

## 単一超伝導ナノチューブトランジスタの実現

### —省エネルギーナノエレクトロニクスの新展開へ期待—

#### 1. 発表者：

秦 峰（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）

石 武（研究当時：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  
博士研究員／現：Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National  
Laboratory (U.S.A.) 博士研究員）

井手上 敏也（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 助教）

吉田 将郎（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程3年）

A. Zak（Faculty of Sciences, Holon Institute of Technology (Israel), Senior lecturer）

R. Tenne（Department of Materials and Interfaces, Weizmann Institute of Science  
(Israel), Professor）

喜々津 智郁（理化学研究所 創発物性科学研究センター 物質評価支援ユニット テクニカル  
スタッフ）

井ノ上 大嗣（理化学研究所 創発物性科学研究センター 物質評価支援ユニット 技師）

橋爪 大輔（理化学研究所 創発物性科学研究センター 物質評価支援ユニット ユニッ  
トリーダー）

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：

- ◆無機ナノチューブ（注1）の一種である二硫化タングステンナノチューブがトランジスタに動作し、超伝導が発現することを発見。
- ◆単一ナノチューブにおける超伝導として世界で初めての報告であり、特徴的な形状を反映した新規超伝導特性を観測。
- ◆本研究結果が、省エネルギーナノエレクトロニクスの新しい可能性を開拓。

#### 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 チームリーダー兼任）、同研究科附属量子相エレクトロニクス研究センターの井手上敏也 助教、同研究科物理工学専攻の秦峰 大学院生らの研究グループは、イスラエルにある Holon Institute of Technology の A. Zak 上級講師、同国のワイツマン科学研究所（Weizmann Institute of Science）の R. Tenne 教授、理化学研究所物質評価支援ユニットの橋爪大輔ユニットリーダーらの研究グループらと共同で、無機ナノチューブの一種である二硫化タングステン（ $WS_2$ ）ナノチューブに対して電解質ゲート（注2）を用いたキャリア数制御を行うことにより、 $WS_2$  ナノチューブの電気伝導性を制御できること、電子を多量にドーピングした領域で超伝導が発現することを発見した。この結果は単一ナノチューブにおける超伝導の初めての報告であり、さらに

超伝導特性を詳細に測定することにより、螺旋状の巻き方の自由度（注3）を持つ円筒構造という特徴的な形状に由来する新規超伝導輸送特性の観測にも成功した。本研究成果は、対称性が破れた低次元電子系における新奇超伝導という新たな学術分野を切り開く礎となるだけでなく、省エネルギーナノエレクトロニクスに新たな指針を与えることが期待される。

本研究成果は、英国科学雑誌『Nature Communications』（平成29年2月16日）に掲載される。

#### 4. 発表内容：

##### ①背景

ナノチューブは低次元ナノ構造体の一種であり、直径がナノ（10億分の1）メートルスケールの円筒形状の物質である。特に、原子層物質（注4）の一つであり、炭素原子で構成されたグラフェン（注5）が円筒状に丸まった構造体と見なせるカーボンナノチューブは、強度・弾性・導電性に優れ、従来の材料にはない電気輸送・光学特性を有することから、燃料電池や光学機器等、実用化に向けた研究が盛んに行われている。

本研究で対象とするWS<sub>2</sub>ナノチューブは、グラフェンに次ぐ原子層物質として近年大きな注目を集めている、遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる物質群の一つであるWS<sub>2</sub>のナノ構造体の一種である。本材料は金属と絶縁体の中間の電気伝導性を示す半導体であり、固体ゲート絶縁体材料を用いた電気伝導性の制御や力学特性の研究が行われてきたが、超伝導を含めた電気伝導性の大幅な制御は未報告であった。

