



東北大学



平成27年5月27日

報道機関各位

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)  
東北大学 大学院理学研究科

## 原子層高温超伝導体を開発 -究極の超伝導ナノデバイス実現へ道-

### <概要>

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)の高橋隆教授、および同大学院理学研究科の中山耕輔助教らの研究グループは、鉄(Fe)とセレン(Se)からなる原子層超薄膜において高温超伝導を発現・制御することに成功しました。今回の研究は、原子数個からなる原子層超薄膜において60 K(-213°C)を越える高温超伝導を発現させ、その超伝導転移温度を精度良く制御する方法を確立したものです。この成果は、様々な新しい量子効果が期待される2次元電子系における超伝導発現機構の解明を進めるのみならず、応用の立場からは、原子レベルのサイズを持ち超高速・省エネルギーで動作する究極の超伝導ナノデバイスの実現に大きく道を拓くものです。

本研究成果は、平成27年6月1日(英国時間)に、英国科学誌 Nature Materials(ネイチャー マテリアルズ)のオンライン速報版で公開されます。

### 【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(AIMR) 教授 高橋 隆 TEL: 022-795-6417

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 助教 中山耕輔 TEL: 022-795-6477

(報道担当)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(AIMR) 広報・アウトリーチオフィス TEL: 022-217-6146

## <背景>

現代のエレクトロニクスを支える半導体デバイスは微細加工による高速化や高集積化が限界に達しつつあり、電子機器の高性能化を加速するためには新しい原理に基づくデバイスの開発が必要とされています。この次世代デバイスの候補となるのが、超伝導デバイスです。超伝導体の持つ量子効果を利用することで、半導体デバイスを遥かに凌駕する高速演算や省エネルギー動作が可能になることから、超伝導デバイスは夢のデバイスと言えます。しかし、物質が超伝導になる温度 ( $T_c$ ) は、一般には絶対零度 (0 K, <sup>注1)</sup> - 273 °C) に近い極低温であり、液体ヘリウムを用いた大掛かりな冷却装置が必要になることが実用化の障害となっています。また、高集積化の実現も実用化に向けた重要な課題です。これらの問題を解決するためには、高い  $T_c$  を持つ材料の開発と、その超伝導体を薄膜化および微細化する技術の確立が不可欠です。

本研究では、鉄系超伝導体<sup>注2)</sup>と呼ばれる鉄 (Fe) とセレン (Se) からなる物質 (化学式 FeSe) に着目しました。バルクの FeSe は 8 K (- 265 °C) で超伝導となることが知られていましたが、“高温超伝導”と呼ぶにはまだまだ低い温度です。しかし、それを非常に薄い原子レベルの薄膜にすると  $T_c$  が高くなる可能性が報告されており、その実験の検証と、さらにその超伝導転移温度の制御方法の確立が急務とされていました。

## <研究の内容>

本研究グループは、分子線エピタキシー法<sup>注3)</sup>という、原子を1個ずつ積み上げて非常に薄い原子層薄膜を作成する技術を用いて、厚さを1層(原子3個分の厚さ)から20層(60個分)まで原子レベルで制御した FeSe の高品質薄膜(図1)を作成しました。この原子層超薄膜に対して、角度分解光電子分光法<sup>注4)</sup>(図2)という方法を用いてその電子状態を精密に測定した結果、1層の FeSe において、超伝導の証拠となる超伝導ギャップ<sup>注5)</sup>が開いていることを突き止めました(図3)。また、超伝導ギャップの温度依存性から  $T_c$  が 60 K 付近にあり、バルク FeSe の 8 K を遥かに超えて非常に高いことを観測しました。さらに、2層以上の多層膜では、作成後そのままの状態では超伝導が起きないものの、薄膜表面にカリウムを吸着させて電子量を調節することで、50 K 付近の高温超伝導を発現させることにも成功しました。また、原子層膜の枚数と  $T_c$  に強い関係があることも見出しました。このように、1~数原子層の FeSe 原子層超薄膜において高温超伝導を発現させ、それを制御することに成功しました。

## <今後の展開>

バルク結晶を1~数原子層まで薄くすることで、その超伝導転移温度を1桁近く上昇させたことは、今後の基礎および応用研究に非常に大きなインパクトを与えます。今回達成した  $T_c = 50\text{--}60$  K は、30年近く前に発見され、大きな“超伝導フィーバー”を巻き起こした銅酸化物高温超伝導体(最高  $T_c \sim 135$  K)には及ばないものの、その後発見された“高温超伝導体”、例えば、フラーレン ( $C_{60}$ ) 超伝導体 ( $T_c \sim 33$  K) や 2 ホウ化マグネシウム ( $MgB_2$ ,

