



# バレートロンクス結晶中の電子スピンの直接観測・制御に成功 —新たな原理に基づく電子デバイスの実現に道—

## 1. 発表者:

鈴木 龍二(東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 1年)  
坂野 昌人(東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 2年)  
明石 遼介(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 特別研究員 / ERATO 磯部縮退 $\pi$ 集積プロジェクト 研究員)  
石坂 香子(東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授)  
有田 亮太郎(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 / ERATO 磯部縮退 $\pi$ 集積プロジェクト グループリーダー)  
岩佐 義宏(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・物理工学専攻 教授 / 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)

## 2. 発表のポイント:

- ◆バレートロンクス(注 1)と呼ばれる新原理のエレクトロニクス物質として注目される二硫化モリブデン(注 2)の原子層 1 枚の電子状態の解明に成功。
- ◆二硫化モリブデンの原子層を多層重ねても 1 層の性質を失わない物質を合成することにより、原子層 1 層の性質を世界で初めて観測。
- ◆エネルギー散逸を最小限に抑えた、電力消費が極めて少ない新原理のエレクトロニクスに、足がかりを提供。

## 3. 発表概要:

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・物理工学専攻の岩佐義宏教授(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)率いる研究グループは、同研究科物理工学専攻 石坂香子准教授、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 有田亮太郎チームリーダー、広島大学放射光科学研究センター 奥田太一准教授らと共同で、グラフェン(注 3)に続くシート状の構造を持つ物質として着目されている二硫化モリブデンが、バレートロンクスと呼ばれる新しい低消費電力デバイス用の材料として非常に有力であることを実験的に証明し、新たな原理に基づくエレクトロニクスに向けて大きく貢献しました。

近年、低消費電力エレクトロニクスに向けてさまざまな試みが行われていますが、その中で最も基盤的なものは、電荷の流れ(電流)ではなく、電荷をもたない“何か”の流れを情報担体として用いることにより、熱の発生を最小化するという考え方です。例えば、“何か”をスピンに選び、スピン流を制御する技術の確立を目指す試みはスピントロニクスと呼ばれています。その他にも“バレー”と呼ばれる新たな量子力学的自由度を工学的に応用する試みとして、“バレートロンクス”を提案されています。

今回、研究グループは、二硫化モリブデンと呼ばれる、グラフェンと同じ蜂の巣格子の結晶構造を持つ物質を対象に、スピン・角度分解光電子分光法、発光スペクトルの 2 つの実験を行うととも



に、第一原理に基づいた理論計算(注 4)を組み合わせることによって、二硫化モリブデンが、バレーに依存したスピン分極など、バレートロニクスの基本となる特殊な性質を持っていることを証明しました。本成果をもとに、二硫化モリブデンを用いた新しいバレートロニクスの原理研究が加速され、低消費電力エレクトロニクスへの礎となることが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌『*Nature Nanotechnology*』(7月28日電子版)に掲載されました。

本研究は科学研究費補助金特別推進研究の支援を受けて行われました。

#### 4. 発表内容:

##### ① 背景

現代社会を支えるエレクトロニクスは電子の電荷の有無をスイッチに見立てて、電子機器を制御しています。これに加えて電子の“バレー”と呼ばれる自由度をスイッチに利用してデバイスの省エネルギー化・微細化を達成しようとするバレートロニクスが提案されています。バレーとは、半導体結晶の対称性に起因する電子の振る舞いの違い(流れる道や流れ方)を指すものです。例えば、右手と左手のような鏡写しの構造が結晶内に同時に存在しているときに、右手に対応する電子と左手に対応する電子は別々のものとして区別することができます(図1)。しかも右手と左手に対応する電子状態が互いに入れ替わりやすく、この区別を用いて情報を送受信ができるとされています。このことから、バレーの流れ(バレー流: 右手か左手、一方の電子だけで作られる流れ)を作ることができれば、ジュール熱の損失のない理想的な情報媒体として、画期的な省エネルギー性を持つ量子デバイス実現が期待されます。

最近、バレーを利用できる材料として特に注目されているのが、二硫化モリブデンと呼ばれる物質です。二硫化モリブデンは、2010年のノーベル物理学賞の対象となり、炭素原子一種類でできたハチの巣状の構造を持つ「グラフェン」と同じハチの巣格子の構造をもつ原子層1枚の物質です(図2)。しかし、二硫化モリブデンはグラフェンとは異なり2種類の元素で構成されています。この構造の違いのため、二硫化モリブデンは、バンドギャップ(注 5)を持ち、バレーも有するようになり、グラフェンとは異なるトランジスタなどの機能性が期待されています。

