

## 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 11日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340105

研究課題名（和文） 強相関電子系における多自由度の競合とマルチクリティカルティ

研究課題名（英文） Competition of multi-degrees of freedom and multicriticality in strongly correlated electron systems.

研究代表者

勝藤 拓郎（KATSUFUJI TAKURO）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00272386

研究成果の概要（和文）：

複数の秩序状態が競合して多重臨界点をつくる物質として、 $Ba_{1-x}Sr_xV_{13}O_{18}$ 、 $La_5Mo_4O_{16}$  を新たに見出し、その多重臨界点付近において、特徴的な物性を見いだした。さらに、 $MnV_2O_4$  の磁場下熱伝導度測定の結果から、転移点付近でスピン揺らぎと軌道揺らぎがともに臨界的に増大している振舞いを明らかにした。また、ペロブスカイト型マンガン酸化物における電子相分離について、ローレンツ顕微鏡法を含めた電子線回折実験によって明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We discovered new systems in which two different ordered states are competing and those produce a multicritical point:  $Ba_{1-x}Sr_xV_{13}O_{18}$  and  $La_5Mo_4O_{16}$ , and we found characteristic physical properties produced by the multicriticality in these systems. Furthermore, we clarified the critical enhancement of both spin and orbital fluctuation in  $MnV_2O_4$  by means of thermal conductivity measurement with applied magnetic field. We also clarified the electronic phase separation in perovskite manganites by means of electron diffraction measurement including the Lorentz electron microscope technique.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：量子臨界点、スピン、軌道

## 1. 研究開始当初の背景

量子臨界点における新しい物理が注目を集めていた。例えば、銅酸化物系超伝導、鉄砒素系超伝導は、いずれも反強磁性あるいはスピン密度波状態が臨界点で消失した点で生じると考えられていた。この2系以外にも、ヘビーフェルミオン物質において、反強磁性

あるいは強磁性の消失する量子臨界点において超伝導が生じる例が数多く知られており、これらはいずれも、量子臨界点に特徴的な揺らぎが重要な役割を果たしていると考えられ、エキゾチックな超伝導状態を形成することが知られていた。

上記で挙げた例はいずれもスピン自由度の秩序の量子臨界点で興味深い現象が起こ

る例である。こうした単一の秩序変数の量子臨界点の物理に関しては、実験的にも理論的にも多くのことが理解されつつあった。しかし、複数の自由度が同時に臨界点になる、あるいは複数の秩序状態の臨界点が競合する、いわゆるマルチクリティシティに関しては、単一の臨界点とは異なった物性が期待されるものの、あまり研究がなされていなかった。

我々は研究開発当初、スピン自由度だけではなく、軌道自由度他の自由度が競合している物質を数多く開発・研究していた。そうした物質においては、スピン整列と軌道整列のマルチクリティシティや、異なる整列状態の間のマルチクリティシティなどが期待される状況にあった。

## 2. 研究の目的

マルチクリティシティの研究を行うためには、まずこのような現象を示す物質群を開発する必要がある。さらに、多重臨界に由来する新奇な現象に関しては、その測定手法も含めて開発する必要もある。特に、軌道整列に関しては、整列状態の観測方法は知られていたが、揺らぎや臨界現象の観測方法は確立されていなかった。

本研究では、物質群の開発と新奇な現象の探索の双方を行い、多重臨界点付近の新奇な現象の発見とその物理の解明を目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) マルチクリティシティを示す物質群の開発

軌道整列とスピン整列のマルチクリティシティ、軌道自由度に由来する異なる基底状態間のマルチクリティシティについて、特に3重縮退した $t_{2g}$ 軌道に3d電子がある遷移金属酸化物について探索を行った。我々によるそれまでの研究により、 $t_{2g}$ 軌道系は、三角格子において軌道整列を起しやすいたことが明らかになってきたため、Ti系、V系の擬三角格子系を中心に探索を行った。

