

Mn 基ホイスラー合金の磁気特性と電子状態

—猿橋賞受賞によせて—

梅津理恵*

斉藤耕太郎¹⁾**

小野寛太²⁾**

佐藤和則***

福島鉄也****

黒田文彬*****

小口多美夫*****

1. はじめに

一般的に、ホイスラー合金といえば、 X_2YZ の分子式を持つ金属間化合物で、 X や Y を遷移金属や希土類系元素が占め、 Z は第13~15族元素などから構成される物質群の総称である。ざっと考えただけでも組み合わせは数千種にもものぼり、実に多様であることは容易に察しが付くであろう。これらのホイスラー合金が全て平衡状態において安定に相が存在するとは限らないが、多くの物質が多様な物性を示すことはよく知られており、以前より、機能性材料として研究が進められている。筆者も、これまでに $X=Co$ としたCo基ホイスラー合金の相安定性や磁気特性、および電子状態について、Ni基ホイスラー合金では磁場印加によって構造相変態が誘起されるメタ磁性形状記憶効果に関して、「最近の研究」に記事を紹介した⁽¹⁾⁽²⁾。Co基ホイスラー合金は、「ハーフメタル」という特異な電子状態を有することでスピントロニクス分野で注目されているが⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、Mn基ホイスラー合金に関しても同様な電子状態を有することが理論の立場より提案されており⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾、研究対象とする合金系がCo基からMn

基合金へ移りつつある。さらに最近では、 $XX'YZ$ とする四元系(擬三元系)ホイスラー合金が、スピンギャップレス半導体型電子状態や⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、ハーフメタル型電子状態を有する完全補償型フェリ磁性体である⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾などのトピックスで注目されている。

本稿では、ハーフメタル型電子状態を有するフェリ磁性体である Mn_2VAI ホイスラー合金の磁気特性と電子状態について、また、擬三元系ホイスラー合金と捉えられるCoV-MnAl合金の最近の研究結果について紹介する。そして、最後に、2019年5月に受賞した「第39回猿橋賞」についても触れる。

2. Mn_2VAI ホイスラー合金の磁気特性と電子状態

(1) Mn_2VAI ホイスラー合金の規則度制御

図1に X_2YZ ホイスラー合金の結晶構造を示す⁽¹⁾。低温では、ホイスラー型規則構造と呼ばれる $L2_1$ 型結晶構造を示し、温度上昇に伴い $B2$ (CsCl)型構造、 $A2$ (bcc)型構造へと逐次変態する。 $B2$ 型構造では、 Y と Z 元素が不規則化し、 $A2$ 型構造ではすべての構成元素がランダムに配置すること

* 東北大学金属材料研究所; 教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

** 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所; 1)研究員, 2)准教授

*** 大阪大学大学院工学研究科; 准教授

**** 東京大学物性研究所; 特任准教授

***** 大阪大学大学院基礎工学研究科; 大学院生(現: 産業技術総合研究所機能材料コンピュータシミュレーションデザイン研究センター; 特別研究員)

***** 大阪大学産業科学研究所; 教授

Magnetic Properties and Electronic State of Mn-based Heusler Alloys; Rie Y. Umetsu*, Kotaro Saito**, Kanta Ono**, Kazunori Sato***, Tetsuya Fukushima****, Fumiaki Kuroda***** and Tamio Oguchi***** (*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai. **Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Tsukuba. ***Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. ****The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa. *****Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka. (Present: Research Center for Computational Design of Advanced Functional Materials, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba.) *****The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki.)

Keywords: Mn-based Heusler alloy, density of states, half-metal, degree of order, neutron diffraction, atomic configuration

2021年2月2日受理[doi:10.2320/materia.60.205]

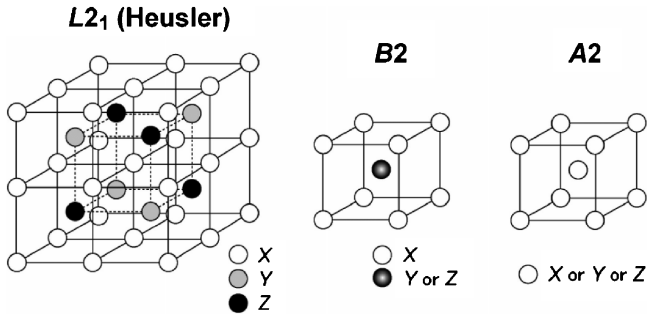


図1 Mn_2VAI の $L2_1$ 型規則構造と $B2$ (CsCl型), および $A2$ (bcc)構造⁽¹⁾.

になる. これらの構造相変態温度を調べることは, 結晶の規則度を制御したり, 相の安定性を議論するのに非常に重要である. Co基ホイスラー合金の薄膜を製膜後に同じ温度で熱処理を施すにしても, 規則-不規則相変態温度(T_t)の高い物質($L2_1$ 相の安定性が高い)ほど, 規則度の高い膜が得られることが確認されている⁽²⁰⁾. Mn_2VAI ホイスラー合金の T_t を調べるために $Mn_{50}V_{50-x}Al_x$ 合金のバルク多結晶試料を作製し, 熱分析測定を行った.