##### ② 研究内容(具体的な手法など詳細)

今回、研究グループは、二硫化モリブデンの原子層1枚の電子状態を初めて明らかにしました。特に、バレーの自由度(右手系の電子か左手系の電子か)に依存して異なるスピンをもつ電子が流れていること、またその電子状態として、1000テスラ(注 6)という超強磁場が加わっているのと類似した特異な状態が外部磁場なしに実現していることを明らかにしました。

二硫化モリブデンの原子層1枚の電子状態を明らかにするには、スピン・角度分解光電子分光(SARPES、図3)という方法が決定的な手段になります。しかし、二硫化モリブデン原子層1枚の面積はせいぜい10ミクロン(マイクロメートル)程度と非常に小さいものです。SARPES法はサイズの大きな試料を必要とするのでそのままでは適用できません。一方、二硫化モリブデンを通常やり方で大きな結晶にすると異なるバレーの電子が区別できなくなってしまうことが知られていました。そこで、研究グループは二硫化モリブデンの原子層1枚がもつ性質をそのまま保った特殊な構造の新結晶を合成するという手法を用いました。新しく合成された結晶について、SARPES実験を、広島大学の放射光施設(HiSOR)、および高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー(東京大学物性研究所共同利用ビームライン)にて行いました。その結果、原子層1枚の二硫化モリブデンで予想される電子状態、すなわちバレーに依存したスピンの分極現象を世界で初め



て直接決定することに成功しました(図4)。スピンは面直に偏極しており、逆向きのスピンのエネルギー分裂は、理論計算と非常に良い一致を示しています。このことから、二硫化モリブデンの原子層 1 枚は、1000 テスラという非常に強い磁場があたかも面直にかかっているのと等価な、非常に不思議な状態になることが明らかになりました。しかも、この磁場の向きは、バレー(電子が右手系か左手系か)に依存しているのです。

### ③ 今後の展望

本研究により、バレートロンクス材料として注目されている原子層 1 枚の二硫化モリブデンのもっとも基本的な電子状態が、定量的に明らかになりました。今後は物質の中に発生している仮想的な超強磁場を利用した、新しいバレートロンクス機能への発展が期待されます。具体的には、スピントロニクス技術と組み合わせたエネルギー散逸のないバレー流の生成などです。これによって、固体中にエネルギー散逸のない電流が実現できることが分かれば、これを用いて、電力消費が極めて少ないエレクトロニクス素子への展望が開けてくると期待されます。

## 5. 発表雑誌:

雑誌名:「Nature Nanotechnology」(平成26年7月28日電子版)

論文タイトル:Valley-dependent spin polarization in bulk MoS<sub>2</sub> with broken inversion symmetry (和訳:反転対称性のない二硫化モリブデン結晶における、バレーに依存したスピン分裂)

著者:R. Suzuki, M. Sakano, Y. J. Zhang, R. Akashi, D. Morikawa, A. Harawasa, K. Yaji, K. Kuroda, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Ishizaka, R. Arita, and Y. Iwasa

## 6. 問い合わせ先:

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

教授 岩佐 義宏(いわさ よしひろ)

電話 03-5841-6828

電子メール iwasa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

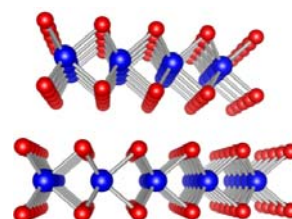
## 7. 用語解説

(注 1) バレートロニクス

半導体には、電子が流れる道や流れ方を決めている複数の自由度を持つものがある。これをバレーとよび、半導体によりバレーの数や個々の特性が異なっている。とくに、異なるバレーが、同じエネルギーを有する場合、どちらのバレーに電子が存在するかによって状態が異なるので、バレーを情報担体とみなすことができるようになる。この原理によって構築されるエレクトロニクスをバレートロニクスと呼ぶ。電荷を伴わないバレー流を制御できれば、エネルギー散逸が極めて少ない電子素子ができると考えられている。二硫化モリブデンはその候補物質のひとつで、バレーは 2 つあり、それぞれ右手と左手のような関係にあることが予言されている。本研究は、その予言を実験的に検証し、バレートロニクスの基礎を築いた研究である。

