

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(開拓)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H06240

研究課題名(和文)2元化合物強誘電体

研究課題名(英文)Ferroelectric composed of two elements

研究代表者

伊藤 満 (ITO, MITSURU)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：30151541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は強誘電体研究が他分野の研究に比べて大きく発展しない理由が75年前に発見されたペロブスカイト型酸化物の極めて優れた強誘電性によるものであり、見かけ上その単純なメカニズムと結晶構造がより機能性の優れた物質探索のモチベーションを阻害しているという視点に立ち、ペロブスカイトに匹敵するあるいは超える性能の新物質を2元化合物で探索することである。この目的達成のため、kアルミナ型とウルツァイト型の二つの結晶構造に焦点を当てて強誘電性発現のメカニズムと強誘電体としての潜在的な能力を系統的に調べた。その結果、強誘電体としての可能性と強誘電体以外の特性について極めて詳細な検討を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を3年に涉って精力的に実施した結果、非ペロブスカイト型化合物の持つ潜在力を十分に詳らかにすることができた。物質研究は数ある物質の持つ多様性を認識することから始まり、既知物質や既知構造に関する帰納と演繹により新物質にたどり着くことができる。本研究では、強誘電性を示すのに最低限の構成元素で成り立つ物質を見直す事により、新しい強誘電性発現の機構を研究者に対して提示することができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to find out quite new ferroelectric materials in the framework of two constituent elements. Most of known ferroelectric materials are perovskites with a simple crystal structure, which show superior ferroelectric properties. However, at the present time, most of the researchers' attention is focused on perovskite ferroelectrics and not so many few materials are not discovered compared to the situation in other fields. In this study, I have focused on the ferroelectricity in two binary compound systems of k-Alumina and wurtzite. Potential of these two materials were fully discussed based on experimental and theory.

研究分野：無機固体化学

キーワード：強誘電体 2元化合物 アルミナ ウルツァイト 窒化物 酸化物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

キュリー兄弟が 1880 年に水晶で発見した圧電性の研究は、ロッシェル塩に対しても同時に進められた。1914 年 Schrödinger は強誘電体(ferroelektrisch)という概念と用語を初めて提案した。その後 1921 年、Valasek によりロッシェル塩で強誘電性が発見された。第 2 次大戦の始まりまでに知られていた強誘電体は、ロッシェル塩、リン酸 2 水素カリウム(KH_2PO_4)(KDP)、および、 KH_2AsO_4 のみであった。第 2 次大戦の終わり頃、ロシア、日本、米国ではほぼ同時にペロブスカイト型酸化物、チタン酸バリウム(BaTiO_3)(チタバリ)の強誘電性が発見された。戦後、ペロブスカイト型酸化物の探索範囲が広がり、1950 年代前半には強誘電体 PbTiO_3 、反強誘電体 PbZrO_3 、あるいはこれらの固溶体、 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PZT)が次々と発見された。ペロブスカイト系酸化物の研究と平行して非酸化物系強誘電体が以降次々と発見・報告された。固溶体を含まない純物質の強誘電体の数は、現在では 200 を超えている。以上が、強誘電体研究の歴史の概略である。

このような背景で現在研究・応用が進められている強誘電体の大部分(論文数で 71%)がペロブスカイト型酸化物に関するものであり、他の材料分野に比べ、新物質の報告が極めて少ない。この状況をペロブスカイトの潜在力の深さと見るか、物質開拓がこの分野でやり尽くされたと見るか、意見は分かれるところであるが、強相関係、超伝導、熱電、触媒分野に比べ開拓的研究が極端に少ないことは否定できない。若手研究者を呼び込み、基礎と応用分野から多角的に新物質に関する彷彿とした議論を進める状況でのみ分野は活性化し、発展する。

