

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420681

研究課題名(和文) イオン拡散を伴う軌道自由度凍結現象とナノ構造制御の研究

研究課題名(英文) Study on phenomena of freezing of orbital degree of freedom and nano-structure control with ion diffusion

研究代表者

堀部 陽一 (Horibe, Yoichi)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80360048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：Mn系スピネル遷移金属化合物におけるイオン拡散型軌道秩序化現象に伴うチェッカーボード型ナノ構造の形成過程および制御因子について、透過型電子顕微鏡による明・暗視野法を用いた実空間の観察および電子回折図形を用いた逆空間の同時観察により調べた。その結果、本系におけるチェッカーボード型ナノ構造は局所的歪場と長距離歪場の微妙なバランスの上に形成され、最終的にはバンド形状となり崩壊すること、またナノ構造形成には、酸素欠損の存在が大きな影響を及ぼすことが見出された。

研究成果の概要(英文)：Evolution and control factors of checkerboard nano-structure with orbital ordering accompanied by ionic diffusion in Mn-based transition-metal spinel oxides have been investigated by simultaneous observations in real- and reciprocal spaces by transmission electron microscopy. The checkerboard nano-structure in this system is suggested to be consisted under subtle balance between local and long-range strain field, resulting in collapse with large domain size after evolution. Furthermore, the presence of oxygen vacancies is found to play a key role to form the checkerboard nano-structure.

研究分野：固体物理学

キーワード：ナノ構造 透過型電子顕微鏡 電子回折

1. 研究開始当初の背景

遷移金属化合物における様々な d 電子自由度に関係して、銅系酸化物における高温超伝導、マルチフェロイクス(強誘電・強磁性体)、電荷整列現象等の興味深い性質が出現する[1]。この様な d 電子自由度凍結は、特有の格子応答およびその結果生じる局所歪場を伴うことから、特徴的なナノ構造を形成することが知られている[2]。Mn イオンを含むスピネル型遷移金属化合物における従来の研究においては、 d 電子軌道方向の自由度凍結に関係した巨大な格子応答の結果、斜方晶および正方晶ナノロッドから成る極めて異方的なチェッカーボード型ナノ構造の出現が報告されている[3]。このようなチェッカーボード型ナノ構造は、イオン拡散を伴う軌道秩序化の進行に伴い発生する、Mn イオンに由来する電子軌道密度の空間的不均一性によるものであると考えており、イオン拡散速度の調整等による不均一性の発達・緩和機構の制御や、イオン置換や異種イオン利用等による電子軌道密度の制御によりナノ構造が制御できる可能性がある。このような方法により、極小で均一なサイズのナノロッドの規則配列による高い形状異方性導入や、界面を介したナノロッド間の相互作用を利用することが可能となれば、既存材料特性の拡張や新奇材料特性の獲得に利用できると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、スピネル型遷移金属化合物におけるイオン拡散を伴う d 電子軌道秩序化の結晶学的・組織学的特徴を明らかにするとともに、秩序化に伴い出現するナノ構造の制御を試みた。具体的には、2種類のスピネル型マンガン酸化物 (Co, Fe, Mn)₃O₄ および ZnMnGaO₄ セラミックス試料を作製し、様々な条件で熱処理を行うと共に、粉末 X 線回折測定および透過型電子顕微鏡観察を併用した結晶学的・組織学的研究を行うことにより、以下のような点について明らかにすることを目的とした。

(1) 軌道秩序化の初期過程の直接観察：軌道秩序化の初期過程における局所歪場変化などについて明らかにするため、チェッカーボード型ナノ構造形成前段階における結晶構造およびナノ構造の特徴について明らかにする。

(2) チェッカーボード型ナノ構造の成長過程の解明：イオン拡散型秩序化進行に伴うチェッカーボード型ナノ構造成長過程の観察を行い、その成長機構について結晶学的・組織学的観点から明らかにする。

(3) イオン拡散型軌道秩序化の主要制御因子の解明とナノ構造の制御：イオン拡散型軌道秩序化の進行やナノ構造変化に対する、元素置換効果や欠損酸素量の影響などについて調べることにより、軌道秩序化の制御因子

