

2026 年 7 月 16 日

東京大学

東京理科大学

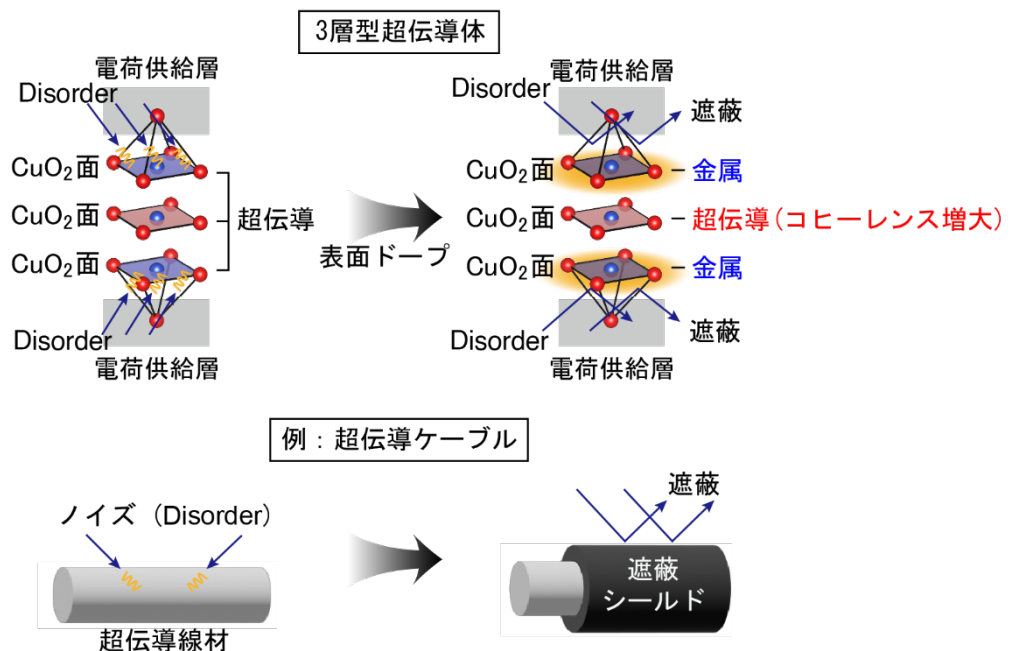
上智大学

原子層レベルの金属シールドで高温超伝導から「ノイズ」を シャットアウト

— 理想的な高温超伝導層を実現 —

発表のポイント

- ◆ 3 層型銅酸化物高温超伝導体において、外側の CuO_2 面だけを高伝導な金属状態にすることで、電荷供給層から伝わる乱れを遮断し、理想的な CuO_2 超伝導面を実現しました。
- ◆ 超伝導ケーブルにおける金属シールドの設計思想を結晶内部の原子層レベルへ応用した「金属シールド（遮蔽効果）」によって、超伝導コヒーレンスを飛躍的に向上させました。
- ◆ 理論研究で仮定されてきた理想的な超伝導層を実験的に実現することで、乱れの影響を受けた実験と理論との隔たりを埋め、両者を同一の舞台で比較できる道を拓きました。



本研究では、3 層型銅酸化物高温超伝導体において、外層を金属シールド、内層を超伝導とする原子層ごとの役割分担を実現し、超伝導を乱れ（ノイズ）から保護することで、超伝導性能を飛躍的に向上させた。

発表概要

東京大学物性研究所の鄭 峻赫（ジョン・ジュンヒョク）大学院生（同大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程）、近藤猛准教授の研究グループは、東京理科大学先進工学部電子システム工学科の常盤和靖教授、上智大学理工学部機能創造理工学科の酒井志朗准教授、東京理科

大学先進工学部物理工学科の遠山貴巳教授らの協力のもと、3 層型銅酸化物高温超伝導体（注 1）の電子状態を角度分解光電子分光（ARPES）（注 2）により詳細に観測し、外側の CuO_2 面（注 3）だけを高伝導な金属状態へ制御することで、結晶内部に原子層レベルの「金属シールド」を構築し、乱れから保護された理想的な CuO_2 超伝導面を初めて実現しました。

