提案されています。これにより分散処理型の多数の量子ビットをもつ量子コンピュータの実現が可能となります。NV中心は単一光子発生素子源としても期待でき、数量子ビットのNV中心による素子は将来の量子コンピュータの実現に向けた応用が期待されます。

また、NV中心は量子コンピュータの素子としてだけでなく、量子情報の通信における単一光子発生源としての実証や、量子情報の中継器素子としての提案もされています。今回の成果は中継器等において量子もつれ状態を制御・記憶する素子の実現にも貢献することが期待され、量子コンピュータのみならず、量子情報通信分野における応用も期待されます。

## 用語説明

※1【量子もつれ(エンタングルメント)】複数の粒子間に量子力学的な相関がある状態のこと。空間的に離れていてもあたかも1つの物体であるかのように振舞い、分離できない状態。N個のビットを考えた場合、重ね合わせで作られた状態はN個の独立したビットに分離することができ、N個の独立した情報しか取りえないが、量子もつ

れがある場合は  $N$  個のビットに分離することができず、 $2^N$  個の独立した情報を同時に扱える。この量子力学特有の性質により、量子コンピュータにおいて超高速並列計算が可能になる。

- ※ 2 【量子ビット】 量子情報では、従来の情報の取扱量の最小単位であるビットの代わりに、情報を量子力学的 2 準位系の状態で表現する。通常のビットは 0 か 1 かのどちらかの状態しかとることができないが、量子ビットは、0 と 1 だけでなく 0 と 1 の状態の量子力学的重ね合わせ状態もとることができる。本研究では電子と核を持つ量子力学的な自由度の一つであるスピンを量子ビットとして用いている。
- ※ 3 【単一窒素-空孔複合体（単一 NV 中心）】 窒素-空孔複合体（NV 中心）は図 1 に示されているように、ダイヤモンド中の炭素が抜け落ちてできた空孔と窒素の複合体で略して NV 中心と呼ばれる。単一とは NV 中心 1 個を意味し、共焦点レーザー顕微鏡という実験装置により、図 2 に示されているように 1 個を光検出することができる。
- ※ 4 【CNOT ゲート】 量子コンピュータで論理演算を実行する演算素子の一つ。量子コンピュータでは 1 量子ビットの重ね合わせを制御する 1 量子ビットゲート（回転ゲート）と CNOT ゲートの組み合わせにより、任意の演算回路を構成できることが証明されている。
- ※ 5 【単一光子】 光は粒子性を持っており、単一光子は光の粒子 1 個を意味する。
- ※ 6 【ベル状態】 最も基本的な量子もつれ状態。John S. Bell にちなんで名づけられた。
- ※ 7 【GHZ 状態】 量子もつれ状態の一つで、生成には 3 粒子以上が必要である。Greenberger, Horne, Zeilinger により研究されたことにちなみ名づけられた。
- ※ 8 【W 状態】 量子もつれ状態の一つで、生成には 3 粒子以上が必要である。GHZ 状態に比べ、ノイズに対する耐性があるという特徴を持つ。
- ※ 9 【忠実度】 量子もつれ状態の品質の高さの尺度で、理想的な状態のとき、その値は 1 となる。値が 1 に近いほど質が高い。

## 本件の発表者

筑波大学大学院図書館情報メディア研究科 講師  
水落 憲和

産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 主幹研究員  
山崎 聡

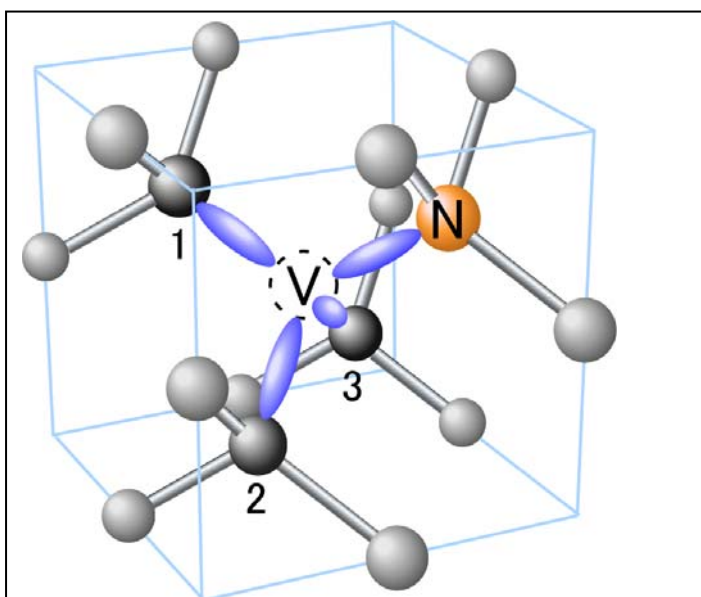


図1 ダイヤモンド中の窒素 - 空孔複合体 (NV 中心). 1-3 の数字でラベルが空孔 (V) からの最近接炭素原子. 今回、この 3 つの最近接炭素原子のうち 2 つが核スピンをもつ  $^{13}\text{C}$  の NV 中心で研究をおこなった。