申請者は過去 28 年間ペロブスカイト系酸化物の誘電性・磁性・電気伝導性・イオン伝導性の研究にとり組んできた。また、最近 5 年は非ペロブスカイト型強誘電体の開発にも取り組んでいる。この状況を踏まえ、研究の戦略目標として次の 2 点を掲げてきた。

構成元素数が少なく、構造が単純であり、6 配位以外の化合物も対象とすること。

バンド・フォノン構造計算を常に物質設計にフィードバックできる体制とすること。その結果、今日現在までに以下の結果を得ている。

- (1) Aurevillius 型構造(6 配位)を持つ Bi_2WO_6 の W^{6+} を Si^{4+} で置換した Bi_2SiO_5 (Si は 4 配位) で強誘電性を確認し、変位型強誘電性メカニズムを完全解明した。
- (2) 4 配位系の典型物質であるウルツァイト型化合物(極性)が分極反転して強誘電体となる可能性を第 1 原理計算で探ったところ、エネルギー的観点から室温で分極反転する可能性があることを確認した。
- (3) 分極反転時に配位数を変化させる物質を検討した結果、 $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型($\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と同型)酸化物の分極反転の活性化エネルギーがペロブスカイト型酸化物と同程度であり、かつ分極が $20\text{-}22 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と BaTiO_3 に匹敵することを確認した。

2. 研究の目的

結晶化学で教える 2 元無機化合物のうち典型例構造としてコランダムとウルツァイトがある、これらの 2 つの構造では酸素最密充填面を持ち、酸素面の積層順序は六方最密充填の ABABAB... である。コランダムとウルツァイト型構造の違いは酸素で形成される 6 配位位置と 4 配位位置のカチオンの占有サイトにあり、コランダムでは 6 配位位置を、ウルツァイトでは 4 配位位置を占有する。一方、スピネル構造では、酸素最密充填面の積層順序は立方最密充填の ABCABC... である。約 50 年前に発見された $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型構造はカチオンを Ga, In, Sc, Fe を置換した化合物で報告されており、熱力学的安定相は GaFeO_3 のみである。注目すべきは $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型において、最密充填酸素面の積層順序は ACABACAB..... であり、コランダムとスピネルの折衷構造となっていることである。 $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型構造では、スピネル層では 4+6 配位が、コランダム層では 6 配位のみが安定化する。この構造では 4 面体位置で発生する双極子モーメントは一般的なスピネル構造とは異なり他層で発生するモーメントでキャンセルされないため、構造的には極性を示す。

第 1 原理計算で求めた分極反転のエネルギー(未発表)はウルツァイトで $0.25\text{-}0.33 \text{ eV}$ であり沢田正三が 1973 年に報告した(JPSJ) BeO 単結晶の 700 以上での分極反転挙動と矛盾しない。さらに重要な点は ZnO に 2 次元的引っ張り応力を加えた際の分極反転の活性化エネルギーの低下であり、 PbTiO_3 のエネルギーより小さくなる。

他の重要な結果は、 $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型構造の持つ強誘電体としての潜在能力の高さにある。分極反転のエネルギーはペロブスカイト型酸化物に匹敵し、分極値も大きい。さらに、計算結果は興味深い分極反転のメカニズムを示している。本系で分極反転を誘起するのは、a 軸方向での最密酸素面の相対的なせん断運動であり、この結果は分極が相転移の秩序パラメー

たでない間接型強誘電体の可能性があることを示している。予備的な研究結果を基にして、本研究ではウルツァイト型構造と κ - Al_2O_3 型構造を有する2元化合物の薄膜を合成し、それらの強誘電性を定量的に評価することにより強誘電性発現のための組成と構造の最適条件を調べ、その結果をもとに普遍化した物質探索の新しい指針を研究者コミュニティに提案することを目的とする。

3. 研究の方法

予備的な研究結果を基にして、本研究ではウルツァイト型構造と κ - Al_2O_3 型構造を有する2元化合物の薄膜を合成し、それらの強誘電性を定量的に評価することにより強誘電性発現のための組成と構造の最適条件を調べ、その結果をもとに普遍化した物質探索の新しい指針を研究者コミュニティに提案することを目的とする。

