



東北大学



平成 22 年6月4日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
独立行政法人日本原子力研究開発機構

超伝導体への磁気注入に世界で初めて成功

—超伝導を用いた量子コンピュータへ道を拓く—

東北大学（総長：井上明久）金属材料研究所の高橋三郎助教、日本原子力研究開発機構（理事長：岡崎俊雄）先端基礎研究センターの前川禎通センター長、及び IBM アルマデン研究所の Stuart S. P. Parkin 博士、Hyunsoo Yang 博士、See-Hun Yang 博士らの研究グループは共同で、超伝導体へスピン^{注1)}と呼ばれる磁気を注入して超伝導を制御することに世界で初めて成功し、超伝導状態でのスピン（磁気）が通常の状態に比べて 100 万倍も安定であることを見出しました。

1999年、本研究グループの高橋助教らは、電気抵抗がゼロの超伝導体を二つの強磁性体（磁石）で挟み、超伝導体と強磁性体の間に薄い絶縁膜を挿入した積層構造のトンネル接合^{注2)}デバイスでは、電圧を印加することにより超伝導体にスピン（磁気）を注入できること、磁石の相対的な向きを変えることにより超伝導を制御できること、それにより大きな抵抗の変化（トンネル磁気抵抗効果^{注3)}を引き起こすことを理論的に予言しており、その実験的検証が望まれていました。

本研究グループは、アルミニウム（超伝導体）、コバルト鉄（強磁性体）、酸化マグネシウム^{注4)}（絶縁体）からなる高品位の二重障壁トンネル接合デバイスを開発し、理論的に予言されていたスピン注入による大きなトンネル磁気抵抗変化の観測に成功しました。これは、スピンは超伝導体で非常に安定に存在し続けられることを明らかにしたもので、従来の考えを修正するものです。この研究成果は、超高感度センサーや量子コンピュータ^{注5)}などの量子計算デバイスへの応用が期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Materials（ネイチャーマテリアルズ）」のオンライン版（6月6日付）に掲載されます。

【本件に関する問い合わせ先】

（研究内容について）

国立大学法人東北大学金属材料研究所

金属物性論研究部門 助教 高橋 三郎 TEL：022-215-2008

独立行政法人日本原子力研究開発機構

先端基礎研究センター センター長 前川 禎通 TEL：029-282-5093

（報道担当）

国立大学法人東北大学金属材料研究所

総務課庶務係主任 小玉 亨 TEL：022-215-2181, FAX：022-215-2184

独立行政法人日本原子力研究開発機構

広報部次長 須賀 伸一 TEL：03-3592-2346, FAX：03-5157-1950

日本アイ・ビー・エム株式会社

広報 波岡ジューン直子 TEL：03-3808-5196

補足説明

【背景と経緯】

近年、微細加工技術の進展によってスピントロニクス（スピントロニクス^{注6)}）の分野が急速に発展を遂げています。従来の半導体エレクトロニクスでは電子の電荷の部分を利用するのに対して、スピントロニクスでは電荷とスピンの双方を対象としており、その中心となる材料は強い磁気をもつ強磁性体です。一方、超伝導体は電気抵抗がゼロの材料ですが、磁気に弱いという性質を持つと考えられてきたため、超伝導体に磁気（スピン）を注入するスピントロニクスデバイスはこれまで開発されてきませんでした。

1999年、本研究グループの高橋助教と前川センター長は、超伝導を直接弱めないように強磁性体と超伝導体の間に薄い絶縁体膜を挿入した二重障壁のトンネル接合デバイス（図1）では、強磁性電極の磁化の向きが反平行のとき、電圧をかけて強磁性体から超伝導体へスピンを注入できること、またスピンは超伝導体中に長時間滞在して大きな抵抗変化（トンネル磁気抵抗効果）を引き起こすことを理論的に予言しました。これらの理論的予測を検証する実験が国内外で行われましたが、トンネル障壁として酸化アルミニウム^{注4)}を用いたため障壁内の原子の乱れや膜厚の不均一性が問題となり、明確な実験的検証が得られていませんでした。

【研究の内容】

今回の研究では、これらの問題を解決するために、超伝導体としてアルミニウム（Al）、強磁性電極としてコバルト鉄（CoFe）、トンネル障壁として酸化マグネシウム（MgO）を用いて、高品質の2重トンネル接合デバイス（CoFe/MgO/Al/MgO/CoFe）を開発しました（図1）。それぞれの膜の厚さは、CoFe（3.5nm）、Al（4.5nm）、MgO（3～4nm）、接合面積は $700\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$ ^{注7)}です。Alは絶対温度2.3K以下で超伝導になります。このデバイスの電気的特性を示すトンネルコンダクタンス（電気抵抗の逆数）とそれから得られるトンネル磁気抵抗の変化率（TMR）を精密に測定したところ（図2 a、b）、低温では理論的に予測されていたトンネル磁気抵抗の大きな振動的な振る舞いが明瞭に観測されました。これは、磁化が反平行のとき、注入されたスピンの長時間にわたって安定に保たれていることを示しています。従来、超伝導と磁気（スピン）は相容れない、と考えられてきましたが、超伝導状態に注入されたスピンは安定に存在し続けられることを明らかにしたもので、従来の考えを修正し、スピンの新しい応用の可能性を示すものです。

