

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22H01942・23K23210

研究課題名（和文）電子強誘電体の逐次電荷秩序相転移の研究

研究課題名（英文）Study in the successive transition of the charge-ordering phase in electron ferroelectrics

研究代表者

池田 直（IKEDA, Naoshi）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：00222894

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,810,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、イオン変位を伴わない電気分極の発生を特徴とする「電子強誘電体」の発生メカニズムと新機能解明を目的とした。希土類複電荷鉄酸化物RFe2O4を中心に、d電子間相互作用の競合が電子ストライプ構造形成の起源とする理論モデルを検証した。特にYFe2O4の高品質単結晶や薄膜を合成し、パルス応答、磁場中X線回折、THz応答などの実験を行った。これにより、低エネルギーでの超高速分極反転、非磁性領域での巨大磁歪効果、レーザー照射による電荷秩序融解の時間発展、300K付近の未知の相転移などを発見し、電子強誘電体の応用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、電子強誘電体のが示す優れた特性の基礎理解が進んだ。本研究の成果は、強相関電子系理解に立脚した新しい強誘電体の実在が明瞭になっただけでなく、本研究で見出した新現象から、近未来の文明発展の基礎を得た。例えば、極めて低エネルギーで動作する強誘電体デバイス、psecレベルで超高速応答する強誘電体デバイス、現在のMRAMなどに比べ10桁以上低いエネルギーでのメモリーデバイス、新しいTHz発生源、新原理で動作する巨大磁歪材料などである。

研究成果の概要（英文）：This research explores "electron ferroelectrics," exhibiting electric polarization from electron redistribution without ion displacement, promising ultra-low-energy and high-speed applications. The study aims to understand their origin and functions in rare-earth double-charge iron oxides (RFe2O4), particularly verifying that competing d-electron interactions drive electron stripe structures. Experiments on high-quality YFe2O4 crystals and films revealed precise control of polarization domains using short pulses, leading to a low-energy memory function superior to existing MRAM. Other findings include observing polarization hysteresis, a giant magnetostrictive effect in non-magnetic regions linked to spin fluctuations, and analyzing charge order melting by laser irradiation on distinct electronic and phononic timescales. An unknown phase transition near 300K was also identified. These results deepen the understanding of electron ferroelectricity and its potential applications.

研究分野：固体物性

キーワード：電子強誘電体 electron ferroelectrics, RFe2O4 LuFe2O4 YbFe2O4 YFe2O4

1. 研究開始当初の背景

我々は、電子強誘電体とよばれる新種の強誘電体が、常温以上 500K まで実在することを提案し、またその存在を証明してきた。現在広く用いられ文明を支えている強誘電体は BaTiO₃ などに代表されるが、その機能の起源である電気分極は、陽イオンと陰イオンの変位の発生により発現している。一方電子強誘電体では、電気分極が遷移金属上の電子の濃淡だけで発現しイオン変位を伴っていない。

このイオン変位を必要としない電気分極は、分極反転過程において原子の振動を伴わず電子交換だけで分極反転する特徴がある。このことから、極めて低エネルギーで動作する強誘電体応用デバイスや、超高速領域で動作する機能性強誘電体材料を実現することが期待されている。

我々は材料発見当初から、このような電子強誘電性への興味を抱き、その実在の解明並びに、特徴的な機能の存在を明らかにすることを目的とした研究を重ねてきた。その中から、電子強誘電体の psec レベルの超高速応答、省電力分極反転、THz 発生源動作、マルチフェロイック機能などの魅力的な新機能を見出し報告してきた。

また当時理論考察からは、電子の濃淡だけで形作られる電気分極の形成起源は、鉄 d 電子間の相互作用とその競合過程の結果として現れることが示されていた。

このように本研究開始時点で、この極めて新規な電気分極には、極めて多くの魅力があることがわかっており、またその機能の発現起源は、鉄 d 電子間の相互作用とその競合過程であることも示されていた。この相互作用競合の結果、鉄イオン三角格子上に電子のストライプ配列が出現し、その配列周期が基本格子の 3 倍となることで電気分極が形成される。

