

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00659

研究課題名（和文）エキシトニック絶縁体における電子正孔相関の光制御

研究課題名（英文）Optical control of electron-hole correlation in excitonic insulators

研究代表者

溝川 貴司（Mizokawa, Takashi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90251397

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：時間分解あるいは位置分解の角度分解光電子分光により、エキシトニック絶縁体相と付随する半金属相、半導体相の電子状態を系統的に解明した。特に、光誘起半金属相において、擬1次元的な電子面とホール面が波数空間で縮退し、ラインノード半金属状態が実現することを示した。ポンプ光の励起後50fsの時間領域では完全にバンドギャップが閉じておらず擬ギャップが残っているが、150fs程度で完全に擬ギャップが消失して半金属相に至ることが示された。圧力下の赤外分光測定については、S置換によってエキシトニック相から半導体相へと変化していく物質群において、エキシトニック相に留まる組成では圧力誘起半金属相の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

励起子絶縁体Ta₂NiSe₅は中赤外領域に直接バンドギャップを持つ。本研究課題では、励起子絶縁体から半金属への圧力誘起相転移とパルスレーザー光による100フェムト秒スケールの光誘起相転移のメカニズムを解明した。固体物理学分野で励起子絶縁体に関連する研究が流行しつつあり、この成果は先駆的研究としてインパクトを与えている。また、層状遷移金属カルコゲナイドであるTa₂NiSe₅では、MoS₂などのように原子層結晶によるデバイス化も期待される。デバイス化に向けた研究は未成熟な段階ではあるが、励起子絶縁体が新しいタイプの光量子デバイスへと応用される可能性を秘めていることが本研究課題によって示された。

研究成果の概要（英文）：We have revealed the electronic structure of the excitonic insulator phase and associated semimetal and semiconducting phases by means of time- or space-resolved angle-resolved photoemission spectroscopy. In particular, we have shown that the photoinduced semimetal phase has quasi-one-dimensional hole and electron Fermi surfaces which are almost degenerate in the momentum space corresponding to a nodal-line semimetal. Around 50 fs after the pump light arrival, pseudogap is observed at the Fermi level while it disappears to be the semimetal state around 150 fs. By means of infra-red spectroscopy under pressure, all the excitonic insulator states were found to be semimetallic under pressure.

研究分野：固体物理学

キーワード：エキシトニック絶縁体 時間分解光電子分光 圧力誘起相転移 光誘起相転移 電子正孔相関 擬ギャップ

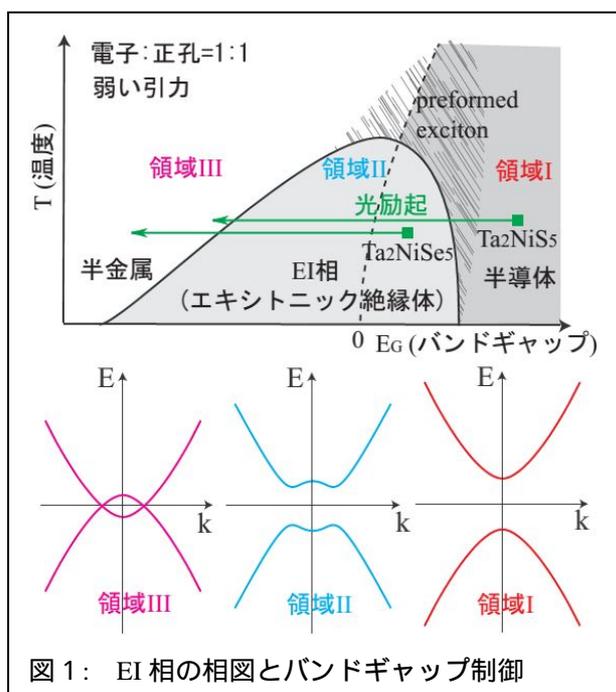
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

半金属や半導体において、電子と正孔がクーロン引力によって励起子を形成し、その励起子がBCS的あるいはBEC的に凝縮した状態はエキシトニック絶縁体(EI)と呼ばれる。EI相は、Mottによって理論的に予言され[N. F. Mott, Philos. Mag. **6**, 287 (1961)]、超伝導のBCS理論が確立した後の1960年代に電子正孔系にBCS理論を適用することで盛んに研究された [跡えば、D. Jérôme, T. M. Rice, and W. Kohn, Phys. Rev. **158**, 462 (1967); B. I. Halperin and T. M. Rice, Rev. Mod. Phys. **40**, 755 (1968)]。しかしながら、EI相を示す可能性のある候補物質が稀少であること、電子・正孔対は電気的に中性であり検出が難しいこと、などの理由から実験的検証が困難であり、近年までEI相の存在は確立していない状況であった。最近、角度分解光電子分光でバンド分散を測定することによって、TiSe₂ [H. Cercellier et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 146403 (2007)] やTa₂NiSe₅ [Y. Wakisaka et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 026402 (2009)] などの遷移金属カルコゲナイドがEI相の候補物質として指摘され、長らく停滞していたEI相の研究が新しい局面を迎えている。Ta₂NiSe₅では、価電子帯のトップと伝導帯の底が運動量空間において同じ場所にあり、様々な実験的・理論的手法によって328K以下の低温相が理想的なEI相に近いことが確認されている [K. Seki et al., Phys. Rev. B **90**, 155116 (2014)など]。さらに最近では、本研究の代表者を含むドイツ・スイス・日本の合同チームによって、適度な励起光強度では光キャリアの遮蔽効果でEI相が抑制されるのではなく、適度に縮小したバンドギャップ間で電子と正孔が結合することによって、逆にEI状態が増強される様子が観測された [S. Mor et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 086401 (2017)]。この観測結果はEI状態以外のシナリオでは説明することは困難であり、Ta₂NiSe₅の低温相がEI相であることを強く支持している。一方、本研究の代表者および分担者を含む研究チームによって、一部のSeをSに僅かに置換したTa₂Ni(Se_{1-x}S_x)₅について、さらに強い励起光ではバンドギャップが崩壊する様子が観測されている [K. Okazaki et al, Nat. Commun. **9**, 4322 (2018)]。つまり、EI相は励起条件によって全く逆の光応答を示し、弱励起でEI相が増強される一方で、強励起ではEI相が抑制されることが2018年の時点で分かっていた。Ta₂NiSe₅の低温相がEI相であることは研究代表者を含む我が国の研究チームによって2009年に提案された後に徐々に国外に波及し、2018年に入ってドイツ、韓国等のグループが研究を発表し始めている状況であった。EI相での光応答の解明は根本的な問題であるが、系統的な研究は行われておらず本研究は高い独自性と重要性を有するものである。

