

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540373

研究課題名(和文) 一次元三角格子系の電荷・軌道自由度の制御と新奇量子臨界相の創製と異常物性の開拓

研究課題名(英文) Control of spin/orbital degrees of freedom and study of critical behavior in 1-dimensional triangle lattice system

研究代表者

宮坂 茂樹 (Miyasaka, Shigeki)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70345106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：幾何学的フラストレーション系CaV₂O₄におけるスピン・軌道秩序の臨界現象を研究した。CaV₂O₄はモット絶縁体で、110K付近で軌道秩序を生じ、その結果スピンフラストレーションが解消され、50K付近で長距離反強磁性を生じる。Vサイトにd電子が一つ多いCrを置換し電子ドーピングを行う事で、軌道秩序が消失し、同時にスピンフラストレーションが回復し長距離反強磁性秩序は消失した。このように、競合する軌道秩序とスピンフラストレーションの制御に成功した。また、スピン・軌道秩序の融解に伴い金属-絶縁体転移が生じ、その臨界点では強いスピン・軌道ゆらぎに起因した非フェルミ液体的な振る舞いが観測された。

研究成果の概要(英文)：Critical behaviors of spin/orbital order have been investigated in geometrically frustrated system CaV₂O₄. CaV₂O₄ is a Mott insulator, and undergoes orbital order transition around 110 K with decreasing temperature. As a result, spin frustration is suppressed, and CaV₂O₄ shows antiferromagnetic long-range order below 50 K. The substitution of Cr with 3d³ electronic configuration for V with 3d² causes the electron doping in this system. The Cr doping induces the disappearance of orbital order, resultantly recovers the spin frustration, and suppresses the long-range magnetic order. In the Cr-doped CaV₂O₄, we have succeeded in the control of orbital order and spin frustration, which are competing. In addition, the Cr doping induces the metal-insulator transition (Mott transition) as well as spin/orbital order-disorder. At the critical point of spin/orbital order near Mott transition, the non-Fermi liquid behavior by strong spin/orbital fluctuation has been observed.

研究分野：物性物理

キーワード：軌道秩序 スピンフラストレーション 金属-絶縁体転移 量子臨界点

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系では、電子間に働く強いクーロン斥力により、電子が自由に遍歴することが出来ず、電子が局在することでモット絶縁体状態となる。このモット絶縁体状態では、電子が持つスピン、電荷、軌道といった特性が顕わになった秩序状態、例えば磁気秩序、電荷秩序、軌道秩序が出現する。このような電子秩序相は、キャリア量などの物質パラメータの制御により融解し、このモット絶縁体-金属転移近傍の臨界領域では、超伝導や重い電子状態などの異常な物性が出現することが知られている。異常物性が出現する臨界領域の一つの典型例として、磁気転移温度がゼロケルビンに達した磁氣的量子臨界点が挙げられる。この電子秩序相近傍での臨界領域は、物性物理学における新奇な物理現象を探索する上での、一つのフロンティアとなっている。

この電子秩序相の臨界領域での異常物性は、臨界領域特有の電荷・スピン・軌道の大きなゆらぎがその発生要因となっている。電子の多自由度のうち、スピンのゆらぎが本質的に大きい系としては、幾何学的フラストレーションを内包する系がある。過去の研究によりスピンフラストレーション系の多くは、フラストレーションを解消するために軌道あるいは電荷秩序を生じることが判明している。軌道、電荷整列により隣接サイト間の磁気相互作用に差が生じ、長距離磁気秩序が生じる。これらの系では電子の持つ電荷や軌道の自由度がスピンフラストレーションと競合していると考えられることもできる。このような軌道自由度を内包したスピンフラストレーション系の臨界領域では、スピンと軌道のゆらぎが複合的に関与した新しい量子臨界現象が出現することが期待されている。