の解明とナノ構造の制御を行う。

3. 研究の方法

イオン拡散を伴う軌道秩序化を示すスピネル型遷移金属化合物において、イオン組成や陽イオン比率、焼成条件、アニール条件およびアニール時間等を系統的に変化させながら固相反応法による多結晶試料作製を行った。得られた試料に対して、X 線回折測定による平均結晶構造の測定を行うと共に、透過型電子顕微鏡による実空間・逆空間の同時直接観察を行い、格子応答や局所歪場変化、ナノ構造変化について調べた。

イオン拡散を伴う軌道秩序化の初期過程については、様々な条件で熱処理を行った ZnMnGaO₄ 多結晶試料を用いて研究を行った。原料粉となる ZnO、Mn₂O₃、Ga₂O₃ を秤量後、粉碎・混合・ペレット化を行い、まず 950 で 5 時間仮焼成を行った。反応物をさらに粉碎・混合・ペレット化し、1000 で 15 時間仮焼成を行った後、1150 で 24 時間、本焼成を行った。本焼成後、そのまま 120 /h および 5 /h で室温まで徐冷を行った (120 /h 徐冷試料・5 /h 徐冷試料)。また比較のため、得られた多結晶試料を再度 1000 まで加熱し 12 時間保持後、氷水にて急冷した試料を作製した (急冷試料)。さらに急冷試料を 275 および 375 にて 165 時間保持した試料を作製した (275 保持試料・375 保持試料) これらの試料について、X 線回折測定を行った後、透過型電子顕微鏡を用いた電子回折法と明・暗視野像法を併用した結晶構造およびナノ構造の観察を行った。

チェッカーボード型ナノ構造の成長過程の研究は、組成および保持時間の異なる (Co, Fe, Mn)₃O₄ 多結晶試料を用いて行った。Co_{0.6}Fe_{1.0}Mn_{1.4}O₄ および Co_{0.6}Fe_{0.9}Mn_{1.5}O₄ となるよう、Fe₂O₃、Co₃O₄、および MnO₂ 原料粉を秤量後、粉碎・混合・ペレット化を行い、まず 950 で 5 時間仮焼成を行った。反応物をさらに粉碎・混合・ペレット化し、1000 で 10 時間仮焼成を行った後、1150 で 24 時間本焼成を行い、そのまま氷水にて急冷した。得られた多結晶試料を 375 にて 75h・123h および 265h 保持し、熱処理を行った (75h 保持試料・123h 保持試料・265h 保持試料)。これらの試料について、X 線回折測定を行った後、透過型電子顕微鏡を用いた電子回折法と明・暗視野像法を併用した結晶構造およびナノ構造の観察を行った。

イオン拡散型軌道秩序化の主要制御因子の抽出とナノ構造制御については、これらの試料から得られた結晶学的・組織学的特徴について、詳細な検討を行うことにより明らかにした。具体的には、Mn イオン組成の影響について Co_{0.6}Fe_{1.0}Mn_{1.4}O₄ および Co_{0.6}Fe_{0.9}Mn_{1.5}O₄ との比較により、酸素欠損量の影響について Co_{0.6}Fe_{1.0}Mn_{1.4}O₄ 375 保持および ZnMnGaO₄ 375 保持試料との比較により明らかにした。