銅酸化物高温超伝導体では、電荷供給層（注 4）から CuO_2 面へキャリア（電荷）が供給されることで超伝導が発現します。しかし同時に、電荷供給層に存在する原子レベルの乱れ（ディスオーダー）（注 5）が、超伝導にとっての「ノイズ」として CuO_2 面へ伝わり、本来の超伝導電子状態を乱してしまいます。これまで主に研究されてきた 1 層型および 2 層型銅酸化物では、すべての CuO_2 面が電荷供給層と直に接しているため、この乱れの影響を避けることができませんでした。一方、3 層型銅酸化物では、中央の CuO_2 面が外側の CuO_2 面に挟まれているが、内側・外側のすべての CuO_2 面が超伝導状態にあるため、層間で超伝導電子が混ざり合い、理想的な CuO_2 超伝導面を実現することはできませんでした。

本研究では、外側の CuO_2 面だけを高伝導な金属状態へ変化させ、外層を金属シールド、内層を超伝導とする原子層ごとの役割分担を実現しました。金属化した外層は電荷供給層から伝わる乱れを原子層レベルで遮断し、内側の CuO_2 超伝導面に理想的な電子環境を実現しました。その結果、超伝導コヒーレンス（注 6）を飛躍的に向上させました。

本成果は、超伝導ケーブルで金属シールドが外部ノイズから超伝導を守る設計思想を結晶内部の原子層レベルへ応用した初めての成果です。これにより、高温超伝導研究に新しい材料設計指針を示すとともに、乱れの影響を受ける実験と理想系を仮定する理論との間に長年存在していた隔たりを埋め、実験と理論を同一の舞台で直接比較できる新たな研究基盤を築きました。本成果は、高温超伝導発現機構の解明を大きく前進させるとともに、より高性能な超伝導材料や新しい量子材料の設計へ道を拓くことが期待されます。

本成果は、*Nature Communications* 誌（現地時間 7 月 14 日）に掲載されました。

発表内容

〈研究の背景〉

銅酸化物高温超伝導体は、1986 年の発見以来、液体窒素温度を超える高い超伝導転移温度を示すことから、その発現機構の解明は物性物理学における最も重要な研究課題の一つとなっています。しかし、その発現機構は現在も完全には解明されていません。

その大きな理由の一つが、「ディスオーダー（原子レベルの乱れ）」の存在です。銅酸化物では、超伝導を実現するために電荷供給層からキャリアを導入します。一方で、その電荷供給層は電子状態へランダムな乱れも与えます。その結果、電子状態が乱され、超伝導本来の電子状態を直接観測することが難しくなります。一方、多くの理論研究では、このような乱れを含まない理想的な CuO_2 面を仮定して超伝導機構を議論しているため、理論と実験を直接比較することが容易ではありません。

本研究グループは、この問題を解決する新しい方法として、「金属シールド」という身近な技術に着目しました。送電ケーブルや高速通信ケーブルでは、金属シールドによって外部からの電磁ノイズを遮断し、電流や信号を安定に伝えています。もし、この考え方を結晶内部の原子層レベルへ応用できれば、電荷供給層から超伝導層へ伝わるディスオーダーも遮断でき、理想的な超伝導面を実現できるのではないかと着想しました。

〈研究の内容〉

本研究では、このアイデアを実現するため、単位胞内に3枚のCuO₂面を持つ3層型銅酸化物高温超伝導体に着目しました(図1)。この物質では、中央の内側CuO₂面が両側の外側CuO₂面に挟まれているため、外側CuO₂面を遮蔽層として利用できる可能性があります。しかし通常は、内側・外側のすべてのCuO₂面が超伝導状態にあるため、超伝導電子が層の間を行き来することで、電荷供給層からの乱れも内側のCuO₂面へ伝わり、理想的なCuO₂超伝導面を実現することはできませんでした。

