

# トポロジカル量子物質のスピンの機能開拓に成功

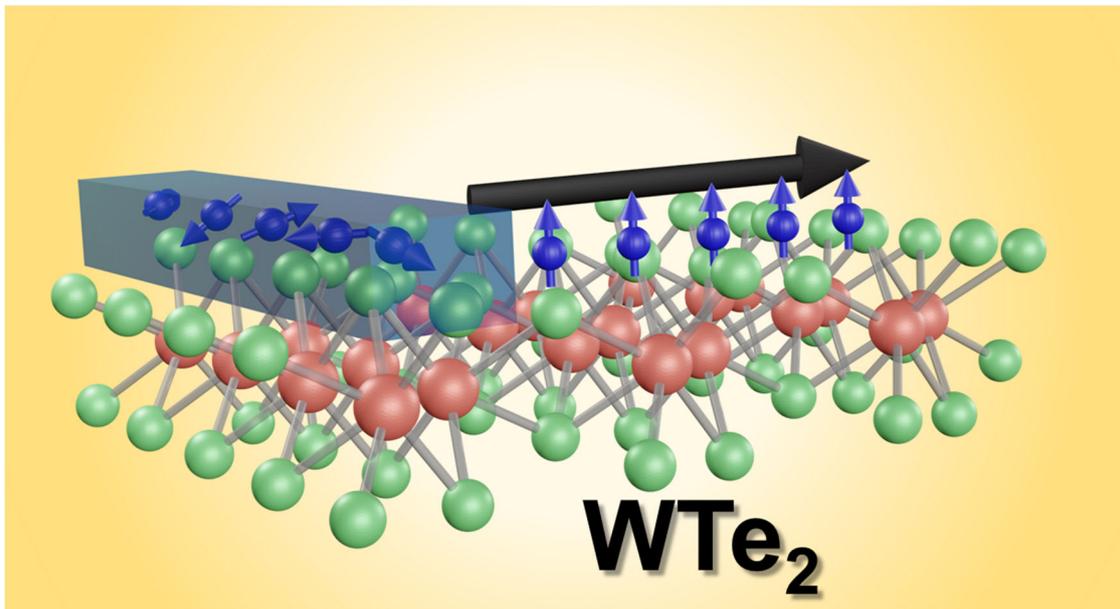
## —電気的スピン生成・計測を室温で実現—

### 概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の大西康介 修士課程学生、白石誠司 同教授らのグループは名古屋大学大学院工学研究科の竹延大志 教授と共同で、21世紀の新しい物質「トポロジカル量子物質」の一種である「ワイル半金属」<sup>\*1</sup>を用いて、室温でスピン情報を電気的に生成・計測できる素子を実現しました。

「トポロジカル量子物質」とは、その電子状態がトポロジカル（伸ばす、曲げるといった変形を加えてもその前後で性質が変わらないこと）に「捻れた」物質であり、20世紀までに発見されてきた半導体・金属・磁性体などとは根本的に異なる性質を持つ物質です。2016年のノーベル物理学賞がこの研究分野の草分けとも言うべき研究に与えられたことは、トポロジカル量子物質の極めて高い重要性を示すものです。今回の研究では、このトポロジカル量子物質の一種であるワイル半金属であり、かつ、これも近年盛んに研究されている原子層物質でもある  $WTe_2$  (ニテルル化タングステン=タングステンダイテルライド)を用いて、その結晶構造に由来した熱ゆらぎ<sup>\*2</sup>に対して強靱なスピン状態を、新開発の素子により電気的に生成・計測することに成功しました。このスピン情報は室温でも生成・計測できることから、スピンを用いた新しい情報伝播・計測素子への応用が可能です。

本成果は2022年10月18日（現地時刻）にドイツの科学誌である Advanced Electric Materials 誌にオンライン掲載されました。



**ワイル半金属である  $WTe_2$  におけるスピン状態生成の概念図。** 非磁性の（スピン情報を持たない）金属から電流を  $WTe_2$  に注入すると、 $WTe_2$  の結晶構造に由来した効果によるスピン情報が生成できる。スピン情報が生成できるのは結晶構造における  $a$  軸方向に電流を流した場合であり、例えば  $b$  軸方向に電流を流してもスピン情報は生成できない。

## 1. 背景

2016年にノーベル物理学賞がトポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究<sup>\*3</sup>に与えられたことからわかるように、21世紀の物質科学におけるトポロジーの役割には巨大なものがあります。ここで言うトポロジーとは、例えば数学においては「ドーナツには穴が1つあるが、野球のボールには穴がなく、この1や0という穴の数＝不連続な指標は変形によって変化しない」という図形の持つ「不変な」指標に着目することです。物質科学におけるトポロジー的な性質もまた、物質の状態が連続的に変化しても、その変化に影響されない「不変な」指標を与えてくれます。この観点から、近年「トポロジカル絶縁体」「トポロジカル超伝導体」などが、世界的に熾烈な研究競争の対象になっています。今回我々が研究対象とした「ワイル半金属」もそうしたトポロジー的な性質を持つ材料であり、やはり大きな注目を集める材料です。こうしたトポロジカルに特徴的な物質では、その物質の電子状態の捻れに由来するスピン<sup>\*4</sup>構造や、エネルギー散逸のない情報伝搬性を生かした超低消費エネルギー演算などが理論的に可能であるために、スピン演算に取り扱うために好適な電気的手法によりスピン情報を生成・計測する技術開発が焦眉の急となっていました。

