

# 一方向のスピンのみを選択的に伝導するキラル金属電極材料を開発

—省電力デバイスの実現や水素エネルギー製造の効率化に期待—

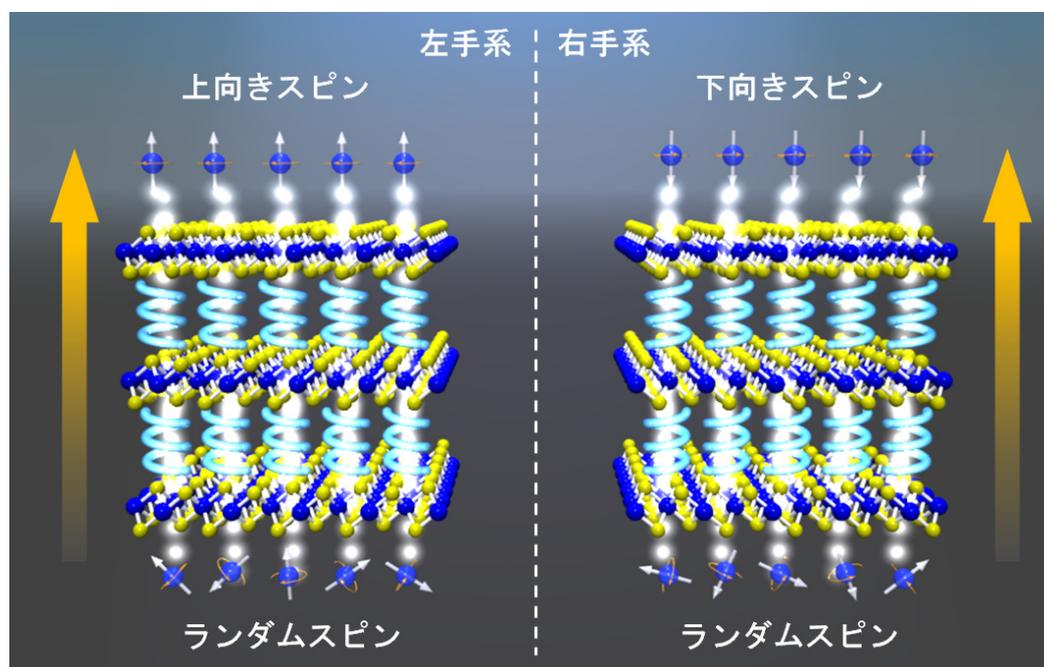
## 概要

京都大学大学院工学研究科の辺智芸 博士課程学生、筒井祐介 同助教、関修平 同教授、須田理行 同准教授らの研究グループは、二硫化チタン( $\text{TiS}_2$ )と呼ばれる層状化合物の層間にキラル分子を挿入した新奇な物質「キラル  $\text{TiS}_2$ 」を開発し、挿入したキラル分子のキラリティに依存して同物質中を特定方向のスピンを有する電子のみがほぼ 選択的に伝導することを明らかにしました。

電流を担う電子の一つ一つは、スピンと呼ばれるミクロな磁石としての性質を持っていますが、通常の電流中ではそれぞれのスピンのバラバラの方向を向いているため磁気情報を持っていません。スピンの方向を特定の一方向に揃えることで磁気情報を持たせた電流は、「スピン偏極電流」と呼ばれ、この磁気情報を利用した省電力デバイスや電気化学的な水素エネルギー製造への応用の可能性が期待されていましたが、これまでに室温で 100%に迫るスピン偏極率を実現できる電極材料は報告されておらず、実用化への壁となっていました。

本研究ではキラル  $\text{TiS}_2$  に電流を流すだけで、室温でスピン偏極率(スピが一方向に揃っている度合い)が約 95%ものスピン偏極電流が生成可能でありことを見出しました。更に、同材料を電極とした高性能な磁気抵抗素子の作製や水電解セルによる水素製造の効率化が可能であることも実証しました。本成果は、次世代エレクトロニクスやエネルギー製造を担う革新的電極設計指針となることが期待されます。