そこで本研究では、試料表面から外側のCuO₂面へ集中的にキャリアを注入することで、外側のCuO₂面だけを高伝導な金属状態へと変化させました(図2)。これにより、もともと超伝導状態同士で結び付いていた内側・外側のCuO₂面間の混成をほぼ断ち切り、外層を金属シールド、内層を超伝導とする原子層ごとの役割分担を実現しました。角度分解光電子分光により電子状態を詳細に調べた結果、金属化した外側CuO₂面が電荷供給層から伝わるディスオーダーをほぼ完全に遮断し、原子層レベルの金属シールドとして機能していることが分かりました。これは、送電ケーブルや高速通信ケーブルで利用されている金属シールドと同じ設計思想が、結晶内部の原子1層という極めて小さなスケールで実現したことを意味します。その結果、中央の内側CuO₂超伝導面では、乱れの影響をほとんど受けない理想的な電子環境が実現しました。

実際に、図3に示すように、中央のCuO₂超伝導面から観測される超伝導スペクトル(注7)は、明瞭な超伝導ギャップ(注8)を保ったまま従来の銅酸化物高温超伝導体と比べて著しくシャープになりました。これは、超伝導電子が互いに足並みを揃えて運動する性質(コヒーレンス)が飛躍的に向上したことを示しています。すなわち、理論研究で長年仮定されてきた「乱れない理想的なCuO₂超伝導面」が実験的に初めて実現されたことを意味します。

本研究は、送電ケーブルや高速通信ケーブルなどで広く利用されている金属シールドという工学的な設計思想を、結晶内部の原子層レベルへ応用した初めての成果です。これにより、高温超伝導研究に新しい材料設計指針を示すとともに、理論研究で長年仮定されてきた理想的なCuO₂超伝導面を実験的に実現し、これまでディスオーダーによって隔てられていた実験と理論を同一の舞台で直接比較できる新たな研究基盤を築きました。本成果は、高温超伝導発現機構の解明を大きく前進させるだけでなく、より高性能な超伝導材料や新しい量子材料を設計するための新しい指針となることが期待されます。

〈今後の展望〉

本研究によって、これまで高温超伝導研究の大きな障害となっていたディスオーダー(原子レベルの乱れ)の影響を原子層レベルで取り除き、理論研究で長年仮定されてきた理想的なCuO₂超伝導面を初めて実験的に実現しました。これにより、これまでディスオーダーによって隠されていた高温超伝導本来の電子状態を直接観測できるだけでなく、理論と実験を同一の舞台で直接比較できる新たな研究基盤が築かれました。

また、本研究で実証した「原子層レベルの金属シールド」という概念は、送電ケーブルや高速通信ケーブルで広く利用されている金属シールドの設計思想を結晶内部へ応用した新しい材料設計手法です。この考え方は銅酸化物高温超伝導体にとどまらず、強相関電子系や量子材料など、ディスオーダーが物性を左右する幅広い物質群へ展開できる可能性があります。

今後は、この理想的なCuO₂超伝導面を用いることで、高温超伝導発現機構に関する理論をこれまでにない精度で直接検証できるようになると期待されます。本成果は、高温超伝導発現機構の解明を大きく前進させるだけでなく、原子層レベルの金属シールドという新しい材料設

