東北大学 TOHOKU UNIVERSITY
Saitama University 埼玉大学
KEK 高エネルギー加速器研究機構

Press Release

2026 年 11 月 13 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学
国立大学法人埼玉大学
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

# 結晶をわずかに伸ばすと絶縁体が金属に！
## ― 半世紀にわたる謎に迫る原子層の“重なり”の役割 ―

【発表のポイント】

- 半世紀近く絶縁化の仕組みが議論されてきた層状物質 1T-$TaS_2$（図 1a）を一方向に伸ばし、絶縁体から金属へ可逆的に切り替えられることを示しました。
- 放射光を用いた微小領域の電子状態観測により、層の重なり方の変化が金属化の鍵であることを示しました。
- 層の重なりと量子状態をひずみで制御する可能性を示し、未知の量子状態の探索や新しい材料設計の指針を与える成果です。

【概要】

鉛筆の芯に使われる黒鉛（グラファイト）は、原子の薄いシートが積み重なった層状物質の一つです。同じ層状物質である 1T-$TaS_2$は、低温で絶縁体になることが知られていましたが、半世紀近くその仕組みが議論されてきた興味深い物質です。近年、その謎を解く鍵として、原子層同士の重なり方が注目されています。

東北大学、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、埼玉大学の共同研究グループは、1T-$TaS_2$の結晶を一方向にわずかに伸ばす一軸ひずみを加えることで、絶縁体から金属へ可逆的に切り替えることに成功しました。 放射光を微小スポットに絞り、ひずみが加わった領域の電子状態を直接観測できるマイクロ角度分解光電子分光（マイクロ ARPES）(注 1) が、今回の発見を可能にしました。実験結果と理論計算を比較した結果、$TaS_2$ 層に形成されたダビデの星（Star of David）構造（図 1b）の特徴を保ちながら、層の重なり方が変化すること（図 1c,d）が金属化の鍵となっていることが示唆されました。さらに、新たに現れた金属状態では、電子の動きにくさを表す有効質量 (注 2) が理論計算で予測される値の約 2 倍となり、電子同士が互いの動きに強く影響する強い電子相関 (注 3) を示す新たな金属状態であることも分かりました。

これらの結果は、層の重なりと電子相関が協働して物質の性質を決めることを示すとともに、結晶をわずかに伸ばすことで新しい量子状態を引き出すという、新たな材料設計の可能性を示すものです。

本成果は、2026 年 11 月 13 日 19 時（日本時間）、科学誌 Nature Communications に掲載されます。

【詳細な説明】

**研究の背景**

電子機器のさらなる高性能化、省電力化に向けて、外部からの小さな刺激によって物質の電気的性質を大きく切り替える技術が求められています。その候補の一つとして注目されているのが、原子レベルで薄いシートが積み重なった層状物質です。層状物質では、各層の中の原子配列だけでなく、隣り合う層の位置関係、すなわち重なり方によって、電子の動きや物質の性質が大きく変わります。近年では、例えば、炭素原子のシートであるグラフェンを 2 枚、特定の角度でねじって重ねると、超伝導などの特異な量子状態が現れることが発見され、大きな注目を集めています。このため、層の重なりを外部から自在に制御して新しい電子状態を作り出すことが、量子材料研究の重要な課題となっています。

1T-$TaS_2$ は、この層の重なりと電気的性質の関係を調べる格好の物質です。1T-$TaS_2$ の各層では、低温になると 13 個のタンタル（Ta）原子が集まってダビデの星と呼ばれる構造を作り（図 1b）、それが周期的に並びます。興味深いことに、この構造を 1 枚の層だけで考えると金属になるはずですが、実際の結晶は電気を流さない絶縁体になります。なぜ絶縁体になるのかは、半世紀近く議論されてきた問題です。従来は、電子同士が強く反発することで動けなくなるモット絶縁体（注 4）として説明されてきました。一方、近年では、隣り合う層の星型構造が特定の位置関係で重なると、上下の層の電子が強く結び付く層間二量体化（注 5）（図 1c）が起こり、強い電子相関を主な原因としなくても絶縁状態を説明できることが提案されています。つまり 1T-$TaS_2$ では、電子同士の相互作用だけでなく、原子層の重なり方も絶縁化の仕組みを理解する重要な鍵となっている可能性があります。