(注 2) 二硫化モリブデン 図2参照

モリブデンの硫化物で、組成式が  $\text{MoS}_2$  と表される黒色の固体である。従来より、固体潤滑剤としてエンジンオイルの添加物等に用いられている。右図に示したような層状の結晶構造を有しており、グラフェンと同じように、原子層 1 層(単層)を比較的簡単に取り出すことができる。



(注 3) グラフェン

1 原子の厚さの炭素原子のシート。炭素原子とその結合からできた蜂の巣のような六角形格子構造をとっている。名称の由来はグラファイト (Graphite) と「ENE」から。グラファイトは、グラフェンシートが多数積み重なってできている結晶のこと。2004 年、マンチェスター大学の Geim らは、グラファイト結晶をスコッチテープを用いてはがすことによって、単層グラフェンを作製することに成功した。これが、室温で数万  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  の非常に高い移動度を示すとともに、室温で量子ホール効果を示すなど、非常に特異かつ新しい量子物性を示した。そのため、発見者には 2010 年、ノーベル物理学賞が与えられた。現在も、活発な研究がつけられているとともに、グラフェンに続くシート状の構造を持つ物質の開発が活発化している。二硫化モリブデンもその一群の原子層物質の一つである。

(注 4) 第 1 原理に基づいた理論計算

原子レベル、ナノスケールでの物質の基本法則である量子力学に基づいて、原子番号だけを入力パラメータとして、非経験的に物理機構の解明や物性予測を行う計算手法のこと。実験では分からないミクロな情報を補うことで、実験結果の理解に役立つのはもちろん、最近では、まだ合成されていない新物質や、実験困難な極限条件下の物質科学研究のために、欠くことのできない研究手法となりつつある。

(注 5) バンドギャップ

世の中の物質は電子を通す「金属」と、通さない「絶縁体」、人為的に金属にも絶縁体にも変化される「半導体」の 3 種類に分類することができる。どれに分類されるかはそれぞれの物質が持つバンドギャップの大きさによる。バンドギャップの無いグラフェンのような金属や、バンドギャップの大き過ぎるガラスのような絶縁体は電子の流れを制御することができない。バンドギャップの大きさがちょうどよいシリコンのような半導体材料が、トランジスタ等で電子を制御するための材料として工業的に



重宝されている。二硫化モリブデンは半導体に分類され、電子の作るバレー流を制御するための材料として期待されている。

(注 6) テスラ

磁場の単位。1 テスラは、1 ウェーバ毎平方メートル ( $\text{Wb/m}^2$ ) に等しい。地磁気は 50 マイクロテスラ程度、MRI 診断に用いられる磁場は 1 テスラ程度である。1000 テスラは人工的に発生できる磁場の現在の最高値にほぼ等しい。

8. 補足図:

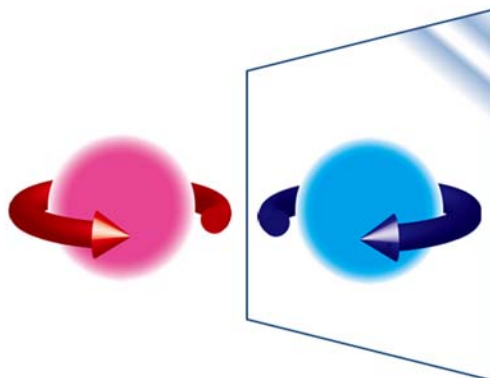


図 1:鏡写しの関係にある電子のイメージ

バレートロニクスのうち、最も応用が注目されているのは鏡写しの関係にある電子を利用して、スイッチを作る手法です。鏡写しの関係にある電子は互いに移り変わりにくく、これに情報を乗せて伝えることができます。

