

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01690

研究課題名(和文) 磁場中共鳴非弾性X線散乱測定によるハーフメタル型ホイスラー合金の電子状態

研究課題名(英文) Electronic state of half-metal-type Heusler alloy proved by resonant inelastic soft X-ray scattering in magnetic field

研究代表者

梅津 理恵 (Umetsu, Rie)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：60422086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：電子状態において、フェルミ準位近傍におけるスピン偏極率が100%であると理論的に予測されているホイスラー合金の候補物質について軟X線共鳴非弾性X線散乱(RIXS)測定を行った。Mn<sub>2</sub>VAlとCo<sub>2</sub>MnSiでは、Mn、V、Coの2p<sub>3/2</sub>吸収ピークのRIXSスペクトルにおいて明瞭な磁気円二色性(MCD)が観測された。両者においてMnのMCDの符号が異なっており、各々における電子状態の違いを反映していることが分かった。Co<sub>2</sub>FeSiでは、Fe2p<sub>3/2</sub>吸収ピークにおいて弾性散乱のすぐ脇に大きなMCD成分が観測され、フェルミ準位近傍に存在するFeの大きなDOSを反映していることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論的には多くの物質がハーフメタル型電子状態を有することが予測され、スピントロニクス分野で有用であると提案されているのに対し、その電子状態が納得のいく実験結果で検証されている例ははかた。本研究では、良質のバルク単結晶試料を育成し、軟X線共鳴非弾性X線散乱測定により、ハーフメタル型電子状態を世界で初めて実証した点で、学術的意義が非常に高い。本研究により、ハーフメタル型強磁性体の電子状態を調べるのに、放射光を用いた軟X線RIXS測定が非常に有効な手段であることが示された点は社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：Soft X-ray resonance inelastic X-ray scattering (RIXS) measurements were performed on candidate materials for the Heusler alloy, which is theoretically predicted to have a spin polarization of 100% around the Fermi level in the electronic state.

For Mn<sub>2</sub>VAl and Co<sub>2</sub>MnSi, clear magnetic circular dichroism (MCD) was observed in the RIXS spectrum of the 2p<sub>3/2</sub> absorption peaks of Mn, V, and Co. It was found that the sign of MCD of Mn was different between them, and it reflected the difference in the electronic state of each other.

In Co<sub>2</sub>FeSi, a large MCD component was observed just beside the elastic scattering at the Fe-2p<sub>3/2</sub> absorption peak, demonstrating that it reflects the large DOS of Fe existing at the Fermi level.

研究分野：金属物性

キーワード：ハーフメタル型強磁性体 スピントロニクス 電子状態 共鳴非弾性X線散乱 異方性磁気抵抗

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1983年にde. Groot 等によってフェルミ面近傍において片側のスピンバンドだけがギャップを有する「ハーフメタル」という電子状態を有する物質が理論的に予測されて以来[1]、高スピン偏極強磁性材料はスピントロニクス分野において非常に注目を集めている。Co<sub>2</sub>MnSn, Co<sub>2</sub>MnSi等のCo基ホイスラー合金もハーフメタル型電子状態を有することが予測され[2]、特にCo<sub>2</sub>MnSiを強磁性電極としたトンネル磁気抵抗効果素子はハードディスクドライブの読み取りヘッドとして実用化され、近年は、半導体デバイスの高効率スピン注入源としての応用が期待されている。研究代表者は、早くから様々なCo基、Mn基ホイスラー合金の基礎物性に着眼した研究を行ってきており、高スピン偏極であることに加え、キュリー温度が高く、相安定性も高い材料設計の指針を与えてきた[3,4]。しかしながら、実際の物質が第一原理計算で示されるような特徴的な電子状態を、「真に」有しているのかどうかを実験的に検証することはなかなか困難であった。それは、マクロな物性値はアップ・ダウンスピンバンドを足し合わせたトータルな電子状態密度を反映した状態を観測しているに過ぎないからである。

近年の放射光に関する技術の進展により、偏極光電子分光を行うことでアップとダウンの電子状態密度をそれぞれ検出することが可能になりつつあるが、本合金系は軟磁性であることから、単磁区構造にするためには磁場印可が必須であり、現時点において磁場中の光電子分光測定は非現実的であることから（磁場により光電子の軌道が曲げられ、測定が不可能）、それとは異なる測定原理・手法が必要である。本研究では、磁場印可の影響を受けない、光応答の共鳴非弾性X線散乱測定を磁場下で行うことにより、内殻2pより3dへ励起された電子が緩和して終状態に落ち着く際に検出される発光エネルギーを円偏光入射X線において測定することで、フェルミ面ごく近傍の電子状態を調べることを目的としている。

[1] R.A. de Groot *et al.*, Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 2024. [2] J. J. Kübler *et al.*, Phys. Rev. B 28 (1983) 1745. [3] R.Y. Umetsu *et al.*, Phys. Rev. B 72 (2005) 214412. [4] R.Y. Umetsu *et al.*, Phys. Rev. B 77 (2008) 104422. [5] F. Yang *et al.*, Phys. Rev. B 86, 020409 (2012).