計概念を切り拓き、より高性能な超伝導材料や新しい量子材料の創製につながることを期待されます。

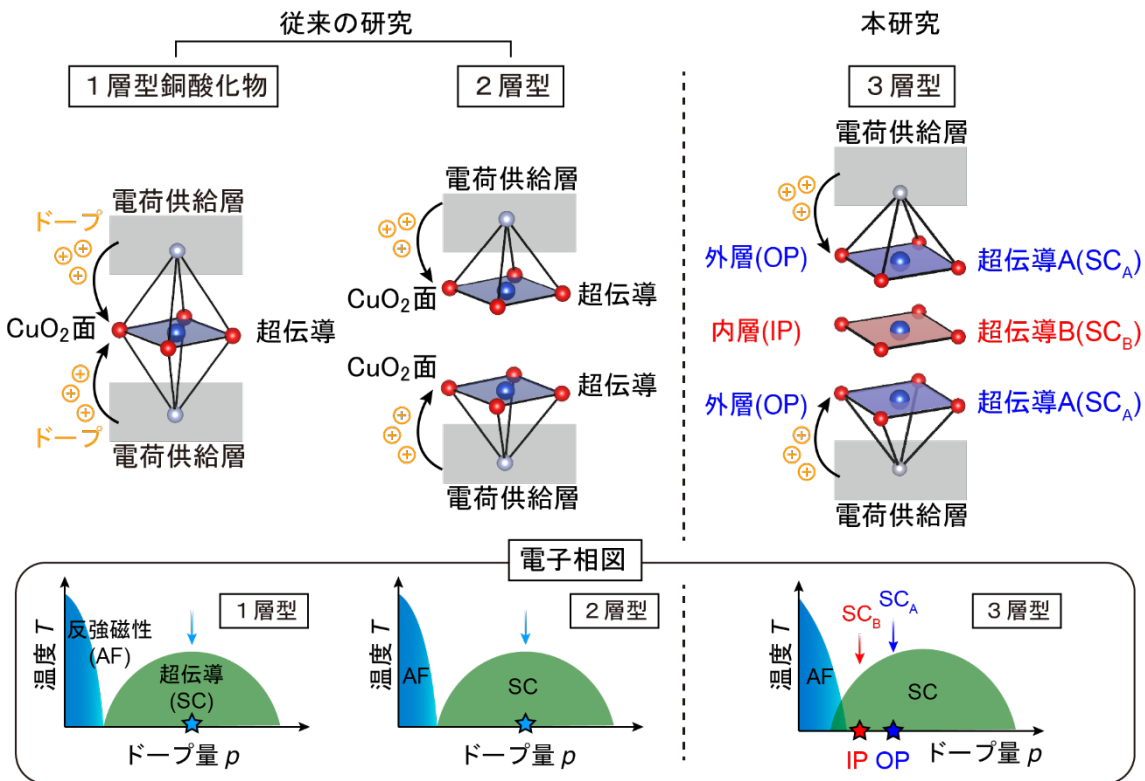


図 1：従来の 1 層型・2 層型銅酸化物と本研究の 3 層型銅酸化物の違い。

従来の 1 層型・2 層型銅酸化物高温超伝導体では、すべての CuO₂ 面が電荷供給層と直に接しているため、キャリアの供給と同時にディスオーダー（原子レベルの乱れ）の影響を必然的に受ける。このため、実験で観測される超伝導状態と、理論研究で仮定される乱れのない理想的な CuO₂ 超伝導面との間には長年隔たりが存在していた。一方、3 層型銅酸化物では、外層（OP）と内層（IP）への電荷分布が自然に分かれることで、最適ドーピング（注 9）に近い外層超伝導（SC_A）と低ドーピングの内層超伝導（SC_B）という二種類の超伝導層が一つの結晶中に原子層ごとに形成される。下段は、それぞれの CuO₂ 面に対応する電子相図を模式的に示している。通常の状態では、SC_A と SC_B の超伝導電子が混じり合うため、電荷供給層からの乱れが内層へも伝わってしまう。