1473 Kにて均一化熱処理を施し, 急冷して得た試料($0 \leq x \leq 35$)のDSC曲線を図2(左)に示す. $x=0$ ($Mn_{50}V_{50}$)のDSCの昇温過程において1100 K近傍に吸熱ピークが観測されるが, 既存の二元系状態図等と比較することで, ○印で示したそのピークは $B2$ 相から $A2$ 相への T_t であることが分かる. したがって, $x=25$ 前後の組成において○印の吸熱ピークの低温で観測される●印の反応は $L2_1$ 相から $B2$ 相への T_t であると見なされる. この結果を基に相図を描くと図2(右)のようになる. これより, 規則度の制御を行うための時効熱処理温度が決定される.

図3に各温度にて熱処理を施した Mn_2VAI ($Mn_{50}V_{25}Al_{25}$)合金の粉末X線回折(XRD)パターンを示す. 1173 K, 1093 K, および673 Kは Mn_2VAI にとってそれぞれ $A2$, $B2$, $L2_1$ 型規則構造を示す温度であることが, 図2(右)の相図より判断される. 1173 K熱処理試料のXRDパターンでは非常に弱い200超格子反射が観測され, 冷却中にわずかに $B2$ 相に規則化したものと考えられる. 1093 K熱処理試料では強い200反射が観測されることから, ほぼ完全な $B2$ 相が得られたと言え, 673 Kより徐冷した試料では200と111の超格子反射の両方が観測されることから $L2_1$ 相に規則化したと考えられる. しかしながら, これらの超格子反射強度は図中の一番下の計算による回折パターンと比べて強度が弱く, $L2_1$ 相の規則度は低いと思われる. 1473 Kにて溶体化熱処理を施して急冷して得た試料は逆位相境界が導入されて規則度が進みにくいと考えられる. よって, 比較的高い温度にて熱処理を施してドメインを大きく成長させてから673 Kにて熱処理を施した(2段階時効)試料のXRDパターンでは, 計算による回折パターンとはほぼ同等な111反射強度が見られ, 規則度の高い $L2_1$ 相が得られたことが分かる. このように, 熱分析の結果を基に熱処理条件を変えることで規則度を制御

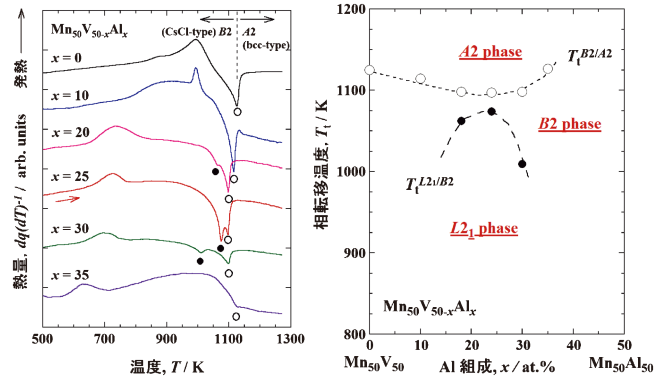


図2 $Mn_{50}V_{50-x}Al_x$ ($0 \leq x \leq 35$)合金の昇温過程におけるDSC曲線(左)と相図(右). (オンラインカラー)

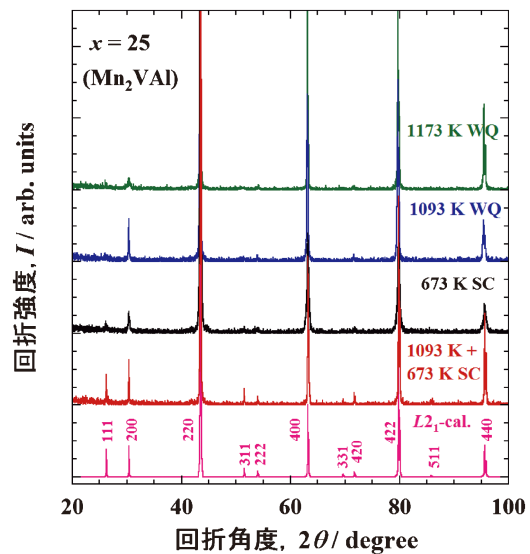


図3 Mn_2VAI 合金のX線回折パターン(SC:徐冷, WQ:急冷). 一番下は格子定数 $a=0.5833$ nmとし, 完全に規則化した $L2_1$ 型構造を仮定した場合の計算強度. (オンラインカラー)

し, 概ね $A2$, $B2$, $L2_1$ 相と3種の相が得られた.

(2) Mn_2VAI ホイスラー合金の磁性に及ぼす規則度の影響

図4(左)は各温度(1173, 1093, および673 K)にて最終熱処理を施した試料の5 Kにおける磁化曲線である. 2段階時効を施して得た $L2_1$ 相の試料は磁場印加に伴いすぐに飽和するような磁化曲線を示す. Arrott Plotより自発磁化を求めたところ, 磁気モーメントの総和は $1.94 \mu_B/f.u.$ であり, 理論計算値の $1.98 \mu_B/f.u.$ とほぼ等しい⁽⁷⁾. 一方, $B2$ 相の磁化曲線はすぐに飽和するものの磁気モーメントの値が $1.76 \mu_B/f.u.$ と $L2_1$ 相の値より小さく, 規則度の低下が影響しているものと考えられる. 673 Kで熱処理を施し, 規則度の低い $L2_1$ 相の磁化曲線は磁場印加に伴い緩やかに飽和している. これは組織が細かく, 強磁性を示す逆位相領域の磁区が逆位相境界によってピン止めされていることによると考えられる. 規則度によって磁氣的性質が大きく異なるような

