

# 原子層レベルの厚さの超伝導体における量子状態を解明

## —乱れのない 2 次元超伝導体の本質理解とナノエレクトロニクス開発の礎—

### 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 1 年）  
笠原 裕一（京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 准教授）  
叶 劍挺（Groningen 大学 Zernike 先端物質科学研究所 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）  
野島 勉（東北大学 金属材料研究所 准教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆電界効果によって半導体表面で原子層の厚さ程度の“究極の 2 次元超伝導体”を実現。
- ◆乱れが極めて少ない 2 次元超伝導体に普遍的と考えられる、“磁場下における金属状態”を観測し、これが量子ゆらぎによって起こることを解明。
- ◆超伝導体を用いた“次世代のナノエレクトロニクス材料開発への礎”となることが期待。

### 3. 発表概要：

超伝導体はリニアモーターカーや核磁気共鳴（NMR）などに用いられる先端的な材料として、世界中で応用研究が盛んに行われていますが、特に近年のナノエレクトロニクスの発展に伴い、ナノ材料としての超伝導体の側面を持つ超伝導薄膜や超伝導細線の研究が注目を集めています。このうち超伝導薄膜の研究は、1970 年代から続いています。その対象物質はビスマス薄膜などの非晶質、または不純物や欠陥などの乱れを多く含む金属蒸着膜であったため、乱れのない理想的な 2 次元超伝導体が本来持つ性質は未だに明らかになっていませんでした。

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 大学院生らの研究グループは、京都大学大学院 笠原裕一 准教授、オランダのフローニンゲン（Groningen）大学 叶劍挺 准教授、東北大学 金属材料研究所 野島勉 准教授らと共同で、セラミック半導体の一種でかつ原子膜材料<sup>(注1)</sup>である層状窒化物・塩化窒化ジルコニウム（ZrNCl）高品質単結晶をスコッチテープで劈開する方法を用いて不純物の極めて少ない薄膜を作製し、さら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<sup>(注2)</sup>を形成することにより、ZrNCl 表面に原子層レベルの厚みを持ち、乱れの極めて少ない究極の 2 次元超伝導が発現することを見出しました。さらに磁場下における超伝導の性質を詳細に調べた結果、乱れが極めて少ない超高品質の 2 次元超伝導体は、磁場下において極低温であっても量子ゆらぎによってその超伝導状態（電気抵抗ゼロの状態）を維持できないことが明らかになりました。これらの研究成果は、今後、2 次元超伝導体の本質的な性質を解明していく上での礎となるだけでなく、次世代のナノエレクトロニクス材料の研究・開発をしていく上で重要な知見を与えるものと期待されます。

本研究成果は、米国科学雑誌『*Science*』のオンライン速報版（*ScienceXpress* 平成 27 年 10 月 1 日版）に掲載されました。

#### 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コンピューティングシステムで非常に重要な役割を担うはずですが、こうした超伝導体の集積化において重要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、このうち 1970 年代から続けられてきた超伝導薄膜の研究は、薄膜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（乱れが極めて少ない）超伝導薄膜が本来持つ性質は明らかになっていませんでした。とりわけ「理想的な 2 次元超伝導体は磁場中で本当に超伝導性を維持できるのか。」という疑問は物性物理学において長年の問題でした。本研究では高品質単結晶表面に電界効果によって超伝導を誘起するという手法を用いて、この問題に挑戦しました。

##### 《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) 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) を作製しました。ゲート電圧印加による電気抵抗の温度依存性の変化の様子を図 2A に示します。ゲート電圧なしでは ZrNCl は、温度の低下とともに抵抗値が増加する絶縁体的な振る舞いを示しているのに対し、ゲート電圧の印加後はその上昇に伴って、電子が ZrNCl の表面に蓄積されるため、抵抗値が減少して金属的になり、さらには低温で超伝導体へと変化することを確認しました (図 2A)。この EDLT 構造では、電界によって電子が ZrNCl の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い超極薄の超伝導状態が人工的に実現可能です。本研究では、臨界磁場 (超伝導状態と常伝導状態の境界の磁場) の温度依存性を磁場下での詳細な温度-抵抗特性より測定し、ZrNCl 表面に蓄積される電子の集団が、およそ原子層 2 層分に相当する 2 ナノメートル程度の厚みしかない究極の 2 次元超伝導体になることを実証しました (図 2B)。さらに、その磁場下における抵抗の振る舞い (図 3A) を解析し、精密な磁束相図 (磁場-温度相図) を作成することに成功しました (図 3B)。この磁束相図より、本研究手法で作製できる 2 次元超伝導体では、磁場下において超伝導状態は維持されず、代わりに量子ゆらぎによる磁束のトンネル運動によって記述される金属的状态が出現することが分かりました。これは、乱れの少ない 2 次元超伝導に普遍的な現象であると考えられます。