【本研究のインパクト】

今回の高品質の二重接合トンネルデバイスの開発により、超伝導状態にスピンを注入することに初めて成功しました。また、この磁気状態は常伝導状態に比べて100万倍も安定であることも明らかになりました。この発見は、超伝導体中でのスピンの量子コンピュータの必須要素である量子ビット^{注8)}の有力な候補になることを示しています。本研究は、量子計算デバイスに用いる新しいタイプの量子ビットや量子情報技術の開発につながるものと期待されます。

本研究における実験は、IBMアルマデン研究所においてStuart Parkin博士、Hyunsoo Yang博士とSee-Hun Yang博士によって行われたものです。実験結果の説明と理論的検討は、高橋三郎助教、前川禎通センター長およびIBMの研究チームとの共同で行われました。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究A No. 19204035、特定領域研究No. 19048009）、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」、次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発の助成を受けて行われました。Parkin博士が率いるIBMの研究チームはDMEA (Defense Microelectronics Activity) からスピントロニクスデバイスの研究開発の支援を受けました。

【参考図】

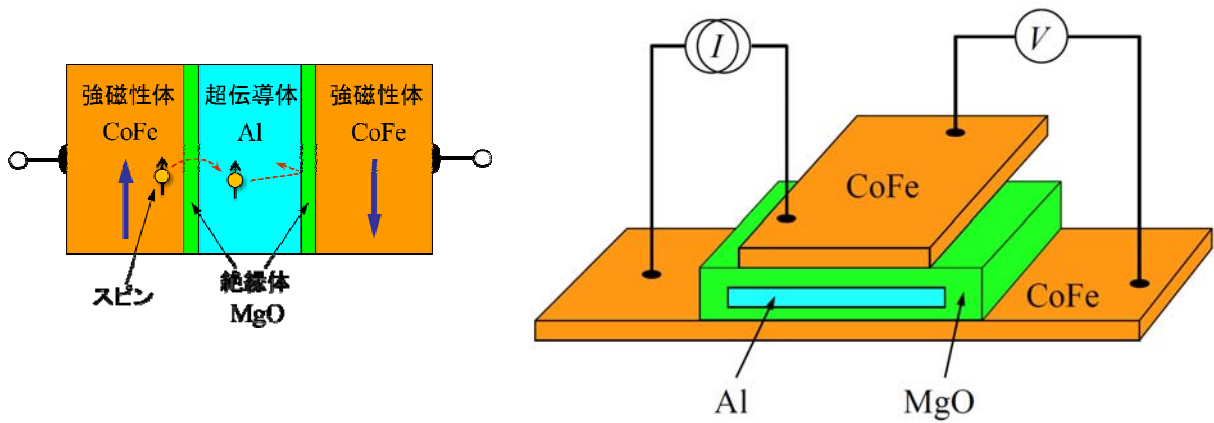


図1 二重トンネル接合デバイスの概念図（左図）。左右の強磁性電極（CoFe）の磁化の向き（青色矢印）を互いに反平行の配置にすることで、スピンを超伝導体に注入し、長い時間保持することができる。今回、作成した二重トンネル接合デバイスの構造（右図）。