2. 研究の目的

本研究課題では幾何学的なフラストレーションを内包している系、具体的には遷移金属元素が三角格子を組み、三角格子が一次元鎖を形成する CaFe_2O_4 、 CaMn_2O_4 型構造を取る物質系を取り上げた。これらの物質は遷移金属元素と酸素による八面体が稜共有し、三角格子鎖(ジグザク鎖)を形成している。例として、 CaV_2O_4 の結晶構造を図1、図2に示す。これらの一次元鎖は頂点共有などにより3次元的なネットワークを作り、S字または8の字型の空間をCa元素が占めている。この幾何学的なフラストレーションを内包し、電荷・軌道のゆらぎが本質的に大きな一次元系を対象として、キャリアドーピングにより電荷・軌道自由度の制御を行った。そして、新奇な電荷・軌道整列現象、またキャリア注入による電荷・軌道秩序の融解とスピンフラストレーションの復活により生じる非フェルミ液体、エキゾチック超伝導などの、電子

の多自由度のゆらぎに起因した新規物性の開拓を目指した。

三角格子が一次元鎖を形成し、電荷・軌道整列現象やその融解現象が研究されている系としてはホランダイト型酸化物が挙げられる。しかし、電荷・軌道整列の観点から系統的な研究が行われている系はこれ以外には少ない。また、本研究の対象物質群の類似構造を取る物質は非常に多いが、未開拓な物質がほとんどである。そこで、本課題では一次元三角格子系における新しい物質系として CaFe_2O_4 類似物質系を提案し、電荷・軌道秩序、秩序融解に伴う臨界異常を研究した。

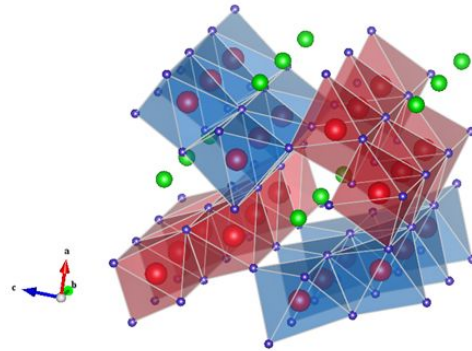


図1: CaV_2O_4 の結晶構造。赤丸はV、青丸はO、緑丸はCaを表している。

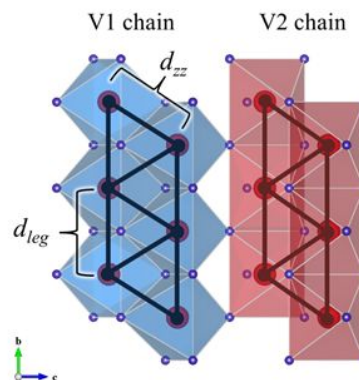


図2: CaV_2O_4 の結晶構造をa軸方向から見たときの、2つのV三角格子鎖(ジグザク鎖)。

3. 研究の方法

本研究では、磁性、軌道整列現象や電気伝導を担う3d電子数が異なる二つの物質系の研究を試みた。一つは3d電子が2個存在し、 t_{2g} 電子軌道(d_{xy} , d_{yz} , d_{zx} 軌道)を占有する電子が軌道占有の自由度を持つ CaV_2O_4 を母物質とする系を取り扱った。もう一つは、3d電子を4個持ち、その内の一つの電子が、 e_g 電子軌道($d_{x^2-y^2}$, $d_{3z^2-r^2}$)を占有する自由度を持つ CaMn_2O_4 を母物質とする系を取り扱った。

まずは、これらの系に対して化学的な元素置換効果などによりキャリアドーピングを行う事を試みた。言い換えれば、これはVや

Mn サイトの電子数を変化させことになる。このような遷移金属イオンの電子数変化により、モット転移(金属-絶縁体転移)が生じることは、ペロブスカイトなどの他の遷移金属化合物などを対象に、広く研究が行われてきた。キャリアドーピングのための化学的要素置換効果としては、主に二つの方法を試みた。一つは、+2 価の価数の Ca の代わりに、+3 価の Y や希土類元素を置換することを試みた。この Y 置換効果により、V や Mn の 3d 電子数は増加する、いわば電子ドーピングが可能となる。別の元素置換効果としては、V や Mn サイトに異なる 3d 電子数の元素を置換した。本研究では、Cr を置換元素として使用した。Cr は本系では+3 の価数を持ち、3 つの 3d 電子を持つ。これを V や Mn 元素と置換することで、V 系では広い意味での電子ドーピング、Mn 系ではホールドーピングが実現できる。