##### ②研究内容

本研究グループは、図1左の透過型電子顕微写真に示したような多層WS<sub>2</sub>ナノチューブを基板上に分散させ、図1右のような単一ナノチューブのデバイスを作製し、ゲート絶縁体材料として電解質（KClO<sub>4</sub>）を用いることで電気伝導性の制御を試みた。ゲート絶縁体材料である電解質に電圧を印加すると、電解質中のイオンが物質表面や原子層物質の層間に集積して物質中に電荷が蓄積され、大幅なキャリア数の制御が可能となる。その結果、半導体であったWS<sub>2</sub>ナノチューブに電子を蓄積して金属的電気伝導特性にすることに成功し（図2左）、電子を多量に蓄積した領域では、図2右に示したように電気抵抗が5.8ケルビン（マイナス267.4℃）以下でゼロになる超伝導が発現することを発見した。単一ナノチューブにおいて超伝導特性を観測したのは初めてであり、これにより従来研究されてこなかったナノチューブの特徴的な形状（円筒構造、原子層の巻き方の自由度）を反映した超伝導特性の探索が可能である。

本研究では、特に磁場下での電気伝導性の振る舞いを詳細に測定することにより、電気抵抗がチューブ軸と磁場の角度に大きく依存する異方的な振る舞いを示すことや、磁場がチューブ軸に平行な場合に、円筒を貫く磁場に電気抵抗が影響を受けること、さらに電流電圧特性が磁場と電流が平行か反平行かで異なる振る舞いを示すことを明らかにした。これら新しい超伝導特性は単一ナノチューブに特有のものであり、前例のない特異な超伝導状態が実現されていることを示している。

##### ③今後の展望

本研究により単独のナノチューブで実現した超伝導状態は今までにない特異な超伝導特性を有することが明らかになった。本研究成果は、対称性が破れた低次元電子系における新奇超伝導という新たな学術分野を切り開く礎となるだけでなく、省エネルギーナノエレクトロニクスに新たな指針を与えることが期待される。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」（オンライン版：2月16日）

論文タイトル：Superconductivity in a chiral nanotube

著者：F. Qin, W. Shi, T. Ideue\*, M. Yoshida, A. Zak, R. Tenne, T. Kikitsu, D. Inoue, D. Hashizume, Y. Iwasa\*

DOI 番号：10.1038/ncomms14465

## 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  
助教 井手上 敏也（いでうえ としや）

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）

## 7. 用語解説：

注1：ナノチューブ

低次元ナノ構造体の一種であり、直径がナノメートルスケールの円筒状の物質である。炭素原子からなるカーボンナノチューブや無機材料から構成される無機ナノチューブ等さまざまな物質が知られている。特に、原子層物質からなるナノチューブは、原子層1層、あるいは数層を丸めて円筒状にしたものと見なせる。

注2：電解質ゲート

電界効果トランジスタのゲート絶縁体材料として従来の固体材料の代わりに電解質を用いてキャリア数制御を行う方法。ゲート絶縁体材料である電解質に電圧を印加すると、電解質中の陽（陰）イオンが負（正）電極に引き寄せられ、物質表面や原子層物質の層間に集積して、イオンと逆符号の電荷が蓄積される。従来の固体ゲート絶縁膜を用いた手法に比べて、多量のキャリア数制御を行うことが可能である。

注3：巻き方の自由度

原子層物質からなるナノチューブは、原子層をどのように巻いて円筒形状を形成するかの自由度がある。カーボンナノチューブや遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブはこの巻き方の自由度を有する。

注4：原子層物質

原子層で形成されるシート状の物質。炭素原子からなるグラフェン（炭素原子1層）、グラファイト（炭素原子複数層）や遷移金属原子とカルコゲン原子からなる遷移金属ダイカルコゲナイド等が挙げられる。本物質で着目している二硫化タングステンは遷移金属ダイカルコゲナイドの一種である。

注5：グラフェン

炭素の単原子層からなるシート状の構造体。グラファイト（黒鉛）は、複数のグラフェンが層状に積層した物質である。特殊な物理特性や優れた機能性が多数明らかになり、新しいナノ材料として大きく注目されている。2010年にはグラフェンの発見者に対してノーベル物理学賞が与えられた。