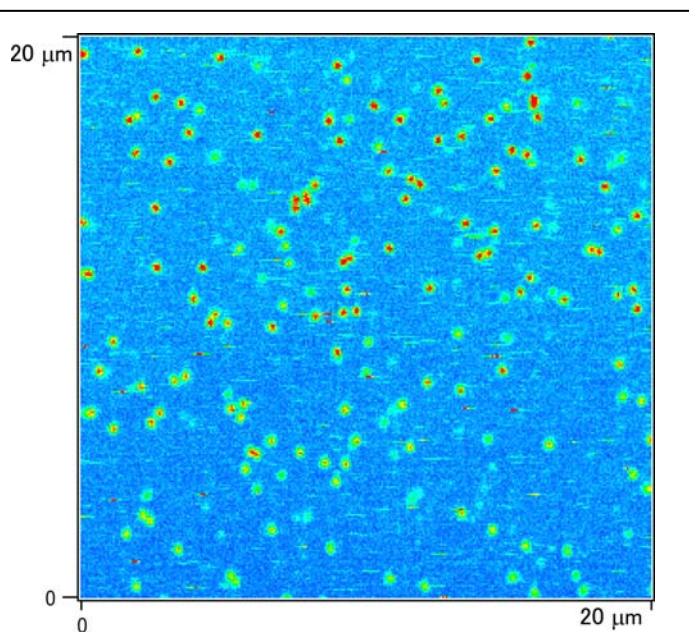


図2  $^{13}\text{C}$  をドーブしたダイヤモンド試料における共焦点レーザー蛍光顕微鏡像. 赤で示されている輝点が単一 NV 中心.

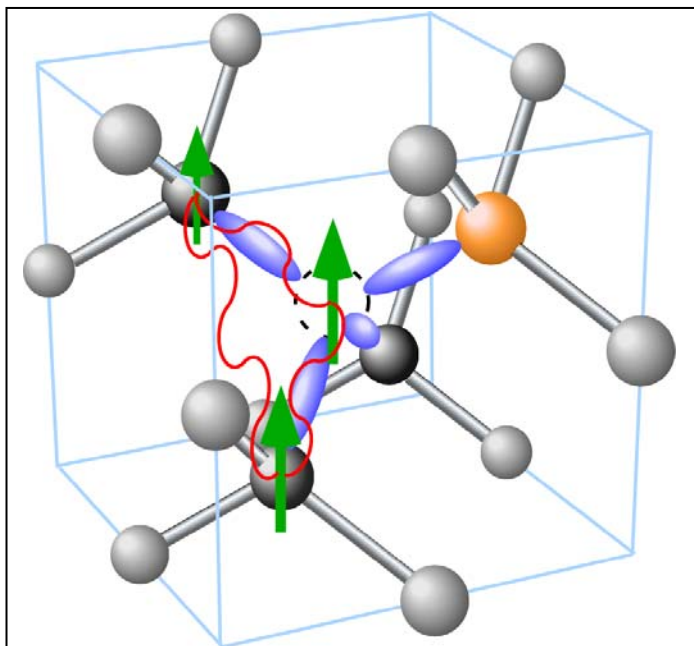


図 3、2つの核スピンと電子スピンの間での量子もつれ状態 (イメージ図)

# 宝石の王様といわれるダイヤモンド

ダイヤモンドは炭素からできている。

不純物が混入でき、窒素が混入すると黄色に。

不純物にはスピンを持つものもある。

今回、NV中心と呼ばれる不純物においてスピンを用い、  
量子もつれの生成に固体素子で初めて室温で成功！

3量子ビットの壁を室温で破る！

# 量子コンピュータ(夢のコンピュータ)

既存の計算を遥かに凌ぐ超高速並列計算の実現

## これまでの代表的な提案

### 因数分解等の高速化(ショアのアルゴリズム)

通常のコピュータでは桁数の増大と共に指数関数的に計算時間が増大. 現在の暗号技術(RSA)ではこれを利用.

