

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04004

研究課題名(和文)放射光X線共鳴非弾性散乱による強相関電子の動的電荷相関の研究

研究課題名(英文) Dynamical charge correlation of strongly correlated electrons studied by resonant inelastic scattering of synchrotron x-rays

研究代表者

石井 賢司 (ISHII, Kenji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 放射光科学研究センター・上席研究員(定常)

研究者番号：40343933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：酸素K吸収端の共鳴非弾性X線散乱(RIXS)を用いて、ホールドーブ型銅酸化物の電荷励起の観測に成功し、その運動量・ドーブ量依存性を明らかにした。また、ホールドーブ型ニッケル酸化物の電荷励起は、スピンや格子自由度との結合によって生じるホールの局在性の強さに起因して、運動量依存性の大きさや電荷秩序のエネルギースケールが銅酸化物とは対照的であった。電子ドーブ型銅酸化物では、銅K吸収端と銅L3吸収端で観測される電荷励起が良い一致を示し、複数の吸収端の相補利用の重要性を示す実例となった。技術開発を行った銅K吸収端RIXSでは44 meVのエネルギー分解能を達成し、一次元銅酸化物での励起観測に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強相関遷移金属酸化物を対象として、これまでほとんど議論されてこなかった運動量依存性まで含めた電荷励起を通して電子状態、物性の議論が行えるようになり、その観測においてRIXSが有効であることを示すことができたことが学術的意義である。RIXSは触媒や電池電極など、遷移金属を含んだ実用材料を調べる上でも有用である。本研究で得られた知見はこれらの材料の電子状態解明に役立つと期待でき、材料の性能向上を通して研究成果を社会に還元できると期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded to observe charge excitations in hole-doped cuprates using resonant inelastic x-ray scattering at the oxygen K-edge and clarified their momentum and doping dependence. Charge excitations in hole-doped nickelates show that the momentum dependence and energy scale of charge order are contrasting to those of the cuprates. The contrasts in the nickelates originate from the localized character of the holes which strongly couple with the spin and lattice degrees of freedom. In electron-doped cuprates, we found that the peak position and width of the charge excitations observed in Cu K-edge RIXS coincide excellently with those in Cu L3-edge RIXS, demonstrating the importance of complementary use of the multiple edges in RIXS. In the technical development of RIXS, we achieved the energy resolution of 44 meV at the Cu K-edge and applied it to observe electronic excitations in the one-dimensional cuprate.

研究分野：固体物理学

キーワード：物性実験 量子ビーム 強相関電子系 光物性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系の代表物質である銅酸化物は、高温超伝導だけでなく、擬ギャップや電荷秩序などの電荷ドーピングされたモット絶縁体における強相関金属としての振る舞いが現れ、量子多体系の主たる研究対象となっている。これらの物性は、電荷、スピン、さらに格子を含めた多自由度がお互いに相関することに由来しており、幅広いエネルギーに渡るこれらのダイナミクスの全体像を明らかにすることは、強相関金属の理解には不可欠である。

近年、高輝度放射光源の進歩により、運動量の大きな X 線領域の光が電子励起観測のプロープとして利用されるようになり、X 線のエネルギーを内殻電子準位に共鳴させた共鳴非弾性 X 線散乱 (Resonant Inelastic X-ray Scattering, RIXS) を用いることで、エネルギー・運動量 ($Q-\omega$) 空間での電子励起の研究が可能となってきた。銅酸化物超伝導体のスピンドイナミクスについては、銅 L_3 吸収端の RIXS で高エネルギー部分が観測され、これまでの中性子非弾性散乱による低エネルギー部分の研究と合わせて、 $Q-\omega$ 空間での全貌がわかってきた。我々は、銅 L_3 吸収端 RIXS を用いた研究で電子ドーピングよりスピン励起が高エネルギーにシフトすることを見出し[1]、母物質の反強磁性スピン波のエネルギーを維持するホールドーピング型[2]とは全く対照的であることが明らかとなった。一方、スピンのカウンターパートとなる電荷のダイナミクスについては、従来の光学伝導度測定などによる研究では $Q=0$ に議論が限られていることから、RIXS に $Q-\omega$ 空間の全容解明の役割が期待されている状況であった。また、銅酸化物超伝導体における電荷秩序は、従来はストライプ秩序として知られた La 系のみの特徴と考えられていたが、最近になって普遍的に観測されるに至り[3,4]、ホールドーピング、電子ドーピング双方とも電荷秩序相、及び、その近傍での電荷ダイナミクスの解明が課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、銅酸化物を主たる対象として、構成元素の吸収端 (酸素 K、銅 L_3 、K) を適切に使い分けて RIXS 実験を行うことで電荷の動的相関を幅広い $Q-\omega$ 空間に渡って調べ、以下の課題に取り組むことを目的とする。

