

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書

◆記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字	TAKAHASHI TAKASHI					
①研究代表者氏名	高橋 隆			②所属研究機関・部局・職	東北大学・大学院理学研究科・教授	
③研究課題名	和文	超高分解能光電子分光装置の開発と高温超伝導体準粒子の研究				
	英文	Development of ultrahigh-resolution photoemission spectrometer and study of quasiparticles in high-temperature superconductors				
④研究経費 金額単位：千円	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度		総合計
	38,000	20,600	18,200	7,300		84,100
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
高橋 隆	東北大学・大学院理学研究科・教授	光電子固体物性	研究全体の遂行と統括			
佐藤 宇史	東北大学・大学院理学研究科・助手	光電子固体物性	光電子分光装置の建設・調整および測定			
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）						
<p>本研究は、超高分解能角度分解光電子分光法を用いて、高温超伝導体中の「準粒子」を直接観測し、その起源を明らかにすることによって、高温超伝導発現機構の解明を目指すものである。高温超伝導発現に直接関与すると考えられるフェルミ準位近傍の「準粒子」は、フェルミ準位近傍のバンド分散中の小さな「折れ曲がり（kink）」として現れ、その結合エネルギー位置および折れ曲がりの大きさが「準粒子」を特徴付けている。このkinkの観測には、非常に高いエネルギー分解能と運動量分解能で、フェルミ準位近傍のエネルギー分散（バンド構造）を測定する必要がある。本研究では、準粒子のエネルギー分散を直接観測できる世界最高水準のエネルギーおよび運動量分解能を持つ「超高分解能角度分解光電子分光装置」の建設と整備改良を行う。建設した「超高分解能角度分解光電子分光装置」を用いて、ホールおよび電子型銅酸化物高温超伝導体、さらにボロン系高温超伝導体について測定を行う。現在、銅酸化物高温超伝導体については、そのkinkの起源について、「フォノン」と「磁気的相互作用（マグノン）」の2つの可能性が提案され、世界中の研究者を巻き込んで大きな論争が展開されている。この高温超伝導発現機構に関する基本的問題に答えるため、様々なドーピングレベルを持つホールおよび電子型高温超伝導体について エネルギー分散中のkinkを直接観測し、その運動量、温度、CuO₂層数、さらに不純物依存性を精密に測定する。実験結果の解析から、超伝導に関与する「準粒子」の起源を明らかにして、高温超伝導発現機構の総合的解明を目指す。</p>						

⑦ 研究成果の概要 (研究目的に対する研究成果を必要に応じて図表等を用いながら、簡潔に記入してください。)

超高分解能光電子分光装置の建設・改良

図1に、建設した「超高分解能光電子分光装置」の概略図を示す。装置は(1)電子エネルギー分析器、(2)光源放電管、(3)測定分析槽、(4)試料準備槽から構成される。目標の高分解能を達成するには、いずれの構成要素も最高の能力を発揮するよう条件整備する必要があった。電子エネルギー分析器については、静電半球型分析器および電子レンズシステムへの電位の安定化とその精密調整、さらに最後段の2次元電子検出器及びCCDカメラの相対位置と検出器の感度補正を徹底的に行った。光源放電管部については、分解能低下の原因となる測定真空槽への不純物ガスおよびイオンの流入を防ぐ目的で、アパーチャーを含む2段の差動排気システムと極端紫外線フィルター機構

を構築した。測定分析槽においては、試料を低温に保ったまま回転できる角度可変型試料マニピュレーターを製作した。さらに、試料の温度低下と槽内の真空度向上を図るため、循環型ヘリウムクライオスタットを用いた4段の熱シールド(図2)を試料基板周りに作成した。試料準備槽においては、迅速な試料交換を図るために、大気圧からの試料搬入移送機構を製作した。これらの改造整備の結果、装置はエネルギー分解能 1.3meV 、運動量分解能 0.005\AA^{-1} 、試料温度 3.7 K 、測定時真空度 $2 \times 10^{-11}\text{ Torr}$ を達成した。図3に本装置を用いて測定した金のフェルミ準位近傍の超高分解能光電子スペクトルを示す。そのフェルミ端の立ち上がりから分解能 1.3meV を達成していることが分かる。