##### 《今後の展望》

本研究により、乱れが極めて少ない原子層程度の厚さを持つ 2 次元超伝導体は、磁場下においてその状態を維持できないという普遍的な性質が明らかになりました。この結果は、先に述べた問いに対して「乱れない理想的な 2 次元超伝導体では磁場下において超伝導は実現しない」という 1 つの答えを提示しています。今後、この研究成果は、2 次元超伝導体の本質的な性質を解明していく上で礎となるだけでなく、次世代のナノエレクトロニクスの材料の研究・開発していく上で重要な知見になることが期待されます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science」 (ScienceXpress (Science オンライン速報版) 平成 27 年 10 月 1 日版)  
論文タイトル：「Metallic ground state in an ion-gated two-dimensional superconductor」  
著者：Yu Saito, Yuichi Kasahara, Jianting Ye, Yoshihiro Iwasa\* and Tsutomu Nojima\*  
DOI 番号：10.1126/science.1259440

## 6. 用語解説：

### 注1 原子膜材料

2010 年のノーベル物理学賞で有名となったグラフェンなどの 2 次元物質として注目されている、原子層 1 層あるいは数層で形成される材料。これらの物質の多くはスコッチテープ法で劈開し、ナノメートルスケールの厚さの薄膜を容易に作製できるため、ナノデバイスへの応用の期待が高まっている。

### 注2 電気二重層トランジスタ (EDLT)

日常生活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時に液体と固体の界面にできる帯電層は電気二重層 (electric-double-layer; EDL) と呼ぶ。この電気二重層では、塩を構成している陽イオン (正の電荷を持つ) と陰イオン (負の電荷を持つ) はそれぞれ負と正の電圧が印加されている電極に引き寄せられ、最終的に電極界面に整列し、同時に電極内では、イオンとは反対の符号を持つ電荷が界面に引き寄せられている。

9. 添付資料：

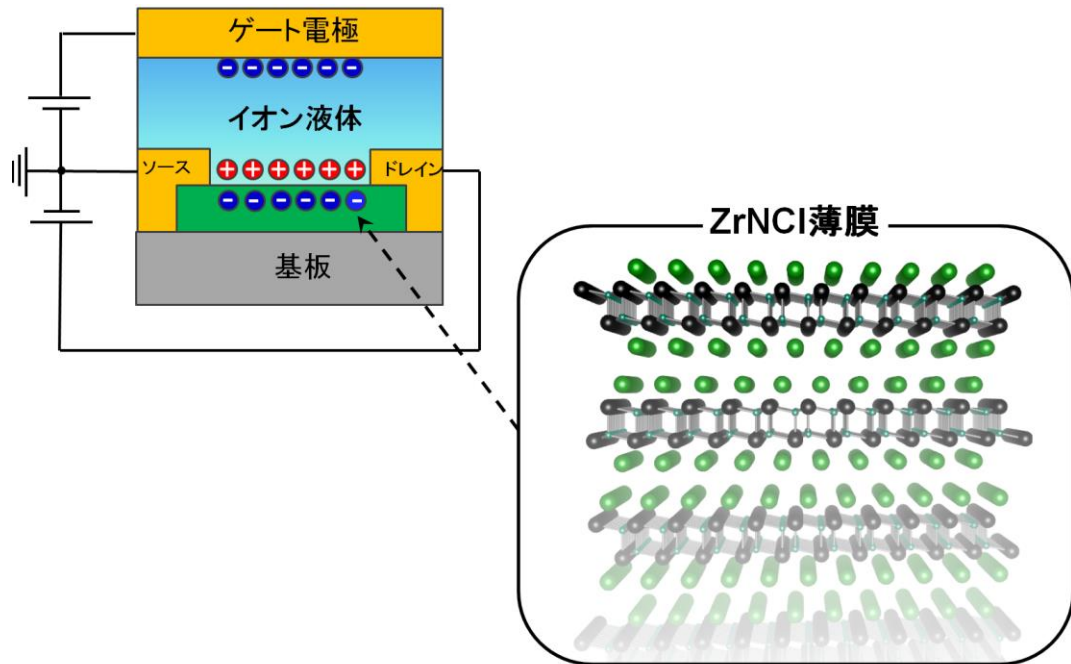


図1:塩化窒化ジルコニウム ZrNCl を用いた電気二重層トランジスタ構造

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。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。

