

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740218

研究課題名(和文) レーザー励起極超高分解能及び時間分解角度分解光電子分光による高温超伝導体の研究

研究課題名(英文) Electronic properties of high-Tc cuprates studied by laser-based angle- and time-resolved photoemission spectroscopy

研究代表者

近藤 猛 (Kondo, Takeshi)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：40613310

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：液体窒素温度を超える高い臨界温度を示す超伝導体が約30年前銅酸化物において発見されて以来、銅酸化物高温超伝導体は物性研究の対象として長らく主役を担ってきた。それにも関わらず、その高い超伝導臨界温度が生み出される機構に関しては未だ統一した見解が得られていない。

超伝導は、伝導を支配する電子が多数の対を組むことで安定化し、背景にある格子振動や不純物による散乱を受けることなく電流を流す特異な電子状態である。超伝導の発現機構を解明する上で、電子同士を対として結びつける"のり"を同定することが重要となる。本研究ではこの"のり"の起源となりうる励起モードを、電子構造の詳細観察から同定する。

研究成果の概要(英文)：The high temperature superconductivity was found in copper oxide around 30 years ago. Since then, a lot of effort was applied to elucidate the superconducting mechanism. Nevertheless, the community has not yet reached consensus on it.

The superconductivity occurs at low temperatures by generating coupled electrons, which can avoid scattering from the lattice vibration and impurities. In order to clarify the origin of the high temperature superconductivity, it is crucial to identify the "glue" causing the electron pairs. In this study, we identify the collective modes strongly coupled with conduction electrons of the copper oxide through the detailed investigation of electronic structure, which is possibly related to the superconductivity in the material.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：角度分解光電子分光 酸化物高温超伝導体

### 1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導体は発見されてから約 30 年が経ち、これまでに様々な研究が成されてきたにも関わらず、未だその超伝導の機構に関しては統一した見解が得られず、今でもなお、高温超伝導の発現機構解明は、物性物理学の最も挑戦的な課題の一つである。2008 年に鉄ヒ素系物質で銅酸化物に次ぐ第 2 の高温超伝導の発現が確認され、その比較対象が登場したことで、改めて銅酸化物高温超伝導体に注目が集まっている。

### 2. 研究の目的

高温超伝導の発現機構を解明する上で、電子対の形成を仲立ちするボソンを同定することが重要となる。電子とボソンが結合すると、準粒子のエネルギー分散に折れ曲がり構造 (kink 構造) が生じることが期待される。これまでの角度分解光電子分光による研究から、様々な組成を持つ銅酸化物高温超伝導体で、そのような kink 構造が観測されており、対応するボソンの種類や、電子対の形成との関係を巡り、活発な研究及び議論がなされている。我々は、レーザー励起型角度分解電子分光を用いて、Bi 系試料においてギャップノード方向における方向における準粒子分散を精密に観察及び解析する。

### 3. 研究の方法

角度分解光電子分光は、試料に光を照射した際に真空中に飛び出す光電子を、角度とエネルギーの関数としてプロットすることで、バンド分散を直接的に観測できる、物性研究をする上で強力な実験手法である。角度分解光電子分光はこれまでに、放射光やヘリウム放電管による光源を用いた銅酸化物高温超伝導体に対する研究から、*d* 波超伝導対称性や、臨界温度以上の温度から発達する擬ギャップ、あるいは、低ドーピング試料で見せる特異な電子相関効果など、高温超伝導特有の電子物性を明らかにしてきた。

近年我々の研究室では、レーザーによる低エネルギーの光を用いた角度分解光電子分光装置を開発することで、従来の装置を遥かにしのぐエネルギー分解能を達成した。

本研究では、この技術を活用することで観察が可能となるギャップノード近傍の微細な電子構造を見いだす。

銅酸化物高温超伝導の中でも Bi 系試料は BiO 層がファンデルワールス力で弱く結合することから劈開性に優れ、清浄表面が得やすいことから、角度分解光電子分光研究に適している。

我々は幅広いキャリア量を容易に調節できる Bi 系試料である (Bi, Pb)<sub>2</sub>(Sr, La)<sub>2</sub>CuO<sub>6+d</sub> (Bi2201) に着目し、ノード方向での準粒子分散の詳細監査圧を行った。