8. 添付資料：

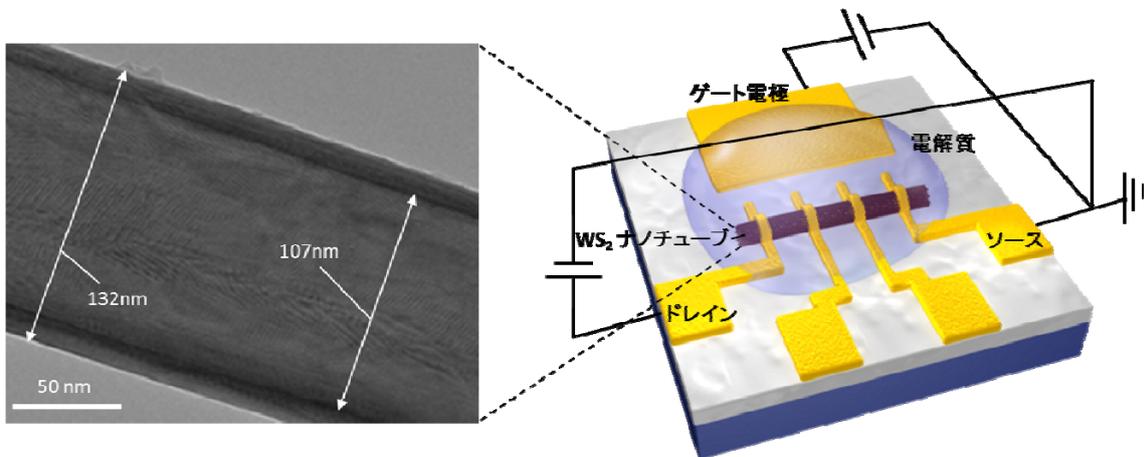


図1. 多層二硫化タングステン( $WS_2$ )ナノチューブの透過型電子顕微写真とデバイスの模式図  
試料は直径 100 ナノメートル程度の多層ナノチューブである。正のゲート電圧を印加することで、 $WS_2$  ナノチューブの表面および層間に正イオンが集積し、試料中に電子が蓄積される。

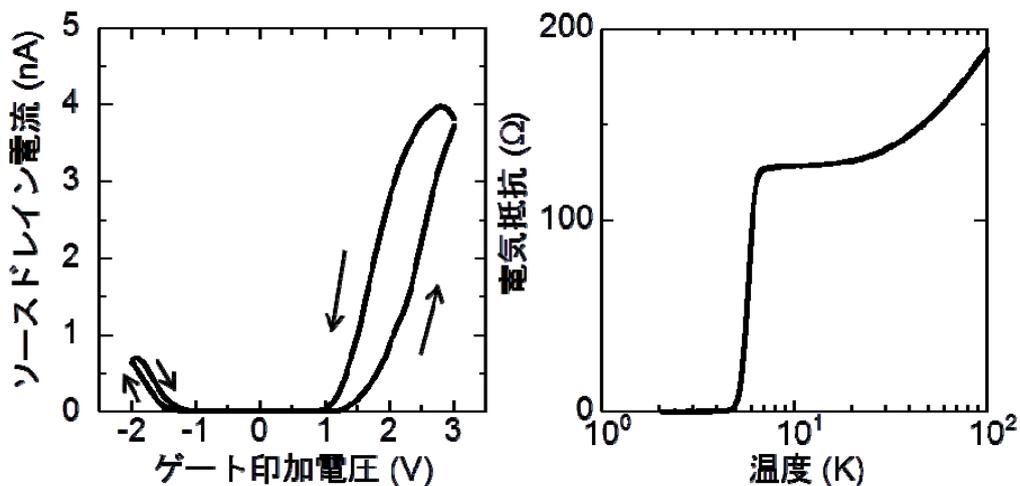


図2.  $WS_2$  ナノチューブのトランジスタ動作と超伝導の発現  
ゲート印加電圧が正負どちらの領域でも金属的挙動が実現でき、電子を多量に蓄積した領域では 5.8 ケルビン（マイナス 267.4℃）以下で電気抵抗がゼロになる超伝導が発現している。