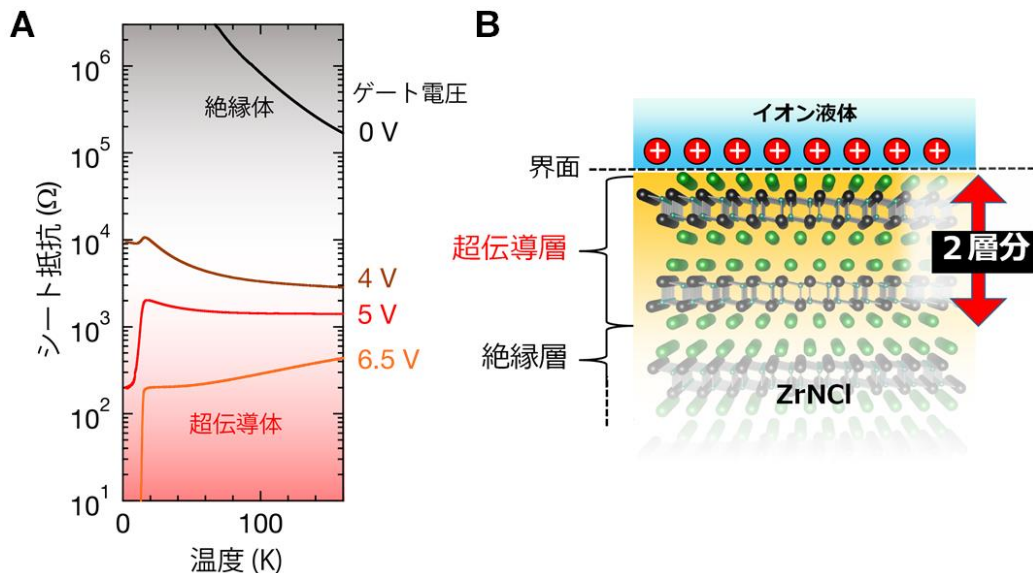
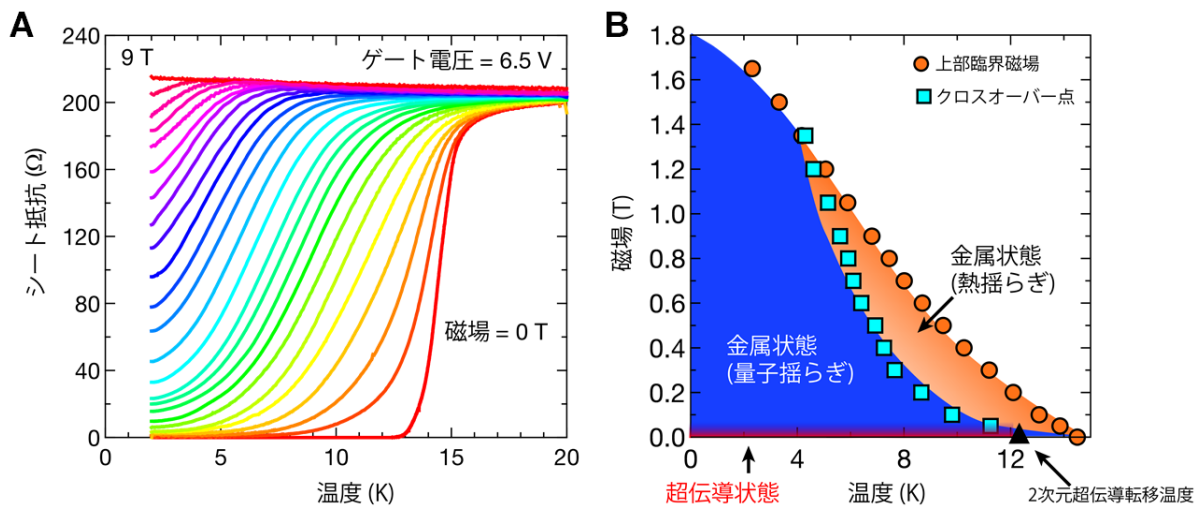


図2:電界効果による ZrNCl の絶縁体-超伝導転移(A)と超伝導層の厚さ(B)

ゲート電圧を印加していない状態では試料本来の絶縁体的な温度依存性 (黒線) を示すが、ゲート電圧を大きくするに従って抵抗値が減少 (茶線) し、さらに低温では超伝導転移が観測された (赤・オレンジ線)。超伝導転移温度は約 15 K ほどであった。また、解析の結果、超伝導状態になっているのは表面から約 2 nm、つまり ZrNCl の約 2 層分であることが分かった。



**図3: ZrNCI-EDLT における面直磁場下における抵抗-温度特性(A)との磁束相図(B)**

図 3A は、様々な面直磁場下における ZrNCI-EDLT の抵抗温度特性である。0.05T という微弱な磁場を印加するだけで超伝導状態が壊れている（赤線の左のオレンジ線のデータ）。電気抵抗の詳細な解析を行い、この様子をまとめたものが図 3B の温度-磁場相図（磁束相図）である。超伝導転移温度以下であるにも関わらず、磁場下においては磁束の運動によってほとんどすべての領域で金属状態が実現している。オレンジの領域は熱ゆらぎ由来の金属領域で青の領域は量子ゆらぎ由来の金属領域である。