

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04453

研究課題名(和文) スピン分解共鳴電子エネルギー損失分光法の確立とスピン量子物性への応用

研究課題名(英文) Development of spin-resolved resonant electron-energy-loss spectroscopy and application to spin quantum physics

研究代表者

木村 真一 (KIMURA, Shin-ichi)

大阪大学・大学院生命機能研究科・教授

研究者番号：10252800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：物質の性質の起源であるプラズモン、マグノン、フォノンなどの集団励起や電荷励起を、スピンとイオン価を分解して観測する新しい分光法であるスピン分解共鳴電子エネルギー損失分光法(SR-rEELS)を開発した。この方法論は、希土類のM吸収端や遷移金属のL吸収端である0.5-1.5 keVで電子線のエネルギーを変化させることで、内殻吸収に合わせた入射電子エネルギーで電子非弾性散乱強度が増大すること、さらに、スピン分解電子非弾性散乱が観測可能なところに特徴がある。また、今後の発展として、角度分解および時間分解SR-rEELSへ展開できる可能性調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、スピン分解共鳴電子エネルギー損失分光法(SR-rEELS)という物質の素励起を観測する新しい方法論を提示したことが、学術的意義があると考えられる。この方法論は、シンクロトロンX線や中性子源の大型施設を用いることなく、小規模な実験室で大型施設と同様の観測が行える上に、X線や中性子線とは相補的な、スピン分解測定や共鳴測定が可能であるところに特徴がある。このことは、大型施設をダウンサイジングしただけではなく、新たな情報を引き出すことができることを示している。SR-rEELSで得られる情報は、スピン流の直接観測などの新しい検出法として展開されるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Spin-resolved resonant electron energy loss spectroscopy (SR-rEELS), a novel spectroscopic method to observe spin- and ion-dependent collective and charge excitations such as plasmons, magnons, and phonons, which are the origin of material properties, has been developed. This methodology is characterized by the fact that by changing the electron beam energy of 0.5-1.5 keV, which corresponds to the M absorption edges of rare earth ions and the L absorption edges of transition metals, and spin-polarized electron gun has been used. At the absorption edges, it has been observed that the inelastic electron scattering intensity resonantly increased. In addition, spin-resolved electron inelastic scattering can be observed. In addition, the possibility of expanding to angle- and time-resolved SR-rEELS was investigated as a future development.

研究分野：物性物理学

キーワード：スピン偏極電子エネルギー損失分光 強相関電子系 スピン偏極電子源 スピン偏極非弾性電子散乱 スピントロニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

次世代のスピン트로ニクス材料として注目され、研究が進められている物質として、スピン軌道相互作用の大きな重元素を含む空間反転対称性を持たない (Space Inversion Symmetry Breaking: SISB) 物質群や、ホイスラー合金などのハーフメタルがある。SISB の物質として、BiTeI[1]のようなバルク物質や、固体表面で結晶対称性が寸断された系があり、どちらも SISB によって生じる局所電場効果と大きなスピン軌道相互作用によるラッシュバ分裂が原因でスピン縮退が解け、スピン偏極バンドが生じる[2]。このスピン分裂バンドがフェルミ準位上に現れた場合には、伝導電子がスピン偏極していることが予想される。また、ハーフメタル材料でも、伝導電子が 100% のスピン偏極率を持つことが期待されており[3]、これらの物質すべてにおいて、スピン偏極した電流 (伝導電子) がスピン트로ニクスに重要な役目を果たすことが期待されている。

このスピン偏極電流は、電荷とスピンの両方の自由度があり、また結晶対称性が崩れているために、伝導方向の異方性も現れる。一般に、電流 (伝導電子) は電荷の集団励起であるプラズモンの形で記述されるが、物質内部のプラズモンがどの原子軌道に主に由来しているのか、どの方向に動くのか、どの方向のスピンを持っているのかは独立であり、自明ではない。