別のキャリアドーピング効果として、 CaV_2O_4 と CaMn_2O_4 の Ca 元素を欠損させる方法を試みた。この Ca サイトの欠損は、Ca:V/Mn の比を、1- :2 とすることである。これにより、V や Mn の価数は+3 価の状態から高価数の状態となり、ホールドーピングが可能となる。

上記のような大きく分けて 3 つのキャリアドーピング効果のための、化学的な元素置換効果、元素欠損効果を試みた。それをまとめると、

- (1) Ca サイトへの Y、希土類元素置換効果、
- (2) V/Mn サイトへの Cr 置換効果、
- (3) Ca サイトの欠損効果、

となる。これらの試みの内、 CaMn_2O_4 を母物質とした系に関しては、単一相の作成には成功しなかった。Y 及び希土類元素置換効果や Cr 置換効果では、ペロブスカイト構造が安定化してしまい、それらが不純物として析出してしまった。また、Ca の欠損効果では、スピネル型 Mn_3O_4 が不純物相として析出した。

一方、 CaV_2O_4 を母物質とする系に関しては、上で述べた (1)(2)(3) の各々の方法でキャリアドーピングした単相試料の作製に成功した。まず、(1) の Y 置換効果に関しては、 $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{V}_2\text{O}_4$ の $0 \leq x \leq 0.1$ の組成領域の単結晶作成に成功している。まず、通常の固相反応法を用いて、空气中、その後、アルゴンと水素(水素 7-20%)の混合ガス中での強還元雰囲気中で、試料を焼成し、単相の多結晶体の合成に成功した。その後、同じくアルゴン+水素のガス雰囲気中で、赤外線輻射加熱炉を用いた浮遊帯域溶融法(FZ法)により、単結晶試料の育成を行った。現在、 $x = 0.1$ までの Y 濃度の試料の育成に成功しているが、混合ガスの水素量を増やすことで、より高い Y 濃度の試料の作製が出来る可能性があると考えている。逆に、還元雰囲気が弱いと、ペロブスカイトなどの不純物相が出現することが判明している。

(2) の V サイトへの Cr 置換効果に関して

は、 $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の化学式を持った組成 $0 \leq x \leq 1.0$ の全固溶領域での単結晶合成に成功している。これらの試料の合成は、通常の固相反応法ではペロブスカイトが安定化してしまい、多結晶試料の育成すら不可能であったために、FZ法を用いたかなり特殊な育成方法で試料合成を行った。本研究で用いた結晶育成の詳細は以下のとおりである。

(i) まず、 CaV_2O_4 と CaCr_2O_4 の両方の母物質の多結晶体を、空气中、その後、アルゴン+水素(水素 7%)の混合ガス中で、通常の固相反応法により合成を行った。

(ii) 次に、 $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ となるように CaV_2O_4 と CaCr_2O_4 をモル比で秤量、混合し、棒状にプレスした後、アルゴン+水素(水素 7%)の混合ガス中で焼結した。この段階では、 CaV_2O_4 と CaCr_2O_4 が相分離した多結晶となっている。

(iii) 焼結した多結晶原料棒を、アルゴンガス雰囲気下、結晶成長スピード 60mm/h の条件で、FZ法で一旦多結晶を溶融する。この段階で、 CaV_2O_4 と CaCr_2O_4 が固溶し、 $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の原料棒が出来上がる。この $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の原料棒をアルゴンガス雰囲気下で、結晶成長スピード 30mm/h の条件で、再度 FZ法で結晶育成することで、単相の単結晶試料が出来上がる。

(3) Ca サイトの欠損効果に関しては、通常の固相反応法により、 $\text{Ca}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ の $0 \leq x \leq 0.1$ の欠損範囲で多結晶体の合成に成功した。試料合成は、通常の固相反応法を用い、焼成時の雰囲気は、空气中、その後アルゴン+水素(水素 7%)の混合ガス雰囲気を用いた。 $0.1 < x$ の高欠損領域では、不純物として V_2O_3 が析出した。

