

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02609

研究課題名（和文）熱イメージングを用いた誘電体における熱電現象・電場誘起熱応答の開拓

研究課題名（英文）Thermal imaging based study on thermal and thermoelectric responses in dielectric materials

研究代表者

井口 亮（Iguchi, Ryo）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員

研究者番号：40707717

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、最新の動的熱計測技術を用いて誘電体中の分極ダイナミクスに由来する熱応答・熱電応答の実験的探索を行った。熱電効果については古くに理論的な推測と限定的な実験例があるが、熱計測の難しさから存在の示唆に留まる。本研究ではまず、動的サーモグラフィ法に基づく非接触熱測定を誘電体材料へ適用し、高い電場印加下でも定量性を担保した熱イメージングを実現した。その後、電場により誘起される電気熱量効果について新たな直接計測法の確立と展開を行い、さらにコンデンサ構造における熱電応答の系統的な測定と解明を行った。これらにより、誘電体における電場誘起熱現象に対して新たな計測手法と理解をもたらした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では広く社会で使われている誘電体において埋もれている現象を明らかにしており、新しい熱制御技術や誘電体を用いた電子部品の熱設計に向けた基礎的な知見が得られた点に意義がある。また、誘電体中の輸送現象という新しい観点での取り組みであり、実際に電気双極子輸送現象というこれまでにない切り口による学理への展開にも繋がっており、エレクトロニクスに新しい展開をもたらすものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to elucidate the thermal response based on the polarization dynamics in dielectric materials using state-of-the-art dynamic thermal measurement techniques. We developed the non-contact quantitative measurement of thermal responses in dielectric materials simultaneously with the dielectric characterization. Next, we demonstrated a new direct measurement method for the electrocaloric effect, the fundamental effect induced by electric fields in dielectric materials. Then, based on the developed techniques, we conducted systematic study on the thermoelectric response in dielectrics, leading to new advancements in the understanding of electric field-induced thermal phenomena in dielectrics.

研究分野：スピントロニクス、スピнкаロリトロニクス

キーワード：誘電体 サーモグラフィ 熱電現象 電気熱量効果

1. 研究開始当初の背景

誘電体は電場印加に伴って内部の電荷の空間的なバランスが破れて電気分極を有する物質である。誘電体を金属電極二枚で挟んだ構造はコンデンサと呼ばれる電子部品の基本構造であり、電極間に電位差を与えると生成された分極に起因して巨視的な電気双極子が現れ、コンデンサにおける電気特性を支配する。コンデンサは電圧の安定化やノイズの除去のために必要不可欠なため、スマートフォン・パソコンを始めさまざまな電子機器における基幹部品である。さらに、誘電体の利用方法は電子部品だけに限られず、熱工学的な利用も検討されている。誘電体では電場印加/除去に伴ってエントロピーが変化し、発熱/吸熱を生じさせる電気熱量効果が生じることから、冷媒ガス不要で環境負荷の低い冷却原理として注目されてもいる。一方で、誘電体は電気的には絶縁性であることから、導体で発現する熱電効果など輸送現象について注目されることは殆どなかった。

近年の新たな展開から、誘電体においても新しい原理による熱現象・熱輸送現象が現れる可能性を見出せるようになった。具体的には、絶縁性であっても磁気的な秩序がある場合には磁化ダイナミクスによってスピンと熱が運ばれることが実験的に明らかになり、このアナロジーを考えれば、誘電体中の分極のダイナミクスにより、未開拓の現象が生じる可能性が考えられる。しかし、このような観点に基づく取り組みは研究開始時点において存在していなかった。また、1970年頃にマクスウェル方程式に現れる分極変位電流と通常の電流のアナロジーから、誘電体における熱電現象を予測した例もある。しかし、実験報告はその存在の可能性を示唆するだけに留まっており、観測された熱電信号が本当に誘電体の分極に由来するのか？どのような物質で大きな熱電応答が発生するのか？これらの問いへの回答は明らかにされないまま、数十年の間手つかずとなっていた。

誘電体中の熱現象の開拓には、対象となる系の時間・空間的な熱応答を網羅的に測定できる技術が不可欠である。また、電気分極を制御するためには高電圧が必要となることもあり、電気的な温度計測手法を用いる難易度も高い。これらの困難から研究が進んでこなかった背景があると推測される。研究代表者らは、非接触型の熱計測技術を用いて磁化ダイナミクスに由来する熱輸送現象に関する研究に従事してきた。とりわけ動的サーモグラフィ法が誘電体中における熱現象開拓に適している可能性に気づき、本研究を構想した。