本成果は、2023 年 9 月 11 日にドイツの国際学術誌「*Advanced Materials*」にオンライン掲載されました。



図：キラル  $\text{TiS}_2$  におけるスピン選択伝導の模式図。もともとランダムなスピンの向きを持つ電流を流すと、右手系  $\text{TiS}_2$  では下向きスピンのみが、左手系  $\text{TiS}_2$  では上向きスピンのみが、それぞれほぼ選択的に伝導される。

## 1. 背景

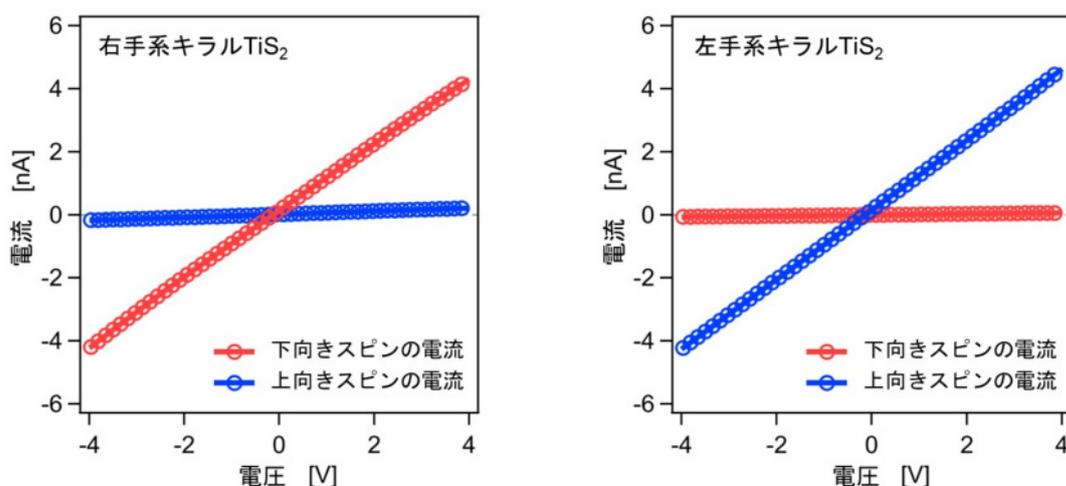
現代社会を支えるエレクトロニクスは電流中の電子の持つ電氣的性質(電荷の流れ)を利用した技術です。これに加えて、電子の磁氣的性質(スピンの向き)も同時に利用しようとするスピントロニクスと呼ばれる技術は、次世代高性能デバイス、省電力デバイスの実現へと繋がることから、近年注目を集めています。更に同研究グループは最近、電子の磁氣的性質が水電解による水素製造を効率化できることも明らかにしており、循環型エネルギー製造技術の観点からも電子スピン制御技術が注目されています(※関連プレスリリース①)。

これまでのスピントロニクス技術には通常、スピンの向き(上向きスピンまたは下向きスピン)を制御するために、レアメタルを含め強磁性材料や電磁石などを用いた外部磁場が不可欠でした。また、これらを用いたとしても室温で電流中の向きを完全に一方に揃えることは困難であると考えられており、スピンの情報を効率的に利用することが出来ていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究グループは、右手と左手のように、鏡に映した構造が元の構造と重ならないという特殊な構造を持つ”キラル分子”と呼ばれる分子が持つ”キラリティ誘起スピン選択性”という現象に注目しました。これは、電流がキラルな構造を持つ分子中を流れることで、電流中のスピンの向きが平行に揃うという性質です。本研究グループは二硫化チタン( $\text{TiS}_2$ )と呼ばれる層状化合物の層間にキラル分子を挿入することで、電流中のスピンをほぼ完全に平行に揃える性質を有する新たな物質「キラル  $\text{TiS}_2$ 」の合成に成功しました。更にこの物質は、良質な「金属」としての性質を同時に有しており、そのまま「電極材料」としての応用が可能です。