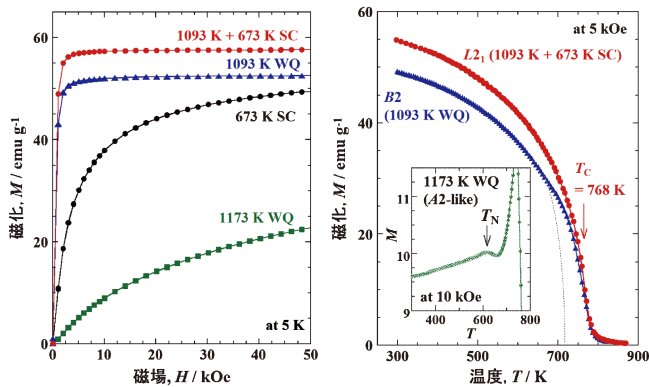


図4 Mn_2VAI 合金の5 Kにおける磁化曲線(左)と熱磁化曲線(右). 内挿図は1173 Kから急冷した試料の熱磁化曲線(SC: 徐冷, WQ: 急冷). (オンラインカラー)

$\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Al}, \text{Ga})$ においても、逆位相境界によって囲まれる領域のサイズと磁化曲線の挙動が系統的に調べられている⁽²¹⁾⁽²²⁾. A2相の磁化曲線は50 kOeの磁場においても飽和せず、磁化の値も小さく、反強磁性的様相を示していることが分かる。

各試料における熱磁化曲線を図4(右)に示す. L_{21} 相の熱磁化曲線は温度上昇に伴い減少し、キュリー温度(T_C)は768 Kであることが分かった. B_2 相の熱磁化曲線は650 K近傍でステップを示した後、 L_{21} 相の熱磁化曲線と重なり、同じキュリー温度を示した. これは、温度上昇中に B_2 相から L_{21} 相に規則化したものと考えられ、図中の点線の外挿より、 B_2 相の T_C は L_{21} 相より数十 K低いと推定される. 内挿図にA2相の試料の熱磁化曲線を示す. 磁化の値は温度上昇に伴い増加し、617 Kにピークが観測されることから、A2相はこの温度にネール温度(T_N)を有する反強磁性であることが分かる. 700 K近傍で急に磁化が増大しているのは、規則化して強磁性になったからであると思われる.

熱磁化曲線において617 Kに観測されるピークがネール温度であるかを調べるために、粉末中性子回折測定を行った結果を図5に示す. 測定は、オーストラリアの中性子研究所(ANSTO: Australian Nuclear Science & Technology Organisation)に設置されているWOMBAT(High-Intensity Neutron Powder Diffractometer)にて295 Kから525 Kの温度領域にて行われた. 測定時の中性子の波長は0.154 nmである. A2相(bcc)としての110, 200, 211のような基本反射の指数が付けられている回折ピークは比較的シャープで半値幅が狭いのに対し、図中に赤字で示すような超格子反射として指数が付けられる回折ピークはブロードである. これは、A2相領域から急冷される過程で B_2 相が導入されたことに起因する. さらに、100, 111などの低角側のピークでは回折強度が温度上昇に伴い低下する成分が含まれていることが分かる. これは磁気反射に相当し、不規則相bcc型Cr-Mnと同様に、bcc結晶格子の体心とコーナーに位置する原子の磁気モーメントが反強磁性的に結合した磁気構造であることが示唆される⁽²³⁾. 100反射ピークの拡大図と積分強度の温度依

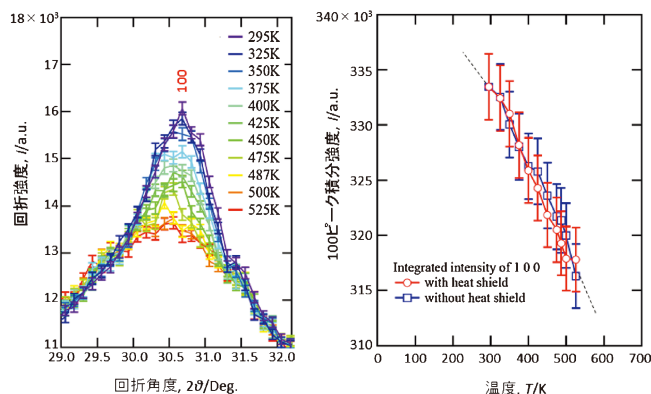
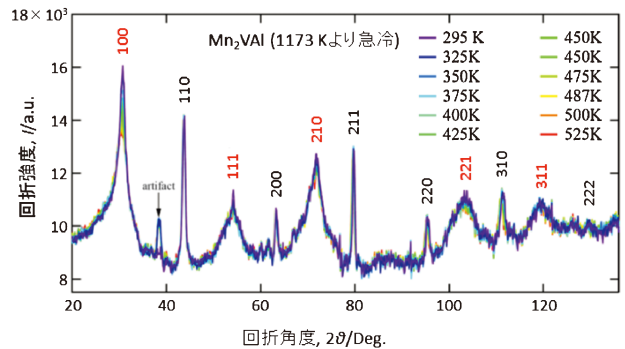


図5 1173 Kより急冷して得た Mn_2VAI 粉末中性子回折パターン(上). 100回折ピーク(左下)とその積分強度の温度依存性(右下). (オンラインカラー)

存性を図5(下)に示す. なお、 $\text{Mn}_2\text{VAI}/\text{Fe}$ 単結晶積層膜について磁気特性が調べられ、交換バイアス効果が報告されている. このことから、 Mn_2VAI の不規則相は反強磁性であるといえる⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾.

