

## 電子強誘電体の研究

### Fundamental Studies on the Electronic Ferroelectricity

研究代表者 岡山大学 池田 直

Okayama University Naoshi IKEDA

Ferroelectric materials are widely used in modern electric devices. The physics of ferroelectricity are interesting because they involve the collective behavior of electrons, which is an important issue in material science. It is known that the polar displacement of anion and cation in crystal forms the electric dipole. The coherent arrangement of the dipoles drives the development of the ferroelectricity. Such mechanism had been established through the thorough experimental and theoretical studies in recent few decades. On the other hand recently we found another mechanism for the development of ferroelectricity. A resonant X-ray scattering (RXS) study in triangular mixed valence oxide  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  proves the ordering of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$ . The supercell of the iron ions holds an electric polarization consisting of distributed electrons with polar symmetry. The electron arrangement arises from charge frustration on triangular lattice. This ferroelectricity by the electron correlation offers great potential when designing future ferroelectric devices to be coupled or controlled with the degrees of freedom of electron: charge, spin and orbital. As this phenomenon had found in very recent years we made some fundamental studies to pioneer the future basis of the electronic ferroelectricity.

#### 研究目的

$\text{RFe}_2\text{O}_4$  は、電子相関とそのフラストレーションから電子密度の極性な秩序構造が発生し、電子誘電体と呼ばれる新しい誘電体となる。電子誘電性は今まで知られていた誘電体とその発現原理が異なるため、さまざまな目新しい特性を持つ可能性がある。だがこの物性は発見されたばかりであるため、通常の誘電体に比べて何が不得手で、何が優れているのかは十分に明らかではない。 $\text{RFe}_2\text{O}_4$  では酸素欠損量と  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  の存在比が密接に関連するため、三角格子上の電子間相互作用のフラストレーションを酸素欠損量によって制御することが可能である。そこで本研究では、精密な結晶合成とともに、この誘電性の発現起源である電荷フラストレーションを制御し、電子誘電性が通常の誘電体に近い特性を持ち得る可能性と、一方で電荷フラストレーションが崩れた場合に現われる特異な物性の解明を行った。

#### $\text{RFe}_2\text{O}_4$ について

本研究で取り上げる  $\text{RFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{R}=\text{Y}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$ ) は、fig. 1 に示すように三角格子層が  $c$  軸方向に積層した結晶構造をもつ。三角格子の積層には三つの自由度があり、それに相当するイオン位置を上部に A, B, C で示してある。たとえば R (希土類イオン) は下から、B, A, C とその位置を変える。この希土類イオンの三角格子に挟まれ、二枚の鉄イオンの三角格子層がある。この鉄イオン層は W-Layer と呼ぶ。鉄イオン位置も下から AB, CA, BC と位置を変える。各鉄イオンには上下の一つずつ、そしてほぼ同

じ高さに三つの酸素イオンが配位し三方両錐の酸素 5 配位となっている。この結晶構造は六方晶系で書いてあるが、電荷秩序がおこらない高温相では菱面体系 ( $R\bar{3}m$ ) で記述される。

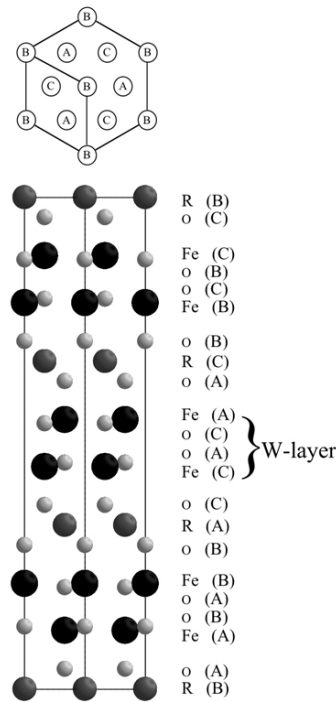


Fig. 1 Crystal structure of  $RFe_2O_4$ . A, B and C represent the relative atomic position in triangular lattice. Black and grey balls represent iron and oxygen ions, respectively. Double iron layer is illustrated as W-layer.

