

報道関係各位

## PRESS RELEASE

2018年8月3日

上智大学

東北大学大学院工学研究科

東北大学金属材料研究所

理化学研究所

高エネルギー加速器研究機構

J-PARC センター

### 銅酸化物高温超伝導体で 2 次元の強磁性ゆらぎを世界で初めて観測

－高温超伝導体の磁性状態の全貌を解明－

#### 1. 発表の要点

- 反強磁性ゆらぎ（注1）が主役を担ってきた高温超伝導銅酸化物（注2）において、2次元の強磁性ゆらぎ（注3）を初めて観測。
- 高温超伝導銅酸化物において、キャリアの注入とともに反強磁性から強磁性へと磁性状態が変化することを解明。
- 強磁性ゆらぎが高温超伝導を阻害している可能性を提案。

#### 2. 発表概要

銅酸化物の高温超伝導体では、反強磁性の絶縁体である母物質に正孔または電子キャリアを注入することで超伝導が発現しますが、大量にキャリアを注入すると超伝導が消失する原因はわかっていませんでした。

今回、上智大学工学部機能創造理工学科の足立教授の研究グループは、東北大学大学院工学研究科、東北大学金属材料研究所、理化学研究所仁科加速器科学研究センター、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、J-PARC センターとの共同研究で、大量に正孔を注入した銅酸化物で 2 次元の強磁性ゆらぎを世界で初めて観測しました。これは、キャリアの注入とともに反強磁性から強磁性へと磁性状態が変化することを意味し、銅酸化物の磁性状態の全貌を明らかにしたものです。また、超伝導が大きく抑制された物質で強磁性ゆらぎが観測されたことから、強磁性ゆらぎが高温超伝導を阻害している可能性を示しています。本成果は、高温超伝導に対する強磁性ゆらぎの関わりを新たに示す重要な成果です。

本成果の詳細は、2018年8月1日に米国物理学誌「Physical Review Letters」でオンライン公開されました。

### 3. 発表者

足立 匡（上智大学理工学部機能創造理工学科 教授）  
倉嶋晃士（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 大学院生）  
小池洋二（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 名誉教授）  
宮坂 等（東北大学金属材料研究所／東北大学大学院理学研究科化学専攻 教授）  
渡邊功雄（理化学研究所仁科加速器科学研究センター 専任研究員）  
門野良典（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授／J-PARC センター  
物質・生命科学ディビジョンミュオンセクション リーダー）

### 4. 発表内容

#### ①研究の背景

1911年に発見された物質の電気抵抗がゼロになる超伝導は、リニア新幹線や磁気共鳴診断装置（MRI）などで私たちの暮らしに深く関わっています。しかし、ある臨界温度以下に冷やすと超伝導になることから、従来の超伝導材料では液体ヘリウムや冷凍機が必要になっています。一方、銅酸化物で見られる高温超伝導は、臨界温度が液体窒素温度（マイナス 196℃）を越えるものがあることから、応用に向けた研究とともに、高い臨界温度のメカニズムを解明するための研究が活発に行われています。

銅酸化物では、反強磁性を示す絶縁体物質に電気伝導を担う正孔／電子キャリアを注入すると、反強磁性秩序が壊れて超伝導が発現します。超伝導が発現する物質では、反強磁性のゆらぎが観測されていることから、超伝導の発現メカニズムに反強磁性のゆらぎが深く関わっていると言われていました。一方、キャリアを大量に注入すると超伝導が消失しますが、この原因はわかっていませんでした。さらに、キャリアを大量に注入した物質で磁性状態がどうなっているのかも不明でした。

2007年、アメリカの理論研究グループが、超伝導が消失した物質では強磁性秩序が発達すると予測し、2010年にカナダの実験研究グループがランタン系銅酸化物において3次元の強磁性ゆらぎが存在することを報告しました。しかし、これに続く研究は報告されず、真偽は確かではありませんでした。

#### ②本研究の内容と成果

本研究では、強磁性ゆらぎの真偽と超伝導の消失との関連を明らかにするために、上智大学と東北大学を中心とする研究グループが、正孔を大量に注入したビスマス系銅酸化物 $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ を用いて、電気伝導特性、磁気特性、熱特性の測定を行いました。その結果、(i)電気伝導特性と熱特性（比熱）が2次元の強磁性ゆらぎに特徴的な振る舞いを示すこと、(ii)図1に示すように、磁化が強磁性転移の前段階で見られるS字型の振る舞いを示すこと、(iii)ミュオンスピン緩和の測定によって磁性ゆらぎが存在することをそれぞれ明らかにしました。