これまで、1T-$TaS_2$ の電子状態は温度や圧力などを変えることで精力的に研究されてきました。しかし、原子層の重なり方を意図的に変化させ、それに伴う電子状態の変化を直接調べることは容易ではありませんでした。そこで研究グループは、結晶を一方向に伸ばす一軸ひずみに着目しました。わずかな変形によって層の重なり方を変えることができれば、絶縁体から新たな電子状態を引き出し、長年議論されてきた絶縁化の仕組みに迫れるのではないかと考えました。

**今回の取り組み**

今回、東北大学大学院理学研究科の鈴木 崇人 大学院生、中山 耕輔 助教、同大学材料科学高等研究所（WPI-AIMR）の佐藤 宇史 教授（主任研究者、同研究所量子マテリアル国際研究センター（$Q^2$）センター長）らの研究グループは、KEK 物質構造科学研究所の小澤 健一 教授、東北大学大学院理学研究科の若林

裕助 教授、東北大学金属材料研究所の野島 勉 教授、埼玉大学学術院 理工学研究科の上野 啓司 教授らのグループと共同で、1T-$TaS_2$ において低温の絶縁状態から金属への変化をひずみによって実現しました。

研究グループは、結晶を一方向に伸ばす小型のひずみ装置を開発し（図 2a,b,c）、KEK 物質構造科学研究所 放射光実験施設（フォトンファクトリー）のマイクロ ARPES 装置と組み合わせました。結晶に加わるひずみは場所によって異なるため、その影響を調べるには、ひずみが加わった微小な領域を選んで電子状態を観測する必要があります。今回、放射光を微小スポットに絞れるマイクロ ARPES を用いることで、約 1%のひずみが生じると見積もられる領域の電子状態を低温で精密に観測しました。その結果、ひずみを加える前の 1T-$TaS_2$ では、絶縁体の証拠であるエネルギーギャップが観測される（図 2d）のに対し、一軸ひずみを加えるとギャップが閉じて金属になることを明らかにしました（図 2e）。さらに、ひずみを解放すると元の絶縁状態に戻りました。これにより、結晶を伸ばすと金属になり、元に戻すと再び絶縁体になるという、可逆的な変化を電子構造から捉えることに成功しました。興味深いことに、金属化した後も、ダビデの星に由来する特徴的な電子構造は残っていました。また、1T-$TaS_2$ を高温にしたときに現れる金属相の電子構造とは異なっていることも分かりました。これらの結果は、ダビデの星構造に由来する特徴を保ちながら、従来知られていた金属相とは異なる新たな金属状態が現れたことを示しています。

そこで、研究グループは金属化の起源として、ダビデの星構造の重なり方に着目しました。先行研究で報告された第一原理計算との比較から、ひずみを加えていない状態の実験結果は、隣接する層が二量体を形成する重なり（図 1c）で説明される一方、ひずみ下の実験結果は、二量体化が弱まった重なり（図 1d）を仮定した計算でよく説明できることが分かりました。この結果は、ひずみによって隣り合う原子層の重なり方が変化し、層間の電子の結び付きが弱まることが、絶縁体から金属への変化を引き起こす有力なメカニズムであることを示しています。