上記のように育成した単結晶、多結晶体を用いて、磁気秩序、軌道秩序やその融解が生じる臨界領域の物性の詳細を、以下の手法を用いて研究した。磁気秩序に関して SQUID 磁束計を用いて、磁気転移温度や磁化の異方性などの測定を行った。軌道秩序に関しては、それに伴う結晶構造相転移を、放射光光源を用いての粉末 X 線回折、単結晶 X 線回折を用いて明らかにした。X 線回折実験は、高エネルギー加速器研究機構の放射光科学研究センター-BL-8A/8B のビームラインを用いて行った。粉末 X 線パターンはリートベルト解析を用いて解析し、元素座標位置などを決定した。単結晶 X 線回折の結果は、リガク社製 Crystal Structure を用いて解析した。室温から液体ヘリウム温度までの電気抵抗率測定は、4 端子法を用いて、自作の測定システムにより行った。

4. 研究成果

先に述べたように、本研究では CaV_2O_4 と CaMn_2O_4 へのキャリアドーピングを様々な化学的置換効果や元素欠損効果により試みた。ここでは、最もキャリア量を変化させること

に成功し、金属-絶縁体転移が生じ、その近傍でスピン・軌道秩序の結合した物性が観測された $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ に関する物性測定の結果について報告する。

まず、 $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の Cr 置換効果に伴う磁性の全体像を示す。図 3 には $x=0-0.7$ までの試料の磁化率の温度依存性の結果を示す。

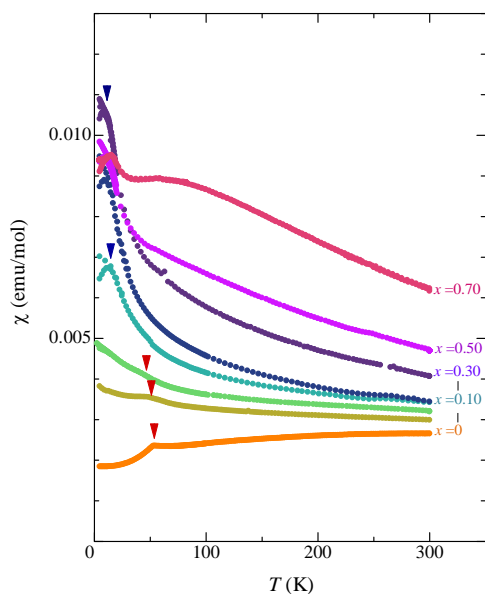


図 3: $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ ($x = 0-0.7$)の磁化率の温度依存性

母物質 CaV_2O_4 ($x = 0$)は低温(51 K)で反強磁性長距離秩序を示し、磁化率に明確なキックが観測されている。Cr 置換に伴い、反強磁性転移に伴う異常は、徐々に低温側にシフトしていき、 $x=0.10$ の組成では 10K 程度の低温でスピングラス転移と思われる磁化率の異常が観測されている。このスピングラスによる異常は、 $x=0.7$ の組成まで観測されている。磁化率の温度依存性に関しては、Cr 置換とともに低温に向けて磁化が増大するキュリーワイス的な振る舞いが顕著になる。また、 $x=0.7$ の組成では、磁化率は 100K 付近でブロードなピーク構造を持つ。この振る舞いは、 CaCr_2O_4 の磁化率にも観測されており、この組成付近から CaCr_2O_4 における長距離反強磁性秩序が出現している可能性がある。

磁化率の測定結果から、母物質 CaV_2O_4 ($x = 0$)の長距離反強磁性が、 $x=0.10$ 付近で急速に抑制されていることが判明した。この長距離磁気秩序は、V サイトの軌道秩序に伴い、この系が持つスピンプラストレーションが解消されることで生じていると予想している。そこで、この系における軌道秩序の Cr 置換に伴う変化について研究を行った。本研究では、軌道秩序に伴う斜方晶(軌道無秩序)-単斜晶(軌道秩序)の構造相転移が、Cr 置換により不安定化していく様子を、X 線構造解析