さらに、複数の磁氣的相互作用により異なるスピン秩序状態が競合している系において、多重臨界が起こる系の探索を行った。特に、2次元スピン系で、面間方向の磁氣的相互作用が弱くかつ競合している場合は、弱い磁場で面間方向の秩序状態を変化させられる等、競合の状態を磁場で制御できることが予想される。このような観点からの物質探索を行なった。

### (2) マルチクリティシティに由来する新奇な物性の発見

マクロ測定として、電気抵抗測定、磁化測

定、熱伝導度、熱起電力の測定を行った。いずれも、磁場を印加することによって臨界点を制御しながらの測定を行った。特に、熱伝導度測定については、軌道揺らぎを反映した物理量であることが明らかになったため、磁場依存性も含めて臨界点付近での精密な測定を行い、理論計算との比較を行った。

また、電子線回折実験においては、ローレンツ電子顕微鏡法、電子線小角散乱法の測定法を用いて、マルチクリティシティ近傍における磁区構造、相分離状態の観測を行った。

## 4. 研究成果

- (1)  $Ba_{1-x}Sr_xV_{13}O_{18}$  における異なる軌道整列状態の競合とマルチクリティシティ [M. Ikeda and T. Katsufuji *et al.*, Phys. Rev. B 83, 134417 (2011); M. Ikeda and T. Katsufuji *et al.*, Phys. Rev. B 82, 104415 (2010)]

$AV_{13}O_{18}$ (A=Ba,Sr)は(hexagonal setting の基本単位格子ベクトルで定義された)  $ab$  面の1層だけを取り出すと、13個のVで形成された「星」構造が周期的にならんだ格子となるが、この格子は三角格子から周期的に三角形を取り除いたものと見ることができる(図1)。この擬三角格子がc軸方向に積まれることによって、結晶全体ではVは擬面心立方格子を形成する。Vの平均価数は+2.8/13であり、形式的には13個のVのうち8個が $3+$  ( $3d^3$ )で残りの5個のVが $2+$  ( $3d^2$ )となる。

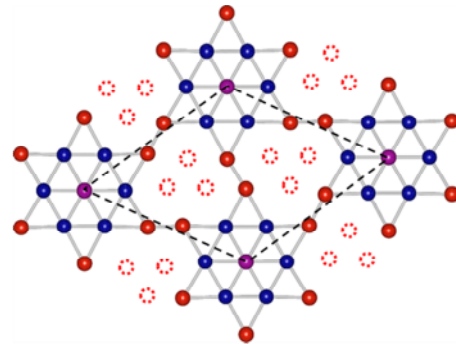


図1  $AV_{10}O_{18}$ の $ab$ 面上のVの配列

我々はこの物質の純良な多結晶試料を合成した結果、A=BaとSrで異なる基底状態を取ることを見いだした。x線構造解析の結果、Ba, Srいずれの場合も、高温相では短いV-Vをつなぐと、正三角形が辺でつながった菱形が3層にわたったV四量体を形成することが分かった。この高温相では13個のVが3つの四量体と1つの孤立Vイオンに分かれる。Srの場合は、270Kで電気抵抗率と帯磁率が減少し、そこで四量体の一部が壊れて三量体に変化する相転移を起こすことを見いだし

た。一方 Ba の場合は、200 K で電気抵抗が増大し、帯磁率が一旦減少して、それより低温で増大する。このとき、電子線回折実験で 200K 以下で  $q=(0,1/2,1/2)$  に超格子構造が現れることを見いだした。以上の結果から、 $\text{SrV}_{13}\text{O}_{18}$  では低温で  $V t_{2g}$  軌道の軌道整列に由来する三量体形成が、また  $\text{BaV}_{13}\text{O}_{18}$  では (おそらく孤立 V) 電荷整列が起こっていると結論づけた。

さらに  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{V}_{13}\text{O}_{18}$  の試料を作製して、2つの低温相がどのような競合を示すかを調べた。その結果、図 2 に示すような相図が得られた。特に相境界付近では、電気抵抗、帯磁率、ゼーベック係数の温度依存性において 2 段階転移に伴う明確な 2 つの異常を観測することができた。