三角格子である事に加え、この物質は  $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  が共存する混合原子価系である。さらに低温で鉄イオンスピンの秩序化し、また  $Fe^{2+}$  は酸素 5 配位のもと軌道の自由度も有する。ここで議論する強誘電性は鉄イオン電荷の自由度に起因する物性である。三角格子上に存在する同数の  $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  について考える。平均価数  $Fe^{2.5+}$  から考えた場合、 $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  はそれぞれ、電子の過剰（負電荷）、欠損（正電荷）の役割を持つ事になる。このため二つのイオンは相互に隣接することがエネルギー的な利得となる。だがここでは三角格子であるため、 $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  の配列では三角格子上の反強磁性 Ising Spin と類似な電荷配列に関する相互作用のフラストレーションが起こると考えられる。

この三角格子上の電荷間の競合する相互作用をフーリエ解析することで考察すると、正電荷 ( $Fe^{3+}$ ) と負電荷 ( $Fe^{2+}$ ) の配置は相互に折り合いをつけ、結晶単位胞よりも広がった超格子構造をとって規則配列を作る。正電荷と負電荷は二次元三角格子上で、(1 1) 方向に単位胞の 3 倍の周期を構成する様に配置することがエネルギー的に最も安定である。この解析から示される W-layer 内の  $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  の電荷規則配列モデルを fig. 2 に示す。

Fig. 2 では、平均結晶構造の単位胞は細い実線である。また  $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  が構成する超格子単位胞を灰色の線でかこってある。興味深い事にこの電荷秩序構造は対称中心を消失している。手前の（上部の）三角格子層は正電荷 ( $Fe^{3+}$ ) が、奥の（下部の）それは負

電荷 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) が過剰であるために電気双極子を持つことになる。このためこの電気双極子が規則配列をすれば誘電体となることが予想される。この電気双極子は、今までの誘電体には必須であった陽イオンと陰イオンのペアが作るものではない。 $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  の濃淡がそのまま電子の多少となり、平均電荷数からのずれが陰イオンを伴わない電気双極子を形成する。

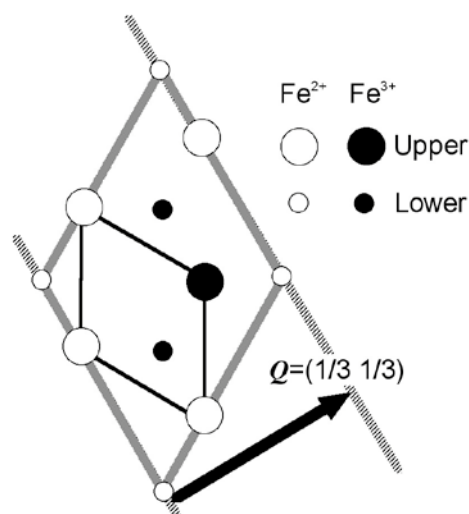


Fig. 2 Charge ordering model of  $\text{RFe}_2\text{O}_4$  in the W-layer. Black and white circles indicate  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$ , respectively. Larger and smaller circles show the upper and lower position of iron ions along  $c$ -axis, for in the W-layer. Thin black line is the chemical unit cell. Super structure cell is shown in grey line. The presence of the supercell coincides with that of wave vector  $Q=(1/3 \ 1/3)$ .

この電荷秩序に対応する超格子構造は、回折実験より、 $(n/3 \ m/3 \ l+1/2)$ 、 $(n, m, l$  は整数)と指数付けられる超格子点として X 線、中性子、電子線を用いて 330K 以下で観測されていた。またこの温度以上では  $(n/3 \ m/3 \ l)$ 、 $(n, m$  は整数、 $l$  は連続数)で表されるブラッグストリークになる。これは 500K 以下でまず  $ab$  面内 (W-layer 内) だけの電荷秩序が形成され、330K 以下ではこの  $ab$  面内の相関に加えて  $c$  軸方向の相関が発達することを表す。