1000億年以上かかるが、量子コンピュータでは数時間に短縮(1万桁の因数分解)



# 量子コンピュータ

通常のコンピュータ: 0と1のビットにより演算

量子コンピュータ: (古典)ビットから量子ビットへ

量子ビット

0と1だけではなく、重ね合わせ状態  $\Psi = a|0\rangle + b|1\rangle$  を利用

重ねあわせ、量子もつれ状態を利用して、  
超高速並列計算

量子もつれとは複数の粒子間に量子力学的な相関がある状態のこと。空間的に離れていてもあたかも1つの物体であるかのように振舞い、分離できない状態

$|00\dots00\rangle \sim |11\dots11\rangle$ までのN個のビット:  $2^N$ 個の状態

量子もつれがないと...

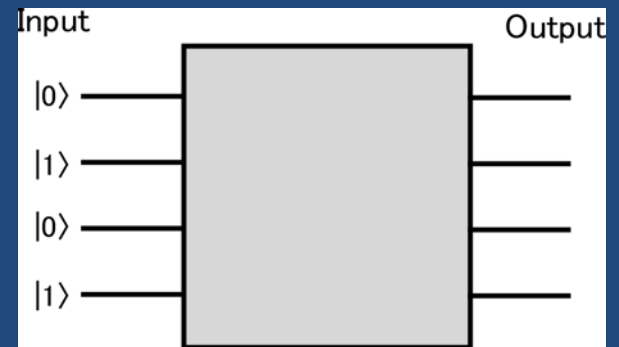
N個の独立した情報しか取り扱えない。

量子もつれを利用すると...

$2^N$ 個の独立した情報を同時に扱える。

1度に多くの計算が可能に！

(例えば、 $N=10$ のとき、 $2^N=1024$   
 $N=40$ のとき、 $2^N > \text{一兆}$ )



量子もつれ状態を生成できる、  
一つでも大きな量子ビット数の素子が必要

## ダイヤモンド以外のこれまでの研究

気相中での原子(イオントラップ)を用いた研究:  
量子もつれを実現. 最大で8量子ビット. さらなる多量子ビット化には限界

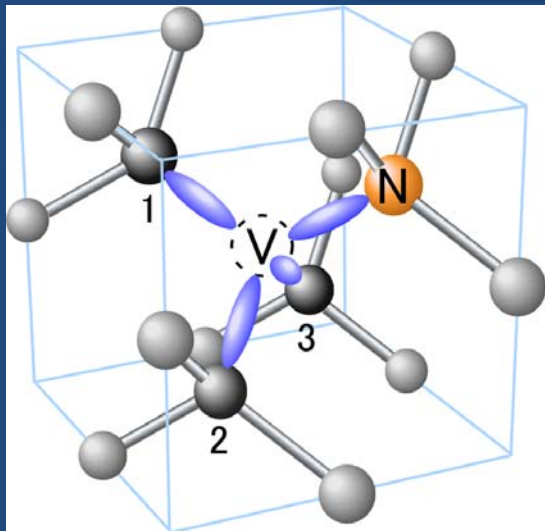
液相の分子における核磁気共鳴(NMR)による研究:これまで研究されている実験条件下では、厳密には量子もつれ状態が実現していないとの指摘. さらなる多量子ビット化にも限界

## 実用化には固体素子が必要

多量子ビット化と集積化を目指した固体素子での研究も活発(超伝導体、量子ドット等)

固体素子での量子もつれ状態の生成は容易ではなく、これまで2量子ビットでの生成が極低温で超伝導体を用いて報告されているだけ

# ダイヤモンド中の単一NV中心



## 特徴

- ・室温動作(長い緩和時間)
- ・量子ビットとして利用できる電子スピンを持つ
- ・電子スピン状態を光により操作できる(初期化)
- ・単一NV中心の観測とそのスピン操作法が確立

## ヴァフトップ教授グループ

- ・単一NV中心の観測とその単一スピンの制御
- ・単一NV中心の電子スピンと核スピンによる2量子ビットでのCNOT回路

## その他のグループ

単一光子発生 (レーザー励起)、2量子ビット量子レジスタ、量子中継器 (理論提案)

