

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21853

研究課題名（和文）「強誘電体分極の巨大近接効果」の現象としての確立

研究課題名（英文）Proving experimentally "Colossal proximity of ferroelectric polarization"

研究代表者

渡部 行男（Yukio, Watanabe）

兵庫県立大学・工学研究科・非常勤研究員

研究者番号：40274550

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：教科書では、電極間の強誘電体に閾値以上の電場を印加すると、自発分極が配列する。本研究は、これを電極がない巨視的な領域で、世界で初めて起こした。このためには、表面から吸着物を除くが、一般的な超高真空中の高温加熱では酸素欠陥ができるので、超高真空常温で原子状酸素を照射し、原子レベルに平坦で非常に欠陥が少ない強誘電体単結晶表面の作製に成功した。この清浄表面に、特定の条件で電場を印加すると、電極から遠く離れて電極からの電場が無視できる広域な自由表面で分極が揃った。またこれを確実に再現する条件を得た。分極の光学的電気解析と伝導解析を行い本現象を確定し、第一原理計算と有限要素法を組み合わせ、機構を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、既存理論では予想さえされていなかっ新現象をた世界で初めて報告するものである。この代表者らの提案する機構からすると、実用上重要な金属酸化物系の強誘電体一般に起こる、原理的な現象と予想されるので、幅広い意義を持つと考えられる。例えば、強誘電体の基礎である自発分極のダイナミクスの新概念に繋がる可能性があり電極やエッチングを用いない革新的な分極の制御技術を創生する高い可能性があると考えられる。このため、応用・基礎を革新する新現象として、分野を超えての意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Textbooks teach that the application of electric field above a threshold between a pair of electrodes orient spontaneous polarization. In this study, such orientation was world-first discovered in electrodeless regions. For this, adsorbates need to be removed from surfaces, conventionally through high-T annealing in UHV. Because such annealing creates defects, we use atomic oxygen at RT in UHV and obtain atomically flat surface where defects are substantially removed. Under some conditions, spontaneous polarization aligned reproducibly in a macroscopic region of free surface far from electrodes where field from electrodes are negligible. Through measurements of macroscopic and nanoscopic polarization and conduction, we show that this phenomenon, which we call macroscopic proximity effect, exists and propose a mechanism through ab initio calculations and finite element method analyses.

研究分野：ferroelectric

キーワード：ferroelectric surface polarization 2D proximity

1. 研究開始当初の背景

磁性体では、磁場で磁化が整列するが、遍歴電子型の磁性体では、電子しみ出しにより、その閾値以下でも磁化が揃う領域がある。これは、RKKY 相互作用(Friedel 振動)による電子の波長の数倍(1~3nm)程度の現象であり、GMR(巨大磁気抵抗)にも関係する。これが遍歴電子型磁性体の近接効果である。また、超電導では相間長程度($T_c \sim 4K$ なら 100nm 程度、高温超電導は 1nm 程度)内では位相が揃っている(同一の波動をする)。これが超電導の近接効果である。

強誘電体では、自発分極方向には、巨視的なサイズまで揃うが、自発分極(→↑↓←で向きを示す)に垂直な方向の整列は室温で数 10nm 程度とされる(欠陥/反電場無しとして)[1]。これが強誘電体の近接効果である(数 10nm)。強誘電体の既設効果一方、電極間に閾値以上の電場を印加すると、電極直下の自発分極が整列する、と強誘電体の全教科書にある[1](→↑↓←が↑↑↑↑や↓↓↓↓になる)。厳密は、既知の近接効果(数 10nm)と漏れ電界により、少し広い範囲で整列が起こる。また、漏れ電界は厚みと共に増える(図 1 の例では 0.5mm での漏れ電界広がりは 1~2 μm)。従って、既知の近接効果は、本発見の巨視的近接効果に比べ無視できる。

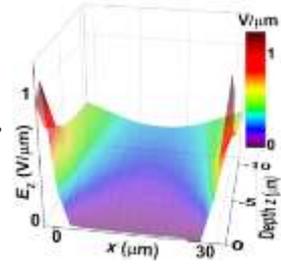


図 1 漏れ電界の計算例
高電場(橙赤は電極下)