しかし理論と実験両面で考察を掘り下げたところ、この三角格子上の電子のストライプ配列は 3 倍だけでなく、2、4、7 倍といった、異なる周期配列も存在することを突き止めた。これは、鉄 d 電子間の相互作用とその競合において、競合バランスの変化により出現しうる。

このように、電子強誘電体には際立った優れた特性を持つが、同時にその発現起源は未解明な仮説に立脚していた。電子強誘電性は近未来に应用利用されると想定しうるが、その発生機構は精密に理解しておかないと、応用基盤が危ういものとなる。このためこの現象発生のミクロな実証的理解が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究は、電子強誘電性を示す希土類複電荷鉄酸化物 RFe₂O₄ を中心とし、電子間相互作用のバランスを変調することで、3 倍以外の電子ストライプ構造発生を調べ、その周辺で起こる物性異常を精査することで、電子強誘電性発現の起源が「鉄 d 電子間相互作用の競合」にあるという理論モデルを検証し、さらに新機能物性の発見を目的とした。

特に d 電子間相互作用のバランスは、RFe₂O₄ 系のなかでも相対的に a 軸長さが長く c 軸長が短い、YFe₂O₄ において、顕著な効果が起こることが期待され、この材料の良質な単結晶合成が重要な目的となった。また加えて、RFe₂O₄ の数々の特徴を実用領域においても引き出せるか確認することも目的であり、RFe₂O₄ 単結晶薄膜の合成も進め、薄膜結晶の機能確認も進めた。

これから、電子強誘電体の低温の逐次電荷相転移近傍に注目し、極性電荷秩序(強誘電)相と非極性電荷秩序相の境界領域、さらにそれに重なる磁気相転移点での、誘電応答、磁気応答、光応答解析技術を開発しながら、最終的に Fe イオン間相互作用に役割を持つと示唆されるスピン揺らぎ効果の役割を、世界に先駆け総合的に解明することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、ここまで磨いてきた精密単結晶合成技術を、さらに進化させた。ここから YFe₂O₄, LuFe₂O₄ 単結晶の合成、YbFe₂O₄ 単結晶薄膜の Rf スパッタ法による合成を進めた。

得られた単結晶について、パルス応答を含む輸送特性解析、磁場中 X 線回折実験、THz 電磁波応答実験、非線形光学応答解析実験などを進めた。そこから多くの発見があったが、いずれも電子のストライプ構造が、パルス外場や、磁場により変調する現象である。パルス外場応答は、パルス電場のみならず、THz 電磁波や、パルスレーザー励起においても、特異な応答を示すことを発見した。

この新発見の現象を精密に理解するために、磁場中の放射光回折実験と中性子回折実験を計画し実施した。パルスレーザー励起に伴う電荷秩序ドメイン応答は、時分割放射光回折実験を通して、フォノンと電荷秩序応答が異なる時間スケールで振る舞うことを確かめる実験を行った。

4. 研究成果

得られた成果は(1)非極性・極性電荷秩序相転移、(2)パルス電場への分極応答、(3)パルス電場による分極反転観測、(4)非磁性領域での巨大磁歪効果、(5)レーザー照射に伴う電荷秩序融解の時間発展、(6)300K 付近の未知の相転移の発見、などに分類されるため、それらについて概要を報告する。

(1) 非極性・極性電荷秩序相転移

精密に合成された YFe₂O₄ 単結晶は、降温とともに磁気転移直上付近から非線形光学応答 (SHG) の増大を示した。さらに磁気転移温度以下で、電荷例列ストライプが格子の 3 倍構