4. 研究成果

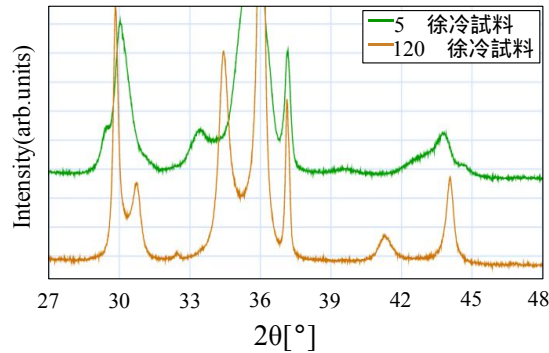


図1 異なる徐冷速度の試料から得られたX線回折曲線

ZnMnGaO₄ 5 /h 徐冷試料および 120 /h 徐冷試料から得られたX線回折曲線を、図1に示す。5 /h 徐冷試料から得られた測定曲線は、回折ピークの大きな幅広がりを示し、ピーク位置が立方晶 ZnGa₂O₄ および正方晶 ZnMn₂O₄ から得られた回折曲線とよく一致していることが明らかとなった。このことは、5 /h 徐冷試料における Mn イオンと Ga イオンの濃度変化に関係したナノスケールでの相分離の存在を示唆している。一方、120 /h 徐冷試料におけるX線回折曲線を見ると、回折ピークに明瞭な分裂が観察され、本試料における正方晶構造の存在が見いだされた。これらの結果から、本系において本焼成からの冷却速度の低下に伴い、立方晶(高対称相)から正方晶への構造変化が生じ、その後、相分離が発生することを示している。すなわち本系においては、高温領域で立方晶から正方晶への構造変化が生じ、それよりも低い温度域で相分離すること、この相分離速度が非常に緩やかであることが明らかとなった。

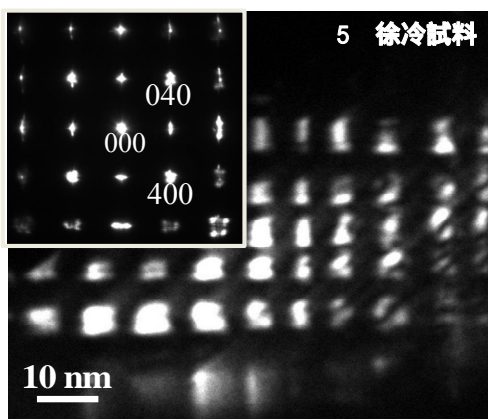


図2 5 /h 徐冷試料から得られた電子回折図形と 800 基本格子反射暗視野像

5 /h 徐冷試料において撮影された室温における電子回折図形(図2挿入図)中には、*h*00タイプ位置周り4つに分裂した、特徴的な基本格子反射が観察される。この分裂した1つの回折斑点を用いて結像した暗視野像(図2)中には、明るいコントラストを示す

規則的に配列したナノドメインが観察される。他の3つの分裂した斑点を用いて結像した暗視野像との比較から、これらのナノドメインは、互いに隣接することなく、規則的に配列していることが明らかとなった。電子回折図形の解析から分裂した回折斑点のうち、[100]*方向および[010]*方向に分裂した回折斑点は、それぞれ長軸方向の異なる2種類の正方晶ナノドメインおよび回転方向の異なる2種類の立方晶ナノドメインによるものであることが明らかとなった。以上の結果から、ZnMnGaO₄系において、2種類の正方晶ナノロッドおよび2種類の立方晶ナノロッドからなる、チェッカーボード型ナノ組織の存在が確認された。

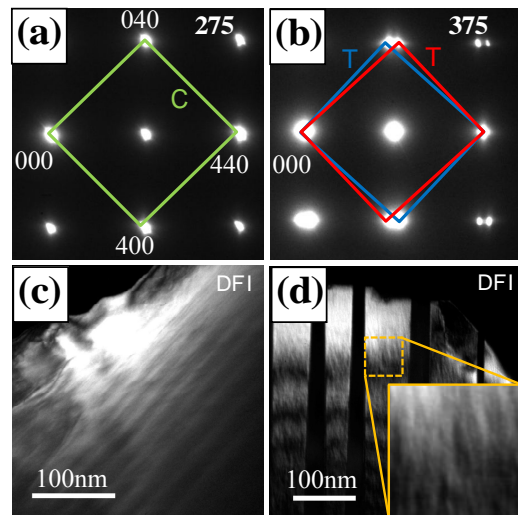


図3 異なる保持温度試料から得られた基本格子反射暗視野像

275 および 375 において165時間熱処理した試料から得られた電子回折図形および暗視野像を、図3に示す。電子線の入射方向は、[001]入射にほぼ平行である。275 保持試料の電子回折図形(図3(a))中には、立方晶スピネル構造を示す基本格子反射のみが観察され、特徴的な回折斑点の分裂は見い出されなかった。一方、図3(b)に示す375 保持試料から得られた回折図形においては、[110]*方向に沿った回折斑点の分裂が観察される。この回折斑点の分裂は、赤枠および青枠で示すように、両者共に正方晶構造に起因する回折斑点であることが見出された。これらの特徴を反映して、本格子反射を用いて結像した暗視野像中には、275 保持試料(図3(c))においては特徴的なコントラストは見られなかったのに対し、375 保持試料(図3(d))においては、双晶組織に起因する約90 nmの間隔の明暗のバンド状コントラストの規則配列が観察された。さらに本試料中の双晶ドメインの内部には、明瞭なTweed模様を観察された。このTweed模様の存在は、本試料における立方晶母相中における析出相の微小ドメインの存在を示唆しており、チェッカーボード型ナノ組織の前駆現象であると考えられる。すなわち本系において、比較的