2. 研究の目的

本研究は、この近接効果を従来になく理想的と見做せる強誘電体について調べる。このため、原子レベルに平坦な表面を持ち表面を含めて非常低欠陥の強誘電体を表面の作製し、これを維持するため超高真空中で測定する。この時、特定の条件で電場を印加すると、電場印加で、電極から遠く離れ、電極からの電場が無視できる広域な自由表面で、分極が揃うことを世界で初めて発見した。この機構を、分極分布の測定と伝導解析を行い、これを第一原理計算と有限要素法を組合わせて解析する。

3. 研究の方法(実験)

【試料】 原子レベルに平坦な表面を持つ非常低欠陥の強誘電体を、機械研磨を用いずに、表面の化学エッチングとアニールを半年繰り返すことで得た(購入した試料は機械研磨されているので欠陥があるので 100 μm 化学エッチング除去)。この試料は欠陥低減に適する TSSG 法で作成された BaTiO₃ 単結晶であり、このような原子レベルに平坦なエッチング表面は、TSSG-BaTiO₃ で世界で初めてであり、地味だが本研究の「要」の成果である(図 2)。この表面から吸着物を除くのは、超高真空中で高温にするのが一般的であるが、酸素欠陥ができてしまう。この問題を解決するため、超高真空常温で原子状酸素を照射する手法を開発した。

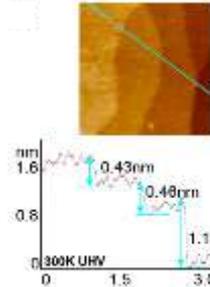


図 2 原子レベルに平坦な TSSG-BaTiO₃ 表面

【測定】 超高真空中を用い吸着物を除いた環境で、強誘電体を理想的な状態に保ち、電場を印加し、電場印加中と印加後に測定を行った。特に偏光顕微鏡観察は、全実験で他測定と同時にを行った。ナノスケールの測定には既設の AFM (圧電応答顕微鏡 PFM, 電位顕微鏡 KFM, 非線形誘電率顕微鏡 SHG) を用いた。これから分極分布を求め、伝導測定と対比した。

【非線形誘電率顕微鏡 SHG の構築】 早稲田大学上江洲由晃名誉教授が開発した非線形誘電率顕微鏡 SHG(図 3)を、そのご助言と修士論文[2]博士論文[3]を基に構築し、3 次元測定に用いた。代表者(渡部)は、この新設計と部品選定と各部品の動作化に大半の時間を使ったので説明する。

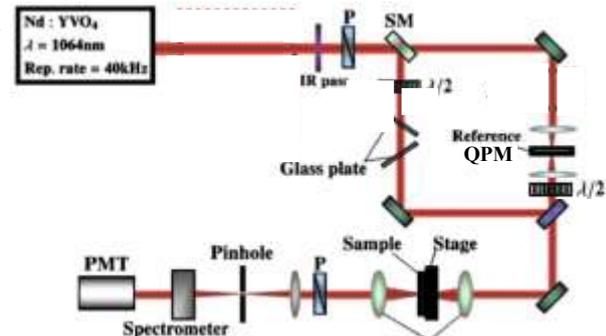


図 3 上江洲研の SHG 顕微鏡[2,3]

新設計は Mach-Zehnder 干渉計をフレネルロム板に変え、非熟練(渡部)が再組み上げ可能にした(図 4)。これも、基本波と SH 波の偏光を等しく回転できるが、回転 90° で基本波と SH 波の偏光角度差が 1° (強度 2%) 有る。これは、測定への影響小と考え、検出器前に検光子を配置して、この弱点を排除できると考えた。その他、代表者は、reference の SH 波の発生や偏光の回転法を含め、様々な素子について、メーカーのデータを基に膨大な組み合わせと種々の素子を机上と実験で検討し、図 4 に至った。また、従来の方式に代え、装置移動が容易なケージシステムとチューブで設計した。この欠点は、組込後変更が困難で、1 か所の不都合が多数の他の素子に影響する点である。このため、0.1mm 精度で素子と配置を設計選定し、固定具を作製した。SHG は、横田 AP が上記部品の連結・光軸合わせと初期操作(氏が科研通ったため契約辞めを宣言したので申請と違う)、代表者と藤澤 P がソフトと操作条件。非線形 SPM を藤澤 P、その他(他の測定と理論)を代表者。

