

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 7日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560019

研究課題名（和文） 熱電変換材料候補であるタリウム化合物が示すナノ空間変調構造の分光学的検証

研究課題名（英文） Spectroscopic verification of nanometer-spaced modulated structure that Tl compound which is a candidate for a thermoelectric material shows

研究代表者

三村 功次郎 (MIMURA KOJIRO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40305652

研究成果の概要（和文）：単結晶 TlInSe_2 熱電材料のインコメンシュレート(IC)相における Tl 原子周りの3次元原子像を Tl L_{III} 吸収端蛍光 X 線ホログラフィーにより調べた。得られた3次元像は、Tl 原子が本物質の IC 相に関連して空間的に非常に大きく揺らいでいること、フォノンバンドの計算から予測される揺らぎと良く対応していることを示唆する。また関連物質 TlGaTe_2 や TlSe に対してクロス状の特異な分散構造を角度分解光電子分光により観測した。この構造は、表面の伝導バンドに生じた構造を結合状態密度として観測したものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Three dimensional (3D) atomic images around the Tl atoms in single crystal TlInSe_2 thermoelectric material in the incommensurate (IC) phase were reconstructed using Tl L_{III} X-ray fluorescence holography. Comparison of the experimentally obtained 3D images with the theoretical calculated ones suggests that the Tl atoms have extremely large spatial fluctuations, which are related to the IC phase of this material, and corresponds well to those proposed by theoretical phonon calculations. Furthermore, we observed a cross-type peculiar dispersive structure for TlGaTe_2 and TlSe by means of angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES). It is assumed that the observed peculiar dispersive structure is caused by the dispersion of high-lying surface conduction bands and that ARPES detects the joint density of states.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：熱電変換材料・ナノ空間変調構造・インコメンシュレート相・軟 X 線発光分光・軟 X 線吸収分光・角度分解光電子分光・蛍光 X 線ホログラフィー

1. 研究開始当初の背景

擬1次元結晶構造をもつ TlInSe_2 (図1) は、結晶構造がインコメンシュレート (IC) 相 (ナノ空間変調構造) へと転移することに起

因した電荷分布の変調により、140℃以下で $10^6 \mu\text{V/K}$ という極めて高いゼーベック係数を示すことから有力な熱電変換材料の候補であるといえる。最近、我々は角度分解光電

子分光 (ARPES) により観測した価電子帯エネルギーバンドから、 TlInSe_2 における IC 相の実験的検証に初めて成功した。

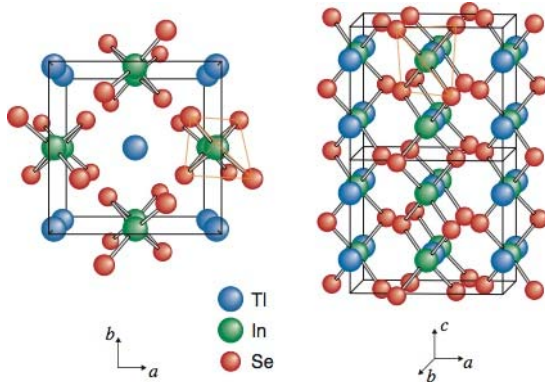


図 1. TlInSe_2 の結晶構造

しかし TlInSe_2 の価電子帯頂上-伝導帯の底の間の光学遷移は禁制遷移であるため、エネルギーギャップ等の基礎的パラメータすら得られていないという問題点がある。この問題は、同一試料表面に対して内殻励起を用いた軟 X 線発光分光 (XES) および軟 X 線吸収分光 (XAS) 実験を行い、得られた価電子帯、伝導帯の部分状態密度をフェルミ準位で正確に接続することで解決できる。さらに、XES, XAS スペクトルの偏光依存性を観測することで、ノーマル (N) 相から IC 相への転移に伴う軌道対称性の変化に関する議論も可能になるという利点を併せ持ち、 TlInSe_2 の相転移に伴う電子状態の情報が飛躍的に増大することが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、ARPES, XES, XAS の分光的手法を用いて、 TlInSe_2 の価電子帯から伝導帯にわたる電子構造の全貌を明らかにすると共に、測定対象を TlMeX_2 ($\text{Me} = \text{Ga}, \text{In}; \text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) へと拡張して同様の測定を行うことで電子状態の化学的傾向を整理し、 TlMeX_2 を基本とした IC 相を活かした熱電発電の実用化に向けた指針を得ることを目的とした。助成を受けた後、研究提案に従って高温にまで加熱可能なマニピュレータ先端部を試作して XES, XAS 測定を行ったが、 TlInSe_2 の各元素における価電子バンド-内殻ホール間の遷移による発光効率および内殻準位-伝導バンド間の遷移に伴う吸収効率が非常に弱いことが分かり、実効的なスペクトル観測が困難であることが明らかになった。そこで本研究の測定手段を、蛍光 X 線を発する原子の周りの局所的な構造を 3 次元的に明らかにすることができる蛍光 X 線ホログラフィー (XFH) に変更し、 TlInSe_2 の室温における原子位置ならびに原子揺らぎを視覚化し、IC 相と

