

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04679

研究課題名（和文）分子性誘電体物質の新奇強電場相と新機能の創発

研究課題名（英文）Creation of novel ferroelectric phases and new functionalities in molecular dielectrics

研究代表者

堀内 佐智雄（HORIUCHI, Sachio）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員

研究者番号：30371074

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：強電場を印加することにより分極が急激に増加する性質をもつ誘電体には、高性能のエネルギー貯蔵・変換機能が期待される。本研究では、強電場により高分極性の強誘電相が誘起される相変化型の有機分子材料の開発を行った。相変化型誘電体物質の拡充と多様な相転換形態の実現を通じて、高分極、低損失動作化、相変換の微視的機構と構造-機能相関の包括的な理解、高性能・高機能化に向けた有効な材料設計指針を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大な分極変化を示す反強誘電体は、電気エネルギーの貯蔵や機械/熱エネルギーとの相互転換機能への利活用の観点から、近年熱い注目を集めてきた。四角酸で見出した静電エネルギー貯蔵密度と貯蔵効率は、有機分子系の中で群を抜く性能であるだけでなく、重量ベースであれば静電エネルギー貯蔵密度は無機バルク反強誘電体の最高性能に匹敵、凌駕するレベルにあり、軽量な有機物ならではの優位性を発揮できた意味でも特筆すべき成果である。

研究成果の概要（英文）：Dielectrics, which have the rapidly increasing polarization with strong electric fields, are expected to show highly performing energy storage and conversion. In this study, we developed organic molecular phase-change materials in which a highly polarizable ferroelectric phase is induced by an external electric field. Through the expansion of variations in phase-change dielectrics and switching schemes, we were able to obtain new materials with high-polarization and low-energy loss as well as comprehensive understanding of the microscopic mechanism and structure-property relationship useful for effective material design.

研究分野：有機物性化学

キーワード：誘電体 有機結晶 相転移 結晶構造 分光

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

環境適合性の高いエネルギーエレクトロニクスを実現するため、高性能のエネルギー貯蔵・変換機能をもつ材料が求められている。その中、反強誘電体のように、強電場により相転移が生じ分極が急激に増加する性質(メタ誘電性)をもつ誘電体は、電気エネルギーの貯蔵や機械/熱エネルギーとの相互変換機能に優れることから、近年注目を集めてきた[引用文献]。反強誘電性とは、反平行秩序状態にある双極子の配置を電場により平行またはそれに近い状態に整列させて強誘電秩序を発生させる現象で、電気分極-電場曲線には、二重ループ型のヒステリシスが現れる。反強誘電性が直接観測された有機分子結晶は、本研究前ではベンゾイミダゾール類や四角酸など、ごく僅かな例が知られるのみであった[引用文献]。

エネルギー貯蔵・転換いずれの高機能化にとっても最重要な起点はエネルギー貯蔵密度の大きさである。反強誘電体の場合、貯蔵エネルギー密度は、誘起される分極量とスイッチ電場の大きさそれぞれに比例することから、耐圧の強化とともにこれらを増強する必要がある。他方、充放電過程でのエネルギー損失として現れる分極-電場曲線のヒステリシス幅も極力抑える必要がある。なお、ターゲットデバイスに応じて相反する材料設計指針が求められる例も存在する。例えば充放電機能については、デバイスに不要な応力を避けるために電気ひずみを小さくすることが望ましい一方で、逆に大変位トランスデューサに利用するには、電気ひずみをいかに最大化するかが鍵となる。

本課題の目指すところは、上記の様々な課題に応える分子設計案へと還元し材料開発の加速化や誘電体材料科学の発展に資することである。有機分子性結晶の場合、特有のミクロ・メゾ・マクロの階層構造(分子構造・分子配列・ドメイン構造)から物性機能の起源について実験や理論計算を通じて洞察を深める必要がある。物質群と自由度に富んだ有機分子化合物が対象である以上、求められる機能から材料設計への橋渡しのためには構造-機能相関の知見を蓄積・体系化することが求められる。すなわち、本課題根幹の学術的な「問い」は、新たな電場誘起相の構造や特質、微視的な動作機構が如何なるものか、それがどのようにしてエネルギー貯蔵や変換機能の高性能化や高信頼化に結実できるのか?であった。

2. 研究の目的

高性能で高信頼性のエネルギー貯蔵・変換機能をもつ有機分子材料を開発し、環境適合性の高いエネルギーエレクトロニクスを実現するための材料技術の発展に貢献したい。そのために、本研究課題では、多様な分子自由度を最大限活用し、相変化型誘電体物質の拡充と新奇な相や動作機構を伴う多様な強電場相の開拓を行う。相転移の微視的機構と構造-機能相関を明らかにすることで強電場物質科学の学理を構築するとともに、将来のデバイス開発を加速する材料設計指針の確立を目指す。この目的を遂行するための取り組みが、1. 結晶構造と理論計算による相変化予測、2. 材料合成と新奇強電場相の開拓、3. 強電場下の構造-機能相関の評価である。

