



令和元年 8 月 7 日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

### 超伝導と共存、競合する違うタイプの電荷秩序を発見 銅酸化物超伝導体の電子状態の理解に新たな進展

#### 【発表のポイント】

- 銅酸化物高温超伝導体で電荷秩序の共通の性質が精力的に研究されている。
- 超伝導と競合するタイプと、共存するタイプの 2 種類の電荷秩序を初めて発見。
- ストライプ相と超伝導相がマイクロな状態で相分離していることを明らかにした。

#### 【概要】

国立大学法人東北大学金属材料研究所とスタンフォード線形加速器国立研究所を中心とする国際研究チームは、銅酸化物高温超伝導体において異なった性質を持つ 2 種類の電荷秩序が存在することを世界で初めて明らかにしました。

銅酸化物において高温で発現する超伝導のメカニズム解明は物性物理学でも重要な課題の一つです。超伝導相の近傍には、多様な秩序相が存在しており、この秩序相と超伝導相との関係を明らかにすることが、超伝導機構解明の重要な手がかりになります。

近年、様々な銅酸化物高温超伝導体で電荷秩序が観測され、超伝導と電荷秩序の関係が活発に議論されています。本研究では、性能を向上させた共鳴軟 X 散乱実験<sup>\*1</sup>を行い、ホールドーピング型銅酸化物高温超伝導体<sup>\*2</sup> $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  における電荷密度波<sup>\*3</sup>の性質を、ホール濃度を制御した複数の試料で調べました。その結果、超伝導と共存するタイプと、競合するタイプの 2 種類の電荷秩序が、ホール濃度の異なる領域に存在する事を初めて明らかにしました。超伝導と共存する電荷秩序は、電荷とともにスピンのストライプ状の縞模様を形成しており、そのストライプ相と超伝導がマイクロな状態で相分離していることが明らかとなりました。今後本研究のさらなる発展により、超伝導発現の鍵となる電荷相関の解明が期待されます。

本研究内容は、2019 年 7 月 22 日に Nature Communications にオンライン掲載されました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して  
東北大学金属材料研究所  
量子ビーム金属物理学研究部門  
博士課程 3 年 浅野 俊  
教授 藤田 全基  
TEL: 022-215-2035  
Email: fujita@imr.tohoku.ac.jp

◆報道に関して  
東北大学金属材料研究所  
情報企画室広報班(富松)  
TEL: 022-215-2144  
FAX: 022-215-2482  
Email: pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

## 【詳細な説明】

### ○研究背景

銅酸化物において高温で発現する超伝導のメカニズムは、物性物理学の重要な問題の一つです。超伝導相の近傍には、多様な秩序相が存在しており、それらの秩序相と超伝導相との共存、及び、競合の関係を明らかにすることが、超伝導機構解明の重要な手がかりになります。近年、放射光 X 線分光技術の発展により、長周期構造を持った電荷密度波(CDW)が秩序化する相(電荷秩序相)が、銅酸化物高温超伝導体の超伝導相近傍で共通して存在することが明らかとなってきました。しかし、電荷秩序の起源や超伝導との関わりは統一的に理解されていませんでした。

### ○研究の手法

本研究で用いた共鳴軟 X 散乱(RSXS)実験は、CDW の周期構造を直接観測できる強力な測定手法です。しかし、銅酸化物高温超伝導体では、CDW に由来する散乱強度は非常に弱く、系統的な測定は困難でした。本研究では、共鳴軟 X 線散乱に用いる検出器の性能を向上させ、高感度で CDW のシグナルを検出することに成功しました。このことにより、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の全組成・温度領域における電荷秩序の探索とその性質を高精度で調べる事が可能となりました。

### ○得られた成果

RSXS により  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の全組成領域で CDW の探索を行った結果、図 1 にグレーで示すように  $0.10 < x < 0.16$  の広い組成領域において電荷秩序が存在することを初めて明らかにしました。さらに、 $x \sim 0.135$  を境に低温でスピン密度波(SDW)が存在する組成領域( $x < 0.135$ )と存在しない領域( $0.135 < x$ )で観測される電荷秩序は、それぞれ超伝導と競合、共存することを発見しました。このことは、性質の異なる 2 種類の電荷秩序が存在することを意味し、その性質が SDW の存在とも深く結びついていることを示しています。

図 2 に  $x = 0.135$  を挟んだ  $x = 0.14$  と  $x = 0.13$  の試料における CDW シグナルの温度依存性を示します。 $x = 0.14$  では超伝導転移温度( $T_c$ )以下で、CDW に由来するピークの強度が減少し、半値全幅(FWHM)が一定となりました。この結果は超伝導発現に伴って、CDW の発達が抑制されたことを示しており、超伝導と競合した CDW であると考えられます。一方、 $x = 0.13$  では、 $T_c$  以下でも CDW 由来のピークの強度が増大し、FWHM が減少し続けています。超伝導の発現と関係なく CDW が発達していることを示しています。また、この  $x = 0.13$  では、低温で SDW も存在しており、スピンと電荷が空間的にストライプ模様を形成して秩序化している相(ストライプ相)が超伝導相内にあることを示しています。このことから、超伝導相とストライプ相がマイクロに相分離した状態で共存していることを明らかにしました。