高温・長時間でのアニール処理による、チェッカーボード型ナノ構造の形成可能性が示唆された。

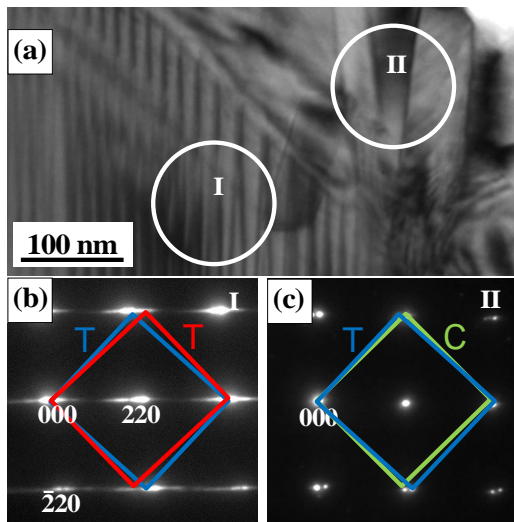


図4 $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{1.0}\text{Mn}_{1.4}\text{O}_4$ 265h 保持試料から得られた明視野像(a)、領域 I および II から得られた電子回折図形(b)、(c)

$\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{1.0}\text{Mn}_{1.4}\text{O}_4$ 265h 保持試料から得られた明視野像を、図4(a)に示す。像中には、大きさ $20 \times 500\text{nm}$ 程度の細かい筋状コントラストからなる領域(図中 I)と $60 \times 230\text{nm}$ 程度のバンド状コントラストを有する領域(図中 II)の2種類の領域が観察される。これらの領域から得られた電子回折図形を、それぞれ図4(b)、(c)に示す。これらの回折図形中では、 $[110]$ 方向に沿って分裂した回折斑点の存在が観察される。これらの回折図形について詳細な検討を行ったところ、図4(b)においては正方晶ドメインの存在による双晶分裂が生じているのに対し、図4(c)は立方晶と正方晶ドメインの存在の結果生じた分裂であることが明らかとなった。この結果から、 $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{1.0}\text{Mn}_{1.4}\text{O}_4$ 265h 保持試料においては大きなスケールでの相分離が生じ、チェッカーボード型ナノ構造は形成されないことが明らかとなった。

この状態におけるドメイン界面近傍の単位格子の模式図を、図5に示す。従来の研究においてチェッカーボード型ナノ構造の存在が報告されている $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.9}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ と同様、本試料においてもナノスケールでの Mn スピノーダル分解が生じるものの、チェッカーボード型ナノ構造は形成されず、2種類の正方晶領域と1種類の立方晶領域からなる双晶状ナノ構造の形成が明らかとなった。このような相違が現れる原因として、Mn イオンの拡散とそれに伴う歪緩和機構が考えられる。 $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn})_3\text{O}_4$ における Jahn-Teller 転移温度は約 700K であり、本研究で用いたアニール温度(約 648K)よりも十分に高い。このため、スピノーダル分解に伴う Mn イオンの拡散は、Jahn-Teller 歪を伴いながら進行する。この際、初期 Mn イオン濃度が高いほど、Jahn-Teller 歪同士の相関により、拡散が阻

