三角格子系鉄複合酸化物 LuFe_2O_4 における 電荷秩序構造と誘電特性

大阪府立大学大学院理学系研究科 松尾祥史

日本原子力研究開発機構 吉井賢資

岡山大学大学院理学研究科 池田 直

大阪府立大学大学院工学研究科 森 茂生

Yoji MATSUO, Kenji YOSHII, Naoshi IKEDA and Shigeo MORI: Charge Ordered Structure and Dielectric Properties in LuFe_2O_4

Recent works revealed that a ferroelectric polarization in the charge-frustrated system LuFe_2O_4 originates from an emergence of the charge ordering, which is characterized by a regular arrangement of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions on the frustrated triangular lattice. In this work, we have investigated both the charge ordered (CO) structure and charge ordering processes mainly by means of the transmission electron microscopy (TEM). Both the CO structure and charge ordering processes depend strongly on the amount of the oxygen deficiency (δ) involved in $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$. In the case of $\delta \sim 0$, the three-dimensional CO structure with the modulation vector of $q = [1/3 \ 1/3 \ 1/2]$ was formed at room temperature. On the other hand, as δ was increased, the three-dimensional CO structure changed into the two-dimensional CO one and the coherent length becomes shorter along the $[001]$ direction. For proper understanding of the dielectric and magnetic properties in LuFe_2O_4 and related materials, it should be essential to prepare $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ samples with properly controlled oxygen-concentration and elucidate the physical properties in $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ with $\delta \sim 0$.

1. はじめに

強誘電体材料は、誘電性、圧電性、焦電性や電気光学効果を示すことから、電子デバイスの基盤材料として注目され、広く研究されてきている。 BaTiO_3 に代表される従来の強誘電体は、陽イオンと陰イオンのペアが、中心対称性を破るように変位することにより双極子モーメントが生じ、強誘電性が発現する。^{1),2)} 最近、三角格子系鉄複合酸化物 LuFe_2O_4 が、従来とは異なるメカニズムをもった強誘電体であることが見出された。³⁾ この物質における強誘電性は、同数の Fe^{2+} と Fe^{3+} が幾何学的フラストレーション構造である三角格子上で規則配列し、電荷秩序構造を形成することに起因する。このことから、本物質は電子の規則配列により電気双極子が生じる新しいタイプの強誘電体であるとみなすことができる。また、従来の研究によると自発分極が磁気秩序により増大することが明らかにされている。³⁾ このことは、本物質における強誘電性が磁性と強く相関していることを示しており、本物質は磁性と誘電性が強く結合した多強性物質(マルチフェロイック物質)としても期待されている。

三角格子系鉄複合酸化物 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($R = \text{Y}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$) の代表的物質である LuFe_2O_4 は、平均構造として

菱面体構造(空間群 $R\bar{3}m$) を有しており、図1に示すように Fe イオンからなる三角格子層が $[001]$ 方向に積層した層状物質である。⁴⁾ ここで、図1において、 Fe-O からなる三角格子面が2枚積層している部分をW層と呼ぶ。また、 Fe の平均価数が $2.5+$ であることから、三角格子上に同数の Fe^{2+} と Fe^{3+} が存在し、スピンと電荷のフラストレーションが生じる。この電荷フラストレーションの緩和過程として、三角格子上において Fe^{2+} と Fe^{3+} の規則配列によって特徴付けられる電荷秩序構造が形成される。⁵⁾ さらに、中性子、X線および電子線回折実験により、 LuFe_2O_4 の電荷秩序化過程が明らかにされた。⁶⁾ LuFe_2O_4 は、500 Kにおいて三角格子面内において Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序化が起こり二次元的な電荷秩序構造を形成する。温度の低下に伴い、320 K以下で $[001]$ 方向への相関が発達し、二次元的な電荷秩序構造から三次元的な電荷秩序構造へと変化する。

従来の研究より $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の磁氣的・電氣的性質は、酸素量の化学量論比に大きく依存することが報告されている。⁷⁾ 特に電氣的性質において、酸素欠損の多い試料では半導体的挙動を、酸素欠損の少ない試料では絶縁体的挙動を示す。⁸⁾ そのため、本物質系における誘電特性を明らかにするためには、酸素欠損を含まない LuFe_2O_4 を作製すること

図1 LuFe_2O_4 の結晶構造. (Crystal structure of LuFe_2O_4 .)