4. 研究成果

1. ウルツァイト系2元化合物の強誘電性の計算と実験との対応

研究主体は薄膜合成であるが、研究協力者にJFCCの計算グループを加え、随時、実験と計算グループの進捗状況のすり合わせを行うことで情報共有を図った。本研究で対象とするのは主に薄膜であり、必要に応じて単結晶を作製したり、溶液法や水熱法も併用した。

ウルツァイト型化合物に関しては次のような展開を図った。過去の文献(沢田正三 1973)で報告されている結果を再現すべく、本研究では、まず2元酸化物 BeO の薄膜を作製して、高温での強誘電測定を試みる。これまでの予備実験の結果、直接基板にエピタキシャル成長させるよりも下部電極 ITO をバッファー層として使用すれば成長が容易で表面平坦性が優れていることを確認している。ZnO に関しては、本研究では、ZnO の電子伝導性を低下させるべく、化学量論比に限りなく近づけて低欠陥濃度で成膜すること、あるいは、強誘電測定が可能なほどの高抵抗化が不可能な場合には、価数の異なる金属元素ドーピングを試みた。また、面内歪みの印加で分極反転のエネルギーが低下する。これを利用して、室温、あるいは室温以下で分極反転を観測するため ZnO を各種基板上に堆積した。またバッファー層を選択して2次元応力が印加できるような条件を試行錯誤で探索した。この条件探索は29年度と30年度前半で終了させた。

ウルツァイト型構造が分極反転時、中心対称性の $P6_3/mmc$ をとる時、つまり、金属面とカルコゲナイド面が一致する。この時、構造は3配位をとる金属がカルコゲナイド最密面中に埋め込まれた h -BN 型構造と同一となる。非極性の h -BN 型構造から極性のウルツァイト型構造への相変化は強誘電相転移であり、このメカニズムを第1原理計算により調べた。この結果をもとに、ウルツァイト型構造を有する窒化物あるいは酸窒化物固溶体薄膜の作製の実施についても検討した。また、同時に、各種ウルツァイト型2元系窒化物の分極反転エネルギーも計算した。

2. κ - Al_2O_3 型酸化物の強誘電性に関する計算と実験との対応

申請者はすでに、 κ - Al_2O_3 型構造を有する分極反転のメカニズムに関する議論と分極測定を行っており、データの一部はすでに論文として公表済みである。特に重要なのは、 κ - Al_2O_3 型 Al_2O_3 , Ga_2O_3 , Fe_2O_3 , In_2O_3 (いずれも準安定相) のうち、 Al_2O_3 を除いて、分極反転の活性化エネルギーが 100 meV 以下であることである。十分小さな分極反転の活性化エネルギーと BaTiO_3 程度の大きさの分極と、さらに T_C が 800 程度(準安定相の結晶化温度)と高いことは、実用性も評価に値する物質群であることを示している。また、金属元素を2元化することで占有サイトを調節できるため、分極の大半を司る四面体サイトの元素占有率を調節することで、分極値と反転エネルギーの制御も可能なことを明らかにした。

現在までのところ、 κ - Al_2O_3 型酸化物の分極測定は、薄膜のみで可能であり、また、その分極値も計算の10%程度である。これは κ - Al_2O_3 型酸化物がその対称性から3回対称を持つ SrTiO_3 (111)上にもみ成長可能であり、斜方晶の κ - Al_2O_3 型酸化物は膜状態で3方向にドメインを持つ状態で安定化することに由来する。本研究では、この3方向ドメインを単ドメイン化してドメイン境界由来のリーク電流を減らすことで相対的に大きな電圧印加可能な膜を作製してドメインの反転を可能にする状況を実現した。これらの結果を用いて κ - Al_2O_3 型酸化物の本質的な強誘電性能を計算と比較して明らかにした。