害され、領域全体で規則正しいチェッカーボード型ナノ構造が形成されると考えられる。

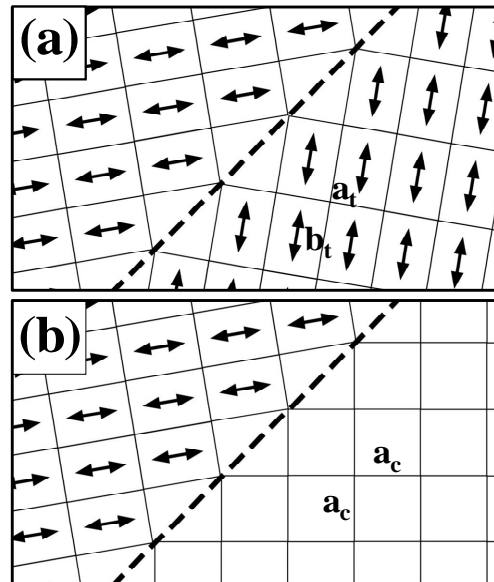


図5 $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{1.0}\text{Mn}_{1.4}\text{O}_4$ 265時間保持試料における正方晶双晶ドメイン境界と正方晶立方晶ドメイン境界

また $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{1.0}\text{Mn}_{1.4}\text{O}_4$ においてチェッカーボード型ナノ構造が生じなかった理由として、試料中における Mn 価数の影響が考えられる。本系において、A サイトイオン (Co イオン) は2価の陽イオンであり、一方 B サイトイオン (Fe, Mn イオン) は、3価の陽イオンである。拡散現象に重要な役割を果たす Mn イオンは3価及び4価の混合価数を取り得る。この為、 648K でのアニールに伴う過剰酸素の導入により、電荷の中性条件を満たすため、Mn 価数が3価から4価に一部変化すると考えられる。このような、4価の Mn イオンは Jahn-Teller 現象を示さないため拡散速度が速く、結果として、ラメラ型ナノ組織形成に重要な役割を果たすと考えられる。すなわち、本系におけるチェッカーボード型ナノ組織の形成は Mn 濃度に対し非常に敏感であることが明らかとなった。

従来のマンガン混合型スピネル酸化物における研究から、本系における結晶構造は、温度の低下に伴い、 $C' T' C+T$ のように変化すると指摘されている。一方、本研究の結果から、 $C' T'$ 変化は強い温度及び保持時間依存性を有することが明らかとなった。この結果は、 $C' T'$ 変化が Jahn-Teller 効果による単純なマルテンサイト変態ではなく、 Mn^{3+} イオンの短距離拡散を伴う変化であることを示唆している。一方、 $T' C+T$ 変化は、 Mn^{3+} イオンの長距離拡散を伴うスピノーダル分解に関係した相分離過程であると考えられる。以上の結果から、スピネル型マンガン酸化物におけるチェッカーボード型ナノ構造の形成には、Jahn-Teller 歪を伴う Mn^{3+} イオンの拡散が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

<引用文献>

- [1] P. G. Radaelli, *et. al.*, Nature 416, 155-158 (2002), N. Ikeda, *et. al.*, Nature 436, 1136-1138 (2005), Y. Horibe, *et. al.*, Physical Review B71, 052411 1-4 (2005), Y. Horibe, *et. al.*, Physical Review Letters 96, 086406 1-4 (2006).
[2] T. Choi, *et. al.*, Nature Materials 9, 253-258 (2010).
[3] S. Yeo, *et. al.*, Applied Physics Letters 89, 233120 1-3 (2006), C. L. Zhang, *et. al.*, Applied Physics Letters 90, 133123 1-3 (2007), C. L. Zhang, *et. al.*, Applied Physics Letters 91, 233110 (2007).

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 8 件) 全て査読有

1. Characteristic Features of the Modulated Structure Appearing in the Multiferroic Material $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ around $x = 0.15$
M. Nomoto, T. Inoshita, Y. Inoue, Y. Horibe, and Y. Koyama, Materials Science Forum 879, 1393-1398 (2017).
2. Features of the ferroelectric domain structure in the multiferroic material YbMnO_3
T. Inoshita, Y. Inoue, Y. Horibe, and Y. Koyama, MRS Advances 1, 591-596 (2016).
3. Crystallographic features in the vicinity of the morphotropic phase boundary in the multiferroic material $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$
M. Nomoto, T. Inoshita, Y. Inoue, Y. Horibe, and Y. Koyama, MRS Advances 1, 573-578 (2016).
4. Large-scale phase separation with nano-twin domains in manganite spinel $(\text{Co,Fe,Mn})_3\text{O}_4$
Y. Horibe, S. Takeyama, and S. Mori, AIP Conf. Proc. 1763, 050005 (2016).
5. Duality of Topological Defects in Hexagonal Manganites
F.-T. Huang, X. Wang, S. M. Griffin, Y. Kumagai, O. Gindele, M.-W. Chu, Y. Horibe, N. A. Spaldin, and S.-W. Cheong, Physical Review Letters 113, 267602 1-5 (2014).
6. Unfolding of Vortices into Topological Stripes in a Multiferroic Material
X. Wang, M. Mostovoy, M. G. Han, Y. Horibe, T. Aoki, Y. Zhu, S.-W. Cheong, Physical Review Letters 112, 247601 1-5 (2014).
7. Color theorems, chiral domain topology