### 2. 研究の目的

ハーフメタル型電子状態を有すると理論的に予測されている、強磁性体 (Co<sub>2</sub>MnSiやMn<sub>2</sub>VAlなど) の単結晶試料を育成し、その試料の原子配列を完全に制御した上で、磁場中共鳴非弾性X線散乱(RIXS)の円偏光依存性よりフェルミ面近傍のスピン偏極電子状態を調べ、ハーフメタル型電子状態の直接観測を行うことを目的としている。また、スピン・軌道相互作用を取り入れた理論計算より、ハーフメタル型強磁性体の異方性磁気抵抗(AMR)の符号が負を示すことが、ハーフメタル型電子状態の必要条件であると提案されていることから[5]、RIXSの観測結果と合わせて、ハーフメタル型電子状態の有無について包括的な議論を行うことも予定している。

これまで、ホイスラー合金薄膜試料に対して電子状態の直接観測を目的とした、スピン偏極光電子分光測定が数多く挑戦されてきたが、未だ成功例はない。これは、残留磁化が小さく、ゼロ磁場状態で磁区を揃えることが困難であることや、試料表面の磁性が固体内部と異なるといった問題に由来する。本研究は、磁場中で磁区を揃えたバルク単結晶試料を用いて固体内部の電子状態に敏感、かつバルク敏感な磁場中共鳴非弾性X線散乱測定を行うことで、これらの問題点を克服することを研究の目的としている。

### 3. 研究の方法

共鳴非弾性X線散乱(RIXS)は、入射X線を吸収して内殻電子が共鳴的に励起され、X線を放射しつつ緩和する現象であり、入射エネルギーを選ぶことによって特定の元素の電子を励起させることができ、フェルミ面近傍の部分状態密度を反映するようなスペクトルが得られる。さらには、強磁性体では電子状態が交換分裂をしているため、入射X線を円偏光させた場合、電子の遷

移確率がアップ・ダウンスピンバンドとで異なり、それぞれのスペクトル強度において差分が生じる。よって、ハーフメタルであれば、フェルミ面直上の非占有状態から占有状態、そして終状態への緩和において、片側のバンドからだけに寄るスペクトルが得られることになる。RIXS測定は、SPring-8・BL07LSUに設置されている超高分解能分光器を用いて行う。チャンパー内には分光器用のマグネットが設置されており、試料の磁化を約 0.25 テスラの磁場により揃え、磁場と平行方向の左右円偏光を入射して測定を行うことが可能である。得られたスペクトルと第一原理計算のスピンの偏極した部分状態密度とを比較することで電子状態に関する包括的な議論をすることが出来る。

試料は、母合金を高周波溶解、またはアーク溶解で作製し、ブリッジマン法にて単結晶試料を育成した。予め、母合金の融点は熱分析測定で調べ、各々の融点に合わせて昇温すべく温度等の条件を決定した。得られたインゴットは、融点に近い温度にて数週間均一化熱処理を施した後、規則化のための追加熱処理を施してある。試料の組成はICP発光分光やEPMAで評価を行った。結晶方位はラウエ法により分析して(100)や(110)面のディスク状に放電加工機で切断した後、更に方位を確認し、 $\langle 100 \rangle$ や $\langle 110 \rangle$ 方向が長手方向になるような短冊形試料に切り出した。その試料をRIXS用の試料ホルダーに取り付け、グローブボックスかチャンパー内で劈開し、その面にX線を入射して測定を行った。試料の磁化やキュリー温度は磁化測定装置を用いて調査した。