2. 研究の目的

EI相を示す物質で予想される典型的な相図を図1に示す。EI相への転移温度はバンドギャップに対してドーム型であり半導体と半金属の境界付近で極大となる。現段階では、光励起によってTa₂NiSe₅のバンドギャップを変化させる場合に予想に合致するかどうか分かっていない。本研究の第1の目的は、Ta₂NiSe₅等の時間分解光電子分光測定により(I)半導体となり電子と正孔対が結合して発光する領域、(II)EI状態が増強される領域、(III)バンドギャップが崩壊しフェルミ面が形成される領域、を同定し各領域での電子正孔ダイナミクスを定量的に計測することにある。これにより、EI相近傍で光励起された電子と正孔のダイナミクスの全容を解明する。さらに第2の目的は、強い光励起によって得られる半金属状態を調べて、圧力誘起金属相との共通点と相違点を明らかにすることである。これらの測定から電子と正孔のフェルミ面が重なる特異な半金属相の電子状態を解明し、光誘起超伝導および光励起下での超伝導相関を利用する新規光機能の開拓につながる基盤を構築する。



3. 研究の方法

【ポンププローブ型時間分解角度分解光電子分光による光誘起相の観測】

本研究課題で利用する東京大学物性研究所で開発された高次高調波時間分解光電子分光装置は世界最高の性能(時間分解能 80fs、繰り返し 1kHz と 10kHz)を誇り他のグループの追随を許しておらず、実験を展開する上で優位性を有している。研究代表者と分担者・岡崎氏が新規雇用する博士研究員とともに、東京大学物性研究での時間分解光電子分光測定を推進する。Ta₂NiSe₅を対象として、励起光強度を系統的に変えながら時間分解光電子分光を行い、EI状態が増強される領域(II)、バンドギャップが崩壊し電子と正孔のフェルミ面が形成される領域(III)を同定する。図1に矢印で示すように、ポンプ光によって励起された光キャリアは半導体のバンドギャップ

