

## 量子ゆらぎが支配する 2 次元超伝導体の新規電子相を発見 —量子計算へ向けた超伝導デバイスの実現へ—

### 1. 発表者：

齋藤 優（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）

野島 勉（東北大学 金属材料研究所 准教授）

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：

- ◆電界効果により半導体単結晶表面で原子層の厚さ程度の高品質 2 次元超伝導体を実現した。
- ◆少ない乱れと大きな量子ゆらぎのコンビネーションにより出現する、多彩な超伝導量子状態を発見し、磁場による量子状態の制御に成功した。
- ◆量子計算のための超伝導素子・集積回路の基盤となる技術と知見になることが期待される。

**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）、同研究科物理工学専攻の齋藤優 大学院生、東北大学金属材料研究所 野島勉 准教授の研究グループは、セラミック半導体の一種でかつ 2 次元物質（注 1）と呼ばれる層状窒化物・塩化窒化ジルコニウム（ $ZrNCl$ ）と二硫化モリブデン（ $MoS_2$ ）の高品質単結晶表面にイオン液体を絶縁層として用いる電気二重層トランジスタ（EDLT）構造（注 2）を作製することにより、 $ZrNCl$  及び  $MoS_2$  表面に厚さ 1~2 ナノメートルで、乱れの極めて少ない 2 次元超伝導を実現しました。さらにこの 2 次元超伝導体に磁場を加えると、低温における ON（超伝導状態）と OFF（絶縁体状態）という 2 つの極低温での量子状態の間に、さらに 2 つの特殊な量子状態が現れることを発見し、それら 4 つの量子状態を連続的に磁場で制御することに成功しました。これらの研究成果は、今後、新たな 2 次元超伝導体の研究分野を開拓する上の重要な礎になるだけでなく、将来的な超高速・量子計算のための超伝導デバイスや超伝導集積回路といった最先端ハードウェアを開発する上で重要な知見になることが期待されます。

本研究成果は、英国オンライン科学雑誌『*Nature Communications*』（平成 30 年 2 月 22 日版）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（JSPS 科研費 JP25000003）、新学術領域研究（JSPS 科研費 JP15H05884）、特別研究員奨励費（JSPS 科研費 JP15J07681）の助成を受けて行われました。

#### 4. 発表内容：

##### 《背景》

電子デバイスの高度集積化が進む現代社会においては、物質のナノエレクトロニクスデバイスとしての側面に注目が集まっています。特に超伝導体の集積化は、超伝導量子ビットなど次世代の量子計算のためのコンピューティングシステムで重要なハードウェアを構成する基盤となる技術です。したがって、こうした超伝導体の集積化において不可欠な超伝導細線や超伝導薄膜の基礎的物性を解明することが広く求められています。しかし、1930年代から続けられてきた超伝導薄膜の研究では、試料作製の際に意図せずして含まれてしまう不純物や欠陥、非晶質性といった乱れのため、理想的な2次元超伝導体が本来示すべき量子状態の創出・解明にまで至っていませんでした。これが、2次元超伝導の学術的な理解や超伝導薄膜をベースとしたデバイス応用の方向性を限定的にしている要因でした。

##### 《研究内容》

本研究グループは、セラミック半導体の一種である層状窒化物・塩化窒化ジルコニウム (ZrNCl) 及び潤滑剤にも使われている二硫化モリブデンの高品質な単結晶をスコッチテープ法により劈開し、厚さ20ナノメートルほどに薄膜化した後、その表面に電界効果トランジスタの一種であるEDLT構造(図1)という絶縁層にイオン液体を用いる特殊なデバイスを作製しました。このEDLT構造では、強電界によって電子が単結晶表面に蓄積しているため、蒸着等の従来の方法によって作製される超伝導薄膜に比べ、乱れの影響が極限まで少なくかつ厚さ1~2ナノメートルの超極薄の理想的な2次元電子系を人工的に実現可能です。本研究では、このトランジスタ構造で2次元超伝導体、すなわち電場で制御可能な超伝導トランジスタを作製しました。さらに面に対して垂直方向に磁場をかけた場合の磁気抵抗の温度依存性を測定することで、ON(超伝導状態)からOFF(絶縁体状態)の間に、量子金属状態(注3)と量子Griffiths状態(注4)という2つの特殊な量子状態を発見しました。これらの新規量子状態は2次元性と量子ゆらぎ、そして試料中に僅かに残る乱れの組み合わせ効果により初めて実現するもので、従来型の乱れの多い超伝導薄膜では観測されなかったものです。研究グループはこれらの特殊な量子状態を磁場によって精密に制御することにも成功し、包括的な磁場-温度相図を構築しました。