対称中心を持たない極性な電荷秩序超格子は新たな誘電性の発現として興味深い。この存在をより強く証拠づけるために放射光を用いた共鳴散乱実験を行った。共鳴散乱実験は、非共鳴 X 線、中性子、電子線回折にくらべ電荷秩序超格子の存在を直接示すことができる。

Fig. 3 に超格子点  $(1/3 \ 1/3 \ 6.5)$  の回折線強度の鉄イオン K 吸収端近傍でのエネルギー変化を白丸で示す。測定は入射 X 線エネルギーをわずかに変化させながら、各エネルギーごとに回折計位置をとりなおし回折線の積分強度を測定することで行なう。試料は結晶面が  $c$  軸に鉛直となるように切り出している。吸収端での回折信号の測定は著しい強度の変動があり吸収補正が必須である。吸収補正を行いやすくするため、入射 X 線と回折 X 線がいつも等距離を通過するようにした。具体的には、4 軸回折計のファイ軸と結晶の  $c$  軸 (試料表面の法線ベクトルに平行) が平行になるようにした。また回折線積分強度の測定は、常に  $\theta/2\theta$  スキャン (bisecting scan) で行っている。図のデータは吸収補正を行った後のものである。

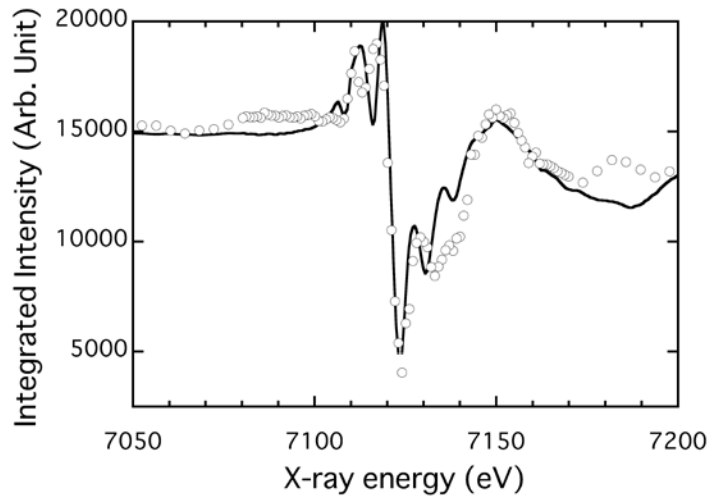


Fig. 3 X-ray energy dependence of the integrated intensity for (1/3, 1/3, 6.5) at 15K is plotted with circles. Line is the difference of the in-phase component of anomalous X-ray scattering factor between  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$ .

データは吸収端直下で極大を直上で極小を示す。また図中には  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  について、原子散乱因子の異常分散項のうち  $f'(E)$  についての差 ( $\Delta f'$ ) を実線で示してある。この  $\Delta f'$  は、 $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  と同形でかつ  $\text{Fe}^{2+}$  または  $\text{Fe}^{3+}$  だけしか含まない  $\text{LuGaFeO}_4$  と  $\text{LuCoFeO}_4$  の X 線吸収係数から Kramers-Kronig 変換によって求めたものである。図の測定データは、 $\Delta f'$  項が確かに存在することと同時に、無視しえない量の異常分散項ではない原子散乱因子が存在することを表している。結晶構造因子を構成する原子散乱因子に、 $f'_{2+}$  と  $f'_{3+}$  との差 ( $\Delta f'$ ) が存在していることは、この超格子が  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  の規則配列によって構成されている事を証明している。またエネルギー依存のない項が存在することは、電荷秩序化に結合する格子の歪みが存在する事も表す。価数の異なるイオンはイオン半径も異なり、電荷秩序化が起こるときに遷移金属周辺の酸素イオンの微小な変異も引き起こしているためである。

この共鳴散乱実験の結果は、fig. 2 に示した W-layer の電荷配列が存在することを表す。さらに  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  が誘電体として振る舞うこと、そしてこの電荷秩序による超格子点が誘電異常を示す温度から現れることから、この物質が極性的な電荷秩序の発生を起源とする誘電体であることが結論づけられる。