(1) 電荷ドーピングによるモット絶縁体の金属化過程

強相関電子系においては、「電荷ドーピングによってどのように反強磁性モット絶縁体から金属へと変化していくか」という点が重要な問題である。その問題に取り組む上での第一かつ重要なステップとして、電荷の動的相関の系統的なドーピング量依存性、及び、そのホールドーピング、電子ドーピング間での類似点、相違点を明らかにする。

(2) 電荷秩序相、及び、その近傍での電荷ダイナミクス

電荷秩序相内、及び、秩序が融解したところでの電荷励起を RIXS で観測し、電荷秩序に関わる相互作用の効果を明らかにする。

(3) 電荷ダイナミクスのスピン・格子自由度との結合

上述したように、強相関電子系では電荷、スピン、さらに格子を含めた多自由度相関が物性を支配している。そのような相関を電荷励起の観測を通して明らかにする。また、直接的にスピンの交換相互作用や格子振動と同程度のエネルギーにある励起の観測に向けて、高いエネルギー分解能を得るための技術開発を行い、そのエネルギー領域の電荷励起観測を目指す。

3. 研究の方法

銅酸化物は、化学置換によりモット絶縁体から金属・超伝導体まで精密な電荷濃度制御が可能な物質である $La_{2-x}(Ba,Sr)_xCuO_4$ (LSCO、LBCO)、 $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ (NCCO) をそれぞれホールドーピング型、電子ドーピング型として選び、さらに、銅酸化物との対比として LSCO と同じ結晶構造をもつホールドーピング型ニッケル酸化物 $La_{2-x}Sr_xNiO_4$ (LSNO) も研究対象に含めた。いずれも単結晶試料を用い、励起の運動量依存性を測定した。RIXS の実験は、主に SPring-8 の BL07LSU (軟 X 線)、BL11XU (硬 X 線) で行い、一部は海外の放射光施設も利用した。

4. 研究成果

(1) 電荷ドーピングによるモット絶縁体の金属化過程

酸素 K 吸収端 RIXS によるホールドーピング型銅酸化物の電荷励起観測[5]

銅酸化物にドーピングされたホールは主に酸素 $2p$ 軌道を占有し、酸素 K 吸収端の吸収スペクトルにはホールドーピングに伴って強度が増大するピークが現れることが知られている[6]。このピークに入射 X 線エネルギーを合わせて LSCO、LBCO の RIXS を測定したところ、サブ eV 領域に運動量依存性を持った電荷励起を観測することに成功した。従来、酸素 K 吸収端の RIXS はモット絶縁体物質への適用がほとんどであったが、ホールドーピングした物質に適用することで、ドーピングしたホールの運動に対応する電荷励起の初めての観測例となった。また、銅 K 吸収端 RIXS[7] では、オーバードーピング領域にある試料で電荷励起の観測が報告されていたが、散乱強度が弱い上、強い弾性散乱のためにサブ eV 領域の観測は難しい状況にあった。今回の成功により、サブ eV 領域にある電荷励起の詳細が議論可能となった。また、この結果は、ドーピングされた電子は銅の $3d$ 軌道を占有するため、電子ドーピング型では銅の K、 L_3 吸収端 RIXS が電荷励起に敏感であることと対をなすものである。

図 1 に LSCO ($x=0.25$) の酸素 K 吸収端 RIXS スペクトルを示す。CuO₂ 面内の運動量 (q) に対して正の分散を持ち、装置分解能 (約 180 meV) よりも幅が広がっていることがわかる。

