

2025 年 10 月 10 日

東京大学

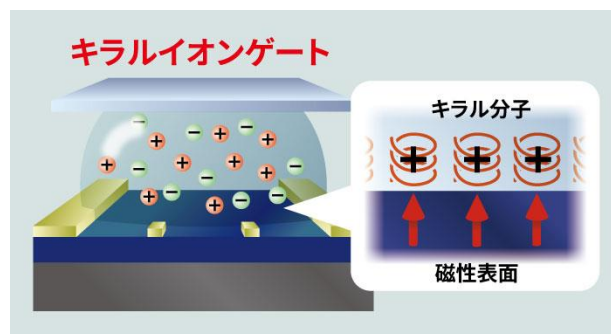
科学技術振興機構（JST）

名古屋大学

キラルイオンゲート技術を世界初実証 ——分子対称性によるトポロジカル表面磁性の超省電力制御に成功——

発表のポイント

- ◆キラルなイオン液体を用いたゲートデバイスでトポロジカル強磁性表面の制御を行い、キラリティに由来するドメインの自発偏極を実証しました。
- ◆従来の EDLT はキラリティの無い分子を用いて行われてきましたが、本研究では EDLT にキラルなイオン性分子を用いる「キラルイオンゲート」を世界で初めて提案・実証しました。
- ◆分子キラリティと磁性の結合をゲートデバイスに取り入れたことにより、省電力スピントロニクス実現に向けた新しい設計指針を与えます。



キラルイオンゲートによる二次元磁性表面の制御

概要

東京大学生産技術研究所の松岡 秀樹 特任助教と金澤 直也 准教授らの研究グループは、名古屋大学大学院理学研究科の須田 理行 教授、京都大学大学院工学研究科の関 修平 教授、東京大学大学院工学系研究科の岩佐 義宏 教授（研究当時）および 同大学国際高等研究所東京カレッジの十倉 好紀 卓越教授と共同で、キラル（注 1）な分子構造を持つイオン液体（注 2）を用いた二次元磁性表面の制御手法を開発しました。

近年、スピントロニクスにおける新たな潮流として、分子や固体結晶のキラリティ（注 1）を活用するキラルスピントロニクスが注目を集めています。本研究では、キラルなイオン液体を電気二重層トランジスタ（EDLT）（注 3）のゲート媒質として用いることで、分子のキラリティと電界効果を融合した新たな磁性制御手法「キラルイオンゲート」を提案・実証しました（図 1）。具体的には、制御の対象として表面のみ強磁性を示す FeSi (111) エピタキシャル薄膜を用い、アキラルおよびキラルなイオン液体による EDLT 構造を作製し、その磁気輸送特性を比較しました。両デバイスに共通して異常ホール効果（入力電流に垂直な方向に出る磁化に比例した電圧、磁化特性の評価に使う）および保磁力（磁化をゼロにするために必要な磁場の強さ、磁石の強さの評価特性の一つ）の静電的な変調が観測される一方で、キラルなイオン液体を用いた場合に限り、ゼロ磁場下での磁気ドメインの偏極（磁化の向きが特定方向に偏っている状態）

が現れることが確認されました。この結果は、分子キラリティによって磁性表面へ実効的な有効磁場が誘起されることを示唆します。キラルイオンゲートは、従来の電界制御にないキラリティ起源の磁気応答を引き出す手法であり、キラルスピントロニクスデバイスへの波及が期待されます。

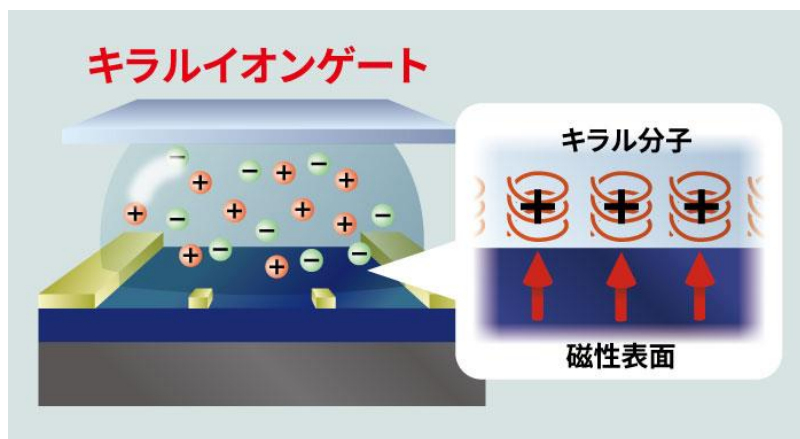


図 1：キラルイオンゲートによる二次元磁性表面の制御

発表者コメント：松岡 秀樹 特任助教の「もしかする未来」



これまで私はイオン性の分子を使ったゲートデバイスの研究を進めてまいりましたが、当初は分子を単なる“点”の電荷としてしか捉えていませんでした。その中で、共同研究を通じてキラルな分子と出会い、分子の持つ個性に目を向けようと思ったことが本研究のきっかけです。最近ではキラルに限らず、多種多様な分子がそれぞれ固有の面白さを持つことを実感しております。今後は、そのような分子の個性を積極的に活かし、エレクトロニクスとの融合をめざした研究を進めていきたいと考えています。