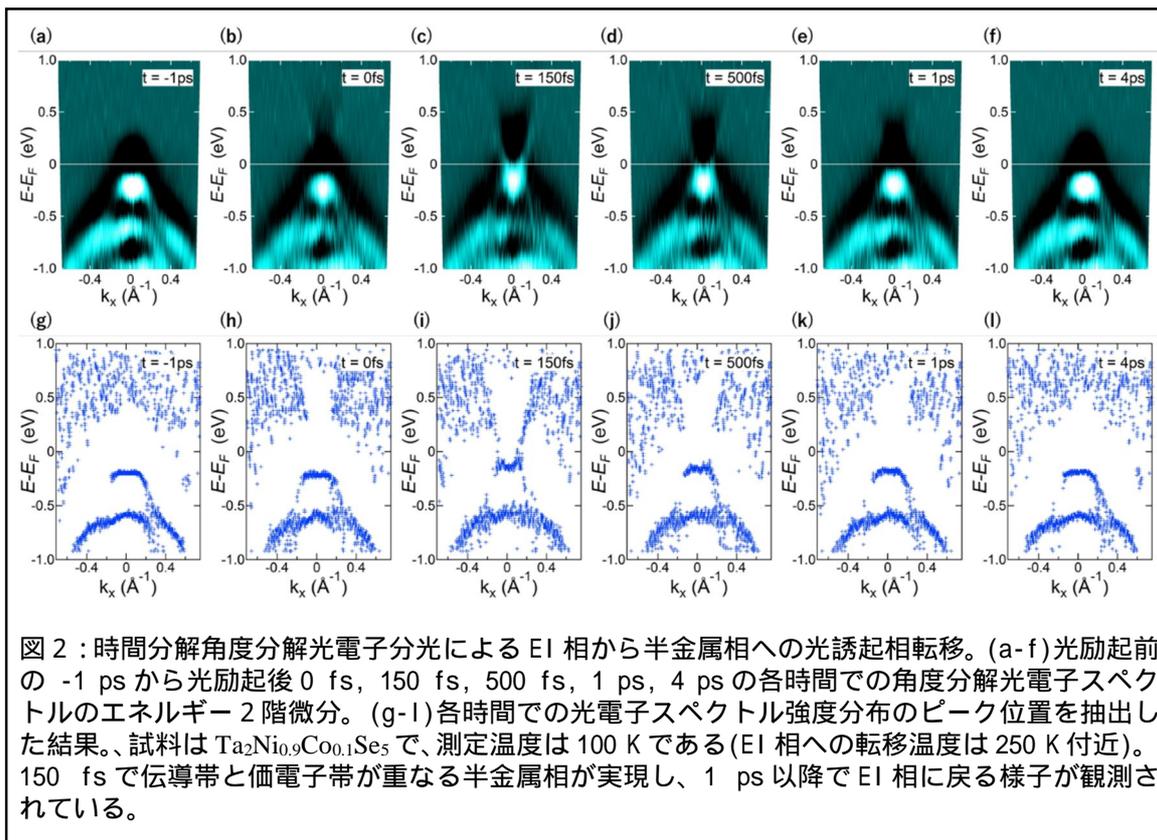
プを縮小させる効果を持つ。この効果を利用して Ta_2NiSe_5 から適度にバンドギャップを縮小すると、EI 相への転移温度が極大となる最適状態となる。この状態からの緩和過程においてバンド構造の時間発展を測定するとともに発光過程の有無を調べる。さらに、強いポンプ光によってバンドギャップが崩壊する領域(III)に到達し、2次元運動量空間で電子と正孔のフェルミ面が完全に(または部分的に)重なる半金属相のトポロジカル性を調べる。フェルミ準位近傍のバンド分散を詳細に計測し、スピン軌道相互作用の効果、部分的ギャップ(擬ギャップ)形成を検証する。一方、バンド絶縁体である Ta_2NiS_5 において、励起光強度を変えながら時間分解光電子分光を行い、バンド絶縁体のまま電子と正孔対が結合して発光する領域(I)、バンドギャップが崩壊し電子と正孔のフェルミ面が形成される領域(III)を同定し、さらに EI 状態が増強される領域(II)があるかどうか探索する。

【光制御と圧力制御の比較】

研究分担者の岡村氏を中心として、研究の初年度にchemical pressureでEI相から半導体相へと移行変わる $\text{Ta}_2\text{Ni}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_5$ を対象として、圧力下での赤外分光をSpring-8のBL43IRを利用して推進する。 Ta_2NiSe_5 の結果と比較することにより、chemical pressureとphysical pressureによる電子状態および電荷ダイナミクスの変化を比較する。さらに、光誘起半金属相を圧力下で得られる半金属相や超伝導相と比較し、光誘起超伝導の可能性を実験的に検証する。EI相近傍の超伝導相では電荷揺らぎが重要と期待され、超伝導相関による擬ギャップが光誘起半金属相で確認されれば重要な発見となる。2年度目以降、圧力下の赤外分光測定を継続しながら、 $\text{Ta}_2\text{Ni}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_5$ について励起光強度を変えながら時間分解光電子分光を行い、領域(I)~(III)を同定する。chemical pressureおよびphysical pressureによるバンド絶縁体 エキシトニック絶縁体 半金属という電子状態変化に対して、光励起による電子状態変化の特徴が明確になると期待される。 $\text{Ta}_2\text{Ni}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_5$ の光誘起半金属相においてもトポロジカル性および擬ギャップ形成を検証する。

4. 研究成果

(1)本研究課題の第1の目的は、直接ギャップのEI相を示す Ta_2NiSe_5 と関連物質について時間分解光電子分光測定を行い、「通常の半導体相となり電子と正孔の対が結合して発光する領域」「EI相となる領域」「バンドギャップが崩壊し半金属相となりフェルミ面が形成される領域」という3つの領域を相図上で同定し、各領域での電子正孔ダイナミクスを定量的に解明することである。研究開始の2019年度から東京大学物性研究所の時間分解角度分解装置を用いて系統的に実験を行い、2020年度までに「バンドギャップが崩壊し半金属相となる領域」について電子状態の時間変化を詳細に解明することに成功した[図2、J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 124703 (2020)]。



Ta_2NiSe_5 の光誘起半金属相のフェルミ面を詳細に観測することで、伝導帯と価電子帯が重なるラインノード半金属状態に近いことが確認された。ただし、観測されたフェルミ面は波数空間で

