

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03519

研究課題名(和文)空間反転対称性の破れた3d遷移金属モノシリサイドの電子状態・スピン構造の解明

研究課題名(英文) Study of electronic and spin structure in B20-type 3d transition metal monosilicide

研究代表者

有田 将司 (Arita, Masashi)

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)：空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ3d遷移金属シリサイドの電子状態とスピン状態の解明を行うためにFeSiの機械研磨した清浄面に対し、角度分解・スピン分解光電子分光測定を行った。明瞭な3次元バンド分散を初めて実験的に得ることに成功し、モデル自己エネルギーを使ったスペクトル関数解析を行った。結果、これまで報告してきた電子-電子相互作用の強度はバンド全体で小さいことが分かった。しかしながら、フェルミ準位近傍は、強いバンドのくりこみが捕らえられ、強い相関効果を示唆する。また、 $-X$ での面内スピン構造を測定することができ、フェルミ準位近傍のバンドについて Γ 点を挟みスピンの向きが反転する様子をとらえた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FeSiは、ありふれた元素の化合物であるが、3d電子系における近藤絶縁体として強い電子相関効果に対する研究が長年なされている。近年では、トポロジカル近藤半導体SmB6や同様の空間反転対称性が破れた結晶構造を持つCoSiなどの類似物質としても注目されている。結晶構造は構造は空間反転対称性の破れを持ち、スピン軌道相互作用(SOI)を顕在化させると考えられる。

今回の成果のうち、電子相関効果の研究は、金属絶縁体転移や特異な温度による磁化率の変化の解明につながる。またバルクでの特異なスピン構造は、比較的軽元素である3d遷移金属化合物でも、系の対称性によりSOI効果が顕著になっている証拠である。

研究成果の概要(英文)：FeSi has been studied for many years because the magnetic and electric properties are similar to those of the 4f Kondo insulators. Recently, FeSi and other transition metal monosilicides, which have a non-centrosymmetric structure, have attracted many researchers for the existence of the new surface states and unusual spin texture. In order to investigate the electron correlation effect and the spin texture in FeSi, the angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) measurements on mechanically polished FeSi surfaces were carried out. We succeeded in obtaining the clear ARPES images along G-X and X-M lines and estimating the intensity of the electron-electron interaction with the whole band structure. By spin-resolved ARPES, the spin component perpendicular to the G-X-M-X plane could be found out near the Fermi energy along G-X. Though the spin polarization is very weak, the spin polarizations are reversed between opposite k points with respect to G point ($k=0$).

研究分野：固体物性

キーワード：スピン・角度分解光電子分光 近藤半導体 強相関物質

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

時間反転対称性と空間反転対称性を有する結晶では、ブロッホ状態の固有値、 $E(k, \uparrow) = E(k, \downarrow)$ となり、全ての運動量 k でスピン縮退を起こす。一方、空間反転対称性を破った系では、 $k = 0$ ならびに時間反転不変な k 点を除いては、 $E(k, \uparrow) \neq E(k, \downarrow)$ となりスピン分裂を生ずる。物質表面では空間反転対称性が破れることから、表面電子バンドのスピン縮退が解け、ラッシュバ分裂を起こすことが知られている[M. Hoesch et al., Phys. Rev. B 69 241401(2004)]。さらに表面 2 次元系においては、スピン分離した表面状態を持つトポジカル絶縁体など発見から盛んな研究がなされ、物性分野でも“次元性”や“位相”に注目した新しい分野が開拓されている。

3 次元系物質においては、結晶本来の対称性(の破れ)を起因とする特殊なバンド構造を持つ物質が注目されている。ディラック半金属は、ある対称性に守られ伝導帯と価電子帯が運動量空間の点で接触したバンド構造、すなわちディラックコーンを持ち、3 次元版グラフェンとして知られている。この系の空間反転対称性や時間反転対称性を破ると、スピン縮退が解け、ワイルノードと呼ばれる点で接触したディラックコーンを持つ、ワイル半金属となる。ワイルノード近傍では、線形なバンド分散を示し、スピン構造は、一方はノードより発散、他方は収斂する方向に向く。ある種の“対称性”から発現する、これらの特殊なバンド構造やスピン構造、さらにはその様々な物性に注目が集まっており、研究がすすめられている。またワイル半金属では、その表面にフェルミアークと呼ばれる開いたフェルミ面が現れ、その特異な表面状態にも注目されている[例えば S- Y. Xu et al., Science 349, 613(2015.)]。