また、ドーピング依存性の測定から、この励起はホール濃度の増大に伴い高エネルギーにシフトすることも明らかとなった。これらの特徴は、 24CuO_2 ユニットの 3 バンドハバードモデルに対して計算した酸素 $2p$ 軌道上の動的電荷構造因子と一致しており、観測された励起はホールがドーブされたバンド内での電荷励起が起源であると確認できた。また、励起の幅が広がっているのは電子間相互作用の影響であり、強相関電子系の特徴と言える。さらに、電子ドーブ型銅酸化物 NCCO で観測された電荷励起 [1] と同じ電荷濃度で比較すると、電子ドーブ型の方が大きな分散を持っていることがわかった。この結果は、電荷移動ギャップの小さい NCCO の方がより大きな電荷のホッピングエネルギーを持つことによるものとして理解できる。

電子ドーブ型銅酸化物の電荷励起

- 銅 K 吸収端 RIXS の銅 L_3 吸収端 RIXS との比較 - [8]

電子ドーブ型銅酸化物においても、ドーブされた電子の運動に対応する励起がホールドーブ型と同様にサブ eV 領域に存在し、我々も含めたいくつかのグループが銅 K 吸収端、銅 L_3 吸収端の RIXS で観測を行ってきた。これまでは主に銅 K 吸収端が高エネルギー側、銅 L_3 吸収端が低エネルギー側を担ってきたが、銅 K 吸収端のエネルギー分解能が向上し、両方の吸収端で観測できるエネルギー領域の重なりが大きくなったため、銅 K 吸収端で観測される電荷励起を銅 L_3 吸収端での観測結果と詳細に比較した。

銅 K 吸収端 RIXS で観測された電荷励起のピーク位置と幅を CuO_2 面内の運動量に対してプロットした結果を図 2 に示す。ピーク位置が電子ドーブが進むにつれて高いエネルギーにシフトしている点は、ホールドーブと同じ特徴である。併せてプロットしている、NCCO [1]、及び、 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (LCCO) [9] の銅 L_3 吸収端 RIXS の結果と比較すると、同じ電子濃度 (x) では、ピーク位置に加えてピーク幅も両吸収端での一致が非常に良いことがわかる。($x = 0.175$ と 0.18 は同じ電子濃度とみなす。) 従って、銅 K 吸収端と銅 L_3 吸収端で観測される電荷励起は同じ起源であると言える。さらに、両吸収端でピーク幅が一致していることは、ピークの広がりには RIXS の散乱過程によるものではなく、物質固有の電子状態を反映しており、そこから電荷に働く相互作用の効果が議論可能となったことを意味している。

ホールドーブ型ニッケル酸化物の電荷励起 [10]

高温超伝導体の母物質などモット絶縁体である銅酸化物は、銅 $3d$ 軌道のモットギャップの間に酸素 $2p$ 軌道が存在した電荷移動型の絶縁体であるため、ドーブされたホールは主に酸素 $2p$ 軌道を占有することになる。その結果、酸素 K 吸収端の RIXS が電荷励起の観測に有効となり、実際、においてそれが実証された。ニッケル酸化物の母物質も同様に電荷移動型の絶縁体であり、酸素 K 吸収端の RIXS でホールドーブ型での電荷励起の観測が期待できる。実際、ホールドーブ型ニッケル酸化物 LSNO で実験を行なったところ、電荷移動ギャップより低エネルギーの領域に、ドーブされたホールの運動に対応する励起が観測された。

図 3 に LSNO ($x = 0.33$) の酸素 K 吸収端 RIXS スペクトルを示す。単一のピーク構造であった銅酸化物とは対照的に、ニッケル酸化物ではサブ eV から 2 eV にかけて、複数のピークが観測される。エネルギーの低い 0.6 eV のピークは Ni^{2+} サイトのスピン $S = 1$ が保たれた電荷励起であるのに対し、高エネルギー側にある 1.5 eV 、 2.0 eV のピークは、ホールが動く際に Ni^{2+} サイトを $S = 0$ とするようなスピン状態、 $3d$ 電子配置の変化を伴った励起であると考えられる [11]。一方、銅酸化物では Cu^{2+} サイトは $S = 1/2$ を保ったままであることから、単一の励起となる。さらに重要な銅酸化物との違いとして、ニ