非常にブロードになっている。光励起後 150 fs では電子正孔系の温度は 1000 K を越えると推定され、その温度揺らぎによって波数空間でブロードになってしまうと考えられる。ラインノード半金属状態からスピン軌道相互作用を増強することでエネルギーギャップが形成される可能性があるため、光励起によってトポロジカル物性を制御する観点からも Ta_2NiSe_5 が有望であることが示唆された[J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 023703 (2023)]。2020 年度から 2021 年度にかけてコロナ禍による計画の遅れがあったが、2022 年度には元素置換された $\text{Ta}_2\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{Se}_5$ および $\text{Ta}_2\text{Ni}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_5$ まで含めて系統系に時間分解角度分解光電子分光測定を完了し、バンド構造の時間発展と光励起のフルエンス依存性を詳細に計測することができた。光励起に対して EI 相に留まる場合とバンドギャップが消失して半金属になる場合の 2 種類の過程のみが観測され、EI 相から通常の半導体相へと転移する過程は観測されなかった。これらの測定結果の中で、EI 相から半金属相へと変化する過程において、価電子帯と伝導帯の間のエネルギーギャップが不完全に閉じた「擬ギャップ状態」が出現することを発見した。従来の EI 相では、フェムト秒レーザーの光励起によって多数の電子および正孔が励起されることで電子正孔間のクーロン相互作用が遮蔽され、伝導帯のエネルギーが低下すると同時に価電子帯のエネルギーが上昇してエネルギーギャップの閉じた半金属になる筈である。しかし、 Ta_2NiSe_5 の観測結果では、EI 相から半金属相へと変化する過程で、伝導帯のエネルギーは期待どおりに低下する一方で、価電子帯のエネルギーはほとんど変化せず、その結果として両者の間に不完全なギャップが残される[図 3、J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 064706 (2023)]。

不完全なエネルギーギャップをもつ「擬ギャップ状態」は、電子正孔間のクーロン相互作用以外にも価電子帯に影響を与える相互作用が存在することを示している。この相互作用の候補として、電子と正孔の非対称な電荷分布と反転対称性を局所的に破る格子変形との間の相互作用（電子格子相互作用の一種）を提案した。 Ta_2NiSe_5 の場合、Ta サイトに負電荷、Se サイト（および Ni サイト）に正電荷が分布する励起子が形成されるが、 TaSe_6 八面体の反転対称性を破るような格子変形と結合し、励起子が局在するととも安定化すると期待される。以上のシナリオに基づいて、実験結果を以下のように解釈することができる。パルス光励起によって多数の電子および正孔が生成されると電子正孔間のクーロン相互作用は即座に遮蔽され(70 fs では完全に遮蔽されていると考えられる)、伝導帯と価電子帯の混成が弱くなり伝導帯のエネルギーは低下する。しかし、価電子帯は上記の格子変形による安定化のために 70 fs ではエネルギーはまだ上昇しない。150 fs 程度になった段階で、格子変形の緩和によって価電子帯のエネルギーが上昇して、伝導帯と価電子帯がフェルミ準位で重なったラインノード型半金属になる。

上記のような電子正孔相関と局所的に反転対称性を破る格子変形との関係は、 TiSe_2 でも指摘されており、さらに幅広い物質系に適用できる可能性がある。また、グラフェンなどディラック型やラインノード型のフェルミ面を持つ既存の半金属に、元素置換などで電子正孔相関を導入することで、EI 相に相当する様々な秩序状態（CDW 状態、SDW 状態、orbital current 状態、spin current 状態など）を実現できる可能性が示唆された。

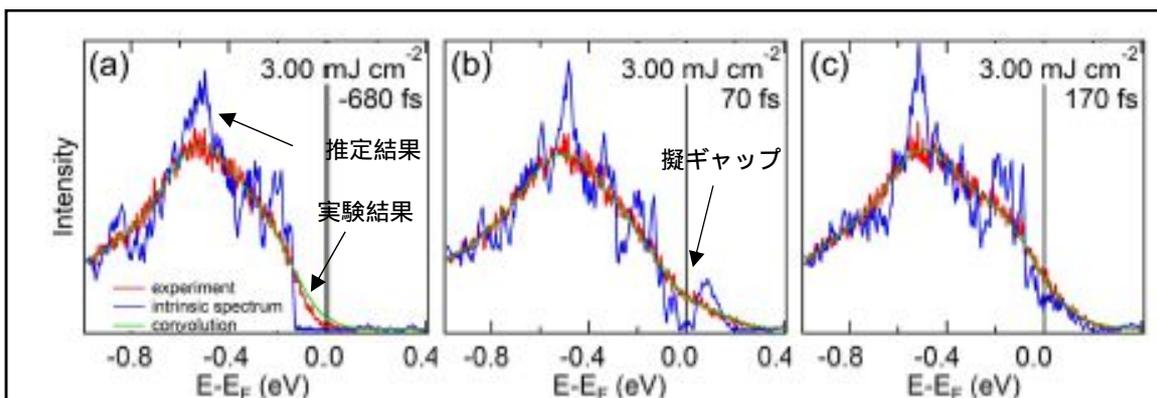


図 3 : (a)EI 相、(b)擬ギャップ相、(c)半金属相について、時間分解光電子スペクトルから 250 meV のエネルギー分解能によるブロードニングを除去してスペクトル関数を推定した結果。「低エネルギー側からフェルミ準位(E_F)に近づくにつれてスペクトル強度が低下することが尤もらしい」という情報を用いてスペクトル関数を推定し、フェルミ準位(E_F)でのギャップが開いた EI 相、擬ギャップが残る中間相、ギャップが消失した半金属相を区別することに成功した。推定されたスペクトル関数を再び 250 meV のエネルギー幅で畳み込んだ結果は実験結果とよく一致しており、推定されたスペクトル関数は十分に信頼できる。

