

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03433

研究課題名（和文）一軸応力印加角度分解光電子分光法によるトポロジカル相転移の研究

研究課題名（英文）Study on Topological Phase Transition Using Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy with Uniaxial Stress Application

研究代表者

有田 将司 (Masashi, Arita)

広島大学・技術センター・技術専門職員

研究者番号：20379910

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：一軸歪印加を行うことで結晶の格子に歪を与えながら、角度分解光電子分光法（ARPES）を行い、試料の電子状態の変化の観測を行った。当初、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ のトポロジカル相転移などの観測がねらいであったが、ARPES測定可能な状態での歪印可が困難であった。そのため、基板歪印可型やピエゾ素子型、ねじ式の1軸応力印加ホルダを開発し、CDW物質1T-TaS2やトポロジカル絶縁体Bi2Te3での一軸歪印可ARPES測定を行い、電子状態の変化をとらえることに成功した。
この一軸歪印加試料ホルダは、放射光ARPES装置の共同研究ユーザーが利用でき、外場印可の実験ができる環境を整備することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ARPESは、超高真空中で行う表面敏感な測定手法であるため、外場印可下で測定は難易度が高いが、この研究課題を通し放射光ARPES装置において一軸歪印可のARPES測定手法を確立できた。一軸歪印可ARPES測定を用い、CDW物質1T-TaS2のCDW抑制やトポロジカル絶縁体Bi2Te3の歪誘起で新しいトポロジカル表面状態の変化をとらえることができた。

さらに、試料ホルダに電極を装備させたことで、ホルダ上で電気回路を組むことができ、電場や電流、磁場印可測定の可能性を広げ、国内で初めて放射光高分解能ARPESビームラインで、複数の外場印可測定を可能にした。今後、実際のデバイス開発に応用でき得る。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to observe changes in the electronic structure of the material by applying uniaxial strain to the crystal lattice and using angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES). For $Pb_{1-x}Sn_xTe$, it was difficult to observe topological phase transitions by applying uniaxial strain. Consequently, we developed three uniaxial strain holders for use with ARPES measurement: substrate strain type, piezoelectric device type, and screw type uniaxial strain holders. Using these holders, we successfully observed changes in the electronic structure of the charge density wave material 1T-TaS2 and the topological insulator Bi2Te3 under uniaxial strain.

The developed uniaxial strain sample holders for ARPES measurements can be widely used by collaborative researchers in ARPES apparatus equipped at our undulator beamline. In the environment established through this research project, it has become possible to perform ARPES measurements under various external fields.

研究分野：固体物性

キーワード：角度分解光電子分光 一軸歪印可 外場印可 トポロジカル物質 CDW

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

$Pb_{1-x}Se_xTe$ は、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe と絶縁体 PbTe の混晶物質である。トポロジカル絶縁体とはバルクが非自明なトポロジカル指数を持った絶縁体で、表面や物質境界に偏在した金属的エッジ状態を持つ。トポロジカル結晶絶縁体は、その一種で空間群の対称性に保護された表面電子状態を持つ物質である。SnTe は、空間群 $Fm\bar{3}m$ (No.225) で、L 点周辺のエネルギーギャップで、スピン軌道相互作用によりバンド反転を起こしている絶縁体である(図 1)。バンド反転があるため、バルクは非自明なトポロジカル指数を持ち、さら結晶構造のミラー対称性からその対称性に守られた金属的な電子状態がその物質表面に現れる(図 2)。一方、PbTe は、結晶構造とバンド構造は同様であるが、スピン軌道相互作用によるバンド反転は無く、通常のいわゆる”Trivial”な絶縁体である(図 1)。バルクエッジ対応から、この間の混晶系 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ では $x = 0.8 \sim 0.6$ でエネルギーギャップが閉じるトポロジカル相転移が起こる(図 3)。また、PbTe は、a 軸方向に 2% の格子定数の減少をさせると、バルクのギャップがほとんどゼロのディラックセミメタル近傍となる。これは 1 軸応力印加によるトポロジカル相転移を示唆する(図 4)。

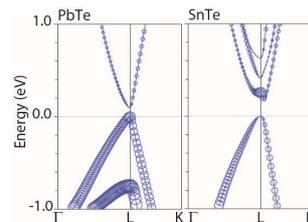


図 1: PbTe と SnTe とバルクバンド構造。○は Te 3d 成分。

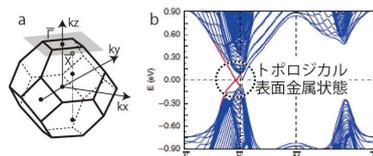


図 2: a) SnTe のブリルアンゾーン b) 表面バンド構造[Nature Communications 3,982(2012)].