この誘電性は  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  の電気分極を持つ秩序配列に起源があるわけだが、 $\text{Fe}^{2+}$  が負電荷の、 $\text{Fe}^{3+}$  が正電荷の役割があるため、電子交換によってその分極の向きが入れ替わることになる。これは今までの誘電体の分極の反転機構とは決定的に異なる。今まで知られていた誘電体は、陽イオンと陰イオンがそれぞれ正電荷と負電荷の役割をもち、分極形成やその反転にはイオン位置の変位を必ず伴う。分極反転過程は格子系に結合するために、たとえば膨大に反転を繰り返す場合、格子に集積される不可逆な痕跡との結合から反転特性の劣化が起こる可能性がある。また極小型の誘電体を集積する場合には、基盤との格子結合を慎重に選択しないと、分極そのものが形成されにくくなる場合がありうる。一方ここに述べた電荷秩序型の分極であれば、イオンではなく同種イオン上の電子の交換だけで分極を反転することができる。これはこれまでの誘電体にくらべて、高速度の分極反転、高集積化が容易になる可能性を秘めている。また従来の研究によるとこの物質の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。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)としても期待できる。

## 研究経過

このように魅力的な可能性を持つ新しい誘電性ではあるが、基本的な特性の解明すら明らかではない。また分極を示す電子の秩序分布といった原理一つをとっても、たとえば電子が動くことは誘電特性と同時に、電気伝導が重畳する可能性がある。ここだけでも通常の誘電体との対比がどうなるのか疑問を解明しなければならない。このため本研究ではまず手始めとして  $RFe_2O_4$  の基本的な特性の解明を試みてきた。

この電子誘電性は、三角格子上での電子間クーロン相互作用の競合によって電気分極を持つ電荷秩序化が起ると考えられる。そのばあい電気伝導性は、電荷秩序化の不完全な領域があれば、そこに存在する電子が電導を担う可能性がある。誘電体としての機能を期待するなら、電気伝導は下がるのが望ましい。電荷秩序化をより広い領域に発達させることができれば電導度を下げることができるかもしれない。とくにこの物質の電荷秩序化は、三角格子上のフラストレートするクーロン相互作用に起源があるはずで、これを精密に制御すれば、電気伝導や誘電性など物性が変化することが期待される。

このため本研究では、 $RFe_2O_4$  の電荷フラストレーションに変調を加えることを目的としていくつかの精密な試料合成を行った。

## $LuFe_2O_4$ の酸素欠損量によると電荷秩序と誘電特性の変化

$Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  の存在量は酸素欠損に敏感に依存する。これは試料合成時の酸素分圧によって制御しうするため、 $CO_2/CO$  比を変えて合成時の酸素分圧を制御することで試料の酸素欠損量をコントロールし、焼結体試料を合成した。その後電荷秩序構造の特徴を電子線回折像によって観察することを試みた。

$LuFe_2O_{4-\delta}$  多結晶試料を、 $CO_2:CO=2:1, 3:1, 3.5:1$  の混合比において 1200C で作製した。それぞれの試料を以下 (2), (3), (3.5) の試料と呼ぶことにする。(2) の試料において得られた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。このことにより、(2) 試料においては  $[110]$  方向へ 3 倍周期を持つ長周期構造が存在し、 $[001]$  方向には相関を持たない 2 次元的な秩序構造が形成されていることを示している。一方 (3) 試料において得られた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が見られる。また、ストリーク状散漫散乱中に、 $(1/3\ 1/3\ 1/2)$  位置に強度極大を持つことがわかった。このことは、 $[110]$  方向へ 3 倍周期を持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示している。また (3.5) 試料では、電子回折パターン中には  $(1/3\ 1/3\ 1/2)$  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。このことは、 $[110]$  方向に 3 倍周期の長周期構造が形成されると同時に、 $[001]$  方向にも 2 倍周期を持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、(2) 試料においては W 層内でのみ三角格子上で  $Fe^{2+}$  と  $Fe^{3+}$  の秩序化に伴う  $[110]$  方向に 3 倍周期をもつ 2 次元的な電荷秩序構造が形成されている一方で、(3) 試料および (3.5) 試料においては、W 層間の相互作用によると考えられる  $[001]$  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。試料合成時の  $CO_2/CO$  比が大きいほど平衡酸素分圧は高くなってゆくが、この値が大きい試料ほど酸素欠損が少なく電気伝導も低くなる事もわかった。