#### 4. 研究成果

##### (1) $\text{Co}_2\text{MnSi}$ と $\text{Mn}_2\text{VAI}$ ホイスラー合金の単結晶試料における共鳴非弾性X線散乱

図1に $\text{Co}_2\text{MnSi}$ のCo(a), Mn(b),  $\text{Mn}_2\text{VAI}$ のV(c), およびMn(d)のL端における磁場中共鳴非弾性X線散乱(RIXS)の磁気円二色性(MCD)スペクトルを示す。V(c)はMCDの強度が弱い、それ以外については強度の高いMCDスペクトルが得られている。同じMnでも、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$ (b)と $\text{Mn}_2\text{VAI}$ (d)の場合では、スペクトルの性状が明瞭に異なっており、占有するサイトが違うことで電子状態が異なっていることが示唆される。具体的には、(b)では、Energy Loss = 0の位置に観測される弾性散乱のMCDと、入射X線が高くなるにつれて線形に変化する非弾性散乱のMCD成分との間にギャップが存在するのに対し、(d)では両者が連続的に繋がっている。これは、 $\text{Mn}_2\text{VAI}$ のMnがダウンスピンバンドのフェルミ準位に大きな電子状態密度(DOS)を有していることに因ると考えられる。また、(d)ではMCDの符号が負(青色)のMCD成分が支配的であるのに対し、(b)では正(赤色)の成分広いエネルギー領域で観測される。これらが何を意味しているのかは、各々のスペクトルの性状に対して理論計算により得られるスペクトルとの比較を行うことで明確になる(図2と図3)。図(a)と図(b)を比較すると、両者において正のMCD成分が存在していることが分かるが、その分布の様子は異なっている。また、弾性散乱と非弾性散乱との間のギャップの幅が異なっており、Mnの方がCoの場合よりも広いことが明らかである。これは、電子状態において、フェルミ準位と占有状態との間のギャップの幅がCoとMnで違うことに見事に対応している。

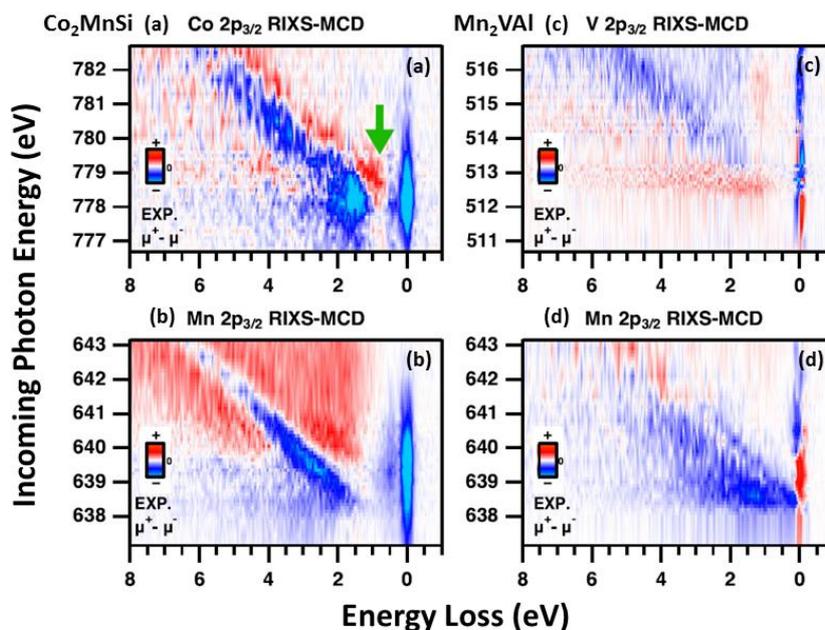


図1  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  のCo(a), Mn(b),  $\text{Mn}_2\text{VAI}$  のV(c), およびMn(d)の2p内殻励起のRIXS-MCDスペクトル

図2は、図1のMn<sub>2</sub>VAIのV(c)とMn(d)のRIXS-MCDスペクトルの2次元強度マップのうち、入射光のエネルギー  $h\nu = 638.6$  (a)と512.6 (c) eVのスペクトルを示し、青色と赤色の実線は左右円偏光の入射光に対するRIXSスペクトルで ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ )、黒線がその差分、つまりはMCD( $=\mu^+ - \mu^-$ )である。Mn(a)とV(c)では、Energy Loss = 0の位置に観測される弾性散乱のMCD成分の符号が異なっているが、これは、Mn<sub>2</sub>VAIのMnとVの磁気モーメントが反強磁性的に結合していることに対応している。Mn<sub>2</sub>VAIは中性子回折測定等の先行研究より、フェリ磁性体であることが報告されており、その結果と一致していると言える。図2の(b)と(d)は、一般化勾配近似(GGA)法による電子状態密度の計算結果を基に、MnとVのMCDのスペクトルをそれぞれ計算したものである。磁場印加によりゼーマン分裂した2*p*内殻のそれぞれ4つの状態 ( $m_j = +3/2, 1/2, -1/2$  and  $-3/2$ ) からの成分を示しており、黒実線で示されるそれらの成分の和は、(a)のMCDの計算結果と対応する。図(b)より、Mn<sub>2</sub>VAIのMnのMCDは $m_j = -3/2$ からの成分が支配的であることが明らかである。 $h\nu = 638.6$  eVにおけるMn-2*p*のMCDはEnergy Loss = 0.2と1.2 eV近傍に2つのピークが観測され、その性状は計算スペクトルによってよく再現されている。一方、実験で得られるVのMCDはそもそも強度が非常に弱いが、(d)の計算結果からも明らかのように、 $m_j = +3/2$ と $-3/2$ からの成分が相殺した結果、MCDの強度が弱いということが分かる。