3. 研究の方法

Reaxys等の化学物質データベースとケンブリッジ結晶構造データベース(CSD)を併用し、分子・結晶構造をもとに材料候補の抽出を行った。有機強誘電体では、プロトン移動と電子系の強い相関性により自発分極の大きさが突出していたクロコニック結晶の実績[引用文献]を鑑み、本課題における開発ターゲットとして、同様の分子間水素結合とパイ電子骨格を併せ持つ物質に重点を置くことにした。CSDからの候補物質の抽出にあたり、結晶構造に隠された擬似的な併進対称性を強誘電性の鍵であったことに準えて、擬似的な併進対称性の存在を反強誘電性を見出す手がかりとした。次節で述べる通り、反強誘電的な分極特性を示す材料は、反強誘電体のように秩序化した系に限らず、水素位置が乱れた系も見出された。このことを受けて、同様に水素位置が乱れた結晶構造をもつ物質も候補として抽出することにした。

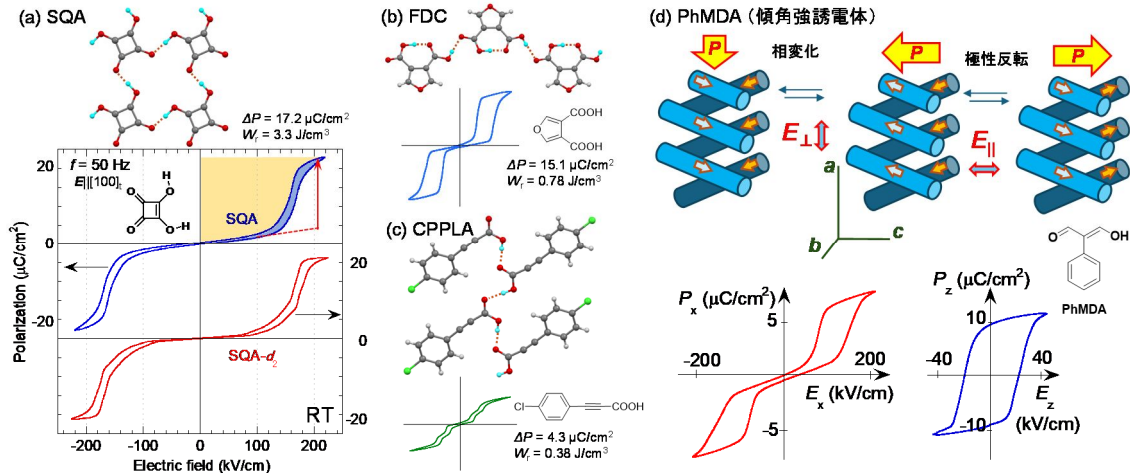
これらの候補物質入手の後、単結晶化とそのX線構造解析、結晶方位の確認を行った。分極・圧電特性・外場下の構造解析・分極イメージング等の各種評価について、有機結晶特有の強い異方性を正確に評価するため、単結晶試料を用いて実験を行った。また、水素結合型誘電体の大半では、水素結合分子ネットワークに沿って自発分極もしくは誘起分極が現れるため、特に断りが無い限り、同方向に外部電場を印加して分極特性や縦の圧電定数の実評価を行った。

密度汎関数理論(DFT)に基づく計算では、Berry位相評価による自発(または副格子)分極の予測、各種秩序構造のエネルギー安定性評価を行った。ファンデルワールス密度汎関数理論による結晶構造最適化・分極計算機能を整備し、電場誘起相転移や圧電 d 定数のシミュレーションも実施した。

4. 研究成果

(1) 相変化型誘電体物質開発とエネルギー貯蔵機能 (発表論文1)

分子間水素結合とパイ電子骨格を併せ持つプロトン互変異性物質について探索を進めた結果、特に $15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 超もの優れた誘起分極をもつ反強誘電体を2例も創出できた(図1)。反強誘電体



(図1) プロトン互変異性物質による相変化型誘電体の分子構造、分子配列、および電場-分極履歴特性。(a) 四角酸(SQA), (b) 3,4-フランジカルボン酸(FDC), (c) (4-クロロフェニル)プロピオン酸(CPPLA), (d) フェニルマロンジアルデヒド(PhMDA)。