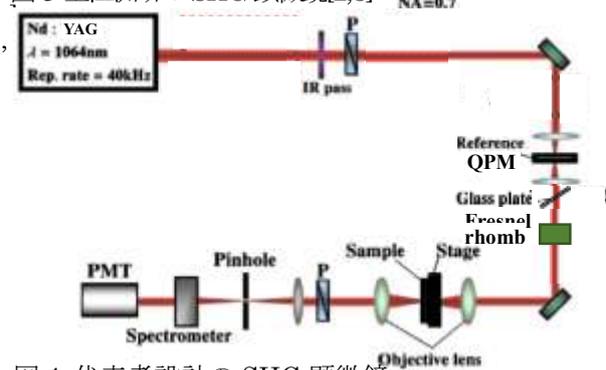


図 4 代表者設計の SHG 顕微鏡

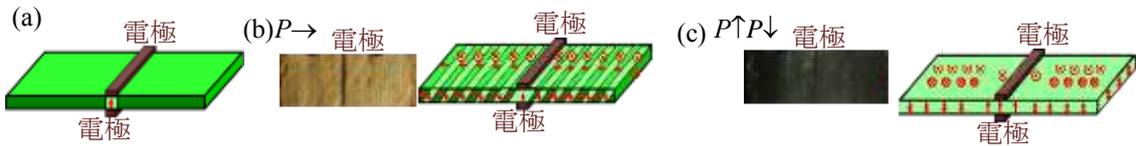


図5 研究成果の概要 (a)確立した分極整列. 電極印加(b)前(c)後の偏光顕微鏡像とそれが示す分極. \rightarrow は a 分域 \downarrow は c 分域を示す.

4. 研究成果

【実験】 研究成果の概要は図5に示される. 図5(a)の電極配置で強誘電体に電場を印加すると電極の直下だけ分極が揃う(\uparrow で示した). 以下, 上向き下向き分極を揃える処理を夫々, +分極処理-分極処理と呼び, この「処理後の状態」を $P\uparrow$ と $P\downarrow$ で, 分極処理無しの状態を $P\rightarrow$ で表わす. 分極が, 「上向き下向きの部分や状態」を $P+$ と $P-$ で, 横向きの部分や状態を a (a 分域) で表す.

本研究の発見は, 図5(b)の未処理状態 $P\rightarrow$ に電場印加すると図5(c)のように, 電極から離れて(50mm以上)電極からの電場が殆どない領域まで $P+$ と $P-$ になることである. 図5(b)がポイント絵のような分極であることは, 3次元SHG顕微鏡で確認した(図6). 特に, SHG測定で偏光顕微鏡は非常に僅かな a 分域の存在も検出することが分かり, 図5(c)の状態は電極無しの部分もほぼ100% $P+P-$ であることが解明された.

さらに, 非線形誘電率測定(図7)で, この向きが電極下と同じ向きに揃っていることが分かった. 即ち, $P\uparrow$ は $P+$, $P\downarrow$ は $P-$, $P\rightarrow$ は $aP+P-$ であった. これを, 表面電位顕微鏡(KFM)でナノスケール分解能で見た(図8). 未処理状態 $P\rightarrow$ は, 教科書に見られるような帯状の $P+$ 分域と $P-$ 分域と a 分域が存在した. この $P+P-$ 分域 = c 分域と a 分域の境界の表面は波打つことが知られているが, それも形状像に現れている. 図1で電場の浸み出しは $1\sim 2\mu\text{m}$ であったが, $P\uparrow P\downarrow$ 処理をすると浸み出しより $7\mu\text{m}$ 以上離れた領域が $P+$ と $P-$ であることがナノスケール分解能で確認された(図8).