造から 7 倍構造になるとともに SHG 信号が消失した。これから、電子型電気分極がスピンゆらぎの発達とともに増強するという理論予想を証明した。さらにで対称中心を持つ電荷整列構造は電気分極を持たないことを証明した。

(2) 電子型電気分極のパルス電場応答

電子型強誘電体では、変位型強誘電体のような PE ヒステリシスループを描こうとすると、電子配列が乱され、非線形電気伝導が発生しヒステリシスループが描けない。このためパルス電場応答を調べた。その結果、 $1\ \mu\text{sec}$ レベルの短時間パルスを用いると、電気分極が応答するが、電荷整列全体構造は崩壊しないという条件が存在することを見出した。この条件下で、結晶中の電気分極ドメインの存在比を制御することに成功した。

ドメイン分布が変化する前後について、弱電場で試料の電気抵抗を評価すると、高抵抗状態から、低抵抗状態に遷移し、その値を保持することを見出した。これはメモリー動作である。メモリー書き込み時に用いるエネルギーは、既存の mram などと比べ 10 桁以上低エネルギーであることを見出した。

(3) パルス電場による分極反転観測

効果的なパルス電場条件を用いれば、電子型の電気分極が応答することがわかったため、電場に対する電気分極の履歴のある応答の観測を目的とし、パルス電場中の SHG 観測を行った。SHG シグナルの電場強度依存は、PE ループの二次成分と一致する特徴的な凹構造を持つ事の観測に成功した。

(4) 非磁性領域での巨大磁歪効果

単結晶の格子定数は、280K 付近で磁場に対して特異的に応答することを見出した。この格子定数の変化量と加えた磁場の強さから見積もられる磁歪定数は、 $0.1\%/T$ を超えており、超磁歪現象と分類される。更にこの現象が、非磁性領域で見出されたことが興味深い。これは、(1)に述べたスピン秩序ではなく、スピンゆらぎにより安定化している電荷秩序ドメインが、磁場印加によりゆらぎが抑制され、その結果電気分極ドメインが不安定化し、それから格子の長さに変化が起こったと解釈できる。これは電子強誘電性の発生を説明する理論モデルとも整合する。この現象は極めて新規であり、さらなる追試のため、PF の BL-3A での磁場中回折実験、JRR3 における磁場中の磁気散漫散乱の変化の観測を実施した。その結果、非磁性領域における短距離スピン秩序に起因した磁気散漫散乱の存在と、磁場による短距離スピン秩序の現象の確認まで行った。現在研究費がないためこの研究は中断しているが、予算が復活次第再開する。

(5) レーザー照射に伴う電荷秩序融解の時間発展

RFe204 の電荷秩序起源である d 電子間相互作用を変調させるために、鉄 d 電子が持つ、 1.5eV 付近のバンドギャップに相当するパルスレーザーを入射し、電子間相互作用を変調させた場合、電荷整列構造がどの様に崩壊するのかを、時分割回折実験を PFAR-NW14 で実施し解析している。鉄イオン励起に伴い電荷整列の秩序長さが減少するが、その効果の伝播は、まず電子間相互作用の減少が起こり、遅れてフォノン由来の熱伝搬が起こることを解明した。いずれも 0.1psec スケールで発生することを確認した。