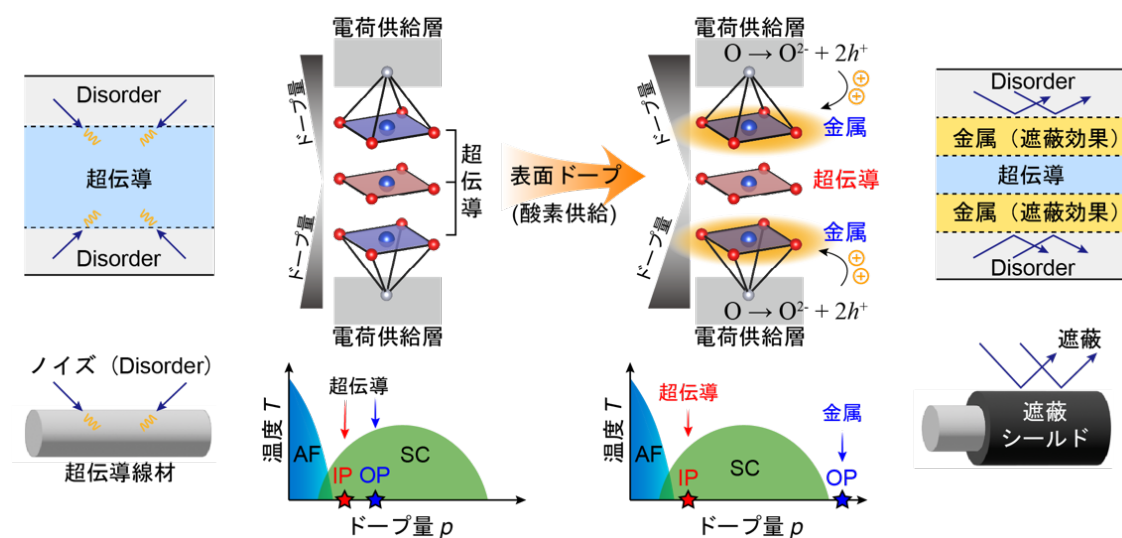


図 2：本研究で実現した「原子層レベルの金属シールド」と理想的な CuO₂ 超伝導面。

表面への酸素供給によって外層 (OP) だけを集中的にキャリアドーピング (注 10) することで、超伝導相の外に位置するオーバードープ (注 9) 状態となり、高伝導な金属状態へ変化させた。これにより、外層を金属シールド、内層を超伝導とする原子層ごとの役割分担を実現した。金属化した外層は電荷供給層から伝わるディスオーダーを遮蔽する「原子層レベルの金属シールド」として機能し、内層に乱れから保護された理想的な CuO₂ 超伝導面を実現した。右下は、この概念が超伝導ケーブルを金属シールドで保護する仕組みと対応していることを模式的に示している。

