



Tokyo Tech

平成27年9月 17 日

報道機関各位

東京工業大学広報センター長

大谷 清

## 結晶でもグラフェン凌ぐ2次元電子機能を実現 —電子のスピンも調整でき次世代デバイス実現に威力—

### 【ポイント】

- 二セレン化タングステンでグラフェンを超える2次元電子機能を容易に実現
- 結晶表面へのルビジウム(Rb)の希薄蒸着で、特異な単原子層電子ガスの生成を発見
- 2次元電子ガスにおけるスピン状態間のエネルギー差を、蒸着量により巨大かつ自在に調整可能なことを実証
- 常識に反した“増量で縮む”という電子状態が関与していることを解明
- スピンや光を利用するトランジスタ応用につながる新技術

### 【概要】

東京工業大学応用セラミックス研究所の笹川崇男准教授、英セント・アンドルーズ大学のフィリップ・キング講師らの国際共同研究チームは、二セレン化タングステン( $\text{WSe}_2$ )の単結晶表面にルビジウム(Rb)を希薄に蒸着することで、電子のもつ磁気的性質(スピン)を巨大に変化できる単原子層の電子ガスが生成することを発見した。これにより、グラフェン(用語1)を超える2次元電子機能を簡便に実現することができる。

電界効果トランジスタ(FET:用語2)の根幹部分(ゲート)で行っている静電ドーピング(用語2)を化学的に模倣して、通常のゲート電圧効果より2桁大きなスピン変化を自在に調整できることを実証した。静電ドーピング効果で誘起される2次元電子ガスは、“水を注ぐと水位が下がる”ことに相当するような「負の圧縮率」と呼ばれる特異な状態をもつことも解明した。本成果は、次世代半導体の基礎学理に重要な知見を与えるとともに、室温で動作するスピントロニクス・デバイスの実現などに向けて大きな弾みとなる。

以上の成果は、英国の科学誌「Nature Nanotechnology (ネイチャー・ナノテクノロジー)」においてオンラインで先行出版(9月21日発行:日本時間9月22日)される。

## ●研究の背景と経緯

グラフェンのノーベル賞(2010年)を契機に、原子レベルの厚さをもつシート状物質や、それらがもつ2次元電子機能の開発が活発に行われている。グラフェンに追いつき追い越せる可能性をもつ物質の筆頭として注目されているのが、遷移金属ジカルコゲナイドと総称される $MX_2$ の組成( $M$  = 遷移金属、 $X$  = カルコゲン)をもつ層状物質である。

遷移金属ジカルコゲナイドの中でも、重たい(大きな原子番号をもつ)元素で構成されている二セレン化タングステン( $WSe_2$ )は、電子の運動と電子の磁石的性質(スピン)とが強く影響しあった状態をもつことから、グラフェンにはないスピンを電圧で制御するというような新機能の実現への期待も大きい。

一方で  $WSe_2$  は、単原子層ではスピン機能を発揮できる電子状態をもつものの、複数層では各層のもつ機能を打ち消すように積層した構造になってしまうことから、バルク単結晶は利用できないと考えられていた。しかしながら、単原子層を簡便に大面積で作製できる方法はこれまでに開発されていない。

## ●研究成果

今回、積層化で失われていた  $WSe_2$  単原子層に固有な電子スピン機能を、単結晶の最表面に復活させ、容易に利用できる方法の開発に成功した。これは「結晶表面にアルカリ金属のルビジウム(Rb)を希薄に蒸着するだけ」という非常に単純な方法である。本手法の効果を模式的に表したのが図1である。

