

# 高温超伝導体に至るメカニズムの一端を解明

## -超伝導状態直前の特異な金属状態を観測、四半世紀の謎に手がかり-

### 概要

佐藤雄貴 京都大学大学院理学研究科大学院生、笠原成 助教、松田祐司 教授らの研究グループは、東京大学、九州産業大学、韓国科学技術院、ドイツ・マックスプランク研究所と共同で、銅酸化物高温超伝導体が超伝導状態になる過程で現れる特異な金属状態を解析しました。その結果、電子が集団的な自己組織化によって配列し、ある種の液晶状態が作られていることを発見しました。高温超伝導がどのように起こるのか、その過程で特異な金属状態がみられることは分かっていたのですが、変化のメカニズムや高温超伝導との関係は四半世紀に渡り謎のままでした。

論文は、7月25日（日本時間）、*Nature Physics* に掲載されました。

### 1. 背景

超伝導は、ある種の物質を極低温まで冷却すると電気抵抗が完全にゼロになる現象です。超伝導の標準理論である BCS 理論<sup>1</sup>では、約  $-240^{\circ}\text{C}$  より高い温度で超伝導状態になる物質は見つからないであろうとされていました。しかし、1986年に銅を含んだある種の酸化物で  $-240^{\circ}\text{C}$  よりも高い温度で超伝導を示す物質が発見されました。その後、似た物質でも次々と高い温度での超伝導現象が発見されています。一連の物質は銅酸化物高温超伝導体として高い注目を集めていますが、高温超伝導の発現メカニズムは現代物理学において最も重要な未解決問題の一つであり、多くの科学者がこの研究に取り組んでいます。

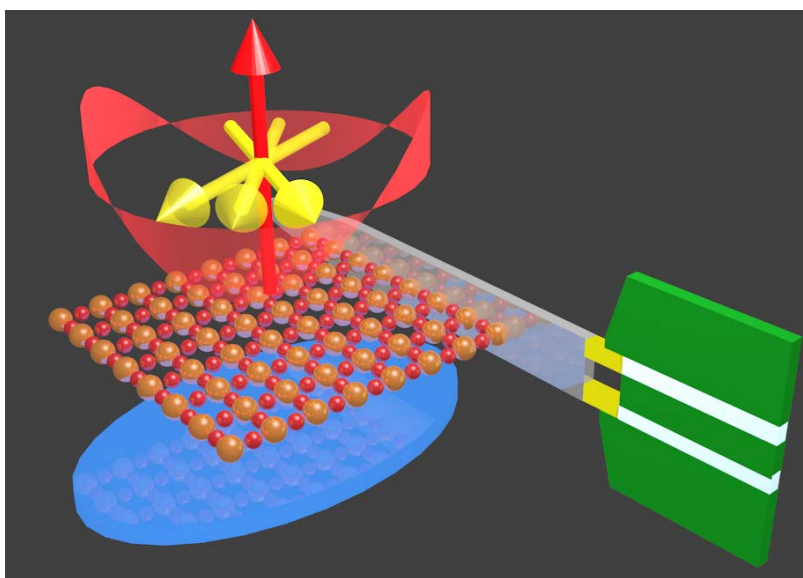
高温超伝導の発現機構を解明するには、超伝導が起きる前の金属状態の性質を理解することが不可欠です。銅酸化物高温超伝導体では、超伝導を起こすよりも高温で、一部の特定方向の電子が消失する特異な金属状態が現れることが研究初期より観測されていました。この状態は擬ギャップ状態と呼ばれていますが、この状態がどのようにして生じ、また高温超伝導の発現機構とどのように関連するのかは、四半世紀を超える銅酸化物高温超伝導体の歴史においても最大の謎の一つとされてきました。特に、通常の状態から擬ギャップ状態への移り変わりが、電子状態が徐々に移り変わっていく連続的な変化によるものなのか、或いは、水が氷になるような急激な状態間の変化によってもたらされるのか、擬ギャップ状態とは一体どのような状態なのか、といった論点に様々な学術的見解が存在し、これまでに一万本をこえる数の擬ギャップ状態に関する論文が発表されています。しかし決定的な結論は出ておらず、現代物理学上の最重要課題の一つとなっていました。

---

<sup>1</sup> バーディーン、クーパー、シュリーファールのアメリカの科学者 3 人により確立された超伝導の標準理論。1957年、格子振動を媒介とした引力相互作用により 2 つの電子がペア（クーパー対）を組むことにより多数の電子対が量子力学的に同一の凝縮状態となることが超伝導状態であると提唱。銅酸化物高温超伝導体では、BCS 理論とは異なる機構により超伝導を起こすと考えられている。

