



2022 年 10 月 17 日

報道関係者各位

慶應義塾大学

分子を挟んだ磁気ナノデバイスにおいて室温での磁気抵抗効果の観測に成功 ー「ナノ科学」「スピン」「分子」が融合した新しい学際領域を切り拓くー

慶應義塾大学大学院理工学研究科の松坂美月(修士1年生)、林恭平(修士2年生)、同大学理工学部
の海住英生准教授らは、北海道大学電子科学研究所の西井準治教授、藤岡正弥助教、東北大学多元物
質科学研究所の芥川智行教授、茨城大学大学院理工学研究科の小峰啓史准教授と共同で、分子を挟ん
だ磁気ナノデバイスにおいて室温での磁気抵抗(MR)効果の観測に成功しました。

2つの磁性体の間に有機分子を挟んだ有機スピンバルブ(OSV)素子では、磁場によって抵抗が変化
する磁気抵抗効果を示します。このOSV素子をナノスケール化すると、巨大なMR効果が発現するこ
とが報告されていましたが、これまでほとんどの研究は低温での実験に限定されていました。今回、
磁性薄膜のエッジを用いた新たなナノ接合作製技術を開発し、さらに、磁性体間に挟む分子として高
移動度分子に注目した結果、室温でのMR効果の観測に成功しました。この成果は「ナノ科学」「スピ
ン」「分子」が融合した新しい学際領域を切り拓くものです。

本研究成果は2022年10月12日(英国時間)に『Nanoscale Advances』(オンライン、英国王立化
学会)に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・磁性薄膜のエッジを用いた新たなナノ接合作製技術を開発。
- ・高移動度分子を挟んだ磁気ナノ接合において、室温にて初めて磁気抵抗効果を観測。
- ・「ナノ科学」「スピン」「分子」が融合した新しい学際領域を切り拓く。

2. 研究背景

電子の持つ「電荷(電気量)」と「スピン(電子の自転に相当するもの)」の2つの性質を利用す
るスピントロニクスは、次世代のエレクトロニクスとして期待されています。最近では、このスピ
ントロニクスに分子が融合した分子スピントロニクスが大きな注目を集めています。分子は主に軽元素
で構成されるためスピン軌道相互作用(※1)が小さく、このため、分子中においてキャリア(典型的
には、電子に相当)のスピン散乱を抑えることができます。これにより、大きな磁気抵抗(MR)効果の発
現やスピン信号の長距離伝送が期待されています。代表的な分子スピントロニクスデバイスの1つに
有機スピンバルブ(OSV)素子があります。これは2つの磁性体の間に有機分子を挟んだ素子です。こ
のOSV素子では、室温から低温にかけて、数10%のMR効果が観測されています。一方で、OSV素子を
ナノスケール化すると、数100%の大きなMR効果が報告されています。しかし、ナノスケール化され
たOSV素子に関する研究のほとんどは低温での実験に限定されていました。それは、室温でのMR効
果の観測が極めて困難であったからです。

3. 研究内容・成果

今回、研究グループは、ナノスケール化した OSV 素子において、室温 MR 効果の観測を目指し、新たなナノ接合デバイス（図 1）を提案しました。このデバイスは磁性薄膜のエッジとエッジが互いに交差した構造となっており、交差したエッジ間に分子を挟みます。この構造では、磁性薄膜の膜厚によってデバイスの接合面積が決まるため、例えば、膜厚 10~50 nm の磁性薄膜を用いれば、 $10 \times 10 \sim 50 \times 50 \text{ nm}^2$ の超微小接合が作製可能となります。これにより、接合面積を確実に決定できることに加え、従来のナノスケール OSV 素子作製技術で問題となっていた有機分子への磁性原子の潜り込み問題や磁性原子の磁気的不安定性問題を解決することができます。