様々な電氣的磁氣的特性を示し、長年、研究が進められている 3d 遷移金属シリコン化合物やゲルマニウム化合物の中に、空間反転対称性の破れた B20 型(空間群 $P2_13$ (No.198))結晶構造を持つ物質 MSi , MGe ($M=Cr, Mn, Fe, Co, Ni$)がある(図 1)。電子状態は、遷移金属の 3d 電子と Si や Ge の sp 電子との混成は強く、広い混成バンドを作るが、3d 電子は比較的電子相関(クーロン相互作用)が大きく、条件によってはバンド幅とエネルギー値が近くなる場合がある。その結果、金属絶縁体転移や多彩な磁気構造を持つ。格子系に注目すると、空間反転対称性が破れや、結晶方位[111]方向に原子が螺旋状に配列するカイラル構造を持つ(図 1)ことが起因となり、スピン軌道相互作用の効果が大きくなり、スピン分裂が生じる。また、ジャロシンスキー・モリヤ相互作用により、螺旋磁気構造などが現れることが知られている。近年では、同様な螺旋型原子配列を持つ単結晶 Te で、ワイルノードがあることが理論予測され研究が進められている[M. Hirayama et al., Phys. Rev. Lett. 114, 206401(2015)]が、B20 型結晶構造を持つ $CoSi$ でもワイルノードが存在することが予測され、ARPES で観測もなされた[F. Ishii et al., JPS Conf. Proc. 3, 016019(2014).]。

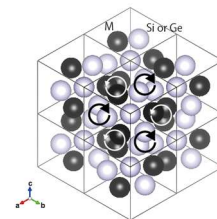


図 1:[111]方向から見た B20 型結晶構造。

2. 研究の目的

B20 型 3d 遷移金属化合物は、結晶構造の空間反転対称性の破れから、スピン軌道相互作用が顕著に現れる。これを起因とする特殊な電子構造やスピン構造を、スピン分解・角度分解光電子分光測定を用い、明らかにする。B20 型 3d 遷移金属化合物が持つ多彩な物性や磁気構造と、電子相関効果や軌道成分分布などを含めた電子バンド構造、運動量空間でのスピン配列の関連を解明する。また、対称性の破れや螺旋状原子配列、表面といった近年注目をされている視点からも研究を進め、新しい物性物理の知見を得ることを目的とする。本研究では、モノシリサイドに注目し、我々が研究を進めてきた $FeSi$ を中心に研究を進めた。また、 $CoSi$, $MnSi$ にも注目した。

$FeSi$ は、常磁性の物質で、低温で絶縁体、70K 以上では金属的電気伝導を示す 3d 系近藤絶縁体として 60 年代より研究が行われている[V. Jaccarino et al., Phys. Rev. 160, 476 (1967)]。 $CoSi$ は、反磁性で半金属的な電気伝導を示すが、非磁性の両物質の固溶体 $Fe_{1-x}Co_xSi$ が、強磁性を示すことは興味深い[S. Kawarazaki et al., J.Phys.Soc.Jpn.,41,1171(1976)]。第一原理計算の結果では、 $CoSi$ は、 Γ 点フェルミ準位近傍にワイルノードを持ち、スピン分離した線形のバンド分散を持つことが分かった。 $MnSi$ は、約 40K 以下でヘリカル磁気構造、また磁場中ではコニカル磁気構造やスキルミオンと呼ばれる渦状磁気構造が出現するなど複雑な磁気構造を持つことで知られ、近年盛んに研究がなされている[Nakajima et al., Sci. Adv.;3,e1602562(2017)]。

[電子構造と電子相関、準粒子散乱の解明]

多彩な物性を示す B20 型遷移金属モノシリサイドであるが、電子バンド構造の直接観測の報告例はほとんど無い。そこで角度分解光電子分光を用い、バンド構造を明らかにすることを目的とする。励起エ

エネルギーを変化させることで、運動量空間の特定の位置での測定や軌道成分を分離した測定を行い、第一原理計算の結果と比較を行う。価電子帯全体での自己エネルギー解析をすることで、系の電子相関効果について考察できると考えている。

[スピン構造の解明]