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe のミラー対称性を破ることは、トポロジカル表面状態を破ることであり、電場や磁場を与えることにより試みられている。PbTe/SnTe 接合を作ることでその境界で結晶構造が乱れミラー対称性を破れ、その特異な磁気抵抗効果が報告されている[Phys. Rev B 98, 161301(R) (2018)]。また 3 次元トポロジカル絶縁体に磁場をかける時間反転対称性を破る操作や 3 次元トポロジカル結晶絶縁体にミラー対称性を破るような”外場”を与えると、金属表面状態にはギャップが生じ、2 次元のトポロジカル状態は消える。一方、試料端に 1 次元なトポロジカル金属状態が残留することが理論的に予測され、Bi 単結晶で実験的に観測された[Nat. Phys. 14,918(2018)]。

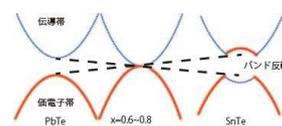


図 3: $Pb_{1-x}Se_xTe$ バンド模式図。

バンドの状態を調べることができる角度分解光電子分光 (ARPES) 測定は、近年ではディラック・ワイル電子系やトポロジカル絶縁体の研究にその威力を発揮している。しかしながら、ARPES 測定は、測定環境の乱れに影響を受けやすく、電場、磁場印加下での測定は不可能である。他の外場として、試料への圧力印加下での測定は、超高真空中での加圧機構を導入することや測定表面が開放されていることで正確な加圧が困難ではあるが、測定環境の乱れは少ない為、いくつかの方法で結晶中の応力変化を与えて ARPES 測定が試みられている。測定試料を薄膜化し、基板結晶状にエピタキシャルに成長させる際に基板結晶との格子定数のミスマッチを利用し、面内応力を変化させる方法[Phys. Rev B 95, 224507 (2017)]や、測定試料を固定する試料基板を何らかの方法で変形させ、結晶表面や内部の応力を与える方法で、ARPES 測定が成功している[例えば Nat. Commun., 9, 4535 (2018)]。

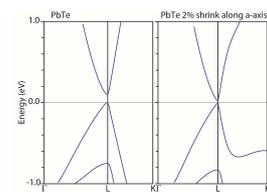


図 4: PbTe のバンド計算の結果(左)と a 軸の格子定数を 2% 減少させたバンド計算結果(右)。

2. 研究の目的

我々は ARPES 測定が可能、かつ、対称性を破る操作を行うには 1 軸応力印加が適しており、応力印加により、トポロジカル相転移や高次トポロジカル相が現れる $Pb_{1-x}Sn_xTe$ は、最適な測定試料と考えた。(100) 方向への応力印加により格子定数が変化することでトポロジカル相転移や結晶に歪を与えることで様々なトポロジカル相が出現するため、物理的に興味深い。このようなトポロジカル物質において応力印加下でトポロジカル相転移や相転移点でのディラック点の変化の観測し、トポロジカル物質の表面・バルクの電子状態の外場からの影響を解明する。

この研究課題推進の過程で、広島大学放射光施設 (HiSOR) の高分解能 ARPES ビームライン装置において一軸応力印加 ARPES 測定のシステム構築を行う。これらを広く共同研究ユーザー公開し、ユーザー利用可能な外場印加 ARPES 測定システムの整備を行う。

3. 研究の方法

[一軸応力印加ホルダの開発]

ARPES 測定は、HiSOR BL-9A の装置で行った。光電子分光装置とビームラインは、我々が中心となり、立ち上げ、改良、整備を進めてきており、研究期間中には微小集光ミラーの設置と新型のディフレクタタイプ光電子アナライザへの更新を行った。また ARPES 測定ステージは、電子放出角度を調整するためにアジマス角とチルト角を調整できる試料ステージが付いているが、それに加え 8 端子電極を装備したステー

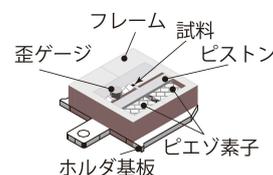


図 5: 一軸応力印加用試料ホルダ。

ジを導入し整備を行なう。それを利用し、ピエゾ素子による歪印可ホルダを開発・作成する。図5に当初計画していた一軸歪印加用試料ホルダの略図を示す。成形した測定試料を設置し、ピエゾ素子によりピストンを押すことにより圧力を試料に掛ける予定だったが、均等に圧力をかけることが実際の測定試料では困難であった。また試料は機械研磨試料も測定することを考慮し、試料アニールが可能な手動式歪印可ホルダも開発した。試料の清浄表面は破断でも可能であるが、再現性を向上させるために超高真空中での真空中の Ar イオンスパッタと通電加熱によるアニールで行うこともある。そのため、素材や構造を考慮し、開発を行った。さらに、へき開や破断による表面クリーニング試料に使用できる基板に歪を与えるタイプの歪印可試料ホルダも開発した。