本研究で得られた結果は以上であるが最後に特筆すべき点を強調して締めくくりとしたい。

- (1) ウルツァイト型化合物に関してはドイツ Kiel 大学の Dr. Wagner のグループが (Al, Sc)N 系で強誘電性を見出した。同時に、分極反転機構を報告しているが、これは 2014 年我々が報告した機構と全く同一であり、ウルツァイト型酸化物で強誘電性を追求した筆者らに先んじて、強誘電性の確認に成功しているが、研究戦略そのものに大きな路線変更が必要でないことが確認された。沢田正三らの約 50 年前の先見的直感が見事に証明されたことは、強誘電体設計の世界で画期的な成果であり、慧眼である。なお、本研究の成果は 2020 年度開始の、科研費研究に引き継がれる予定であり、引き続き、世界を牽引する予定である。
- (2) κ -Al₂O₃ 型酸化物に関しては、これまで多くの研究者が強誘電性と磁性の研究に取組みんだ結果重要な知見を得ているが、強誘電性に関する計算値と実験値が 1 桁程度食い違うことが最大の謎であった。これに関して、韓国のグループは計算値程度の分極を示すことを唯一報告しているが、この実験結果を再現する結果は得られなかった。本結果に関する詳細な検討の結果、薄膜の電子伝導性に由来する伝導成分の適切な評価がされなかったために生ずることが判明した。通常の基板上に成長した κ -Al₂O₃ 型酸化物の強誘電性はナノサイズの結晶ドメインを形成する構成元素が基板最表面の元素と化学結合し、各ドメインが外部電場反転に伴って、面内方向に剪断運動するため、この剪断運動のドメイン間での衝突が電場による分極反転を妨げると考えられる。この仮説は、 κ -Al₂O₃ 型酸化物に適切なる元素置換によってドメインサイズを制御することで分極値がドメインサイズに連携して大きくなることも実験的に確かめられた(投稿中)。また、 κ -Al₂O₃ 型 Fe₂O₃ に関しては、大きな抵磁界と磁気異方性をそのまま保持して PET 上に ALD と MLD 法を利用して Fe₂O₃-テレフタレート複合薄膜を作製し、磁気特性を損なわずに、柔軟性を付与した複合膜作製実現に成功した(ACS Applied Materials and Interface, 発表済み)。 κ -Al₂O₃ 型酸化物の強誘電性発現に関してはこれまで多くの謎が報告されていたが、本研究費を用いた集中的な研究実施により、それらの謎はほぼ解明された。本系の強誘電性は数ある強誘電性物質の中でも、最も複雑な機構で発現するものであり、新規物質設計において極めて有用な情報を与えるものである。本研究実施により、多くの論文発表と学会発表を実施することにより強誘電体物質として 1 つのグループとして認識させ、学界に認識させることに成功した。