一方で、電子間相互作用が強い物質群である強相関電子系でも、プラズモンや磁気励起・電荷励起が注目されている。例えば、高温超伝導体の高い転移温度の起源として、プラズモンの可能性が議論されている[4-6]。また、重い電子系では、伝導電子と局在スピンの相互作用 (近藤効果) が重要な役目を果たしており、その結果生じるフェルミ準位近傍の磁気励起と電荷励起を比較することで、量子臨界点近傍で発生する非 BCS 超伝導や巨大磁気抵抗などの特異な物性の起源がしばしば議論されてきた[7]。しかしながら、この磁気励起と電荷励起では別の観測手法を用いるために、これらの大きさにはしばしば矛盾が生じていた。

このように、プラズモン、磁気励起・電荷励起を正しく理解するためには、それぞれの励起の起源の原子軌道、伝導方向、スピン方向のすべてを 1 つの方法で決定する方法論が必要である。しかしながら、これらすべての情報、すなわちプラズモン・電荷励起・スピン励起をすべて直接的に観測できる手法はこれまで開発されていないのが現状であった。特にその観測は、集団励起とともに物質中の素励起の 1 つである「準粒子」の情報が得られる ARPES の発展に比べて、未踏の領域であった。

プラズモンは主として電子エネルギー損失分光 (Electron Energy Loss Spectroscopy: EELS) で波数分散を含めて直接観測され、間接的には運動量変化がない光反射・吸収スペクトルの解析から導出される損失関数のピークとして得られる。特に強力なのは、透過電子顕微鏡を使った高エネルギーの EELS であり、微小領域の電子構造観測に威力を発揮している[8]。しかしながら、本研究で行うような共鳴による原子軌道選択やスピン分解は不可能である。また、近年のシンクロトロン光利用の技術発展によって、原子軌道選択が可能な共鳴非弾性軟 X 線散乱が急速に発展しており[9,10]、この方法でも、プラズモンは観測できることが報告されている[11,12]。しかしながら、原子軌道選択性のメリットがあるが、電子スピンの方向を自由に選択した測定は原理的に不可能で、かつ、測定可能な波数範囲がガンマ点近傍に限られており、ブリルアンゾーン全体を俯瞰した観測は難しいのが実情である。

一方で、電荷励起は角度分解光電子分光 (ARPES) や光反射スペクトル (光学伝導度スペクトル)、磁気励起は中性子非弾性散乱によって主に観測されてきた。この 2 つの励起は本来つながっているはずであるが、励起のスピンと波数の変化を連続的に観測する方法はなかった。さらに、実際にプラズモンを測定しているかどうかは、明確ではなかった。以上のように、プラズモンや磁気・電荷励起をスピン分解して観測する方法論は、これまで存在しなかった。

以上のような背景に立ち、本研究代表者は、共鳴電子エネルギー損失分光 (resonant EELS: SR-rEELS) 法、つまり、内殻共鳴による角度分解 EELS により、プラズモンや磁気・電荷励起などの素励起を共鳴による原子軌道選択性と角度分解による波数依存性を同時に観測可能であることに気が付いた。さらにこれにスピン分解測定を加えることで、スピン트로ニクスに重要なスピン偏極電流の電流方向とスピンの方向を分解して観測できることが期待される。このアイデアを実現すべく、その手始めとして、高輝度で高単色な電子源を用いて、(スピン分解を除く) 共鳴電子エネルギー損失分光 (rEELS) 装置を建設し、評価を行ってきた。

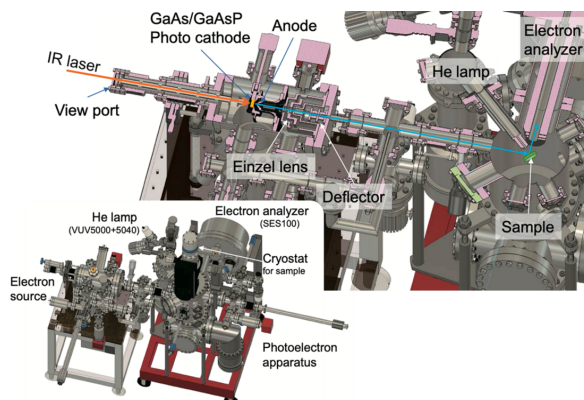


図 1. SR-rEELS の構成図。本装置は、スピン偏極電子源と光電子分析器から構成される。SR-rEELS だけではなく、角度分解光電子分光 (ARPES) と X 線光電子分光も可能。