キラル  $\text{TiS}_2$  中におけるスピンを同方向に揃える性質(スピン偏極率)を調べたところ、同物質を流れた電流の中ではおよそ95%ものスピンの向きが揃っていることが明らかになりました。この値は、典型的な磁石である金属中の値(鉄：45%、コバルト：42%、ニッケル：~33%)を大きく上回る値であり、スピンの向きを揃える性質としては既存の材料を大きく凌駕する値であることが分かりました。更に、挿入する分子のキラリティを右手系から左手系に入れ替えることで、スピンの向きを反対方向に揃えることが可能であることも明らかになりました。



図：キラル  $\text{TiS}_2$  流れる電流におけるスピンの向きの依存性。層間に挿入する分子が右手系では下向きスピンの向きが、左系では上向きスピンの向きがほぼ選択的に伝導され、その選択性は95%にも達した。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究では、層状化合物の層間にキラル分子を挿入するという新たな手法によってキラルな金属電極を人工的に作り出すと同時に、電流中のスピンの向きを磁性体や外部磁場を用いずに、電流を流すだけでほぼ完全に揃える手法を見出しました。スピンの制御は次世代エレクトロニクスや、エネルギー製造技術を効率化する革新的技術として期待されています。本手法は、既存の物質中にキラルな化合物を組み込むというシンプルな手法によってスピン選択性を付与可能な革新的手法であると共に、本研究で使用した二硫化チタンに限らず、様々な物質にも同原理が適用可能と考えられ、次世代エレクトロニクスやエネルギー製造を担う革新的電極設計指針となることが期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ「電子やイオン等の能動的制御と反応」(研究総括：関根泰、研究代表者：須田 理行、研究期間：平成 31 年 10 月～令和 5 年 3 月、JPMJPR19T5)、JST 創発的研究支援事業 (創発 PO：福島孝典、研究代表者：須田理行、研究機関：令和 5 年 4 月～令和 9 年 3 月)、一部は日本学術振興会科学研究費補助金 学術変革領域研究(A) 20H05870、挑戦的研究(萌芽) 23K17876、日立財団倉田奨励金、旭硝子財団研究助成、住友電工グループ社会貢献基金 (いずれも研究代表者：須田 理行)の支援を受けて行われました。

#### ※関連プレスリリース①

「電流中の“スピン”の制御により水電解の効率化を実現—水素エネルギーによる持続可能な社会へ大きく貢献—」

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20220506>

#### <用語解説>

- (1) スピン：電子は右回りまたは左回りに自転運動しており、この回転によって電子は磁気モーメントと呼ばれるミクロな磁石としての性質を持つ。
- (2) スピントロニクス：電子が持つ電荷として性質を利用した従来のエレクトロニクスに対して、電子が持つスピンも情報として利用する次世代エレクトロニクス技術。
- (3) キラリティ(キラル)：キラリティとは掌性ともいい、右手と左手の関係のように物体を鏡に映した形がもとの形とは重ね合わせられないことをいう。また、このような性質を持った分子を「キラル分子」という。
- (4) キラリティ誘起スピン選択性：キラル分子の薄膜に電子を通過させた際に、元はバラバラであったスピンの向きに選択性が現れる現象である。また、キラリティを入れ替えることで、スピンの向きも入れ替わることが知られている。

#### <研究者のコメント>

持続可能な社会を実現するためには、循環型のエネルギー製造技術、低消費エネルギーデバイスの製造の両面からの技術革新が不可欠であり、このいずれをも解決する技術として電子スピンの効率的な利用が期待されています。本研究の発見は、従来の電子スピンの利用を革新的に効率化できるものと考えています。今後は、本原理を使用して更に実用化を目指した研究を行いたいと考えています。(須田理行)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Chiral van der Waals superlattices for enhanced spin-selective transport and spin-dependent electrocatalytic performance (効率的なスピン選択的電子輸送とスピン依存電極触媒性能を有するキラルファンデルワールス超格子)

著者：Zhiyun Bian, Yuki Nakano, Keisuke Miyata, Ichiro Oya, Masaki Nobuoka, Yusuke Tsutsui, Shu Seki and Masayuki Suda\*

掲載誌： *Advanced Materials* DOI : <https://doi.org/10.1002/adma.202306061>