### 4. 研究成果

(1) それぞれ、 $T_c=60\text{K}$  及び  $T_c=23\text{K}$  を持つ不足ドーピング試料 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub> (Bi2212 UD60K) 及び Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>6+d</sub> (Bi2201 UD23K) のノード方向における準粒子分散を詳細に観察した (図 1)。両者の試料で共に EF の極近傍に明確な kink 構造を観測した。この結果から、準粒子分散に見えるこの微細構造は、銅酸化物高温超伝導体の種類によらず共通に発現するものと結論できる。

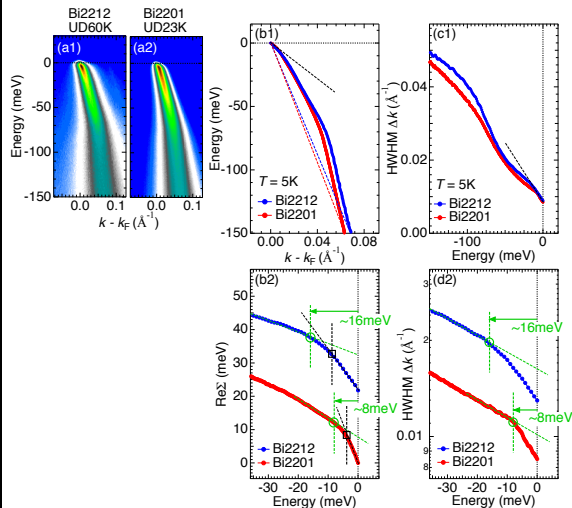


図 1: Bi2212 (UD60K) と Bi2201 (UD23K) の低エネルギーで観測される kink 構造。(a1,a2) ギャップノード方向で測した光電子強度。エネルギーと波数の関数としてプロットする。(b1,b2) (a1,a2) で示す ARPES データにおいて波数分解するエネルギー分布曲線のピーク位置から見積もったバンド分散。(c1,c2) (a1,a2) で示す ARPES データにおいて、エネルギー分解する運動量分布曲線の幅を結合エネルギーの関数として示す。

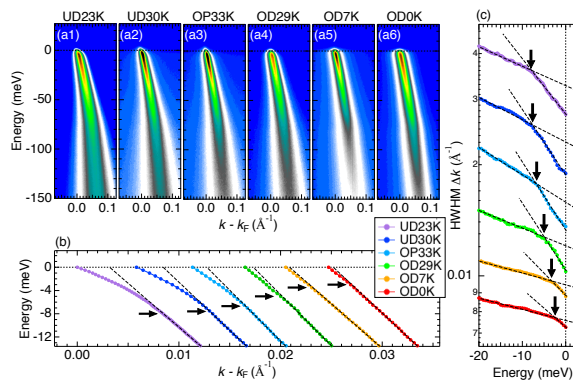


図2：低エネルギーで観測される kink 構造のキャリア量依存性。(a1-a6) ギャップノード方向で測定した光電子強度。エネルギーと波数の関数としてプロットする。右のパネルが  $T_c$  が  $T < 2\text{K}$  まで観測されない過剰ドーブ試料の結果であり、左へ行くに従いより不足ドーブ領域となる。(b) (a1-a6)で示す ARPES データにおいて各波数で見えるエネルギー分布曲線のピーク位置から見積もったバンド分散。(c) (a1-a6)で示す ARPES データにおいて、各エネルギーで見える運動量分布曲線の幅を結合エネルギーの関数として示す。矢印は kink が生じる結合エネルギーを示す。

(2) kink 構造が観測される結合エネルギーは、Bi2201 ( $T_c=23\text{K}$ ) で 約  $8\text{meV}$ 、また Bi2212 ( $T_c=60\text{K}$ ) では約  $16\text{meV}$  と見積もられることから(図1を参照)、低エネルギーで生じる電子-ボソン結合と  $T_c$  とが相関を持つことが示唆される。さらに、結合定数  $\lambda$  を見積もると、Bi2201 では 2.32、Bi2212 で 1.26 と両者で約 2 倍も異なることから、本研究で見いだされた低エネルギーでの kink 構造は、約  $70\text{meV}$  で観測されることで良く知られる kink 構造とは起源が異なるものと判断できる。