本研究テーマを挑戦的研究(開拓)第 1 期のテーマとして選択していただいた関係者の方々に、感謝の意を表します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Hamasaki Yosuke, Itoh Mitsuru	4. 巻 110
2. 論文標題 Control of crystal-domain orientation in multiferroic Ga _{0.6} Fe _{1.4} O ₃ epitaxial thin films	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 212905 ~ 212905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4984211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ayrıkyan Azatuhi, Kastner Andreas, Khansur Neamul Hayet, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru, Webber Kyle G.	4. 巻 64
2. 論文標題 Lead-Free Multilayer Piezoceramic Composites: Effect of Cosintering on Electromechanical Properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	6. 最初と最後の頁 1127 ~ 1134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TUFFC.2017.2701882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hamasaki Yosuke, Shimizu Takao, Yasui Shintaro, Shiraiishi Takahisa, Akama Akihiro, Kiguchi Takanori, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 122
2. 論文標題 Crystal structure and magnetism in $-Al_{2O_3}$ -type $Al_xFe_{2-x}O_3$ films on SrTiO ₃ (111)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015301 ~ 015301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4990947	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takashima Hiroshi, Itoh Mitsuru	4. 巻 512
2. 論文標題 Thin-film perovskite electroluminescence with BaTiO ₃ films as insulating layers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Ferroelectrics	6. 最初と最後の頁 100 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1080/00150193.2017.1349993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katayama Tsukasa, Hamasaki Yosuke, Yasui Shintaro, Miyahara Akiko, Itoh Mitsuru	4. 巻 642
2. 論文標題 Epitaxial thin film growth of garnet-, GdFeO ₃ -, and YMnO ₃ -type LuFeO ₃ using pulsed laser deposition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 41 ~ 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2017.09.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Hamasaki Yosuke, Shiraiishi Takahisa, Akama Akihiro, Kiguchi Takenori, Itoh Mitsuru	4. 巻 28
2. 論文標題 Ferroelectric and Magnetic Properties in Room-Temperature Multiferroic GaxFe _{2-x} O ₃ Epitaxial Thin Films	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1704789 ~ 1704789
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/adfm.201704789	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Hamasaki Yosuke, Osakabe Takuya, Itoh Mitsuru	4. 巻 5
2. 論文標題 Chemical tuning of room-temperature ferrimagnetism and ferroelectricity in -Fe ₂ O ₃ -type multiferroic oxide thin films	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 12597 ~ 12601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1039/c7tc04363e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsukasa Katayama, Shintaro Yasui, Takuya Osakabe, Yosuke Hamasaki, Mitsuru Itoh	4. 巻 30
2. 論文標題 Ferrimagnetism and Ferroelectricity in Cr-Substituted GaFeO ₃ Epitaxial Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1436 1441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b00144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsukasa Katayama, Takuya Osakabe, Shintaro Yasui, Yosuke Hamasaki, Badari Narayana Rao, Minghui Zhang, Mitsuru Ito	4. 巻 113
2. 論文標題 Effect of Cr Substitution on Ferrimagnetic and Ferroelectric Properties of GaFeO ₃ Epitaxial Thin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 162901 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5029442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minghui Zhang, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Badari Narayana Rao, Haiqin Wen, Xiuhong Pan, Meibo Tang, Fei Ai, Mitsuru Itoh	4. 巻 12