[測定試料 $Pb_{1-x}Se_xTe$ の作成、成形、研磨:角度分解光電子分光測定の実施]

$Pb_{1-x}Se_xTe$ についてトポロジカル相転移近傍の試料を育成し、[001]を測定面に(100)方向の圧力印加ができる試料を成形、研磨し準備を行った。加圧ホルダに設置し、加圧試験、清浄表面作製のためにスパッタ・アニールの試験を行った。また、基板に歪を与える方法や押しネジなどによる手動の加圧に切り替えて測定も行った。

測定準備槽にて、 $Pb_{1-x}Se_xTe$ の清浄表面作成を行い[100]面での測定を L 点周辺(表面 BZ では \bar{X} 点周辺)のバンド分散の測定を行った。 $Pb_{1-x}Se_xTe$ の $x \sim 0.35$ の試料はトポロジカル相転移近傍にあると考えられるので、一軸応力印加によるバルクバンドの観測を行い、表面状態の分散の変化をとらえることを目指した。

[層状試料の測定]

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 や電荷密度波(CDW)物質 $1T-TaS_2$ は、比較的柔軟性のある層状物質であるため、試料基板に歪を印加する試料ホルダでの歪印可が比較的容易と考え選択、測定を行った。これらの試料は ARPES での測定例も多く、我々も測定経験があるため、歪印可前後でのスペクトルの変化を捉えやすく、考察も容易であると考えた。

4. 研究成果

[$Pb_{1-x}Sn_xTe$ の試料準備と歪印可測定1]

本研究では、初めに $Pb_{1-x}Sn_xTe$ の研究を進めるために、ブリッジマン法で $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ 単結晶とブリッジマン法と化学気相輸送法により $SnTe$ 単結晶のサンプル作成を行った(写真1)。得られた単結晶では明瞭な Laue 像を得ることができ、結晶方位を確定できた。測定表面[001]は、ラウエ像で方位を 1° 以内で合わせた後、一部は真空中での破断用に成形しサンプルホルダに固定。残りを大気中で、200倍の光学微分干渉顕微鏡で大きな傷の無い滑らかな表面が観測できる程度に機械研磨を行った。洗浄、固定後、真空導入し、 $400^\circ C \cdot 3$ 時間の脱ガス後、 $2 kV/5$ 分間の Ar イオンスパッタと $450^\circ C \cdot 20$ 分間でのアニールを3回程度繰り返すことで清浄化を試みた。その後 LEED 測定を行ったところ、明瞭な LEED スポットが得られ ARPES 測定が可能な表面が得ることができたと判断した。

歪印可前の測定は、過去の研究例[Nat. Phys., 8, 800 (2012)]から励起光エネルギー $h\nu \sim 22 eV$ 測定温度 20Kで行った。 \bar{X} 点(バルクの L 点)周辺で測定して得られた $SnTe$ と $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ のフェルミ面 ARPES 像を図6に示す。両者ともにスペクトルは得られたが $SnTe$ は、フェルミ準位(E_F)に達する2本のホール型金属的バンドが観測できたがバルクバンドと表面バンドの明瞭な分離ができなかった。これは、 $SnTe$ が価電子帯頂上に E_F を持つ p-type になっているためであると考えられる。一方、 $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ は、 $E = -0.05 eV$ 付近に価電子帯頂上を観測できる、バルクのギャップを持った絶縁体であり、そのバルクギャップ内に E_F に達する金属的なバンドが得られた。これはトポロジカル結晶絶縁体特有の金属的表面バンドである。そこで、全部品が Mo である一軸圧力印可ホルダを製作した。Mo ネジとレバーを利用した、加圧型を準備、測定を試みた(写真2)。これを使用する場合、接着剤を使用するタイプのサンプルホルダでは不可能であった真空中の $400^\circ C$ での試料アニールが可能となり、機械研磨試料であっても ARPES 測定が可能となった。また加圧用のネジを真空中で操作することで、*in-situ* での応力変化を可能にした。そこで、 $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ について、真空中で応力変化をさせ、同様に測定を行った。結果を図7に示す。加圧後のスペクトルは、表面バンドが不明瞭になる変化が見られたが、そのバンドのエネルギー値やバルクバンドギャップの大きさ、フェルミ波数の変化などがほとんど見られなかったため、応力印加によるスペクトルの変化



写真1:ブリッジマン法で作成した $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ (左)単結晶と化学気相輸送法で作成した $SnTe$ (右)単結晶。