## 2. 研究の目的

rEELS の発展として、本研究では、スピン偏極プラズモンや磁気・電荷励

起を直接観測するために、スピン分解を導入することを目的とした。具体的には、スピントロニクス・強相関電子系の物質科学研究へ展開することを目指し、元素選択的にバルクのプラズモン・磁気励起・電荷励起をすべての波数空間で観測できる「スピン分解共鳴電子エネルギー損失分光法 (SR-rEELS)」の方法論を開発し、検証することが目的であった。

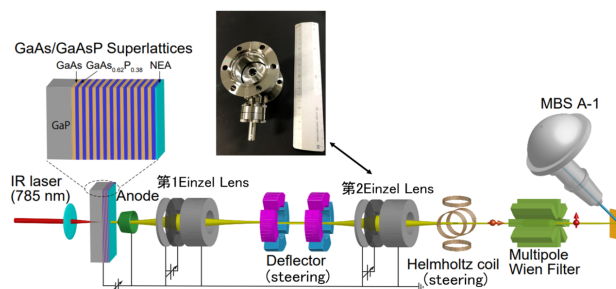


図2. 電子源の構成図。2つの Einzel lens とステアリングリングを導入して、試料上へ電子線を導入した。

### 3. 研究の方法

rEELS 装置には、約 80 % のスピン偏極度が報告されている電子源 (GaAs/GaAsP 歪超格子) が採用されている [13]。この電子源では、円偏光レーザーでフォトカソードを励起することによって、電子の進行方向に平行・反平行に向いたスピンベクトルの電子スピンを発生させることができることが期待されている。そこで、この電子源からスピン偏極電子を取り出し、SR-rEELS が可能かどうかを実証する。そのために、電子スピンの方向を任意の方向に向けるための「スピンローテーター」 [14] を、本装置に最適化して新たに導入し、スピン方向を任意に回すことができる「スピン偏極電子源」へとアップデートする。また、このスピン分解非弾性電子散乱を実証するために、標準試料 (鉄やニッケル薄膜) による評価を行う。具体的には、既存の rEELS 装置に、電子スピンを任意の方向に向けるためのスピンローテーターを設置し、電子スピンの方向と試料の磁化の方向を変化させながら、スピン分解非弾性電子散乱を実証する。そのために、スピンローテーターを自作し、磁場・電場分布測定などの性能評価を行ったのち、実際に電子源に組み込んでテストを実施する。その後、スピンローテーターを既存の rEELS 装置に組み付け、SR-rEELS 装置を完成させる。完成した装置は、実際の試料を用いた測定によって評価を進める。

### 4. 研究成果

#### (1) SR-rEELS 装置の建設と評価

完成した SR-rEELS 装置の概略図を図 1 に、電子光学系の概略図を図 2 に示す。これまでに立ち上げてきた共鳴電子エネルギー損失分光 (rEELS) 装置に使っている GaAs/GaAsP 歪超格子フォトカソードに円偏光赤外レーザー (IR laser) を導入し、スピン偏極電子電子線を作製し、試料に導入する。フォトカソードから出たスピン偏極電子は、2つのレンズ (Einzel lens) で収束・拡大されて試料に照射されるが、その調整のために、ディフレクターとヘルムホルツコイルが用いられている。試料上での電子ビームの大きさを評価したところ、電子エネルギー 1.5 keV において FWHM が約 160  $\mu\text{m}$  であることがわかった。空間電荷効果を考慮しない光線追跡法では、約 20  $\mu\text{m}$  程度まで絞れることが期待されるため、その差は空間電荷効果または光学系が理想的な配置にないためと考えられる。しかしながら、実験で得られた空間分解能でも、本研究目的は達成可能であった。今後、は空間分解能の向上も進めていく予定である。また、電子スピンを任意の方向に向けるためのスピンローテーターの設計を行い、試作機を制作した。試作機を電子源に実装し、電子スピンのコントロールのテストを行い、スピン方向のコントロールが可能であることを示すことができたが、電子の透過率が悪く、実用段階には達していない。今後更に改良を加えて、実用に供する計画である。