このようなナノ接合デバイスを作製するため、真空成膜法、熱圧着法、高性能研磨法を駆使した独自の作製技術を開発しました（図 2）。初めにイオンビームスパッタ法（※2）により、低融点ガラス上に磁性薄膜を成膜します（図 2(a)、(b)）。次に、磁性薄膜の両サイドに金薄膜を成膜し、低融点ガラスを熱圧着します（図 2(c)、(d)）。試料を半分に切断した後、その断面を平滑に研磨することで、磁性薄膜のエッジ出しを行い、その上に分子を成膜します（図 2(e)~(g)）。このとき、分子として、C8-BTBT (2, 7-ジオクチル[1]ベンゾチエノ [3, 2-b] [1]ベンゾチオフェン) に注目しました。C8-BTBT は最高移動度 $43 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が報告されている高移動度分子です。高移動度分子を用いることで、スピン拡散長が長くなり、スピン散乱の抑制がさらに高まると考えました。最後に、磁性薄膜のエッジ同士が交差するように重ね合わせ、ナノ接合デバイスを作製しました（図 2(h)）。

本研究で提案したデバイスはこれまで報告例のない全く新しいタイプのデバイスであることから、構造・電気・磁気特性の評価を入念に行いました。図 2(f) に示したガラス/磁性薄膜/ガラス構造体では、おおよそ 10 工程もの研磨を経て、ナノオーダーで平坦な研磨面を実現しました（図 3(a)）。研磨によって実現された磁性薄膜のエッジには一様な電流が流れました。これはエッジ面がほとんど酸化されていないことを示します（図 3(b)）。このエッジ面上に C8-BTBT 分子膜をオフセンタースピンコーティング法（※3）により成膜した結果、図 3(c) に示すように、数 nm の膜厚で均一な C8-BTBT を成膜することに成功しました。このように作製したデバイスにおいて、電気磁気特性を調べた結果、室温において MR 効果を観測することに成功しました（図 4）。これは、高移動度分子を用いた磁気ナノ接合において、分子を介したスピン信号由来の MR 効果を、室温で初めて観測したことを意味します。

4. 今後の展開

本研究成果により「ナノ科学」「スピン」「分子」が融合した新しい学際領域を切り拓けるものと期待できます。また、本研究で構築したナノ接合作製技術は、物理・化学・生命科学などの異なる学術分野の垣根を超えた、究極の超微小接合・高機能デバイスの創製につながるものと期待できます。本デバイスでは、数 nm の磁性薄膜を用いることで、原理的には数 nm サイズの超微小接合が作製可能となります。つまり、既存の高度なリソグラフィー技術（※4）を用いることなくナノ接合を作製することができ、かつ、リソグラフィー技術の限界を超える可能性を秘めています。また、構造上、電極に相当する磁性薄膜の抵抗を低減できることから、高周波応用、および、発熱の抑制による低消費電力化が期待できます。さらに、将来的には磁性薄膜/絶縁薄膜を多層構造にすることで、超高密度ナノデバイスを創製できる潜在性も秘めています。ナノ接合デバイスでは、巨大 MR 効果のみならず、不揮発性の電氣的メモリ効果、整流特性、スイッチング特性、巨大熱電効果などバルクでは見られないさまざまな新規現象が観測されています。その他、DNA シーケンサーなどへの応用も進められています。本研究成果はこれらのデバイス作製技術としても広く活用できると同時に、それらの高性能化も可能であることから、基礎学術的にも応用工学的にも幅広い発展が期待できます。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究（B）・挑戦的研究（萌芽）、「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点整備事業共同研究プロジェクト」（文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定・ロードマップ 2020-」）、物質・デバイス領域共同研究課題基盤共同研究・展開共同研究、および「人と物質と知で未来を創るクロスオーバー・アライアンス事業」などの支援を受けて実施されました。

<原論文情報>

研究論文名：Room-temperature magnetoresistance in $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{C8-BTBT}/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ nanojunctions fabricated from magnetic thin-film edges using a novel technique（磁性薄膜エッジを利用した新しい作製手法による $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}/\text{C8-BTBT}/\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ ナノ接合における室温磁気抵抗効果）