(2)本研究課題の第2の目的である EI 相と半金属相の光制御、圧力制御と超伝導相関の関係については、圧力下で半導体相である Ta_2NiS_5 に注目して測定を進めた。2020 年度までに、 Ta_2NiS_5 では半金属相は容易に得られないことが分かり、光誘起によって半金属相が得られることと対照的な結果となった。そこで、2021 年度から 2022 年度にかけて、 x の値 (S の置換量) によって EI 相から半導体相までをカバーする $Ta_2Ni(Se_{1-x}S_x)_5$ について圧力下赤外分光測定を系統的に行った[Phys. Rev. B **107**, 045141 (2023)]。 x の増加とともに元のバンドギャップが増加するが、励起子効果(電子正孔間のクーロン相互作用による伝導帯と価電子帯の混成)が予想どおり x の増加とともに減少していった。また、 S 置換によって電子状態が不均一になるが、伝導帯と価電子帯の混成の度合いは極めて一様であることが位置分解光電子分光によって明らかになった[図 4, Adv. Quantum Technol. **6**, 2300034 (2023)]。

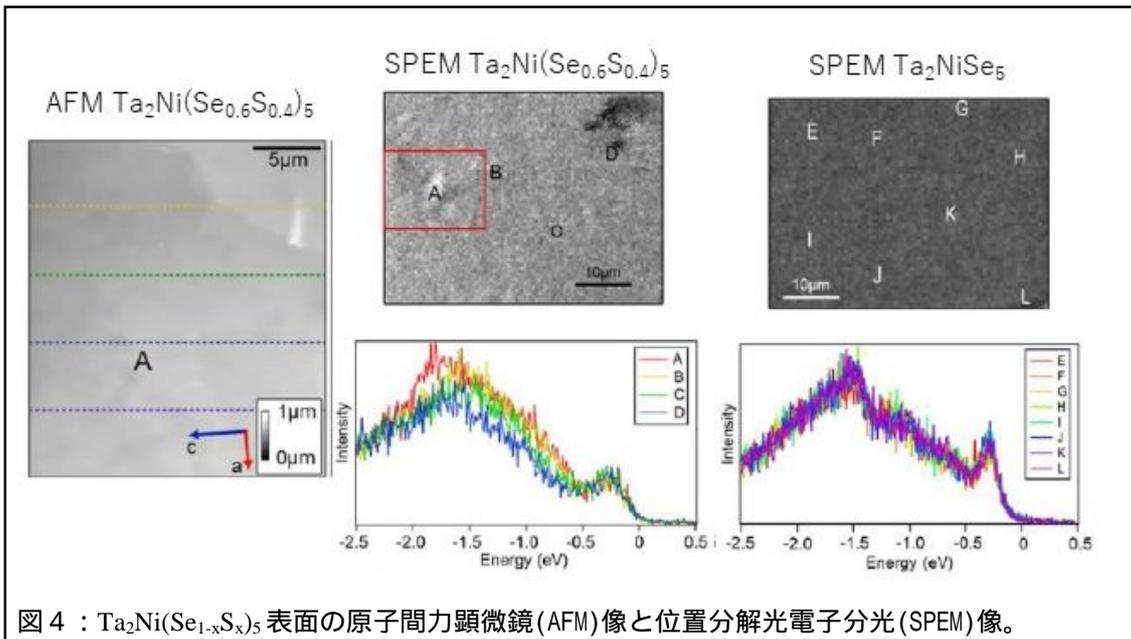


図 4 : $Ta_2Ni(Se_{1-x}S_x)_5$ 表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像と位置分解光電子分光 (SPEM) 像。

原子間力顕微鏡像が示すように、劈開面は数十 μm 程度の領域で平坦である。 $x=0.0$ の場合、劈開表面の様々な位置で測定した光電子スペクトルが一致するが、 $x=0.4$ の場合には、 $-1.0 \sim -2.0$ eV 付近のバンドが S 置換効果によって位置依存性を示し、電子状態が不均一になっている。しかしながら、 -0.3 eV 付近の励起子効果によるシャープなピークは位置に依存しない。このことから、励起子効果による伝導帯と価電子帯の混成は元素置換などによる乱れの効果に対して頑強であることがわかった。

2020 年度後半から 2021 年度に大川万里生博士研究員が研究に参加し、 Ta_2NiSe_5 の原子層結晶の作製を開始した。当初の予算計画を変更して高精度の偏光顕微鏡とマイクロプローブを導入し、機械的に原子層結晶を作製するプロセスを構築した。これにより、機械的な剥離法によって試料を作製し、偏光顕微鏡、原子間力顕微鏡、光電子分光によって評価するシステムが完成した。2022 年度に剥離法によって厚さ 50 nm 程度の薄膜を大気中で作成してシリコン基板上に転写した原子層結晶の光電子分光測定を行ったところ、大気中で表面が汚染されてしまい、本質的な光電子スペクトルを得ることができなかった。

コロナ禍のため時間分解光電子分光実験が制約を受けていた期間を利用して、 Ta_2NiSe_5 での Ni サイトの Co 置換効果を第一原理バンド計算によって研究し、Co 置換の下でもエキシトニック相のバンドギャップが保持される機構を解明した。同様に、Se サイトの S 置換効果を研究し、 S 置換でエキシトニック相のバンドギャップが増大することを示した[J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074714 (2022)]。