この結果を踏まえて、 $CO_2/CO$  比を大きくしながら高品位  $LuFe_2O_4$  単結晶試料の合成を行った。このために単結晶育成装置を整備した。

CO<sub>2</sub>/CO 比を変えて作成した単結晶は、誘電応答特性や電気伝導特性が系統的に変化する。c 軸方向の誘電分散で求めた活性化エネルギーの変化と室温における電気抵抗値の変化を fig. 4 に示す。図の横軸は、単結晶作成時の CO<sub>2</sub>/CO 混合比である。とくに注目されるのは、室温の電気抵抗率が 10<sup>8</sup> 乗 Ω·cm 程度となる試料が見られることである。この値は、いまのところ試料の作成ロットや電導度の測定方法によって確定せず正確な見積もりに至っていない。しかし電子誘電体においても高い絶縁性能を実現しうる可能性を示す結果と考えている。

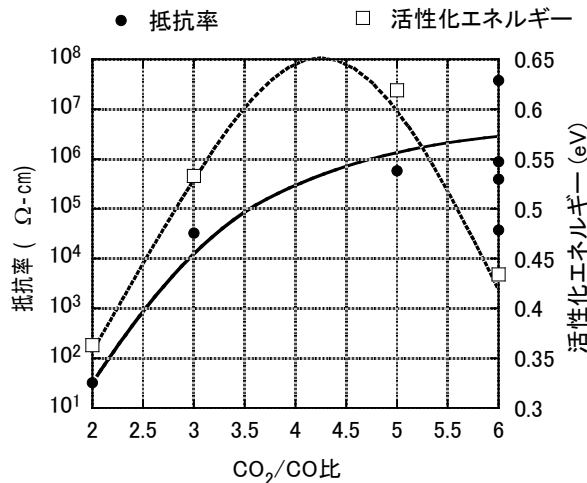


Fig. 4. Gas mixture variation for the activation energy and the resistivity for LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> single crystal along c-axis. Lines are guide for eyes. The resistivity data are shown for the room temperature measurement.

#### Yb<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M=Ca<sup>2+</sup>, Ce<sup>4+</sup>) の物性

LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の研究では酸素欠損の微量な調整により電荷競合のバランスをわずかに変化させ、電荷秩序の発達に伴う電導度の変化を探る研究が行われた。より大きく電荷競合バランスを変調させることは、電荷競合現象を崩壊させるため興味深い。

そこで希土類サイトを二価あるいは四価のイオンで置換することを目的として、Yb<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と Yb<sub>1-x</sub>Ce<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の合成を試みた。希土類を四価のイオンである Ce<sup>4+</sup> で置換した場合、Fe<sup>2+</sup> の存在量が増加することになる。また Ca<sup>2+</sup> で置換した場合は Fe<sup>3+</sup> が増加する。どちらも試料も 1200°C で CO<sub>2</sub>/CO=1 の条件で焼結体試料を作成した。粉末 X 線回折から求めた格子定数の変化から固溶域を決定している。熱残留磁化の温度変化測定によれば、Ca ないしは Ce の固溶に伴い磁気転移温度は低下する。交流誘電応答特性の測定から、活性化エネルギーと室温での抵抗率について、ドーピング量変化に対してまとめた結果を fig. 5 に示す。誘電応答の活性化エネルギーは Ca または Ce ドープに伴い低下する傾向がある。誘電性・磁性測定より、希土類を二価あるいは四価のイオンで置換することにより、電荷秩序が崩壊してゆく様子を示す結果を得た。