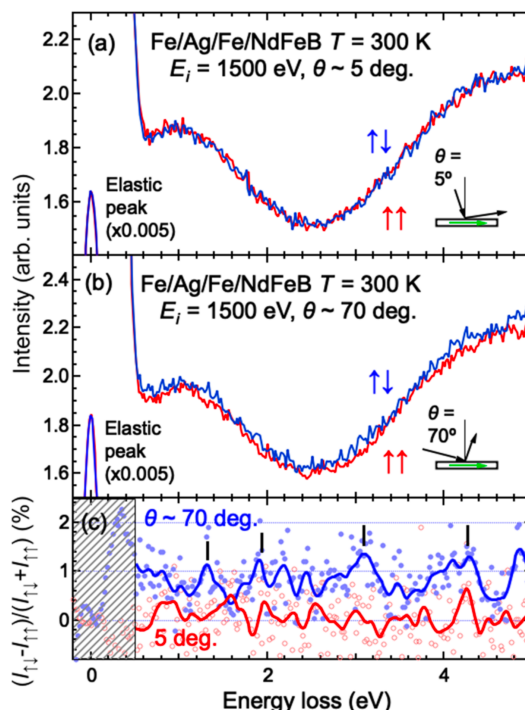


図3. 面内に磁化した鉄薄膜のスピン偏極 EELS スペクトル。(a)は試料表面に垂直近い方向から電子入射した場合、(b)は試料表面にほぼ平行に電子を入射した場合、(c)は散乱したスピンの非対称性を表す。0.5eV 以下は、弾性散乱ピークの裾であり、データに信頼性がないと考えられるため、ハッチングした。



## (2) スピン分解 EELS の観測

装置が完成したのち、まず、スピン散乱の実証を行った。具体的には、磁化させた鉄薄膜に電子線を照射し、スピンの方向の違いによる散乱電子強度を観測した(図3)。その結果、キャリアプラズモンおよび価電子プラズモンが現れる領域に数1%のスピン偏極が観測された。本測定では、非弾性散乱の強度が弾性散乱に比べて約0.5%であり、さらにスピン偏極度が約1%であることから、スピン偏極測定の実効率は約0.005%であった。そのために、図3に示すように、S/Nの悪い測定になっている。しかしながら、この結果は、先行研究の低エネルギースピン分解 EELS[15,16]と類似しており、妥当な結果である推察される。SR-rEELS が、スピン偏極非弾性電子散乱の観測に有用であることを示すことはできたため、本研究の目的の1つが達成された。

## (3) 六ホウ化サマリウム Sm 3d 共鳴 EELS の観測

並行して、rEELS の可能性を調べるため、六ホウ化サマリウム (SmB<sub>6</sub>) の Sm 3d 吸収端と NiO の Ni 2p 吸収端での共鳴効果の観測を行った。SmB<sub>6</sub> は、Sm<sup>2+</sup>と Sm<sup>3+</sup>が時間的・空間的に揺らいでいる価数揺動系の物質で、この価数揺動によって極めて小さいエネルギーギャップを持った半導体(近藤半導体と呼ばれている)になることが知られている[17]。さらに最近では、表面電子状態がバルク電子状態のトポロジーでプロテクトされて金属状態が出現(「トポロジカル近藤絶縁体」と名付けられている)することとしても知られている[18]。この物質では、 $h\nu \sim 1080$  eV に Sm の 3d 内殻から 4f 準位への吸収(M<sub>4,5</sub>吸収端)が存在する。この吸収端付近で入射電子線の運動エネルギーを変化させることで EELS スペクトルが変化するかどうかの調査を行った。この物質の伝導電子は Sm<sup>3+</sup> 5d バンドが起源になっていると考えられるため、Sm<sup>3+</sup>に由来した吸収で共鳴増大することが期待される。

測定した結果を図4に示す。ここでは、入射電子エネルギー  $E_i = 1076$  eV と 1084 eV ではスペクトル差 ( $\Delta I_b$ ) が殆ど見られないが、 $E_i = 1080$  eV では、スペクトルの増大が観測された。この 1080 eV は、Sm 3d-4f 吸収に対応するため、共鳴増大が観測されたことを示している。また、差分スペクトル ( $\Delta I_a$ ) では、約 0.5 eV と 2 eV のところに共鳴増大が観測された。前者は伝導帯と 4f 準位との混成、いわゆる c-f 混成バンド間の吸収であり、後者はキャリアプラズモンによるピークである。これらが共鳴増大しているということは、Sm<sup>3+</sup>がこれらの電子構造に関係していることを示しており、予測とも合致している。

