



## PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 6 年 6 月 19 日

岡 山 大 学

### 高温超伝導の秘密、解明！？ 結晶をひずませると電荷秩序が現れた！ ～省エネに貢献する超伝導の仕組み解明に新たな一歩～

#### ◆発表のポイント

- ・オリジナルの結晶ひずみ発生装置を製作しました。
- ・銅酸化物の結晶をひずませると、超伝導に代わって電荷秩序が現れることを発見しました。
- ・今後研究が進むことで、銅酸化物での高温超伝導発現の仕組み解明につながると期待されます。

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域（理）の川崎慎司准教授（低温物性物理学）、鄭国慶教授（同）、岡山大学大学院自然科学研究科の佃菜桜大学院生（研究当時）、ドイツ・マックスプランク研究所の Chengtian Lin 博士の国際共同研究グループは、ビスマス系銅酸化物高温超伝導体の結晶（銅と酸素が結合した正方形）をひずませると超伝導に代わって電荷秩序（電荷の並びに規則性がある状態）が現れることを発見しました。

本研究成果は、6月14日付けの英科学誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

ロスのない送電／蓄電により電気を無駄なく使える「超伝導」は、将来の脱炭素社会実現の切り札の一つですが、実用化には室温で超伝導になる物質が必要不可欠です。1986年に発見された銅酸化物高温超伝導体は、室温超伝導に最も近い物質として研究が進められていますが、なぜ超伝導が起こるのか、その仕組みはまだ分かっていません。本成果は、銅酸化物において「超伝導」と「電荷秩序」という異なる現象が、結晶の中でコインの裏表のように密接に関係していることを明らかにしました。超伝導発現の仕組みを解明する新たな鍵となることが期待されます。

#### ◆研究者からのひとこと

近年、正方形や六角形の平面構造を持つ超伝導物質を精密にひずませ新しい性質を引き出す研究が注目を集めています。銅酸化物は正方形の代表的物質です。我々は5年前に装置開発からこの分野に参入しました。ゼロからスタートして幾重にも試行錯誤を重ねた末、2年前についに独自装置を完成させました。その後は装置をフル活用して（ただひたすら実験して）今回の成果を得ることができました。物性物理においてひずみ実験は未開拓領域です。我々は今後も超伝導の可能性を探求していきます！



川崎准教授



## PRESS RELEASE

### ■発表内容

#### <現状>

2020年、我が国を含む主要国は2050年カーボンニュートラル達成を宣言しました。化石燃料に頼らない社会の実現には、太陽光や風力発電などの代替エネルギーに加え、省エネルギーが不可欠です。超伝導は電気抵抗ゼロ（=ロス無し）で送電／蓄電を行うことが可能なため、省電力に貢献します。また、磁力の強い超伝導磁石は、医療用MRIや超伝導リニアに不可欠です。

超伝導は、脱炭素社会の実現に加え、私たちの生活をより便利で快適なものにします。しかし、超伝導技術の普及には大きな課題があります。それは、超伝導は極低温でのみ現れることです。極低温にするにも莫大なエネルギーを必要とするため、冷却コストのかからない「室温超伝導物質」の開発が必要です。1986年に発見された銅酸化物（最高超伝導転移温度  $T_c = -140^\circ\text{C}$ ）は、室温超伝導の最有力候補物質ですが、その発現の仕組みは不明で室温超伝導への指針もありません。仕組みが分からない原因の一つに超伝導の背景が不明なことがあげられます。その背景は特に「異常金属相（擬ギャップ）」<sup>[1]</sup>と呼ばれています。

#### <研究成果の内容>

「銅酸化物」はその名の通り、結晶内で銅と酸素が結合してつくられる正方形の「 $\text{CuO}_2$ 面」で超伝導が起きます<sup>[2]</sup>。ところが、これまでその正方形の構造そのものと超伝導の関係を調べた実験はほとんどありませんでした。

本研究は、自作のピエゾ素子<sup>[3]</sup>駆動の一軸性圧力発生装置（一軸ひずみセル）<sup>[4]</sup>を用いて、超伝導と  $\text{CuO}_2$  面の関係を核磁気共鳴法<sup>[5]</sup>により調べました。測定対象には、銅酸化物系の中でも結晶内の  $\text{CuO}_2$  面が一枚のビスマス系銅酸化物（ $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_6$ ,  $T_c = 32\text{ K}$ ）を選びました<sup>[2]</sup>。実験の結果、 $\text{CuO}_2$  面が正方形からひずむと超伝導が抑制され、わずか0.15%のひずみで超伝導に代わって電荷秩序が現れることが分かりました。高温超伝導の背景である「異常金属相（擬ギャップ）」に、実は電荷秩序が隠されていたのです。この結果は、銅酸化物においては正方形の  $\text{CuO}_2$  面の中で高温超伝導と電荷秩序がコインの裏表のように密接な関係にあることを示しており、超伝導発現の仕組みを考える上で新たな鍵となると考えられます。