発表内容

スピントロニクスでは、電流などの外場で磁性を高速かつ低消費電力に制御する技術が鍵となります。その背景の中、近年では分子や固体のキラリティと電子スピンの結合を活用した現象が CISS (Chiral-Induced Spin Selectivity) 効果、すなわちキラルな分子や物質を通過する電子のスピンの選択的に偏る現象を始めとして次々と開拓されており、キラリティでスピントロニクスデバイスを制御する新概念「キラルスピントロニクス」へ展開されています。しかし、これまでは一般的に電気を帯びていないイオン性のキラル分子が使われており、イオン性の分子を用いることによるゲートデバイス化は未開拓でした。

本研究では、キラルな有機カチオン（カチオンとはプラスの電荷を持つイオンのこと）からなるイオン液体を EDLT のゲート媒質として用いることで、分子のキラリティとゲートデバイスを融合した新たな磁性制御手法「キラルイオンゲート」を提案・実証しました。従来、磁性体の物性を外場で制御する研究は、キャリア蓄積や電気化学反応によりキュリー温度（強磁性が失われる温度）や保磁力、磁気異方性を変えることに主眼が置かれてきました。本研究ではさらに一歩進め、キラルな有機カチオンを含むイオン液体をゲート媒質として導入し、分子のキラリティに由来する対称性の破れを電界制御に組み合わせることで、磁性の新しい操り方を示しました。対象試料は、バルク（塊状）では絶縁体として知られる FeSi (111) エピタキシャル

薄膜です。同薄膜の表面には電子状態のトポロジー（注4）に由来した表面電子状態が発現し、伝導と強磁性を表面でのみ担います。このため、表面数ナノメートルで電荷を集積させる EDLT の効果を、バルク寄与から分離して評価できます。本研究グループは、(i) 高温での電気化学反応モード、(ii) アキラルなイオン液体を用いた通常の EDLT モード、(iii) キラルなイオン液体を用いたキラル EDLT モードの3条件を系統的に比較しました。

EDLT モードでは、アキラル／キラルなイオン液体共通の振る舞いとして保磁力が 10% 超のスケールで変調されることを確認しました。これは、EDLT により印加された強電場もしくはドーピングされたキャリアにより二次元的な磁性表面が変調され、磁気異方性や磁化が感度高く応答する描像と整合します。

本研究で最も特筆すべき成果は、キラル EDLT において、ゼロ磁場で冷却したにもかかわらず磁気ドメインの占有が一方向に偏る（ドメイン偏極）現象を実証した点です。キラル液体を塗布するだけで偏極が立ち上がり、ラセミ体では現れず、S 体／R 体で偏極の向きが逆転するという分子キラリティに応じた対照的なドメイン偏極挙動を観測しました（図2）。このことは、分子と磁性表面の界面において有効磁場が生じうることを示唆します。ここで留意すべきこととして、この現象にはなんらかの時間反転対称性の破れが必要となりますが、この候補として電子やフォノンによって運ばれる一方向的な角運動量の流れ・散逸が考えられ、より微視的な構造を明らかにする実験を通じてこの起源が明らかになることが期待されます。

本研究が提案するキラルなイオン液体を組み込んだキラルイオンゲートは、従来の EDLT では得にくいキラリティ起源の磁気応答を引き出せる新概念であり、キラルスピントロニクスにおいてデバイス研究の新しい設計指針を与えることが期待されます。

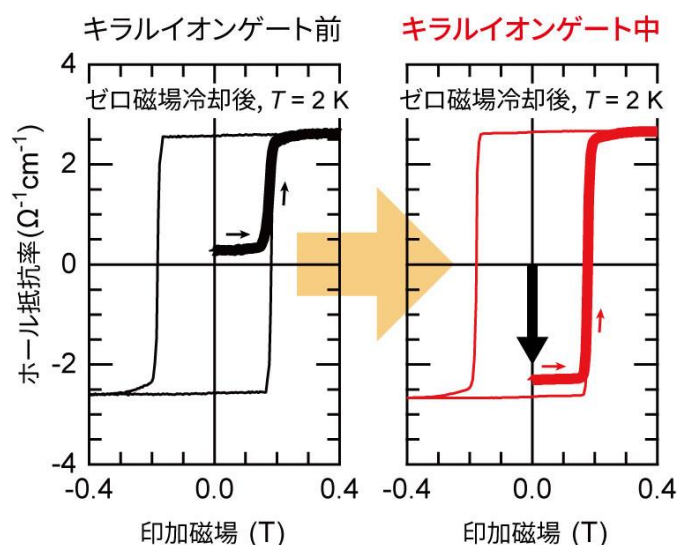


図2：キラルイオンゲートのドメイン偏極現象

キラルイオンゲートの前後に置いて、ゼロ磁場で冷却した後のホール効果測定の結果を示す。この初期磁化過程（太線）のホール抵抗率の値が、冷却中に試料が感知した有効磁場の大きさを反映し、これがキラルイオンゲートによって生じている。