$T_c$  (39 K) を遙かに超えて、液体窒素温度 77 K に接近しています。今後、原子層数、電子ドーピング量、薄膜成長基板を調整・制御することで、さらに  $T_c$  を上昇させ、液体窒素温度を越える  $T_c$  を達成しようという研究が急速に進むと考えられます。また一方で、現時点で達成した  $T_c$  (50–60 K) においても、液体ヘリウムを必要としない気体ヘリウム循環型の冷却装置で超伝導を実現できることから、その基礎および応用研究の幅が大きく広がるものと期待されます。

今回 1~数原子層の超薄膜で高温超伝導の発現に成功したことは、2次元超伝導の理想的な研究舞台を提供するのみならず、原子レベルで構成される究極の超伝導ナノデバイスの実現に大きく道を拓くものです。原子レベルまで薄くすることで究極の微小化・高集積化も可能になり、超高速・省エネルギーで動作する超伝導ナノデバイスへの応用研究が飛躍的に発展すると期待されます。今回開発した原子層高温超伝導体は、原子レベルの厚さのため、非常にわずかな電子量の調節で常伝導と超伝導状態を切り替えることができると考えられます。原子層薄膜超伝導体をデバイスに組み込み、電場で電子量の注入を制御して超伝導と常伝導状態を瞬時に切り替える高機能超伝導ナノデバイスへの応用も期待されます。

---

本成果は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(S)「超高分解能スピン分解光電子分光による新機能物質の基盤電子状態解析」(研究代表:高橋 隆)、および若手研究(B)「角度分解光電子分光による鉄系超伝導体の超伝導ギャップ対称性と擬ギャップ相図の解明」(研究代表:中山耕輔)などの助成を受けたものです。

### <論文情報>

“High-temperature superconductivity in potassium-coated multilayer FeSe thin films”

(カリウムで覆われた鉄セレン多層膜における高温超伝導)

Y. Miyata, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato and T. Takahashi

Nature Materials, to be published on-line on June 1.

## <用語解説>

### 注1) K (ケルビン)

温度を表す単位です。通常使われる単位である°C(摂氏)とは、次の式で関係付けられません。

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$$

### 注2) 鉄系超伝導体

鉄を含む二次元伝導面を持つ超伝導体の総称です。2008年に東京工業大学の細野秀雄教授の研究グループによって発見されました。この鉄系超伝導体は、新しい高温超伝導体の宝庫として大きな期待を集めています。

### 注3) 分子線エピタキシー法

超高真空中において薄膜の原料を加熱して原子ビームを作成し、その原子を1個ずつ基板に積み重ねて薄膜を成長させる手法です。原子単位で薄膜を形成していくため、高品質な薄膜を作成できます。

### 注4) 角度分解光電子分光

結晶の表面に紫外線を照射して、外部光電効果により結晶外に放出される電子のエネルギーと運動量を同時に測定することで、物質中での電子の状態を観測する実験手法です。最近その分解能が急速に向上し、超伝導状態の電子も観測できるようになりました。