2. 論文標題 Epitaxial Growth of Orthorhombic GaFeO ₃ Thin Films on SrTiO ₃ (111) Substrates by Simple Sol-Gel Metho	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 254 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) Epitaxial Growth of Orthorhombic GaFeO ₃ Thin Films on SrTiO ₃ (111) Substrates by Simple Sol-Gel Method	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 Koki Tachiyama, Shintaro Yasui, Badari Narayana Aroor Rao, Takuro Dazai, Takamasa Usami, Tomoyasu Taniyama, Tsukasa Katayama, Yosuke Hamasaki, Jianding Yu, Huan He, Hui Wang, Mitsuru Itoh	4. 巻 4
2. 論文標題 Magnetic Properties of Single Crystal GaFeO ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MRS Advances	6. 最初と最後の頁 61-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1557/adv.2019.37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Badari Narayana Aroor Rao, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Mitsuru Itoh	4. 巻 4
2. 論文標題 Fabrication and Characterization of Multiferroic Al _{0.5} Fe _{1.5} O ₃ Epitaxial Thin Films,	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MRS Advances	6. 最初と最後の頁 539-544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1557/adv.2019.121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Takuya Osakabe, Yosuke Hamasaki, Tomoyasu Taniyama, Mitsuru Itoh	4. 巻 127
2. 論文標題 Ferroelectric and Ferrimagnetic Properties of e-RhFe ₂ -xO ₃ Thin Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 474-477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.2109/jcersj2.19048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Badari Narayana Rao, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Ayako Taguchi, Hiroki Moriwake, Yosuke Hamasaki, Mitsuru Itoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Investigation of Ferrimagnetism and Ferroelectricity in Al _x Fe ₂ -xO ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 706-714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1039/c9tc05390e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Hamasaki, Tsukasa Katayama, Shintaro Yasui, Takahisa Shiraishi, Akihiko Akama, Takanori Kiguchi, Tomoyasu Taniyama, and Mitsuru Itoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Switchable Third ScFeO ₃ Polar Ferromagnet with YMnO ₃ -type Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4447-4452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1039/C9TC07006K	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sou Yasuhira, Yosuke Hamasaki, Tsukasa Katayama, Takahiro Ao, Yoshiyuki Inaguma, Hajime Hojo, Maarit Karppinen, Anish Philip, Shintaro Yasui, Mitsuru Itoh	4. 巻 59
2. 論文標題 Modulating the Structure and Magnetic Properties of -Fe ₂ O ₃ Nanoparticles via Electrochemical Li ⁺ Insertion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 4357-4365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b03302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Badari Narayana Rao, Shintaro Yasui, Yefei Han, Yosuke Hamasaki, Tsukasa Katayama, Takahisa Shirashi, Takanori Kiguchi, Mitsuru Itoh	4. 巻 2
2. 論文標題 Redox-based multilevel resistive switching in AlFeO ₃ thin-film heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Material	6. 最初と最後の頁 1065-1072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anish Philip, Janne-Petteri Nieme, Girish C Tewari, Barbara Putz, Thomas Edward James Edwards, Mitsuru Itoh, Ivo Utke, Maarit Karppinen	4. 巻 12
2. 論文標題 Flexible -Fe ₂ O ₃ -terephthalate thin-film magnets through ALD/MLD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 21912-21921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://dx.doi.org/10.1021/acsam.0c04665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Mitsuru Itoh, Yosuke Hamasaki, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Takuya Osakabe, Tomoyasu Taniyama, Ayako Konishi, Hiroki Moriwake
2. 発表標題 Ferroelectricity and Magnetic Properties in k-Al ₂ O ₃ -type Oxides
3. 学会等名 8th International Conference on Electroceramics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh, Yosuke Hamasaki, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Tomoyasu Taniyama, Ayako Konishi, Hiroki Moriwake