#### <社会的な意義>

本研究成果を高温超伝導体のモデルとして、理論的アプローチによる高温超伝導現象への理解が進むことが期待されます。今後、高温超伝導発現の仕組み解明に向け新たな発展がもたらされると期待されます。

### ■論文情報

論文名：Strain-induced long-range charge-density wave order in the optimally doped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$  superconductor

掲載紙：Nature Communications 15, 5082 (2024).

著者：Shinji Kawasaki, Nao Tsukuda, Chengtian Lin, and Guo-qing Zheng



## PRESS RELEASE

D O I : <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49225-w>

U R L : <https://www.nature.com/articles/s41467-024-49225-w>

### ■研究資金

本研究は、独立行政法人日本学術振興会（JSPS）「科学研究費助成事業」（基盤 A・JP19H00657, 研究代表：鄭国慶、基盤 C・JP19K03747、JP23K03323, 研究代表：川崎慎司）および公益財団法人村田学術振興・教育財団「研究助成」（研究代表：川崎慎司）の支援を受けて実施しました。

### ■補足・用語説明

[1] 銅酸化物高温超伝導は異常金属相（擬ギャップ）で現れますが、超伝導発現の仕組みを考える上で、歴史的には母物質に存在する磁性との関係に焦点を当てる研究が中心でした。

[2] 銅酸化物では、図 1 左に示すように母物質のモット絶縁体（反強磁性という磁気秩序を示す絶縁体）に元素置換して電子やホールを増やしていく（キャリアドーピングという）と磁気秩序が消え、超伝導が現れます。超伝導転移温度  $T_c$  が最も高いドーピング量を最適ドーピング試料と呼びます。

銅酸化物では銅と酸素が化学結合した  $\text{CuO}_2$  面内で超伝導が現れるのが普遍的性質です。一般的に  $\text{CuO}_2$  面を 2 枚、3 枚と複数持つ銅酸化物系は  $T_c$  が高くなる傾向にあり、そのような系に注目が集まりがちですが、本研究では  $\text{CuO}_2$  面が一枚のビスマス系銅酸化物の最適ドーピング試料 ( $T_c = 32\text{K}$ ) を測定対象に選び、 $\text{CuO}_2$  面の正方形構造と超伝導の関係を詳しく調べました。

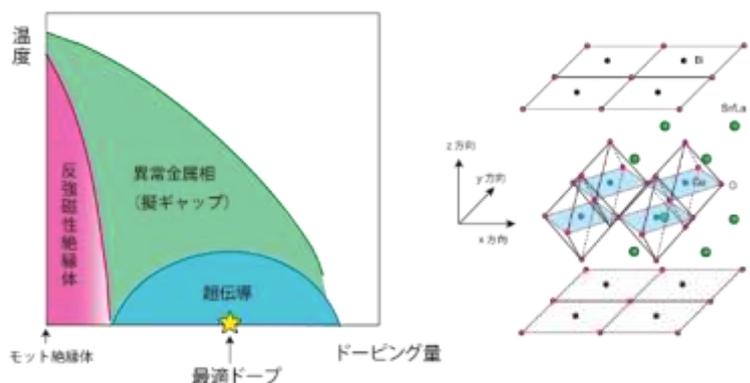


図 1：（左）銅酸化物高温超伝導体の一般的相図。本研究で測定に用いたのは最適ドーピング試料（星印）。（右）ビスマス系銅酸化物 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ ) の結晶構造。銅酸化物において、高温超伝導は、銅（青丸）と酸素（赤丸）で構成される  $\text{CuO}_2$  面（水色）で生じることが知られています。

[3] ピエゾ素子とは、力と電気を自由自在に変換できる素材で、正負電圧をかけると伸縮する性質を持っています。現在では圧力センサーや発振器など幅広い用途に利用されています。

[4] 市販のピエゾ素子と金属チタンの板を切り出して作った部品を組み合わせて一軸ひずみセルにします。チタン部品は放電加工という特殊な方法で作りますが、これは岡山大学工学部創造工学セ