の相関関係を議論した。また、IC 相に関わる研究とは異をなすが、 TlMeX_2 の ARPES を詳細に観測したところ、特異な表面分散構造が観測され、基礎物理の面から興味が持たれる。よって本稿では、この 2 点の結果について報告する。

3. 研究の方法

(1) 蛍光 X 線ホログラフィー実験

XFH 実験は、高エネルギー加速器研究機構物質科学研究機構にあるフォトンファクトリーの BL-6C および大型放射光施設 SPring-8 の BL12B2 において行った。(110) 表面を有する TlInSe_2 単結晶試料を 2 軸ゴニオメータの試料ステージに固定し、 $\text{Tl } L_{III}$ 吸収端 (12.66 keV) より高エネルギーの励起光を入射した際に放出される $\text{Tl } L\alpha$ 蛍光をインバースモードで観測した。 $\text{Tl } L\alpha$ 蛍光は円筒型グラフィットでエネルギー分析したのち、高速のアバランシェフォトダイオードで検出した。ホログラムは 13.0–18.0 keV の 7 つの入射 X 線エネルギー ($h\nu$) で観測した。XFH において本質的なアーティファクトを減少させるため、3D 原子像は異なる $h\nu$ で得た像を重ね合わせる Barton のアルゴリズムを利用して構築した。

原子像の特徴を定量的に見るため、理論計算を実行した。計算では 60 Å 半径のクラスターを TlInSe_2 の N 相の結晶構造 (図 1) から抽出し、3D 原子像は実験と同じ条件でシミュレートした。

(2) 角度分解光電子分光実験

ARPES 測定は、広島大学放射光科学センター HiSOR の BL-9A において行った。単結晶 TlGaTe_2 の (110) 清浄試料表面は 3×10^{-9} Pa 以下の超高真空下で試料を劈開することによって得た。利用した励起光エネルギー ($h\nu$) 領域 ($8.9 \text{ eV} \leq h\nu \leq 11.7 \text{ eV}$) における全エネルギー分解能は 5 meV と評価した。角度分解能は 0.5° 以下である。結合エネルギーは試料マニピュレータ上に蒸着された多結晶 Au のフェルミ端を測定して補正した。

4. 研究成果

(1) 蛍光 X 線ホログラフィーによる TlInSe_2 の局所構造解析

図 2 に Barton のアルゴリズムに従って 7 種の $\text{Tl } L_{III}$ 吸収端 XFH を解析することで再生された TlInSe_2 (001) 面上の Tl 原子周りの原子像を示す。図 2 中において、N 相における Tl と In の原子位置をそれぞれ実線および破線の円によって示した。この面では Tl および In 原子のみが観測される。原子像中にはアーティファクトも見られるが、In 原子は N 相における適切な原子位置に明瞭に観測される。一方で、Tl 原子像は 2 種の異なった強度をも

っている。(001) 面上の Tl 原子のうち、中心の Tl 原子から第 1, 3 近接にあたる Tl 原子像の強度は非常に弱い一方で、第 2 近接の Tl 原子像強度は相対的に強く表れている。Tl 原子は単位胞中において結晶学的に 1 つの等価なサイトのみ占有しているため、この結果は非常に興味深い。そこで、N 相における (001) 面上の Tl 原子像をシミュレートしたところ、シミュレーションによる全 Tl 原子像の強度は、実験から得られた Tl 原子像と比較してより強く観測された。この結果は、TlInSe₂ 結晶の IC 相において、Tl 原子の位置に大きな揺らぎが生じている可能性を示唆する。