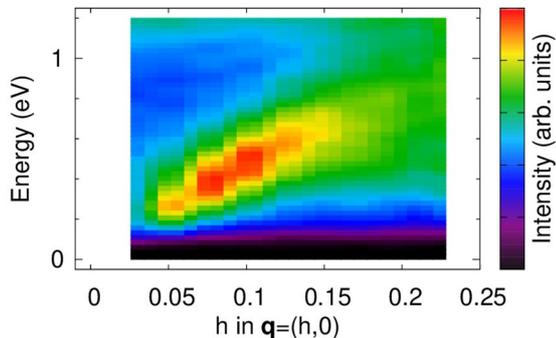


図 1: LSCO $x = 0.25$ の酸素 K 吸収端 RIXS スペクトル。

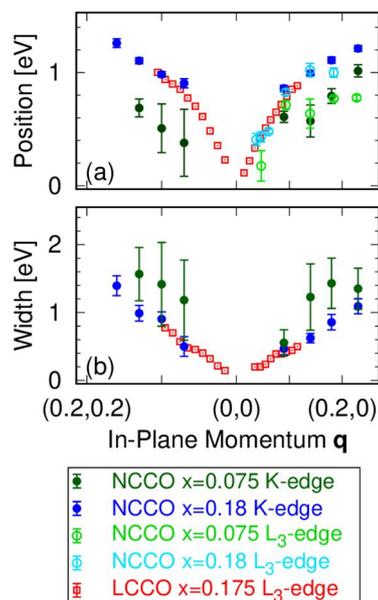


図 2: RIXS で観測される電子ドーブ型銅酸化物の電荷励起の (a) ピーク位置と (b) ピーク幅。

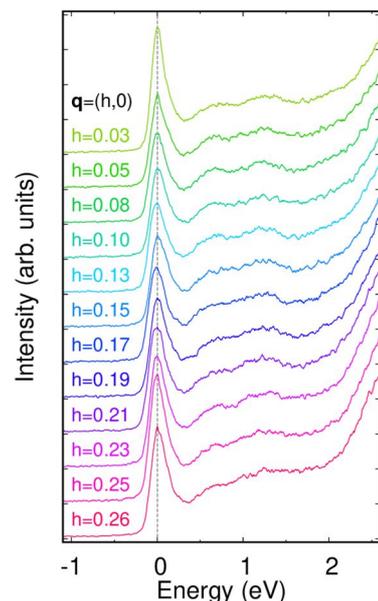


図 3: LSNO $x = 0.33$ の酸素 K 吸収端 RIXS スペクトル。

ニッケル酸化物の電荷励起は運動量依存性を持たないことが明らかとなった。この結果は、銅酸化物では Cu あたり数%のホールドーブで容易に金属化するのに対し、ニッケル酸化物は $x = 0.33$ においても絶縁体であり、ホールが局在化していることと対応している。

以上の結果から、電荷移動型の絶縁体にホールをドーブした遷移金属酸化物においては、酸素 K 吸収端の RIXS が電荷励起の観測に極めて有効であることが実証できた。

(2) 電荷秩序相、及び、その近傍での電荷ダイナミクス[5,10]

(1)で測定を行ったホールドーブ型の銅酸化物 LBCO、ニッケル酸化物 LSNO は、それぞれ $x = 0.125, 0.33$ 付近で電荷秩序を示すことが知られている。LBCO の転移温度は 50 K、波数は $\mathbf{q} \sim (0.22, 0)$ 、LSNO は転移温度 240 K、波数 $\mathbf{q} \sim (0.33, 0.33)$ である。これらの電荷秩序と関連した励起、もしくは電荷秩序に伴う電子状態変化を探索するため、酸素 K 吸収端 RIXS の測定を行った。なお、LBCO では電荷秩序の波数での測定が酸素 K 吸収端で可能であるが、LSNO では波長による制約から電荷秩序の波数には届かない。

LBCO については、転移温度の上下で $\mathbf{q} = (0.22, 0)$ 近傍での測定を行ったが、秩序化による弾性散乱の強度増大(超格子反射)は観測されたものの、電荷励起には温度変化は見られず、測定したエネルギー分解能(約 180 meV)の範囲では、電荷秩序と関連した励起、電荷秩序に伴う電子状態変化は観測されなかった。一方、LSNO においては、図 4 に示すように顕著な温度変化が観測された。低温で 0.6 eV 付近にあったピークが、転移温度 240 K を境に、高温側では 0.1 eV 程度低エネルギーにシフトしていることがわかる。このような電荷励起スペクトルの温度依存性に現れた銅酸化物とニッケル酸化物の違いは、電荷秩序のエネルギースケール、さらには秩序を引き起こす相互作用の大きさが異なることを反映したものと考えている。