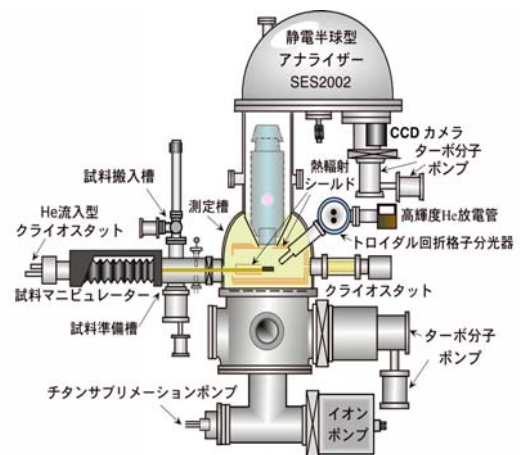


図1 超高分解能光電子分光装置の概略図

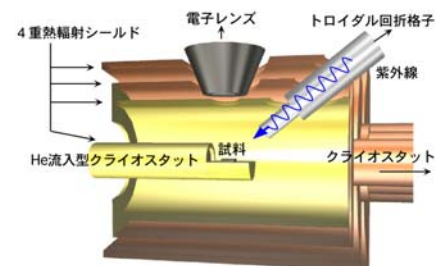


図2 熱輻射シールドの概略図

様々な高温超伝導体についての測定

高温超伝導対中の「準粒子」の直接観測とその起源を同定する事により、高温超伝導発現機構の解明を目指して、以下の高分解能光電子分光研究を行い新しい知見を得た。

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n=1-3$): Bi系高温超伝導体について、 CuO_2 層の数(n)が1枚から3枚の物質について、そのフェルミ面、超伝導ギャップ、コヒーレントピーク強度、擬ギャップ、分散中のkink位置および強度について系統的測定を行った。その結果、これらの物質について、エネルギーギャップとキャリアドーピング量の間にスケール則が成立していることを見出した(Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 067005; Phys. Rev. B **67** (2003) 060501(R))。

kinkの運動量および温度依存性の精密測定: $\text{Bi}2223$ ($n=3$)について、そのエネルギー分散中のkinkの運動量および温度依存性を精密に測定し、その起源について議論した。(Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 157003)。詳細は次ページの特記事項に記述)

Bogoliubov 準粒子の直接観測: 超伝導状態の $\text{Bi}2223$ ($n=3$)について、フェルミ準位極近傍のエネルギー分散を精密に測定し、Bogoliubov 準粒子のエネルギー分散とコヒーレンス因子を実験的に初めて決定した。(Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 217002。詳細は次ページの特記事項に記述)

Bi系高温超伝導体における磁気的同位体効果の観測: $\text{Bi}2212$ ($n=2$)の CuO_2 面に、非磁性のZn、磁性を持つNiを置換した時の電子構造の変化を研究し、エネルギーバンド分散に磁気的同位体効果が現れる事を見出した。(Nature Physics **2** (2006) 27。詳細は次ページの特記事項に記述)

電子型高温超伝導体における非単調型 d 波超伝導ギャップの直接観測: 電子型高温超伝導体 $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$ の超高分解能測定を行い、超伝導ギャップが非単調型の $d_{x^2-y^2}$ 波対称性を示す事を見出した。(Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 017003。詳細は次ページの特記事項に記述)

MgB_2 の2バンド超伝導ギャップの直接観測: 新規ボロン系超伝導体 MgB_2 について超高分解能角度分解光電子分光測定を行い、 σ および π バンドの超伝導ギャップを分離して観測することに成功した。(Nature **423** (2003) 65。詳細は次ページの特記事項に記述)

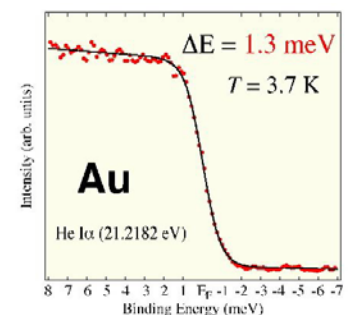


図3 Auのフェルミ端の光電子スペクトル

⑧特記事項 (この研究において得られた独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、当該研究分野及び関連研究分野への影響等、特記すべき事項があれば記入してください。)

(1) 高温超伝導体における Bogoliubov 準粒子の直接観測 (Phys. Rev. Lett. **90** (2002) 217002.)