著者：松坂美月¹、佐々木悠馬²、林恭平¹、三澤貴浩²、小峰啓史³、芥川智行⁴、藤岡正弥²、西井準治²、海住英生^{1, 5}（¹慶應義塾大学理工学部物理情報工学科、²北海道大学電子科学研究所、³茨城大学大学院理工学研究科、⁴東北大学多元物質科学研究所、⁵慶應義塾大学スピントロニクス研究開発センター）

公表雑誌：Nanoscale Advances（英国王立化学会が発行するオープンアクセスジャーナル）

公表日：英国時間 2022 年 10 月 12 日（水）（オンライン公開）

doi: 10.1039/d2na00442a

<用語説明>

※1 スピン軌道相互作用

電子が持つスピンと電子が原子核の周りを回ることによって生じる軌道角運動量の間で生じる相互作用。原子番号が大きいほどスピン軌道相互作用が大きくなることが知られている。分子は軽元素で構成されることが多いため、分子のスピン軌道相互作用は一般的に小さい。

※2 イオンビームスパッタ法

超高真空中で不活性ガス（例えば、アルゴンガス）をイオン化させた後、ビーム状にして、原料に衝突させることで、その原料物質をはじき飛ばし（＝スパッタし）、これにより基板上に薄膜を形成させる技術。

※3 オフセンタースピンコーティング法

揮発性の溶媒に分子を溶かした溶液を基板に滴下し、高速回転することで分子膜を成膜する方法をスピコーティング法という。通常のスピンコーティング法では、ステージの中心に基板を置いて成膜するが、オフセンタースピンコーティング法では、ステージの中心から数 cm 離れた位置に基板を置いてスピコーティングを行う。これにより、基板全体に遠心力が働くため、分子膜の配向性が向上する。

※4 リソグラフィ技術

半導体デバイスなどで構成される集積回路を露光装置により形成する微細加工技術。コンピュータ内部の CPU やメモリの作製工程で使用される。光を用いたフォトリソグラフィ技術や電子を用いた電子線描画装置などが挙げられる。