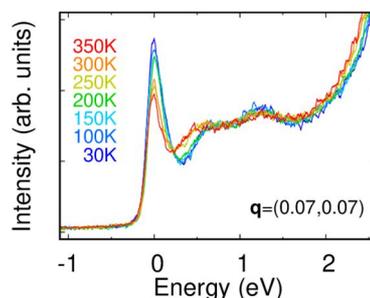


図 4: LSNO $x = 0.33$ の酸素 K 吸収端 RIXS スペクトルの温度依存性。

(3) 電荷ダイナミクスのスピン・格子自由度との結合

酸素 K 吸収端で観測された電荷励起に対するスピン・格子自由度の役割

(1)、(2)で観測された電荷励起についての銅酸化物とニッケル酸化物の対照的な振る舞いは、スピン・格子自由度との結合を考えることで理解できる。ニッケル酸化物におけるホールは、電子格子相互作用と電子相関との相乗作用により、強いポーラロン効果の影響を受けていることが指摘されている[12]。このポーラロン効果がホールの局在性を高め、より大きなエネルギースケールでの電荷秩序を引き起こす。さらに、ニッケル酸化物では、スピン $S = 1$ の反強磁性バックグラウンドの中でホールは動くこととなり、量子揺らぎの大きな $S = 1/2$ の銅酸化物と比べると、ホールの局在性は高まる。一方、銅酸化物ではホールの局在性は低く、容易に金属、さらには超伝導体となり、電荷秩序のエネルギースケールも低く抑えられていると考えられる。

低エネルギー励起観測に向けた銅 K 吸収端 RIXS の高エネルギー分解能化

本研究課題では、研究代表者が装置担当者を務めている SPring-8 の BL11XU において、銅 K 吸収端のエネルギー分解能を向上させるための技術開発を行った。分光素子となるモノクロメーター、アナライザー、及び、それらを制御するための駆動機構を整備した。その結果、非対称 Si(444)反射モノクロメーターと Ge(733)反射アナライザーの組み合わせで 50 meV のエネルギー分解能を達成した。さらに、石英の(224)反射アナライザーを用いた場合には、最高で 44 meV まで向上させることができた。

得られた高エネルギー分解能を利用して、頂点共有一次元鎖を有する銅酸化物 Sr_2CuO_3 でテスト測定を行った。この物質は $S = 1/2$ の一次元スピン系とみなすことができ、低エネルギーに観測されることが期待される 2 スピノン励起は、すでに $Q-\omega$ 依存性がよく理解されている[13]。図 5 に測定結果を示す。鎖方向の運動量 (q) は 0.25 であり、スピン間の交換相互作用 240 meV から、この運動量では 2 スピノン励起は 0.45 eV 付近に現れると予想される。実際に実験で観測されたピーク位置はこの予想と非常によく一致しており、高エネルギー分解能銅 K 吸収端 RIXS での励起観測を達成することができた。銅 K 吸収端では、銅酸化物超伝導体母物質での 2 マグノンの観測例[14]はあるが、一次元系での 2 スピノンの観測はこれが世界で初めてである。

しかしながら、銅 K 吸収端 RIXS では Sr_2CuO_3 の測定に予想以上のビームタイムを要したために、電荷ドーブされた銅酸化物の電荷励起観測には至らなかった。また、海外の放射光施設で予定していた高エネルギー分解能での酸素 K 吸収端、銅 L_3 吸収端の RIXS 実験も諸事情によりビームタイムがキャンセルとなってしまったため、これらの測定は今後の課題として残された。

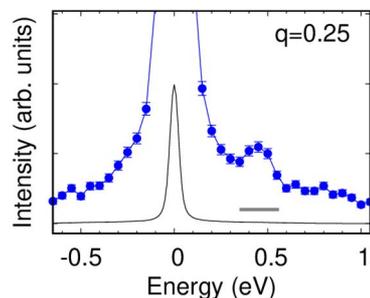


図 5: Sr_2CuO_3 の高エネルギー分解能での銅 K 吸収端 RIXS スペクトル。黒実線は分解能関数、横棒は分解能も考慮した 2 スピノン励起の現れるエネルギー範囲を示す。