の手法で明らかにした。

図 4 のインセットには、単結晶 X 線回折実験で得られた、特定の(hkl)のブラッグピークの、室温と測定最低温度の様子を示している。測定に使用したのは、 $x=0, 0.05, 0.10$ の三組成の単結晶試料である。これらの組成では、室温の結晶構造は斜方晶であるが、 $x=0$ と 0.05 に関しては、低温でブラッグピークが分裂している。これは低温の結晶構造が単斜晶に変化していることを示唆している。一方で、 $x=0.10$ では最低温まで構造相転移はなく、斜方晶のままであることが判明した。

図 4 にはこれらのブラッグピークの半値幅、ピークが分裂している温度に関しては、分裂したピークトップ間の幅を、温度に対してプロットしている。この図からも明らかなように、 $x=0, 0.05$ では、ピークの分裂が約 110K から生じており、この温度が斜方晶-単斜晶構造及び軌道秩序転移の転移温度となっている。一方、 $x=0.10$ では半値幅の変化や、ピークの分裂などは全温度範囲で生じていないため、この組成では構造相転移や軌道秩序は消失していると考えられる。

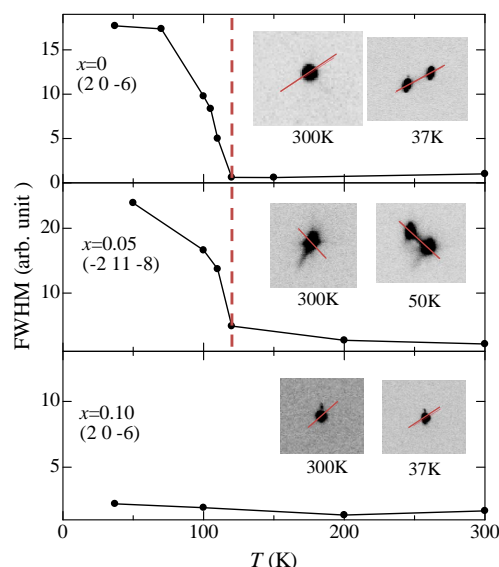


図 4: $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0.05, 0.10$)のブラッグピーク($x=0$ と $x = 0.10$ では(2 0 -6)、 $x=0.05$ では(-2 11 -8))の半値幅、もしくは分裂したピークのピークトップ間の幅の温度依存性。インセットは、300K と測定最低温度のブラッグピークの像。

以上のように、スピンと軌道の秩序状態は、この系では非常に密接な関係を持っていることが判明した。 $x < 0.10$ の組成範囲では、約 110K で構造相転移を伴う軌道秩序が生じる。それにより、スピンのプラストレーションが解消し、約 50K で長距離反強磁性秩序が生じている。一方、 $x = 0.10$ 以上の組成では、軌道秩序が消失するため、長距離磁気秩序も消失する。しかし、短距離の磁気相関が残っているため、低温でスピングラスが出現する。

$x = 0.10$ 付近で軌道秩序の融解と長距離磁気秩序の消失が観測され、この組成付近がある種のスピン・軌道秩序の臨界点となっていることが期待される。そこでは、スピン・軌道秩序の融解に伴う異常が、電気抵抗率に観測される。図 5 には $x = 0-0.30$ の電気抵抗率の温度依存性を示している。