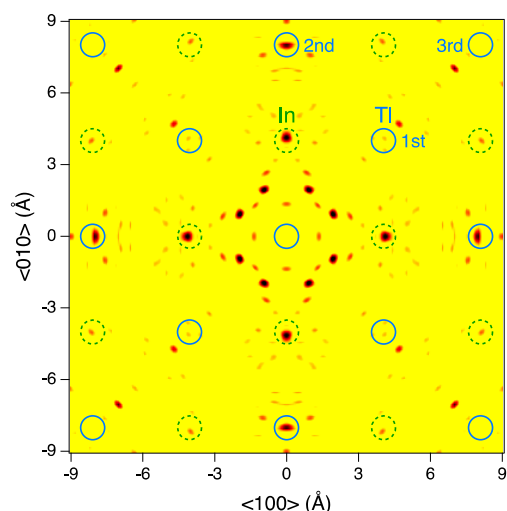


図 2. TlInSe₂ (001) 面上の Tl 原子周りの原子像

得られた原子像に対して、いくつかの疑問点が挙げられる。第一の疑問点は、TlInSe₂ 中の Tl 原子は 1 つの等価なサイトに占有しているにも関わらず、Tl 原子像の強度は中央 Tl 原子からの距離に応じて系統的に変化している点、第二は、イメージ強度は基本的に原子中の電子数によって決定されるにも関わらず (Tl (Z = 81), In (Z = 48))、なぜシミュレート像中の最近接 Tl 像は最近接 In 原子像よりも弱いのかという点である。これらは、TlInSe₂ (110) 面に対する幾何学的配置によるものである。ホログラム像は各々の仰角 θ において回転角 $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ で得られた蛍光 X 線からバックグラウンドを差分することによって計算される。この手順において、 θ 方向の振動は完全には得られず、振動のフーリエ変換、つまり原子像は特定の方位でより弱くなる。今回の配置では、 $\langle 110 \rangle$ 方向がこれに対応する。ゆえにシミュレーションであったとしても、第 1, 第 3 近接方向にある Tl 原子像の強度は、第 2 近接方向などに存在する Tl 原子像よりも弱くなってしまふのである。

図 3 に TlInSe₂ (100) 面上の Tl 原子周りの原子像を示す。この面では Tl および In 原子のみが観測される。図 2 とは対照的に、全

の原子が図 3 の実験再生像中にも明瞭に見られる。とりわけ、実験における最近接 Tl や In 原子の強度はシミュレーション再生像によって良く再現されている。しかし、Tl 原子は実線の円で示された N 相においてで予測される位置に対して中心原子から遠ざかる方向へシフトしている。故に、実験像中の Tl 原子の位置や強度は、中心 Tl 原子からの距離に強く依存することが分かる。一方で、全ての実験 In 像は、シミュレーションによって良く再現されている。

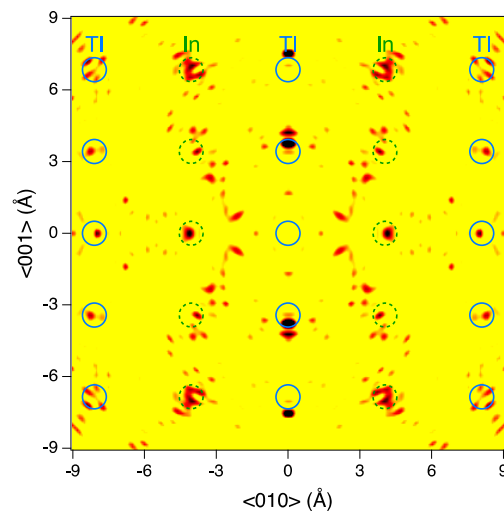


図 3. TlInSe₂ (100) 面上の Tl 原子周りの原子像

以前、XFH 像の強度と原子の空間的揺らぎの関係が詳細に議論されている。この議論を参考に、我々は TlInSe₂ 結晶の IC 相における構成原子の位置的なみだれを次のように推測する。相対的に強い再生像強度を持つ Tl 原子、つまり主に中心 Tl 原子と同一の 1 次元鎖中に位置する Tl 原子は、原子鎖上で中心 Tl 原子から遠ざかる方向へとシフトする。しかし、弱い像強度をもつ Tl 原子、つまり隣り合った 1 次元鎖中に位置する Tl 原子は、平均的な原子位置の周りにランダムに大きく揺らいでいる。近接 In 原子は中心 Tl 原子と連携して平均位置から動いているために、強度を保ったまま N 相で予測される原子位置に再生されると予測される。よって Tl 原子の複雑な揺らぎは、この物質の IC 相と関連する可能性が示唆される。