(3) Mn_2VAI の電子状態

上述のように、 Mn_2VAI の熱処理温度を変えることで規則度を制御することが可能であることを示した. ここでは、規則度によって電子状態がどのように変わるかを理論計算した結果を示す. 図6に L_{21} , B_2 , A2相を仮定した場合の Mn_2VAI の電子状態密度をKorringa-Kohn-Rostoker(KKR)法にコヒーレントポテンシャル近似(CPA)を導入して得た結果を示す. L_{21} 相に規則化した場合、アップスピンバンドのフェルミ準位近傍にギャップを有するハーフメタル型の電子状態であることが分かる. VとAlが不規則化した B_2 相ではある程度は高いスピン分極率が維持されているが、3種の元素がすべて不規則化したA2相ではギャップは完全に消失している. L_{21} 相と B_2 相の基底状態の磁性はフェリ磁性であるのに対し、A2相では常磁性が最も安定である、という結果であった. これは、A2相が反強磁性であるという前節の実験結果とは異なるが、それは、実験的に得られたA2相が完全に不規則化しているわけではないからであろう. 規則度が磁性に及ぼす実験、および理論計算で得られた結果を表1にまとめる.

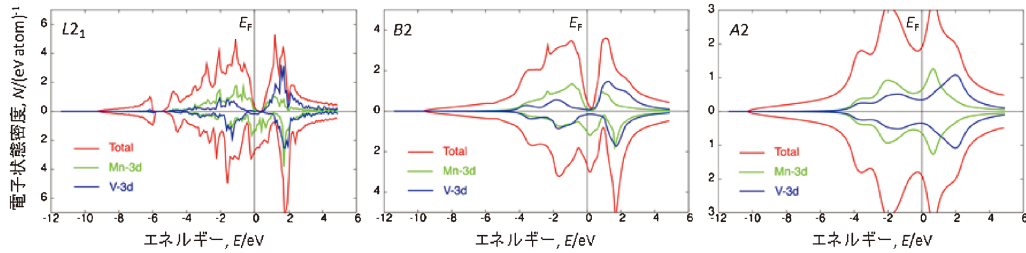


図6 Mn_2VA1 ホイスラー合金の $L2_1$, $B2$, $A2$ 型構造の電子状態密度. (オンラインカラー)

表1 Mn_2VA1 ホイスラー合金の $L2_1$, $B2$, および $A2$ 相の磁気特性と格子定数. 実験による格子定数は, 室温で測定した X 線回折パターンを解析して得た.

	$L2_1$	$B2$	$A2$
理論	フェリ磁性 $a = 0.5722$ nm $M_{tot} = 1.93 \mu_B/f.u.$	フェリ磁性 $a = 0.5733$ nm $M_{tot} = 1.27 \mu_B/f.u.$	常磁性 $a = 0.5705$ nm
実験	$a = 0.5833$ nm $M_{tot} = 1.94 \mu_B/f.u.$	$a = 0.5891$ nm $M_{tot} = 1.76 \mu_B/f.u.$	反強磁性 $a = 0.5890$ nm

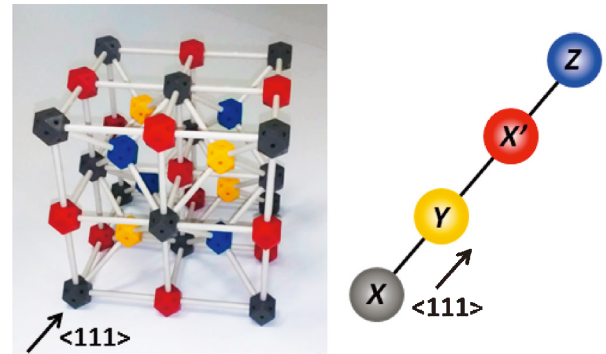


図7 $XX'YZ$ 四元系ホイスラー合金の結晶構造⁽²⁶⁾. 右の $\langle 111 \rangle$ 方向の原子の並びは $LiMgPdSn$ 型構造の場合である. このとき, 各原子の価電子数の大きさは, $X > X' > Y$ の順である. (オンラインカラー)

3. $CoVMnAl$ 四元系ホイスラー合金の規則度と磁気特性

$CoVMnAl$ 合金は, いわば Co_2VA1 と Mn_2VA1 ホイスラー合金の混晶系であると見なすことが出来る. 前々章でも述べたように, 四種の元素から構成される四元系(擬三元系)ホイスラー合金は, スピンギャップ半導体型電子状態や⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾, ハーフメタル型電子状態を有する完全補償型フェリ磁性体⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾などが提案されており, 近年注目されている物質群である. 本合金系においても, 原子配列や規則度の違いは磁気特性や電子状態に影響を及ぼすと考えられることから, 粉末中性子回折測定を行い, 原子配列を決定した.