## 2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループでは、ワイル半金属である  $WTe_2$  (タングステンダイテルライド) に着目しました。この材料は、現在活発に研究されている原子層物質と呼ばれる原子1層がほぼ平坦に結合している物質（グラフェンがその代表選手）でもあります。この材料では、過去に原子層平面に対して平行方向のスピン情報を持つことができることが報告されていましたが、その存在は極低温（約15ケルビン＝摂氏マイナス258℃）で消失してしまっており、熱に対して弱いことが問題でした。

今回の研究では、 $WTe_2$  の独特な結晶構造に由来した、その原子層平面に対して垂直方向のスピン情報が存在することに着目し、完全に電氣的な手法のみ（オールエレクトリック）により、この垂直方向のスピン情報を電流によって生成し、さらにそのスピン情報を電圧信号として読み出すことに成功しました。更にその生成されたスピン情報は熱ゆらぎに対して極めて強靱であり、室温（300ケルビン＝摂氏23℃）でも観測できることを実験的に示しました。

## 3. 波及効果・今後の予定

今後求められる研究成果としては、スピン情報の生成効率を上げていくことです。同時に生成したスピンを計測するだけでなく演算に用いていくスピントロニクス<sup>\*5</sup>の観点からの技術的プラットフォームの構築も必要です。これらを通じてワイル半金属を用いた超低消費エネルギー情報生成・伝搬・計測・演算システムの創出が期待できます。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・基盤研究（S）「半導体ナノスピントロニクス」（16H06330）、同・挑戦的研究（開拓）「クーパー対純スピン流計測の挑戦」（19H05522）の支援を受けました。ここに謝意を表します。

### <用語解説>

※1 **ワイル半金属**：相対論的な運動をする電子を記述する方程式において、特に質量をゼロとしたとき得られるフェルミ粒子[電子などのスピン1/2を持つ粒子]のことを特にワイル粒子と呼びますが、このワイル粒子が

存在できる物質のうち、半金属（マイナス電荷を持つ電子とプラス電荷を持つ正孔が同数存在する金属）的性質を持つ物質をワイル半金属といいます。1929年にドイツの理論物理学者ヘルマン・ワイルによって提唱された粒子がワイル粒子であり、ワイル物質中においては、異なるカイラリティをもつワイル粒子が対となって現れる点に特徴があります。

※2 **熱ゆらぎ**：自然界の物理量は熱の影響によってその値や方向を変えることが多くあります。スピンの向きも非常に低い温度では不変で安定していますが、室温（27°C）付近の「高温」ではその向きがグラグラ不安定になることがあります。このような不安定さを「熱ゆらぎ」と呼びます。

※3 **トポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究**：D.J. Thouless（ワシントン大学）、F. D. M. Haldane（プリンストン大学）、J. M. Kosterlitz（ブラウン大学）の3教授に「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績による2016年のノーベル物理学賞が贈られました。

※4 **スピン**：スピン角運動量とも言われ、電子の持つ電荷と並んで重要な内部自由度であり、磁石の持つ磁性の源でもあります。スピンはアップとダウンの2値を持つため、情報を担うことが可能です。

※5 **スピントロニクス**：電子の持つスピン角運動量を情報担体として用いようとする研究分野の総称です。1980年代後半の巨大磁気抵抗効果の発見（2007年ノーベル物理学賞）によって創出された分野であり、これまでに磁気ヘッドや磁気メモリなど様々な素子に応用が広がっていると同時に、豊かで新しい基礎物性を内包する研究分野でもあります。

## 研究者のコメント

（白石）ワイル物質は大学院時代からその物理に親しんだ思い出深い物質です。この物質のスピン機能を開拓することに大きな興味を抱いて近年熱心に研究を進めており、今回の成果は私にとって大きな喜びです。ワイル物質のスピン機能開拓が更に加速されることに期待しながら、今後も楽しんで研究を推進していこうと思っています。

（大西）ワイル半金属をはじめとするトポロジカル物質はまだ未知なことも多いため、研究は前途多難でしたが、このような形で成果を発表することができ大変嬉しく思います。今後も更なるトポロジカル物質の物性解明に向けて、研究に邁進していこうと思います。

## 論文タイトルと著者

タイトル：“All-electric spin device operation using the Weyl semimetal,  $WTe_2$ , at room temperature”（ワイル半金属  $WTe_2$  を用いた室温における全電氣的スピン素子動作）

著者：K. Ohnishi<sup>1</sup>, M. Aoki<sup>1</sup>, R. Ohshima<sup>1</sup>, E. Shigematsu<sup>1</sup>, Y. Ando<sup>1,2</sup>, T. Takenobu<sup>3</sup>, M. Shiraishi<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院工学研究科, 2. JST さきがけ, 3. 名古屋大学大学院工学研究科

掲載誌：Advanced Electronic Materials

DOI： <https://doi.org/10.1002/aelm.202200647>