##### 《今後の展望》

本研究により、乱れが極めて少ない原子層厚さの2次元超伝導体は、従来型の乱れの多い超伝導薄膜では見られなかった新規量子状態を示すことが明らかになりました。今後、これらの研究成果は、新たな高結晶性2次元超伝導体の研究分野を開拓する礎になるだけでなく、将来的な超高速・量子計算のための超伝導素子や超伝導集積回路といった量子効果を利用した最先端ハードウェアを開発する上で重要な知見になると考えられます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」 （オンライン版 2月 22日掲載）

論文タイトル：「Quantum phase transitions in highly crystalline two-dimensional superconductors」

著者：Yu Saito, Tsutomu Nojima and Yoshihiro Iwasa

DOI 番号：10.1038/s41467-018-03275-z

## 6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

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)

東北大学金属材料研究所

准教授 野島 勉 (のじま つとむ)

<報道担当>

東京大学大学院工学系研究科 広報室

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

## 7. 用語解説：

(注1) 2次元物質

2010年のノーベル物理学賞で有名となったグラフェンをはじめとする、原子層1層あるいは数層で形成されるシート状の結晶。これらの物質の多くはテープに貼り付けて剥がす過程を繰り返すこと（スコッチテープ法と呼ばれる手法）で最終的にナノメートルスケールの原子層厚さにまで高い結晶性を保ったまま劈開可能なため、通常の固体の電子系には見られない新規物性の創出だけでなくナノデバイスへの応用という観点からも期待されている。

(注2) 電気二重層トランジスタ (EDLT)

日常生活に至る所に使われている電化製品の中核を担う電界効果トランジスタ (FET) の絶縁層をイオン液体と呼ばれる特殊な塩（えん）で構成される液体に置き換えたトランジスタ（図1参照）。液体状の塩あるいは塩を溶かした液体の中に2つの固体電極を入れ、電極間に電圧を印加した際に液体と固体の界面に形成される電気二重層 (electric-double-layer; EDL) と呼ばれる帯電層を電荷蓄積の原理としている。EDLTでは通常のFETに比べ10-100倍以上のキャリア密度を固体表面に誘起できるため、ゲート電圧による電流スイッチングだけでなく、固体表面の電子状態そのものを、乱れを入れることなく変化させることができる。電界誘起超伝導はEDLTによってはじめて実現した現象である。

(注3) 量子金属状態

電子は粒子としての性質だけではなく波動的性質を持っており、通常の超伝導では、電子の位相が試料全体にわたって揃うことで電気抵抗ゼロが実現される。量子金属状態とは、超伝導電子全体の位相が、量子揺らぎと呼ばれる擾乱（じょうらん）によって揃うことができず、その結果、ゼロ抵抗ではなく有限の電気抵抗を有する状態のことを言う。1~2ナノメートルしか

厚みのない2次元超伝導では、その低次元性に起因した大きな量子揺らぎ効果により、位相の乱れが避けられない。この状態はボース金属、あるいは磁場中では、量子磁束液体とも呼ばれる。

(注4) 量子 Griffiths 状態

超伝導電子の位相だけでなく、振幅（超流動密度）が空間的にゆらぎ、長時間にわたって安定する不均一な状態。極低温、高磁場領域で現れる。大きな量子ゆらぎと試料中に僅かにのこる乱れの組み合わせ効果により、発現する。これを磁性体中の効果として理論的に提案した Griffiths 氏の名前にちなんで、量子 Griffiths 状態と呼ばれる。最近では、本研究も含めた高結晶2次元超伝導体においても発見され始めている。