空間反転対称性の破れた FeSi において、スピン軌道相互作用を入れたバンド計算を行うと Γ -M、 Γ -X 方向で 30~50meV 程度スピン縮退の解けたバンドが存在することが分かってきた(図 2)。これらは、運動量空間で+k 方向と-k 方向でスピンが反転するスピン構造を持つ可能性がある。CoSi は、バンド計算よりフェルミ準位近傍 Γ 点にスピン縮退したワイルノードを持つことが分かっており、スピン構造はノードから発散と収斂の2方向に向くことが予想されている。これらを実験的に観測するためには、放射光を使ったスピン分解・角度分解光電子分光が最適であり、特定の電子バンドを選択し、そのスピン構造の解明を目指す。

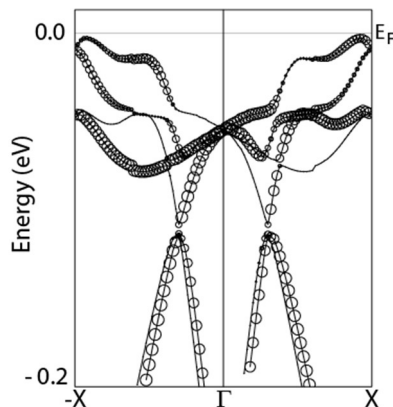


図 2: FeSi の(-X)- Γ -X 方向のバンド計算結果。丸の大きさは、スピンの+k_x 方向成分の大きさを表す。+k_x と-k_x のスピンの向きが異なり、反転している可能性を示唆。

3. 研究の方法

本研究では FeSi を中心に研究を進めた。チョコラルスキー法により得られた純良単結晶を用い、ARPES 測定と Spin-ARPES 測定を行った。ARPES 測定は、広島大学放射光科学研究センターBL-1、BL-9A、Spin-ARPES 測定は、BL-9B で行った。測定表面は、ラウエ像で方位を 1° 以内で合わせた後、大気中での機械研磨を行い、真空導入後に Ar イオンスパッタとアニールを繰り返すことで清浄化を試みた。また、CoSi、MnSi の測定を進めるため、Mn、Co の蒸着源を作製し、Si 基板上に薄膜作製を試みたが、計画通りの薄膜ができなかったためフラックス法による単結晶作製を試み、成功した。

4. 研究成果

(1) FeSi 機械研磨

FeSi をラウエ像を用いて、[001] [011] [111] 面の方位出しを 1° 以下で行い、ダイヤモンドラッピングシートとシリカ研磨液を用いて機械研磨を行った。微分干渉顕微鏡を用いて観察した研磨後の試料表面を観察し、大きな研磨傷が、観測できない程度に研磨できていることを確認した。その後、超高真空中に導入し、1.5kV 2分程度の Ar イオンスパッタと 950°C、1分のアニールを 3~5 回程度繰り返した。表面処理を行った試料表面对して、オージェ電子分光を行い、炭素、窒素、酸素がほとんど検出されないことを確認し、また明瞭な LEED 像の観測に成功し、それぞれ試料の方位に 1X1 の原子秩序を持った表面が得られていることが確認できた(図 3)。得られたそれぞれの表面に対し ARPES 測定を行ったが、[011]面においては、バンド分散を反映した測定結果を得ることができたが、議論できる結果を得られなかった。

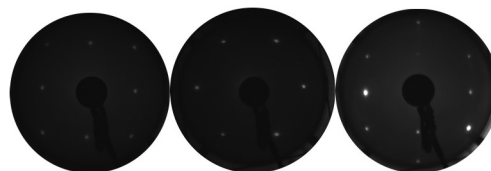


図 3: 表面処理後[001]、[111]、[011]面で得られた LEED 像

以下、[111]面、[001]面についての結果である。

(2) ARPES 測定:[001]面 k_z分散

ARPES 測定は、広島大学放射光科学研究センターBL-1 および BL9-A で行った。

図 4(a)に垂直放出 ARPES スペクトルの $h\nu=25\sim 135$ eV で得られた励起エネルギー依存性測定結果とそれを、内部ポテンシャル $V_0=17$ eV と仮定した場合の表面垂直方向の運動量 k_z 方向のバンド分散に直した図 4(b)を示す。また、点線は、Wien2 を用いて計算した Γ -X 方向のバンド計算の結果である ARPES で得られたバンド分散は、計算と良い一致を示した。