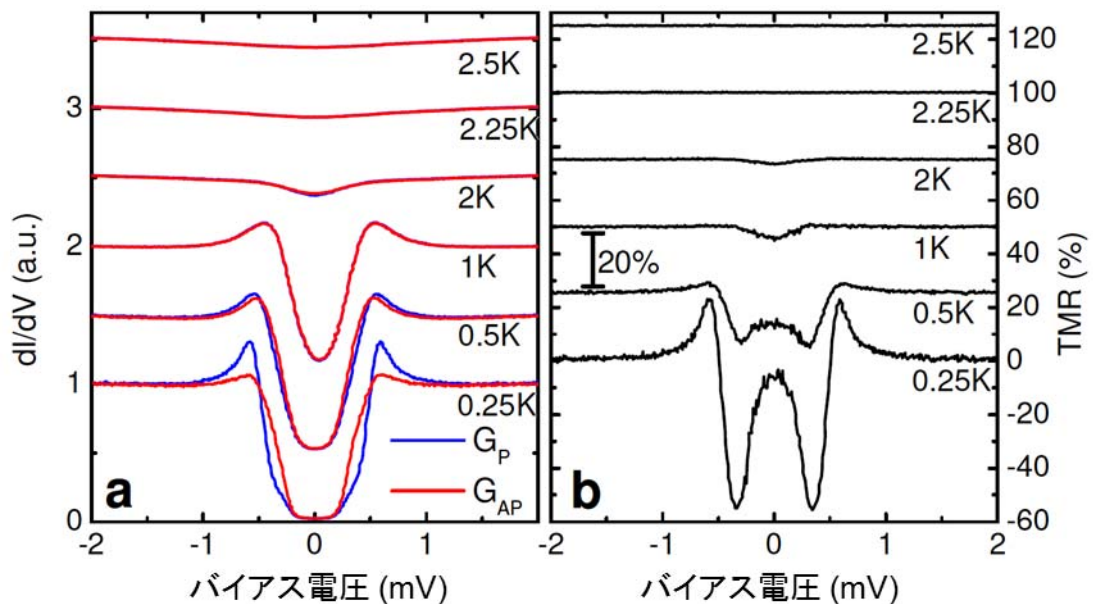


図2 今回作成した二重トンネル接合における電気抵抗の逆数（左図）とトンネル磁気抵抗(TMR)変化率（右図）のバイアス電圧依存性。

【用語解説】

1) スピン

電子がもつ自転のような性質で、電子スピンは磁気（微小な磁石）を帯びています。スピンには上向きスピンと下向きスピンの二つの状態があります。

2) トンネル接合

金属電極/絶縁体膜/金属電極の3層構造からなる接合デバイス。絶縁体膜の厚さは1ナノメートル程度と非常に薄いので、電子が絶縁体膜の障壁をすり抜けるトンネル現象によって伝導することができます。

3) トンネル磁気抵抗効果

強磁性トンネル接合素子の2つの強磁性電極の磁化の相対的な向きが平行な場合と反平行な場合で、素子の電気抵抗が変化します。この現象をトンネル磁気抵抗効果（TMR）といい、このときの電気抵抗が変化する割合を百分率で表したものを磁気抵抗率と呼びます。数10%～数100%の大きな磁気抵抗変化を示し、磁気センサーや不揮発性メモリに応用されます。

4) 酸化マグネシウム、酸化アルミニウム

強磁性トンネル接合のトンネル障壁には、酸化マグネシウム（MgO）や酸化アルミニウム（Al₂O₃）が多く用いられます。酸化マグネシウム（MgO）は、原子が規則的に配列した結晶の性質を持ちます。一方の酸化アルミニウムは、原子配列が不規則なアモルファス物質であります。

5) 量子コンピュータ

量子力学の基本原則（量子状態の重ね合わせの原理）を利用して大規模計算を超高速・並列処理を行なう量子コンピュータは、従来のコンピュータをはるかにしのぐ性能を有します。電子スピンを利用した量子コンピュータはその有力候補の1つです。

6) スピントロニクス

電子スピンの持つ情報を積極的に利用することで、従来のエレクトロニクスを超える機能を持ったデバイスの創出を目指す新しいエレクトロニクスのことです。

7) ナノメートル（nm）、マイクロメートル（ μ m）

1ナノメートル（nm）は10億分の1メートル。1マイクロメートル（ μ m）は100万分の1メートル。

8) 量子ビット

量子コンピュータを構成する記憶素子の最小単位。従来のコンピュータの1ビット（0または1）に対して、量子ビットでは二つの量子力学的状態（例えば、上向きスピンと下向きスピン）の任意の重ね合わせ状態（傾いたスピン）を表すことができます。量子ビットの候補として電子スピン・核スピン・ジョセフソン効果・光子などさまざまな候補が提案されています。

【論文名・著者名】

“Extremely long quasiparticle spin lifetimes in superconducting aluminum using MgO tunnel spin injectors”

(MgOトンネルスピン注入素子を用いた超伝導アルミニウムにおける極度に長い準粒子スピン寿命)

Hyunsoo Yang, See-Hun Yang, Saburo Takahashi, Sadamichi Maekawa and Stuart S. P. Parkin

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

高橋 三郎 (タカハシ サブロウ)
東北大学金属材料研究所 助教
〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
Tel: 022-215-2008
E-mail: takahasi@imr.tohoku.ac.jp

前川 禎通 (マエカワ サダミチ)
日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター センター長
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
Tel: 029-282-5093
E-mail: maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

<報道担当>

東北大学金属材料研究所 総務課庶務係主任 小玉 亨 (コダマ トオル)
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
Tel: 022-215-2181, Fax: 022-215-2184
E-mail: imr-som@imr.tohoku.ac.jp

日本原子力研究開発機構 広報部 次長 須賀 伸一 (スガ シンイチ)
〒100-8577 東京都千代田区内幸町2丁目1番8号 新生銀行本店ビル11階
Tel: 03-3592-2346 Fax: 03-5157-1950
E-mail: suga.shinichi@jaea.go.jp

日本アイ・ビー・エム株式会社 広報 波岡ジューン直子 (ナミオカ ジューン ナオコ)
〒103-8510 東京都中央区日本橋箱崎町1-9番21号
Tel: 03-3808-5196
E-mail: june@jp.ibm.com