高温超伝導体の超伝導機構が BCS 理論の枠内で記述できるのかどうかは基本的な問題である。これを検証するために、BCS 理論の基本概念である Bogoliubov 準粒子描像が高温超伝導体で成立しているかどうかを Bi2223($n=3$)単結晶における超高分解能 ARPES で調べた。その結果、世界で初めて、Bogoliubov 準粒子の全エネルギー分散を観測することに成功した。特記すべきは、光電子分光では測定が非常に難しい「フェルミ準位より上のエネルギー分散」までも実験的に決定したことである。このことは、高温超伝導体の超伝導状態が広義の BCS 理論の枠組みで記述できることを示している。

(2) ホール型高温超伝導体バンド分散中の kink の起源 (Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 157003.)

Bi 系高温超伝導体のフェルミ準位近傍のエネルギー分散に観測される「折れ曲がり (kink)」の起源とその超伝導機構との関係について、「フォノン」と「磁氣的相互作用」との間で大きな論争が起きている。我々は、Bi2223 ($n=3$)について、フェルミ面を切る多くの運動量方向でエネルギー分散を測定し、kink の運動量依存性と温度依存性を詳細に測定した(図 4)。その結果、 $(0,0)-(\pi,\pi)$ 方向から $(\pi,0)$ 点に向かうにつれ kink の大きさが増大し、また $(\pi,0)$ 点近傍の kink は超伝導転移温度以上では消滅する事を観測した。この事は、 $(\pi,0)$ 近傍の kink が超伝導と関係し、その起源が磁氣的相互作用であることを示している。

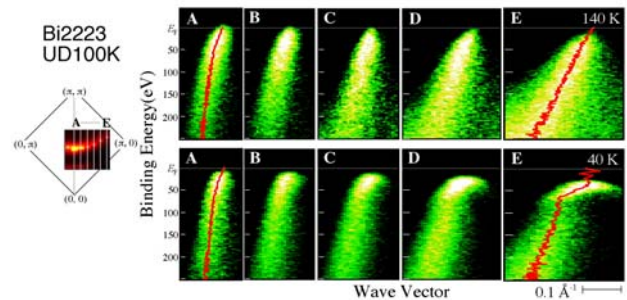


図 4 Bi2223 におけるバンド分散の波数依存性

(3) ボロン系超伝導体 MgB₂ の 2 バンド超伝導ギャップ (Nature **423** (2003) 65.)

$T_c=39$ K を持つボロン系超伝導体 MgB₂ に、2 種類の超伝導ギャップがあるのではないかとの理論的予言 (2 バンド超伝導) が成されていたが、大きな単結晶育成が困難な事からその実験的確認が得られていなかった。我々は、微小 ($0.1 \times 0.1 \times 0.01 \text{ mm}^3$) 単結晶の ARPES 測定に挑戦し、100 個以上の微小単結晶の超高真空下での劈開を試み、その超高分解能 ARPES 測定に成功した。図 5 に、ブリルアンゾーン中 Γ KM 方向のバンド分散と、バンドがフェルミ準位を切る位置で測定した ARPES スペクトルを示す。図から分かるように、 σ バンドで大きな ($\Delta=6.5 \text{ meV}$)、 π バンドで小さな ($\Delta=1.5 \text{ meV}$) ギャップが開いていることが分かる。この事は、MgB₂ に 2 種類の超伝導ギャップが存在していること (2 バンド超伝導) を示している。

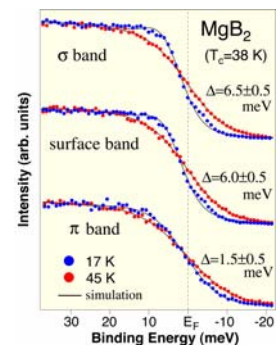


図 5 MgB₂ の超伝導ギャップ

(4) 高温超伝導体における磁氣的同位体効果 (Nature Physics **2** (2006) 27.)