## 2. 研究手法・成果

今回の研究では磁気トルク測定<sup>2</sup>という超高感度磁気測定を用い、代表的な銅酸化物高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の純良単結晶を対象に擬ギャップ状態での磁氣的性質を従来にない高分解能で調べることに成功しました。研究の結果、擬ギャップ状態では物質の磁氣的性質がx方向(0°方向)とy方向(90°方向)で異なり、電子集団が自発的に配列することで空間的な非対称性をもった新しいタイプの秩序状態へと急激に変化していることが明らかになりました。これは電子の集団的な自己組織化によってある種の液晶状態がつくられている相転移現象<sup>3</sup>を示しています。このように自発的に非対称性をもった電子状態は電子ネマティック相と呼ばれます。擬ギャップ状態への変化が電子ネマティック相への相転移であることを明らかにしたのは本研究が初めてであり、高温超伝導の舞台となる特異な金属状態が電子ネマティック相であると解明されたことで、高温超伝導現象の解明に向けた重大な指針を与えたこととなります。今後、電子ネマティック相と高温超伝導の発現機構がどのような関わりを持っているかについては大きな議論を呼ぶことが予想されます。



**図 1:** 高感度磁気トルク測定と電子集団の秩序化のイメージ図。結晶に加えた磁場の方向（黄色矢印）に対して、物質の磁氣的性質（磁気トルク）を超高感度で測定する。銅酸化物の特異な金属状態においては、磁場方向によって図上部の赤波のような磁気トルクの振動が観測され、青い楕円のように電子集団が一軸的な配向性をもった秩序状態が実現していることを発見した。

<sup>2</sup> 磁氣的な性質が方向によって異なる物質に磁場をかけると生じる回転する力。今回の手法を用いると方向によってどの程度性質が異なるのか、従来の測定に比べて数千倍高い感度で精密に測定することができる。

<sup>3</sup> 温度変化により一つの状態（相）から別の状態（相）に変化すること。固体、液体、気体の状態間の変化や、磁石を暖めるとある温度において急に磁力が消失する現象等があり、状態間（相）の移り変わりは相転移と呼ばれる。相転移では秩序の仕方が変化することにより、何等かの対称性が変化することが知られている。

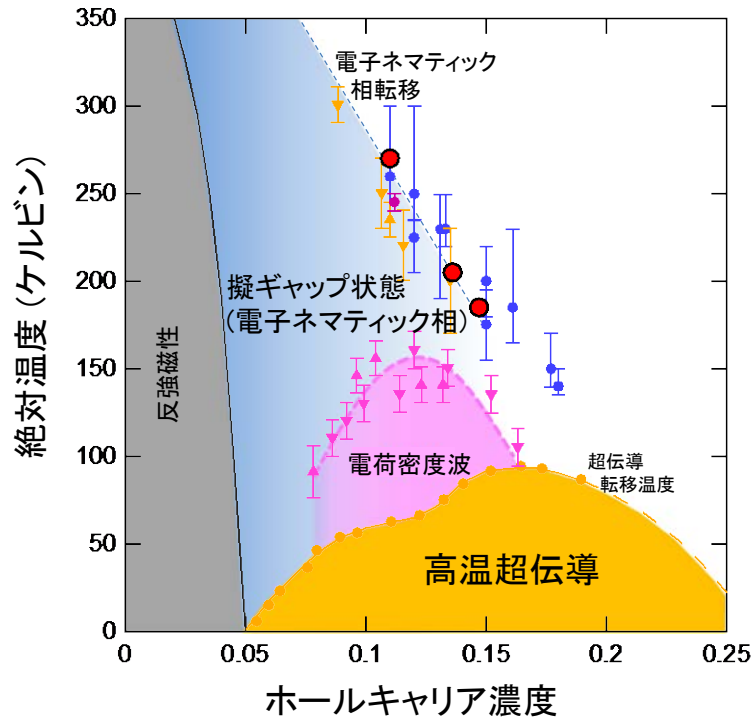


図 2: 高温超伝導体の電子状態図。キャリア濃度が増加すると高温超伝導を示す温度（超伝導転移温度）が変化する。超伝導状態よりも高温では、特定方向の電子が消失した特異な電子状態（擬ギャップ状態）が現れる。この状態は電子ネマティック相への相転移現象であることが明らかになった。

### 3. 研究プロジェクトについて

本研究は JSPS 科学研究費補助金（課題番号: 25220710, 15H02106, 15H03688, 16K05460, 16K13837）、新学術領域研究「強相物質のトポロジカル相」、POSCO TJ Park Foundation、韓国研究財団の支援を受けました。

#### <論文タイトルと著者>

タイトル : Thermodynamic evidence for nematic phase transition at the onset of pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

著者 : Yuki Sato, Shigeru Kasahara, Hinako Murayama, Yuichi Kasahara, Eun-Gook Moon, Terukazu Nishizaki, Toshinao Loew, Juan Porras, Bernhard Keimer, Takasada Shibauchi and Yuji Matsuda

掲載誌 : *Nature Physics* DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nphys4205>