プレスリリース

慶應義塾大学　東北大学 TOHOKU UNIVERSITY

2025 年 7 月 30 日

報道関係者各位

慶應義塾大学
東北大学

キラル分子を用いた磁気ナノデバイスにおいて室温磁気抵抗効果を観測
―キラル誘起スピン選択性(CISS)効果に関して新たな知見―

慶應義塾大学大学院理工学研究科の松坂美月(博士 2 年生、日本学術振興会特別研究員 DC1)、鹿嶋倖太郎(修士 2 年生)、寺井航紀(修士 1 年生)、上田拓海(修士 2 年生)、宮本龍之介(同大学院修了生)、同大学理工学部の物理情報工学科・海住英生教授、化学科・山本崇史准教授らは、東北大学多元物質科学研究所の芥川智行教授らと共同で、キラル分子を用いた磁気ナノデバイスにおいて室温での磁気抵抗(MR)効果の観測に初めて成功しました。

近年、キラル分子におけるキラル誘起スピン選択性(CISS)効果が大きな注目を集めています。CISS 効果に関して、磁性探針を用いた導電性原子間力顕微鏡による研究は多い一方で、デバイス化された報告例は少なく、その接合面積は小さくてもマイクロメートルスケールに留まっていました。

今回、磁性/非磁性薄膜のエッジを用いたナノ接合作製技術を開発しました。さらに、磁性体間に挟む分子として新たに合成したキラル分子を用いて磁気ナノデバイスを作製した結果、室温において、CISS 由来の MR 効果を観測することに初めて成功しました。

本研究成果は 2025 年 7 月 30 日(英国時間)に『Nanoscale』(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/非磁性薄膜のエッジを用いたナノ接合作製技術を開発した。
・キラル分子を用いた磁気ナノデバイスにおいて、室温にて初めてキラル誘起スピン選択性由来の磁気抵抗効果を観測した。
・デバイス化することでキラル誘起スピン選択性が低下する原因はリーク電流以外にある可能性を示した。

2. 研究背景

次世代のエレクトロニクスとして、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に分子が融合した分子スピントロニクスが注目を集めています。分子は主に軽元素で構成されており、スピン軌道相互作用(※1)が小さいため、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。また、キラリティ(※2)を有するキラル分子において、近年、キラル誘起スピン選択性(CISS)効果が発見され、現在世界中で急速に研究が進められています。CISS 効果とは、電子がキラル分子を伝導する過程において、その分子のキラリティによって、上向きの電子スピン、あるいは、下向きの電子スピンが選択的に通過す

ると考えられている現象です。

CISS 効果は、主に磁性探針を用いた導電性原子間力顕微鏡(※3)による手法により観測されてきました。一方で、最近では、CISS 効果を利用したデバイス開発が進められています。キラル分子がスピンフィルター(※4)のように機能するため、キラル分子を用いたデバイスにおいて大きな MR 効果の発現が期待できると考えられるからです。しかしながら、これまで非磁性体/キラル分子/磁性体から構成される、CISS 効果に基づいた有機スピンバルブ(CISS-OSV)デバイスでは、MR 比は大きくても数%程度に留まっていました。この MR 比の低下は、従来のデバイスにおけるミリメートルからマイクロメートルスケールの比較的大きな接合面積により、キラル分子層中のピンホールによるリーク電流が発生しやすいことが原因と考えられてきました。一方で、磁性探針を用いた手法ではナノスケールの接触面積であるため、ピンホールの影響が小さいとされています。

したがって、報告例のないナノスケール接合を有する CISS-OSV デバイスにおいて、室温 MR 効果を観測すること、それによってデバイス化における MR 比低下の原因を明らかにすることは喫緊に解決するべき最重要課題の 1 つとなっていました。

3. 研究内容・成果

今回、研究グループは、ナノスケールの接合面積を有する CISS-OSV デバイスの創製を目指し、図 1 に示すデバイスを提案しました。これまでの磁性薄膜のエッジを利用したナノスケール接合の作製技術(※5)に加え、非磁性電極として金薄膜エッジを利用した金電極を作製しました。さらに、キラル分子としてベンゾチエノベンゾチオフェン(BTBT)ベースであるキラルなアルキルアミド置換型の[1]ベンゾチエノ[3,2-*b*][1]ベンゾチオフェン誘導体(*S*-BTBT-CONHR)の合成を新規に行い、CISS-OSV デバイスの作製技術を確立しました。