最近、TlInSe₂ のフォノンバンド計算から、横方向の音響分枝および上部光学分枝間の振動ギャップがほとんど近接する位置近傍における原子の揺らぎが論じられている。その結果によれば、TlInSe₂ の (001) 面において Tl 原子は In や Se 原子よりも強く揺らぎ、その一方で、(100) 面において Tl 原子は $\langle 001 \rangle$ に沿う方向のみで揺らいでいる。図 2 および図 3 に示した XFH 実験から得た原子再生像は、このモデルを強くサポートしている。本研究

における XFH 実験から得られた TI 原子の揺らぎの特徴は、この物質の相転移の駆動力と関連している可能性が指摘される。さらにこのフォノンバンド計算によれば、振動に寄与するバンドは相転移に伴い分裂することが示唆されている。実際に TlInSe_2 の ARPES では価電子帯頂上のエネルギーバンドが IC 相において分裂しており、相転移に伴う格子振動と電子構造が相関関係にあることが明らかとなった。

(2) 角度分解光電子分光による TlMeX_2 に観測される特異な分散構造

図 4 に $T = 20 \text{ K}$, $h\nu = 10.0 \text{ eV}$ で得られた Γ -N (N-T) 方向の TlGaTe_2 のエネルギーバンドを示す。 Γ -N (N-T) 方向は、TI 原子鎖に対して平行な方向にあたる。図 4 中の濃い部分がエネルギーバンドに対応する。局所密度近似 (LDA) で得られたバンド計算によれば、測定領域のバンドは主に Te 5p 状態に起因しているが、価電子帯頂上 (VBM) は Te 5p 状態のみならず Tl 6s 状態の混成状態も含んでいる。言い換えれば、エネルギーバンドに対する Tl 6s 状態の寄与は、価電子帯頂上のごく近傍と 3 eV より高結合エネルギー側のバンドに選択的に寄与している。

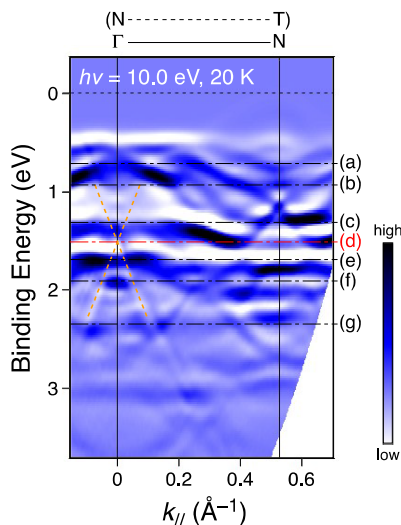


図 4. TlGaTe_2 の Γ -N (N-T) 方向のエネルギーバンド。図中の(a)-(g)で示した記号は、図 5 に示した等エネルギー面の結合エネルギー位置を示している。

バンド計算の結果と比較すると、実験によって得られたエネルギーバンドは、全体的に高結合エネルギー側へ約 70 meV シフトしているものの、図 4 中にオレンジ色の破線で示した 2 本の直線的なバンドのみを除外すれば、良い一致を示している。 Γ 点で 1.5 eV あたりで互いに交差しているバンドは、バルクに対するバンド計算中には存在しない。観測された直線的なバンドは、Bi をベースとした 2 元カルコゲナイド中に観測されたバンドと非

常に良く似ている。しかし、直線状に分散したバンドは Bi カルコゲナイドにおいては表面ブリルアンゾーンの全方位に観測される一方で、 TlGaTe_2 におけるバンドは Γ -N 方向のみに観測される。