2. 研究の目的

本研究では、広く社会で使われている誘電体において埋もれている現象を明らかにすることで、新しい熱制御技術や誘電体を用いた電子部品の熱設計に向けた基礎的な知見を明らかにすることを目指した。具体的な項目として、以下の目的に沿って研究を実施することとした。

- (1) 誘電体材料における熱現象の非接触計測法の確立
- (2) 各種誘電体材料における電気熱量効果の定量化
- (3) 誘電体コンデンサ構造における熱電応答の解明

3. 研究の方法

本研究においては、特に誘電体中の分極を制御するための電場印加と、電場方向に沿った熱応答の計測を両立するためにコンデンサ構造を対象とした(図1)。

(1) 誘電体材料における熱現象の非接触計測法の確立

本項目では、研究代表者らが用いてきた動的サーモグラフィ法を用い、電場・電流印加に伴う熱応答のイメージングを誘電体に適用することを目指し、定量性の確保のための補正方法、および分極評価のための電気回路について検討を行った。

動的サーモグラフィ法は赤外線カメラによる温度の空間分布計測とフーリエ解析に基づくロックイン検出を組み合わせたもので、特定の入力に対する熱応答の空間分布を非接触かつ mK オーダーの感度で測定できる。誘電体の熱電応答の探索に用いれば、信頼性が高く系統的な実験が可能である。一方で、赤外線カメラによる温度計測では、物体から輻射される赤外線量から温度を推定しているため、その定量性は対象に依存する。本項目においては、電気熱量効果および特性が既知の熱電効果を対象として、一貫性のある定量的な測定を実現する補正方法を確認することを目指した。また、電場印加時の分極変化をサーモグラフィ計測と同時に評価するための電気回路の組み込みについても取り組んだ。

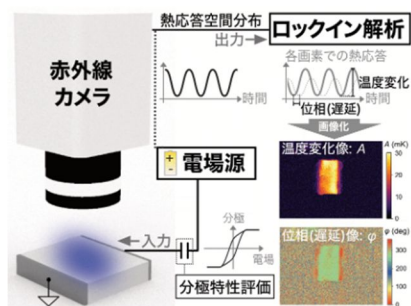


図 1: 誘電体の動的サーモグラフィ計測の模式図。

本項目においては、電気熱量効果および特性が既知の熱電効果を対象として、一貫性のある定量的な測定を実現する補正方法を確認することを目指した。また、電場印加時の分極変化をサーモグラフィ計測と同時に評価するための電気回路の組み込みについても取り組んだ。

(2) 各種誘電体材料における電気熱量効果の定量化

本項目では(1)における補正方法に基づき、動的サーモグラフィ法を用いた誘電体中の電気熱量効果の直接計測を試みた。電気熱量効果による熱応答の振る舞いは常誘電体であれば予測可能なため、後述する項目(3)に進む前段階として正常な測定ができていないか確認することを目的とした。加えて、動的サーモグラフィ法を用いて簡便な電気熱量効果の直接計測法を実現することを目指した。電気熱量効果は本質的には入力電場に対して非線形の効果であるため、線形応答を測定するロックイン計測では工夫が必要となる。実際、過去には多種の熱量効果をターゲットとした類似の研究では、線形領域のみの評価や測定範囲を分割した上での積分による評価などが行われていたが、強誘電体などヒステリシスがある場合には適用が困難である。本研究では、非線形応答を含めることで、電気熱量効果の駆動に最適な電場のオン・オフに伴う熱応答を一測定で明らかにできる手法について研究を進めた。

また、強誘電性を示す物質においては、電気熱量効果の測定には間接計測法と呼ばれるエントロピー変化の計算による温度変化の推定が困難であることが知られている。本研究の手法は直接計測法であり実際の温度変化を測定するため、このような状況においても利用可能である。そこで、確立した手法に基づいて、いくつか試料構造や組成を工夫した試料における電気熱量効果の検証についても進めた。

