

2024年4月13日

東京大学

理化学研究所

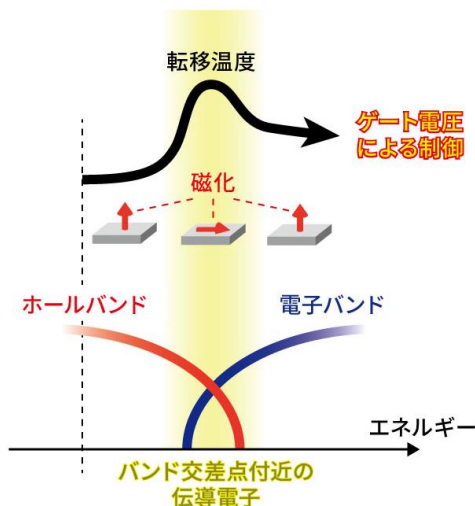
科学技術振興機構 (JST)

## 磁性半金属の特異な磁性をゲート電圧で変調することに成功

——スピントロニクスへの応用展開に期待——

### 発表のポイント

- ◆ 磁性半金属と呼ばれる特殊な強磁性体において、強磁性転移温度、磁気異方性、磁気輸送特性などの性質を、ゲート電圧で変調することに成功しました。
- ◆ 強磁性転移温度の大幅な上昇、磁気異方性の完全な切り替えなどの劇的な変化が観測され、その起源として、半金属的な電子構造と磁性の強い結合が示唆されました。
- ◆ 本研究の結果を利用することで、磁性半金属を主役とする新原理スピントロニクスデバイスへの応用展開が期待されます。



本研究における磁性のゲート制御の概念図と、対応する電子構造

### 概要

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センターの中野匡規特任准教授（研究当時、研究当時：理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター創発機能界面研究ユニット ユニッタリーダー兼任、現：芝浦工業大学工学部 教授）、同研究科物理工学専攻の岩佐義宏教授（研究当時、研究当時：理研創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム チームリーダー兼任、現：理研創発物性科学研究センター 副センター長、同センター創発デバイス研究グループ グループディレクター）、梶原駿大学院生（研究当時）、王越（オウ エツ）大学院生（研究当時）、同大学生産技術研究所の松岡秀樹特任助教（理研創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム 客員研究員兼任、研究当時：同センター基礎科学特別研究員）らの研究グループは、同大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センターの平山元昭特任准教授（理研創発物性科学研究センタートポロジカル材料設計研究ユニット ユニッタ

リーダー兼任)、同大学先端科学技術研究センターの野本拓也講師(研究当時、現:東京都立大学理学部物理学科 准教授、理研創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム 客員研究員兼任)、有田亮太郎教授(理研創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム チームリーダー兼任)と共同で、磁性半金属テルル化クロムの強磁性転移温度(注1)、磁気異方性(注2)、異常ホール効果(注3)などの性質を、ゲート電圧で大きく変調することに成功しました。磁性のゲート電圧による変調は、これまで主に半導体に磁性イオンを添加して作られる希薄磁性半導体や鉄に代表される金属磁性体で実現されており、低消費電力の次世代スピントロニクスデバイスへの応用が期待されています。今回、磁性半金属という新たな物質系において、従来の物質系では見られないような劇的なゲート効果が観測されたことにより、磁性半金属を主役とする新原理スピントロニクスデバイスへの応用展開が期待されます。

本研究成果は、2024年4月12日(米国東部夏時間)に米国科学誌「Science Advances」のオンライン版に掲載されます。

## 発表内容

電気が流れる磁性体の研究は、スピントロニクスデバイスへの応用展開の可能性から大きな注目を集めています。そのような磁性体を構成する物質系として、鉄に代表される金属磁性体や、半導体に磁性イオンを添加して作られる希薄磁性半導体といった既存の物質系に加え、最近では特に磁性半金属が新たな研究対象として注目されています。磁性半金属は、そのバンド構造(注4)におけるバンド交差点が磁性と関連し、多様な機能性を提供することが期待されています。その応用の一つとして、ゲート電圧によって磁性を制御できるデバイス、すなわち磁性体ゲートデバイスの開発があります。このような磁性体ゲートデバイスの研究は、基礎研究と応用研究の両方において重要であり、これまで主に金属磁性体や希薄磁性半導体を中心に精力的に行われてきました。一方、磁性半金属を用いた磁性体ゲートデバイスでは、磁性半金属のバンド交差点付近に存在する伝導電子が、強磁性転移温度、磁気異方性、磁気輸送特性など、多岐にわたる磁性に影響を及ぼすことが期待されますが、磁性半金属は存在が希少ということもあり、そのような研究はほぼ行われてきませんでした。