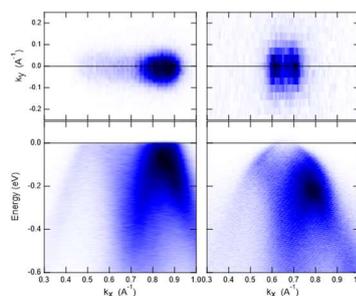


図6: \bar{X} 点の(左上) $SnTe$ のフェルミ面(左下) $SnTe$ の ARPES イメージ(右上) $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ のフェルミ面(左下) $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ の ARPES イメージ

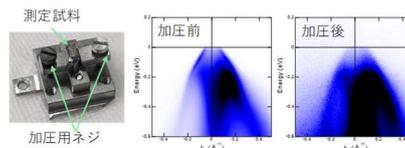


写真2:レバー加圧型応力印可ホルダ
図7(左)加圧前と(右)加圧後の \bar{X} 点の $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ の ARPES イメージ

と結論付けられなかった。この測定を実施する中で、このホルダを使用する試料は、正確に幅 2 mm に成形し、固定する必要があるが、試料アニールを繰り返し行うと昇華によって試料が小さくなり、正しく加圧できていないという問題が発生した。また、400°Cから 20K への温度変化で Mo 部品が脆弱になり、部品が割れる不具合が出て、繰り返しの測定ができず、再現性の確認ができない事例が出た。

[基板歪印可型ホルダと電極システムの開発]

そこで、試料基盤を歪ませることで応力印加する方法に切り替え、そのホルダの開発を行った。ネジとヒンジにより、厚さ 0.3~0.5mmのシート状のサンプル基盤を曲げることで、その上に張り付けたサンプルに応力を印加する方式のホルダを開発、作成した(写真3)。真空内での、応力を可変させること考え、サンプルホルダ正面から応力可変用ネジを操作できる様にした。加圧方向から減圧(伸長)方向まで応力を変化させることが可能である。応力変化を与えることが可能かを確かめるため、層状 CDW 物質の 1T-TaS₂を使い、検証測定を行った。この試料は比較的薄く柔軟性があり、形状加工もしやすいため、また、応力印加で CDW 転移点の変化が期待できるためこの試料を選択した。

初めに応力印加ホルダ上で、4端子抵抗率測定を行い、転移点の変化を観測する。そのために既存の3軸回転マニピュレータのステージを改造し、真空槽外につながる電極8極を設置。試料の角度調整を行いながら、電圧、電流の印可、測定ができるようにした(写真4)。また、その電極に正しく接触でき、かつ、サンプルトランスファーや温度変化測定が可能なサンプルホルダを新たに開発し(写真5)、サンプルホルダ上で電気回路を組むことでの測定サンプルへの外場印可 ARPES 測定や、同時の電気的な測定を可能にした。この電極ホルダ上には、上記の応力印加ホルダも設置可能である。

電極マニピュレータ、電極サンプルホルダを用い4端子抵抗率測定を 1T-TaS₂ に対して、行った。歪印可ホルダに接着した試料に配線を行い(写真6)、測定を行った例を図8に示す。350K 付近の Incommensurate (IC)-CDW 相と Nearly Commensurate (NC)-CDW 相の相転移、200K 付近にみられる NC-CDW 相と Commensurate (C)-CDW 相のヒステリシスを持つ相転移が観測され[Phys. Rev. Lett. 32 882 (1974), Adv. Phys. 24 196 (1975)]、電極ホルダ上で抵抗率測定がされており、これらの電極システムが正しく作動することが分かった。さらに、同一試料において伸長(減圧)方向での歪印加下を行い、抵抗率測定の結果、特に降温過程の NC-CDW 相と C-CDW 相の相転移点において応力印加下で、相転移温度が5~10K 程度低下することが分かった(図8)。これは、格子に歪を印加することでネスティング条件が変化し CDW 転移が抑制されるためと考えられる。

[CDW 物質 1T-TaS₂ の歪印可測定]

この歪印可ホルダを用い、1T-TaS₂ に対して Γ -M 方向の ARPES 測定を行った。初めに歪印可無しの IC-CDW 相と C-CDW 相の ARPES スペクトルを図9に示す。C-CDW 相に転移すると CDW ポテンシャルによりエネルギーバンドの畳み込みが生じ、ARPES スペクトルでは、強度の再分配が起こる。そこで IC-CDW 相ではスペクトル強度が観測されない Γ 点周辺の E_F 近傍のスペクトル強度をプロットすることで、転移点を判断することにし、応力印加前と応力印加後の降温過程で ARPES の温度変化測定を行った。図9(左)と(中)のARPESスペクトル中に示された四角内の積分強度の変化を図9(右)に示す。IC-CDW 相と C-CDW 相の転移点160K 付近で両方とも強度が増加する様子がとらえられたが、急峻に強度が増加する温度が、歪印可有りの場合は無しの場合に比べ5K 程度、低温側にシフトすることが分かり、この結果は図8で示した抵抗率測定の結果と矛盾がなく、シフトする温度幅も同程度であった。このような ARPES での CDW 転移の抑制の報告例はなく、今後、歪量などの相関を観測・考察する予定である。