そこで $h\nu = 8.9\text{--}11.7 \text{ eV}$ で Γ -N 方向の TlGaTe_2 のエネルギーバンドを測定したが、どの $h\nu$ でも 2 本の直線的なバンドが観測された。直線的なバンドのクロス点の結合エネルギー (E_B) 位置は、表 1 にまとめたように明瞭な $h\nu$ 依存性を示す。 E_B 位置は $h\nu$ が減少するにつれて低結合エネルギー側へ線形的にシフトする。クロス点の全シフトは 11.7~8.9 eV の $h\nu$ 変化において 2.9 eV である。このシフトは、 $h\nu$ に伴う光イオン化断面積の変化として扱うには大きすぎる値である。よって観測された直線的なバンドはバルクの価電子バンドと共通点がないことは明白である。

表 1. 結合エネルギーおよび運動エネルギー (E_B , E_K) で表示されたクロス点の $h\nu$ 依存性

$h\nu$ (eV)	E_B (eV)	E_K (eV)
11.7	3.31	4.14
10.0	1.51	4.24
8.9	0.41	4.25

クロス点の E_B 位置に加えて、我々は表 1 中に各々の E_B に対応した運動エネルギー (E_K) を与えた。 TlGaTe_2 中のクロス点の E_K は $h\nu$ に依存せず、約 4.2 eV の一定値をとることが分かる。一方で、 Bi_2Se_3 の時間経過した表面に対するディラック点の E_K は、明らかな $h\nu$ 依存性がある。故に、トポロジカル絶縁体に観測されるディラック点と我々が観測した直線状の分散構造のクロス点は振る舞いの上で異なっており、起源が異なるものと考えられる。

さらに TlGaTe_2 の特異な分散構造は、清浄で完全な試料表面が得られた時のみ明瞭に観測される。この傾向は TlMeX_2 三元化合物の二元の基本物質である TlSe にも現れる。

以上のことを総合すると、 TlGaTe_2 に観測される特異な分散構造は、伝導バンド中に形成された表面起因の分散構造を ARPES により結合状態密度として検出したものであると考えられる。

この分散構造の波数空間中の全体像を得るため、 Γ -N スキャンに加え、TI 原子鎖に対して平行な Γ -H-T 方向に沿った ARPES スペクトルも測定し、 Γ -N-N-T 面の 2 次元波数空間中の等エネルギー面を構築した。図 5 に $h\nu = 10.0 \text{ eV}$ の ARPES スペクトルから得られた等エネルギー面の E_B 依存性を示す。 E_B に関係なく、分散構造が Γ -H-T ラインに対してほぼ並行に配列していることが分かる。 E_B が大きくなるにつれ、0.71 eV から 1.51 eV の領域において桃色の三角形で示した分散構造は

お互いに接近していく [図 5(a)–5(c)]。そして、図 4 中のクロス点に対応する $E_B = 1.51$ eV で分散構造は Γ 点で重なり合う [図 5(d)]。さらに 1.51 eV 以上の E_B の増加は、お互いから離れて行くような直線状の構造による逆の描像を導く [図 5(e)–5(g)]。

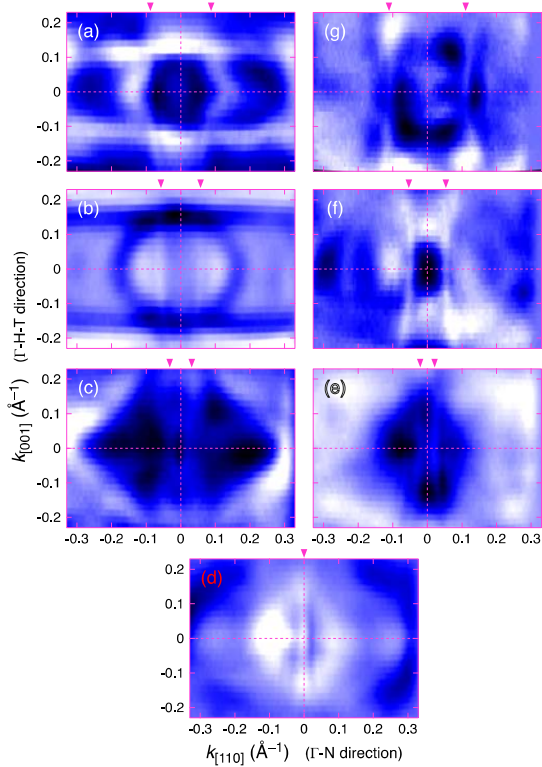


図 5. Γ -N-N-T 面内の等エネルギー面 (a) 0.71, (b) 0.93, (c) 1.31, (d) 1.51 (クロス点), (e) 1.69, (f) 1.91, (g) 2.35 eV。三角形は、特異な分散構造の位置を示す。