が必要不可欠となる。つまり、1対1の割合で Fe^{2+} と Fe^{3+} が三角格子に存在することで電荷秩序構造が形成され、その結果強誘電性が生じるため、酸素量を精密に制御した試料作製方法の確立が必要不可欠となる。最近われわれは、 CO-CO_2 混合ガスを用いて酸素分圧を精密に制御し、酸素欠損の少ない $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料を作製することに成功した。そこで本稿では、 CO-CO_2 混合ガスを用いて酸素欠損量 (δ) を制御した $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料での電荷秩序構造の特徴を透過型電子顕微鏡 (TEM) により調べた結果について報告するとともに、電荷秩序構造と誘電特性との相関について議論する。

2. 実験方法

本研究では、 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料を CO-CO_2 混合ガス還元雰囲気炉を用いて、酸素分圧を制御しながら作製した。ここで、試料作製時の酸素分圧は、混合ガス CO と CO_2 の混合比を制御することにより行った。特に本稿では、 $\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 2, 1 : 3, 1 : 3.5$ の条件の下で作製した $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料の電荷秩序構造の特徴について述べる。ここで、 $\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 2$ の条件で作製した $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料を A 試料と呼び、 $\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3$ の場合を B 試料、 $\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3.5$ の場合を C 試料と呼ぶことにする。各試料の電荷秩序構造の特徴および秩序化過程については、透過型電子顕微鏡 (日本電子製 JEM-2010 および JEM-2000FX) を用いて、電子回折パターン、暗視野像および明視野像を得ることにより、100 K から 700 K の温度範囲で調べた。また、誘電特性は HP-4192A を用いて、50 K から 400 K の温度範囲で測定した。

3. 実験結果

3.1 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ における電荷秩序構造

本物質系の磁氣的・電氣的特性は δ に大きく依存する。⁷⁾

図2 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ の室温における電子回折パターン。電子線の入射方向は $[1\bar{1}0]$ 方向である。(a) A 試料 ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 2$) (b) B 試料 ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3$) (c) C 試料 ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3.5$) (Electron diffraction patterns of $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ at room temperature. Note that the beam incidence is almost parallel to the $[1\bar{1}0]$ direction. (a) Sample A ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 2$) (b) Sample B ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3$) (c) Sample C ($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3.5$).)

また、磁氣的・電氣的特性は、三角格子に存在する Fe^{2+} および Fe^{3+} のフラストレーション効果に起因し、 Fe^{2+} および Fe^{3+} の規則配列による電荷秩序構造に強く依存している。そこで、さまざまな酸素分圧下で作製した $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料を用いて、電子回折パターンを得ることにより、室温での電荷秩序構造の特徴について調べた。図2に、A 試料、B 試料および C 試料の室温での電子回折パターンを示す。電子線の入射方向は $[1\bar{1}0]$ 方向である。まず、図2a で示すように、A 試料の電子回折パターン中には、基本構造である菱面体構造 (空間群 $R\bar{3}m$) による基本格子反射に加え、 $(1/3 \ 1/3 \ 0)$ を通り $[001]$ 方向に伸びるジグザグ状の散漫散乱が見られる。このことから、A 試料は $[110]$ 方向へ3倍周期をもつ長周期構造が存在し、 $[001]$ 方向には相関をもたない二次元的な秩序構造が形成されていることがわかる。一方、図2b で示すように、B 試料の電子回折パターン中には、基本格子反射に加え $(1/3 \ 1/3 \ 0)$ を通り $[001]$ 方向に伸びるストリーク状散漫散乱に加え、ストリーク状散漫散乱中に、 $(1/3 \ 1/3 \ 1/2)$ 位置に強度極大が存在することがわかった。このことは、 $[110]$ 方向へ3倍周期をもつ長周期構造の相関性が、 $[001]$ 方向に発達してきていることを示している。また、C 試料の電子回折パターン中には、 $(1/3 \ 1/3 \ 0)$ を通り $[001]$ 方向に伸びる強度の弱いストリーク状散漫散乱と $(1/3 \ 1/3 \ 1/2)$ 位置に回折斑点が存在する。このことは、 $[110]$ 方向に3倍周期の長周期構造が形成されていると同時に、 $[001]$ 方向にも