[Pb_{1-x}Sn_xTe の歪印可測定2]

このように基板に歪を印加するホルダでは、歪印可が正しく行われているので、Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te を[001]面、また SnTe を[110]面で歪が印可されやすいように薄板状に加工し、試料基盤に導電性接着剤で固定、トップポストにて破断を行い ARPES 測定を試みた。SnTe の L 点を観測できる励起光エネルギー $h\nu \sim 12\text{eV}$ を選択し、測定温度20Kで測定した ARPES 測定の結果を図10に示す。L 点付近のトポロジカル結晶絶縁体特有の表面バンドの観測を試みたが、[100]面と同

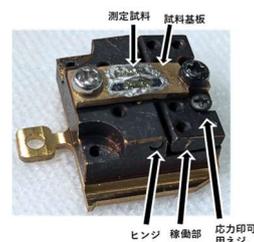


写真3: 基板歪印可型応力印加ホルダ。



写真4: 8極電極付マニピュレータ。



写真5: 8極電極サンプルホルダ。

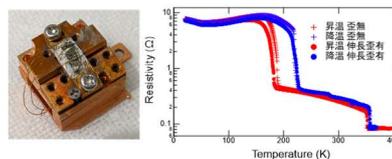


写真6: 抵抗率測定用に歪印可ホルダ上に配線した1T-TaS₂試料。
図8: 歪印可前後で測定した1T-TaS₂の抵抗値。

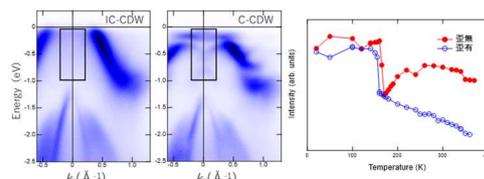


図9: 1T-TaS₂の Γ -M 方向の(左)370K IC-CDW 相(中)20K C-CDW 相での ARPES イメージ(右)スペクトル四角内の積分強度の温度変化。

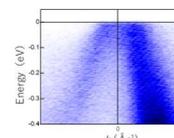


図10: SnTe [110]面、L 点付近での ARPES イメージ。

様に、 E_F に達する金属的バンドとバルクバンドとの分離が困難であった。また歪印可前後での変化は、議論しうるデータは得ることができなかった。測定後の試料を確認したところ、試料の割れや基板からの剥がれが確認され、正しく歪印可が行われなかった可能性がある。 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ は、硬く脆い物質であり、この基盤に歪を与える形での歪印可方法では困難であったと判断した。

[トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の歪印可測定]

トポロジカル物質での歪印可 ARPES 測定を目指し、 E_F 位近傍 Γ 点にディラック表面状態を有し、比較的柔らかい層状物質 Bi_2Se_3 で測定を行った。基板に歪を印加するタイプのホルダに Γ -M 方向に伸長させる歪を与える様に試料を設置、真空中でのトップポスト法で劈開し、清浄表面を得た。ネジを操作することで真空中にて、歪を変化させた ARPES 測定結果を図11に示す。トポロジカル絶縁体でのディラック表面状態が観測されているが、歪有のスペクトルでは、上部コーンがフェルミ順位側にシフトしているように見える。詳細のために $k_x = 0$ (Γ 点)での ARPES スペクトルを比較すると、歪印可前に $E = -0.326$ eV の構造は、歪印可後、低エネルギー(高結合エネルギー)側に 4 meV 程度シフトしている様子が見られた。これは、D. Flötotto らの報告と同様のエネルギーシフトと考えられる[Nano Lett. 18 5628(2018)]。一方、歪印可前、 $E \sim 0.3$ eV に観測される2つの構造は、歪印可後は、2つの構造のエネルギー差は増大している様子が見られ、これは、歪印可後にディラック点にギャップが生じている、もしくは、何らかの原因で、元々存在したエネルギーギャップが増大している様子を観測しているものと考えられる。前者の場合、トポロジカル相転移の可能性があり、後者の場合は、歪により試料の表面(観測している面)と裏面の表面状態の相関が大きくなる効果によりギャップが増大した、などが考えられる。トポロジカル絶縁体においても、今回 HiSOR BL-9A 用に開発した歪印可ホルダによって、一軸歪が印可でき電子状態の変化を観測できた。

[ピエゾ素子型歪印可ホルダの開発]