(4) まとめ

銅酸化物の電子状態の記述には t - J モデルがしばしば用いられ、その励起スペクトルは幅広い Q - ω 空間で見ると、電荷励起は t のエネルギースケール、スピン励起は J のエネルギースケールに現れる。本研究で行った酸素 K 吸収端 RIXS でホールドープ型の電荷励起が観測できたことで、ホールドープ型、電子ドープ型双方で、これらのエネルギースケールにある電荷・スピン励起の全体像解明が完了したことになる。ホールドープ型の電荷励起観測における酸素 K 吸収端 RIXS の有効性も実証され、電荷励起の運動量依存性の大きさや電荷秩序のエネルギースケールが、銅酸化物とニッケル酸化物で対照的であることを明らかにすることができた。これらの違いは、スピンや格子自由度との結合によって生じるホールの局在性の強さに起因していると考えられる。

NCCO の電荷励起では、銅 K 吸収端と銅 L_3 吸収端での測定が良い一致を示すことが明らかになった。さらにこの結果は、異なる吸収端の RIXS を相補的に利用することの重要性も示している。また、技術開発を行った銅 K 吸収端 RIXS では、最高で 44 meV のエネルギー分解能を達成し、それを利用したデモンストレーションとして、 Sr_2CuO_3 の 2 スピノンの観測に成功した。