2倍周期をもった長周期構造が存在していることを示している。つまり、A試料では、W層内の三角格子上で Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序化に伴う $[110]$ 方向に3倍周期をもつ二次元的な電荷秩序構造が形成されており、一方、B試料およびC試料では、W層間の相互作用が強くなり、 $[001]$ 方向に2倍周期を伴った電荷秩序構造が形成されていることがわかった。ここで、試料中に含まれる酸素欠損量(δ)は、試料作製時に用いる $\text{CO}-\text{CO}_2$ 混合ガスの CO/CO_2 比に依存し、 CO/CO_2 比が大きいほど δ は小さくなる。つまり、C試料の δ は小さく、A試料の δ が最も大きいと考えられる。また、本物質でのFeの平均価数が2.5+であることから、酸素欠損が存在すると Fe^{2+} と Fe^{3+} の存在比が1対1からずれる。これらのことから、 Fe^{2+} と Fe^{3+} の存在比が1対1から大きくずれる場合、三角格子面内でのみ電荷秩序構造が形成され、 $[001]$ 方向には相関が発達せず二次元的な電荷秩序構造が形成される。一方、 Fe^{2+} と Fe^{3+} の存在比が1対1からのずれが小さい場合、二次元的な秩序構造から $[001]$ 方向への秩序が発達し、三次元的な電荷秩序構造が形成すると考えられる。

次に、図2cで $(1/3 \ 1/3 \ 1/2)$ 位置に存在する回折斑点を用いて暗視野像を得ることにより、電荷秩序構造の分域構造について調べた。図3は、C試料の室温での暗視野像である。図中には、 $[110]$ 方向に約10～20 nm、 $[001]$ 方向に数ナノメートルの大きさからなる領域が明るいコントラストとして観察され、層状に分布している。⁹⁾このように本物質系の電荷秩序構造は、マンガン酸化物で見られるような電荷秩序構造とは異なり、三角格子面内においてさえも秩序化の相関距離が約10～20 nmしかなく、ナノスケールの分域構造を形成していることが明らかとなった。¹⁰⁾

3.2 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ における電荷秩序化過程

次に、 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ の電荷秩序構造の秩序化過程を明らかにするために、電子回折パターンの温度変化について調べた。図4に、C試料での電子回折パターンの温度変化を示す。ここで、電子線の入射方向は $[1\bar{1}0]$ 方向である。図4aで示すように、室温での電子回折パターン中には、基本格子反射に加え $(1/3 \ 1/3 \ -1/2)$ 位置に回折斑点が存在するとともに、 $(1/3 \ 1/3 \ 0)$ を通り $[001]$ 方向に伸びるストリーク状散漫散乱が見られる。そこで電子回折パターンの温度変化を調べた結果、320 Kにおいて $(1/3 \ 1/3 \ -1/2)$ 位置の回折斑点は消失し、ストリーク状の散漫散乱のみが観察された(図4b)。さらに試料温度を上昇させると500 Kにおいて、ストリーク状の散漫散乱が消失し、図4cで示すように、菱面体構造(空間群 $R\bar{3}m$)による基本格子反射のみが見られた。つまり、500 K以上においては、三角格子面内の Fe^{3+} と Fe^{2+} の秩序化は消失し、無秩序状態にあることを示している。図4に示す電子回折パターンの温度変化から、室温においては $[110]$ 方向に3倍周

図3 C試料($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3.5$)におけるストリーク状の散漫散乱の一部を用いて結像して得られた暗視野像。(Dark-field image of sample C obtained by using part of the diffuse streak.)

図4 C試料($\text{CO} : \text{CO}_2 = 1 : 3.5$)における電子回折図形の温度変化。電子線の入射方向は $[1\bar{1}0]$ 方向である。(a) 298 K, (b) 322 K, (c) 526 K. (Temperature variation of electron diffraction patterns in sample C. Note that the beam incidence is almost parallel to the $[1\bar{1}0]$ direction. The electron diffraction patterns were obtained at (a) 298 K, (b) 322 K and (c) 526 K, respectively.)

期と $[001]$ 方向に2倍周期をもつ三次元的な電荷秩序構造が形成されている。試料温度を上昇させると、320 K以上において $[001]$ 方向のW層間の相関性がなくなり、 $[110]$ 方向にのみ3倍周期をもつ二次元的な電荷秩序構造に変化する。さらに試料温度を上昇させると、520 K以上において三角格子面内の3倍周期の秩序化も消失し、電荷無秩序状態になることがわかった。

4. 電荷秩序構造モデルと強誘電性

$\text{LuFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 多結晶試料における電荷秩序構造の特徴に