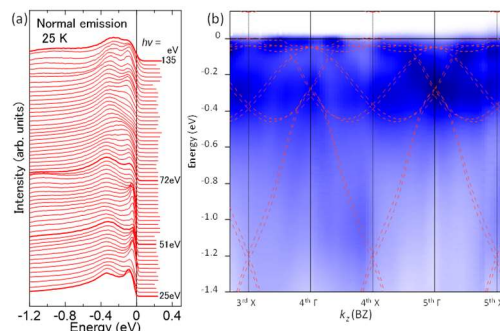


図 4:(a) 垂直放出スペクトル (b) Γ -X 方向 ARPES マップ

(3) ARPES 測定:[111]面

図 5 に $h\nu=8.4\text{eV}$ 、10K で測定した ARPES スペクトルから得た $E=20\text{meV}$ の k_x - k_y 強度マップと Γ -M、 Γ -K の分散を示す。 Γ 点に頂上を持つバンドが $E=25\text{meV}$ 付近に存在することが分かる。この結果は、以前の報告と矛盾しないが、[001]面 k_z 分散から得られた内部ポテンシャル $V_0=17\text{eV}$ (図 4)から励起エネルギー $h\nu=8.4\text{eV}$ では、 Γ 点近傍を測定していることが分かる(図 5)。よって実験から価電子帯頂上は Γ 点に存在することが示唆される。また、 Γ 点で得られた ARPES スペクトル(垂直放出スペクトル)の温度依存性の結果を図 6 に示す。10K、 $E=25\text{meV}$ 付近に強い準粒子ピークが観測され、フェルミ準位近傍、バンド端に強い電子相関があることが示唆される。この準粒子ピークは、温度上昇に従って、強度が弱くなり室温付近では、ほとんど観測できない。挿図は、フェルミ順位上のスペクトル強度を示しており、75K 以下では、ほぼ強度が無く、100K 以上で急峻な強度増大が起こっており、電気抵抗測定で観測されている金属絶縁体転移と一致する。

(4) ARPES 測定 : [001]面 高対称線

[001]面での k_z -ARPES 測定から励起光エネルギー $h\nu=51\text{eV}$ で高対称線 $\Gamma-X$ 、 $h\nu=72\text{eV}$ で $X-M$ が測定できることが分かっている。図 7 a) と b) に $h\nu=51$ 、 72eV 、S 偏光で ARPES 測定した結果を示す。また c)、d) に計算で得られた $\Gamma-X$ 、 $X-M$ のバンド分散の結果を示す。(20meV のガウス幅で広げている。) 実験結果と計算結果は、良い一致を示しており、実験でバルクのバンド構造が得られていると考えている。しかしながら、実験で得られているバンドのエネルギー位置は、計算よりもフェルミ準位に近い方向にシフトしている、すなわち、バンド幅が狭くなっていることが観測できた。これは、電子相関効果によるバンドのくりこみによる効果と考えられる。そこで、電子-電子相互作用を表す自己エネルギーのモデル関数 $\Sigma(\omega) = g_h\omega/(\omega + i\gamma_h)^2 + (-g_l/(\omega + i\gamma_l) - g_l/\gamma_l)$ を導入した。この関数の実部と虚部がクラマース・クローニツヒ変換で結ばれる関数である。フィッティングパラメータ ($g_h, \gamma_h, g_l, \gamma_l$) の 4 つを仮定し、スペクトル関数 $A(\mathbf{k}, \omega) = -1/\pi \text{Im} 1/(\omega - \epsilon_{\mathbf{k}}^0 - \Sigma(\mathbf{k}, \omega))$ を用い、スペクトルの再現を行った。パラメータ ($g_h, \gamma_h, g_l, \gamma_l$) = (5, 5, 0.025, 0.0025) と仮定し、得られた結果を e) と f) に示す。バンド計算結果よりも、バンド幅が狭くなり、実験結果をより良く再現していることが分かる。 g_h は、系全体の電子相関の強度を表しているが、これまで、角度積分光電子分光での報告や我々が [111]面での ARPES で報告した $g_h = 13$ に比べ半分以下と見積もられた [T. Saitoh et al., Solid State Commun. 95, 307 (1995), M. Arita et al., Phys. Rev. B 77, 205117 (2008).]. これは、 $E \sim -1\text{eV}$ までの広いエネルギー範囲でバンド分散構造が明瞭に観測できたことで、より正しいパラメータの見積もりができたものである。一方、フェルミ準位近傍のバンド構造の再現性はあまりよくないように見える。例えば、 $h\nu=51\text{eV}$ での Γ 点周辺や $h\nu=72\text{eV}$ での X 点周辺では、分散形状に相違がみられる。これは、フェルミ準位近傍の強い相関効果があるため、もしくは、自己エネルギーの電子軌道依存や現在は無視している運動量依存性があるためと考えられている。