(6) 300K 付近の未知の相転移

上記(4)に述べた非磁性相磁歪の効果は、300K 付近から低温で顕著である。この温度付近で、電気抵抗率の温度変化の不連続や比熱の異常があることを確認した。300K というのは、測定技術的にちょうど見過ごされがちな温度領域であるため、この磁歪効果の起源の解明に繋がらうることとして、多様な測定から精査を続けている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Adachi Hiroto, Ikeda Naoshi, Saitoh Eiji	4. 巻 107
2. 論文標題 Ginzburg-Landau action and polarization current in an excitonic insulator model of electronic ferroelectricity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155142(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.155142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu Hongwu, Okimoto Yoichi, Morita Atsuya, Shimanuki Shuhei, Takubo Kou, Ishikawa Tadahiko, Koshihara Shin-ya, Minakami Ryusei, Itoh Hirotake, Iwai Shinichiro, Ikeda Naoshi, Sakagami Takumi, Nozaki Mayu, Fujii Tatsuo	4. 巻 16
2. 論文標題 Nonlinear Optical Properties in an Epitaxial YbFe2O4 Film Probed by Second Harmonic and Terahertz Generation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1989(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16051989	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Horigane Kazumasa, Tadokoro Masayuki, Eguchi Ritsuko, Ishii Hirofumi, Nakamura Shinichi, Kambe Takashi, Ikeda Naoshi, Goto Hidenori, Kubozono Yoshihiro, Akimitsu Jun	4. 巻 62
2. 論文標題 Structural Characterization of Graphite Analogue BC ₂ Synthesized Under Various Conditions and Its Application to Ti Intercalation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 19466 ~ 19473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.3c02405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu H., Fukada Y., Nishida G., Takubo K., Ishikawa T., Koshihara S., Ikeda N., Okimoto Y.	4. 巻 8
2. 論文標題 Ultrafast anisotropic polarization dynamics of electronic ferroelectric LuFe2O4	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 064402-064402-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevmaterials.8.064402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Murase S., Yoshikawa Y., Fujiwara K., Fukada Y., Teranishi T., Kano J., Fujii T., Inada Y., Katayama M., Yoshii K., Tsuji T., Matsumura D., Ikeda N.	4. 巻 162
2. 論文標題 Valence control of charge and orbital frustrated system YbFe ₂ O ₄ with electrochemical Li+ intercalation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 110468 ~ 110468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2021.110468	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagata Tomoko, Ikeda Naoshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Electrical resistance switching of YbFe ₂ O ₄ single crystal bulk	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025349-025349-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0194423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukada Yukimasa, Aoyagi Yumito, Yokoyama Misaki, Horibe Yoichi, Kano Jun, Kaneda Miyu, Fujii Tatsuo, Yoshigoe Akitaka, Kobata Masaaki, Fukuda Tatsuo, Yoshii Kenji, Ikeda Naoshi	4. 巻 54