ついて電子回折パターンを得ることにより調べた結果、C 試料では室温で三次元的な電荷秩序構造が形成されていることがわかった。そこで、三次元的な電荷秩序構造での Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序パターンについて考えてみる。図 2c に示すように、電荷秩序構造を特徴づける回折斑点が $(1/3 \ 1/3 \ 1/2)$ 位置に出現することから W 層内の三角格子面内では 3 倍周期の秩序構造が形成されている。現在提案されている W 層内の三角格子面内での Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序パターンを図 5 に示す。¹¹⁾ 図 5 からわかるように、3 倍周期の秩序構造の単位胞内には、6 個の鉄イオンのサイトが存在する。これら 6 個のサイトに Fe^{2+} と Fe^{3+} を同数配置させると、20 通りの配置パターンが考えられる。これらの配置パターンを検討した結果、図 5 に示すような Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序パターンが基本パターンとなっていることがわかった。そこで、この秩序パターンを W 層内にある 2 つの三角格子面に対して適応すると、1 つの三角格子面では Fe^{2+} が Fe^{3+} よりも多く存在し、他方の三角格子面内では Fe^{3+} が Fe^{2+} よりも多く存在していることがわかる。ここで、Fe の平均価数が 2.5+ であることから、 Fe^{2+} では電子が過剰に存在し、一方 Fe^{3+} では電子が欠損しているとみなすことができる。そこで、W 層内の 2 つの三角格子面での電荷分布を考えると、2 つの三角格子面での電荷の重心位置がずれていることから、図 5 中に矢印で示すような双極子モーメントが生じることになる。2 枚の三角格子面で生じた双極子モーメントが三次元的に秩序化することにより巨視的な分極モーメントが生じ、強誘電性が発現すると考えられる。つまり、三次元的な電荷秩序構造の出現が、本物質系の強誘電性の起因であると言える。最近池田らは、電荷秩序構造の出現と強誘電性との相関を明らかにするために、焦電流の温度依存性の測定を行った。¹²⁾ その結果、350 K 以下で焦電流が発生し、320 K において焦電流の積分値が飽和することから、 LuFe_2O_4 の自発分極が 320 K 以下で出現することを見出した。また、試料温度を低下させると、250 K 付近で自発分極の値が大きくなる。ここで、 LuFe_2O_4 は約 250 K で、フェリ磁性転移を起こすことから、磁気秩序の形成に伴って自発分極が増大していることを示している。^{12),13)} さらに、印加電場の方向を逆転させると自発分極の方向が反転することから、 LuFe_2O_4 は 320 K 以下で自発分極をもつ強誘電体であることを明らかにした。¹²⁾ そこで、 LuFe_2O_4 の誘電特性を明らかにするために、誘電率の温度依存性を調べた。図 6 に LuFe_2O_4 の誘電率の温度依存性を示す。図 6 に示すように、温度の上昇に伴い誘電率の実部 ϵ' は増加し、320 K 付近で異常を示す。また、320 K 以下では印加周波数に依存した分散を示すことがわかった。ここで、図 4 に示した電子回折パターンの温度依存性から、320 K において二次元的な電荷秩序構造から三次元的な電荷秩序構造に変化することから、誘電率の温度依存性に見られる 320 K での異常は、

図 5 電荷秩序構造モデル。(Structural model schematically illustrating the $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ order in the W layer.)

図 6 $\text{LuFe}_2\text{O}_{4.8}$ における誘電率の温度変化。(Temperature variation of the dielectric constant in $\text{LuFe}_2\text{O}_{4.8}$.)

電荷秩序構造の二次元的構造から三次元的構造への変化によることがわかる。つまり、三角格子面内の二次元的な Fe^{2+} と Fe^{3+} の秩序化に加えて、 $[001]$ 方向への W 相間の秩序化の発達为本物質系の誘電性に強く影響を与えている。また、解析の結果、図 6 で示す誘電率の温度依存性はデバイ型の誘電分散として理解されることがわかった。図 7 に、誘電率測定から得られた緩和周波数の温度依存性を示す。図 7 に示すように、緩和周波数が温度の低下に伴って線形的に減少することから、熱活性型の緩和過程として特徴付けられることがわかった。また、活性化エネルギーは約 0.44 eV であり、 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ (PZT) のような強誘電薄膜での分域壁移動のエネルギー (~ 0.9 eV) と比べて小さな値である。¹⁴⁾ さらに、図 7 中にメスバウアー分光により得られた、Fe イオンの 2 価と 3 価間の価数揺らぎの温度依存性を縦線で示す。¹⁵⁾ ここで、誘電率の緩和周波数の温度依存性と各温度での Fe イオンの価数揺らぎがほぼ一致することから、本物質における強誘電分域壁の移動が Fe イオンの価数揺らぎに起因していると考えられる。

5. まとめ

三角格子系鉄複合酸化物 LuFe_2O_4 における電荷秩序構造の特徴および秩序過程について主に透過型電子顕微鏡法により調べた結果について報告した。特に、 LuFe_2O_4 における電荷秩序構造および磁氣的・電氣的特性は、 Fe^{2+} と

図7 LuFe₂O_{4.8}における緩和周波数の温度変化.
(Temperature variation of the characteristic frequency for the dielectric response of LuFe₂O_{4.8}.)