これらの結果を物性相図にまとめたものを図2に示します。これまで、銅酸化物では、反強磁性状態と超伝導状態の存在しか知られていませんでしたが、本研究によって、大

量に正孔を注入すると2次元の強磁性ゆらぎの状態が現れることが明らかになりました。本研究によって、銅酸化物の磁性状態の全貌が明らかになりました。これは、高温超伝導の発現メカニズムを明らかにするために不可欠な情報です。また、超伝導が大きく抑制された物質で強磁性ゆらぎが観測されたことから、強磁性ゆらぎが高温超伝導を阻害している可能性があります。これは、長い間の謎であった、キャリアを大量に注入すると超伝導が消失する原因を解明するものです。

### ③今後の展開

本研究の成果は、銅酸化物における高温超伝導に強磁性ゆらぎが関わっている可能性があることを新たに示したものです。今後は、どのように関わっているのかを詳しく調べるのが重要です。本研究で示した強磁性ゆらぎの存在は、発見から30年以上に渡って行われてきた高温超伝導の研究に新たな道を示すものです。今後、高温超伝導の発現メカニズムを解明するための研究が加速して行くことが期待されます。

なお、本研究成果の一部は、以下の助成により得られたものです。

- ・文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「超低速ミュオンが拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」（課題番号：231080040）
- ・仁科加速器科学研究センター理研 RAL ミュオン施設共同研究（R516）
- ・高エネルギー加速器研究機構ミュオン共同利用実験課題（No. 2015A0198, No. 2016B0121）
- ・東北大学学際高等研究教育院

\*本成果の参加者は、他に以下のメンバーによって構成されています。

鈴木謙介（東北大学金属材料研究所 助教）

福永 泰（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 大学院生）

川股隆行（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 助教）

野地 尚（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 助教）

宮崎正範（室蘭工業大学大学院工学研究科生産システム工学系専攻 助教）

幸田章宏（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 研究機関講師）

## 5. 発表雑誌

雑誌名：「Physical Review Letters」（2018年8月1日オンライン公開）

論文タイトル：Development of Ferromagnetic Fluctuations in Heavily Overdoped  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$  Copper Oxides

著者：Koshi Kurashima, Tadashi Adachi, Kensuke M. Suzuki, Yasushi Fukunaga, Takayuki Kawamata, Takashi Noji, Hitoshi Miyasaka, Isao Watanabe, Masanori Miyazaki, Akihiro Koda, Ryosuke Kadono, and Yoji Koike

## 6. 問い合わせ先

上智大学理工学部機能創造理工学科

教授 足立 匡 (あだち ただし)

TEL: 03-3238-3402 E-mail: t-adachi@sophia.ac.jp

東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻

教授 小池 洋二 (こいけ ようじ)

TEL: 022-795-7974 E-mail: koike@teion.apph.tohoku.ac.jp

## 7. 用語解説

(注1) 反強磁性ゆらぎ

電子には、自転にたとえられるスピンという極微の磁石のような性質があり、上向きと下向きの2つの状態をとります。隣り合った電子のスピンが互いに逆向きに整列した状態を反強磁性秩序状態といい、逆向きに整列した状態からスピンの向きが時間的に変動する状態を反強磁性ゆらぎ状態といいます。

(注2) 高温超伝導銅酸化物

ある物質を冷やすと、ある温度(臨界温度)以下で、突然、電気抵抗がゼロになります。これを超伝導現象といいます。超伝導は1911年に発見されましたが、およそマイナス270°Cまで冷やさなければなりません。しかし、1986年に銅を含んだ酸化物で高温超伝導が発見され、臨界温度はおよそマイナス140°Cにまで上がりました。高温超伝導の発現メカニズムが解明されれば、冷やす必要がない、室温で超伝導になる物質の発見に対して有力な知見が得られます。

(注3) 強磁性ゆらぎ

隣り合った電子のスピンが互いに同じ向きに整列した状態を強磁性秩序状態といい、同じ向きに整列した状態からスピンの向きが時間的に変動する状態を強磁性ゆらぎ状態といいます。