デバイス作製に先立ち、磁性探針を用いた導電性原子間力顕微鏡により *S*-BTBT-CONHR の CISS 効果について調べた結果、図 2 に示すように高いスピン選択性を示すことがわかりました。続いて、金電極について構造・電気特性を評価しました。その結果、図 3(a～c)に示すように、ガラス/金薄膜/ガラス構造体を作製することができ、ナノオーダーで平坦な研磨面（図 3(d)）も実現しました。この研磨された金薄膜のエッジには一様な電流が流れることも確認しました(図 3(e))。さらに、このエッジ面上に *S*-BTBT-CONHR キラル分子膜をオフセンタースピンコーティング法(※6)により成膜した結果、図 4 に示すように、数ナノメートルの膜厚で均一な *S*-BTBT-CONHR キラル分子膜を成膜することに成功しました。

これらの新技術を駆使して、非磁性体(金)/*S*-BTBT-CONHR/磁性体(ニッケル鉄)ナノデバイスを作製した結果、室温において、磁性(ニッケル鉄)薄膜の磁化状態(図 5(a))に対応した MR 効果の観測に成功しました(図 5(b))。これはナノデバイスにおいて、CISS 由来の MR 効果を初めて観測できたことを意味します。また、このとき、デバイスの接合面積をナノスケール化しても MR 比の向上は見られませんでした。この結果は、デバイス化による MR 比低下の原因が従来考えられてきたリーク電流以外にある可能性を示唆するものであり、CISS 効果における新しい知見を提供しました。

4. 今後の展開

CISS 効果に関する研究は近年急速に進んでいますが、そのメカニズムは解明されていません。本研究成果はそのメカニズム解明に大きく寄与するものです。CISS 効果のメカニズムを解明し、デバイスにおいて大きな MR 効果を観測できるようになれば、新しいタイプの高感度磁気センサや高密度磁気メモリなどへの応用が期待されます。基礎学術的にも応用工学的にも幅広い発展に寄与します。

5. 謝辞

本研究は、JSPS 基盤研究(B)(No.24K00948)、JSPS 特別研究員奨励費(No.24KJ1953)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2123、「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（Spin-RNJ）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-」)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：Magnetoresistance effect based on spin-selective transport in nanodevices using chiral molecules（キラル分子を用いたナノデバイスにおけるスピン選択輸送に基づいた磁気抵抗効果）
著者：松坂美月[1]、鹿嶋倖太郎[1]、寺井航紀[1]、上田拓海[1]、宮本龍之介[1]、山本崇史[1]、三部宏平[2]、芥川智行[2]、海住英生[1、3]（[1]慶應義塾大学大学院理工学研究科、[2]東北大学多元物質科学研究所、[3]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(英国王立化学会が発行する国際科学雑誌)
公表日：英国時間 2025 年 7 月 30 日(英国時間)(オンライン公開)
doi：10.1039/d5nr01259g

＜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で生じる軌道角運動量の間で生じる相互作用。原子番号が大きい元素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　キラリティ
分子構造の鏡像と重ね合わせることができない性質(右手と左手の関係)であり、不斉炭素に代表される四つの異なる置換基を持つ原子が存在する分子によって生じる現象である。この性質を持つキラル分子は、光学活性を示し鏡像異性体間で生理活性や物性が大きく異なる場合がある。

※3　磁性探針を用いた導電性原子間力顕微鏡
導電性原子間力顕微鏡とは、原子間力顕微鏡(AFM)の一種で、試料表面の電気伝導を測定できる顕微鏡である。通常の AFM では試料表面の形状を測定する一方、導電性 AFM では、試料と金属探針の間に電圧を印加し、流れる電流の大きさを測定する。これにより、電気伝導度の分布を可視化でき、ナノスケールでの電気伝導特性を評価することができる。このとき、金属探針を磁性探針にしたものが本研究で用いた手法である。磁性探針の磁化状態に対応したナノスケールでの電気伝導特性を評価することができる。