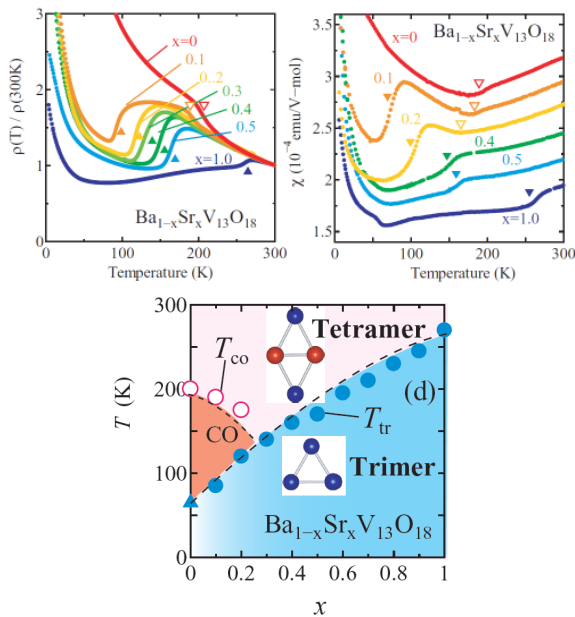


図 2 (左上)  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{V}_{13}\text{O}_{18}$  の電気抵抗率の温度依存性 (右上) 同、帯磁率の温度依存性 (下) 同、電子相図

以上の結果は、 $t_{2g}$  系において 2 つの異なる相の競合が明確に現れる稀有な例であり、今後単結晶試料等を用いたより詳細な研究が必要である。

- (2)  $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$  の面間強磁性-反強磁性の競合とマルチクリティカリティ [K. Kobayashi and T. Katsufuji, Phys. Rev. B 83, 100411(R) (2011)]

$\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$  では、 $\text{Mo}^{4+}(4d^2, S=1)$  と  $\text{Mo}^{5+}(4d^1, S=1/2)$  が正方格子面上をチェッカーボードに配列している。正方格子は層状に積み重なっているが、層間は非磁性の Mo イオンのみ存在するため、面内では磁氣的相互作用が強く、面間では磁氣的相互作用の弱い 2 次元磁性体

である。我々はこの物質、および Mo の一部を Co で置換した物質の単結晶を熔融塩電解法によって作製し、その物性を調べた。

磁化測定の結果、母物質では、190K でスピンの正方格子面上でフェリ磁性に整列し、面内で発生したフェリ磁性のモーメントが面間では反強磁性的に整列すること、さらに温度を下げると 70K で面間方向が強磁性配列に相転移することを見いだした。また、反強磁性相で磁場を印加すると 0.5T 程度で強磁性配列に転移することも見出した (図 3)。

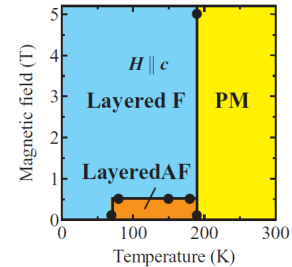


図 3  $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$  の温度-磁場相図

さらに面間方向の電気抵抗率の温度依存性は絶縁体的であった。電気抵抗率の磁場依存性の測定の結果、図 4 に示すような特徴的な磁気抵抗を見いだした。これは、反強磁性相では磁場印加によって強磁性配列になる際に電気抵抗が減少し、強磁性相では磁場印加によって磁化方向が反転する際にドメイン構造ができるため電気抵抗が上昇するというモデルで理解できる。

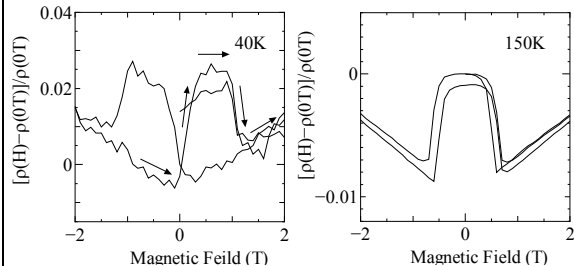


図 4  $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$  の磁気抵抗 (左) 強磁性相 (右) 反強磁性相