(3) 誘電体キャパシタ構造における熱電応答の解明

本項目の詳細は再提出時に記載する。

4. 研究成果

(1) 誘電体材料における熱現象の非接触計測法の確立

サーモグラフィ計測では、物体から輻射される赤外線量の校正のために黒体コーティングが用いられることが主である。黒体コーティングは高い放射率を示す一方で、絶縁性が十分に高いとは言えず、高電圧印加に伴って絶縁破壊などに由来して計測結果が信用できないことがわかった。黒体コーティングなしでの測定の場合は、対象試料自身の放射率が高い必要がある。本研究で用いる試料を近赤外領域に対応する赤外線カメラで測定したところ放射率が低く透明に近いことがわかった。他方、遠赤外領域では試料が十分な放射率を有しており、本領域に対応した赤外線カメラを用いて定量的に動的サーモグラフィ計測を行うための校正・補正方法の確立を行った。

遠赤外領域においては、MEMS 技術を用いた微小な抵抗センサーを用いたマイクロボロメーター式のイメージセンサーが用いられることが多く、実際に本研究で用いたものも同式である。マイクロボロメーター式のカメラにおいては抵抗センサーの熱容量が無視できず、リアルタイムで見ると計測結果には一定の遅れが生じる。この熱容量による時定数は 10ms 程度のオーダーであり、周波数ドメインでは 10Hz 程度から影響が顕著になる。この影響を熱応答が極めて高速であるスピン熱電効果を示す参照試料を用いて調べたところ、指数関数的減衰型の関数との畳み込み積分により良く再現されることがわかった(図 2)。さらに、赤外線カメラの撮像・読み出しタイミングによるセンサー内部でのズレまで考慮することで、周波数に依らず定量的な測定を実現する補正手順を見出すことができた。これらの赤外線カメラの方式・実装に由来する定量性への影響は文献として十分にまとめられているとは言い難い状況であった。これは、多くの場合においてはフォトダイオード式で遅れが存在せず高感度である近赤外領域の赤外線カメラが用いられることに加え、欠陥解析に用いる場合は周波数依存性や熱が発生するタイミング(位相遅れ情報)に関して定量性が要求されない利用方法が多いためであると推測される。本研究で取り組んだ定量性を担保する補正方法については後述する(2)の成果物の補足資料としてまとめ、公開した。

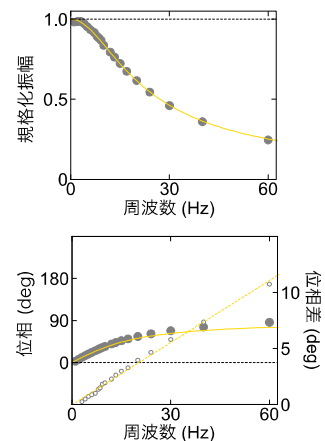


図 2: マイクロボロメーター式カメラにおける補正係数の周波数依存性測定例。実線は補正モデル。

(2) 各種誘電体材料における電気熱量効果の定量化

本項目では(1)における補正方法に基づき、動的サーモグラフィ法を用いた誘電体中の電気熱量効果の直接計測方法の確立と物質探索への展開を行った。電気熱量効果は本質的には入力電場に対して非線形の効果であるため、本研究での新たな手法として、交流電場の入力に対して基本波に加えて二倍波、三倍波といった高次の応答を含めた測定を実現し、これらから最大の温度変化を引き出すことを提案した。また、誘電体に電圧を印加した際には系の絶縁性に応じてリーク電流が生じる。このリーク電流はジュール熱を生じ、電場のオン・オフに伴って変化することから、電気熱量効果測定信号と似た振る舞いをする。このため、電気熱量効果とジュール熱を分離する必要がある。本課題に向けて熱伝導方程式に基づく解析に取り組み、両者の違いは周波数

依存性から分離できることを見出した。実験的な検証に向けては、典型的な強誘電体であるBaTiO₃に対してBaをSrで置換し、キュリー温度を室温以下および近傍に制御したBa_{1-x}Sr_xTiO₃を用いることとし、多結晶試料を焼結により作製した。これらの試料を対象に電気熱量効果計測を行って、実際に実験的にもその振る舞いを確認することができた。さらに、本試料の温度依存性を測定し、常磁性的な振る舞いを示す試料について、間接計測法による温度変化の推定量と動的サーモグラフィ法による計測結果を比較した。両者は良い一致を示しており、本手法の正当性を確認することができた。動的サーモグラフィ法を利用することにより、多数の試料を直接的かつ同時に評価ができるだけでなく、さらに試料内部での空間的な温度変化の偏りなどが評価できる(図4)。今後、電気熱量効果に適した材料開発への貢献が期待できる。