※4　スピンフィルター
上向きの電子スピンと下向きの電子が注入されたとき、片方の向きの電子スピン、すなわち、上向きの電子スピン、あるいは、下向きの電子のどちらかが透過する現象、あるいは、その材料のことを示す。スピンをフィルタリングするような役割を示すことから、スピンフィルターと呼ばれる。

※5　磁性薄膜のエッジを利用したナノスケール接合の作製技術
本研究グループが、2022 年に磁性薄膜のエッジを利用したナノスケール接合の作製技術を構築した。このナノスケール接合では、磁性薄膜の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

間に分子を挟み込む。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 50 ナノメートルの磁性薄膜を用いれば、50×50 平方ナノメートルの微小接合が作製可能となる。この技術を用いて、磁性(ニッケル鉄)薄膜のエッジ間に 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(C8-BTBT)を挟んだナノスケール接合において室温にて磁気抵抗効果の観測に成功した(Nanoscale Advances, Vol. 4, pp. 4739-4747, 2022)。

※6　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ン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センチメートル離した位置に基板を置いてスピンコーティングを行う。

＜図表＞

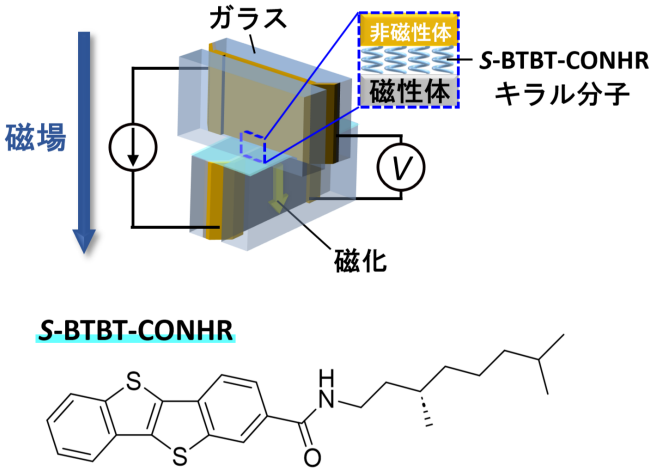

図 1　磁性薄膜と非磁性薄膜のエッジ間にキラル分子が挟み込まれた新たな磁気ナノデバイス

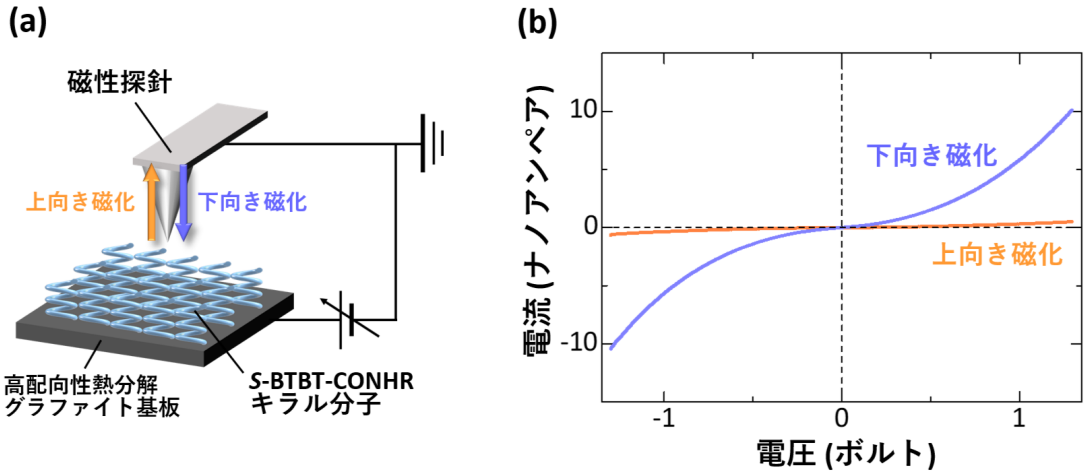

図 2　(a)磁性探針を用いた導電性原子間力顕微鏡のセットアップ、(b) *S*-BTBT-CONHR キラル分子の高いスピン選択性

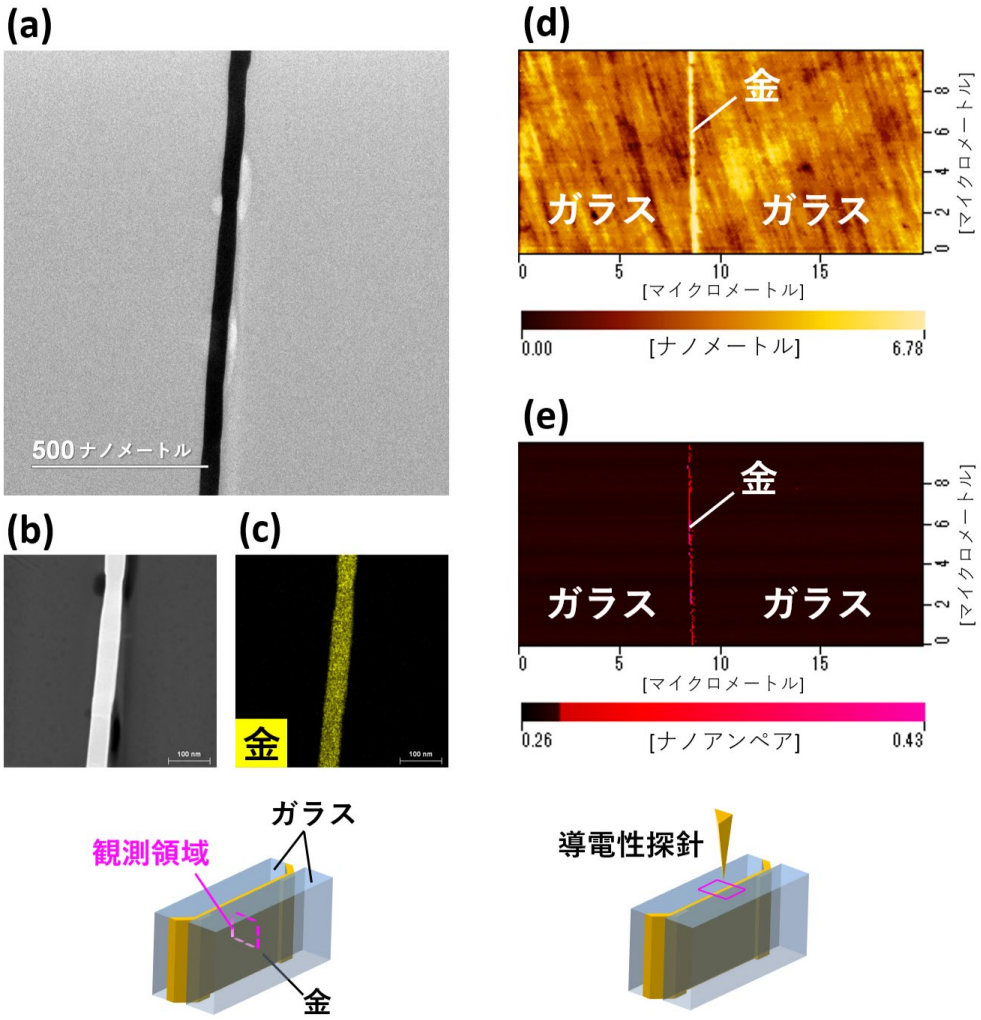

図 3　ガラス/金薄膜/ガラス構造体の(a)断面観察像、(b)高角度環状暗視野像、(c)元素マッピング像、(d)表面観察像、(e)電流マッピング像

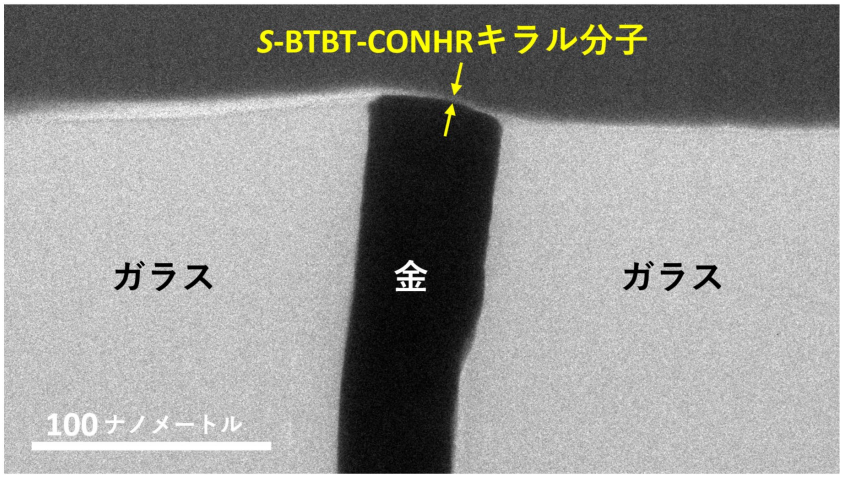