図3は、図1のCo<sub>2</sub>MnSiのCo (a)とMn(b)の2次元強度マッピングのうち、入射光のエネルギー  $h\nu = 779.0$  (a)と640.5(c) eVのRIXSとそのMCDスペクトルを示している。線の色の違いは、図2と同様である。図2のMn<sub>2</sub>VAIの場合とは異なり、CoとMnの両方の元素について明瞭なMCDが観測される。弾性散乱のMCDの符号はCoとMnにて同じ方向であり、CoとMnの磁気モーメントが強磁性的に結合していることの証である。さらに、Mn<sub>2</sub>VAIと異なるのは、MCDの成分において正の成分も有していることである。図3の(b)と(d)は理論計算によるMCDスペクトルを示しているが、Mn<sub>2</sub>VAIでは $m_j = -3/2$ からの成分のみが支配的であったのに対し、Co<sub>2</sub>MnSiの場合は $m_j = +3/2$ の成分も足し合わせることでそのスペクトル性状がよく再現されていることが分かる。これは、Mn<sub>2</sub>VAIの電子状態においてアップスピンバンドにギャップが存在していたのに対し、Co<sub>2</sub>MnSiではダウンスピンバンドにギャップが存在することの違いを反映した結果であり、つまりは、RIXSのMCDスペクトルの解析より、このような電子状態の違いが明瞭に分別出来ることが明らかになった。さらに解析を進めており、フェルミ準位近傍に形成されるギャップのバンド幅や、ゼーマン分裂したエネルギーの幅等の定量的な議論に踏み込んでいる。これにより、3*d*電子軌道の占有・非占有状態における様々な情報が引き出されることが分かりつつある。

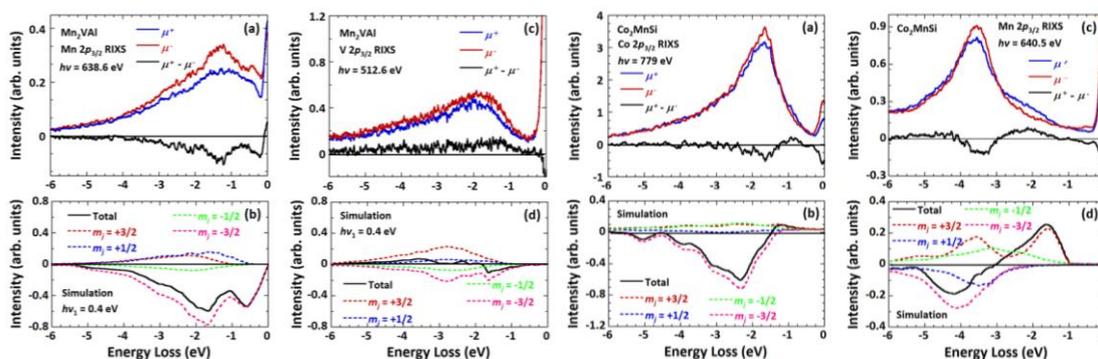


図2 (左) Mn<sub>2</sub>VAI単結晶合金のMn(a)とV(c)のL端における右回り偏光( $\mu^+$ )と左回り偏光( $\mu^-$ )におけるRIXSスペクトルとその差分(磁気円二色性: MCD =  $\mu^+ - \mu^-$ )。 (b)と(d)は計算によるMCDスペクトル(ゼーマン分裂をした4つの $m_j$ の各状態からの成分とその和: 黒実線)を示す。入射光のエネルギー $h\nu$ はそれぞれ638.6, 512.6 eVである。

図3 (右) Co<sub>2</sub>MnSi単結晶合金のCo(a)とMn(c)のL端におけるRIXSスペクトル( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ )とそのMCD ( $=\mu^+ - \mu^-$ )。入射光のエネルギー $h\nu$ はそれぞれ779.0, 640.5 eVである。(b)と(d)はそれぞれにおける計算スペクトル。

