



磁石の表面上で孤立した量子スピンの作製に成功 ～磁気トンネル接合 MgO/Fe を用いた量子ビット開発へ～

千葉大学大学院工学研究院の山田豊和准教授、ピーター クリュウガー教授、同大学院融合理工学府博士後期課程の石井響誠氏、および Nana K. M. Nazriq 氏（研究当時）からなる研究チームは、走査トンネル顕微鏡（STM）^{注1}を用いて、パソコンやスマートフォンなどで磁気情報の書き込みを実現するために欠かせないデバイス「MgO/Fe 積層薄膜」の表面観察を実施しました。その結果、この MgO/Fe 積層薄膜の上に、電子が持つ小さな磁石のような性質である「量子スピン」を、**孤立した 1 個の状態**で安定的に実現できることを、世界で初めて実証しました。この成果は、孤立した量子スピンの、将来的に量子センサーや量子コンピューターといった次世代量子技術において、量子情報を担う最小単位である「量子ビット（qubit）」として中核的な役割を果たし得ることを示唆するものです。さらに注目すべきは、この量子スピンのすでに広く実用化されているスピントロニクス素子（磁気情報デバイス）と同じ、真空中での薄膜形成技術（真空製膜法）によって作製可能であった点です。つまり、**現在の技術基盤をそのまま応用できる**ため、量子デバイスへの応用展開も非常に現実的であり、今後の発展が大いに期待されます。

この研究成果は、2025 年 7 月 30 日付で英国王立化学会が発行する学際的科学ジャーナル Nanoscale Horizons にオンライン公開されました。

■ 研究の背景

現在、私たちが日常的に利用している「情報」は、すべてデータセンター内にある、目には見えないほど小さな「磁石」によって記録・保存されています。このような磁気情報素子は「スピントロニクス」と呼ばれる技術によって実現されています。

スピントロニクス素子は、鉄などの磁性材料を真空中で加熱・蒸発させ、基板の表面に極めて薄い膜として成膜することで作製されます。すでに確立されたこの技術を応用して、次世代の情報処理を担う量子コンピューターや、超高感度な量子センサーに不可欠な「量子ビット（qubit）」の開発が可能になると考えています。これは、量子デバイスを社会に広く普及させるうえで重要な一歩です。

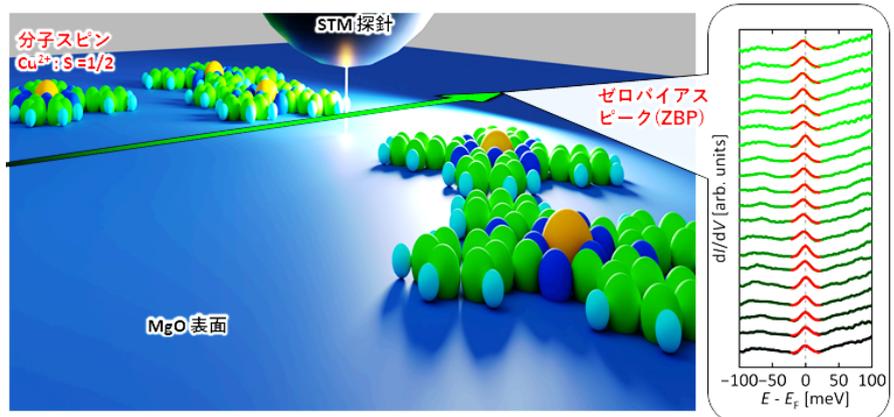


図 1：Fe(001)磁性基板の表面を、厚さ約 1 nm の絶縁体である MgO 薄膜で被覆し、その上に量子磁石である CuPc 単分子を吸着させた。その結果、分子内に存在する Cu イオンがスピンの角運動量 $S = 1/2$ の量子スピンを持つことが、ゼロバイアスピーク (ZBP) の出現から確認された。これは、スピンの他の電子とほとんど相互作用していない「孤立した状態」にあることを示す。