< 引用文献 >

- [1] K. Ishii *et al.*, Nat. Commun. **5**, 3714 (2014).
- [2] M. Le Tacon *et al.*, Nat. Phys. **7**, 725 (2011).
- [3] G. Ghiringhelli *et al.*, Science **337**, 821 (2012).
- [4] E. H. da Silva Neto *et al.*, Science **347**, 282 (2015).
- [5] K. Ishii *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 115148 (2017).
- [6] C. T. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **66**, 104 (1991).
- [7] S. Wakimoto *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 104511 (2013).
- [8] K. Ishii *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 075001 (2019).
- [9] M. Hepting *et al.*, Nature **563**, 374 (2018).
- [10] K. Yamagami, K. Ishii *et al.*, submitted to Phys. Rev. B (arXiv:1909.01942).
- [11] K. Tsutsui *et al.*, Phys. Rev. B **59**, 9729 (1999).
- [12] J. Zaanen *et al.*, Phys. Rev. B **50**, 7222 (1994).
- [13] J. Schlappa *et al.*, Nat. Commun. **9**, 5394 (2018).
- [14] J. P. Hill *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 097001 (2008).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ishii Kenji, Kurooka Masahito, Shimizu Yusuke, Fujita Masaki, Yamada Kazuyoshi, Mizuki Jun 'ichiro	4. 巻 88
2. 論文標題 Charge Excitations in Nd _{2-x} Ce _x CuO ₄ Observed with Resonant Inelastic X-ray Scattering: Comparison of Cu K-edge with Cu L ₃ -edge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 075001 ~ 075001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.075001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Ishii, Takami Tohyama, Shun Asano, Kentaro Sato, Masaki Fujita, Shuichi Wakimoto, Kenji Tsutsui, Shigetoshi Sota, Jun Miyawaki, Hideharu Niwa, Yoshihisa Harada, Jonathan Pellicciari, Yaobo Huang, Thorsten Schmitt, Yoshiya Yamamoto, Jun 'ichiro Mizuki	4. 巻 96
2. 論文標題 Observation of momentum-dependent charge excitations in hole-doped cuprates using resonant inelastic x-ray scattering at the oxygen K edge	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115148-1--7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.115148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takami Tohyama, Kenji Tsutsui	4. 巻 -
2. 論文標題 Spectral weight of resonant inelastic X-ray scattering in doped cuprates: Effect of core-hole lifetime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217979218400179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Tsutsui, Takami Tohyama	4. 巻 94
2. 論文標題 Incident-energy-dependent spectral weight of resonant inelastic x-ray scattering in doped cuprates	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085144-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.085144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計41件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 山神光平, 石井賢司, 池田啓祐, 平田靖透, 宮脇淳, 原田慈久, 浅野駿, 藤田全基, 和達大樹
2. 発表標題 酸素K端共鳴非弾性X線散乱を用いた層状ペロブスカイトNi酸化物の電荷励起観測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山神光平, 石井賢司, 池田啓介, 平田靖透, 宮脇淳, 原田慈久, 浅野駿, 藤田全基, 和達大樹
2. 発表標題 酸素K端共鳴非弾性X線散乱を用いたLa ₂ -xSrxNiO ₄ + の電荷励起観測
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山神光平, 石井賢司, 池田啓祐, 平田靖透, 宮脇淳, 原田慈久, 浅野駿, 藤田全基, 和達大樹
2. 発表標題 共鳴非弾性軟X線散乱を用いたペロブスカイトNi酸化物の電荷秩序状態観測
3. 学会等名 東京大学物性研究所短期研究会 軟X線放射光科学のアップシフト
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Biqiong Yu, Kenji Ishii, Shun Asano, Masaki Fujita, Diego Casa, Guichuan Yu, Martin Greven
2. 発表標題 High temperature RIXS study of charge transfer excitations in cuprates
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Ishii, Shun Asano, Masaki Fujita, Masumi Ashida, Jun-ichiro Mizuki, Biqiong Yu, Martin Greven, Jun Okamoto, Amol Singh, Di-Jing Huang
2. 発表標題 Reduction annealing effects on charge and spin excitations in Nd ₂ -xCe _x CuO ₄
3. 学会等名 Workshop on Resonant Inelastic and Elastic X-ray Scattering 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 芦田万純, 石井賢司, 浅野駿, 藤田全基, 岡本淳, A. Singh, D. J. Huang, 水木純一郎
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導体Nd ₂ -xCe _x CuO ₄ の共鳴非弾性X線散乱測定
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 共鳴非弾性X線散乱による電子励起の観測
3. 学会等名 量子ビーム若手研究会/CMRCプロジェクト研究会「超伝導体とその周辺物質に対する量子ビーム研究の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 共鳴非弾性X線散乱による銅酸化物の電荷・スピン励起の観測
3. 学会等名 SPring-8シンポジウム・サテライト研究会「計算科学による分光理論の進展 -SPring-8との連携を目指して-」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 筒井健二, 遠山貴巳
2. 発表標題 一次元ハバード模型に対する銅L端RIXSの入射エネルギー依存性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 筒井健二
2. 発表標題 一次元引力型ハバード模型に対するRIXSスペクトルのクラスター計算
3. 学会等名 SPring-8シンポジウム・サテライト研究会 「計算科学による分光理論の進展 ~SPring-8との連携を目指して~」 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Ishii, Takami Tohyama, Shun Asano, Kentaro Sato, Masaki Fujita, Shuichi Wakimoto, Kenji Tustsui, Shigetoshi Sota, Jun Miyawaki, Hideharu Niwa, Yoshihisa Harada, Jonathan Pelliciari, Yaobo Huang, Thorsten Schmitt, Yoshiya Yamamoto, and Jun 'ichiro Mizuki
2. 発表標題 Observation of a dispersive charge mode in hole-doped cuprates using resonant inelastic x-ray scattering at the oxygen K edge
3. 学会等名 The 10th international conference on inelastic x-ray scattering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Ishii