## (2) Co<sub>2</sub>FeSi ホイスラー合金の単結晶試料における共鳴非弾性X線散乱

図4の(a)と(b)は、Co<sub>2</sub>FeSi単結晶合金におけるFe-L端のRIXSスペクトルとそのMCD(b)の2次元強度マップを示している。両者において、弾性散乱と非弾性散乱によるスペクトルの間に弱い構造が観測される。(d)と(f)はそれぞれ、一般化勾配近似(GGA)法と電子相関Uを取入れた局所密度近似(LDA+U)法でバンド計算を行い、それらを基にRIXS-MCDスペクトルを計算した場合の2次元強度マップを示している。これらの比較により、実験スペクトルで観測されるような構造は、GGA法にて計算を

行った場合のスペクトルでよく再現されていることが分かる。図(c)は入射光エネルギー $h\nu = 707.6$  eV の RIXS-MCD スペクトルを示し、(e)と(g)は GGA と LDA+U の計算によって得られた代表的なスペクトルを示す。(c)図中の矢印で観測されるようなピークは、(e)においてのみ観測されている。電子相関  $U$  を取入れたバンド計算では、フェルミ準位近傍にギャップが形成され、この場合だと  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  合金は完全なスピン分極率を有するハーフメタル型強磁性体となるが、GGA の場合は、フェルミ準位に  $\text{Fe-}3d$  による大きな電子状態密度が存在することになる。つまり、今回の実験スペクトルと理論計算スペクトルとの比較により、この  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  合金はハーフメタル型強磁性体ではなく、GGA による電子状態を反映する物質であることが示唆される。今後は、 $\text{Co}_2\text{FeSi}$  の Co-L 端においても測定を行い、Fe の結果と合わせて電子状態について包括的に議論を行うことを計画している。