高温超伝導のペアリングの「糊」の役割を果たすのが「磁氣的相互作用」なのか「フォノン」なのかが、現在大きな問題となっている。我々は、CuO₂面の Cu に微量の非磁性不純物 Zn および磁性不純物 Ni を加える事による電子状態における「磁氣的同位体効果」を詳細に調べた。その結果、超伝導ギャップが開かないノード方向では不純物置換による分散への影響が見られないのに対し、超伝導ギャップが存在し、反強磁性相互作用の強い $(\pi,0)$ 点に近いオフノード方向では不純物置換による kink 構造が明確に抑制される事を見出した(図 6)。この事は、超伝導に密接に関わる電子が磁氣励起と強く結合していることを示しており、銅酸化物における磁氣的引力を媒介とした超伝導機構を強く支持している。

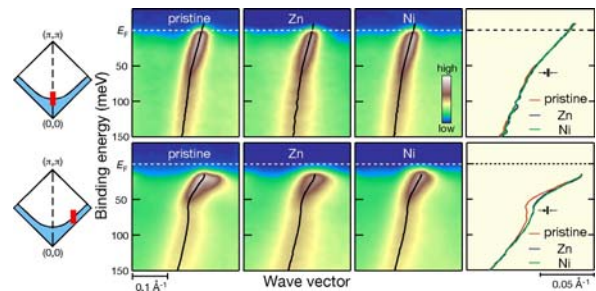


図 6 不純物置換 Bi2212 における kink 構造

(5) 電子型高温超伝導体における非単調 d 波超伝導ギャップ (Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 017003.)

電子型高温超伝導体の超伝導機構がホール型と同じかどうかという問題は、高温超伝導機構の根底に関わる重要な問題であり、その解明が待ち望まれていた。我々は電子型高温超伝導体 Pr_{1.85}LaCe_{0.15}CuO₄ (PLCCO) の超伝導ギャップの精密測定を行い、微小超伝導ギャップの波数依存性を完全決定する事に成功した。その結果、超伝導ギャップの形状が非単調型の $d_{x^2-y^2}$ 型をしており、ギャップの最大値がホットスポット近傍に位置することを見出した(図 7)。この事は、電子型高温超伝導体において磁氣的相互作用が超伝導機構と密接に関係している事を示している。