蒸着した Rb は、最表面の  $WSe_2$  単原子層にのみ電子キャリアを供給し、2次元電子ガスを形成する。この際、数原子レベルの限られた距離に電気分極が発生し、単原子層の電子状態には巨大な電界効果が引き起こされることが判明した。通常のゲート電極を用いて外部電圧で誘起させる電界効果の場合と異なって、今回の手法では電荷蓄積層がむき出しになっているという特徴がある。そこで、最先端の分光手法を用いて、Rb 蒸着前後の電子状態変化を直接に観察することにより、以上の「結晶表面単原子層への選択的な化学的静電ドーピング効果」を実験で発見することができた。

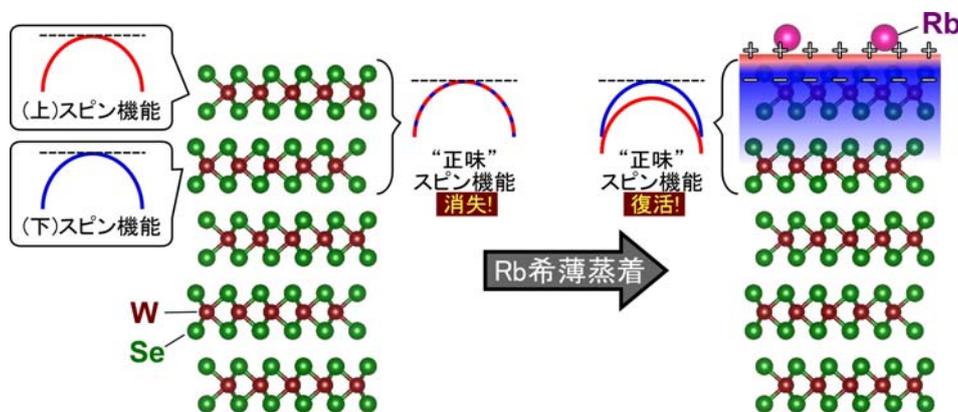


図1. 本研究で開発した手法:  $WSe_2$  単結晶に Rb を希薄蒸着することで、化学的静電ドーピング効果により、結晶最表面にスピン機能をもった2次元電子ガスが作製できる

Rb 蒸着量に比例して電子キャリア量( $N$  [ $\text{cm}^{-2}$ ])は増加し、1.5桁の幅広い範囲で制御できることが分かった。角度分解光電子分光と呼ばれる電子の運動方向とエネルギーの関係を直接観測できる手法を用いて、キャリア量を変化させた際にどのように電子構造が発達するかを観察した結果を図2に示す。キャリア量の増加とともに、電界効果によってスピンの上向きと下向きとでエネルギー差が生じ、 $N \sim 9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の時にはエネルギー差は 180 meV にも及んだ。この値は通常のゲート電圧で引き起こせる効果に比べて2桁も大きい。この巨大変化を Rb 蒸着量で自在に制御できることも相まって、本手法は室温で動作するスピントロニクス・デバイスを実現するための重要な技術になるものと期待される。