薄片形成が難しいものや $Pb_{1-x}Sn_xTe$ のように成形しても脆い試料では、基板を通した歪印可が困難であることが分かったため、当初の目標であった手動式とピエゾ素子を使った応力印加の切り替えの可能な試料ホルダを開発した。圧力方向と伸長方向の応力印加が行え、様々の大きさのサンプルに対応できるように、ギャップ調整ネジを備えたホルダで、ピエゾ素子に印可する電圧の影響を ARPES 像に与えないためにシールドカバーを備えた構造をしている。ピエゾ素子は、小型で比較的強力な積層圧電アクチュエーター(トーキン社製)を使用した。ピエゾ素子はスクリューピストンと交換することができ、手動印可型と圧電素子印可型の組み換えを可能にした。圧電素子では、駆動電圧を DC 0~120V まで変化させることで *in-situ* での印可する応力を可変させることができ、設計上は、約 20MPa までの応力印加できる。一方、手動型は、圧電素子型では不可能な、400 °C 程度までの試料アニールができ、機械研磨試料の測定を可能にしている。これらのホルダは、 $2 \times 2 \times 2$ mm³ 程度に試料成形してあれば、試料を所定の位置に設置でき、加圧が可能であるところまでは確認した。実際の ARPES 測定は未実施だが、70 V までの電圧印可では、ARPES イメージへの影響はみられなかった。また、部品の組み替えで、伸長(減圧)方向にも応力印加ができ、試料形状や固定方法を工夫することで、測定が可能になる。これらにより、HiSOR BL-9A での一軸応力印加 ARPES 測定の環境が整えられたと考えている。

この研究課題を通し、8 極の電極ホルダのシステムを開発でき、試料ホルダ上で、簡易の電気回路であれば、駆動させることができるようになった。これら外場印可 ARPES 測定システムを利用できる放射光高分解能 ARPES ビームラインの例は国内では初めてである。これら開発したシステムを使って、基礎物性研究だけではなく、駆動状態でのデバイスの電子状態や、応力印加状態での物質の電子状態の研究など様々な応用測定が高分解能 ARPES で可能となる。ユーザーにも広く公開し、今後、HiSOR での ARPES 測定の応用の幅を広げられるものと考えている。

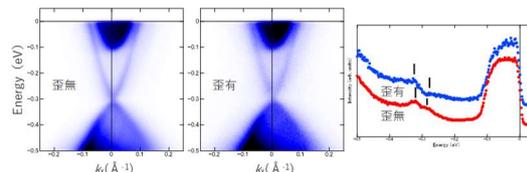


図 1 1 : Bi_2Se_3 Γ -M 方向の (左) 歪無し (中)歪有りでの ARPES イメージ (右) $k_x = 0$ (Γ 点)での ARPES スペクトル。