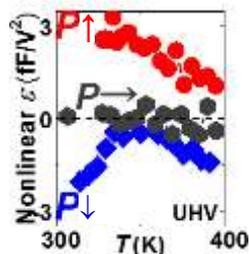


図7 $P\uparrow P\downarrow P\rightarrow$ 状態の非線形誘電率の温度依存性. 値が正0負は分極が上向, 下向, 非配向を示す.

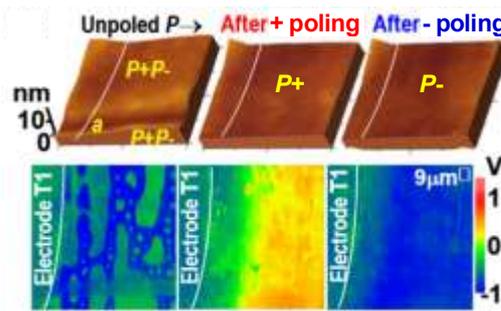


図8 $P\rightarrow P\uparrow P\downarrow$ 状態の形状像(上段)と表面電位像(下段). 左側の白い曲線の右側は電極. 正電位は上向き分極($P+$), 負電位は下向き分極($P-$)を示す

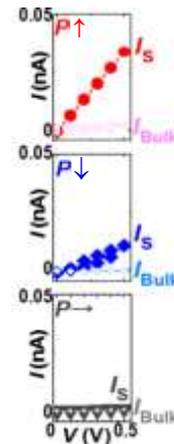


図6 $P\rightarrow$ 状態の3D-SHG顕微鏡: 5つの深さの水平面内SHG分布. 青緑: a 分域 \leftrightarrow 紫: c 分域 \updownarrow .

図9 $P\uparrow P\downarrow P\rightarrow$ 状態の表面伝導 I_s とバルク伝導 I_{Bulk} .

この $P\rightarrow$, $P\uparrow$, $P\downarrow$ 状態, 即ち, 上記の結果により $aP+P-$, $P+$, $P-$ の分極状態の電気伝導を調べると, $P+$, $P-$ の状態は明確な伝導がみられた. この現象は, 代表者らが過去に理論予測し[4]実証したものの[5]と整合する. そこで, これを第一原理計算で解明した(図9).

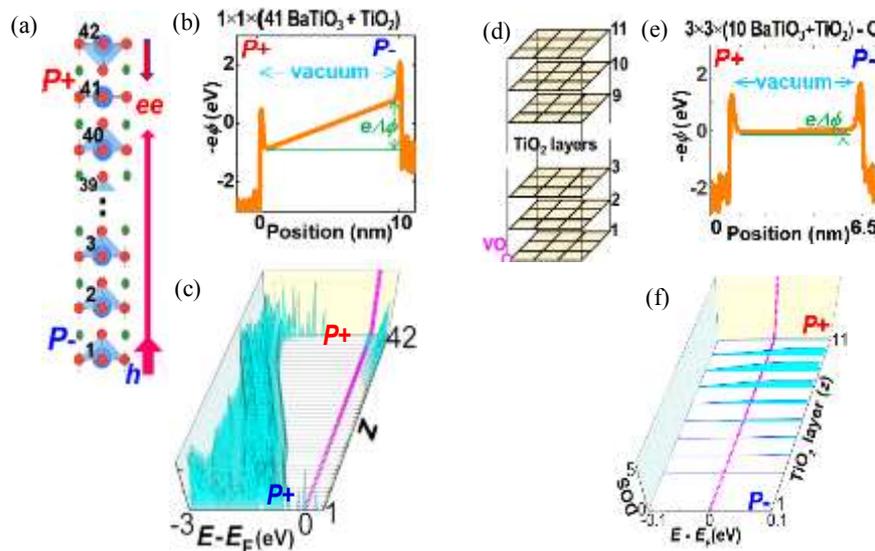


図10 $P+P-$ 表面の電位と電子状態を欠陥無し(a)-(c)と酸素欠陥有(d)-(e)の BaTiO_3 の第一原理計算.