量子もつれの生成は実現していなかった

## 今回の我々の研究

### $^{13}\text{C}$ の核スピンを利用して量子ビットを増やす

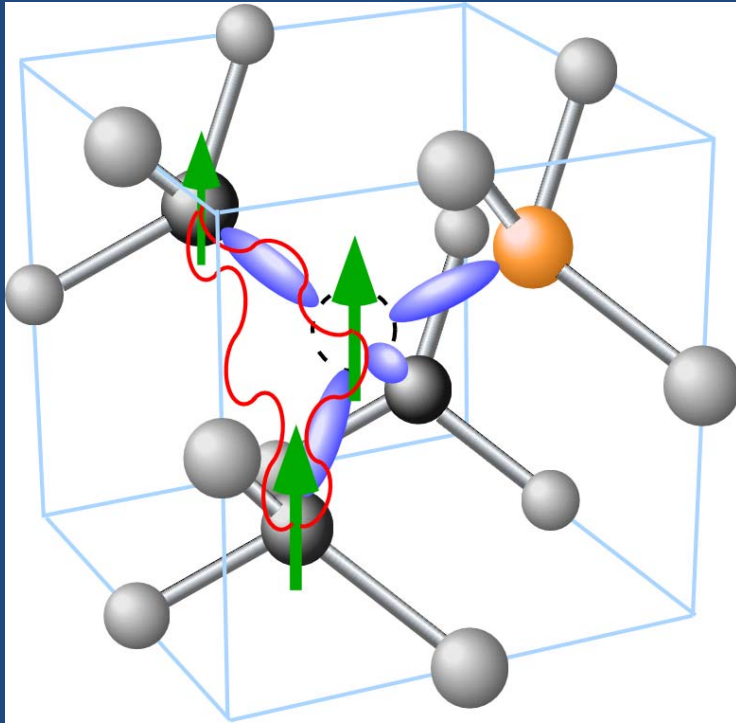
天然の存在比、 $^{12}\text{C}:^{13}\text{C} = 99 : 1$

マイクロ波プラズマ化学堆積法という方法で合成した人工の高品質ダイヤモンドを用いる

### NV中心における $^{13}\text{C}$ による多量子ビット化の主な利点

- スピンは量子ビットとして利用できる。
- 緩和時間が長く、室温動作が期待できる。
- 近接 $^{13}\text{C}$ と電子スピンの相互作用が大きく、スピン操作が比較的容易

## 2つの最近接炭素原子が $^{13}\text{C}$ のNV中心



核スピン2個と電子スピンによる  
量子もつれ

スピンを操作するパルス磁気共鳴による  
手法を駆使して、量子もつれ状態の生成

**忠実度** (生成された  
量子もつれ状態の品質の程度)

ベル状態 : 0.97

GHZ状態 : 0.87

W状態 : 0.85

理想的な状態の時に得られる値(1)に  
近い良い値!

固体素子で高い品質の量子もつれ状態が生成!

# 成果のまとめ

ダイヤモンド中のNV中心における電子スピンと核スピンを用いて、室温での量子もつれ状態の生成に成功。室温で実現したことは将来の実用化の観点から非常に重要

- 核スピン2つを用いた2量子ビットによりベル状態と呼ばれる量子もつれ状態の一つである状態を室温で生成。今回は固体において初めて室温での実現。
- さらに、電子スピンと核スピン2つを用いた3量子ビットにより、GHZ状態及びW状態と呼ばれる量子もつれ状態の生成に成功。これらの生成は固体では初めてで、室温で行われた点は特筆すべき点。

# 今後の展望

今回3量子ビットの壁を破り、 $^{13}\text{C}$ を用いた多量子ビット化が有効であることを示したが、さらに多くの核スピンと電子スピンが相互作用したNV中心を既に観測しており、さらなる多量子ビット化を行う。

・将来の実用的な量子コンピュータでは多数の量子ビットが必要。近年、量子数を増やすことに関してはいくつか提案がなされてきている。例えば、数個の量子ビットを持った量子プロセッサを単一光子で生成した量子もつれ状態で繋ぐモデル提案。これにより分散処理型の多数の量子ビットをもつ量子コンピュータの実現が可能。ダイヤモンドでは単一光子発生も期待。将来の量子コンピュータの実現に向けた応用が期待。

・NV中心は量子情報による通信において単一光子発生素子や、情報を中継する素子としても期待。今回の成果は中継器等において量子もつれ状態を制御・記憶する素子の実現にも貢献。量子コンピュータのみならず、量子情報通信分野における応用も期待。



本研究は科学研究費補助金及び科学技術振興機構(JST)戦略的国際科学技術協力推進事業日独研究交流から支援を受けています。