2. 発表標題 Spin and Charge Excitations in Doped Cuprates Observed with RIXS
3. 学会等名 National Synchrotron Radiation Research Center Users' Meeting and Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Ishii
2. 発表標題 Resonant inelastic x-ray scattering experiments on correlated electron systems
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題 (7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料 の創成」 サブ課題G 第7回 「共通基盤シミュレーション手法」連続研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井賢司, 遠山貴巳, 浅野駿, 佐藤研太郎, 藤田全基, 脇本秀一, 宮脇淳, 丹羽秀治, 原田慈久, J. Pellicciari, Y. Huang, T. Schmitt, 山本義哉, 水木純一郎
2. 発表標題 酸素 K 吸収端共鳴非弾性 X 線散乱によるホールドープ型銅酸化物超伝導体の電荷励起
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井賢司, 遠山貴巳, 浅野駿, 佐藤研太郎, 藤田全基, 脇本秀一, 宮脇淳, 丹羽秀治, 原田慈久, J. Pellicciari, Y. Huang, T. Schmitt, 山本義哉, 水木純一郎
2. 発表標題 酸素K吸収端共鳴非弾性X線散乱によるホールドープ型銅酸化物超伝導体の電荷励起
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun'ichiro Mizuki
2. 発表標題 Electronic Excitations of Copper- and Iron-based Superconductors Studied by Resonant and Non-Resonant Inelastic X-ray Scattering
3. 学会等名 International Conference on Advanced Materials 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun'ichiro Mizuki
2. 発表標題 Electronic Excitation of Cuprates and Iron-based Superconductors Studies by Inelastic X-ray Scattering
3. 学会等名 4th Annual Global Congress of Knowledge Economy-2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun'ichiro Mizuki
2. 発表標題 Resonant Inelastic X-ray Scattering study in Materials science
3. 学会等名 6th Annual Conference of Analytix 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 Resonant inelastic x-ray scattering studies of spin and charge excitations in transition metal oxides
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題 (7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料 の創成」サブ課題G 第4回「共通基盤シミュレーション手法」連続研究会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ishii, M. Yoshida, M. Naka, S. Ishihara, I. Jarrige, K. Ikeuchi, Y. Murakami, K. Kudo, Y. Koike, T. Nagata, Y. Fukada, N. Ikeda, J. Mizuki
2. 発表標題 Momentum-resolved charge fluctuations proximate to the charge-order phase measured by resonant inelastic x-ray scattering
3. 学会等名 International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids, 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Ishii
2. 発表標題 Dispersive charge excitations in hole-doped ladder cuprates
3. 学会等名 Workshop on Resonant Inelastic and Elastic X-Ray Scattering 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 筒井健二
2. 発表標題 クラスター計算に基づく銅酸化物高温超伝導体の銅L端共鳴非弾性X線散乱スペクトル
3. 学会等名 理論研究会サテライトミーティング「放射光と計算物質科学の連携を目指して」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 筒井健二, 遠山貴巳
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導物質における銅L端RIXSの入射エネルギー依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 放射光共鳴非弾性X線散乱によるスピン・電荷励起
3. 学会等名 東京大学物性研究所ワークショップ「磁性・強相関電子系分野の中性子散乱研究の新展開 ~JRR3再稼働を見据えて~」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 共鳴非弾性 X 線散乱の進展と銅酸化物超伝導体への応用
3. 学会等名 第57回高圧討論会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Jun'ichiro Mizuki
2. 発表標題 Inelastic X-ray scattering applied to materials science
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Materials and Nanotechnology 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 筒井健二
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導物質の共鳴非弾性X線散乱に対する数値シミュレーション
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 筒井健二
2. 発表標題 銅酸化物の共鳴非弾性X線散乱の理論的研究
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題 (7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」 サブ課題 G 第5回「共通基盤シミュレーション手法」連続研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 銅酸化物の共鳴非弾性X線散乱の実験的研究
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題 (7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」 サブ課題 G 第5回 「共通基盤シミュレーション手法」連続研究会「低次元量子相のスペクトロスコーピー ～計算と実験の協奏～」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井賢司, 遠山貴巳, 浅野駿, 佐藤研太郎, 藤田全基, 脇本秀一, 宮脇淳, 丹羽秀治, 原田慈久
2. 発表標題 酸素K吸収端RIXSによるホールドープ型銅酸化物超伝導体の電荷励起と電荷秩序の観測
3. 学会等名 東京大学物性研究所ワークショップ「Spring-8 BL07LSUが照らした物質機能の起源」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井賢司
2. 発表標題 共鳴非弾性X線散乱による電荷・スピン励起
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 筒井健二, 遠山貴巳
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導体における銅L端RIXSのクラスター計算
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Sumio Ishihara, Hironori Nakao, Takeshi Matsumura, Taka-hisa Arima, Hiroki Wadati, Kenji Ishii	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 241
3. 書名 Resonant X-Ray Scattering in Correlated Systems	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤田 全基 (FUJITA Masaki) (20303894)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究分担者	筒井 健二 (TSUTSUI Kenji) (80291011)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究 所 放射光科学研究センター・上席研究員(定常) (82502)	
研究分担者	水木 純一郎 (MIZUKI Jun'ichiro) (90354977)	関西学院大学・理工学部・教授 (34504)	
連携研究者	脇本 秀一 (WAKIMOTO Shuichi) (40399415)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門量子ビーム応用研 究センター・研究主幹 (82110)	
連携研究者	遠山 貴己 (TOHYAMA Takami) (70237056)	東京理科大学・理学部・教授 (32660)	