(3)上記の 2 つの目標に加えて、 Ta_2NiSe_5 以外で励起子効果が期待される様々な系について角度分解光電子分光、時間分解光電子分光、位置分解光電子分光測定を行った。ドーピングによって超伝導を示す $LaOBiS_2$ では $Bi6s-S3p$ バンドの正孔と $Bi6p$ バンドの電子の間の相互作用が局所的に反転対称性を破った $Bi-S$ 結合の歪みと関係することが示唆された。高い熱電性能指数を示すことで知られる $SnSe$ では、 $Sn5p$ バンドからなる伝導帯に光励起された電子の寿命が ps オーダーになることが時間分解角度分解光電子分光によって判明した。また、層状構造を持つ $AuTe_2$ の高圧下赤外分光では、圧力に対して電子状態が激しく変化の様子が観測された。研究期間中に展開した光電子分光実験、赤外分光実験により、遷移金属カルコゲナイド、ビスマスやスズのカルコゲナイドにおいて、価電子帯の正孔と伝導帯の電子の間の相互作用(電子正孔相関)が重要な役割を果たすことが示唆されており、電子正孔相関を利用する新しい研究の潮流につながることを期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yu Takahashi, Takeshi Suzuki, Masaki Hattori, Mario Okawa, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Yigui Zhong, Kecheng Liu, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Shik Shin, Kozo Okazaki, Takashi Mizokawa	4. 巻 92
2. 論文標題 Temporal Evolution and Fluence Dependence of Band Structure in Photoexcited Ta ₂ Ni _{0.9} Co _{0.1} Se ₅ Probed by Time- and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064706-1, 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.064706	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 Takumi Mitsuoka, Yu Takahashi, Takeshi Suzuki, Mario Okawa, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Mari Watanabe, Jiadi Xu, Qianhui Ren, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Kozo Okazaki, Shik Shin, and Takashi Mizokawa	4. 巻 92
2. 論文標題 Quasi One-Dimensional Band Structure of Photoinduced Semimetal Phase of Ta ₂ Ni _{1-x} CoxSe ₅ (x = 0.0 and 0.1)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 023703-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.023703	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 -

1. 著者名 Masaki Hattori, Giovanni Tomassucci, Genki Hayashi, Mario Okawa, Marek Kopciuszynski, Alexey Barinov, Yangfan Lu, Hidenori Takagi, Naurang L. Saini, Takashi Mizokawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Robustness of Excitonic Coupling in Ta ₂ NiSe ₅ Against Electronic Inhomogeneity Introduced by S Substitution for Se	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Quantum Technologies	6. 最初と最後の頁 2300034-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qute.202300034	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 H. Okamura, T. Mizokawa, K. Miki, Y. Matsui, N. Noguchi, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y. Lu, H. Takagi, Y. Ikemoto, and T. Moriwaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Pressure suppression of the excitonic insulator state in Ta ₂ NiSe ₅ observed by optical conductivity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045141-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.045141	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 Mario Okawa, Yuka Akabane, Mizuki Maeda, Gangjian Tan, Li-Dong Zhao, Mercuri G. Kanatzidis, Takeshi Suzuki, Mari Watanabe, Jiadi Xu, Qianhui Ren, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Shik Shin, Kozo Okazaki, Naurang L. Saini, Takashi Mizokawa	4. 巻 223
2. 論文標題 Direct observation of multiple conduction-band minima in high-performance thermoelectric SnSe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 115081-1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2022.115081	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 Souma Hikami, Shigeyuki Ishida, Akira Iyo, Hiroshi Eisaki, Masashi Arita, Shiv Kumar, Eike F. Schwier, Kennya Shimada, Naurang L. Saini, and Takashi Mizokawa	4. 巻 91
2. 論文標題 Fermi Surface Geometry of Heavily Hole Doped CaKFe4As4 Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124704-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.124704	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 Takashi Mizokawa, Alexei Barinov, Viktor Kandyba, Alessio Giampietri, Ryoya Matsumoto, Yohei Okamoto, Kou Takubo, Koji Miyamoto, Taichi Okuda, Sunseong Pyon, Hiroyuki Ishii, Kazutaka Kudo, Minoru Nohara, Naurang L. Saini	4. 巻 5
2. 論文標題 Domain Dependent Fermi Arcs Observed in a Striped Phase Dichalcogenide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Quantum Technologies	6. 最初と最後の頁 2300029-1, 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qute.202200029	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 Masato Fujii, Tomoyuki Yamaguchi, Takuo Ohkochi, Chandan De, Sang-Wook Cheong, and Takashi Mizokawa	4. 巻 106
2. 論文標題 Bulk and surface electronic structure of MnPSe3 revealed by photoemission and x-ray absorption spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035118-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.035118	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 Genki Hayashi and Takashi Mizokawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Orbital dependent band degeneracy and edge states in single layer and AA bilayer honeycomb lattice systems with p orbital degeneracy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 085011-1, 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/ac8855	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 -