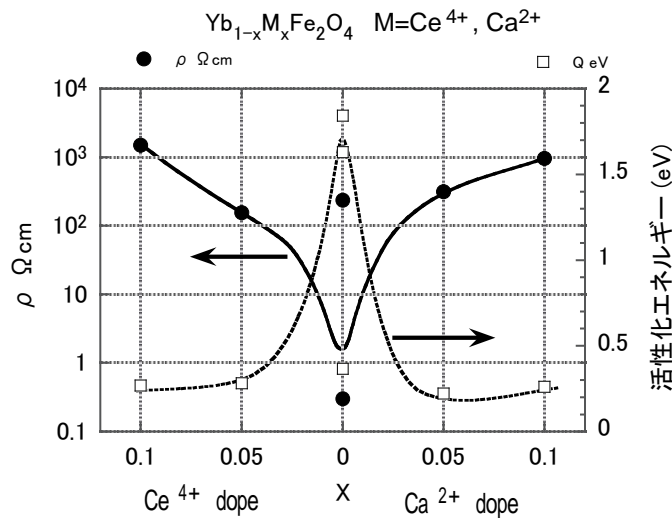


Fig. 5. Doping variation for the activation energy and the resistivity for  $\text{Yb}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Yb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  poly-crystal. Lines are guide for eyes. The resistivity data are the results at room temperature.

$\text{RFe}_2\text{O}_4$  の電荷秩序は  $\text{Fe}^{3+}$  と  $\text{Fe}^{2+}$  の三角格子上的電荷間フラストレーションで決定されるが、最近の第一原理計算からは電子相関が弱い場合には  $\text{RFe}_2\text{O}_4$  は金属的に振る舞うことが考察されている。実験結果のうちドーピングによる活性化エネルギーの低下は、電子相関の競合バランス崩壊による電荷秩序領域が縮小し、電子移動度の回復を示すものと考えられる。また低温での電気抵抗もドーピングに伴い低下することも確かめられた。しかしながら室温の電気抵抗率については、ドーピングにより上昇するようすが見られる。室温域での抵抗の増加は、単純な電荷間クーロン相互作用だけではなく、なにかしらの別の作用が助長され電導を妨げたものと考えられるが、詳細は検討中である。

### 最後に

本研究援助によって電子誘電体  $\text{RFe}_2\text{O}_4$  についての研究体制が整備された。現段階では基本特性の確認に力点が置かれている。このうち特に室温域での特性の精査は、応用を念頭に置いた場合重要である。本研究に見られたこの物質の室温の電導特性は、競合する電荷間相互作用という視点だけでは解釈し得ないことが明らかになりつつある。またこれらの結果と矛盾しない三次元電荷秩序模型を現在構築中である。

### 研究発表

#### 口頭発表

1. Naoshi Ikeda, Takamasa Michiuchi, Yusuke Yokota, Hironori Hayakawa, Yoji Matsuo, Shigeo Mori and Kenji Yoshii; "Ferroelectric Properties of  $\text{RFe}_2\text{O}_4$  by the Charge Ordering", 13th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, Sep. 2007, Awaji, Japan
2. N. Ikeda, Y. Matsuo, S. Mori and K. Yoshii; "Electronic Ferroelectricity from Charge Ordering in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ", The 16<sup>th</sup> International Symposium on the Application of Ferroelectrics (ISAF2007), Nara, Japan, May 27-30, 2007. (Invited)
3. Naoshi Ikeda, Shigeo Mori and Kenji Yoshii; "Ferroelectricity from Electron Ordering", Material Research Society, Boston USA, 2006, 11/27-12/1. (Invited)