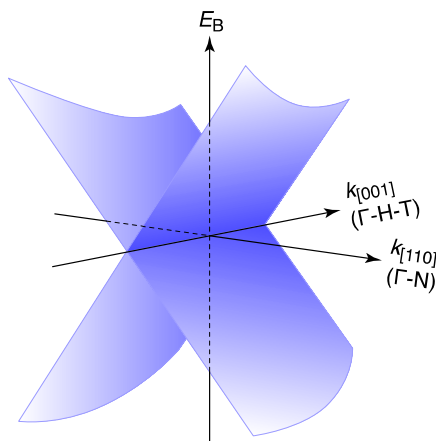


図 6. ARPES の等エネルギー面から予想される特異な分散構造の概略図

図 6 は TlGaTe_2 の Γ -N-N-T 面中において観測された分散構造の概略図である。イメージは図 5 中の等エネルギー面の E_B 依存性か

ら決定している。分散構造は、 Γ -H-T 方向に沿って互いに交差する 2 枚のシートから構成されている。観測されたイメージによれば、シートは Γ -H-T 方向に平行であり、それは、関連するエネルギーバンドが Γ -H-T 方向に沿ったスキャンでは観測できないことを意味している。

ゆえに、新たに観測された分散の形状は、Bi をベースとしたカルコゲナイドに観測される Γ 点を中心とするコーンとは明確に異なる。我々は、これが擬 1 次元 TlGaTe_2 の表面形状と密接であるものと信じている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 33 件)

- (1) K. Mimura, 他 9 名 [K. Wakita 6 番目, N. Mamedov 10 番目], “Three Dimensional Atomic Image of TlInSe_2 by X-ray Fluorescence Holography”, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology (査読有), **9**, 273–276 (2011).
- (2) S. Hosokawa, 他 9 名 [K. Mimura 4 番目, K. Wakita 5 番目, N. Mamedov 10 番目], “Three-Dimensional Atomic Images of TlInSe_2 Thermoelectric Material Obtained by X-ray Fluorescence Holography”, Japanese Journal of Applied Physics (査読有), **50** (5) 05FC06/1–2 (2011).
- (3) K. Mimura, 他 10 名 [K. Wakita 4 番目, N. Mamedov 11 番目], “Peculiar Linear Dispersive Bands Observed in Angle-Resolved Photoemission Spectra of Tl-Based Ternary Chalcogenide TlGaTe_2 ”, Japanese Journal of Applied Physics (査読有), **50** (5), 05FC05/1–4 (2011).
- (4) Y. Shim, H. Aoh, J. Sakamoto, K. Wakita, N. Mamedov, “Temperature dependence of dielectric function and optical transitions in TlInSe_2 and TlGaTe_2 ”, Thin Solid Films (査読有), **519** (9), 2852–2854 (2011).
- (5) N. Mamedov, G. Orudzhev, K. Mimura, K. Wakita, 他 6 名, “Phonon Symmetries and Phase Transition in TlSe and TlInSe_2 ”, Fizika (Azerbaijan Journal of Physics) (査読有), **16** (2), 79–82 (2010).
- (6) N. Mamedov, K. Wakita, 他 8 名 [K. Mimura 5 番目], “Debye temperatures and Grueneisen parameters of chain TlSe and TlInSe_2 ”, Physica Status Solidi (c) (査読有), **6** (5), 997–1000 (2009).
- (7) K. Mimura, 他 11 名 [K. Wakita 6 番目, N. Mamedov 7 番目, Y. Taguchi 8 番目], “Temperature-dependent hard X-ray photoemission spectra of ternary Tl

compounds with high Seebeck coefficient”, Physica Status Solidi (c) (査読有), **6** (5), 993–996 (2009).