図7に三種の遷移金属元素と一種の半金属か半導体元素から構成される, 四元系ホイスラー合金の結晶構造を示す. ちなみに, この模型は分子模型キットを購入して筆者が組み立てたものである. 三種の遷移金属元素の価電子数が多い順番に X, X', Y の位置を占める場合がエネルギー的に安定であることが第一原理計算により示唆されており⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾, この場合の結晶構造のプロトタイプは $LiMgPdSn$ である. $CoVMnAl$ 多結晶合金を作製し, 均一化熱処理を施して DSC 測定を行った結果を図8(左)に示す⁽²⁶⁾. 昇降温過程において同じ温度(1268 K)にピークが観測されることと, その温度が Co_2VA1 と Mn_2VA1 の T_c のほぼ中間の値であることから, それが $CoVMnAl$ の T_c と捉え, それよりも高い温度である 1373 K から急冷した試料と $0.6 \times T_c$ に近い 873 K にて熱処理した試料について磁化測定を行った結果を内挿図に示す. 磁場印加に伴いすぐに飽和するような磁化曲線が両者において観測されるが, 磁化の値はどちらも小さく, 前者において $0.04 \mu_B/f.u.$, 後者において $0.15 \mu_B/f.u.$, キュリー温度も図8(右)の熱磁化曲線に示すように(内挿図は磁化の温度

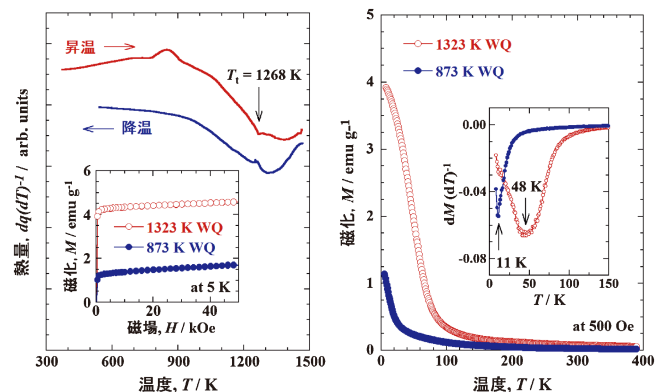


図8 $CoVMnAl$ 合金の DSC 曲線(左)と 5 K における磁化曲線(内挿図), および熱磁化曲線とその温度微分(右)⁽²⁶⁾. (オンラインカラー)

微分), それぞれ 11 K と 48 K であり, T_c より高い温度から急冷した試料の方が, 磁性がやや強い. これらの試料について粉末中性子回折測定を行い, Z-code でリートベルド解析を行った結果を図9に示す⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾. 中性子回折測定は, 大強度陽子加速器施設(J-PARC)の茨城県材料構造解析装置(iMATERIA)を用いて, 飛行時間(T.O.F)法にて室温で行った. $CoVMnAl$ を構成する Co, V, Mn は原子番号が互いに近く, 原子散乱因子の差が小さいことから, X 線回折によって原子配列を決定することは困難である. 一方, 中性子の散乱長はそれぞれ三者三様の値を有することから($Co: 2.49, V: -0.38, Mn: -3.73$)⁽²⁹⁾, 本合金については粉末中性

子回折で厳密に原子配列や規則度を決定することが可能である。リートベルド解析より決定した、原子のサイト占有状態を表2に示す。本実験では、873 Kで熱処理を行った試料は $L2_{1b}$ 型、1373 Kより急冷した試料は $B2$ 型構造から少し配列の乱れた構造($B2$ -like)であった。 $L2_{1b}$ は図1の $L2_1$ 構造と空間群は同じであるが、8cサイトがCoとMnでランダムに占められている。LiMgPdSnではCoとMnがそれぞれ異なるサイトを占有しており、空間群は $L2_1$ や $L2_{1b}$ とは異なる。

図10にCoVMnAl合金のLiMgPdSnと $L2_{1b}$ 構造の場合の第一原理計算により得た電子状態密度を示す⁽²⁶⁾。LiMgPdSn型構造の場合にフェルミ準位近傍で擬ギャップを有するような電子状態であることは以前より報告があったが⁽³⁰⁾⁽³¹⁾、実験で得た試料は $L2_{1b}$ 型構造であり、この場合、

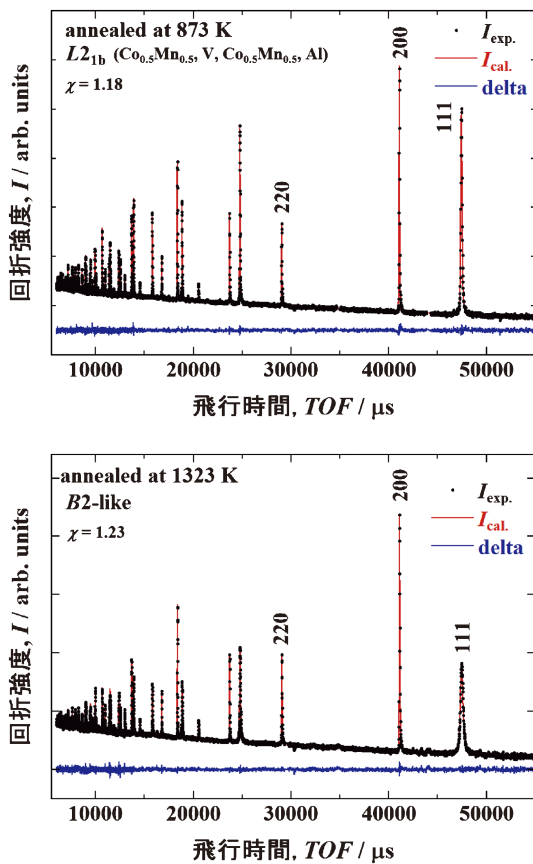


図9 CoVMnAl合金の粉末中性子回折パターン⁽²⁶⁾(上: 873 K熱処理, 下: 1323 K熱処理後急冷)測定は室温で行った。(オンラインカラー)