## (4) 酸化ニッケルの Ni 2p 共鳴 EELS の観測

さらに、rEELS の検証のために、酸化ニッケル (NiO) 単結晶の EELS スペクトルの測定を行った。NiO では Ni 原子が 6 個の O 原子によって対称的に囲まれた形をとる。Ni には 5 つの 3d 軌道があるが、軌道によって異なるクーロンポテンシャルを O 原子から受けることによってエネルギー的に分裂する[19]。この分裂したエネルギー間の遷移 (d-d 遷移) は光学的に禁制遷移となっているが、EELS では観測可能である。NiO 試料は、超高真空中で

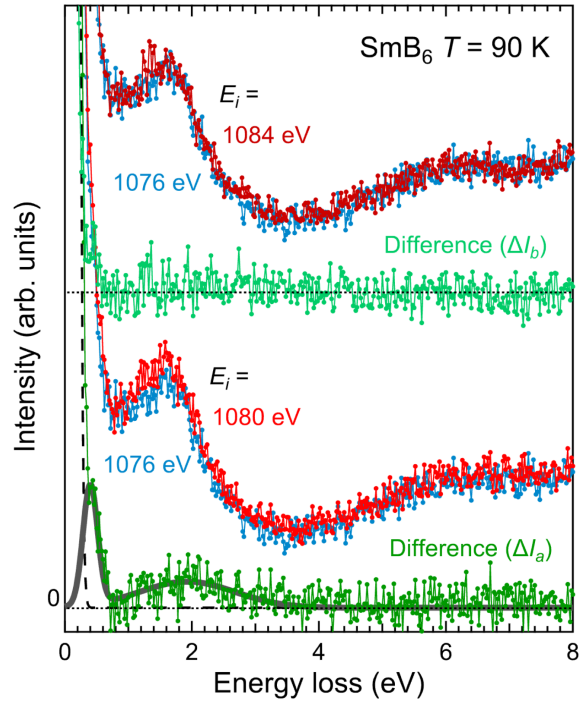


図4. SmB<sub>6</sub>の Sm 3d 吸収端 ( $h\nu \sim 1080$  eV) における rEELS スペクトル。入射電子エネルギー  $E_i = 1076$  eV と 1084 eV ではスペクトル差が殆ど見られないが、Sm 3d 吸収端に対応する  $E_i = 1080$  eV では、スペクトルの増大が観測された。

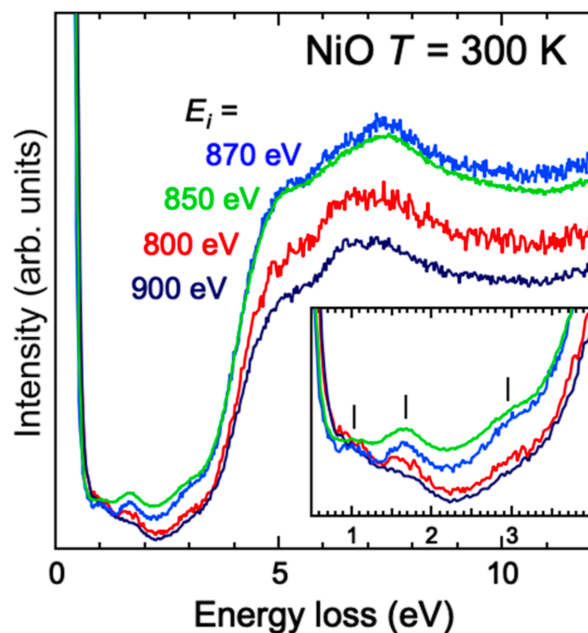
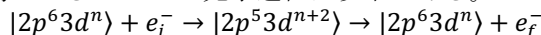