■ 研究の成果

本研究では、スピントロニクス分野ですでに磁気センサー材料として広く使われている酸化マグネシウムと鉄を組み合わせた「MgO/Fe」系の材料に注目しました。この材料で量子ビットを実現できれば、量子技術の開発に大きな進展をもたらすと考えたからです。これまでの量子ビット研究では、金 (Au)、銀 (Ag)、銅 (Cu) といった貴金属表面が主に用いられてきました。なぜなら、これらの貴金属の表面上では量子ビットとの結びつきが非常に弱く、量子スピン(量子ビットの状態)が保持されやすいと考えられていたためです。しかし、この手法には根本的な限界があります。貴金属は導電性を持つため、自由に動く電子「伝導電子」が豊富に存在しており、これらの電子が量子ビットに衝突すると、一定の確率でスピンの反転してしまうため、量子ビットとしての機能が失われてしまいます。つまり、**貴金属基板は量子スピンの安定な保持には適していない**のです。

そこで研究チームは、絶縁体である酸化マグネシウム (MgO) に着目しました。絶縁体は貴金属とは異なり伝導電子が存在しないため、量子スピンの外部からの影響を受けにくく、より安定に保たれます。中でも、スピントロニクス分野で広く利用されている **MgO/Fe(001)構造に注目**しました (図 1 参照)。

まず、真空中で鉄基板の表面を清浄化し、その上に原子一層分の酸素をコーティングしました。その上に MgO 膜を成膜することで、原子レベルで平坦な MgO 表面を実現しました。約 3 年の試行錯誤を経てこの表面に、量子ビットの候補となる量子磁石分子 (銅フタロシアニン (CuPc)) を吸着させることに成功しました。銅は通常の状態では磁石ではありませんが、分子内で銅イオン (Cu^{2+}) として存在することで、電子の“スピン”という量子力学的な性質が生まれます。このスピンは、「上向き」か「下向き」の 2 つの状態を取ることができ、その単純で安定した構造が、量子ビットとして扱いやすいとされています。

この分子を、原子分解能を持つ STM を用いて観察しました。STM では、探針を試料に近づけることで表面形状を画像化できるだけでなく、各原子位置における電子状態の計測も可能です。図 2a は、MgO 表面上に吸着した 1 個の CuPc 分子の STM 像です。分子は四葉のクローバーのような形状に見えます。次に、この分子上で行った電子分光の結果が図 2b です。MgO は絶縁体であるため、電子が入りやすいエネルギー帯付近には電子がほとんど存在せず、エネルギーの隙間 (ギャップ) が生じていま

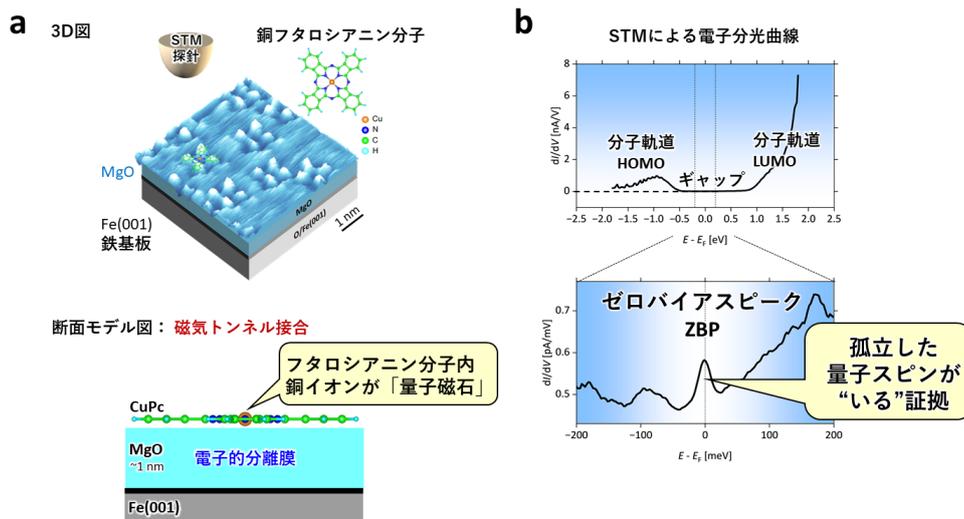


図 2 : (a) Fe(001)磁性基板上に厚さ約 1 nm MgO 薄膜を形成し、その上に量子磁石である CuPc 単分子を吸着した際の STM 表面形状像。下部は断面モデル図。(b) この表面で計測した電子分光曲線。分子のエネルギー状態の間には、電子が存在しにくいエネルギーの空白領域 (ギャップ) が存在した。拡大すると、電圧がゼロの位置に小さなピーク「ゼロバイアスピーク (ZBP)」を発見した (下部)。これは、孤立した量子スピンの存在を示す証拠となった。