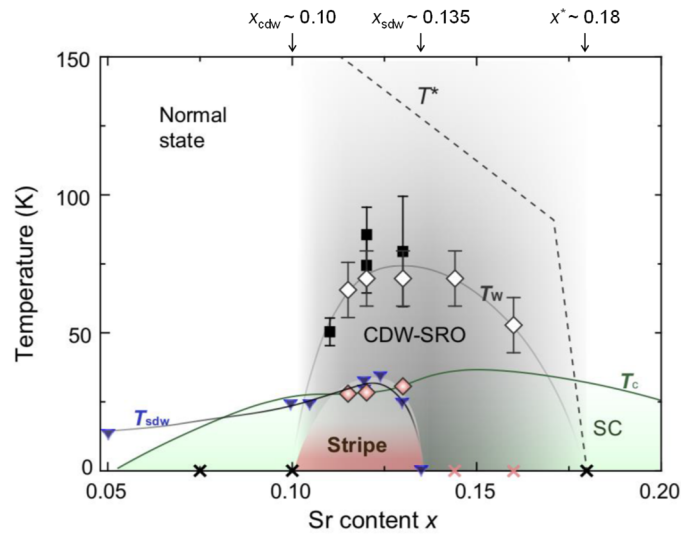


図 1:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の超伝導相図。  $T_w$  は、X 線散乱により決定した電荷密度波(CDW)の転移温度で、 $\times$ 印は CDW が観測されなかった組成を示しています。  $T_{sdw}$  は、これまでに中性子散乱により決定されたスピン密度波(SDW)の転移温度で、  $T_c$  と  $T^*$  は、それぞれ超伝導と擬ギャップの転移温度に対応しています。  $0.10 < x < 0.18$  の超伝導組成領域において、電荷密度波の短距離秩序相(CDW-SRO)とストライプ相(Stripe)が存在していることがわかります。

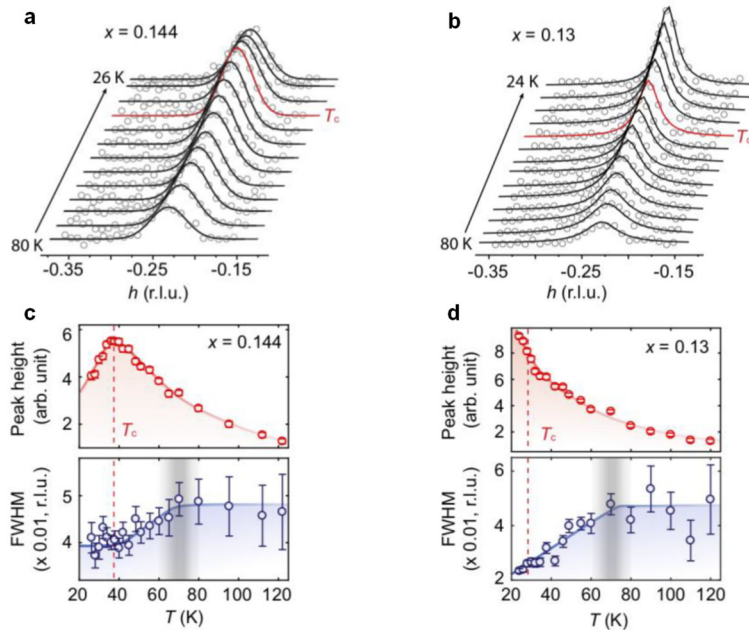


図 2:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の(a)  $x = 0.144$  と(b)  $x = 0.13$  における電荷密度波(CDW)に由来するピークプロファイルとの温度依存性。(c)(d)CDW ピークの高さと半値全幅(FWHM)の温度依存性。赤色の点線と灰色の影はそれぞれ、超伝導転移温度  $T_c$  と CDW ピークの FWHM が減少し始める温度  $T_w$  を表しています。  $x = 0.14$  では  $T_c$  以下で、CDW のピーク強度が減少し、FWHM が一定となりました。一方、  $x = 0.13$  では、  $T_c$  以下でも CDW のピーク強度が増大し、FWHM が減少し続けており、  $x = 0.135$  を挟んだ組成で CDW ピークの温度依存性に違いが見られます。

### ○今後の展開

超伝導と共存する電荷秩序はストライプ相を形成し、超伝導相とマイクロに相分離していることを明らかにしました。マイクロな相分離状態を実空間で直接観測をすることで、超伝導発現の鍵となる電荷相関の解明が期待されます。

### ○発表論文

雑誌名 : Nature Communications

英文タイトル : Observation of two types of charge density wave orders in superconducting  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

全著者 : J.-J. Wen, H. Huang, S.-J. Lee, H. Jang, J. Knight, Y. S. Lee, M. Fujita, K. M. Suzuki, S. Asano, S. A. Kivelson, C.-C. Kao, and J.-S. Lee

DOI: 10.1038/s41467-019-11167-z

### ○専門用語解説 1)共鳴軟 X 線散乱(Resonant soft X-ray scattering : RSXS)

特定の元素の吸収端にエネルギーを合わせた X 線を物質に入射し、散乱した X 線を測定する実験手法です。本 X 線散乱実験では、銅の  $L_3$  端を使用しました。この手法により、スピンや電荷の密度波を測定することができます。

### 2)ホールドープ型銅酸化物高温超伝導体

結晶格子状に電子が敷き詰まった状態から、電子を抜き出して電子の穴を作ること、をホールドープと呼びます。ホールドープ型銅酸化物高温超伝導体とは、電子の穴を増やして超伝導が発現する銅酸化物のことです。

### 3)電荷密度波

電子密度が実空間で周期的な濃淡を持った状態。