(a)(d)モデル(原子配置または層構成). (a)は本計算で得た安定状態の原子配置. (b)(e)真空中の電位. (c)(f)各層毎の電子状態(DOS).

【理論】 BaTiO₃ の欠陥には、酸素と Ba(Ti)があるが、通常、特に、真空で最も疑われるのは、酸素欠陥であるので、酸素欠陥を検討した。欠陥無しの BaTiO₃ では、P+面とP-面の電位差(図 10(b))は、巨視的モデル[4,5]と同じく、バンドギャップ程度であり、図 8 の実験結果を説明する。また、図 10(c)では、表面近くにフェルミ面をよぎるバンドがあるので、実験図 9 で P+面 P-面が伝導を示すことを説明する。さらに、P+面側でフェルミ面をよぎる状態は P-面よりずっと多いので、実験図 9 で P+面の伝導が P-面より高いことを説明する。

一方、欠陥のある BaTiO₃ (図 9(e)) では電位差は、0.1eV 程度で実験(図 8)と全く合わない。また、実験図 9 と異なり、図 10(f)では P-面にフェルミ面をよぎるバンドがなく伝導がないことを示唆する。また、欠陥があると、表面だけでなく試料全体の伝導性があり、且つ、強誘電性が消える温度 T_c 以上でも伝導性がある点も、実験と合わない。このように、欠陥があると実験結果と合わないので、実験結果は、実質的に、欠陥のない理想的試料の特性に近いと言える。

【まとめ】 今回の実験は、「強誘電体の巨視的近接効果」を発見し、その存在を巨視的かつナノスケール分解能で確定した。また、伝導実験と理論は、「強誘電体の巨視的近接効果」には、代表者が提案した強誘電体固有の表面伝導[4-7]と拡散が本質的な役割を担っていることを示した。実際、図 8 の電位分布は、ショットキー効果の空乏層として説明できる。即ち、電極近傍の電子とホール移動により電位が決っている。これらの結果の一部は、Arxiv にある[8]。

【その他】 この研究の過程で、実験で、原子ステップに覆われて平坦な TSSG BaTiO₃ 単結晶表面の形成法を世界で初めて開発し、強誘電体の分極で初めて、電子層ホール層の両方を実現し(尚、高電場印加中、電子層をホール層に変えたという主張はあるが、電場での伝導層の証拠にならならず、キャリア型を同定しておらず、且つ、酸化物一般で起こる抵抗可変現象である可能性が高い)、ほぼ理論と同じ分域間の電位差を世界で初めて発見した。また、理論においては、BaTiO₃ の第一原理計算では初めて、free-standing 最低エネルギー状態が電子ホール層と自発分極を持つことを示し(GL 理論では代表者らの[4]-[7]で予言)、無欠陥であっても、本来的に強誘電体の表面電子ホール層の厚みと電導度が違うことを世界で初めて示し(欠陥が有意な場合、電子層ホール層の一方しかない)、世界で初めて、図 10(a)の P+面のように表面に反分極構造ができることを理論的に発見した。