(5) Spin-ARPES:[001]面

空間反転対称性の破れた B20 型 FeSi においても、CoSi 同様にスピン縮退の解けたバンドが存在することが考えられ(図 2)、これらは、運動量空間で $+k$ 方向と $-k$ 方向でスピンの反転するスピン構造を持つ可能性があることから、それを解明するために、スピン分解 ARPES(Spin-ARPES)を行った。

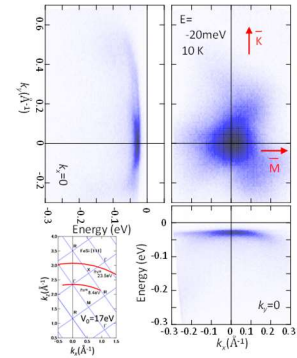


図 5:[111]ARPES の等エネルギーマップと Γ -M、 Γ -K 方向のスペクトル。(左下) ARPES でトレースする運動量。

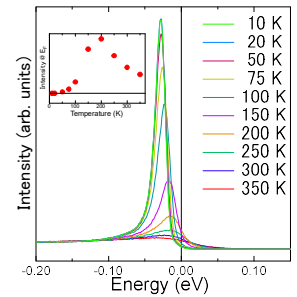


図 6: 垂直放出スペクトルの温度依存性(挿図) E_F 上のスペクトル強度

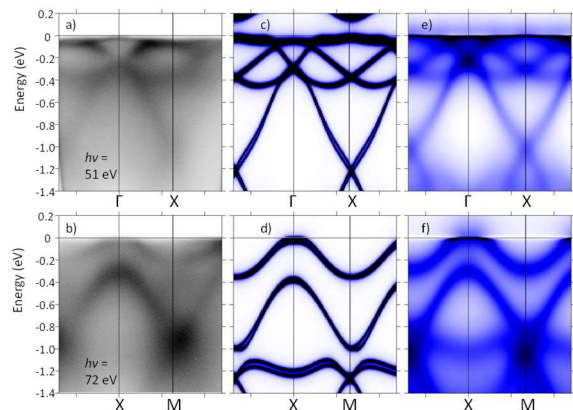


図7:a) $h\nu=51\text{eV}$ で測定した ARPES マップ c) $\Gamma-X$ のバンド計算結果 e) $\Gamma-X$ の電子相関効果を含んだスペクトル関数 b) $h\nu=72\text{eV}$ で測定した ARPES マップ c) $X-M$ のバンド計算結果 e) $X-M$ の電子相関効果を含んだスペクトル関数

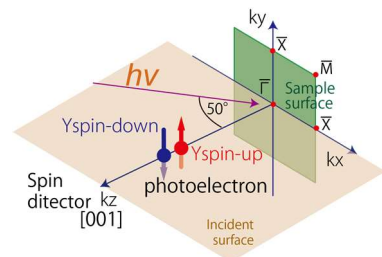


図8: Spin-ARPES の実験配置

図 8 に実験配置を示す。試料測定表面は FeSi[001]面、試料面内回転方向 (Azimuth 回転: 図 8 k_z 軸周りの回転) は、入射面内に表面ブリルアンゾーン $\Gamma-X$ 高対称線が含まれる方向で固定、入射光エネルギー $h\nu=51\text{eV}$ 、S 偏光を用い、測定を行うことでバルクブリルアンゾーン $\Gamma-X$ 高対称線が測定できる実験配置とした。図 9 に ARPES 測定の結果とサンプル回転角 (polar 回転: 図 8 k_y 軸周りの回転) $\pm 2.5^\circ$ 、 $\pm 4.5^\circ$ 、 $\pm 6.5^\circ$ に対するスピン分解光電子スペクトル (Energy distribution curve : EDC) の結果を示す。それぞれ EDC の測定角度位置は、ARPES イメージ上に a~f の線で示している。図 8 で、試料表面面内の入射面垂直方向上向き、すなわち $+k_y$ 方向のスピンを up スピンと定義し、赤は up スピン、青は down スピンの EDC となる。(図 9 右の ARPES イメージでは、紙面垂直方向、向こう向きのスピンを up スピンと定義する。) 緑は、スピン偏極度を示している。偏極度は弱く、明瞭に出ておらず、結果は暫定的なものではある。しかしながら、 $-0.2 \leq E \leq 0$ に注目すると、サンプル回転角プラス側、運動量 $+k_x$ 側において down スピンが優位で、サンプル回転角マイナス側、運動量 $-k_x$ 側において up スピンが優位であることが言える。エネルギー分解能が不足しており期待された約 50meV の分裂など詳細な構造までは分離できないが、運動量のプラス側とマイナス側、つまり、 Γ 点を挟んで、スピンの反転する結果が得られた。これは、FeSi の空間反転対称性の破れた結晶構造により、スピン軌道相互作用が誘起され、特殊なスピントクスチャの存在が示唆される結果と考えている。