### 注5) 超伝導ギャップ

超伝導を担う電子対(クーパー対)を形成するのに必要なエネルギー。角度分解光電子分光によって直接観測することができる。

<参考図>

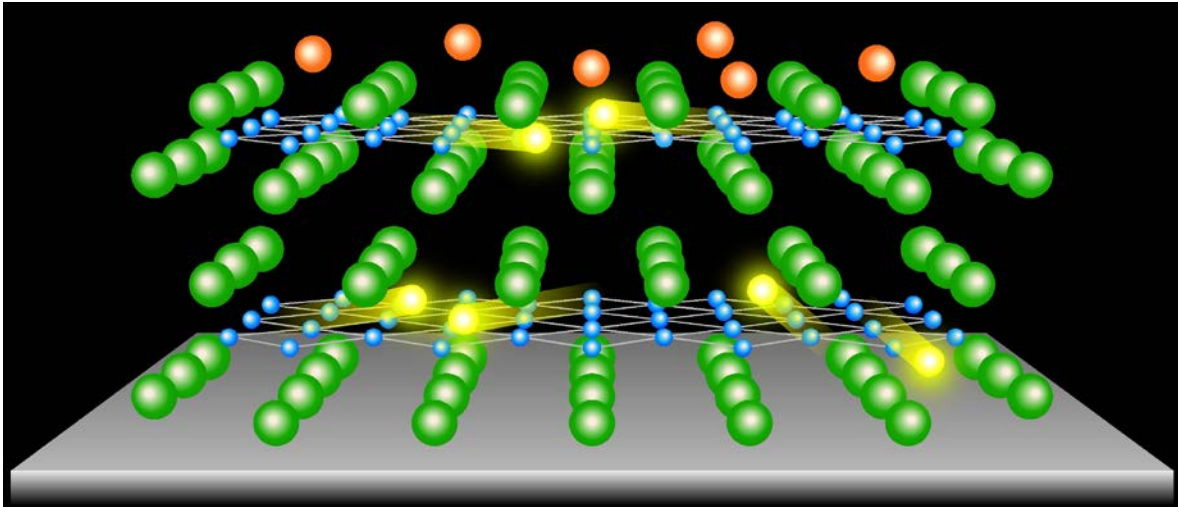


図1 鉄セレン原子層薄膜の構造

青と緑の丸はそれぞれ鉄とセレン原子を表す。カリウム原子(オレンジの丸)を表面に吸着させて薄膜中の電子の量を調節することで、超伝導転移温度を制御できる。黄色の丸は、カリウムから供給された電子が超伝導電子〔クーパ対〕となって、薄膜中を抵抗ゼロで動き回る様子を示す。

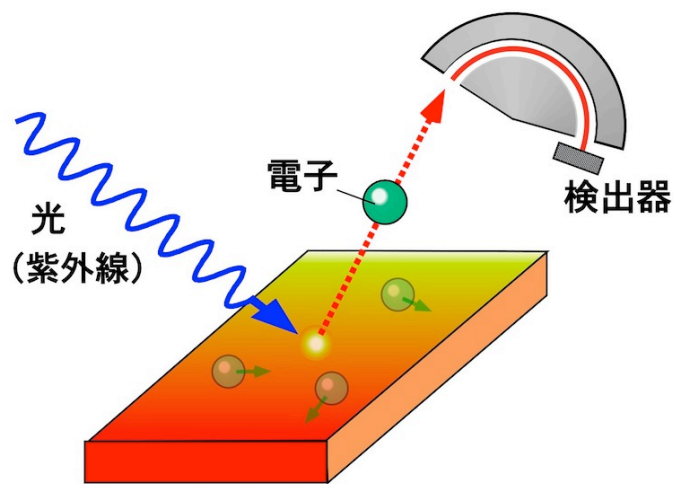


図2 角度分解光電子分光の概念図

物質に紫外線を照射し、外部光電効果で物質外に放出された電子のエネルギーと角度を測定することで、物質の電子構造を決定できる。

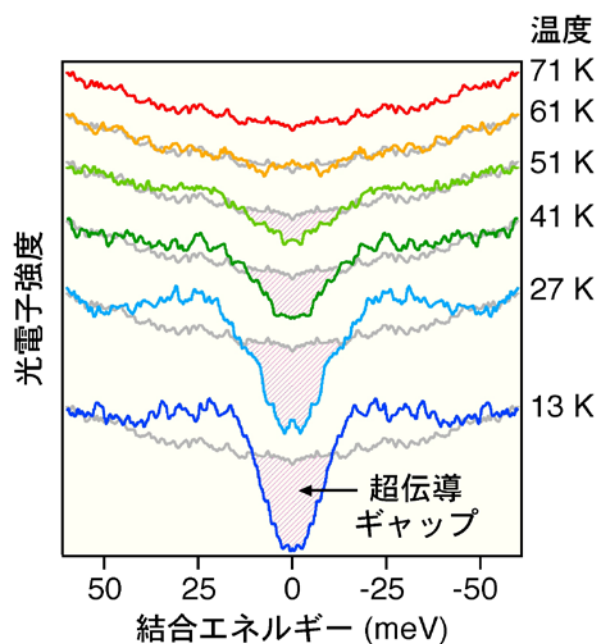


図3 角度分解光電子分光で観測した FeSe 原子層薄膜の超伝導ギャップ  
 低温 (13 K) で、結合エネルギーゼロの部分に薄膜が超伝導状態にあることを示す超伝導ギャップが現れている。温度を上げると、超伝導ギャップは 60 K 付近で消えていることが分かる。

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

高橋 隆

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 教授

Tel : 022-795-6417, E-mail : t.takahashi@arpes.phys.tohoku.ac.jp

中山 耕輔

東北大学 大学院理学研究科物理学専攻 助教

Tel : 022-795-6477, E-mail : k.nakayama@arpes.phys.tohoku.ac.jp

<報道担当>

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 広報・アウトリーチオフィス

Tel : 022-217-6146, E-mail : outreach@wpi-aimr.tohoku.ac.jp