8. 添付資料

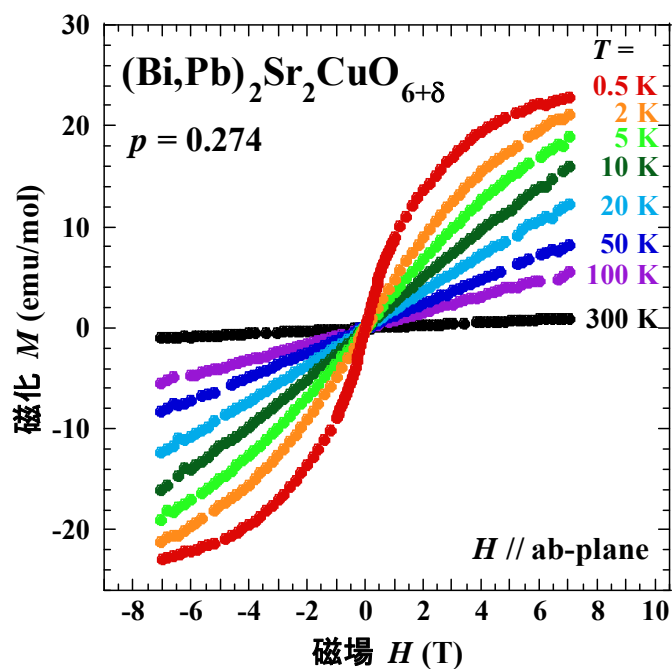


図 1. 超伝導が消失した物質における磁化の磁場変化。磁性のゆらぎがない場合 (300 K) は直線的な変化を示しますが、強磁性ゆらぎが発達すると (0.5 K) S 字型の変化を示します。

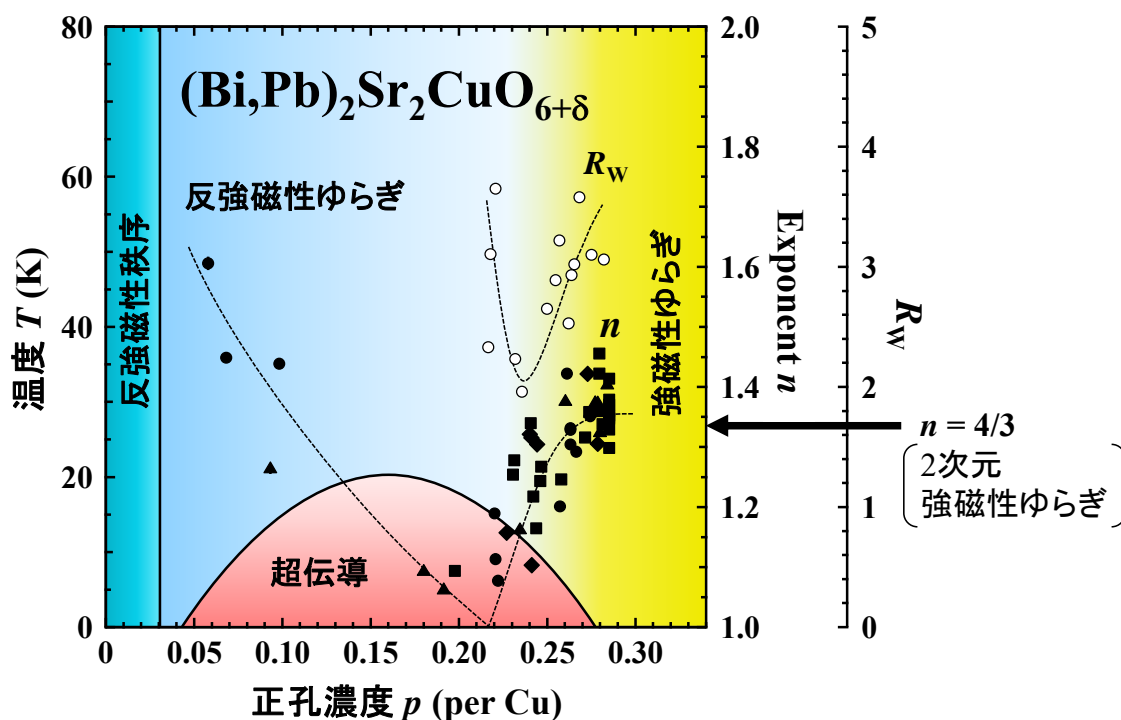


図 2. 本研究で明らかになった銅酸化物高温超伝導体の物性相図。これまでは、反強磁性秩序領域、反強磁性ゆらぎ領域、超伝導領域が知られていましたが、本研究によって正孔濃度~0.25以上の領域で強磁性ゆらぎが存在することが明らかになりました。