また、この Mo の一部を Co に置換すると、フェリ強磁性転移温度が Co 量とともに減少するが、強磁性転移温度はほとんど変化しないことを見出した。さらに、反強磁性相において、磁場を印加して強磁性転移を起こしてからゼロ磁場に戻すと、電気抵抗が数 100 秒程度で緩和現象する現象を見いだした。これは、強磁性秩序と反強磁性秩序が競合していて、磁化が有限の状態から基底状態磁化ゼロの状態へ戻る際に、様々な磁化ゼロ状態を経由して最終的な基底状態へ落ち着くことに由来すると解釈される。また、それが数 100 秒という長い緩和時間を持つのは、系の 2 次元性により、面間の「巨大な」フェリ磁性のモーメントが面間方向には非常に弱くしか結合していないためであると考えられる。

このような現象は、強磁性と反強磁性のマルチクリティカルポイントでの新奇な現象

であり、Co 濃度依存性も含めたより詳細な研究が進行中である。

(3)  $\text{Mn}(\text{V}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4$  の軌道/スピン整列とマルチクリティシティ [T. Omura and T. Katsufuji *et al.*, submitted]

$\text{MnV}_2\text{O}_4$  は 57K で V 3d 軌道の軌道整列、および V スピンと Mn スピンのフェリ磁性相転移が同時に起こる。一方、V サイトを Al で置換するとスピン整列はそのまま軌道整列のみが消失することが知られている。

このように軌道とスピンが同時に整列する場合、スピンの揺らぎによる critical な振舞いに関しては磁化率等から情報が得られるが、軌道の揺らぎとその critical な振舞いに関しては、それを測定する実験手法が知られていなかった。

我々は、熱伝導測定が軌道の揺らぎを反映する物理量であることに注目し、 $\text{Mn}(\text{V}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4$  の熱伝導測定を磁場下で行なった。その結果、軌道整列転移温度より上で転移温度に向かって熱抵抗率が上昇し、転移温度以下で減少することを見いだした(図5)。さらに転移温度より高温側では磁場とともに熱抵抗が上昇する、すなわち正の磁気熱抵抗が起こるが、転移温度以下では負の磁気熱抵抗に変わることを見いだした。またこの結果が、スピンと軌道が双二次で結合したランダウモデルを考慮することにより、軌道感受率が温度や磁場によって軌道整列の臨界点に向かって増大するというモデルで記述できることを明らかにした。以上の研究から、スピン揺らぎと軌道揺らぎの臨界点付近での振舞いが、実験的・理論的に明らかになった。

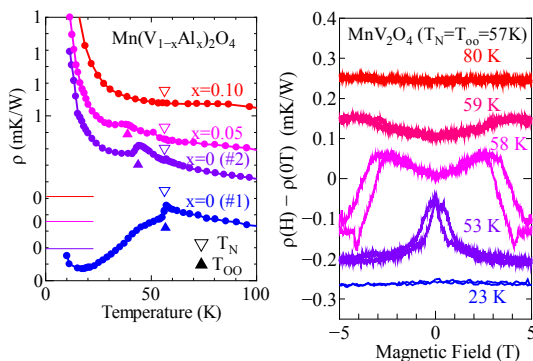


図5 (左)  $\text{Mn}(\text{V}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4$  のゼロ磁場下での熱抵抗率 (右)  $\text{MnV}_2\text{O}_4$  の磁場下での熱抵抗率の変化

(4) ペロブスカイト型マンガン酸化物における多自由度の競合と相分離現象[Y. Murakami, and S. Mori *et al.* Nature Nanotechnology 5, 37

(2010); Y. Horibe and S. Mori *et al.*, submitted.]