(6) CoSi と MnSi の単結晶製作

当初、CoSi、MnSi の薄膜作製を実施していたが、ARPES 測定できうる高品質な薄膜を作成できなかった。そこで、フラックス法による単結晶作製を行い、機械研磨による表面作成を行った。

図 10 に Te フラックスによる作製した CoSi (左) と Ga フラックスによって作成した MnSi (右) の写真を示す。両方ともに明瞭な Laue 像が得られており、ARPES 測定可能な大きさである数ミリ程度の大きさの単結晶が得られた。CoSi については、[001]面の表面清浄化も行った。

1070°C 1 分間のアニールと 2 kV、1 分間の Ar イオンスパッタを数回繰り返すことで、明瞭な 1×1 LEED 像も得られた (図 10(中))。

図 11 に $h\nu=32.7\text{eV}$ で測定した表面ブリルアンゾーン $\Gamma-X$ 方向の ARPES イメージとフェルミエネルギーでの ARPES 強度の k_x-k_y マップを示す。明瞭なバンド分散が観測され、また表面状態と考えられる 2 回対称なフェルミ面が観測されている [D. S. Sanchez et al., Nature 567, 500 (2019)]. 詳細な解析は期間内で行えなかったが、ARPES 測定可能な単結晶試料とその清浄表面を得ることができた。

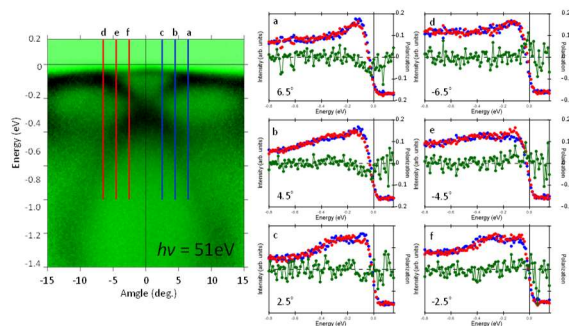


図 9: 右) $h\nu=51\text{eV}$ S 偏光で測定した Energy-Angle ARPES マップ。バルク $\Gamma-X$ 方向に相当する。左) ARPES マップ上の赤線と青線で示した位置 (角度) で測定したスピン分解 EDC スペクトル。赤 (青) 点が up (down) スピンを表す。緑丸はスピン偏極度を示す。

図 9 右の ARPES イメージでは、紙面垂直方向、向こう向きのスピンを up スピンと定義する。) 緑は、スピン偏極度を示している。偏極度は弱く、明瞭に出ておらず、結果は暫定的なものではある。しかしながら、 $-0.2 \leq E \leq 0$ に注目すると、サンプル回転角プラス側、運動量 $+k_x$ 側において down スピンが優位で、サンプル回転角マイナス側、運動量 $-k_x$ 側において up スピンが優位であることが言える。エネルギー分解能が不足しており期待された約 50meV の分裂など詳細な構造までは分離できないが、運動量のプラス側とマイナス側、つまり、 Γ 点を挟んで、スピンの反転する結果が得られた。これは、FeSi の空間反転対称性の破れた結晶構造により、スピン軌道相互作用が誘起され、特殊なスピントクスチャの存在が示唆される結果と考えている。

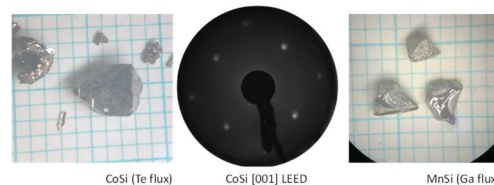


図 10: フラックス法を用いて得られた CoSi 単結晶 (左) と MnSi 単結晶 (右)。CoSi[001]面については機械研磨と真空中のスパッタ、アニールで明瞭な LEED 像が得られた。(中)