これらの結果は、強誘電体の自発分極のダイナミクスの端緒になり、また、電極やエッチングを用いない革新的な分極の制御技術を創生に寄与できると考えられる。

謝辞 非線形誘電率顕微鏡のご指導を頂いた早稲田大学上江洲由晃名誉教授に御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] M. E. Lines and A. M. Glass, Principles and Applications of Ferroelectric and Related Materials (Oxford University Press, Oxford, 1977).
- [2] 嶋田知史 “走査型 SHG 干渉顕微鏡の開発と LiNbO₃ の反転分極構造の観察” 早稲田大学 上江洲研究室 修士論文(2004)
- [3] 金城純一 “光第二高調波干渉顕微鏡を用いた 3 次元分域構造の非破壊観察” 早稲田大学 上江洲研究室 博士論文(2011); J. Kaneshiro et al., J. Appl. Phys. 104, 054112 (2008).
- [4] Y. Watanabe, Theoretical stability of the polarization in a thin semiconducting ferroelectric, Phys. Rev. B57, 789-804 (1998).
- [5] Y. Watanabe, M. Okano, and A. Masuda, Surface conduction on insulating BaTiO₃ crystal suggesting an intrinsic surface electron layer, Phys. Rev. Lett. 86, 332-335 (2001).
- [6] Y. Watanabe, Physics of ferroelectric interface: an attempt for nano-ferroelectric physics, Topics in Applied Physics 98, 177-197 (Springer, 2005, ISBN 3-540-24163-9).
- [7] Y. Watanabe, Intrinsic Free Electrons/Holes at Polarization Discontinuities and their Implications for Basics of Ferroelectricity and its Origin, Solid State Phenomena. 189, 57-93 (Trans Tech. 2012).
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.189>
- [8] <https://arxiv.org/submit/4559950>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 2件）