さらに、金属状態の電子は、理論計算で予想されるよりも動きにくくなっていることも分かりました。電子バンドのエネルギー幅を理論計算と比較すると、実験では約半分に縮んでおり、電子の有効質量が計算値の約 2 倍に増大していると評価されました。これは、電子が互いに強く影響し合っていることを示す強い電子相関の特徴です。つまり、今回現れた金属状態は、単に電気が流れるようになっただけでなく、電子同士の相互作用が重要な役割を果たす「強相関金属」と考えられます。ひずみによって層間二量体化が弱まり、絶縁状態を生み出していたエネルギーギャップが閉じた結果、電子相関の効果が金属状態で顕在化した

と考えられます。この結果は、1T-$TaS_2$の電子状態を理解する上で、層の重なりに由来する絶縁化の仕組みと、強い電子相関の両方を考慮することが重要であることを示しており、長年議論されてきた絶縁化のメカニズムに新たな知見を与えるものです。

**今後の展開**

本研究は、結晶にひずみを加えて原子層の重なりを変えることで、電子状態そのものを可逆的に切り替えられることを示しました。その仕組みには、原子層の重なり方の変化が重要な役割を果たすと考えられます。これは、化学組成を変えたり大きな圧力を加えたりすることなく、機械的な微小変形によって量子状態を制御する新しい材料設計の考え方です。今後、ひずみの大きさや方向をより精密に制御することで、原子層の重なり方と電子同士の相互作用がどのように関係するのかをさらに明らかにし、新しい量子状態を人工的に引き出す研究につながることが期待されます。

今回実現した強相関金属は、長年モット絶縁体の候補として研究されてきた1T-$TaS_2$に現れたという点でも興味深く、絶縁化の仕組みを理解する新たな手掛かりとなります。さらに、電子相関の強い物質では超伝導などの多彩な量子現象が現れることも知られており、こうした未知の量子状態を探索する新たな舞台となる可能性があります。

応用面では、伸ばすと金属、戻すと絶縁体という可逆的な切り替えを利用し、将来的にはスイッチ、センサー、メモリなど、機械的なひずみで電子機能を制御するストレイントロニクス（注6）への展開が期待されます。

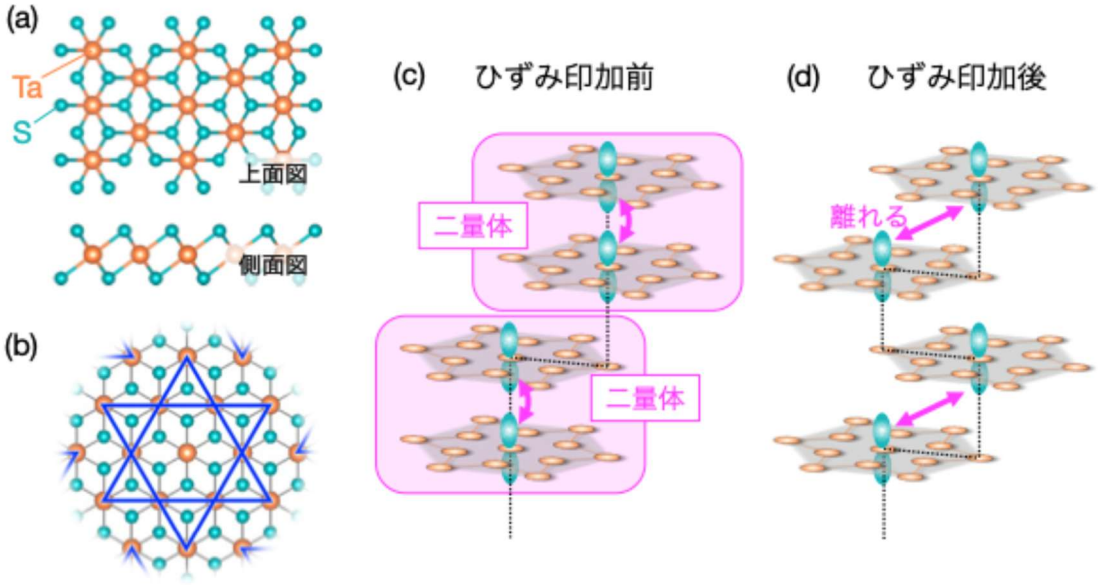



図 1. 原子層の重なり方による絶縁体・金属状態の変化の模式図

(a) 1T-$TaS_2$ の結晶構造の模式図。$TaS_2$ の原子層が積み重なった層状構造を持つ。

(b) 1T-$TaS_2$ の低温で現れるダビデの星の模式図。13 個の Ta 原子のうち、周囲の 12 個が中心の Ta 原子に向かって変位し、星型の構造を形成する。