CoとMnが不規則化することでフェルミ準位近傍の擬ギャップは完全に消失してしまうことが示唆される。LiMgPdSn型の原子配列を実現させようとするのであれば、 T_1 を高くするような他のZ元素でAlを置換したり、電子状態を維持しつつ、化学的な相互作用があまり似通っていない遷移金属元素の組み合わせによるホイスラー合金の設計が必要となる。

4. 第39回猿橋賞を受賞して

非常に光栄なことに、2019年に第39回猿橋賞を受賞した。受賞対象となった研究のタイトルは「ハーフメタルをはじめとするホイスラー型機能性磁気材料の物性研究」である。賞については、まてりあ第58巻9号に、私の母校(奈良女子大学理学部物理学科)で現在教員をされている松岡由貴先生の記事が掲載されているので、そちらを参照して頂きたい⁽³²⁾。また、設立者である猿橋勝子先生や賞に関する

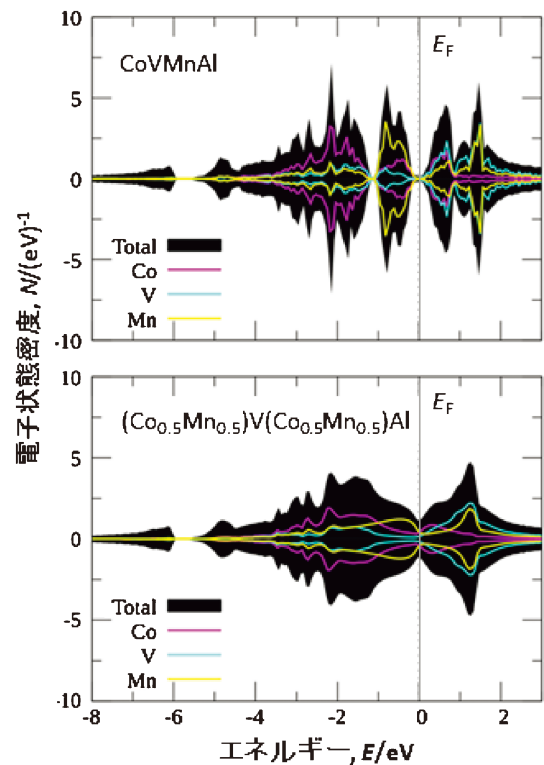


図10 CoVMnAl合金の電子状態密度⁽²⁶⁾(上: LiMgPdSn型構造, 下: $L2_{1b}$ 型構造)。(オンラインカラー)

表2 CoVMnAl合金の粉末中性子回折パターンより決定した原子配置。LiMgPdSn型と $B2$ 型構造の場合の原子配置も合わせて示す⁽²⁶⁾。

	(0, 0, 0)	(1/4, 1/4, 1/4)	(1/2, 1/2, 1/2)	(3/4, 3/4, 3/4)
LiMgPdSn	Co	V	Mn	Al
$L2_{1b}$	0.5Co+0.5Mn	V	0.5Co+0.5Mn	Al
$B2$	0.5Co+0.5Mn	0.5V+0.5Al	0.5Co+0.5Mn	0.5V+0.5Al
$B2$ -like	0.4Co+0.4Mn+0.1V+0.1Al	0.7V+0.1Al+0.1Co+0.1Mn	0.4Co+0.4Mn+0.1V+0.1Al	0.7Al+0.1V+0.1Co+0.1Mn

本もいくつか出版されている⁽³³⁾⁻⁽³⁷⁾.

ハーフメタル型電子状態を有すると示唆される物質群について様々なホイスラー合金を作製し、その基礎物性をかれこれ15年以上も調べている。電子状態を反映するマクロな諸物性から大まかな電子状態を議論することはできても、その特徴を直接的に実証することの重要性を感じ、単結晶の育成に取り組むようになった。JSTのさきがけに2013年~2016年に採用され、何が何でも成果を出さねばならない状況でもあった。幸い、放射光を用いた計測グループとの共同研究にこぎつけ、共鳴非弾性 X 線散乱(RIXS)測定を行い、理論計算とのスペクトル比較により、ハーフメタル型電子状態の特徴を示唆する研究結果を発表することが出来た⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾。初めて RIXS 実験に取り組んだ物質が 2 章で紹介した Mn_2VAl ホイスラー合金であり、育成した単結晶の規則度制御には、上で述べたような基礎研究が必須であった。RIXS に関しては系統的研究が現在も継続しており、近い将来記事にしようと思う。

恥ずかしながら、「猿橋賞」の存在をずっと前から知っていたわけではない。猿橋勝子先生が創設に尽力された「日本女性科学者の会」より奨励賞を2014年に受賞したことで知るようになり、新聞で受賞者が紹介されている記事を見て、こんな大そうな賞なのだ、と意識するようになった。女性限定とはいえ、自然科学全分野において年に1人しか選ばれないのだから、自分には縁の遠い賞であろうと思っていた。年齢制限も段々と近くなり、賞に応募くらいはしてみよう、という気がいつしか湧くようになり、まだ早いかな、来年はしてみようかな、と考えているうちに挑戦するにしても残りあと2回という年齢になったことで、思い切って応募したのである。推薦は学会などの団体推薦や個人推薦、自薦がある中で、私の研究内容を良く理解していらっしゃる、当時の東北大学金属材料研究所長・高梨弘毅教授に依頼をした。その時も、「大きな賞で、(受賞は)なかなか難しいかもしれないけれど、最善を尽くしましょう」とおっしゃって下さった。ですから、受賞を知らせた時は大変喜んで頂き、受賞式にもご出席頂いた。