発表者・研究者等情報

東京大学

生産技術研究所

松岡 秀樹 特任助教

森山 天貴 研究実習生：研究当時

兼：京都大学大学院工学研究科分子工学専攻 修士2年：研究当時

金澤 直也 准教授

大学院工学系研究科

堀 智洋 博士3年：研究当時

岩佐 義宏 教授：研究当時

現：理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長

国際高等研究所東京カレッジ

十倉 好紀 卓越教授

兼：理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長

京都大学 大学院工学研究科

関 修平 教授

須田 理行 准教授：研究当時

現：名古屋大学大学院理学研究科 教授

論文情報

雑誌名：Nano Letters

題名：Electric-field control of two-dimensional ferromagnetic properties by chiral ionic gating

著者名：Hideki Matsuoka*, Amaki Moriyama, Tomohiro Hori, Yoshinori Tokura, Yoshihiro Iwasa, Shu Seki, Masayuki Suda, Naoya Kanazawa

DOI：10.1021/acs.nanolett.5c03884

URL：https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c03884

研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業「新世代コンピューティング素子のためのスキルミオン物質基盤創成（課題番号：JPMJFR2038）」、「カイラルイオントロンクスによる電磁交差物性創発（課題番号：JPMJFR221V）」、同戦略的創造研究推進事業 CREST「Giant CISS 物質：界面陽電子・電子の全運動量制御（課題番号：JPMJCR2303）」、日本学術振興会（JSPS）科研費「ファンデルワールス超薄膜・界面設計に基づく創発二次元物性開拓（課題番号：JP21K13888）」、「接合界面電子状態制御による新規トポロジカル磁気粒子の創出（課題番号：JP23H04017）」、「磁性伝導体における新しい創発電磁誘導（課題番号：JP23H05431）」、「スピン偏極陽電子ビームを基軸とする新しいサイエンスの展開（課題番号：JP23H05462）」、「ありふれた元素の化合物に潜んだトポロジカル表面新物質相の開拓（課題番号：JP24H00417）」、「インターカレーション技術を用いた磁性の制御と新規開拓（課題番号：JP24H01212）」、「表面非対称電子軌道の制御による非相反伝導特性の最大化（課題番号：JP24H01652）」、「トポロジカルスピ粒子における非線形ホール効果の観測とスピントロニクス応用（課題番号：JP25H02126）」、「キラルファンデルワールス超格子：キメラ準粒子創出のためのプラットフォームの構築（課題番号：JP25H02141）」、「界面キラリティ反転を利用した電圧反転型超伝導ダイオードデバイスの創製（課題番号：JP25K22219）」、三菱財団、住友財団、田中貴金属記念財団の支援により実施されました。

用語解説

（注 1）キラル、キラリティ

右手と左手のように、鏡に映した像と元の形が重ならない性質を持つことを「キラルである、キラリティ（対掌性）」を持つ」といいます。逆に、鏡に映した像と元の形が重なることを「アキラルである」といいます。キラルな分子は、置換基の順に応じて S 体（左旋性）と R 体（右旋性）に分けられ、S 体と R 体が同数混ざっている状態をラセミ体といいます。キラリティは、その対称性の破れに由来して光や電子スピンと相互作用し、エレクトロニクスにおける機能性の源になります。

（注 2）イオン液体

プラスのイオン性分子（カチオン）とマイナスのイオン性分子（アニオン）の組み合わせからなり、常温近くで液体の物質です。本研究では、後述する電気二重層トランジスタ（EDLT）における絶縁層として用いています。

（注 3）電気二重層トランジスタ（EDLT）

通常のトランジスタ構造においてその絶縁層をイオン液体に置き換えたものです。ゲート電圧をかけると、表面に数ナノメートル以下の電気二重層ができ、非常に大きな静電容量で表面に大量の電荷を一時的に蓄えられます。これにより、材料の表面の性質を低電圧で強く・可逆に調整できます。

（注 4）電子状態のトポロジー

ドーナツと球の違いのように、“連続変形では変わらない”幾何学的な性質をトポロジーと呼びます。固体中の電子のバンド構造（電子が取りうるエネルギー状態のダイアグラム）にもこの考え方が当てはまり、トポロジーで守られた表面・端の電子状態が現れることがあります。今回の FeSi (111) 薄膜では、このトポロジーによって保護された特殊な表面状態が発現します。

問合せ先

東京大学生産技術研究所 広報室

Tel : 03-5452-6738 E-mail : pro@iis.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.jp

名古屋大学 総務部広報課

Tel : 052-558-9735 E-mail : nu_research@t.mail.nagoya-u.ac.jp

＜JST 事業に関すること＞

科学技術振興機構 創発的研究推進部

加藤 豪（かとう ごう）

Tel : 03-5214-7276 E-mail : souhatsu-inquiry@jst.go.jp