<図表>

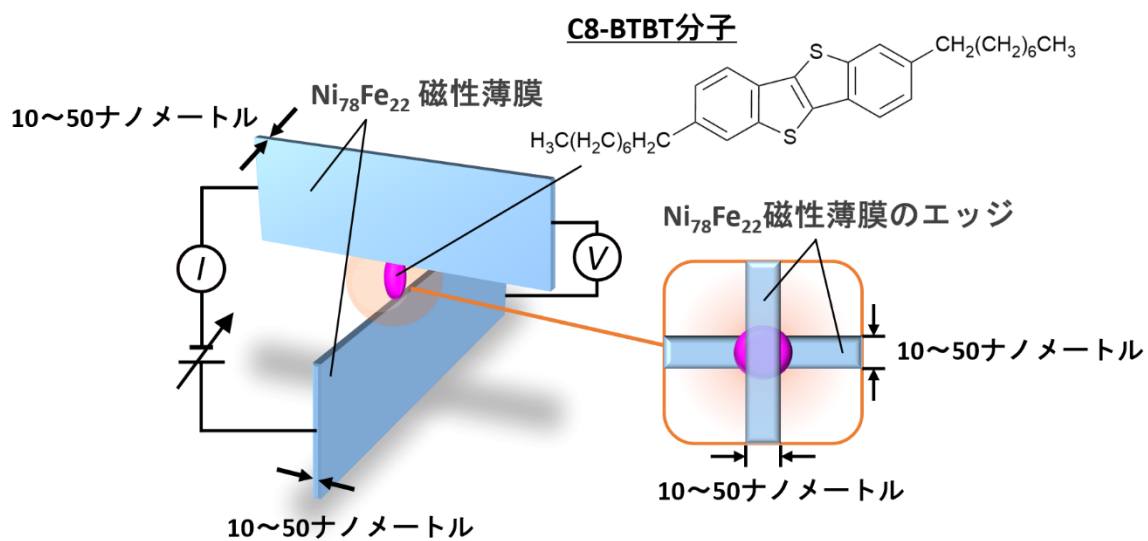


図1 磁性薄膜のエッジとエッジの間に分子が挟まれた新たな磁気ナノ接合デバイス

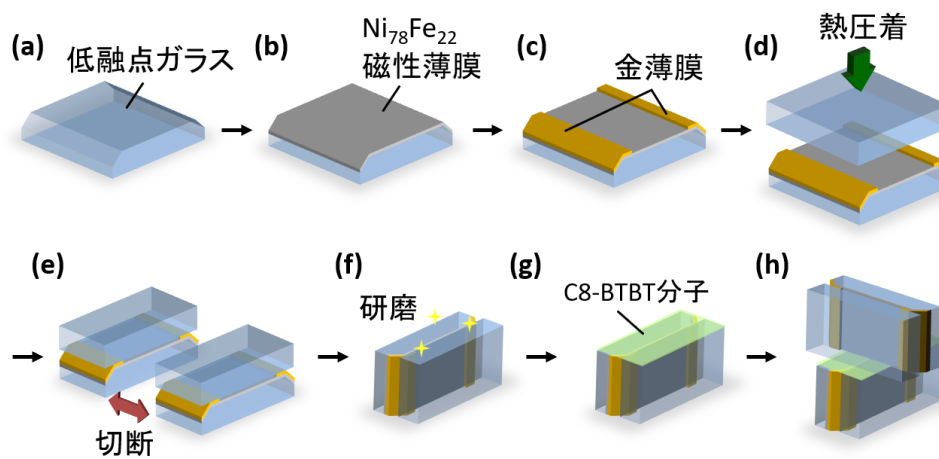


図2 ナノ接合デバイスの作製方法

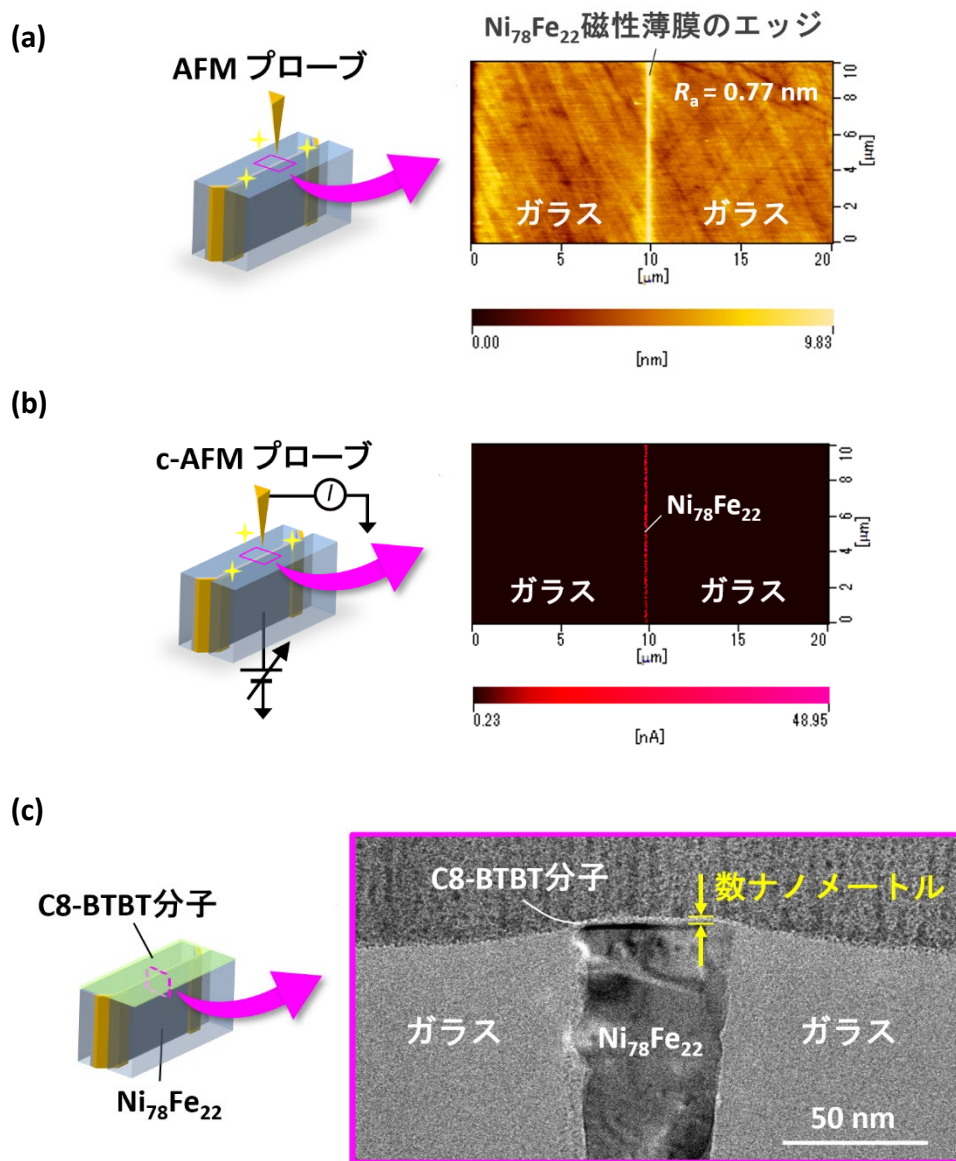


図3 ガラス/磁性薄膜/ガラス構造体の(a)表面観察像、(b)電流マッピング像、(c)断面観察像

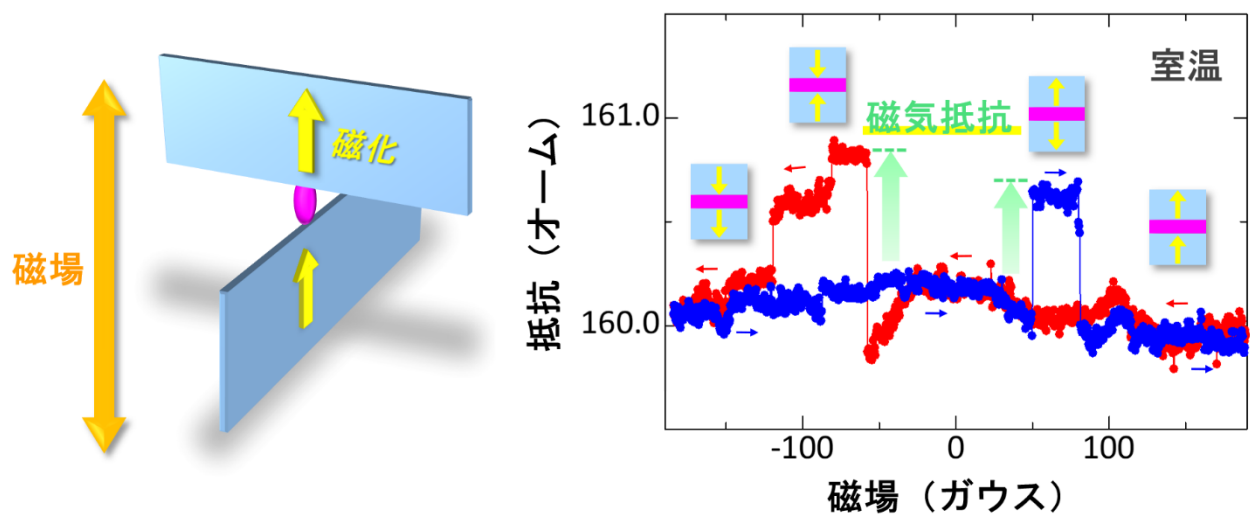


図4 室温における磁気抵抗効果の観測結果

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 海住 英生 (かいじゅう ひでお)

TEL : 045-566-1428 E-mail : kaiju@appi.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (望月)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>