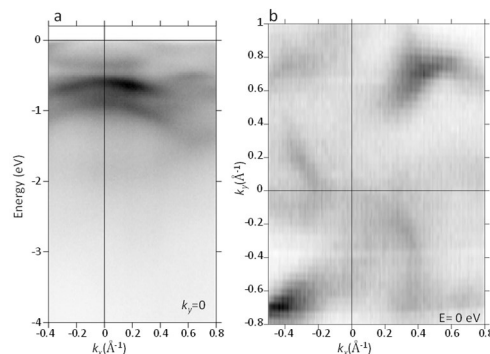


図 11: a) CoSi[001]面での ARPES イメージ b) フェルミエネルギーでの ARPES 強度の k_x-k_y マップ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件/うち国際共著 13件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 S. Yue, H. Zhou, D. Geng, Z. Sun, M. Arita, K. Shimada, P. Cheng, L. Chen, S. Meng, K. Wu and B. Feng	4. 巻 102
2. 論文標題 Experimental observation of Dirac cones in artificial graphene lattices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 201401/5p
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.201401	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 D. Yan, D. Geng, Q. Gao, Z. Cui, C. Yi, Y. Feng, C. Song, H. Luo, M. Yang, M. Arita, S. Kumar, E. F. Schwier, K. Shimada, L. Zhao, K. Wu, H. Weng, L. Chen, X. J. Zhou, Z. Wang, Y. Shi and B. Feng	4. 巻 102
2. 論文標題 Superconductivity and Fermi-surface nesting in the candidate Dirac semimetal NbC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205117/7p
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.205117	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 K. Kuroda, Y. Arai, N. Rezaei, S. Kunisada, S. Sakuragi, M. Alaei, Y. Kinoshita, C. Bareille, R. Noguchi, M. Nakayama, S. Akebi, M. Sakano, K. Kawaguchi, M. Arita, S. Ideta, K. Tanaka, H. Kitazawa, K. Okazaki, M. Tokunaga, Y. Haga, S. Shin, H. S. Suzuki, R. Arita and T. Kondo	4. 巻 11
2. 論文標題 Devil's staircase transition of the electronic structures in CeSb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2888/9p
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16707-6	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 D. Geng, K. Yu, S. Yue, J. Cao, W. Li, D. Ma, C. Cui, M. Arita, S. Kumar, E. F. Schwier, K. Shimada, P. Cheng, L. Chen, K. Wu, Y. Yao and B. Feng	4. 巻 101
2. 論文標題 Experimental evidence of monolayer AIB ₂ with symmetry-protected Dirac cones	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161407/5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.161407	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. Akabane, T. Shimaiwa, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T. Yokoya, M. Arita, S. Kumar, E. F. Schwie, K. Shimada, N. L. Sain and T. 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 the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114707/7p
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 Feng Ya, Jiang Qi, Feng Baojie, Yang Meng, Xu Tao, Liu Wenjing, Yang Xiufu, Arita Masashi, Schwier Eike F., Shimada Kenya, Jeschke Harald O., Thomale Ronny, Shi Youguo, Wu Xianxin, Xiao Shaozhu, Qiao Shan, He Shaolong	4. 巻 10
2. 論文標題 Rashba-like spin splitting along three momentum directions in trigonal layered PtBi ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4765-1,8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12805-2	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 Hao Yu-Jie, Liu Pengfei, Feng Yue, Ma Xiao-Ming, Schwier Eike F., Arita Masashi, Kumar Shiv, Hu Chaowei, Lu Rui 'e, Zeng Meng, Wang Yuan, Hao Zhanyang, Sun Hong-Yi, Zhang Ke, Mei Jiawei, Ni Ni, Wu Liusuo, Shimada Kenya, Chen Chaoyu, Liu Qihang, Liu Chang	4. 巻 9
2. 論文標題 Gapless Surface Dirac Cone in Antiferromagnetic Topological Insulator MnBi ₂ Te ₄	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 041038-1,10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.9.041038	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 Ito S., Arita M., Haruyama J., Feng B., Chen W.-C., Namatame H., Taniguchi M., Cheng C.-M., Bian G., Tang S.-J., Chiang T.-C., Sugino O., Komori F., Matsuda I.	4. 巻 6
2. 論文標題 Surface-state Coulomb repulsion accelerates a metal-insulator transition in topological semimetal nanofilms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaz5015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaz5015	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 R. Matsumoto, T. Sugimoto, T. Mizokawa, N. L. Saini, M. Arita, R. Jha, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki	4. 巻 98