1. 著者名 Yu Takahashi and Takashi Mizokawa	4. 巻 91
2. 論文標題 Impact of Co or Cu Substitution for Ni on the Electronic Structure of Ta ₂ NiSe ₅ Studied by Band Structure Calculations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074714-1, 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.074714	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 溝川貴司	4. 巻 65
2. 論文標題 遷移金属化合物の軌道秩序相のドメイン分解nano-ARPES	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 224, 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.224	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 Matsumoto Ryoya, Saini Naurang L., Giampietri Alessio, Kandyba Viktor, Barinov Alexey, Jha Rajveer, Higashinaka Ryuji, Matsuda Tatsuma D., Aoki Yuji, Mizokawa Takashi	4. 巻 90
2. 論文標題 Surface Electronic States and Inclining Surfaces in MoTe ₂ Probed by Photoemission Spectromicroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084704-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.084704	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 K. Matsubayashi, H. Okamura, T. Mizokawa, N. Katayama, A. Nakano, H. Sawa, T. Kaneko, T. Toriyama, T. Konishi, Y. Ohta, H. Arima, R. Yamanaka, A. Hisada, T. Okada, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, K. Munakata, A. Nakao, M. Nohara, Y. Lu, H. Takagi, and Y. Uwatoko	4. 巻 90
2. 論文標題 Hybridization-Gap Formation and Superconductivity in the Pressure-Induced Semimetallic Phase of the Excitonic Insulator Ta ₂ NiSe ₅	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074706-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.074706	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 Yu Matsuzawa, Tomohiro Morita, Masashi Arita, Alessio Giampietri, Viktor Kandyba, Alexey Barinov, Akira Takahashi, Yusuke Nagakubo, Tadashi Adachi, Yoji Koike, Atsushi Fujimori, Naurang L. Saini, and Takashi Mizokawa	4. 巻 90
2. 論文標題 Fermi Surface Geometry and Inhomogeneous Electronic States in Pr _{1.3-x} La _{0.7} Ce _x Cu ₀₄ (x = 0.05) with Small Superconducting Volume Fraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054704-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.054704	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 溝川 貴司、岡崎 浩三	4. 巻 76
2. 論文標題 励起子絶縁体は存在するか?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 355, 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.76.6_355	査読の有無 無
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 Takeshi Suzuki, Yasushi Shinohara, Yangfan Lu, Mari Watanabe, Jiadi Xu, Kenichi L. Ishikawa, Hide Takagi, Minoru Nohara, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Takashi Mizokawa, Shik Shin, and Kozo Okazaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Detecting electron-phonon coupling during photoinduced phase transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L121105-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L121105	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 T. Morita, Y. Matsuzawa, S. Kumar, E. F. Schwier, K. Shimada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, N. L. Saini, and T. Mizokawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Evolution of the Fermi surface in superconductor PrO _{1-x} FxBiS ₂ (x = 0.0, 0.3, and 0.5) revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094510-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.094510	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 Takumi Mitsuoka, Takeshi Suzuki, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Mari Watanabe, Jiadi Xu, Qianhui Ren, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Shik Shin, Kozo Okazaki, and Takashi Mizokawa	4. 巻 89
2. 論文標題 Photoinduced Phase Transition from Excitonic Insulator to Semimetal-like State in Ta ₂ Ni _{1-x} CoxSe ₅ (x = 0.10)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124703-1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.124703	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 -

1. 著者名 Yuka Akabane, Taiki Shimaiwa, Yosuke Goto, Yoshikazu Mizuguchi, Takayoshi Yokoya, Masashi Arita, Shiv Kumar, Eike F. Schwier, Kenya Shimada, Naurang L. Saini, and Takashi Mizokawa	4. 巻 89
2. 論文標題 Momentum Dependent Band Renormalization and Surface Aging Effect on a Zone Center Electron Pocket in NaSn ₂ As ₂ Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114707-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114707	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 A. Ricci, G. Campi, B. Joseph, N. Poccia, D. Innocenti, C. Gutt, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, T. Mizokawa, M. Sprung, and N. L. Saini	4. 巻 101
2. 論文標題 Intermittent dynamics of antiferromagnetic phase in inhomogeneous iron-based chalcogenide superconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020508-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.020508	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 Y. Chiba, T. Mitsuoka, N. L. Saini, K. Horiba, M. Kobayashi, K. Ono, H. Kumigashira, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y. F. Lu, H. Takagi, and T. Mizokawa	4. 巻 100
2. 論文標題 Valence-bond insulator in proximity to excitonic instability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245129-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.245129	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