さらに、この確立した手法に基づいて、誘電体の分極種別に関する影響を調べる取り組みも行った。強誘電体においては電場オフ時に複雑な分極構造を示す。この構造は、間接計測法における分極-電場曲線の温度依存性から実際のエントロピー変化を推定することを困難とするため、直接計測法が必要になる。そこで本研究で確立した動的サーモグラフィ法による直接計測と、高周波複素誘電率測定を組み合わせ、分極種の定量化と電気熱量効果の大きさの比較を行い、分極種が電気熱量効果に及ぼす影響について明らかにした。

(3) 誘電体キャパシタ構造における熱電応答の解明

本項目の詳細は再提出時に記載する。

(その他の展開)

動的サーモグラフィ法のみならず、サーモリフレクタンズ法を用いた高速測定・高感度測定化に向けた取り組みも行った。特に、基礎的な特性評価として、感温液晶を用いることで高感度化が見込めること、定量性も担保可能であることを明らかにした。

また、本研究からの理論的な展開として、新たに電気双極子を運ぶフェロンという概念を提唱した。磁性体中ではスピンを運ぶ素励起はマグノンと呼ばれ、マグノンを励起するとマグノンの有するスピンの由来して、磁性体中の磁化が減少する。同様に、誘電体中においても電気分極を減少させる励起を考え、それがどのように駆動され、どのような定式化が可能であるかについて理論的な検討を行った。秩序-無秩序型および変位型の誘電体に対して理論的な解析を行って成果として出版された。今後、フェロンに着目した電気双極子輸送現象に関してもさらなる展開が期待される。

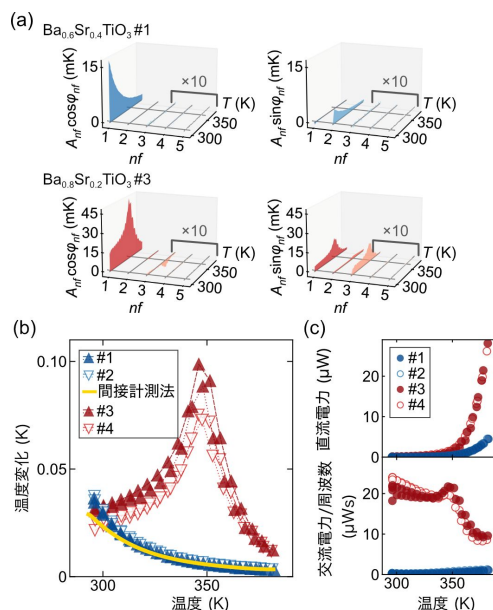


図3: 高調波成分を含む電気熱量効果の動的サーモグラフィ法に基づく動的計測。(a)高調波 nf 成分における振幅(A)および位相 ϕ 。(b)温度変化の温度依存性。(c)同時計測された電力。

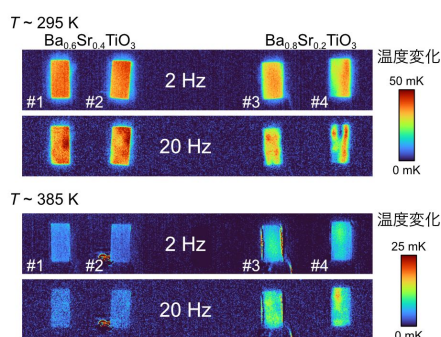


図4: 動的サーモグラフィ法による電気熱量効果の空間分布の可視化例。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahagi Atsushi, Iguchi Ryo, Nagano Hosei, Uchida Ken-ichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Highly sensitive lock-in thermoreflectance temperature measurement using thermochromic liquid crystal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 172401-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0142754	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 Iguchi Ryo, Fukuda Daisuke, Kano Jun, Teranishi Takashi, Uchida Ken-ichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Direct measurement of electrocaloric effect based on multi-harmonic lock-in thermography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 082903-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0137686	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 Tang Ping, Uchida Ken-ichi, Bauer Gerrit E. W.	4. 巻 107
2. 論文標題 Nonlocal drag thermoelectricity generated by ferroelectric van der Waals heterostructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L121406-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.L121406	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 Wooten Brandi L., Iguchi Ryo, Tang Ping, Kang Joon Sang, Uchida Ken-ichi, Bauer Gerrit E. W., Heremans Joseph P.	4. 巻 9
2. 論文標題 Electric field dependent phonon spectrum and heat conduction in ferroelectrics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eadd7194-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.add7194	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 該当する