(c) ひずみを加える前の絶縁状態を説明するモデル図。隣接する層のダビデの星の中心が上下に揃うことで、層をまたいで電子が強く結び付き、層間二量体が形成され、絶縁状態になると考えられる。

(d) ひずみを加えた後の金属状態を説明するモデル図。隣接する層のダビデの星が横方向にずれることで電子の結びつき（層間二量体化）が弱まり、金属状態が現れると考えられる。

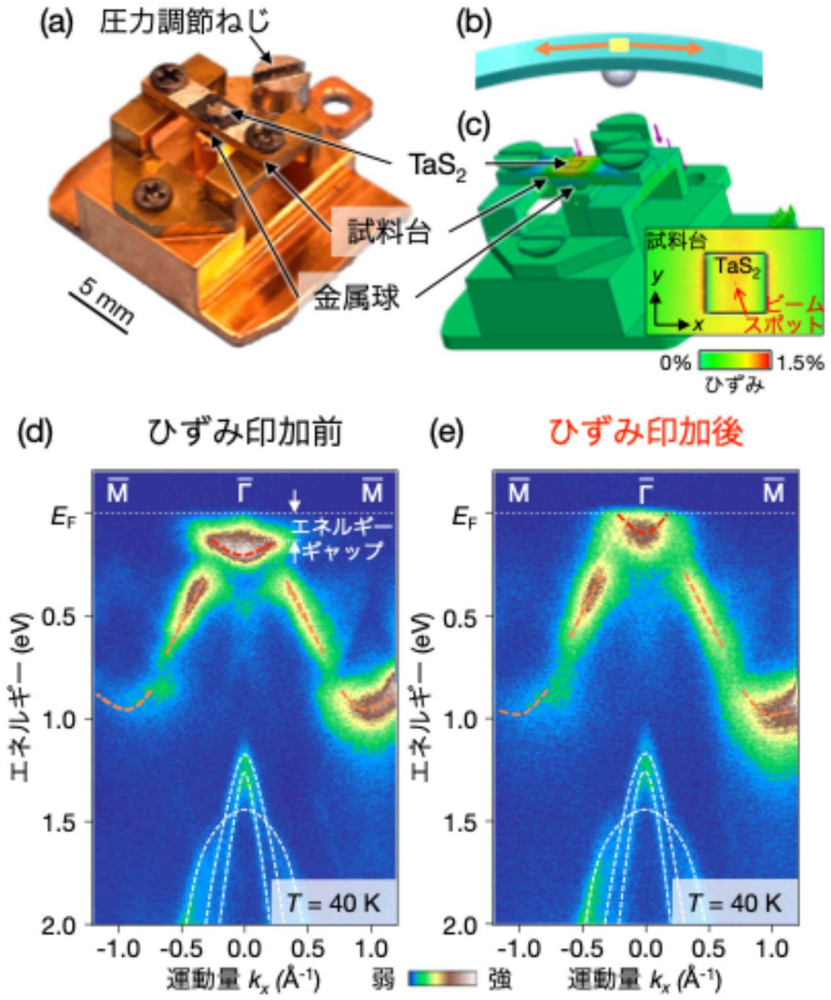



図 2. 一軸ひずみ印加装置と、結晶を伸ばすことで絶縁体から金属へ変化する様子を捉えた電子構造。

(a) 本研究で開発した一軸ひずみ印加装置。ネジを回して金属板を曲げることで（図 2b）、試料を一方向に伸ばし、ひずみの大きさを調整できる。

(b) 金属板が球に押しつけられ、曲がる様子を示した模式図。

(c) 計算によって得られたひずみ分布。試料中央付近に約 1%の引張ひずみが生じると見積もられる。

(d) ひずみを加える前の 1T-$TaS_2$ の電子構造。エネルギーギャップ（図中の矢印）が開いており、絶縁状態であることが分かる。

(e) 一軸ひずみを加えた状態の 1T-$TaS_2$ の電子構造。ひずみによってエネルギーギャップが閉じ、電子が金属的な状態へ変化したことが直接確認できる。

【謝辞】
本成果は、日本学術振興会（JSPS）科研費（JP21H04435、JP23K25812、JP26H02006）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR18T1）、先端国際共同研究推進事業 ASPIRE（JPMJAP2512）、東北大学材料科学国際共同大学院プログラムなどの支援を受けて得られました。放射光を用いた ARPES 実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の放射光共同利用実験課題（課題番号：2024S2-001、2021S2-001）として実施しました。また、本論文のオープンアクセス出版にあたっては、「東北大学 2026 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業」の支援を受けました。

【用語説明】

注1. マイクロ角度分解光電子分光（マイクロ ARPES）：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。本研究では、放射光を十マイクロメートル程度まで絞ることで、ひずみの大きさが場所によって異なる試料の中から、目的の微小領域を選んで電子状態を調べることが可能になった。