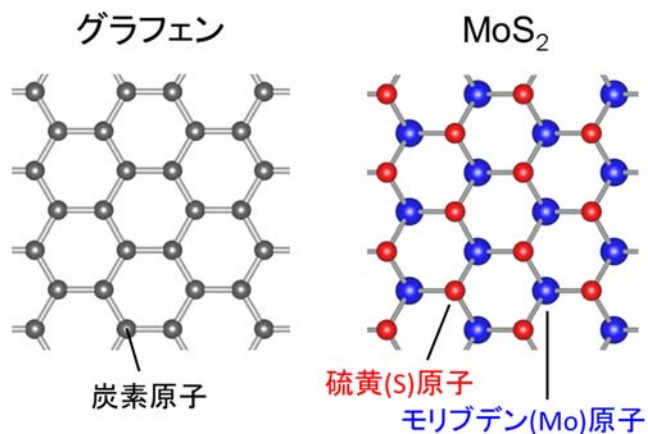


図2:グラフェンと二硫化モリブデンの結晶構造

二硫化モリブデンはグラフェンと同じ蜂の巣格子の結晶構造を持っていますが、硫黄原子(S)とモリブデン原子(Mo)が交互に配置されています。この構造のため、二硫化モリブデン中の電子には、図1の鏡写しの関係が内在されています。



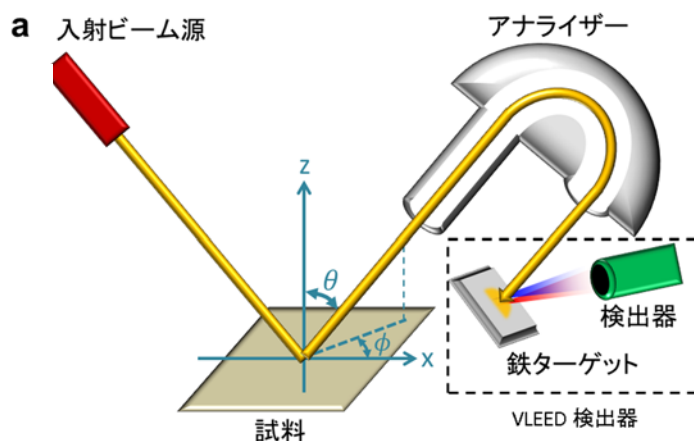


図3: スピン・角度分解光電子分光法 (SARPES)

SARPES 装置の模式図。物質に仕事関数以上のエネルギーを持つ光を照射し、外部光電効果により放出された光電子のエネルギー、放出角度、およびスピン成分を分析する手法です。これにより、物質内部に存在する電子のエネルギー、運動量、およびスピンという全ての情報を直接知ることができます。

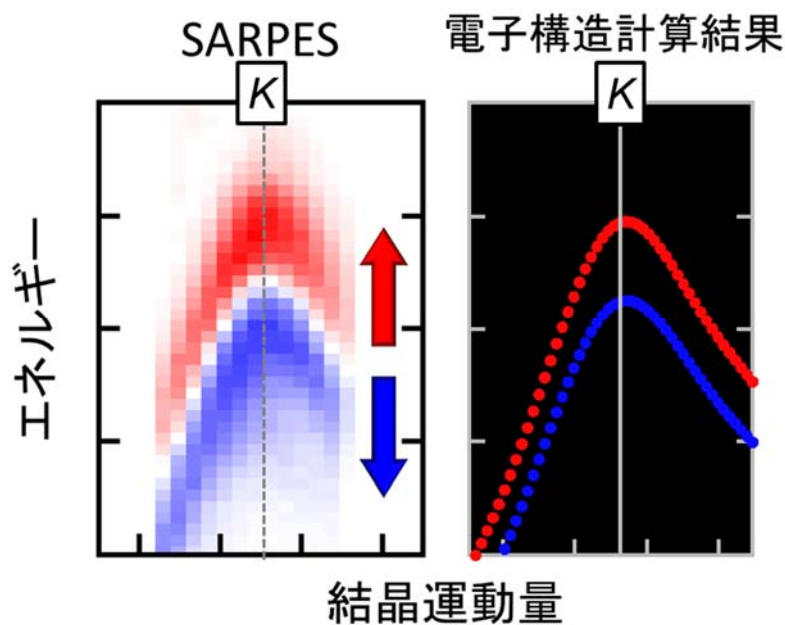


図4: 二硫化モリブデンの電子・磁気構造

左図は SARPES によって実験的に検出された、二硫化モリブデンの電子・磁気構造です。赤い領域が上向きスピン、青い領域が下向きスピンの状態に相当します。スピンのエネルギー分裂幅から、1000 テスラを超える超強磁場がかかっている状態と等価になっていることが分かります。右図は対応する電子の運動量・エネルギーにおける電子構造計算結果です。完全に左図のスピンの分布を再現しています。