図5. NiO 単結晶の rEELS スペクトル。挿入図は、電荷移動ギャップ (4 eV 以下) に観測される d-d 遷移ピークを拡大したもの。

へき開して測定した。へき開面の大きさは  $0.5 \times 1 \text{ mm}^2$  であったが、上で述べた電子光学系の改良を行ったため、十分な強度で測定が可能であった。Ni 2p-3d 吸収のエネルギー (2p<sub>5/2</sub> 吸収端が 850, 2p<sub>3/2</sub> 吸収端が 870 eV) 付近でエネルギーを買えて測定した rEELS スペクトルを図 5 に示す。この図で Energy loss が 4-8 eV のスペクトルの立ち上がりおよびピーク構造は O 2p から Ni 3d upper Hubbard バンドへの電荷遷移によるものであると考えられる。このピークは、Ni 2p-3d 共鳴エネルギーである 850 eV と 870 eV で増大しており、共鳴効果と考えられる。また、挿入図では、Energy loss が 4 eV 以下の d-d 遷移が現れる領域を拡大しているが、明確にピークが現れ、さらに共鳴エネルギーでピークが増大していることがわかる。このことは、d-d 遷移が Ni 2p-3d 共鳴で増大していることを示している。

遷移金属の 2p-3d 共鳴による rEELS の光学過程は以下である。



ここで  $e_i^-$  と  $e_f^-$  は入射電子と放出電子であり、それらのエネルギー差が Energy loss になる。 $n$  は  $d$  電子の占有数で、Ni<sup>2+</sup> は  $n = 8$  になる。中間状態は  $|2p^5 3d^{10}\rangle$  であるため、実際に状態が存在し、共鳴過程が成立する。

このように、rEELS 測定で、明確に共鳴効果が観測された。このことは、rEELS 過程で中間状態の存在を示している。今後、測定試料を増やし、rEELS における中間状態の情報を増やし、理解を深める予定である。

## (6) さらになる発展を目指した装置設計

本研究では、スピンローテーターの開発を行ったが、さらに、電子スピンのコントロールとエネルギー分解能向上のために、電子スピンを電子進行方向に直交する方向に向けるための電子光学系である 90°ディフレクターの設計を行った。この装置は、現在のエネルギー分解能 (約 100 meV @ 1 keV) より高い分解能 (50 meV 以下 @ 1 keV) での観測を可能にしながら、電子スピンを進行方向から 90° 偏極することができる。この 90°ディフレクターを導入することで、マグノン分散などのより低エネルギー励起の観測が可能になることが期待できるため、予算がつき次第試作を行い、実装に向けて進めていく予定である。

SR-rEELS は角度積分測定のみが可能であるが、運動量分散の観測のために角度分解測定が可能な電子レンズを最新式のものに交換し、既存の電子分析機に導入した。この装置は角度分解光電子分光が可能のように整備済みであり、本研究で整備したスピン偏極電子源を取り付けて、角度分解による運動量分解も実現したスピン・角度分解共鳴電子エネルギー損失分光法 (Spin- and Angle-Resolved resonant Electron Energy-Loss Spectroscopy: SAR-rEELS) への展開する。そのために、試料の角度及び向きを入射電子線及び電子分析器に対して正確に合わせることができるよう 6 軸マニピュレータを独自に開発し導入した。このマニピュレータは、真空外部から導入する試料に電流を印加できるような電極を備えており、電流誘起による電子状態変化を測定することで、有用性の確認を行った。