1. 著者名 H. Fujisawa, Kazuma I. and S. Nakashima,	4. 巻 60
2. 論文標題 Nonvolatile operation of vertical ferroelectric gate-all-around nanowire transistors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys., 60	6. 最初と最後の頁 SFFB10-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac127c	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 Y. Watanabe	4. 巻 10
2. 論文標題 Examination of Permittivity for Depolarization Field of Ferroelectric by Ab initio Calculation, Suggesting Hidden Mechanisms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2155
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-81237-0	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 Y. Watanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Breakdown of ion-polarization-correspondence and born effective charges: Algebraic formulas of accurate polarization under field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.4.104405	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 Y. Watanabe	4. 巻 556
2. 論文標題 Electrostatics Liberating Restrictions on Ferroelectric by Unification of Polar Discontinuity e- h+ layers and Criteria of Intrinsicity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ferroelectrics	6. 最初と最後の頁 29-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00150193.2020.1713336	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 Y. Watanabe	4. 巻 1
2. 論文標題 Verification of Permittivity for Depolarization as Unity by Ab Initio Calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Extended abstract of Fundamental Physics of Ferroelectrics and related materials 2020	6. 最初と最後の頁 140-141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Nao Yoshimura, Hironori Fujisawa, Seiji Nakashima and Masaru Shimizu,	4. 巻 58
2. 論文標題 Composition control and introduction of an Fe2O3 seed layer in metalorganic chemical vapor deposition of epitaxial BiFeO3 thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 041003-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab045f	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 Seiji Nakashima, Satoshi Kimura, Yuta Kurokawa, Hironori Fujisawa and Masaru Shimizu	4. 巻 58
2. 論文標題 Introduction of charged domain walls into BiFeO3 thin films using a pit-patterned SrTiO3 (001) substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys. 59	6. 最初と最後の頁 SLLB02-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3897	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 S. Nakashima, Y. Fuchiwaki, N. Happo, K. Kimura, Y. Yamamoto, R. Matsumoto, K. Hayashi and H. Fujisawa,	4. 巻 59
2. 論文標題 Atomic structure stabilization in BiFeO3 thin film by Mn doping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 010602-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab579d	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21件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Y. Watanabeら
2. 発表標題 Realization of Both Electron & Hole Layers proving Intrinsic Ferroelectric Origin not due to Defects
3. 学会等名 ISFD-15 (15th Int. Symp. Ferroelectric Domain) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部行男
2. 発表標題 強誘電体の第一原理計算の精度の新基準 と 結晶パラメータで高精度に自発分極をえる代数式
3. 学会等名 物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部行男
2. 発表標題 強誘電体の反電場に用いる誘電率の値の第一原理計算 及び 渦型分域の矛盾
3. 学会等名 物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部行男
2. 発表標題 基底状態としてのSrTiO ₃ の強誘電性
3. 学会等名 物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部行男
2. 発表標題 反電場の誘電率からみる渦分域の矛盾
3. 学会等名 応用物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤沢浩訓, 池田一真, 中嶋誠二
2. 発表標題 縦型強誘電体ゲートナノワイヤトランジスタの不揮発性動作
3. 学会等名 第38回強誘電体応用会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小山手 厚人, 藤沢 浩訓, 中嶋 誠二
2. 発表標題 BFO薄膜の電気的特性に表面処理が及ぼす影響
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾内 惇平, 畑 駿亮, 大島 元太, 藤沢 浩訓, 中嶋 誠二
2. 発表標題 反応性スパッタリングによる(Hf,Zr)O ₂ 薄膜の室温成膜
3. 学会等名 第69回応用物理学春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 Breakdown of ion-polarization-correspondence & born effective charges Algebraic formulas of accurate polarization under field
3. 学会等名 Fundamental Physics of Ferroelectrics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 強誘電体の反電場に用いる誘電率の値 と隠れた機構
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 電場中の正確な分極を与える代数式：従来の「イオン位置-分極対応とボルン有効電荷」の修正
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 揺らぎの無い場合の基底状態としての SrTiO ₃ の強誘電性
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 SrTiO ₃ -BaTiO ₃ 系の自発分極を格子パラメーターから精密に求める半経験的代数式
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 強誘電体の第一原理計算の精度の基準の提案 及び 応力歪による分極増加の改定
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小山手 厚人、藤沢 浩訓、中嶋 誠二
2. 発表標題 MOCVD法によるSi基板上へのBiFeO ₃ 薄膜のMOCVD成長
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾内 惇平、藤沢 浩訓、中嶋 誠二
2. 発表標題 透明酸化物電極上への(Hf,Zr)O ₂ 薄膜の作製
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 Renovation of Electrostatics of Ferroelectrics Liberating Ferroelectricity from Established Restrictions
3. 学会等名 14th European Meeting of Ferroelectricity EMF-14 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Watanabe
2. 発表標題 Verification of Permittivity for Depolarization as Unity by Ab Initio Calculations Opening Pandora's box
3. 学会等名 Fundamental Physics of Ferroelectrics and related materials 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Fujisawa, S. Nakashima, M. Shimizu
2. 発表標題 MOCVD and Ferroelectric Properties of Low-dimensional Nano-ferroelectrics
3. 学会等名 Asia-Pacific PFM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hironori Fujisawa, Nao Yoshimura, Masaru Shimizu, and Seiji Nakashim
2. 発表標題 Epitaxial Growth of BiFeO ₃ Thin Films by MOCVD Using an Fe ₂ O ₃ Seed Layer Paper MoPO _{ii}
3. 学会等名 Joint ISAF-ICE-EMF-IWPM-PFM meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Nakashima, Yakumo Fuchiwaki, Tohru Higuchi, Yuta Yamamoto, Ryohei Matsumoto, Koji Kimura, Naohisa Happo, Kouichi Hayashi, Masaru Shimizu, and Hironori Fujisawa
2. 発表標題 Atomic and Electronic Structures of Single Crystalline Mn-Doped BiFeO3 Thin Films
3. 学会等名 Joint ISAF-ICE-EMF-IWPM-PFM meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap https://researchmap.jp/wxywxy
--

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	藤澤 浩訓 (Fujisawa Hirokuni) (30285340)	兵庫県立大学・工学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	佐藤 琢哉 (Sato Tetsuya) (40451885)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	申請時は同一学科で最高の遂行力があり、分担に最適であったが、申請年度末に転出した。さらに新研究室を立ち上げる状況になり、分担困難になったため、話し合いにより、本研究には無関与(分担金無)。
研究分担者	横田 紘子 (Yokota Hiroko) (50608742)	千葉大学・大学院理学研究院・准教授 (12501)	SHG顕微鏡開発の上江洲研究室出身で唯一大学籍なので佐藤教授に代わった。申請時、cc分域観察迄の分担で文書合意。但し、科研が採択されたとのことで、同氏が分担停止を宣言し、分担は殆ど未達成になった。

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