授賞式は、2019年5月の下旬に東京で行われた。贈呈式と記念講演会、および祝賀会が催され、恩師の深道明先生や助教時代の上司である貝沼亮介先生をはじめ、お世話になった方々や大学の関係者に出席して頂いた。父親、主人、姉も同席してくれた。実は、祝賀会の参加者や挨拶の依頼などは受賞者本人が設定するので、まるで結婚披露宴のような気恥ずかしさであった。祝賀会の最後に、参集した歴代受賞者がその年の受賞者を囲んで記念撮影をするのだが、間違いなく宝物の写真の1枚となった。ハーフメタル型の電子状態を検証するために共同研究を進めてくれた計測グループや理論グループの皆さんも知らせを聞いて大変喜んでくれた。新聞や電子版ニュースで取り上げられたことで、親戚や昔の友人からの声も届き、改めて賞の大きさを実感する日々である。ラジオやテレビ、一般雑誌からの取材など、初めて経験するようなことが続き、貴重な経験とは思いつつも戸惑い

もあった。受賞から1年後に次の受賞者が発表されたときは、正直なところ、胸をなでおろしたものである。

さて、第40回猿橋賞の授賞式が、コロナ渦で延期となってしまったことは非常に残念である。受賞から2年近くが経過したことと、40周年記念本の出版とやらで記事を書いたりして、今までの研究の経過や自分の研究の位置づけ、そして今後のことなど、色々考えるきっかけを持つことが出来た。そのなかで、授賞式のひと月前の記者会見の際に会長や理事の先生方にお会いし、「猿橋賞」のことや猿橋勝子先生の賞設立の意図に関する話があったことを思い起こした。この猿橋賞は、それまでに頑張ったことの、いわゆるご褒美的な賞ではなく、それからさらにもうひと踏ん張りするための区切り、の意味があるとのこと。つまり、これから先、研究者としてどのように進み、研究を展開させていくのか、そして如何に後進を育てていくのか、が問われるとのことである。大そうな宿題を戴いてしまった。

5. おわりに

Mn_2VAl , $CoVMnAl$ 合金について規則度や原子配列の違いが磁性や電子状態に及ぼす影響について調べた研究を紹介した。これらのホイスラー合金は3d遷移金属元素が主要な構成元素であるため、X線回折測定では規則度や原子配列の議論は限界があるにも関わらず、中性子を用いてそれらがきちんと調べられている例は割と少ない。ハーフメタル型電子状態を有する磁性材料は、その特異性からスピントロニクスの分野において注目されているが、バルク結晶体の相安定性や基礎物性に関する研究も同時に進展するべきであると強く感じている。また、ホイスラー合金にはまだまだ多様な組み合わせがあり、機能性材料の宝庫と言える。これらの合金系において物質理解と同時に応用に関連した研究が今後大いに進展することを期待している。

本稿で紹介した研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金、科学技術振興機構「さきがけ」の支援の下に行われたものである。ホイスラー合金の研究のきっかけを与えて下さった深道明名誉教授と石田清仁名誉教授、いつも有意義な議論をして頂いている貝沼亮介教授、鹿又武名誉教授に、この場を借りて御礼申し上げます。なお、 $CoVMnAl$ 合金の粉末中性子回折実験は、茨城大学・石垣徹教授との共同研究により行われました。多大なご協力に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 梅津理恵, 大久保亮成, 貝沼亮介, 石田清仁: あたりあ, **49** (2010), 462-470.
- (2) 梅津理恵, 許 晶, 伊東 航, 鹿又 武, 貝沼亮介: あたりあ, **54**(2015), 98-104.
- (3) R. A. de Groot, F. M. Mueller, P. G. van Engen and K. H. J. Bushow: Phys. Rev. Lett., **50**(1983), 2024-2027.
- (4) J. Kübler, A. R. Williams and C. B. Sommers: Phys. Rev. B, **28** (1983), 1745-1755.