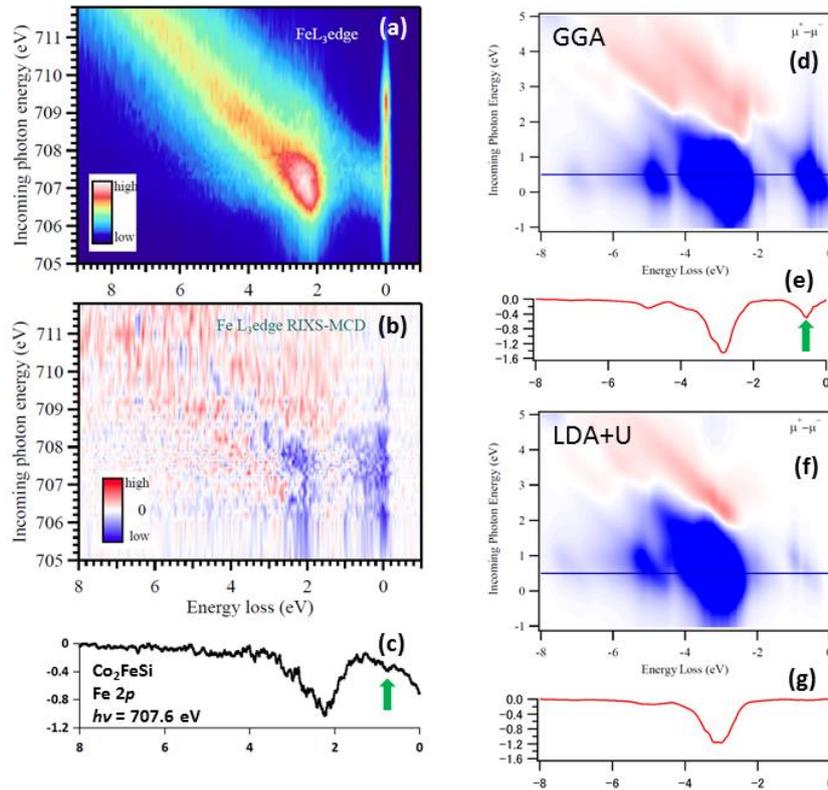


図4  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  における Fe-L 端の RIXS スペクトル(a)とその MCD(b)の2次元強度マップ。(c)は入射光エネルギー $h\nu = 707.6$  eV の RIXS-MCD スペクトル。(d)と(f)はそれぞれ、一般化勾配近似(GGA)法と電子相関  $U$  を取入れた局所密度近似(LDA+U)法でバンド計算を行い、RIXS-MCD スペクトルを計算した場合の2次元強度マップを示す。(e)と(g)はそれぞれの計算における代表的なスペクトルを示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R.Y. Umetsu, M. Tsujikawa, K. Saito, K. Ono, T. Ishigaki, R. Kainuma, and M. Shirai	4. 巻 83
2. 論文標題 Atomic ordering, magnetic properties, and electronic structure of Mn <sub>2</sub> CoGa Heusler alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 65801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-648X/aaf54a	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 R.Y. Umetsu, H. Fujiwara, K. Nagai, Y. Nakatani, M. Kawada, A. Sekiyama, F. Kuroda, H. Fujii, T. Oguchi, Y. Harada, J. Miyawaki, and S. Suga	4. 巻 99
2. 論文標題 Half-metallicity of the ferrimagnet Mn <sub>2</sub> VAl revealed by resonant inelastic soft x-ray scattering in a magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 134414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.134414	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 M. Seredina, I. Gavrikova, D. Karpenkova, M. Zheleznya, A. Bazlova, R. Chatterjee, R.Y. Umetsu, and V. Khovaylo	4. 巻 485
2. 論文標題 Transport properties of ferrimagnetic Mn <sub>2</sub> CoSn Heusler alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Magn. Magn. Mater.	6. 最初と最後の頁 193-196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2019.02.091	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. Nagai, H. Fujiwara, H. Aratani, S. Fujioka, H. Yomosa, Y. Nakatani, T. Kiss, A. Sekiyama, F. Kuroda, H. Fujii, T. Oguchi, A. Tanaka, J. Miyawaki, Y. Harada, Y. Takeda, Y. Saitoh, S. Suga, and R. Y. Umetsu	4. 巻 97
2. 論文標題 Electronic structure and magnetic properties of the half-metallic ferrimagnet Mn <sub>2</sub> VAl probed by soft x-ray spectroscopies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.97.035143	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 I. Shigeta, Y. Fujimoto, R. Ooka, Y. Nishisako, M. Tsujikawa, R.Y. Umetsu, A. Nomura, K. Yubuta, Y. Miura, T. Kanomata, M. Shirai, J. Gouchi, Y. Uwatoko, and M. Hiroi	4. 巻 97
2. 論文標題 Pressure effect on magnetic properties of half-metallic Heusler alloy Co <sub>2</sub> TiSn	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.104414	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 R. Ooka, I. Shigeta, R.Y. Umetsu, A. Nomura, K. Yubuta, T. Yamauchi, T. Kanomata, M. Hiroi	4. 巻 536
2. 論文標題 Temperature dependence of differential conductance in Co-based Heusler alloy Co <sub>2</sub> TiSn and superconductor Pb junctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B	6. 最初と最後の頁 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.10.055	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 T. Kono, M. Kakoki, T. Yoshikawa, X. Wang, K. Goto, T. Muro, R.Y. Umetsu, and A. Kimura	4. 巻 125
2. 論文標題 Visualizing half-metallic bulk band structure with multiple Weyl cones of the Heusler ferromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett	6. 最初と最後の頁 216403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.216403	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 R.Y. Umetsu, K. Saito, K. Ono, T. Fukushima, F. Kuroda, T. Oguchi, and T. Ishigaki	4. 巻 855
2. 論文標題 Effect of atomic configuration on magnetic properties and electronic state of CoVMnAl quaternary Heusler alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Alloys Compd.	6. 最初と最後の頁 157389
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.157389	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27件(うち招待講演 5件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 梅津理恵
2. 発表標題 機能性材料ホイスラー合金の電子状態(猿橋賞受賞記念講演:基調講演)
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西本幸平、藤原秀紀、中田惟奈、濱本諭、久我健太郎、木須孝幸、門野利治、今田真、東谷篤志、山崎篤志、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、菅滋正、梅津理恵、関山明
2. 発表標題 直線偏光制御硬X線光電子分光によるハーフメタル型ホイスラー合金Co <sub>2</sub> MnSiの電子構造研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅津理恵、斉藤耕太郎、小野寛太、石垣徹、辻川雅人、白井正文
2. 発表標題 Mn基ホイスラー合金Mn <sub>2</sub> CoGaの磁氣的性質と原子配列
3. 学会等名 日本磁気学会第43回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西本幸平、藤原秀紀、有長祐人、山神光平、山添康介、宮脇淳、原田慈久、黒田文彬、小口多美夫、木須孝幸、関山明、菅滋正、梅津理恵
2. 発表標題 磁場中共鳴非弾性X線散乱によるホイスラー合金Co <sub>2</sub> FeSiのスピンの偏極電子構造
3. 学会等名 第33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 2020年