強磁性金属である  $\text{La}_{5/8}\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  の La サイトの一部を Pr で置換した  $(\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x)\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  では、強磁性金属状態と電荷・軌道秩序構造から成る反強磁性絶縁体状態が共存する電子相分離状態 (electronic phase separation) が形成される。本研究では、本物質における電子相分離状態での微細構造を明らかにするために、超格子反射を用いた暗視野像を得ることにより、電荷・軌道秩序構造に関する微細構造を、また、ローレンツ電子顕微鏡法を用いることにより、強磁性金属状態での磁気的微細構造の観察を行った。図6は  $(\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x)\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ ) の 20K で得られた暗視野像(a)およびローレンツ像(フレネル像)(b)である。暗視野像中には、電荷・軌道秩序構造による分域構造が明るいコントラストとして観察され、数十ミクロンサイズで電荷・軌道秩序構造が存在していることがわかる。一方、図6(b)で示すローレンツ像においては、強磁性磁区境界による明暗のコントラストが対になって観察され、強磁性状態が、電荷・軌道秩序構造と同じく数十ミクロンのサイズで存在していることがわかった。また、図6(a)と6(b)を比較することにより、電荷・軌道秩序構造と強磁性状態は、相異なる領域にそれぞれ数十ミクロンのサイズで共存していることが明らかとなった。(相分離状態)

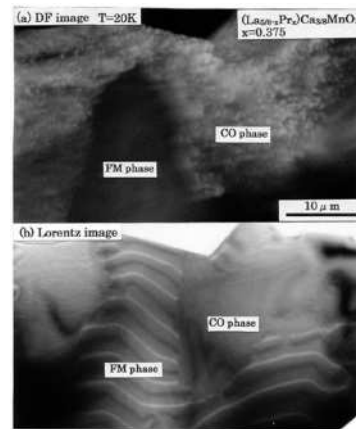


図6  $\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ ) の相分離状態の微細構造 (a)超格子反射を用いて撮影した暗視野像 (b)ローレンツ TEM 像(フレネル像)

そこで、相分離状態での強磁性金属状態の磁区構造の温度変化についてローレンツ顕微鏡法を用いて調べた。図7(a)に、単結晶試料  $(\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x)\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ ) の 17K で得られた強磁性金属状態の領域でのフレネル像を示す。図7(a)中には大きくわけて2種類の磁区構造が存在している。ひとつは、図7(a)において領域 (α) に存在する約  $10\mu\text{m}$  程度の大きさからなる板状の磁区構造である。もう

ひとつは、領域( $\beta$ )に存在する 100nm 程度の大きさからなるストライプ状の磁区構造である。そこで、相分離状態での強磁性金属状態の磁区構造の温度変化を調べた。図 7(a)の状態から温度を上昇させると、図 7(b)で矢印(A)および(B)で示すように、磁壁の移動が観察され、転移温度以上の 147K では巨視的な磁区構造は消失する。一方、147K で得られたフレネル像(図 7(c))では、ナノスケールでの磁気的コントラストが観察された。さらに温度を上昇させると、このナノスケールでの磁気的コントラストは消失した(図 7(d))。

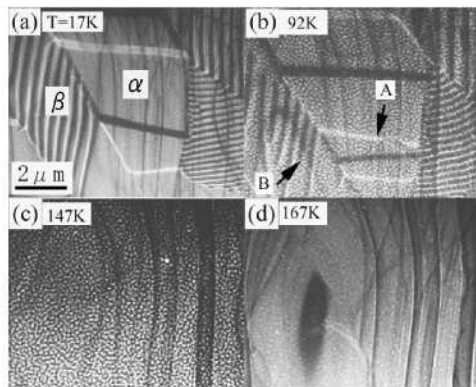


図 7  $\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ )の磁区構造の温度変化。(a)17K (b) 92K (c) 147K (d) 167K

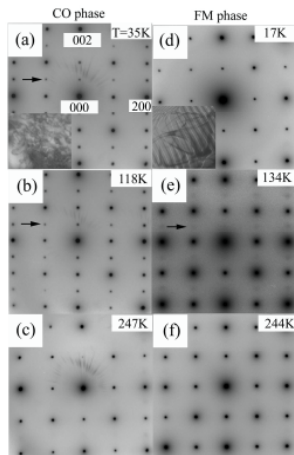


図 8  $\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ )の相分離状態での電子回折パターンの温度変化。(a)-(c) 電荷・軌道秩序構造の領域からの電子系節パターンの温度変化(a) 35K (b) 118K (c) 247K (d)-(f) 強磁性金属状態の領域からの電子回折パターンの温度変化(d) 17K (e) 134K (f) 244K