PRESS RELEASE

ンターで加工されたものです。図2に詳細を示しています。

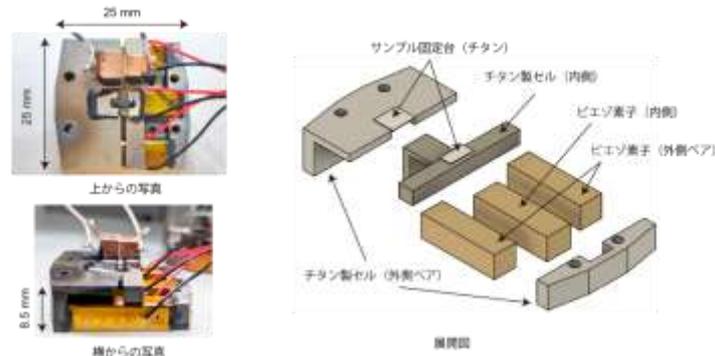


図2：本研究で用いた一軸ひずみセルの写真（左）と展開図（右）（当該論文より）。写真中央の黒い板がビスマス系高温超伝導体の単結晶の板（縦×横×高さ＝2.0×0.6×0.1 mm<sup>3</sup>）。ピエゾ素子に加える電圧を変えることで、ナノメートルオーダーで自由自在に試料のひずみ量を変えることが可能です。学内での金属加工と自ら手作業で組み立てることにより、低コストと短納期を実現しています。

[5] 原子核スピンを通して物質の電子状態を調べる実験手法。医療用 MRI の撮像原理と同じです。本研究では Cu 核の核磁気共鳴を通じて CuO<sub>2</sub> 面内の超伝導と電荷秩序について詳しく調べました。図3に得られた結果の詳細を示しています。

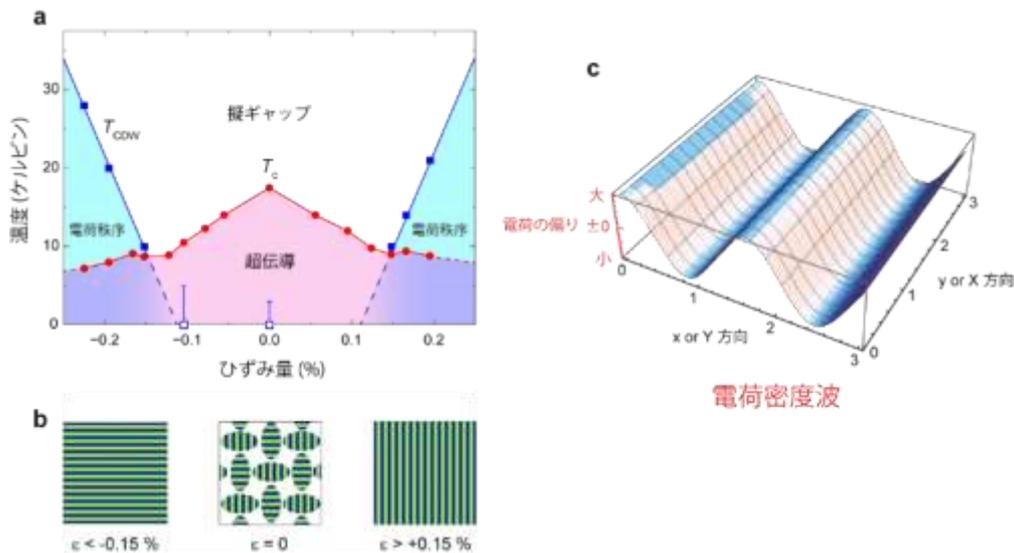


図3：(a) 本研究で得られたビスマス系銅酸化物の超伝導と電荷秩序のひずみ依存性（当該論文より）。(b) ひずみを加えることで CuO<sub>2</sub> 面内に電荷量の周期的な空間分布（電荷秩序）ができる様子を示しています。色の濃淡が電荷の濃淡に相当します。(c) CuO<sub>2</sub> 面内の電荷秩序の詳細を示しています。電荷秩序はひずみを加えた方向に周期的な波、“電荷密度波”として現れます。正方形の CuO<sub>2</sub> 面内で超伝導と電荷秩序が微妙なバランスで存在していることが分かりました。



<お問い合わせ>

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域（理）

准教授 川崎 慎司

（電話番号）086-251-7803

（FAX）086-251-7825（物理事務室）



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。