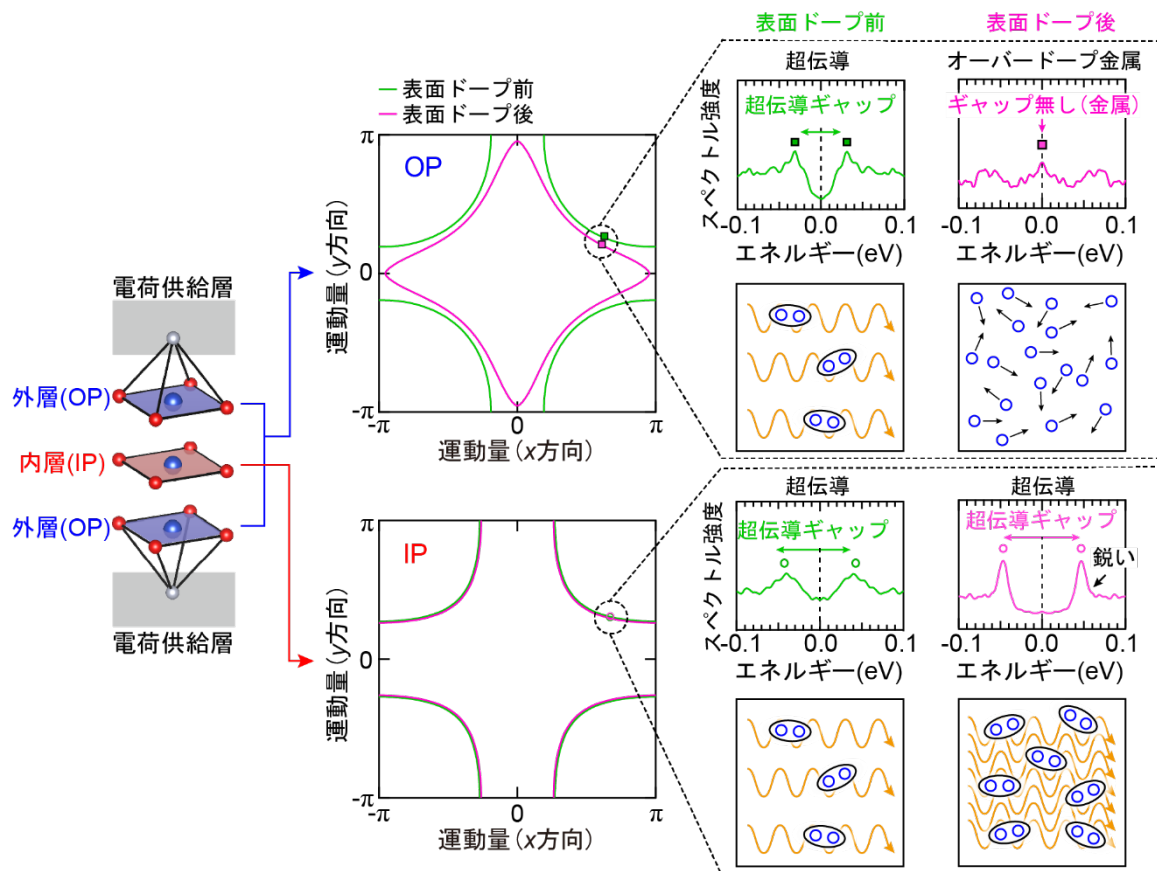


図3：角度分解光電子分光（ARPES）が明らかにした外層の金属化と理想的な CuO_2 超伝導面の実現。

表面への酸素供給前後の電子状態を角度分解光電子分光（ARPES）によって比較した。表面ドーピング後、外層（OP）のフェルミ面（注1）は大きく変化し、超伝導ギャップが消失して、高伝導な金属状態へと変化した。一方、内層（IP）のフェルミ面はほとんど変化せず、超伝導状態は維持された。さらに、内層の超伝導スペクトルは著しくシャープになり、超伝導電子が互いに足並みを揃えて運動する性質（コヒーレンス）が飛躍的に向上したことが分かった。これらの結果は、金属化した外層が原子層レベルの金属シールドとして機能し、電荷供給層から伝わるディスオーダーを遮蔽することで、内層に乱れから保護された理想的な CuO_2 超伝導面が実現したことを実験的に示している。

発表者

東京大学物性研究所

附属極限コヒーレント光科学研究センター

鄭 峻赫（ジョン・ジュンヒョク） 大学院生（東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 博士課程）

近藤 猛 准教授（兼：東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 准教授）

東京理科大学

先進工学部 電子システム工学科

常盤 和靖 教授

先進工学部 物理工学科

遠山 貴巳 教授

上智大学 理工学部 機能創造理工学科

酒井 志朗 准教授

論文情報

〈雑誌〉 Nature Communications

〈題名〉 Superconducting coherence boosted by outer-layer metallic screening in multilayered cuprates

〈著者〉 Junhyeok Jeong, Kifu Kurokawa, Shiro Sakai, Tomotaka Nakayama, Kotaro Ando, Naoshi Ogane, Soonsang Huh, Matthew D. Watson, Timur K. Kim, Cephise Cacho, Chun Lin, Makoto Hashimoto, Donghui Lu, Takami Tohyama, Kazuyasu Tokiwa*, Takeshi Kondo* (*責任著者)

<DOI> 10.1038/s41467-026-75295-z

<URL> <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75295-z>

研究助成

本研究は、日本学術振興会の科学研究費（課題番号 JP25H01250, JP25H01246, JP26H02014, JP24K06965, JP24K00560, JP25H01248）、文部科学省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP 課題番号 JPMXS0118068681）、旭硝子財団、村田学術振興財団、三菱財団、および東レ科学振興会の支援を受けて実施しました。

用語解説

（注１）銅酸化物高温超伝導体：

1986年にベドノルツとミューラーがLa-Ba-Cu-O系物質において高い超伝導転移温度を示す物質を発見したことを契機に、次々と高温で超伝導を示す銅酸化物が見つかりました。これらを総称して「銅酸化物高温超伝導体」と呼びます。現在もその超伝導発現機構は完全には解明されておらず、物性物理学における最も重要な研究課題の一つとなっています。超伝導を担うCuO₂面の数によって分類され、単位胞中に1枚を含むものを1層型、2枚を含むものを2層型、3枚を含むものを3層型銅酸化物高温超伝導体と呼びます。

（注２）角度分解光電子分光（ARPES）：

物質に光を照射すると、電子（光電子）が試料から真空中へ放出されます。その光電子の運動エネルギーと放出角度を測定することで、物質中の電子のエネルギーと運動量を直接観測し、電子構造を詳細に調べることができる実験手法です。超伝導コヒーレンスを反映した超伝導スペクトル、超伝導ギャップ、フェルミ面などを直接観測できることから、高温超伝導研究において最も重要な実験手法の一つです。