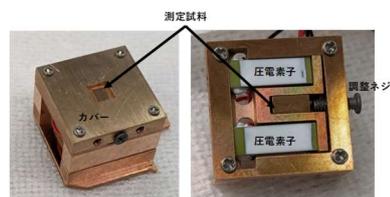


写真 7 : 開発したピエゾ素子型応力印加ホルダ (左) 測定時 (右) カバー下の構造。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 11件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Y. P. Zhu, M. Arita(21番目), C. Liu(全30名)	4. 巻 626
2. 論文標題 Observation of plaid-like spin splitting in a noncoplanar antiferromagnet	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 523(24)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-024-07023-w	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 T. Iwata, T. Kousa, Y. Nishioka, K. Ohwada, K. Sumida, E. Annese, M. Kakoki, K. Kuroda, H. Iwasawa, M. Arita, S. Kumar, A. Kimura, K. Miyamoto and T. Okuda	4. 巻 14
2. 論文標題 Laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy with micrometer spatial resolution and detection of three-dimensional spin vector	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 127(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-47719-z	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 R. Z. Xu, X. Du, J. S. Zhou, X. Gu, Q. Q. Zhang, Y. D. Li, W. X. Zhao, F. W. Zheng, M. Arita, K. Shimada, T. K. Kim, C. Cacho, Y. F. Guo, Z. K. Liu, Y. L. Chen and L. X. Yang	4. 巻 8
2. 論文標題 Orbital-selective charge-density wave in TaTe4	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 44(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-023-00573-8	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 R. Itaya, Y. Toichi, R. Nakanishi, N. Ebara, Y. Nakata, K. Kasai, K. Kuroda, M. Arita, I. Yamamoto, K. Fukutani and K. Sakamoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Creation of a p-type TlBiSe2 using photo-induced doping	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 114201(6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.7.114201	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. Anzai, A. Hariki, H. Sato, M. Arita, T. Zhuang and K. Hiraoka	4. 巻 108
2. 論文標題 Observation of temperature-dependent Fermi surface evolution at the valence transition of YbInCu4	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075116(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.075116	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 S. Hikami, S. Ishida, A. Iyo, H. Eisaki, M. Arita, S. Kumar, E. F. Schwier, K. Shimada, N. L. Saini, T. 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 the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124704(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 H. Anzai, R. Tawara, Y. Kikuchi, H. Sato, M. Arita, R. Takaaze, K. T. Matsumoto, K. Hiraoka	4. 巻 91
2. 論文標題 Photoemission Spectroscopy Study on the Heavy-Fermion Compound YbAgCu4	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 114703(6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.91.114703	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 Bentmann H., Maass H., Braun J., Seibel C., Kokh K. A., Tereshchenko O. E., Schreyeck S., Brunner K., Molenkamp L. W., Miyamoto K., Arita M., Shimada K., Okuda T., Kirschner J., Tusche C., Ebert H., Min?r J., Reinert F.	4. 巻 103
2. 論文標題 Profiling spin and orbital texture of a topological insulator in full momentum space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161107/1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L161107	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 Cho Soohyun, Jung Wonsig, Hong Jisook, Kim Beomyoung, Han Garam, Leandersson M., Balasubramanian T., Arita Masashi, Shimada Kenya, Shim Ji Hoon, Kim Changyoung, Park Seung Ryong	4. 巻 30
2. 論文標題 Observation of Dresselhaus type spin splitting of zinc blende structure semiconductors by circular dichroic photoemission study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Applied Physics	6. 最初と最後の頁 96 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cap.2021.06.011	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 Ma Xiao-Ming, Zhao Yufei, Zhang Ke, Kumar Shiv, Lu Ruie, Li Jiayu, Yao Qiushi, Shao Jifeng, Hou Fuchen, Wu Xuefeng, Zeng Meng, Hao Yu-Jie, Hao Zhanyang, Wang Yuan, Liu Xiang-Rui, Shen Huiwen, Sun Hongyi, Mei Jiawei, Miyamoto Koji, Okuda Taichi, Arita Masashi, Schwier Eike F., Shimada Kenya, Liu Chang [他6名]	4. 巻 103
2. 論文標題 Realization of a tunable surface Dirac gap in Sb-doped MnBi ₂ Te ₄	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121112/1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L121112	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 Ye Mao, Kuroda Kenta, Otrokov Mikhail M., Ryabishchenkova Anastasia G., Jiang Qi, Ernst Arthur, Chulkov Evgueni V., Nakatake Masashi, Arita Masashi, Okuda Taichi, Matsushita Tomohiro, Toth Laszlo, Daimon Hiroshi, Shimada Kenya, Ueda Yoshifumi, Kimura Akio	4. 巻 125