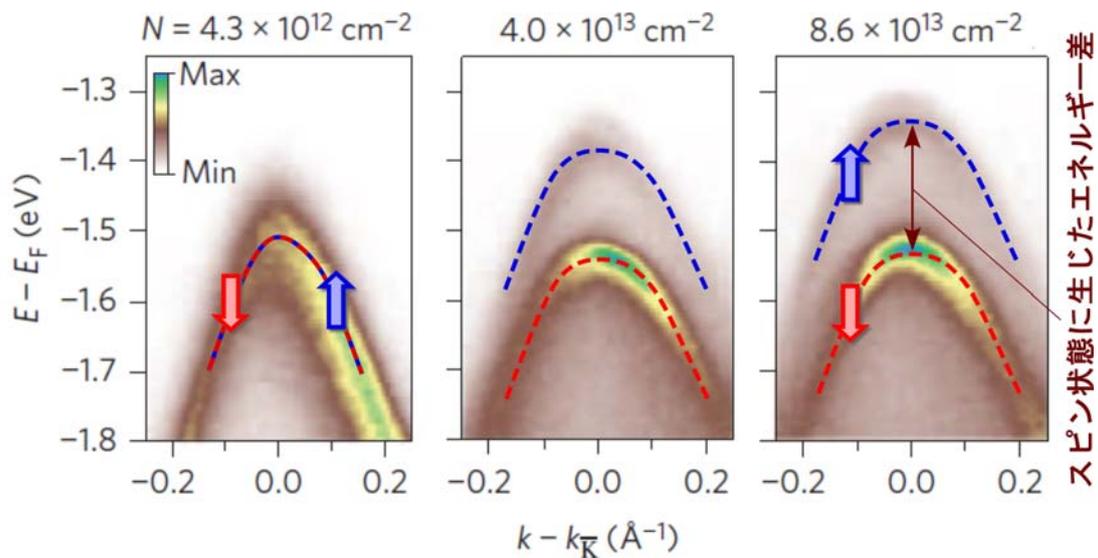


図2. Rb 蒸着量で制御できる電子キャリア量( $N$ )に応じて、異なるスピン方向の電子状態間にエネルギー差が生ずる様子を直接観測した結果

さらに、結果を詳細に解析し理論計算によるシミュレーションと比較検討することによって、 $\text{WSe}_2$  単結晶の最表面に形成される単原子層の電子ガスは、“水を注ぐと水位が下がる”ことに相当するような、直感に反した特異な性質をもつことも発見した。このような「負の圧縮率」と呼ばれる電子状態は、従来の半導体における2次元電子ガスにおいても、非常に低い電子キャリア量の時には観測されていた。これと比べて  $\text{WSe}_2$  の単原子層電子ガスでは、3桁におよぶ驚異的に高い電子キャリア量まで負の電子圧縮率が観測された。

この原因として、 $\text{WSe}_2$  は電子の運動エネルギーを小さくするような電子状態(マルチバレーと呼ばれる電子構造や比較的大きな電子の有効質量)をもち、これによって電子と電子との相互作用が大きくなっていることが関与していると考えられる。単原子層の遷移金属ジカルコゲナイドを用いて電界効果トランジスタを作製する試みが世界中で行われているが、ゲート電圧誘起の電子状態の発達過程は謎だらけである。従って、今回の結果はそれらにも本質的な知見を与えるものとして重要である。

## 【用語説明】

- (1) **グラフェン**: 蜂の巣構造をもつ炭素の単原子層の薄膜。積層したものが黒鉛(グラファイト)。電子が超高速に動き回れるなどの性質をもつことから、次世代の電子材料として期待され、これを対象とした研究が2010年のノーベル賞に輝いた。
- (2) **電界効果トランジスタ(FET)・静電ドーピング**: ソース電極とドレイン電極間の電流をゲート電極の電圧で制御できるトランジスタ。ゲート電圧の静電界によって、ゲート電極の下部にある絶縁体を介した半導体界面に電子キャリアが誘起(ドーピング)されることを利用している。

## ●論文情報

“Negative electronic compressibility and tunable spin splitting in WSe<sub>2</sub> (二セレン化タングステンにおける負の電子圧縮率と調整可能なスピン分裂)”

J. M. Riley, W. Meevasana, L. Bawden, M. Asakawa, T. Takayama, T. Eknapakul, T. K. Kim, M. Hoesch, S.-K. Mo, H. Takagi, T. Sasagawa, M. S. Bahramy, and P. D. C. King, *Nature Nanotechnology*, Published Online (21 Sep. 2015).

DOI: 10.1038/NNANO.2015.217

## 【問い合わせ先】

東京工業大学 応用セラミックス研究所／総合理工学研究科物質科学創造専攻  
准教授 笹川 崇男

〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, R3-37

Email: sasagawa@mssl.titech.ac.jp

TEL & FAX: 045-924-5366

URL: <http://www.mssl.titech.ac.jp/~sasagawa/>

## 【取材申し込み先】

東京工業大学 広報センター

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661