2. 論文標題 Synthesis of Carbon Nanowalls using Plasma-Irradiated Solid Carbon and Absorption of Cs in Water	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 686 ~ 692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11664-024-11586-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 朴 規相、矢野 優太、松田 里佳子、于 洪武、池田 直
2. 発表標題 電気を使わないテラヘルツメモリ材料
3. 学会等名 岡山大学 R&D Showcase, 岡山大学, 12月3日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤井憂羽葉・藤永葉名・大若亜未・那須美沙都・深谷亮・Le Thi My Nguyen・于洪武・沖本洋一・狩野旬・池田直・藤井達生
2. 発表標題 光照射によるYbFe204薄膜の電荷秩序構造の融解過程の観察
3. 学会等名 日本化学会中国四国支部大会、岡山大学、11月16日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 于洪武
2. 発表標題 新奇電子強誘電体RFe204 (R=希土類)を用いた分極反転と非線形光学を用いた新機能探索
3. 学会等名 日本電子材料技術協会第61回秋期講演大会、10月28日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Ikeda
2. 発表標題 (Invited) Correlation among magnetic field, spin fluctuation, and electric polarization exhibited by electronic ferroelectric oxide RFe204 in nonmagnetic state
3. 学会等名 71st REIMEI Workshop: JAEA Advance Science Research Center, 11 Oct. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 深田幸正, 川崎郁斗, 福田竜生, 于洪武, 藤原孝将, 松村大樹, 吉井賢資, 池田直
2. 発表標題 鉄欠損を補填したLuFe204の本質的な電気特性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 于洪武, 矢野佑太, 朴規相, 松田里佳子, 沖本洋一, 王笑朴, 深田幸正, 藤原孝将, 中尾裕則, 深谷亮, 池田直
2. 発表標題 非線形光学及びX線から見た電子強誘電体LuFe204の分極反転メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤原孝将, 于洪武, 木村彰杜, 深田幸正, 池田直, 沖本洋一, Matthias D. Frontzek, 加倉井和久
2. 発表標題 化学当量のなYFe204の中性子回折
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 矢野優太, 于洪武, 朴規相, 松田里佳子, 沖本洋一, 深田幸正, 藤原孝将, 中尾裕則, 深谷亮, 池田直
2. 発表標題 XRD観測による電子強誘電体LuFe204の電気分極の磁場効果
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岡本寛太, 池田直, Wanli Pan, 内海雅樹, Chen Yi, 石井博文, 後藤秀徳, 久保園芳徳
2. 発表標題 アンモニアおよびアミン溶媒により金属ドーブされたFeSe化合物の超伝導の圧力依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鶴岡稜平, 進藤尚由己, 天野辰哉, 川上洋平, 伊藤弘毅, 干洪武, 腰原伸也, 藤原孝将, 池田直, 沖本洋一, 岩井伸一郎
2. 発表標題 LuFe204における強誘電分極の異方性とテラヘルツ変調
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤弘毅, 水上龍星, 于洪武, 鶴岡稜平, 進藤尚由己, 川上洋平, 腰原伸也, 藤原孝将, 池田直, 沖本洋一, 岩井伸一郎
2. 発表標題 電子強誘電体LuFe204が示す巨大テラヘルツ応答
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 深谷亮, Le Thi My Nguyen, 那須美沙都, 藤井憂羽葉, 藤永葉名, 于洪武, 中尾裕則, 野澤俊介, 足立伸一, 藤原孝将, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 時間分解X線回折による電子強誘電体YbFe204薄膜の格子-電荷秩序相関ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会 北海道大学, 2024年9月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 于洪武, 朴規相, 矢野佑太, 深田幸正, 藤原孝将, 池田直, 王笑朴, 杉澤彰宏, 島貫周平, 沖本洋一
2. 発表標題 非線形光学及びX線から見た電子強誘電体RFe204の磁場・電場特性
3. 学会等名 セラミック協会第37回秋季シンポジウム, 名古屋大学, 24年9月10日-12日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉澤彰宏、青柳晃平、于洪武、石川忠彦、腰原伸也、永田知子、池田直、 沖本洋一
2. 発表標題 電子強誘電体Lue204単結晶のバルク光起電力効果の観測
3. 学会等名 セラミック協会第37回秋季シンポジウム、名古屋大学、24年9月10日-12日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoshi Ikeda
2. 発表標題 (Plenary Lecture) Electronic Ferroelectricity in RFe204
3. 学会等名 The 14th Japan-Korea Conference on Ferroelectricity, Ritsumeikan univ., Aug. 23. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 RFe204の電子強誘電性の起源について
3. 学会等名 産業技術総合研究所電子光基礎技術研究部門講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 于洪武、王笑朴、石川忠彦、腰原伸也、深田幸正、朴規相、矢野優太、木村彰杜、池田直、藤原孝将、沖本洋一