本研究では、ごく最近磁性半金属であることが明らかになったテルル化クロムという物質系に注目し、イオンのインターカレーション(注5)を利用したゲート技術を適用することで(図1)、テルル化クロムの磁性をゲート電圧で大きく変調することに成功しました。

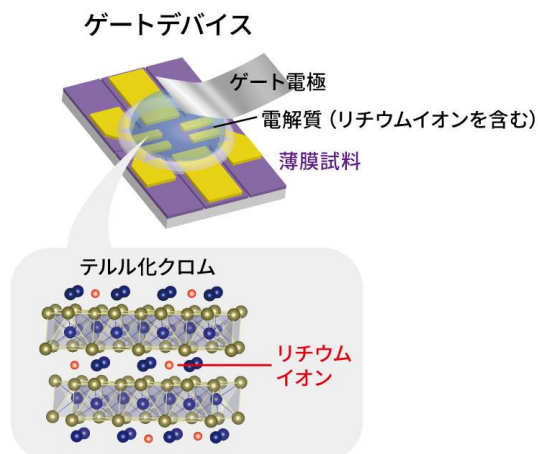


図1: 本研究において作製したインターカレーションを活用したゲートデバイスの構造

具体的には、ゲート電圧を細かく変化させることで、テルル化クロム中に存在する伝導電子の数を精密に制御したところ、強磁性転移温度の大幅な上昇や、面直磁気異方性と面内磁気異方性の完全な切り替え、さらには異常ホール効果と呼ばれる磁気輸送現象の符号反転などの劇的な変化が観測されました。特に興味深いのは、これらの磁性を特徴付ける性質が、ゲート電圧に対して非単調に切り替わる点です。図2に示すように中間のゲート電圧の領域において磁気異方性が面内に切り替わり(図2a)、かつ強磁性転移温度が特異的に増大する振る舞い(図2b)が見られました。先行研究からの類推によると、この中間領域ではバンド交差点付近の伝導電子の寄与が最も大きくなっていると考えられることから、本研究で観測された劇的なゲート効果においては、磁性半金属特有の特異な伝導電子がその本質的な役割を担っていることが示唆されます。

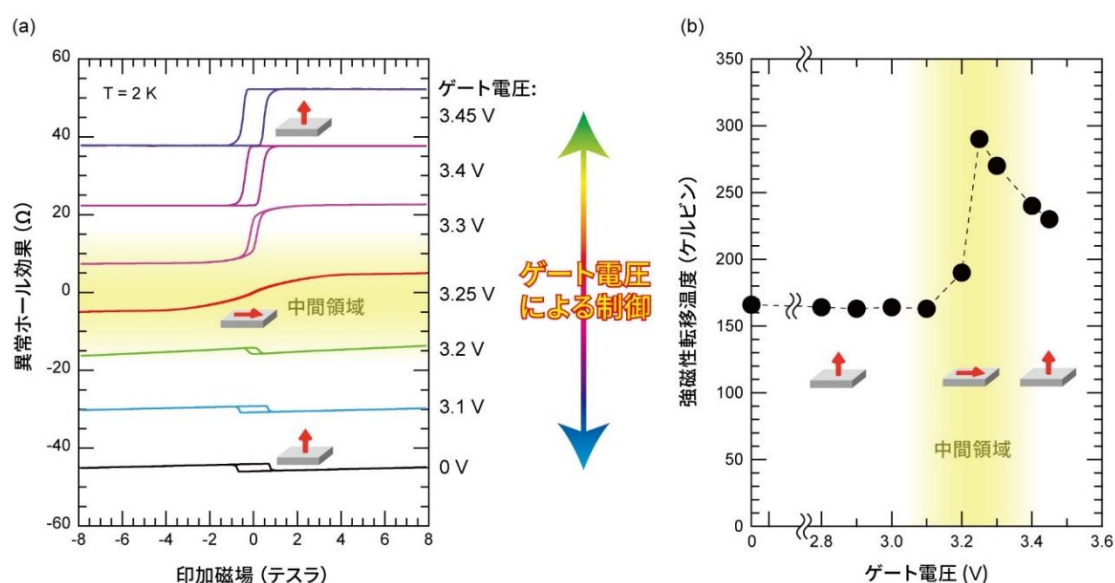


図2：本研究で得られた磁性制御の例

2Kにおける異常ホール効果(a)と強磁性転移温度(b)がゲート電圧の印加に伴い非単調に変化している。

本研究で観測された、ゲート電圧に対する磁性の非単調な振る舞いは、従来の希薄磁性半導体や金属磁性体におけるゲート効果では観測されたことのないものであり、磁性半金属におけるゲート効果の特異性を際立たせるものといえます。このような従来の磁性体ゲートデバイスでは見られない特徴を利用することで、磁性半金属を主役とする、新しいスピントロニクスデバイス技術への応用展開が期待されます。