（注 3）CuO₂面：

銅（Cu）と酸素（O）から構成される原子層で、銅酸化物高温超伝導体において超伝導を担う最も重要な層です。電荷供給層から供給されたキャリア（電子または正孔）がこの層を流れることで超伝導が発現します。

（注 4）電荷供給層：

CuO₂ 面へキャリア（電子または正孔）を供給する原子層です。超伝導の発現に不可欠である一方、元素置換や酸素欠陥によるランダムポテンシャルが原子レベルの乱れ（ディスオーダー）を生み出します。その乱れが CuO₂ 面へ伝わることで、CuO₂ 面本来の電子状態の解明を難しくしている要因の一つです。

（注 5）原子レベルの乱れ（ディスオーダー）：

結晶中の原子配列の乱れや欠陥、不純物などがつくるランダムポテンシャルによって生じる電子状態の乱れを指します。銅酸化物高温超伝導体では、電荷供給層に由来するディスオーダーが超伝導電子を乱す「ノイズ」として働き、超伝導本来の性質を妨げている可能性が長らく指摘されてきました。

（注 6）超伝導コヒーレンス：

超伝導電子（クーパー対）が互いに位相を揃え、電子系全体が一つの大きな波のように振る舞う性質を指します。ディスオーダーが少ないほどコヒーレンスは向上し、角度分解光電子分光では超伝導スペクトルがより鋭く（シャープに）観測されます。

（注 7）超伝導スペクトル：

角度分解光電子分光で観測される超伝導状態の電子スペクトルを指します。超伝導状態では、超伝導ギャップが開くとともに、その両端に超伝導コヒーレンスを反映した鋭いピークが現れます。ディスオーダーが少なくコヒーレンスが高いほど、このピークはより鋭く（シャープに）観測されます。

（注 8）超伝導ギャップ：

超伝導状態になると電子同士が対（クーパー対）を形成し、電子を励起するために必要なエネルギーが生じます。このエネルギー差を超伝導ギャップと呼びます。超伝導ギャップの大きさや形は、超伝導の性質や発現機構を理解する上で重要な情報です。

（注 9）最適ドーピング・オーバードーピング：

銅酸化物高温超伝導体では、キャリア濃度によって超伝導転移温度が変化します。最も高い超伝導転移温度を示すキャリア濃度を「最適ドーピング」と呼び、それよりさらに多くのキャリアを導入した状態を「オーバードーピング」と呼びます。オーバードーピングでは超伝導が弱まり、最終的には通常の金属状態へと変化します。

（注 10）キャリアドーピング（ドーピング）：

物質へ電子や正孔（キャリア）を導入し、その電子状態を制御することをドーピングと呼びます。銅酸化物高温超伝導体では、電荷供給層の元素置換や酸素供給によってキャリア濃度を制御し、反強磁性、超伝導、金属状態など様々な電子状態を実現できます。

(注11) フェルミ面：

物質中の電子が持つエネルギーと運動量の関係を電子構造と呼びます。電子は低いエネルギーから順に占有され、占有された最も高いエネルギーに対応する電子構造の面をフェルミ面と呼びます。フェルミ面の面積はキャリア量を反映し、その形や大きさは電気伝導や超伝導などの物性を決定する重要な情報となります。

問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

東京大学 物性研究所

准教授 近藤 猛（こんどう たけし）

TEL：04-7136-3370

E-mail：kondo1215@issp.u-tokyo.ac.jp

東京理科大学 先進工学部 電子システム工学科

教授 常盤 和靖（ときわ かずやす）

TEL：03-5876-1441

E-mail：tokiwa@rs.tus.ac.jp

〈報道に関する問合せ〉

東京大学 物性研究所 広報室

TEL: 04-7136-3207

E-mail：press@issp.u-tokyo.ac.jp

東京理科大学 経営企画部 広報課

TEL: 03-5228-8107

E-mail：koho@admin.tus.ac.jp

上智学院広報グループ

E-mail：sophiapr-co@sophia.ac.jp