2. 論文標題 Persistence of the Topological Surface States in Bi ₂ Se ₃ against Ag Intercalation at Room Temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1784 ~ 1792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c07462	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 Xiao Shaozhu, Li Yinxiang, Li Yong, Yang Xiufu, Zhang Shiju, Liu Wei, Wu Xianxin, Li Bin, Arita Masashi, Shimada Kenya, Shi Youguo, He Shaolong	4. 巻 103
2. 論文標題 Direct evidence of electron-hole compensation for extreme magnetoresistance in topologically trivial YBi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115119/1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.115119	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 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 有田 将司、宮本 幸治、奥田 太一、生天目 博文、島田 賢也
2. 発表標題 HiSOR BL-9Aの現状とリモート実験に向けたサンプル搬送環境の開発
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 有田 将司、宮本 幸治、生天目 博文、島田 賢也
2. 発表標題 Development of sample transfer system in UHV chamber for remote experiments
3. 学会等名 2023年日本表面真空学会学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 合戸 洸平、大熊隆太郎、藤澤唯太、友田七海、岩田拓万、有田将司、Yuyang Dong、川口海周、森亮、黒田健太、岡田佳恵、近藤猛
2. 発表標題 新規励起子絶縁体候補物質GdGaIへのK蒸着で次元性が変化する電子構造の角度分解光電子分光観察
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山岡人志、谷田博司、Eike F. Schwier、Shivam Kumar、山本義哉、仲武昌史、有田将司、田島史郎、小野寺蓮太、西岡孝、島田賢也、水木純一郎
2. 発表標題 近藤半導体CeM ₂ Al ₁₀ (M = Ru、Fe) における混成強度の異方性
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山岡人志、Eike F. Schwier、谷田博司、山本義哉、Shivam Kumar、有田将司、島田賢也、田島史郎、小野寺蓮太、西岡孝、石井啓文、平岡望、水木純一郎
2. 発表標題 近藤半導体CeRu2Al10におけるRh置換効果：遍歴磁性から局所磁性へ
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 坪田悠希、宮井雄大、Shiv Kumar、田中清尚、石田茂之、永崎洋、中川駿吾、柏木隆成、有田将司、島田賢也、出田真一郎
2. 発表標題 角度分解光電子分光による過剰ドーピング Bi2212 の常伝導状態におけるキャリア濃度の評価
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山口広、大西祐輝、宮井雄大、坪田悠希、有田将司、田中清尚、佐藤仁、島田賢也、出田真一郎
2. 発表標題 角度分解光電子分光及び逆光電子分光による電子ドーピング系銅酸化物高温超伝導体NCCOの電荷揺らぎ効果の検証
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮井雄大、黒澤徹、小田研、有田将司、田中清尚、出田真一郎、島田賢也
2. 発表標題 超過剰ドーピングBi2201の高分解能角度分解光電子分光：電子状態の対称性の評価
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安齋太陽、菊池泰明、加藤夕汰、佐藤仁、有田将司、山田幾也、播木敦
2. 発表標題 放射光を用いた光電子分光法による四重ペロブスカイト酸化物 SrCu ₃ Ru ₄ O ₁₂ の準粒子ピークの観測
3. 学会等名 2024年日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中宏明、岡崎尚太、福島優斗、川口海周、原沢あゆみ、飯盛拓嗣、小森文夫、有田将司、森亮、黒田健太、笹川崇男、近藤猛
2. 発表標題 遷移金属ダイカルコゲナイド1T-TiS ₂ における角度分解光電子分光スペクトルの励起光エネルギー・偏光依存性
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山岡人志、谷田博司、Eike F. Schwier、Shivam Kumar、山本義哉、仲武昌史、有田将司、田島史郎、小野寺蓮太、西岡孝、島田賢也、水木純一郎
2. 発表標題 近藤半導体CeM ₂ Al ₁₀ (M = Ru、Fe)における混成強度の異方性
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村昭夫、福島優斗、白石海人、河野嵩、ヌルママト ムニサ、有田将司、三本啓輔、谷田博司
2. 発表標題 放射光ARPESを用いたCeCoSiのバンド構造の観測
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷元優希美、神森龍一、杉本光昌、佐藤仁、有田将司、Shiv Kumar、島田賢也、中村翔太、大原繁男
2. 発表標題 カイラル金属磁性体Yb(Ni _{1-x} Cu _x) ₃ Al ₉ の角度分解光電子分光
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 出田真一郎、吉田鉄平、田中清尚、有田将司、足立伸太郎、山口隼平、佐々木菜絵、渡辺孝夫、藤井武則、野地尚、石田茂之、内田慎一、W. O. Wang、B. Moritz、T. P. Devereaux、T. K. Lee、C. Y. Mou、藤森淳
2. 発表標題 不足ドーブ三層系銅酸化物高温超伝導体Bi ₂ 223の超伝導ギャップと擬ギャップ
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坪田悠希、宮井雄大、Shiv Kumar、田中清尚、石田茂之、永崎洋、中川駿吾、柏木隆成、有田将司、島田賢也、出田真一郎
2. 発表標題 角度分解光電子分光による銅酸化物高温超伝導体Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈₊ の電子相図の再検討
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西祐輝、宮井雄大、坪田悠希、有田将司、石田茂之、永崎洋、田中清尚、島田賢也、出田真一郎
2. 発表標題 角度分解光電子分光および逆光電子分光により検証する銅酸化物高温超伝導体の量子電荷揺らぎによる電子自己エネルギーへの影響
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮井雄大、黒澤徹、小田研、有田将司、田中清尚、出田真一郎、島田賢也
2. 発表標題 超過ドーピングBi2201の高分解能角度分解光電子分光：電子状態の対称性の評価
3. 学会等名 第78回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坪田悠希, Shiv Kumar, 宮井雄大, 田中清尚, 石田茂之, 永崎洋, 中川駿吾, 柏木隆成, 有田将司, 島田賢也, 出田真一郎
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるBi2Sr2CaCu2O8+ の電子相図の再検討
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 神森龍一, 谷元優希美, 佐藤仁, 有田将司, Shiv Kumar, 島田賢也, 松本圭介, 平岡耕一
2. 発表標題 角度分解光電子分光による価数相転移物質YbInCu4におけるc-f混成の変化の観測
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 大槻太毅, 石田達弘, 北村未歩, 有田将司, 中埜彰俊, 丸岡うらら, 寺崎一郎, 吉田鉄平
2. 発表標題 角度分解光電子分光による遷移金属カルコゲナイドTa2Pd(Se1-xSx)6の電子状態観測
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 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 高圧下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 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板谷亮太, 戸市裕一朗, 中西龍也, 榎原成則, 葛西健太郎, 中田慶隆, 黒田健太, 福谷圭祐, 山本勇, 有田将司, 坂本一之
2. 発表標題 光エネルギーに依存したTlBiSe2への光誘起ドーピング効果
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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