1. 著者名 Tang Ping, Iguchi Ryo, Uchida Ken-ichi, Bauer Gerrit E. W.	4. 巻 106
2. 論文標題 Excitations of the ferroelectric order	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L081105-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.106.1081105	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 Tang Ping, Iguchi Ryo, Uchida Ken-ichi, Bauer Gerrit E.W.	4. 巻 128
2. 論文標題 Thermoelectric Polarization Transport in Ferroelectric Ballistic Point Contacts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 047601-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.128.047601	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 Bauer Gerrit E.W., Tang Ping, Iguchi Ryo, Uchida Ken-ichi	4. 巻 541
2. 論文標題 Magnonics vs. Ferronics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 168468-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2021.168468	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 Yoshida Tasuku, Kano Jun, Mizumaki Masaichiro, Tamenori Yusuke, Nitta Kiyofumi, Kato Kazuo, Hinokuma Satoshi, Oshime Norihiro, Hirose Satoshi, Mikami Hitoshi, Ikeda Naoshi, Fujii Tatsuo, Nishina Yuta, Okubo Tomoko	4. 巻 119
2. 論文標題 High valence states of Pd supported on ferroelectric BaTiO3 driven by electric polarization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092904-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0066289	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 狩野旬、押目典宏、池永英司、安井伸太郎、日隈聡士、保井晃	4. 巻 57
2. 論文標題 強誘電体の電子構造 反電場効果により傾斜するバンド構造 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 463 ~ 466
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 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 押目典宏、狩野旬	4. 巻 34
2. 論文標題 強誘電体チタン酸バリウムの電気分極に誘起されたバンド傾斜構造の観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 放射光学会誌	6. 最初と最後の頁 225 ~ 234
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 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 Oshime Norihiro, Kano Jun, Ikenaga Eiji, Yasui Shintaro, Hamasaki Yosuke, Yasuhara Sou, Hinokuma Satoshi, Ikeda Naoshi, Janolin Pierre-Eymeric, Kiat Jean-Michel, Itoh Mitsuru, Yokoya Takayoshi, Fujii Tatsuo, Yasui Akira, Osawa Hitoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Skewed electronic band structure induced by electric polarization in ferroelectric BaTiO ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10702-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-67651-w	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 Takada Tomoasa, Fujita Takeshi, Imagawa Takehiro, Yamamoto Emi, Kano Jun, Shiga Daisuke, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Higuchi Tohru	4. 巻 90
2. 論文標題 Surface Electron-Ion Mixed Conduction of BaTiO ₃ - Thin Film with Oxygen Vacancies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014707-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.014707	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 Fujii Saya, Kano Jun, Oshime Norihiro, Higuchi Tohru, Nishina Yuta, Fujii Tatsuo, Ikeda Naoshi, Ota Hiromi	4. 巻 129
2. 論文標題 Light reflectance and photoelectron yield spectroscopy enable acceptor level measurement in p-type Ba _{1-x} TiO ₃ semiconductor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 084105-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0033761	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 Bauer Gerrit E.W., Iguchi Ryo, Uchida Ken-ichi	4. 巻 126
2. 論文標題 Theory of Transport in Ferroelectric Capacitors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 187603-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.187603	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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 井口亮、福田大介、狩野旬、寺西貴志、内田健一
2. 発表標題 ロックインサーモグラフィ法を用いた電気熱量効果の直接計測
3. 学会等名 日本セラミックス協会第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺西貴志、福田大介、田中志弥、近藤真矢、井口亮、内田健一、岸本昭
2. 発表標題 BaTiO ₃ 系強誘電体の電気熱量効果に対する双極子分極の寄与
3. 学会等名 日本セラミックス協会第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田大介、寺西貴志、近藤真矢、井口亮、内田健一、岸本昭
2. 発表標題 BaTiO ₃ 系強誘電体の電気熱量効果における分極種の寄与
3. 学会等名 第60回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田大介、寺西貴志、近藤真矢、井口亮、内田健一、岸本昭
2. 発表標題 BaTiO ₃ 系強誘電体の電気熱量効果における分極種依存性
3. 学会等名 セラミックス協会第33回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	寺西 貴志 (Teranishi Takashi) (90598690)	岡山大学・自然科学学域・准教授 (15301)	
研究分担者	狩野 旬 (Kano Jun) (50375408)	岡山大学・自然科学学域・准教授 (15301)	
研究分担者	内田 健一 (Ken-ichi Uchida) (50633541)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・グループリーダー (82108)	

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