(3) Bi2201 の幅広いキャリア量を有する試料に対し、ノード方向での準粒子分散を比較した(図2)。キャリア量の減少と共に、kink が生じる結合エネルギーが増大することを見いだした。また、Bi2201 の結合定数が Bi2212 よりも大きいことが分かった。それに関連し、Bi2212 では過剰ドーブ領域において消失した kink 構造が、Bi2201 では過剰ドーブ領域まで形成されることを見いだした。

(4) 我々の結果は、伝導電子が面内に偏極した音響フォノンと強い相互作用をすることで前方散乱を引き起こし、その結果、低エネルギーでの準粒子分散に折れ曲がり構造が生じる、として理解される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) Y. He, Y. Yin, M. Zech, A. Soumyanarayanan, M. M. Yee, T. Williams, M. C. Boyer, K. Chatterjee, W. D. Wise, I. Zeljkovic, T. Kondo, T. Takeuchi, H. Ikuta, P. Mistark, R. S. Markiewicz, A. Bansil, S. Sachdev, E. W. Hudson, and J. E. Hoffman.

“Fermi Surface and Pseudogap Evolution in a Cuprate Superconductor.”

Science 344, 608 (2014) [査読有り].

DOI: 10.1126/science.1248221

(2) M. Neupane, N. Alidoust, S.-Y. Xu, T. Kondo, Y. Ishida, D.J. Kim, C. Liu, I. Belopolski, Y.J. Jo, T.-R. Chang, H.-T. Jeng, T. Durakiewicz, L. Balicas, H. Lin, A. Bansil, S. Shin, Z. Fisk and M. Z. Hasan.

“Surface electronic structure of the topological Kondo-insulator candidate correlated electron system  $\text{SmB}_6$  .”

Nature Communications 4, 2991 (2013). [査読有り]

DOI: 10.1038/ncomms3991

(3) T. Kondo, A. D. Palczewski, Y. Hamaya, T. Takeuchi, J. S. Wen, Z. J. Xu, G. Gu, and A. Kaminski.

“Formation of Gapless Fermi Arcs and Fingerprints of Order in the Pseudogap State of Cuprate Superconductors.”

Physical Review Letters 111, 157003 (2013) [査読有り]

DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.157003

(4) T. Kondo, Y. Nakashima, W. Malaeb, Y. Ishida, Y. Hamaya, T. Takeuchi, and S. Shin.

“Anomalous Doping Variation of the Nodal Low-Energy Feature of Superconducting  $(\text{Bi,Pb})_2(\text{Sr,L a})_2\text{CuO}_{6+\delta}$  Crystals Revealed by Laser-Based Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy.”

Physical Review Letters 110, 217006 (2013)  
[査読有り].

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.217006

(5) T. Kondo, Y. Nakashima, Y. Ota, Y. Ishida, W. Malaeb, K. Okazaki, M. Kriener, S. Sasaki, K. Segawa, Y. Ando, and S. Shin.

“Anomalous Dressing of Dirac Fermions in the Topological Surface State of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , and Cu-Doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .”

Physical Review Letters 110, 217601 (2013)  
[査読有り].

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.217601

[学会発表] (計 3 件)

(1) 近藤 猛, Walid Malaeb, 石田 行章, 谷口晴香, 前野 悦輝, 中辻 知, 辛 埴

「ルテニウム酸化物  $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$  の表面電子状態: レーザー励起型角度分解光電子分光状態」

2013 年 9 月 28 日 日本物理学会 徳島大学

(2) 近藤 猛, 中島 祐貴, 金井 洋貴, 谷口晴香, Walid Malaeb, 石田 行章, Chuangtian Chen, 渡部 俊太郎, 前野 悦輝, 辛 埴

「レーザー励起型角度分解光電子分光を用いて研究したルテニウム酸化物の表面電子状態」

2013 年 3 月 29 日 日本物理学会 広島大学

(3) 近藤 猛, 中島 祐貴, Walid Malaeb, 石田 行章, 浜谷 陽一郎, 小川 古都, 竹内 恒博, Chuangtian Chen, 渡部 俊太郎, 辛 埴

「レーザー励起型角度分解光電子分光を用

いて研究した銅酸化物高温超伝導体の準粒子分散」

2012 年 9 月 21 日 日本物理学会 横浜国立大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 無し

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者 近藤 猛 (Takeshi Kondo)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号: 40613310

(2) 研究分担者 無し