- (5) S. Ishida, S. Akazawa, Y. Kubo and J. Ishida: J. Phys. F, **12** (1982), 1111–1122.
- (6) I. Galanakis, P. H. Dederichs and N. Papanikolaou: Phys. Rev. B, **66** (2002), 174429.
- (7) S. Ishida, S. Asano and J. Ishida: J. Phys. Soc. Jpn., **53** (1984), 2718–2725.
- (8) R. Weht and W. E. Pickett: Phys. Rev. B, **60** (1999), 13006.
- (9) K. Özdogañ, I. Galanakis, E. Şaşıođlu and B. Aktaş: J. Phys.: Condens. Matter, **18** (2006), 2905–2914.
- (10) G. D. Liu, X. F. Dai, H. Y. Liu, J. L. Chen, Y. X. Li, G. Xiao and G. H. Wu: Phys. Rev. B, **77** (2008), 014424.
- (11) V. Alijani, J. Winterlik, G. H. Fecher, S. S. Naghavi and C. Felser: Phys. Rev. B, **83** (2011), 184428.
- (12) K. Özdogañ, E. Şaşıođlu and I. Galanakis: J. Appl. Phys., **113** (2013), 193903.
- (13) Y. C. Gao and X. Gao: AIP Advances, **5** (2015), 057157.
- (14) X. Dai, G. Liu, G. H. Fecher, C. Felser, Y. Li and H. Liu, J. Appl. Phys., **105** (2009), 07E901.
- (15) V. Alijani, J. Winterlik, G. H. Fecher, S. S. Naghavi and C. Felser: Phys. Rev. B, **83** (2011), 184428.
- (16) M. W. Mohamedi, A. Chahed, A. Amar, H. Rozale, A. Lakdja, O. Benhelal and A. Sayede: Eur. Phys. J. B, **89** (2016), 267.
- (17) R. Stinshoff, A. K. Nayak, G. H. Fecher and B. Balke: Phys. Rev. B, **95** (2017), 060410(R).
- (18) R. Stinshoff, G. H. Fecher, S. Chadov, A. K. Nayak, B. Balke, S. Ouardi, T. Nakamura and C. Felser: AIP ADVANCES, **7** (2017), 105009.
- (19) P. V. Midhunlal, J. A. Chelvane, D. Prabhu, R. Gopalan and N.H. Kumar, J. Magn. Magn. Mater., **489** (2019), 165298.
- (20) R. Y. Umetsu, A. Okubo, M. Nagasako, M. Otsuka, R. Kainuma and K. Ishida: SPIN, Special issue on Heusler–Alloy Films and Devices, ed. by C. Felser and A. Hirohata, **4** (2014), 1440018.
- (21) H. Ishikawa, R. Y. Umetsu, K. Kobayashi, A. Fujita, R. Kainuma and K. Ishida: Acta Mater., **56** (2008), 4789–4797
- (22) R. Y. Umetsu, H. Ishikawa, K. Kobayashi, A. Fujita, K. Ishida and R. Kainuma: Scr. Mater., **65** (2011), 41–44.
- (23) Y. Hamaguchi and N. Kunitomi: J. Phys. Soc. Jpn., **19** (1964), 1849–1856.
- (24) T. Tsuchiya, R. Kobayashi, T. Kubota, K. Saito, K. Ono, T. Ohhara, A. Nakao and K. Takanashi: J. Phys. D: Appl. Phys., **51** (2018), 065001.
- (25) 土屋朋生: 博士学位論文 (2018), 東北大学.
- (26) R. Y. Umetsu, K. Saito, K. Ono, T. Fukushima, F. Kuroda, T. Oguchi and T. Ishigaki, J. Alloys Compd., **855** (2021), 157389.
- (27) R. Oishi, M. Yonemura, Y. Nishimaki, S. Torii, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, T. Morishima, K. Mori and T. Kamiyama: Nucl. Instrum. Methods A, **600** (2009), 94e96.
- (28) R. O-Tomiyasu, M. Yonemura, T. Morishima, A. Hoshikawa, S. Torii, T. Ishigaki and T. Kamiyama: J. Appl. Crystallogr., **45** (2012), 299e308.
- (29) <https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/>
- (30) L. Basit, G. H. Fecher, S. Chadov, B. Balke and C. Felser: Eur. J. Inorg. Chem., **2011** (2011), 3950–3954.
- (31) L. Y. Wang, X. F. Dai, X. T. Wang, Y. T. Cui, E. K. Liu, W. H. Wang, G. H. Wu and G. D. Liu: Mater. Res. Express, **2** (2015), 106101.
- (32) 松岡由貴: まてりあ, **58** (2019), 524.
- (33) 女性科学者に明るい未来をの会 編: 女性科学者に一条の光を—猿橋賞30年の軌跡, ドメス出版, (2010).
- (34) 女性科学者に明るい未来をの会 (古在由秀, 川島誠一郎, 富永健, 久留都茂子, 猿橋勝子 編: 「My Life」 Twenty Japanese Women Scientists, 内田老鶴圃, (2001).
- (35) 湯浅 明, 猿橋勝子 編: 女性科学者21世紀へのメッセージ, ドメス出版, (1996).
- (36) 米沢富美子: 岩波科学ライブラリー157 猿橋勝子という生き方, 岩波書店, (2009).
- (37) 女性科学者に明るい未来をの会 編: 私の科学者ライフ—猿橋賞受賞者からのメッセージ—, 日本評論社, (2021).
- (38) 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: Phys. Rev. B, **97** (2018), 035143.
- (39) 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: Phys. Rev. B, **99** (2019), 134414.

★★

梅津理恵

2000年 東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻博士課程後期3年の課程修了 日本学術振興会特別研究員(PD), CREST 研究員等を経て

2007年 東北大学多元物質科学研究所 助教, 金属材料研究所 助教

2013年 東北大学金属材料研究所 特任准教授, 准教授

2020年 東北大学金属材料研究所 教授: 現職

専門分野: 磁性材料, 金属物性

◎ハーフメタル型電子状態を有するホイスラー合金, メタ磁性形状記憶合金, 垂直磁化膜用強磁性材料, およびスピントロニクス向け Mn 基反強磁性材料などの磁気物性に関する研究に従事.

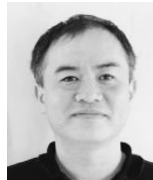
★★



梅津理恵



齊藤耕太郎



小野寛太



佐藤和則



福島鉄也



黒田文彬



小口多美夫