次に、電荷・軌道秩序状態と強磁性金属状態の相分離状態における詳細を明らかにするために、電荷・軌道秩序状態および強磁性

金属状態における電子回折パターンの温度変化を調べた。図 8 に、電荷・軌道秩序状態と強磁性金属状態における電子回折パターンの温度変化を示す。まず、図 6 に示すように電荷・軌道秩序構造と強磁性金属状態が、相異なる領域にそれぞれ数十ミクロンのサイズで共存している状態での電子回折パターンを図 8(a)と 8(d)に示す。電荷・軌道秩序状態では  $1/2\ 0\ 0$  位置に超格子反射が観察されるが、一方強磁性金属状態の領域では超格子反射は観察されなかった。このことから、 $(\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x)\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$  ( $x=0.375$ )の基底状態は巨視的に電荷・軌道秩序構造と強磁性金属状態が相分離した状態であることがわかる。そこで、電荷・軌道秩序構造と強磁性金属状態を示す各領域での電子回折パターンの温度変化を調べた。まず、電荷・軌道秩序構造を形成している領域では、電荷・軌道秩序転移温度まで  $1/2\ 0\ 0$  位置に超格子反射が観察される一方で、強磁性金属状態からの電子回折パターンでは、ナノスケールの磁区構造が観察される中間温度領域で  $1/2\ 0\ 0$  位置に超格子反射が散漫散乱として観察されることが見出された。このことは、短秩序をもった電荷・軌道秩序構造とナノスケールの磁区構造が共存していることを示している。

## 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 17 件)

以下すべて査読あり

- ① T. Kanzaki, R. Kubota, and T. Katsufuji, “Change of phonon Raman spectra with V trimerization in  $\text{BaV}_{10}\text{O}_{15}$ ”, Phys. Rev. B 85, 144410 (2012).
- ② M. Hoshino, T. Kajita, T. Kanzaki, M. Uchida, Y. Tokura, and T. Katsufuji, “Charge-gap formation in the insulating states of  $\text{AV}_{10}\text{O}_{15}$  ( $A = \text{Ba}, \text{Sr}$ )”, Phys. Rev. B 85, 085106 (2012).
- ③ T. Koyama, K. Takayanagi, Y. Togawa, S. Mori and K. Harada, “Small angle electron diffraction and deflection”, AIP advances 2, 012195 (2012).
- ④ A. Nogami, K. Takubo, T. Kajita, M. Hoshino, and T. Katsufuji, “Dynamics of photoinduced phenomena in  $\text{AV}_{10}\text{O}_{15}$  ( $A = \text{Ba}, \text{Sr}$ )”, Phys. Rev. B 84, 214442 (2011).
- ⑤ K. Takubo, R. Kubota, T. Suzuki, T. Kanzaki, S. Miyahara, N. Furukawa, and T. Katsufuji, “Evolution of phonon Raman spectra with orbital ordering in spinel  $\text{MnV}_2\text{O}_4$ ”, Phys. Rev. B 84, 094406 (2011).
- ⑥ Y. Shimizu, K. Matsudaira, M. Itoh, T. Kajita