8. 添付資料：

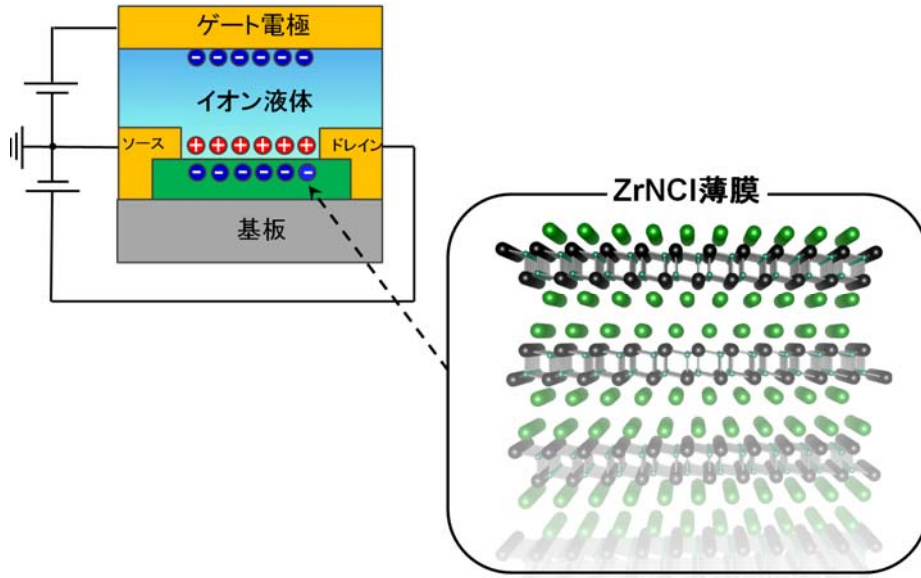


図1：塩化窒化ジルコニウム ZrNCl を用いた電気二重層トランジスタ構造

ZrNCl 薄膜をトランジスタのチャンネルに用いた電気二重層トランジスタ (EDLT) のデバイス構造の概念図。今回の実験で用いた ZrNCl 薄膜の厚さは約 20 nm。正の電圧を印加することで ZrNCl の表面にのみ電子が蓄積する。

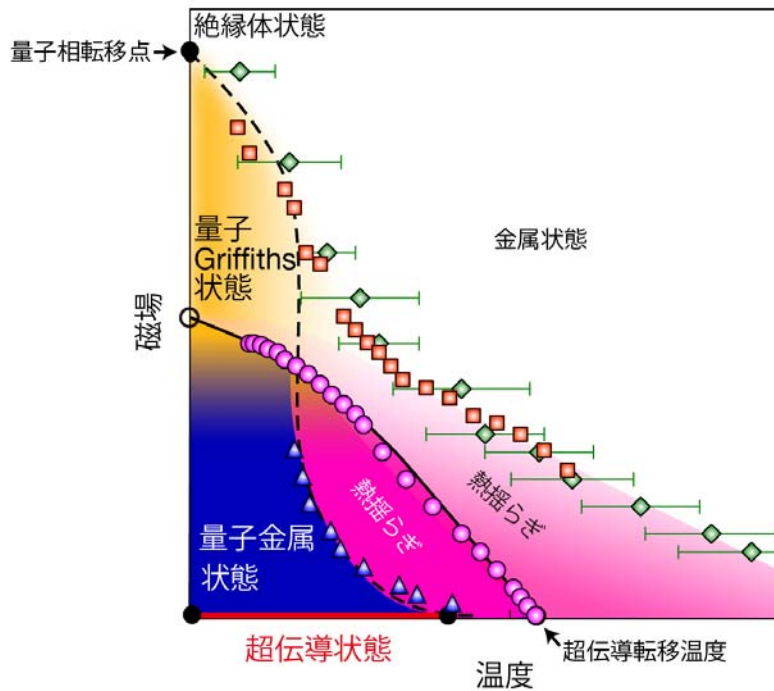


図2：ZrNCl-EDLT における温度-磁場相図

電気抵抗ゼロの超伝導状態は微弱な磁場下しか実現していない（赤線）。極低温の領域では、ゼロ磁場から磁場を徐々に増やしていくと超伝導状態（赤線）→量子金属状態（低温・低磁場領域；青の領域）→量子 Griffiths 状態（低温・高磁場領域；オレンジの領域）→絶縁体状態と変化していく。高温側では熱揺らぎによる状態（高温・低磁場領域；ピンクの領域）になっている。