2. 発表標題 非線形光学応答から見た電子強誘電体YFe204の磁場により電気分極の反転
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会 オンライン、2024年3月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉澤彰宏, 青柳晃平, 于洪武, 石川忠彦, 腰原伸也, 永田知子, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 電子強誘電体LuFe2O4単結晶のバルク光起電力効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会 オンライン, 2024年3月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉井賢資, 深田幸正, 福田竜生, 辻卓也, 松村大樹, 矢板毅, 池田直
2. 発表標題 ペロブスカイト酸化物およびスピネル酸化物における負の磁性
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会 オンライン, 2024年3月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinichiro Iwai, Hitotake Itoh, Ryusei Minakami, Yohei Kawakami, Tatsuya Amano, Hongwu Yu, Yoichi Okimoto, Akiito Kimura, Kosuke Fujiwara, Yukimasa Fukada, Naosi Ikeda
2. 発表標題 Ultrafast control of ferroelectric anisotropy at room temperature in LuFe2O4
3. 学会等名 APS March Meeting, March 4 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 木村 彰杜, 朴 規相, 矢野 優太, 池田 直, 沖本 洋一, 于 洪武
2. 発表標題 電子強誘電体LuFe2O4の電荷秩序ドメイン制御
3. 学会等名 日本電子材料技術協会秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水上龍星, 鶴岡稜平, 伊藤弘毅, 川上洋平, 于洪武, 腰原伸也, 沖本洋一, 井上直希, 西田銀一, 池田直, 藤原孝将, 岩井伸一郎
2. 発表標題 LuFe2O4における電子強誘電分極のコヒーレント異方性制御
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 狩野旬, 廣瀬哲, 池田直, 池田知廣
2. 発表標題 光電子収量分光法で見積もられる酸化物半導体の価電子帯上端のエネルギー準位
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張梓豪, 狩野旬, 池田直, 藤井達生, 高橋勝國, 大久保智子, 高口豊, 山神将大, 押目典宏, 濱寄容丞
2. 発表標題 層状ペロブスカイト KCa2Nb3O10およびHCa2Nb3O10の結晶構造と電子バンド構造
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 王笑朴, 于洪武, 島貴周平, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 那須美沙都, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 YbFe2O4薄膜における第二次高調波発生の角度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 于洪武, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 木村彰杜, 朴規相, 深田幸正, 池田直, 藤井達生, 那須美沙都, 藤原孝将, 深谷亮, 奥山大輔, 沖本洋一
2. 発表標題 非線形光学応答から見たYFe204の電荷整列と分極状態II
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深田幸正, 福田竜生, 吉井賢資, 木村彰杜, 朴規相, 池田直
2. 発表標題 LuFe204の電気的特性に及ぼすバイアス電場の効果
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村彰杜, 池田直, 藤井達生, 狩野旬, 深田幸正, 那須美沙都, 朴規相, 沖本洋一, 于洪武, 深谷亮, 中尾裕則, 藤原孝将, 矢野優太, 大若亜未
2. 発表標題 電子強誘電体RFe204の電荷秩序への電場による影響
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 まとめ (シンポジウム: 電子強誘電体の新展開—新現象から新機能の創出へ)
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 于洪武, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 深田幸正, 西田銀一, 井上直希, 藤原孝将, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 SHGからみた電子強誘電体LuFe2O4結晶の分極反転
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島貫周平, 于洪武, 森田敦也, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 阪上拓巳, 野崎真由, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 電子強誘電体YbFe2O4薄膜の電場印加による分極反転
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森田敦也, 于洪武, 島貫周平, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 水上龍星, 伊藤弘毅, 岩井伸一郎, 阪上拓巳, 野崎真由, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題 電子強誘電酸化物YbFe2O4薄膜のテラヘルツ波発生
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoshi IKEDA