注2. 有効質量：結晶中を動く電子の動きにくさを質量に置き換えて表した量。電子同士の相互作用などによって電子の動きが妨げられると、有効質量は大きくなる。ただし、電子そのものの重さは変化しない。本研究では、ひずみによって現れた金属状態の有効質量が、第一原理計算から期待される値の約 2 倍になると評価された。

注3. 電子相関：物質中の電子は互いに電気的な力を及ぼし合うため、一つ一つが完全に独立して動くわけではない。このように電子同士が互いの運動に影響する効果を電子相関と呼ぶ。電子相関が特に強く、金属でありながら電子が独立な粒子とは大きく異なる振る舞いをする状態を強相関金属と呼ぶ。

注4. モット絶縁体：電子同士の強い相互作用を考慮しない通常のバンド理論では金属になるはずの電子状態を持ちながら、電子同士の強い反発によって電子が自由に動けなくなり、絶縁体となった状態。1T-$TaS_2$ は長年、代表的なモット絶縁体の候補として研究されてきた。

注5. 層間二量体化：隣り合う二つの原子層の電子状態が強く結び付き、一組の二量体を形成すること。1T-$TaS_2$ では、隣接する層のダビデの星が特定の位置関係で重なると層間二量体化が起こり、エネルギーギャップが形成されて絶縁体になると考えられている。

注6.　ストレイントロニクス：物質に加えるひずみ（strain）を利用して、電気的性質などを制御する技術や研究分野。電場や磁場ではなく、物質を伸ばす、縮める、曲げるといった機械的変形を電子機能の制御に利用する。

【論文情報】

タイトル：Strain-induced correlated metallic phase in 1T-$TaS_2$

著者：Shuto Suzuki, Kosuke Nakayama*, Koki Yanagizawa, Katsuaki Sugawara, Seigo Souma, Kenichi Ozawa, Shunichi Takano, Ryoga Takahara, Takeshi Hara, Yusuke Wakabayashi, Takashi Takahashi, Tsutomu Nojima, Keiji Ueno, Takafumi Sato*

*責任著者：

東北大学大学院理学研究科　助教　中山 耕輔（なかやま こうすけ）

東北大学材料科学高等研究所　教授　佐藤 宇史（さとう たかふみ）

掲載誌：Nature Communications

DOI：10.1038/s41467-026-78883-1

URL：https://www.nature.com/articles/s41467-026-78883-1