す。したがって、縦軸 (微分伝導 dI/dV 、試料の電子状態密度に比例) の値はゼロに近くなります。ところが、このギャップ領域を詳細に拡大してみると、ちょうど 0 eV の位置に小さなピークが現れていることが分かりました (図 2b 下部)。このピークは「ゼロバイアスピーク (ZBP)」と呼ばれ、これまでの研究により、分子中の銅イオンの“スピン”と呼ばれる性質がまだ消えずに保たれていることを示す特徴とされています。

注目すべき点は、図 1 の緑矢印に沿って分光を計測したところ、量子スピンの存在を示す ZBP の信号 (分光曲線内の赤線のピーク) は、分子の中だけでなく、まるで“染み出す”ように絶縁体の MgO 表面全体にも広がって観測された点です。これは、電子の流れがほとんどない絶縁体だからこそ起きた現象です。金属表面では電子が ZBP を“かき消して”しまいますが、MgO のような絶縁体では、そのような妨げがないため、**ZBP が広く安定して広がることを初めて確認**できました。

この発見は、MgO/Fe(001)という既存のスピントロニクス材料系でも、量子ビットとして機能する量子磁石が安定化可能であることを示唆しており、非常に重要な成果です。

■今後の展望

本研究は、強磁性基板上で量子スピン状態を安定に制御する新たなアプローチを提示するものです。すでに実用化されているトンネル磁気抵抗センサー (TMR) ^{注2)} にも用いられている MgO/Fe(001)系が、量子スピンを保持・操作するための新しいプラットフォームとして活用される可能性を示しました。今後は、この構造を用いた量子センサーや量子コンピューターへの応用に加え、単一の磁性原子におけるスピン遷移を利用した「単原子触媒」の開発といった、量子スピン工学の多方面への展開が期待されます。

■用語解説

注1) 走査トンネル顕微鏡 (STM) : 原子レベルまで尖らせた探針で試料表面をなぞるようにすることで、物質表面を原子分解能で観察できる顕微鏡。原子より小さい1pm(ピコメートル=10⁻¹²メートル)の精度で、物質の電子状態を計測できる。

注2) トンネル磁気抵抗センサー (TMR) : Fe/MgO/Fe のように絶縁膜を二枚の強磁性薄膜で挟み電気を流す仕組みで、絶縁膜であっても量子力学の“トンネル効果”で電気が流れる。二枚の磁石の向きが平行であると電気がよく流れ、反平行で流れにくくなっており、磁石の向きだけで電流を流したり止めたりできる。毎日使うスマートフォン情報は全て、データセンターの磁気センサーで読み取りされ情報社会を支えている。

■研究プロジェクトについて

本研究は、以下の研究課題の支援を受けて行われました。

- ・ 独立行政法人 日本学術振興会 科学研究費補助金(基盤研究(B)(一般)) “表面場での有機分子と磁性原子による量子ビット二次元配列の構築”
- ・ 小笠原敏晶記念財団 一般研究助成 “金属表面反応場での低次元高分子磁性薄膜の開発”
- ・ 公益財団法人 東電記念財団研究助成 “超省エネ電界制御型・蜂の巣構造磁性薄膜格子の開発”
- ・ 公益財団法人 松籟科学技術振興財団 研究助成 “真空表面合成法による有機分子2次元八二カム格子で実現する超高密度磁気記憶素子”
- ・ 公益財団法人 カシオ科学振興財団 第38回研究助成 “超高密度2次元鉄ナノ磁石八二カム規則配列作製による超省エネ電界書き込み制御型・磁気記憶素子の開発”

■論文情報

タイトル : Emergence of a Zero-Bias Peak on the MgO/Fe(001) Surface Induced by the Adsorption of a Spin-1/2 Molecule

著者 : Kyosei Ishii, Nana K. M. Nazriq, Peter Krueger and Toyo Kazu Yamada*

雑誌名 : Nanoscale Horizons

DOI : 10.1039/D5NH00192G

<本研究に関するお問い合わせ>

千葉大学 大学院工学研究院 准教授 山田 豊和

TEL: 043-290-3915 メール: toyoyamada@faculty.chiba-u.jp

<広報に関するお問い合わせ>

千葉大学広報室

TEL: 043-290-2018 メール: koho-press@chiba-u.jp