今回 SR-rEELS を開発したことで、新たな可能性を発見した。その 1 つが時間分解 SR-rEELS (time-resolved SR-rEELS: tSR-rEELS) への展開である。パルスレーザー光源によってフォトカソードを励起して、光路長 30 m 程度の時間遅延をつけた光励起と同期させることで可能であることがわかった。tSR-rEELS は、同様な物理量の測定が可能な XFEL を用いた RIXS と相補的な分光法であるため、今後、この開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] K. Ishizaka et al., Nat. Mater. **10**, 521 (2011).
- [2] T. Nakamura, Y. Ohtsubo, S. Kimura et al., Phys. Rev. B **98**, 075431 (2018).
- [3] C. M. Fang, G. A. de Wijs, R. A. de Goot, J. Appl. Phys. **91**, 8340 (2002).
- [4] R. Akashi, and R. Arita, Phys. Rev. Lett. **111**, 057006 (2013).
- [5] A. Greco, H. Yamase, and M. Bejas, Phys. Rev. B **94**, 075139 (2016).
- [6] A. Greco, H. Yamase, and M. Bejas, Commun. Phys. (NPG) **2**, 3 (2019).
- [7] A. C. Hewson, The Kondo Problem to Heavy Fermions (Cambridge University Press, UK, 1993).
- [8] F. Roth et al., J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. **195**, 85 (2014).
- [9] V. N. Strocov et al., J. Sync. Rad. **17**, 631 (2010).
- [10] L. J. P. Ament et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 705 (2011).
- [11] G. Tirao et al., J. Phys.: Condens. Matter **19**, 046207 (2007).
- [12] P. Cudazzo et al., Phys. Rev. B **90**, 125125 (2014).
- [13] X. Jin et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 203509 (2014).
- [14] T. Yasue et al. Rev. Sci. Instrum. **85**, 043701 (2014).
- [15] T. Komesu et al., J. Phys. Condens. Matter **18**, 8829 (2006).
- [16] S. N. Samarin et al., Appl. Phys. Lett. **107**, 101602 (2015).
- [17] T. Kasuya et al., J. Phys., Colloq. **40**, C5 (1979).
- [18] Y. Ohtsubo, S. Kimura et al., Nat. Commun. **10**, 2298 (2019).
- [19] K. Terakura et al., Phys. Rev. Lett. **52**, 1830 (1984).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kimura Shin-ichi, Kawabata Taishi, Matsumoto Hiroki, Ohta Yu, Yoshizumi Ayuki, Yoshida Yuto, Yamashita Takumi, Watanabe Hiroshi, Ohtsubo Yoshiyuki, Yamamoto Naoto, Jin Xiuguang	4. 巻 92
2. 論文標題 Bulk-sensitive spin-resolved resonant electron energy-loss spectroscopy (SR-rEELS): Observation of element- and spin-selective bulk plasmons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 093103-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055435	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 Kimura Shin-ichi, Watanabe Hiroshi, Tatsukawa Shingo, Tanida Hiroshi	4. 巻 92
2. 論文標題 Observation of Electronic Structure Modification in the Hidden Order Phase of CeCoSi	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 043704-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.043704	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 Nakamura Takuto, Nakaya Toru, Ohtsubo Yoshiyuki, Sugihara Hiroki, Tanaka Kiyohisa, Yukawa Ryu, Kitamura Miho, Kumigashira Hiroshi, Imura Keiichiro, Suzuki Hiroyuki S., Sato Noriaki K., Kimura Shin-ichi	4. 巻 107
2. 論文標題 Surface valence transition in SmS by alkali metal adsorption	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041102-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.L041102	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 Ohtsubo Yoshiyuki, Nakaya Toru, Nakamura Takuto, Le Fevre Patrick, Bertran Francois, Iga Fumitoshi, Kimura Shin-Ichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Breakdown of bulk-projected isotropy in surface electronic states of topological Kondo insulator SmB6(001)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5600-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-33347-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohtsubo Yoshiyuki, Kimura Shin-ichi, Iga Fumitoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Recent progress in clean-surface formation of topological Kondo insulators and topological surface states observed there	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Electronic Structure	6. 最初と最後の頁 033003-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2516-1075/ac8631	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 Nakamura Takuto, Ohtsubo Yoshiyuki, Harasawa Ayumi, Yaji Koichiro, Shin Shik, Komori Fumio, Kimura Shin-ichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Fluctuating spin-orbital texture of Rashba-split surface states in real and reciprocal space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235141-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235141	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 Kimura Shin-ichi, Sichel Schmidt Joerg, Khim Seunghyun	4. 巻 104