1. 発表者名 梅津理恵、藤原秀紀、関山明、黒田文彬、藤井将、小口多美夫、菅滋正、宮脇淳、原田慈久
2. 発表標題 ハーフメタル型電子状態を有するホイスラー合金の共鳴非弾性X線散乱測定
3. 学会等名 「学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト」(6大学連携プロジェクト)第4回公開討論会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西本幸平、藤原秀紀、濱本諭、有長祐人、姫野良介、近藤佑宥、木須孝幸、中川広野、山崎篤志、中田惟奈、今田真、東谷篤志、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、菅滋正、梅津理恵、関山明
2. 発表標題 直線偏光制御硬X線光電子分光によるハーフメタル型ホイスラー合金Mn <sub>2</sub> VAlの価電子帯電子構造研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野嵩、鹿子木将明、吉川智己、Xiaoxiao Wang、後藤一希、室隆桂之、梅津理恵、木村昭夫
2. 発表標題 軟X線ARPESによるホイスラー型Co <sub>2</sub> MnGeのハーフメタリックなバンド構造の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅滋正、藤原秀紀、梅津理恵、黒田文彬、小口多美夫、関山明、原田慈久、宮脇淳
2. 発表標題 摂動下での軟X線領域の共鳴非弾性散乱の展望: V, Cr酸化物やHeusler合金など
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅津理恵、藤原秀紀、黒田文彬、川田萌樹、榎内利幸、藤井 将、入澤明典、宮脇 淳、関山 明、小口多美夫、原田慈久、菅 滋正
2. 発表標題 共鳴非弾性X線散乱によるCo <sub>2</sub> MnSiホイスラー合金の電子状態
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期第166回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu
2. 発表標題 Electronic state and phase stability of half-metallic ferromagnets in Heusler alloys
3. 学会等名 KIST-KINKEN Joint Symposium 2019, KIST, Soul, Korea, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu, H. Fujiwara, F. Kuroda, H. Fujii, T. Oguchi, A. Sekiyama, J. Miyawaki, Y. Harada and S. Suga
2. 発表標題 Resonant inelastic soft x-ray scattering under magnetic field for Mn <sub>2</sub> VAl Heusler alloy
3. 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Las Vegas, Nevada, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Shigeta, H. Fundo, R. Ooka, R.Y. Umetsu, Y. Miura, A. Nomura, K. Yubuta, T. Yamauchi, T. Kanomata, and M. Hiroi
2. 発表標題 Magnetic properties of the L2 <sub>1</sub> -ordered phase in Co-based Heusler alloys Co <sub>2</sub> TiGa and Co <sub>2</sub> TiSn
3. 学会等名 Joint 5th Int ' I Symposium on Frontiers in Materials Science & 3rd Int ' I Symposium on Nano-materials, Technology and Applications (FMS - NANOMATA 2019), Da Nang, Vietnam (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu
2. 発表標題 SX-RIXS measurements under magnetic field for Heusler alloys with half-metallic electronic state
3. 学会等名 17th RIEC International Workshop on Spintronics and 10th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Sendai, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu
2. 発表標題 Magnetic properties and electronic state of functional materials in Heusler alloys
3. 学会等名 The international workshop for synergetic collaboration between material and synchrotron science through IMR-MAX IV joint research (IMR+MAX IV 2020), Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅津理恵, 福島鉄也, 齊藤耕太郎, 小野寛太, 黒田文彬, 小口多美夫, 石垣徹
2. 発表標題 CoV <sub>2</sub> MnAl合金の原子配列と電子状態
3. 学会等名 第42回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu, K. Saito, K. Ono, T. Fukushima, F. Kuroda, T. Oguchi, and T. Ishigaki
2. 発表標題 Atomic configuration and electronic state of CoV <sub>2</sub> MnAl quaternary Heusler alloy
3. 学会等名 International Conference on Magnetism, ICM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Suga, H. Fujiwara, G. Guentherodt, A. Gupta, J. Miyawaki, Y. Harada, and R.Y. Umetsu