and magnetic properties of Fe_xTaS_2
Y. Horibe, J. J. Yang, Y. -H. Cho, X. Luo, S. B. Kim, Y. S. Oh, F. -T. Huang, T. Asada, M. Tanimura, D. J. Jeong, and S. -W. Cheong, Journal of American Chemical Society 136, 8368-8373 (2014).

8. Ferroelectric and Structural Antiphase Domain and Domain Wall Structures in $\text{Y}(\text{Mn, Ti})\text{O}_3$
S. Mori, K. Kurushima, H. Kamo, Y. Ishii, F. -T. Huang, Y. Horibe, T. Kastufuji, S. -W. Cheong, Ferroelectrics 462, 162-166 (2014).

[学会発表](計 25 件)

招待講演

1. 六方晶遷移金属化合物の構造階層性に由来する特異なドメイン構造
堀部陽一
日本金属学会 2017 年春期大会 (首都大学東京(東京都八王子市)2017 年 3 月 17 日)
 2. Nano-sized Checkerboard Domains in Manganese Spinel Oxides
Yoichi Horibe
2nd International Symposium on Frontiers in Materials Science (FMS2015) (早稲田大学(東京都新宿区)2015 年 11 月 20 日)
 3. Topological domain structures in quantum materials
Yoichi Horibe
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) Physics Colloquium 2015 (Ulsan (South Korea), 2015 年 5 月 27 日)
 4. Topological domain structures in intercalated transition metal dichalcogenide Fe_xTaS_2
Yoichi Horibe
Quantum Materials Symposium 2015 (Muju (South Korea), 2015 年 2 月 12 日)
 5. Direct observation of ferroelectric domains by transmission electron microscopy
Yoichi Horibe
Summer School on Ferroelectricity (広島大学(広島県東広島市), 2014 年 8 月 21 日)
 6. 物質の階層構造に由来するトポロジカルな欠陥 ボルテックス・ドメイン構造
堀部陽一
早稲田大学凝縮系物質科学研究所シンポジウム (早稲田大学(東京都新宿区), 2014 年 7 月 17 日)
- 一般講演
7. 置換型ピスマスフェライト $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ における構造相転移
堀部陽一, 渡邊謙, 野元将志, 小山泰正
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学(大阪府大阪市), 2017 年 3 月 17 日)