2. 発表標題 Cross-correlated frustration of spin, charge and orbital degrees of freedom of iron in RFe2O4
3. 学会等名 異分野基礎科学研究所ワークショップ(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 電荷，軌道，スピン競合系 RFe204について，実験で見えたこと，わからないこと
3. 学会等名 東北大学物性理論セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 酸化鉄化合物RFe204の電子強誘電性について
3. 学会等名 電子材料技術協会，第59回秋季演大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 電子強誘電体RFe204の最近の理解
3. 学会等名 機能性ナノ材料研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 スピン・電荷・軌道フラストレーション系RFe204の電子強誘電性と逐次相転移
3. 学会等名 東北大学研究会 相関電子の軌道自由度から生まれる多様性と普遍性（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田直
2. 発表標題 電子の濃淡整列で実現する電子強誘電体物性の最近の理解
3. 学会等名 日本セラミックス協会 セラミックコーティングにおける界面欠陥構造の解明と制御技術（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 直希, 池田 直, 藤井 達生, 鈴木 孝義, 砂月 幸成, 狩野 旬, 深田 幸正, 高木 裕介, 西田 銀一, 木村 彰杜, 沖本 洋一, 于 洪武, 島貫 周平, 藤原 孝将, 朴 規相
2. 発表標題 電子誘電体 RFe_2O_4 の電荷秩序の外場変化
3. 学会等名 機能性ナノ材料研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西田銀一, 池田直, 藤井達生, 狩野旬, 深田幸正, 高木裕介, 井上直希, 木村彰杜, 沖本洋一, 于洪武, 藤原孝将, 朴規相
2. 発表標題 電子強誘電体 RFe_2O_4 単結晶のP-Eループ観測
3. 学会等名 機能性ナノ材料研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 彰杜, 池田 直, 藤井 達生, 鈴木 孝義, 砂月 幸成, 狩野 旬, 深田 幸正, 高木 裕介, 西田 銀一, 井上 直希, 沖本 洋一, 于 洪武, 島貫 周平, 藤原 孝将, 朴 規相
2. 発表標題 X線回折測定による LuFe_2O_4 単結晶中の超格子ドメイン観察
3. 学会等名 機能性ナノ材料研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	水上龍星, 岸田晶穂, 伊藤弘毅, 川上洋平, 于洪武, 腰原伸也, 沖本洋一, 井上直希, 西田銀一, 池田直, 藤原孝将, 岩井伸一郎
2. 発表標題	層状鉄酸化物LuFe2O4における電子強誘電分極のテラヘルツ強電場制御
3. 学会等名	日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	于洪武, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 阪上拓巳, 大田怜佳, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一
2. 発表標題	第二次高調波から見たYbFe2O4薄膜の電子強誘電性
3. 学会等名	日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	狩野旬, 池田直, 張梓豪, 大久保智子
2. 発表標題	光電子収量分光法による誘電体の価電子帯近傍の状態密度観察
3. 学会等名	日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	井上直希, 池田直, 藤井達生, 鈴木孝義, 狩野旬, 深田幸正, 高木裕介, 西田銀一, 木村彰杜, 沖本洋一, 于洪武, 藤原孝将, 朴規相
2. 発表標題	電子誘電体RFe2O4の電荷秩序の外場変化
3. 学会等名	日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 西田銀一, 池田直, 藤井達生, 狩野旬, 深田幸正, 高木裕介, 井上直希, 木村彰杜, 沖本洋一, 于洪武, 藤原孝将, 朴規相
2. 発表標題 電子強誘電体RFe2O4単結晶のP-Eループ観測
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水上龍星, 岸田晶穂, 伊藤弘毅, 川上洋平, 于洪武, 腰原伸也, 沖本洋一, 深田幸正, 池田直, 藤原孝将, 岩井伸一郎
2. 発表標題 層状鉄酸化物LuFe2O4における電子強誘電分極のテラヘルツ強電場制御
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 于洪武, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 深田幸正, 西田銀一, 井上直希, 池田直, 藤原孝将, 沖本洋一
2. 発表標題 非線形光学応答から見たYFe2O4電荷整列と分極状態の関係
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岡山大学池田研究室 https://ikedalaboratory.wordpress.com 岡山大学 池田研究室ホームページ https://ikedalaboratory.wordpress.com

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤井 達生 (Fujii Tatsuo) (10222259)	岡山大学・環境生命自然科学学域・教授 (15301)	
研究分担者	沖本 洋一 (Okimoto Yoichi) (50356705)	東京科学大学・理学院・准教授 (12608)	
研究分担者	藤原 孝将 (Fujiwara Kosuke) (50847150)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光量子科学研究所 放射光科学研究センター・主任研究員 (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関