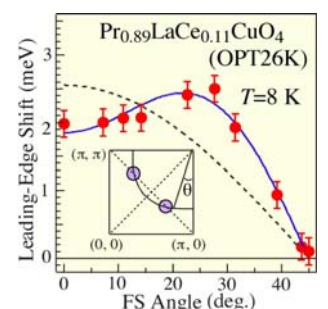


図 7 PLCCO の超伝導ギャップ

⑨研究成果の発表状況（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

（発表論文）

- ① “Impurity effects on electron-mode coupling in high-temperature superconductors”
K. Terashima, H. Matsui, D. Hashimoto, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, T. Yamamoto, and K. Kadowaki
Nature Physics **2** (2006) 27-31.
- (2) “Nondispersive Fermi Arcs and the Absence of Charge Ordering in the Pseudogap Phase of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+\delta}$ ”
U. Chatterjee, M. Shi, A. Kaminski, A. Kanigel, H. M. Fretwell, K. Terashima, T. Takahashi, S. Rosenkranz, Z. Z. Li, H. Raffy, A. Santander-Syro, K. Kadowaki, M. R. Norman, M. Randeria, and J. C. Campuzano.
Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 107006-1-4.
- (3) “Fermi Surface and Anisotropic Spin-Orbit Coupling in Sb(111) Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, M. Arai, and T. Sasaki
Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 046411-1-4.
- (4) “Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of the Insulating Na_xWO_3 : Anderson Localization, Polaron Formation, and Remnant Fermi Surface”
S. Raj, D. Hashimoto, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, D. D. Sarma, P. Mahadevan, and S. Oishi
Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 147603-1-4.
- (5) “Fermi surface and edge-localized state in graphite studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and T. Suematsu
Phys. Rev. B, **73** (2006) 045124-1-5.
- ⑥ “Direct Observation of a Nonmonotonic $d_{x^2-y^2}$ -Wave Superconducting Gap in the Electron-Doped High- T_c Superconductor $\text{Pr}_{0.89}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$ ”
H. Matsui, K. Terashima, T. Sato, T. Takahashi, M. Fujita, K. Yamada
Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 017003-1-4.
- (7) “Fermi Surface Evolution and Luttinger Theorem in Na_xCoO_2 : A Systematic Photoemission Study”
H.-B. Yang, Z.-H. Pan, A.K.P. Sekharan, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, R. Jin, B. C. Sales, D. Mandrus, A. V. Fedorov, Z. Wang, and H. Ding
Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 146401-1-4.
- (8) “Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of the Antiferromagnetic Superconductor, $\text{N}_{1.87}\text{Ce}_{0.13}\text{CuO}_4$ ”
Anisotropic Spin-Correlation gap, Pseudogap, and the Induced Quasiparticle Mass Enhancement”
H. Matsui, K. Terashima, T. Sato, T. Takahashi, S.-C. Wang, H.-B. Yang, H. Ding, T. Uefuji, and K. Yamada
Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 047005-1-4.
- (9) “Angle-resolved photoemission spectroscopy on metallic sodium tungsten bronzes Na_xWO_3 ”
S. Raj, D. Hashimoto, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, S. Ray, A. Chakraborty, D. D. Sarma, P. Mahadevan, W. H. McCarroll, M. Greenblatt
Phys. Rev. B **72** (2005) 125125-1-8.
- (10) “Angle-resolved and resonant photoemission spectroscopy on the heavy-fermion superconductors Ce_2CoIn_8 and Ce_2RhIn_8 ”
S. Raj, Y. Iida, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, S. Ohhara, T. Hayakawa, G. F. Chen, I. Sakamoto, and H. Harima
Phys. Rev. B **71** (2005) 224516-1-8.
- (11) “Momentum anisotropy of the scattering rate in cuprate superconductors”
A. Kaminski, H. M. Fretwell, M. R. Norman, M. Randeria, S. Rosenkranz, U. Chatterjee, J. C. Campuzano, J. Mesot, T. Sato, T. Takahashi, T. Terashima, M. Takano, K. Kadowaki, Z. Z. Li, and H. Raffy
Phys. Rev. B **71** (2005) 014517-1-7.
- (12) “High-resolution ARPES study of quasi-particles in high- T_c superconductors”
T. Takahashi, T. Sato, H. Matsui, and K. Terashima
New Journal of Physics **7** (2005) 105-1-10.
- (13) “High-resolution photoemission study of ZrZn_2 ”
T. Sato, Y. Iida, S. Souma, T. Takahashi, S. Minagawa, N. Kimura, and H. Aoki
J. Electron Spec. Relat. Phenomena **144-147** (2005) 889-891.

- ⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）
- (14) “Ultrahigh-Resolution Photoemission Study of h-ZrRuP”
H. Matsui, D. Hashimoto, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, and I. Shirovani
J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1401.
- (15) “Fermi Surface Topology of $\text{Ca}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{RuO}_4$ Determined by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”
S.-C. Wang, H.-B. Yang, A. K. P. Sekharan, S. Souma, H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, Chenxi Lu, Jiandi Zhang, R. Jin, D. Mandrus, E. W. Plummer, Z. Wang, and H. Ding,
Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 177007-1-4.
- (16) “ARPES on $\text{Na}_{0.6}\text{CoO}_2$: Fermi Surface and Unusual Band Dispersion”
H.-B. Yang, S.-C. Wang, A. K. P. Sekharan, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, T. Takeuchi, J. C. Campuzano, R. Jin, B. C. Sales, D. Mandrus, Z. Wang, and H. Ding,
Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 246403-1-4.
- (17) “X-ray angle-resolved photoemission spectroscopy of CaB_6 ”
S. Souma, T. Takahashi, H. Komatsu, T. Sato, H. Matsui, N. Kimura, H. Aoki, S. Kunii, and J. Akimitsu
Phys. Rev. B **70** (2004) 073104-1-4.
- (18) “High-resolution angle-resolved photoemission study of incommensurate charge-density-wave compound CeTe_3 ”
H. Komoda, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, Y. Ito, and K. Suzuki
Phys. Rev. B **70** (2004) 195101-1-6.
- (19) “Charge-density-wave transition of $1T\text{-VSe}_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Terashima, T. Sato, H. Komatsu, T. Takahashi, N. Maeda, and K. Hayashi
Phys. Rev. B **68** (2004) 155108-1-8.
- (20) “Ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy of La- and Ce-monochalcogenides”
M. Nakayama, H. Aoki, A. Ochiai, T. Ito, H. Kumigashira, T. Takahashi, and H. Harima
Phys. Rev. B **69** (2004) 155116-1-9.
- (21) “Electronic structure of layered transition-metal dichalcogenides $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Xc}_2$ ($\text{Xc}=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Sato, H. Komatsu, K. Terashima, T. Takahashi, M. Shimakawa, and K. Hayashi
J. Phys. Condensed Matter **16** (2004) 8599-8608.
- (22) “Three-dimensional Fermi-surface nesting in $1T\text{-VSe}_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Sato, K. Terashima, S. Souma, H. Matsui, T. Takahashi, H. Yang, S. Wang, H. Ding, N. Maeda and K. Hayashi
J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 3331-3334.
- (23) “The origin of multiple superconducting gap in MgB_2 ”
S. Souma, Y. Machida, T. Sato, T. Takahashi, H. Matsui, S.-C. Wang, H. Ding, A. Kaminski, J. C. Campuzano, S. Sasaki, and K. Kadowaki
Nature (London) **423** (2003) 65-67.
- (24) “Observation of Band Renormalization Effects in Hole-Doped High- T_c Superconductors”
T. Sato, H. Matsui, T. Takahashi, H. Ding, H.-B. Yang, S.-C. Wang, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, T. Terashima, and K. Kadowaki
Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 157003-1-4.
- (25) “BCS-like Bogoliubov Quasiparticle in High- T_c Superconductors Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”
H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, S.-C. Wang, H.-B. Yang, H. Ding, T. Fujii, and T. Watanabe
Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 217002-1-4.
- (26) “Electronic Band Structure and Fermi Surface of CaB_6 Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy,”
S. Souma, H. Komatsu, T. Takahashi, R. Kaji, T. Sasaki, Y. Yokoo, and J. Akimitsu
Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 027202-1-4.

⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

- (27) “Systematics of electronic structure and interactions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n=1-3$) by angle-resolved photoemission spectroscopy”
H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, H. -B. Yang, S.-C. Wang, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, T. Terashima, and K. Kadowaki
Phys. Rev. B **67** (2003) 060501(R)-1-4.
- (28) “Low energy excitation in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n=1-3$) studied by high-resolution ARPES”
H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, H.-B. Yang, S.-C. Wang, H. Ding, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, T. Terashima, and K. Kadowaki
Int. J. Mod. Phys. B **17** (2003) 3554-3558.
- (29) “Low energy excitation and scaling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n=1-3$): Angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Sato, H. Matsui, S. Nishina, T. Takahashi, T. Fujii, T. Watanabe, and A. Matsuda
Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 067005.
- (30) “Electronic structure of black SmS : I $4d-4f$ resonance and angle-integrated valence-band photoemission spectroscopy”
A. Chainani, H. Kumigashira, T. Ito, T. Sato, T. Takahashi, T. Yokoya, T. Higuchi, T. Takeuchi, S. Shin, and N. K. Sato
Phys. Rev. B **65** (2002) 155201.
- (31) “Angle-resolved photoemission study of novel boride compounds”
T. Takahashi, S. Souma, and T. Sato
J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) Suppl. 5-10.
- (32) “Progress of high-resolution photoemission spectroscopy in strongly correlated electron systems”
T. Takahashi
Surface Review and Letters **9** (2002) 995-1006.

発表論文 他 21 件

(国際会議招待講演)

- T. Takahashi
“Recent ARPES results from hole-doped cuprates”
4th Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (Sendai, Nov. 22-24, 2004)
- T. Takahashi
“ARPES study of many-body interaction in high- T_c superconductors, phonon or magnon?”
Yukawa Int. Symp. Physics of Strongly Correlated Electron Systems (Kyoto, Nov. 1-4, 2004)
- T. Takahashi
“ARPES study on many-body interactions in high- T_c cuprates: origin of kink in energy dispersion”
7th Int. Conf. Novel Superconductors (Sitges, Spain, July 11-16, 2004)
- T. Takahashi
“Many-body interaction in high- T_c cuprates studied by ARPES”
Int. Symp. Synchrotron Radiation Research for Spin and Electronic States in d and f Electron Systems (Hiroshima, Nov. 19-21, 2003)
- T. Takahashi
“Many-body interaction in high- T_c cuprates studied by ARPES”
3rd Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (Sendai, Nov. 5-8, 2003)
- T. Takahashi
“High-resolution angle-resolved photoemission study of novel boride compounds”
7th Gernam-Japanese Symp. Cooperative Quantum Phenomena and Superconductivity in Strongly Correlated Electron Systems (Seeon, Germany, July 14-18, 2002)

国際会議および学会講演 他 124 件