- and T. Katsufuji, “Spin-singlet trimer state induced by competing orbital order in triangular-lattice  $\text{BaV}_{10}\text{O}_{15}$ ”, *Phys. Rev. B* 84, 064421 (2011).
- ⑦ T. Asaka, S. Mori, Y. Horibe, K. Takenaka, X. Z. Yu, T. Nagai, K. Kimoto, T. Hirayama, and Y. Matsui, “Multiple-charge modulations in the ferromagnetic insulating state of lightly doped  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ”, *Phys. Rev. B* 83, 174401 (2011).
- ⑧ M. Ikeda, T. Okuda, K. Kato, M. Takata, and T. Katsufuji, “Competition between vanadium tetramerization and trimerization in  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{V}_{13}\text{O}_{18}$ ”, *Phys. Rev. B* 83, 134417 (2011).
- ⑨ K. Kobayashi and T. Katsufuji, “High-temperature interlayer magnetoresistance in  $\text{La}_5\text{Mo}_4\text{O}_{16}$ ”, *Phys. Rev. B* 83, 100411(R) (2011).
- ⑩ Kim Myung-Whun, J. S. Kim, T. Katsufuji, and R. K. Kremer, “Magnetic susceptibility and specific heat of a spinel  $\text{MnV}_2\text{O}_4$  single crystal”, *Phys. Rev. B* 83, 024403 (2011).
- ⑪ M. Ikeda, Y. Nagamine, S. Mori, J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, and T. Katsufuji, “Phase transitions and the role of vanadium  $t_{2g}$  states in  $\text{AV}_{13}\text{O}_{18}$  ( $A=\text{Sr},\text{Ba}$ )”, *Phys. Rev. B* 82, 104415 (2010).
- ⑫ K. Takubo, M. Shimuta, J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, and T. Katsufuji, “Crossover behavior of the crystal structure and the relation to magnetism in perovskite  $\text{RTiO}_3$ ”, *Phys. Rev. B* 82, 020401(R) (2010).
- ⑬ J. Miyazaki, K. Matsudaira, Y. Shimizu, M. Itoh, Y. Nagamine, S. Mori, J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, and T. Katsufuji, “Formation of a Three-Dimensional Network of V Trimers in  $\text{A}_2\text{V}_{13}\text{O}_{22}$  ( $A=\text{Ba},\text{Sr}$ )”, *Phys. Rev. Lett.* 104, 207201 (2010).
- ⑭ T. Kajita, T. Kanzaki, T. Suzuki, J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, and T. Katsufuji, “Opening of a charge gap with V trimerization in  $\text{BaV}_{10}\text{O}_{15}$ ”, *Phys. Rev. B* 81, 060405(R) (2010).
- ⑮ V. V. Shvartsman, P. Borisov, W. Kleemann, S. Kamba, and T. Katsufuji, “Large off-diagonal magnetoelectric coupling in the quantum paraelectric antiferromagnet  $\text{EuTiO}_3$ ”, *Phys. Rev. B* 81, 064426 (2010).
- ⑯ K. Yoshidome, Y. Nagamine, Y. Togawa, K. Yoshii and K. Takenaka, “Lorentz TEM observation of magnetic domains in  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}(\text{Mn},\text{Al})\text{O}_3$ ”, S. Mori, *J. Appl. Phys.*, 107, 09D306 (2010).
- ⑰ Y. Murakami, H. Kasai, J. J. Kim, S. Mamishin, D. Shindo, S. Mori and A. Tonomura, “Direct observation of

ferromagnetic-domain network leading to colossal magnetoresistance”, *Nature Nanotechnology* Vol. 5, 37-41 (2010).

[学会発表] (計 5 件)

- ① T. Katsufuji “Thermal conductivity of spinel  $\text{MnV}_2\text{O}_4$  with doping”, APS March Meeting, 2012.3.2, Boston.
- ② T. Katsufuji “Coupling Between Spin and Orbital Degrees of Freedom in Various Vanadates” (invited), International Conference of AUMS, 2010.12.8, Jeju Island.
- ③ T. Katsufuji “Trimerization with orbital ordering in various vanadates”, Highly Frustrated Magnetism 2010, 2010.8.6, Baltimore.
- ④ T. Katsufuji “Ferroelectrics with Magnetic Ions” (invited), RCBJSF-10, 2010.6.22, Yokohama.
- ⑤ T. Katsufuji “Trimerization with orbital ordering in novel vanadates” (invited), The 2nd APCTP Workshop on Multiferroics, 2010.1.12, Taipei.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

勝藤 拓郎 (KATSUFUJI TAKURO)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号：00272386

### (2) 研究分担者

森 茂生 (MORI SHIGEO)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20251613