[学会発表] (計 94 件)

- (1) N. Mamedov, 他 12 名 [脇田和樹 4 番目, 三村功次郎 5 番目], “TiMeX₂ low dimensional compounds: possibility of a multiferroic phase” (招待講演), 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日, 早稲田大学 (東京都).
- (2) 三村功次郎, 他 9 名 [脇田和樹 6 番目, N. Mamedov 10 番目], “蛍光 X 線ホログラフイーによる TlInSe₂ の局所構造解析”, 第 25 回日本放射光学会年会, 2012 年 1 月 8 日, 鳥栖市民文化会館 (佐賀県).
- (3) 本並哲, 三村功次郎, 他 11 名 [脇田和樹 5 番目, 田口幸広 9 番目, N. Mamedov 13 番目], “鎖状 TI 化合物 TlSe, TlGaTe₂ のエネルギーバンド中に存在する特異な分散構造の研究”, 日本物理学会 2011 年秋期大会, 2011 年 9 月 21 日, 富山大学 (富山県).
- (4) 本並哲, 三村功次郎, 他 9 名 [脇田和樹 5 番目, N. Mamedov 6 番目, 田口幸広 11 番目], “TlSe の特異な分散構造: 角度分解光電子分光による研究”, 第 24 回日本放射光学会年会, 2011 年 1 月 9 日, エポカルつくば (茨城県).
- (5) 三村功次郎, “温度誘起価数転移を示す Eu 化合物の電子状態: 硬 X 線光電子分光による研究” (招待講演), 2010 年 多元系機能材料研究会年末講演会, 2010 年 11 月 19 日, 白子シーサイドホテル (千葉県).
- (6) 三村功次郎, 他 8 名 [脇田和樹 6 番目, N. Mamedov 9 番目], “蛍光 X 線ホログラフイーによる TlInSe₂ の 3 次元原子像”, 原子分解能ホログラフイーによる中距離局所構造のサイエンス, 2010 年 11 月 13 日, 東北大学 (宮城県).
- (7) Z. Jahangirli, K. Mimura, K. Wakita, 他 6 名 [N. Mamedov 8 番目], “Bulk and surface electron states in quasi-one-dimensional Tl¹⁺Tl³⁺Se₂”, 17th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-17), 2010 年 9 月 29 日, バクー (アゼルバイジャン).
- (8) S. Hosokawa, 他 8 名 [K. Mimura 4 番目, K. Wakita 5 番目, N. Mamedov 9 番目], “Three-dimensional atomic images of TlInSe₂ thermoelectric material obtained by x-ray fluorescence holography”, 17th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-17), 2010 年 9 月 28 日, バクー (アゼルバイジャン).

- (9) K. Mimura, “Electronic structures of ternary TI compounds studied by photoemission spectroscopy” (招待講演), 17th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-17), 2010 年 9 月 28 日, バクー (アゼルバイジャン).
- (10) S. Motonami, K. Mimura, 他 10 名 [K. Wakita 6 番目, N. Mamedov 7 番目, Y. Taguchi 12 番目], “Particular kind of dispersive structures of TlSe investigated by angle-resolved photoemission spectroscopy”, 37th International Conference on Vacuum UltraViolet and X-ray Physics (VUVX2010), 2010 年 7 月 13 日, バンクーバー (カナダ).
- (11) 三村功次郎, 他 7 名 [脇田和樹 5 番目, N. Mamedov 6 番目], “TlInSe₂ の蛍光 X 線ホログラフイー”, 第 23 回日本放射光学会年会, 2010 年 1 月 9 日, イーグレ姫路 (兵庫県).
- (12) 石津貴彦, 三村功次郎, 他 7 名 [脇田和樹 5 番目, N. Mamedov 6 番目, 田口幸広 9 番目], “擬一次元物質 TlGaTe₂ の角度分解光電子分光”, 第 23 回日本放射光学会年会, 2010 年 1 月 9 日, イーグレ姫路 (兵庫県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村 功次郎 (MIMURA KOJIRO)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40305652

(2) 研究分担者

脇田 和樹 (WAKITA KAZUKI)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号: 80201151
田口 幸広 (TAGUCHI YUKIHIRO)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80236405

(3) 海外研究協力者

マメドフ・ナジム (MAMEDOV NAZIM)
アゼルバイジャン科学アカデミー・副所長