4. K. Imamura, Y. Horibe, T. Yoshimura, N. Fujimura, S. Mori, N. Ikeda ; “Conduction Characteristics of Charge Ordering Type Ferroelectrics,  $\text{YFe}_2\text{O}_4$ ”, Material Research Society, Boston USA, 2006, 11/27-12/1
5. Naoshi Ikeda, Shigeo Mori and Kenji Yoshii; “Ferroelectricity from Valence Ordering in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, 8th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity, Tsukuba, Japan, 2006, 5/15-5/19. (Invited)
6. Naoshi Ikeda; “Ferroelectricity from the Charge Ordering in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, International workshop on X-ray scattering and electronic structures, Harima Japan 2006, 6/5-6/7. (Invited)
7. K. Kakurai, N. Ikeda, S. Nagai, M. Matsuda, Y. Ishii, K. Ohwada, T. Inami, K. Yoshii, Y. Murakami, H. Kito and Y. Yamada; “Magnetic ordering process in the charge-frustrated ferroelectric system  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ ”, 17th International Conference on Magnetism, Kyoto Japan, 2006, 8/20-8/25
8. N. Ikeda, S. Mori, Y. Horibe and K. Yoshii; “Ferroelectricity of Electronic in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, Kyoto Conference on Solid State Chemistry, Kyoto Japan, 2006, 11/14-11/18.
9. Naoshi Ikeda, Shigeo Mori and Kenji Yoshii; “Ferroelectricity from Polar Charge Ordering in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, Material Research Society Japan, Tokyo, Japan, 2006, 12/7-12/9. (Invited)
10. K. Imamura, Y. Horibe, T. Yoshimura, N. Fujimura, S. Mori, N. Ikeda, “ELECTRICAL CONDUCTION PROPERTIES OF CHARGE ORDERING TYPE FERROELECTRICS  $\text{YFe}_2\text{O}_4$ ”, The 6th Japan-Korea Conference on Ferroelectricity, Sendai Japan, 2006, 8/17-8/20.
11. 池田直; “電子分布による新しい強誘電体  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, 電子セラミック研究会 (東京)2006年11月11日(招待)
12. 池田直; “最近見いだされた新しい機能を持つ電子集団”, 第18回中国四国伝熱セミナー(岡山)2006年9月8日-9月8日(招待)
13. 池田直; “ $\text{RFe}_2\text{O}_4$ の電子配列強誘電性”, 東京工業大学応用セラミックス研究所講演会(横浜)2006年1月16日(招待)
14. 池田直; “電子整列型強誘電体  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, 北海道大学エンレインソウの会(札幌)2006年6月9日(招待)
15. 今村謙、堀部陽一、吉村武、藤村紀文、森茂生、池田直; “ $\text{YFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ の電気的・磁気的特性における酸素欠損の影響”, 平成18年度春季第53回応用物理学関係連合講演会(東京)2006年3月25日
16. 今村謙、堀部陽一、吉村武、藤村紀文、森茂生、池田直; “電荷秩序型強誘電体  $\text{YFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ の電気伝導特性”, 平成18年度秋季第67回応用物理学学会学術講演会(滋賀)2006年8月30日
17. 今村謙、堀部陽一、吉村武、藤村紀文、森茂生、池田直; “電荷秩序型強誘電体  $\text{YFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ の電気伝導特性”, セラミックス協会関西支部第1回学術講演会(京都)2006年7月20日

## 誌上発表

1. K. Yoshii, N. Ikeda and A. Nakamura; “Magnetic and dielectric properties of frustrated ferrimagnet  $\text{TmFe}_2\text{O}_4$ ”, *Physica B* **378-80**, 585-586 (2006).
2. Y. Matsuo, Y. Horibe, S. Mori, K. Yoshii and N. Ikeda; “Doping effect on the charge ordering in  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ ”, *J. Mag. Mag. Mat.* **310**, E349-E351 (2007).
3. K. Yoshii, N. Ikeda, S. Mori; “Magnetic and dielectric behavior of  $\text{TmFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{TmFeCuO}_4$ ”, *J. Mag. Mag. Mat.* **310**, 1154-1156 (2007).
4. K. Yoshii, N. Ikeda, Y. Matsuo, Y. Horibe and S. Mori; “Magnetic and Dielectric Properties of  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{RFeMO}_4$ , and  $\text{RGaCuO}_4$  (R=Yb and Lu, M=Co and Cu)”, *Phys. Rev.* **B76**, 024423/1-12 (2007).
5. Naoshi Ikeda, Shigeo Mori, Kenji Yoshii; “Ferroelectricity from Valence Ordering in  $\text{RFe}_2\text{O}_4$ ”, *Ferroelectrics* **348**, 38-47 (2007).
6. 池田直; “共鳴 X 線散乱で見つけた強誘電体”, *日本放射光学会誌*, **19**, (2006) 15.