Fe³⁺の存在比に大きく依存することが明らかとなった。Fe²⁺とFe³⁺の存在比が1対1より大きくずれる場合、電荷秩序構造はほとんど発達せず二次元的な秩序構造で存在し、電子回折パターン中にストリーク状の散漫散乱を与える。一方、Fe²⁺とFe³⁺の存在比が1対1である場合(またはその比に近い場合)は、二次元的な秩序構造から三次元的な秩序構造へと変化すると同時に、自発分極の発現を伴い、電荷秩序型強誘電体と呼ばれる新しい原理に基づいた強誘電体となる。本物質系の強誘電性は、Fe²⁺とFe³⁺の混合原子価状態にあるFeイオンを含むと同時に、Fe²⁺とFe³⁺が三角格子という幾何学的フラストレーション格子上に存在するため、スピンおよび電荷フラストレーション状態にあることが重要である。しかしながら、現在のところ酸素欠損を含まないRFe₂O₄ (R = Y, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)の単結晶試料を作製することが困難であるため、強誘電性をはじめとする基礎物性の理解はいまだ十分であるとは言えない。今後は、酸素欠損を含まない単結晶試料合成法を確立し、本物質系の磁気的・電気的特性を明らかにしていくとともに、電荷秩序構造に関する結晶構造評価を行うことにより、電荷秩序構造と磁気的・電気的特性との相関を明らかにしていくことが今後の課題の1つであると言える。

謝 辞

本研究の一部は、科研費特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」(19052002)の助成および村田学術振興財団の研究助成を受けて行われたものである。

文 献

- 1) C. Kittel: Introduction to Solid State Physics, Wiley, New York (1995).
- 2) R. E. Cohen, *et al.*: *Phys. Rev. B* **42**, 6416 (1990).
- 3) N. Ikeda, *et al.*: *Nature* **436**, 1136 (2005).
- 4) N. Kimizuka, *et al.*: *J. Solid State Chem.* **40**, 109 (1981).
- 5) Y. Yamada, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **66**, 3733 (1997).
- 6) Y. Yamada, *et al.*: *Phys. Rev. B* **62**, 12167 (2000).

- 7) N. Ikeda, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **63**, 4556 (1994).
- 8) M. Tanaka, *et al.*: *Solid State Commun.* **44**, 687 (1982).
- 9) Y. Matsuo, *et al.*: *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 349 (E) (2007).
- 10) C. H. Chen, *et al.*: *J. Appl. Phys.* **81**, 4326 (1997).
- 11) 池田 直: 放射光学会誌 **19** [1], 1 (2006).
- 12) N. Ikeda, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 1526 (2000).
- 13) K. Yoshii, *et al.*: *Phys. Rev. B* **76**, 024423 (2007).
- 14) C. S. Ganpule, *et al.*: *Phys. Rev. B* **65**, 014101 (2001).
- 15) M. Tanaka, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **53**, 760 (1984).

プロフィール

松尾祥史 Yoji MATSUO
大阪府立大学大学院理学系研究科
Osaka Prefecture University, Department of Physical Science
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1
1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
TEL. 072-252-1161 (5642), FAX. 072-254-9318
e-mail: s_yamatsu@p.s.osakafu-u.ac.jp
最終学歴：大阪府立大学大学院理学系研究科博士
前期課程
専門分野：固体物理, 結晶回折学
現在の研究テーマ：誘電体と相関電子系物質における構造物性
趣味：ヴァイオリン演奏, クラシック鑑賞

吉井賢資 Kenji YOSHII
日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan
TEL. 0791-58-2637, FAX. 0791-58-0311
e-mail: yoshiike@spring8.or.jp
最終学歴：東京大学大学院理学系研究科化学専攻
修士過程
専門分野：固体化合物の物性
現在の研究テーマ：固体酸化物の磁性と誘電性
趣味：育児

池田 直 Naoshi IKEDA
岡山大学理学部物理学科
Dept. Phys. Okayama Univ.
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan
TEL. 086-251-7810, FAX. 086-251-7810
最終学歴：早稲田大学理工学研究科
専門分野：固体物性
現在の研究テーマ：RFe₂O₄の物性研究
趣味：引っ越し

森 茂生 Shigeo MORI
大阪府立大学
Osaka Prefecture University
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1
1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
TEL. 072-254-9318, FAX. 072-254-9318
e-mail: mori@mtr.osakafu-u.ac.jp
専門分野：材料物理