2. 論文標題 Optical study of the electronic structure of locally noncentrosymmetric CeRh <sub>2</sub> As <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 2451161-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.245116	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 Kimura Shin-ichi, Kwon Yong Seung, Krellner Cornelius, Sichel Schmidt Joerg	4. 巻 3
2. 論文標題 Optical evidence of local and itinerant states in Ce- and Yb-heavy-fermion compounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronic Structure	6. 最初と最後の頁 024007-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2516-1075/abffe2	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 S. Kimura, Y. Yokoyama, Y. Nakajima, H. Watanabe, J. Sichele Schmidt, V. Suss, M. Schmidt, C. Felser	4. 巻 30
2. 論文標題 Magneto-Optics of the Weyl Semimetal TaAs in the THz and IR Regions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011017-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.30.011017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Ohtsubo, N. Tokumasu, H. Watanabe, T. Nakamura, P. Le Fevre, F. Bertran, M. Imamura, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Takahashi, S. Kimura	4. 巻 101
2. 論文標題 One-dimensionality of the spin-polarized surface conduction and valence bands of quasi-one-dimensional Bi chains on GaSb(110)-(2×1)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235306-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.235306	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 大坪嘉之, 木村真一, 伊賀文俊	4. 巻 55
2. 論文標題 トポロジカル近藤絶縁体の表面電子状態 研究の最近の発展	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 337-349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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48件(うち招待講演 9件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 木村真一, 伊飼貴一, 立川慎吾, 渡邊浩, 谷田博司
2. 発表標題 CeCoSiの光学伝導度スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 S. Kimura
2. 発表標題 Origin of the valence transition in samarium mono-sulfide
3. 学会等名 3-day International Conference on Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ikeda, H. Watanabe, M.-H. Jung, S. Kimura
2. 発表標題 Terahertz electric-field drive on Weyl fermions
3. 学会等名 11th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Watanabe, S. Tatsukawa, Y. Chen, T. Nakamura, K. Imura, H. S. Suzuki, N. K. Sato, S. Kimura
2. 発表標題 Carrier-induced insulator-to-metal transition on SmS
3. 学会等名 11th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊浩, 陳奕同, 中村拓人, 立川慎吾, 高橋龍之介, 和達大樹, 玉作賢治, 大沢仁志, 井村敬一郎, 鈴木博之, 佐藤憲昭, 木村真一
2. 発表標題 時間分解X線散乱を用いたSmSの光誘起相転移ダイナミクスの観測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳奕同、中村拓人、渡邊浩、鈴木剛、任千慧、劉珂成、Yigui Zhong、金井輝人、板谷治郎、辛埴、岡崎浩三、井村敬一郎、鈴木博之、佐藤憲昭、木村真一
2. 発表標題 時間・角度分解光電子分光による硫化サマリウムにおける光励起バンド構造ダイナミクスの観測
3. 学会等名 2022年度日本表面真空学会 九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kimura
2. 発表標題 Photo-Induced Valence Transition of SmS
3. 学会等名 Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kimura
2. 発表標題 Photo-induced valence transition of SmS: Similarity to the pressure-induced black-to-golden phase transition
3. 学会等名 10th Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪嘉之
2. 発表標題 Quasi-1D surface electronic states fabricated on III-V semiconductor surfaces
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大坪嘉之
2. 発表標題 近藤絶縁体 SmB6の単結晶表面清浄化技術の開発とトポロジカル表面電子状態の観測
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川畑太嗣、吉田悠人、松本大輝、山下拓海、吉住歩樹、太田雄、渡邊浩、大坪嘉之、山本尚人、金秀光、木村真一
2. 発表標題 共鳴スピン分解電子エネルギー損失分光法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊浩、中村拓人、柴田友里亜、山神光平、平田靖透、池田啓祐、Yujun Zhang、和達大樹、井村敬一郎、鈴木博之、佐藤憲昭、木村真一
2. 発表標題 SmSのX線吸収分光を用いた光励起価数転移ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村真一
2. 発表標題 トポロジカル近藤絶縁体の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村真一
2. 発表標題 トポロジカル近藤絶縁体の表面電子状態
3. 学会等名 ワークショップ(4)「超伝導物質、トポロジカル物質」(SCTM2020)(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kimura Laboratory <a href="http://www.kimura-lab.com/index.html">http://www.kimura-lab.com/index.html</a>
--

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	渡邊 浩  (WATANABE Hiroshi)  (50625316)	大阪大学・生命機能研究科・助教   (14401)	
研究分担者	大坪 嘉之  (OHTSUBO Yoshiyuki)  (70735589)	大阪大学・生命機能研究科・助教   (14401)	2021年度よりQSTに移動したため、2020年度のみ参加。

	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
研究協力者	中村 拓人  (NAKAMURA Takuto)	大阪大学・生命機能研究科・助教   (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	DGIST			