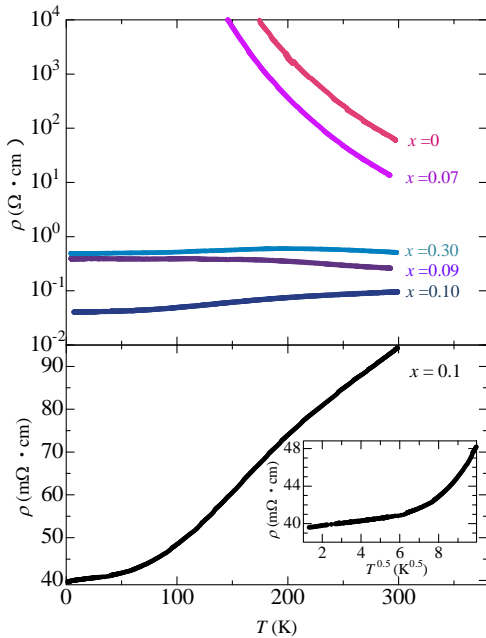


図 5: $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の $x = 0$ から 0.30 の電気抵抗率の温度依存性。(上段) $x = 0.10$ の電気抵抗率の温度依存性(下段)と vs. $T^{0.5}$ プロット(インセット)

母物質の CaV_2O_4 ($x = 0$) はモット絶縁体で、その電気抵抗率の絶対値は大きく、低温に向けて半導体的な振る舞いを示す。Cr 置換とともに電気抵抗率の絶対値は減少していき、 $x=0.10$ において温度低下とともに電気抵抗率も減少する金属的な振る舞いが観測される。 $x=0.10$ の電気抵抗率の絶対値は、最低温でも $40 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 程度で金属としては比較的大きな値を示す。しかし、この組成において電気抵抗率の顕著な減少、温度依存性の変化が観測されたため、本系における金属-絶縁体転移が $x=0.10$ 付近で生じていると判断した。 $x = 0.10$ よりも Cr 置換量を増やしていくと、電気抵抗率は再度増加する傾向がある。

最後に、本系の軌道秩序転移温度(構造相転移温度)、磁気転移温度、ワイス温度、電気抵抗率、伝導度などを Cr 置換量に対してまとめたものを、図 6 に示す。本系では、 $x=0.10$ において Cr の化学的な置換に伴うキャリアドーピング(電子ドーピング)により、軌道秩序は融解する。この軌道秩序の消失により、スピンフラストレーションが回復するため、長距離磁気秩序が消失する。しかし、ワイス温度は -200 K 程度と依然として非常に

大きく、強い反強磁性短距離相関が存在するために、低温でスピングラスが発生する。同時に、強い電子間相互作用や軌道秩序により局在していた電子は遍歴的になり、電気抵抗率の劇的な減少、伝導度の上昇が観測される。このように、本系の電子の持つスピン・電荷・軌道の特性は、密接に関連しており、Cr 置換効果によりこれらの特性は $x = 0.10$ 付近で劇的に変化することが判明した。

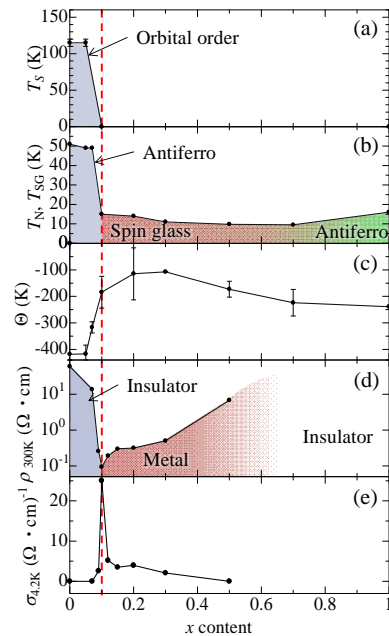


図 6: $\text{Ca}(\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_4$ の諸物性の Cr 置換量依存性。(a)軌道秩序相転移温度(構造相転移温度)。(b)磁気相転移温度。(c)ワイス温度。(d)300K における電気抵抗率。(e)4.2K における電気伝導度。

この臨界組成に当たる $x = 0.10$ では、低温で異常な電気抵抗率の温度依存性が観測されている。図 5 に示すように、 30 K 以下の温度範囲で、電気抵抗率の値は急速に減少し、その温度依存性は通常のフェルミ液体論では説明できない温度の 0.5 乗に比例した振る舞いを示す。このような特異な温度依存性は、この組成が磁気・軌道秩序の量子臨界点であるため、強いスピン・軌道ゆらぎによって生じているのではないかと考えている。

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 30 件)

K. Hemmi, R. Fukuta, E. Uykur, S. Miyasaka, S. Tajima, A. Nakao, H. Nakao, R. Kumai, Y. Murakami, Cr- and Mo-doping effects on structural and orbital order phase transition in spinel-type

MnV₂O₄, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol.81, 2012, SB030-1-4.