2. 論文標題 Orbital-dependent band renormalization in WTe ₂ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 205138-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.205138	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. Sumida, T. Natsumeda, K. Miyamoto, I. V. Silkin, K. Kuroda, K. Shirai, S. Zhu, K. Taguchi, M. Arita, J. Fujii, A. Varykhalov, O. Rader, V. A. Golyashov, K. A. Kokh, O. E. Tereshchenko, E. V. Chulkov, T. Okuda, and A. Kimura	4. 巻 2
2. 論文標題 Enhanced surface state protection and band gap in the topological insulator PbBi ₄ Te ₄ S ₃	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW MATERIALS	6. 最初と最後の頁 104201-1,8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.104201	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 氷上颯馬, 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 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋元優紀, 黒田健太, 越智正之, 川口海周, 櫻木俊輔, 新井陽介, 万宇軒, 黒川輝風, 田中宏明, 有田将司, 出田真一郎, 田中清尚, 辛埴, 平井大悟郎, 廣井善二, 山田高広, 近藤猛
2. 発表標題 角度分解光電子分光で観察した希薄キャリア超伝導体におけるフラットバンド構造
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2021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, 有田将司, A. Barinov, V. Kandyba, A. Giampietri, N. L. Saini
2. 発表標題 カイラル結晶構造を持つIrGe4の光電子分光
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2019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, N.L. Saini
2. 発表標題 CaKFe4As4のマルチバンド電子状態と格子不安定性
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤俊, 有田将司, 春山潤, Baojie Feng, Wei-Chuan Chen, 生天目博文, 谷口雅樹, Cheng-Maw Cheng, Guang Bian, Shu-Jung Tang, G. Tai-Chang Chiang, 杉野修, 小森文夫, 松田巖
2. 発表標題 ピスマス超薄膜における半金属 - 半導体転移の微視的機構の解明
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有田将司, E. F. Schwier, 佐藤仁, 島田賢也, 鹿又 武
2. 発表標題 FeSiの角度分解光電子分光
3. 学会等名 日本放射光学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋元優紀, 黒田健太, 川口海周, 櫻木俊輔, 新井陽介, 万宇軒, 黒川輝風, 田中宏明, 有田将司, 出田真一郎, 田中清尚, 辛埴, 平井大悟郎, 廣井善二, 山田高広, 近藤猛
2. 発表標題 角度分解光電子分光で調べる希薄キャリア超伝導体の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中慎一郎, 有田将司, 島田賢也
2. 発表標題 グラフェン波動関数位相と基板での光電子散乱のARPESによる観察
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本凌弥, 杉本拓也, 溝川貴司, Naurang Saini, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, Rajveer Jha, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるWTe ₂ の軌道に依存したバンドの繰り込み
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤羽祐香, 前田瑞綺, 山本健登, G. Tan, L.-D. Zhao, M.G. Kanatzidis, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, N.L. Saini, 溝川貴司
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるSn _{1-x} NaxSeの電子状態の不均一性
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田瑞綺, 赤羽祐香, 山本健登, G. Tan, L.-D. Zhao, M.G. Kanatzidis, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, N.L. Saini, 溝川貴司
2. 発表標題 縮退半導体の異常なケミカルポテンシャルシフト: 角度分解光電子分光によるSnSeとSn _{1-x} NaxSeの電子状態
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大槻太毅, 澤田慶, 柴田大輔, 川本雅人, 吉田鉄平, N. L. Saini, 溝川貴司, 後藤広樹, 小西健久, 太田幸則, 保井晃, 池永英司, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 平井大悟郎, 高木英典
2. 発表標題 光電子分光によるRuPの金属 - 非磁性絶縁体転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮下剛夫, Wumiti Mansuer, 田北仁志, 久保拓也, 石坂仁志, Eike F. Schwier, 岩澤英明, 島田賢也, 有田将司, 沼田純典, 宇都達郎, 松田梓, 井野明洋
2. 発表標題 高分解能角度分解光電子分光を用いたBi ₂ 212の電子構造におけるCo置換効果の研究
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥岩泰暉, 密岡拓心, 村川寛, 駒田盛是, 横井滉平, 酒井英明, 花咲徳亮, 有田将司, E.F. Schwier, 島田賢也, 生天目博文, 溝川貴司
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるTaAsの電子構造
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森網尚輝, 守田智洋, 密岡拓心, 溝川貴司, 有田将司, 菅原仁
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるCeRuPOのバンド構造
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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