2. 発表標題 Phase Control of Metastable AB ₃ O ₇ Oxides by PLD
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Coordination Engineering for New Ferroelectric Oxides: Unconventional Recombination of Cation-Oxygen Bonds During Polarization Switching
3. 学会等名 18th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤 満, 濱寄 容丞, 片山 司, 越阪部 拓也, 安井 伸太郎, 谷山 智康
2. 発表標題 k-Al ₂ O ₃ 型(A,Fe)2O ₃ (A=Al, Ga, Fe, Sc, Rh, In)酸化物の強誘電性と磁性
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱寄 容丞, 安井 伸太郎, 谷山 智康, 伊藤 満
2. 発表標題 六方晶YMnO ₃ 型ScFeO ₃ 薄膜の構造と強誘電性
3. 学会等名 日本セラミックス協会第30回秋季シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Cation Substitution Effect in Ferroelectric k-Al ₂ O ₃ -type Oxides
3. 学会等名 Fundamental Physics of Ferroelectrics and Related Materials 2018 (Ferro2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Ferroelectricity Evolution Mechanism in k-alumina-type Oxides
3. 学会等名 14th RUSSIA/CIS /BALTIC/JAPAN Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF 2018) (St.Petersburug, Russia) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tachiyama, T. Katayama, T. Osakabe, T. Dazai, J. Yu, H. He, H. Wang, Y. Hamasaki, S. Yasui, T. Taniyama, M. Itoh
2. 発表標題 Preparation of GaFeO ₃ Single Crystal and Epitaxial Thin Films on Single Crystal
3. 学会等名 2018 ISAF-FMA-AMF- AMEC- PFM Joint Conference (IFAAP 2018) (Hiroshima, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Crystal Domain Structure and Properties in k-alumina-type AFeO ₃ Oxides
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Relaxor Ferroelectrics (IWRf-2018) (Vancouver, Canada) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Badari Narayana Aroor Rao, Tsukasa Katayama, Shintaro Yasui, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Characterization of Multiferroic Al ₂ Fe _{2-x} O ₃ Epitaxial Thin Films
3. 学会等名 12th Japan-Korea Conference on Ferroelectrics (JKC-FE12) (Nara, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Hiroki Moriwake, Ayako Konishi, Jianding Yu, Yosuke Hamasaki
2. 発表標題 Magnetic and Dielectric Properties of Single Crystal GaFeO ₃
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsukasa Katayama, Shintaro Yasui, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Ferrimagnetism and Ferroelectricity in Ga _{0.5} Cr _{0.5} FeO ₃ Epitaxial Thin Film
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Yasui, Koki Tachiyama, Tsukasa Katayama, Takuro Dazai, Yosuke Hamasaki, Huan He, Hui Wang, Jianding Yu, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Preparation of k-Al ₂ O ₃ -Type Ferroelectric Single Crystal and Single Domain Epitaxial Thin Film and Their Properties (Oral)
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Badari Narayana Rao, Tsukasa Katayama, Shintaro Yasui, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Room Temperature Ferroelectricity in Multiferroic Al _x Fe _{2-x} O ₃ Epitaxial Thin Films
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井 伸太郎, 片山 司, 濱寄 容丞, 谷山 智康, 小西 綾子, 森分 博紀, 白石 貴久, 赤間 章裕, 木口 賢紀, 伊藤 満
2. 発表標題 k-Al2O3型強誘電体/フェリ磁性体のドメイン構造と分極反転阻害の可能性
3. 学会等名 2018年強的秩序とその操作に関する第6回研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立山 昂輝, 片山 司, 越阪部 拓也, 太宰 卓朗, 余 建定, 賀 歆, 王 慧, 濱寄 容丞, 安井 伸太郎, 谷山 智康, 伊藤 満
2. 発表標題 GaFeO3単結晶基板を用いたSc0.5Fe1.5O3薄膜の単ドメイン化
3. 学会等名 第56回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井 伸太郎, 片山 司, 越阪部 拓也, 濱寄 容丞, 小西 綾子, 森分 博紀, 白石 貴久, 赤間 章裕, 木口 賢紀, 伊藤 満
2. 発表標題 k-Al2O3型構造GaFeO3薄膜の強誘電性とフェリ磁性
3. 学会等名 日本セラミックス協会第31回秋季シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱寄 容丞, 清水 荘雄, 安井 伸太郎, 白石 貴久, 赤間 章裕, 木口 賢紀, 谷山 智康, 伊藤 満
2. 発表標題 Al置換した -Fe2O3薄膜の構造と物性
3. 学会等名 日本セラミックス協会第31回秋季シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Badari Narayana Aroor Rao, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Tomoyasu Taniyama Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Ferroelectric and Magnetic Properties of AlxFe2-xO3 Thin Films