図 4　ガラス/金薄膜/ガラス構造体上の *S*-BTBT-CONHR キラル分子膜の断面観察像

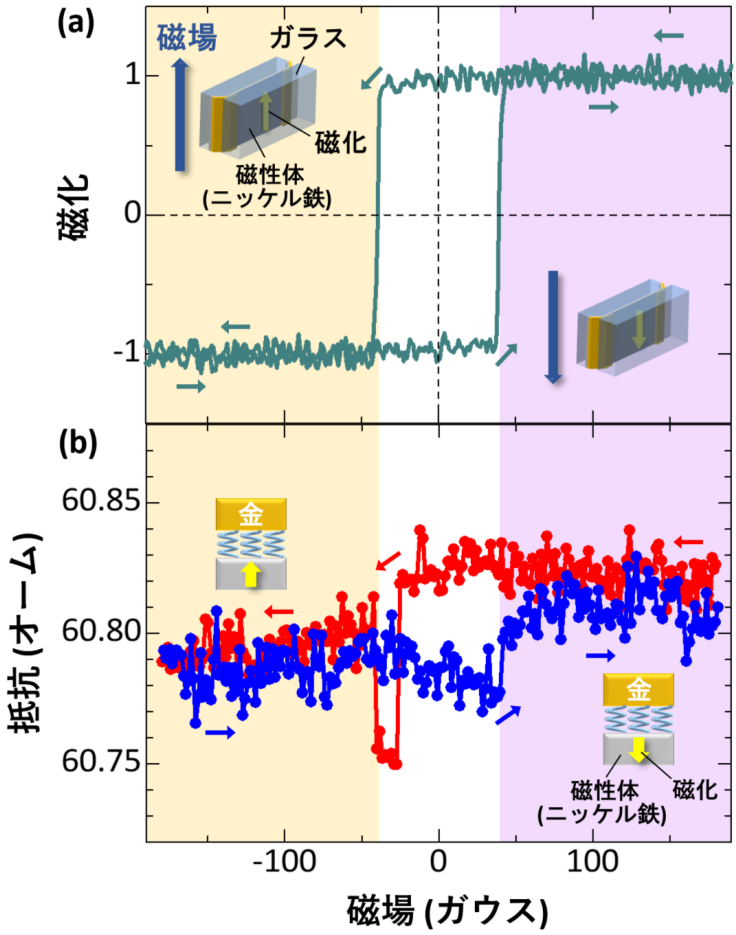

図 5　(a)磁性(ニッケル鉄)薄膜の磁化状態と(b)非磁性体(金)/*S*-BTBT-CONHR/磁性体(ニッケル鉄)ナノデバイスにおける CISS 由来の室温磁気抵抗効果

※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　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

東北大学 多元物質科学研究所　教授　芥川 智行（あくたがわ ともゆき）
TEL：022-217-5653　E-mail：akutagawa@tohoku.ac.jp

・本リリースの配信元
慶應義塾広報室（増田）
TEL：03-5427-1541　FAX：03-5441-7640
E-mail：m-pr@adst.keio.ac.jp　　https://www.keio.ac.jp/

東北大学多元物質科学研究所 広報情報室
TEL：022-217-5198　E-mail：press.tagen@grp.tohoku.ac.jp