2. 発表標題 Resonance Inelastic X-ray Scattering under External Magnetic Field: Complementary Technique to the Spin- and Angle-resolved Photoelectron Spectroscopy
3. 学会等名 International Workshop on Trends in Advanced Spectroscopy in Materials Science (TASPEC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fujiwara, K. Nagai, F. Kuroda, H. Fujii, T. Oguchi, Y. Takeda, Y. Saitoh, J. Miyawaki, Y. Harada, A. Tanaka, T. Kiss, A. Sekiyama, S. Suga, R.Y. Umetsu
2. 発表標題 Magnetic properties and electronic structure of the half-metallic ferrimagnet Mn <sub>2</sub> VAl probed by soft-X-ray spectroscopies
3. 学会等名 The first international Workshop on Momentum Microscopy & Spectroscopy for Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅津理恵
2. 発表標題 ハーフメタルについて～その特徴と応用～
3. 学会等名 日本物理教育学会東北支部大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西本幸平, 藤原秀紀, 濱本諭, 有長祐人, 近藤佑宥, 木須孝幸, 山神光平, 山添康介, 宮脇淳, 原田慈久, 山崎篤志, 今田真, 東谷篤志, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 黒田文彬, 小口多美夫, 菅滋正, 梅津理恵, 関山明
2. 発表標題 磁場中共鳴非弾性軟X線散乱及び直線偏光制御硬X線光電子分光によるホイスラー合金Co <sub>2</sub> FeSiの価電子帯電子構造
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	藤原秀紀, 梅津理恵, 黒田文彬, 宮脇淳, 西本幸平, 櫻内利幸, 関山明, 入澤明典, 藤井将, 小口多美夫, 原田慈久, 菅滋正
2. 発表標題	磁場中共鳴非弾性軟X線散乱によるホイスラー合金Co <sub>2</sub> MnSiのハーフメタル型電子構造の直接観測
3. 学会等名	日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	河野嵩, 鹿子木将明, 吉川智己, Xiaoxiao Wang, 後藤一希, 室隆桂之, 梅津理恵, 木村昭夫
2. 発表標題	軟X線ARPESによるホイスラー合金のハーフメタルなバンド構造と複数のワイル交差点の観測
3. 学会等名	日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	梅津理恵, 藤原秀紀, 関山明, 黒田文彬, 藤井将, 小口多美夫, 菅滋正, 宮脇淳, 原田慈久
2. 発表標題	ホイスラー合金の磁場中共鳴非弾性X線散乱による電子状態観測
3. 学会等名	文部科学省6大学連携プロジェクト、学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト、第5回公開討論会(招待講演、オンライン開催)(招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	西本幸平, 藤原秀紀, 濱本諭, 有長祐人, 姫野良介, 近藤佑宥, 木須孝幸, 中川広野, 山崎篤志, 中田惟奈, 今田真, 東谷篤志, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 菅滋正, 梅津理恵, 関山明
2. 発表標題	直線偏光制御硬X線光電子分光によるホイスラー合金の価電子帯電子構造研究
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
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 河野嵩, 鹿子木雅明, 吉川智己, Xiaoxiao Wang, 後藤一希, 室隆桂之, 梅津理恵, 木村昭夫
2. 発表標題 軟X線ARPESによるCo <sub>2</sub> MnGeのハーフメタル電子状態とワイル交差の直接観測
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河裾厚男, 前川雅樹, 宮下敦巳, 梅津理恵
2. 発表標題 ワイル半金属候補物質-Co基ホイスラー合金-の電子運動量分布と格子欠陥
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R.Y. Umetsu, K. Saito and K. Ono
2. 発表標題 Magnetic properties and neutron diffraction study on CoV <sub>2</sub> MnAl quaternary Heusler alloy
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学金属材料研究所・新素材共同研究開発センター・研究トピックス  <a href="http://www.crdam.imr.tohoku.ac.jp/research_umetsu1.pdf">http://www.crdam.imr.tohoku.ac.jp/research_umetsu1.pdf</a></p> <p>プレスリリース  河野嵩, 鹿子木将明, 吉川智己, Xiaoxiao Wang, 後藤一希, 室隆桂之, 梅津理恵, 木村昭夫、「多機能性強磁性合金のハーフメタル電子状態の直接観測に世界で初めて成功 - 省電力デバイス開発へ道 -」広島大学大学院理学研究科, 物質・材料研究機構, 高輝度光科学研究センター, 東北大学金属材料研究所, 広島大学大学院先進理工系 科学研究科, 論文タイトル: Visualizing Half-Metallic Bulk Band Structure with Multiple Weyl Cones of the Heusler Ferromagnet、2020年11月19日</p>
---

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
連携研究者	菅 滋正  (Suga Shigemasa)  (40107438)	大阪大学・産業科学研究所・名誉教授    (14401)	博士(工学) 放射光実験、解析
連携研究者	藤原 秀紀  (Fujiwara Hidenori)  (00397746)	大阪大学・基礎工学研究科・助教    (14401)	博士(工学) 放射光実験、解析

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