[学会発表] 計22件(うち招待講演 4件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 服部真己, 大川万里生, 鈴木剛, Yigui Zhong, Kecheng Liu, 高木英典, Yangfan Lu, 金井輝人, 板谷治郎, 辛埴, 岡崎浩三, 溝川貴司
2. 発表標題 励起子絶縁体Ta ₂ Ni(Se _{0.6} SO _{0.4}) ₅ の高強度光励起における擬ギャップ状態からノーダル半金属状態へのクロスオーバー
3. 学会等名 13pPSC-34 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川万里生, 高橋優, 服部真己, 鈴木剛, Yigui Zhong, Kecheng Liu, Yangfan Lu, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 金井輝人, 板谷治郎, 辛埴, 岡崎浩三, 溝川貴司
2. 発表標題 時間・角度分解光電子分光による励起子絶縁体Ta ₂ NiSe ₅ の光誘起電子状態の検証
3. 学会等名 15pW241-3 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋優, 大川万里生, 服部真己, 鈴木剛, Yigui Zhong, Kecheng Liu, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 金井輝人, 板谷治郎, 辛埴, 岡崎浩三, 溝川貴司
2. 発表標題 励起子絶縁体Ta ₂ Ni _{1-x} CoxSe ₅ の時間・角度光電子分光
3. 学会等名 15pW241-4 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林元輝, 大川万里男, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 北村未歩, 志賀大亮, 組頭広志, N. L. Saini, 溝川貴司
2. 発表標題 ARPESによるカイラル結晶IrGe4の電子状態
3. 学会等名 12pW331-15 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村英一, 光本祥悟, 大槻太毅, 吉田鉄平, 溝川貴司, 池本夕佳, 森脇太郎, 有田将司, 工藤一貴, 石井博文, 野原実
2. 発表標題 高压下AuTe2の光学伝導度による研究: Te2ダイマー解消と電子状態の関係
3. 学会等名 15aW541-3 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村英一, 松井勇太, 三木克哲, 溝川貴司, 魯楊帆, 片山尚幸, 野原実, 高木英典, 森脇太郎, 池本夕佳
2. 発表標題 励起子絶縁体Ta ₂ NiSe ₅ のS置換系における光学伝導度の圧力応答
3. 学会等名 15aGB41-4 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林元輝, 溝川貴司
2. 発表標題 タイトバインディング計算によるプランベンのエッジ状態
3. 学会等名 21pD2-1 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部真己, 高橋優, 溝川貴司
2. 発表標題 第一原理計算によるTa ₂ Ni(Se _{1-x} S _x) ₅ の電子状態
3. 学会等名 20pPSH-39 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井勇太, 三木克哲, 溝川貴司, 魯楊帆, 片山尚幸, 野原実, 高木英典, 森脇太郎, 池本夕佳, 岡村英一
2. 発表標題 励起子絶縁体関連物質Ta ₂ Ni(Se _{1-x} S _x) ₅ の高圧赤外分光
3. 学会等名 PSH-96 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林元輝, 溝川貴司
2. 発表標題 ハニカム格子d-pモデルのスピン軌道秩序と金属絶縁体転移
3. 学会等名 14aH2-10 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Mizokawa
2. 発表標題 Domain-dependent surface states in charge-orbital ordered transition-metal chalcogenides probed by nano-ARPES
3. 学会等名 Nanosec2021(online) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林元輝, 溝川貴司, 島岩泰暉
2. 発表標題 蜂の巢格子上のp電子系の対称性とバンド構造
3. 学会等名 PSD-5 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋優, 溝川貴司
2. 発表標題 バンド計算によるTa ₂ Ni _{1-x} CoxSe ₅ のCo 置換効果
3. 学会等名 PSH-96 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水上颯馬, 森網尚輝, 溝川貴司, 石田茂之, 永崎洋, 伊豫彰, 今井基晴, 阿部英樹, 有田将司, Shiv Kumar, Eike F. Schwier, 島田賢也, N.L. Saini
2. 発表標題 CaKFe ₄ As ₄ の特異なフェルミ面構造
3. 学会等名 9aH1-4 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤羽祐香, 後藤陽介, 水口佳一, 横谷尚睦, Shiv Kumar, Eike F.Schwier, 島田賢也, N.L.Saini, 溝川貴司
2. 発表標題 NaSn ₂ As ₂ におけるバンド構造の温度依存性
3. 学会等名 11aH1-1 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥岩泰暉, 密岡拓心, 溝川貴司, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 島田賢也, Shiv Kumar, Eike F. Schwier, A. Barinov, V. Kandyba, A. Giampietri, N.L. Saini
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるカイラル結晶IrGe4の電子状態
3. 学会等名 11pH1-3 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木剛, 篠原康, 魯楊帆, 渡邊真莉, 徐佳笛, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 溝川貴司, 石川顕一, 岡崎浩三, 辛埴
2. 発表標題 周波数領域角度分解光電子分光法によるTa2NiSe5における光誘起絶縁体金属転移の研究(実験)
3. 学会等名 11pK36-1 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠原康, 鈴木剛, 魯楊帆, 渡邊真莉, 徐佳笛, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 溝川貴司, 石川顕一, 岡崎浩三, 辛埴
2. 発表標題 周波数領域角度分解光電子分光法によるTa2NiSe5における光誘起絶縁体金属転移の研究(理論)
3. 学会等名 11pK36-2 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 密岡拓心, 鈴木剛, 渡邊真莉, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 岡崎浩三, 辛埴, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 魯楊帆, 高木英典, 溝川貴司
2. 発表標題 励起子絶縁体Ta2Ni1-xCoxSe5の時間分解光電子分光
3. 学会等名 12pPSA-15 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝川貴司
2. 発表標題 放射光分光によるBiS2系超伝導体の原子価不安定性とバンド構造
3. 学会等名 10pB17-7 日本物理学会 2021年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝川貴司
2. 発表標題 Ta2NiSe5のエキシトニック相と光誘起半金属相
3. 学会等名 分子研研究会「有機ディラック電子系におけるトポロジカル現象と新奇物性開拓」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Mizokawa
2. 発表標題 Domain-dependent electronic structure of layered transition-metal compounds probed by photoemission spectromicroscopy
3. 学会等名 Conference on Advances in Electron Spectroscopy - Experiment and Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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	岡村 英一 (Hidekazu Okamura) (00273756)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授 (16101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	岡崎 浩三 (Kozo Okazaki) (40372528)	東京大学・物性研究所・准教授 (12601)	

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1件

国際研究集会	開催年
2nd Italy-Japan seminar on electronic correlation and lattice anomalies in superconducting and thermoelectric materials	2020年～2020年

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
---------	---------