DOI: 10.1143/JPSJS.81SB.SB030.

T. Okuda, S. Miyasaka, Power-law dependence of low-temperature magnetic specific heat for hole-doped delafossite CuCr_{1-x}Mg_xO₂, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol.82, 2013, 065001-1-2.

DOI: 10.7566/JPSJ.82.065001

T. Kobayashi, S. Miyasaka, S. Tajima, T. Nakano, Y. Nozue, N. Chikumoto, H. Nakao, R. Kumai, Y. Murakami, Change of electronic state and crystal structure by post annealing in superconducting SrFe₂(As_{0.65}P_{0.35})₂, Phys. Rev. B, 査読有, Vol.87, 2013, 174520-1-4.

DOI:10.1103/PhysRevB.87.174520.

K. T. Lai, A. Takemori, S. Miyasaka, S. Tajima, H. Nakao, R. Kumai, Y. Murakami, Suppression of superconductivity around x=0.5-0.7 in LaFeP_{1-x}As_xO_{0.95}F_{0.05}, JPSJ Conf. Proc., 査読有, Vol.1, 2014, 012104-1-4.

DOI: 10.7566/JPSCP.1.012104.

[学会発表](計12件)

S. Miyasaka, Effect of R ion size variance on spin and orbital order in RVO₃ (R=rare earth and Y), The 19th ICM-SCES, 2012年7月8日-13日, Busan (Korea).

宮坂茂樹, 3d電子系における量子臨界性と異常物性の制御-非フェルミ液体から超伝導まで-, 山田科学振興財団研究会「室温超伝導の可能性を探る」, 2012年9月22日-23日, TKP ガーデンシティ品川「リオン」(東京都港区高輪).

S. Miyasaka, Quantum critical behavior induced by 2-dimensional antiferromagnetic fluctuation near Mott transition in 3-dimensional perovskite vanadate, SCES, 2013年8月5日-9日, 東京大学(東京都文京区本郷).

T. Tokuhisa, Cr-doping effect on spin and orbital ordering in geometrically frustrated system CaV₂O₄, 1st KANSAI Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2014年2月3日-4日, 千里ライフサイエンスセンタービル(大阪府吹田市).

徳久太一, 幾何学的フラストレーション系 CaV₂O₄ における磁気・軌道秩序への Cr 置換効果, 物構研サイエンスフェスタ 2013, 2014年3月18日-19日, つくば国際会議場(茨城県つくば市).

S. Miyasaka, Two-types of quantum critical behaviors by 2- and 3-dimensional spin fluctuation near Mott transition in perovskite vanadate, CCMR2014, 2014年6月23日-27日, Incheon (Korea).

徳久太一, CaV₂O₄ における磁気・軌道秩序への Cr 置換効果, 日本物理学会, 2014年9月7日-10日, 中部大学(愛知県春日井市).

徳久太一, 幾何学的フラストレーション系 CaV₂O₄ の Cr 置換による軌道秩序および構造相転移の抑制, 物構研サイエンスフェスタ 2014, 2015年3月17日-18日, つくば国際会議場(茨城県つくば市).

[その他]

ホームページ等

大阪大学理学研究科物理学専攻田島研究室

<http://buna.phys.sci.osaka-u.ac.jp/home.html>

大阪大学物理学専攻年次報告

<http://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/ja/aboutus/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮坂 茂樹 (MIYASAKA, Shigeki)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 70345106

(3) 連携研究者

田島 節子 (TAJIMA, Setsuko)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70188241

村上 洋一 (MURAKAMI, Youichi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号: 60190899

熊井 玲児 (KUMAI, Reiji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号: 00356924

中尾 裕則 (NAKAO, Hironori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号: 70321536