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井 伸太郎, 片山 司, 濱寄 容丞, 田口 綾子, 森分 博紀, 白石 貴久, 赤間 章裕, 木口 賢紀, 伊藤 満
2. 発表標題 k-Al2O3型構造材料におけるユニークな強誘電特性
3. 学会等名 第38回エレクトロセラミックス研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Unconventional Ferroelectricity in k-alumina-type Multiferroic AFeO3 Thin Films
3. 学会等名 The Eleventh International Conference on High-Performance Ceramics (CICC-11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Badari Narayana A. Rao, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Multiferroic Properties of Orthorhombic AlxFe2-xO3
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Unconventional Ferroelectricity in k-Alumina-Type Oxide Thin Films
3. 学会等名 Joint ISAF-ICE-EMF- IWPM-PFM meeting 2019 (F2c 2 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Badari Narayana Aroor Rao, Yefei Han, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Resistive Switching in AlFeO ₃ and GaFeO ₃ based Thin Film Heterostructures
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM 13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Hamasaki, Shintaro Yasui, Takamasa Shiraishi, Akihiro Akama, Takenori Kiguchi, Tomoyasu Taniyama, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Interface Structure in Multiferroic YMnO ₃ -type ScFeO ₃ Film on Perovskite Electrode
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM 13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Hamasaki, Shintaro Yasui, Takahisa Shiraishi, Akihiro Akama, Takanori Kiguchi, Tomoyasu Taniyama, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Investigation of Interface Structure in Multiferroic h-ScFeO ₃ Film
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting (Boston, USA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Metastable Phase Engineering for Emergence of New Functions in Oxides
3. 学会等名 The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2019) (Jeju, Korea) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Badari Narayana Aroor Rao, Shintaro Yasui, Tsukasa Katayama, Mitsuru Itoh
2. 発表標題 Large Electrocaloric Effect in Al _x Fe _{2-x} O ₃ Epitaxial Thin Films
3. 学会等名 2019年応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立山 昂輝, 太宰 卓朗, 安井 伸太郎, Jianding Yu, Yang Zhang, Hui Wang, Zhaoyang Xia,
2. 発表標題 k-Al ₂ O ₃ 型 (Ga _{1-x/2} Fe _{1-x/2})Sc _x O ₃ 単結晶の磁性と誘電性 (1)
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立山 昂輝, 太宰 卓朗, 安井 伸太郎, Jianding Yu, Yang Zhang, Hui Wang, Zhaoyang Xia,
2. 発表標題 k-Al ₂ O ₃ 型 (Ga _{1-x/2} Fe _{1-x/2})Sc _x O ₃ 単結晶の磁性と誘電性 (2)
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 満
2. 発表標題 イオン性化合物における第三元素の役割
3. 学会等名 強的秩序とその操作に関する研究グループ第9回研究会（若手夏の学校）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安原 颯, 濱寄 容丞, 阿尾 貴博, 北條 元, 安井 伸太郎, 伊藤 満
2. 発表標題 -Fe ₂ O ₃ ナノ粒子へのLi+挿入とその磁気物性
3. 学会等名 強的秩序とその操作に関する研究グループ第9回研究会（若手夏の学校）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱寄 容丞, 安井 伸太郎, 白石 貴久, 赤間 章裕, 木口 賢紀, 谷山 智康, 伊藤 満
2. 発表標題 ヘテロエピタキシャルY ₂ MnO ₇ 型ScFeO ₃ 薄膜の界面構造
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会（北大・札幌キャンパス）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安原 颯, 濱寄 容丞, 阿尾 貴博, 稲熊 宜之, 北條 元, 安井 伸太郎, 伊藤 満
2. 発表標題 電気化学的手法によりLi挿入した -Fe ₂ O ₃ ナノ粒子の磁性
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会（北大・札幌キャンパス）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 満
2. 発表標題 非ペロブスカイト型強誘電体
3. 学会等名 東北大学金属材料研究所ワークショップ「強誘電体関連物質の機能発現に関する構造科学の新展開」(東北大学)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安原 颯, 濱寄 容丞, 阿尾 貴博, 稲熊 宜之, 北條 元, 安井 伸太郎, 伊藤 満
2. 発表標題 e-Fe2O3ナノ粒子へのLi+挿入とその挿入課程の調査
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会(上智大, 四ツ谷キャンパス)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Mitsuru Itoh	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 21
3. 書名 Handbook of Solid State Chemistry	

〔産業財産権〕

〔その他〕

新しいメカニズムで発現する強誘電体を開発 磁性も備え、室温動作マルチフェロイクス新展開へ
<https://www.titech.ac.jp/news/2017/040091.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----