8. スピネル型マンガン酸化物におけるチェッカーボード型ナノ組織変化
田吹遥, 竹山靖也, 堀部陽一, 森茂生
日本顕微鏡学会九州支部学術講演会 (産業医科大学(福岡県北九州市), 2016年12月3日)
9. 置換型ピスマスフェライト $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ における反強誘電変位
堀部陽一, 渡邊謙, 木口賢紀, 今野豊彦, 野元将志, 井上靖秀, 小山泰正
日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学(石川県金沢市), 2016 年 9 月 14 日)
10. スピネル型マンガン酸化物におけるチェッカーボード型ナノ組織変化
田吹遥, 竹山靖也, 堀部陽一, 森茂生
日本金属学会 2016 年秋期大会 (大阪大学(大阪府豊中市), 2015 年 9 月 22 日)
11. 置換型ピスマスフェライト $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ における反強誘電相の結晶学的特徴
堀部陽一, 渡邊謙, 井下匠, 野元将志, 井上靖秀, 小山泰正
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学(宮城県仙台市), 2016 年 3 月 20 日)
12. Crystallographic Features in the Vicinity of the Morphotropic Phase Boundary in the Multiferroic Material $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$
M. Nomoto, T. Inoshita, Y. Inoue, Y. Horibe, and Y. Koyama
2015 MRS Fall Meeting (Boston (USA), November 29 - December 7, 2015)
13. Features of the Ferroelectric Domain Structure in the Multiferroic Material YbMnO_3
T. Inoshita, Y. Inoue, Y. Horibe, and Y. Koyama
2015 MRS Fall Meeting (Boston (USA), November 29 - December 7, 2015)
14. マルチフェロイクス物質 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ におけるモルフォトピック相境界付近の強誘電状態
野元将志, 井下匠, 井上靖秀, 堀部陽一, 小山泰正
日本金属学会 2015 年秋期大会 (九州大学(福岡県福岡市), 2015 年 9 月 16 日)
15. マルチフェロイクス物質 YbMnO_3 における強誘電分域構造の特徴
井下匠, 井上靖秀, 堀部陽一, 小山泰正
日本金属学会 2015 年秋期大会 (九州大学(福岡県福岡市), 2015 年 9 月 16 日)
16. Nd 置換型 BiFeO_3 における 4 倍超構造の結晶学的特徴
渡邊謙, 堀部陽一
日本金属学会 2015 年秋期大会 (九州大学(福岡県福岡市), 2015 年 9 月 16 日)
17. 遷移金属カルコゲナイド Fe_xTaS_2 における反位相カイラルドメイン構造
堀部陽一, J. J. Yang, Y. -H. Cho, X. Luo, S. B. Kim, 浅田敏広, 谷村誠, Y. S. Oh, S. -W. Cheong
日本金属学会 2015 年秋期大会 (九州大学(福岡県福岡市), 2015 年 9 月 17 日)
18. Nd 置換した BiFeO_3 における反強誘電相の結晶学的特徴
渡邊謙, 堀部陽一
平成 27 年度合同学術講演会(九州大学(福岡県福岡市), 2015 年 6 月 6 日)
19. 暗視野法を用いた遷移金属カルコゲナイド $\text{Fe}_{1/4}\text{TaS}_2$ における反位相ドメイン分布の決定
堀部陽一, 浅田敏広, 谷村誠, S. B. Kim, S. -W. Cheong
日本顕微鏡学会第 71 回学術講演会 (京都国際会議場(京都府京都市), 2015 年 5 月 14 日)
20. マルチフェロイクス YbMnO_3 の強誘電分域構造の特徴
櫻井瞭, 堀部陽一, 井上靖秀, 小山泰正
日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学(東京都新宿区), 2015 年 3 月 21 日)
21. マルチフェロイクス物質 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ の低 Sm 組成域における誘電状態の特徴
井下匠, 野元将志, 小山泰正, 井上靖秀, 堀部陽一
日本金属学会 2015 年春期大会 (東京大学(東京都目黒区), 2015 年 3 月 23 日)
22. Observation of vortex domain structures in multiferroic h-RMnO₃ by TEM
Y. Horibe, F. -T. Huang, T. Choi, N. Lee, and S. -W. Cheong
第 58 回顕微鏡学会シンポジウム (九州大学(福岡県福岡市), 2014 年 11 月 16 日)
23. スピネル型酸化物 $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn})_3\text{O}_4$ におけるナノチェッカーボード組織変化の直接観察
堀部陽一, 森茂生, S. -W. Cheong
日本金属学会 2014 年秋期大会 (名古屋大学(愛知県名古屋市), 2014 年 9 月 24 日)
24. 六方晶マンガン酸化物 RMnO_3 (R=希土類元素, In) における局所構造とドメイン構造
堀部陽一, F. -T. Huang, 久留島康輔, 森茂生, S. -W. Cheong
日本物理学会 2014 年秋季大会 (中部大学(愛知県名古屋市), 2014 年 9 月 7 日)
25. 六方晶酸化物 InMnO_3 におけるドメイン構造および局所構造
堀部陽一, 久留島康輔, 森茂生, F. -T. Huang, S. -W. Cheong
日本顕微鏡学会第 70 回記念学術講演会 (幕張メッセ(千葉県千葉市), 2014 年 5 月 13 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀部 陽一 (HORIBE, Yoichi)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 8 0 3 6 0 0 4 8