## 発表者・研究者等情報

東京大学

大学院工学系研究科

附属量子相エレクトロニクス研究センター

中野 匡規 特任准教授：研究当時

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター創発機能界面研究ユニット

ユニットリーダー：研究当時

現：芝浦工業大学工学部 教授

平山 元昭 特任准教授

兼：理化学研究所創発物性科学研究センタートポロジカル材料設計研究ユニット  
ユニットリーダー

#### 物理工学専攻

岩佐 義宏 教授：研究当時

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム  
チームリーダー：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、同センター創発デバイス  
研究グループ グループディレクター

梶原 駿 修士課程：研究当時

王 越 (オウ エツ) 博士課程：研究当時

#### 生産技術研究所

松岡 秀樹 特任助教

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム 客員研究員

研究当時：理化学研究所創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム  
基礎科学特別研究員

#### 先端科学技術研究センター計算物質科学分野

野本 拓也 講師：研究当時

現：東京都立大学理学部物理学科 准教授

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム  
客員研究員

有田 亮太郎 教授

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム  
チームリーダー

## 論文情報

雑誌名：Science Advances

題名：Band-driven switching of magnetism in a van der Waals magnetic semimetal

著者名：H. Matsuoka, S. Kajihara, T. Nomoto, Y. Wang, M. Hirayama, R. Arita, Y. Iwasa\*,  
and M. Nakano\*

DOI：10.1126/sciadv.adk1415

## 研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 さきがけ研究領域「原子・分子の自在配列と特性・機能（課題番号：JPMJPR20AC）」、「トポロジカル材料科学と革新的機能創出（課題番号：JPMJPR20L7）」、日本学術振興会（JSPS）科研費「基盤研究 S（課題番号：19H05602）」、「基盤研究 B（課題番号：19H02593）」、「基盤研究 B（課題番号：22H01949）」、「若手研究（課題番号：21K13888）」、の支援により実施されました。

## 用語解説

### (注1) 強磁性転移温度

強磁性体において、その温度以上では強磁性の性質が失われる温度。キュリー温度 (Curie temperature) とも呼ばれます。これを磁性で制御することによって、特定の温度で強磁性の性質の有無自体の制御が可能になります。

### (注2) 磁気異方性

強磁性体において、強磁性体中の磁気モーメント (磁力の大きさと向きを表す量) の向きによって、その内部エネルギーが異なる性質のこと。強磁性体薄膜においては、薄膜の面内方向に磁化が向きやすい状態 (面内磁気異方性) と薄膜の面直方向に磁化が向きやすい状態 (面直磁気異方性) のどちらかが実現されることになり、これを決める要因として物質中の軌道角運動量 (電子が原子核の周囲を回る軌道運動によって発生する角運動量) に関連する結晶磁気異方性と、試料の形状に由来する形状磁気異方性などがあります。

### (注3) 異常ホール効果

電気を流す強磁性体で一般的に見られるホール効果の一種。通常のホール効果では磁場を印加しながら電流を流すと両者の直交方向に電圧が生じますが、異常ホール効果では磁場が無くとも磁性体中の磁化が代わりとなることで同様の電圧が生じます。

### (注4) バンド構造

物質中の電子が取りうる状態のエネルギー準位を帯状に記述したものです。特に、電子の波数空間中におけるエネルギー準位を記述した構造のことを一般的にバンド構造と呼びます。

### (注5) インターカレーション

層状物質などの物質中の隙間に元素を挿入することを一般にインターカレーションといいます。特に本研究ではリチウムイオンを外部電場によって物質中に挿入する過程を採用しています。これにより、物質中のリチウムイオンの量をコントロールでき、さらにはリチウムイオンが物質中に電子を与えることで試料の電子数を間接的に制御することが可能になります。

## 問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学生産技術研究所  
特任助教 松岡 秀樹 (まつおか ひでき)  
E-mail : hideki-m[at]iis.u-tokyo.ac.jp

芝浦工業大学工学部  
教授 中野 匡規 (なかの まさき)  
E-mail : mnakano[at]shibaura-it.ac.jp

(報道に関する問合せ)

東京大学大学院工学系研究科 広報室  
Tel : 03-5841-0235 E-mail : kouhou[at]pr.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学生産技術研究所 広報室

Tel : 03-5452-6738 E-mail : pro[at]iis.u-tokyo.ac.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 050-3495-0247 E-mail : ex-press[at]ml.riken.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

〈JST 事業に関する問合せ〉

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんど う ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3526 E-mail : presto[at]jst.go.jp