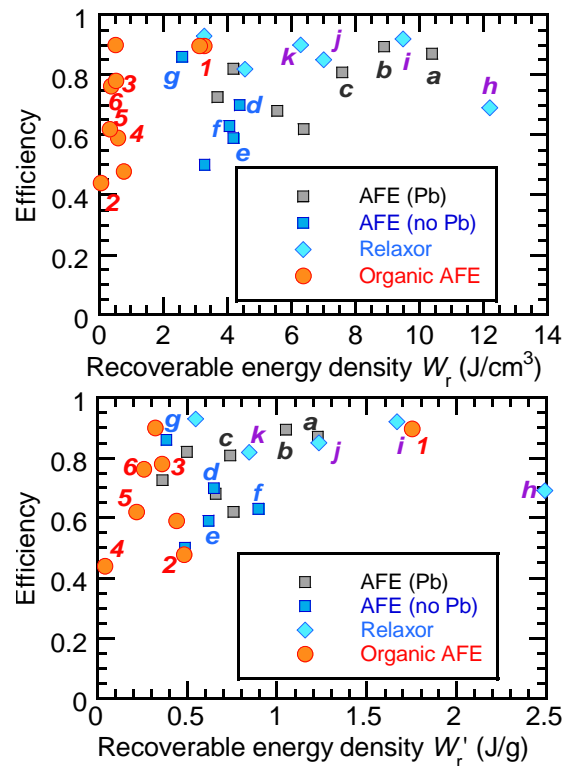
として知られる四角酸(SQA)について、結晶改質により絶縁強度の強化を図った結果、高いスイッチ電場 (170kV/cm) と巨大な誘起分極 ($P = 17.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) を伴う二重ループ型の電場-分極履歴特性を得た。ヒステリシス幅は非常にスリムであり、大きな静電エネルギーを非常に高効率 (≈ 0.90) で貯蔵できることを示した。また、貯蔵エネルギー密度の大きさは、重量ベースでは無機系のバルク反強誘電体の最高レベルの性能に匹敵すること(図2)も明らかにできた。軽量な有機物ならではの優位性を発揮できた意味でも特筆すべき成果と言えよう。他方、3,4-フランジカルボン酸(FDC)結晶(相)でも SQA 結晶に次ぐ大きな分極 ($P = 15.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) が得られた(図1b)。

本研究では、多様な分極反転様式も続々と発見できた。(4-クロロフェニル)プロピオン酸(CPPLA)では二段階の相変化を伴う新奇な反強誘電性を示した(図1c)。一方、既報の強誘電体であるフェニルマロンジアルデヒド(PhMDA)について結晶構造を再考察したところ、互いに傾きあった副格子分極ベクトルを自発分極源とする傾角強誘電体と見做せることに気づき、特有の分極異方性を活用することで「反強誘電体もどきの分極履歴特性を示す強誘電体」の実現に至った。PhMDA 結晶の場合、副格子ベクトルのうち自発分極に垂直な a 軸成分は反平行の配置秩序をもち、これらを電場で強制整列させるべく、同方向に 200kV/cm もの強い電場を印加したところ、二重ループ型の分極履歴特性が得られた。ゼロ電場での強誘電 I 相から自発分極方向が 90 度回転した新たな強誘電 II 相へ電場誘起相転移が生じたと解釈できた(図1d)。

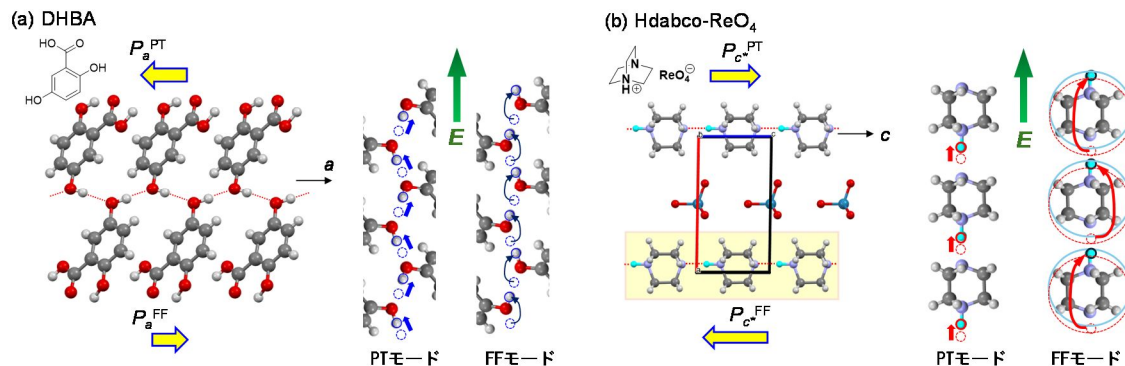
なお、上記の反強誘電体や傾角強誘電体の相変化に伴う誘起分極量の実験値はいずれも、概ね副格子分極ベクトル理論値の足し合わせと整合し、想定される相変化モデルを裏付けることができた。

(2) 分極反転機構の競合 (発表論文 2, 3)

クロン酸や四角酸など、従来の水素結合型誘電体では、分子間の水素原子移動(PTモード)が分極反転を担っていた。一方、本研究で強誘電体候補として見出した 2,5-ジヒドロキシ安息香酸(DHBA)や 2-ナフトール(NPTL)では、注目すべき特徴として、頭尾結合状に連なる水酸基による一次元水素結合鎖をなし、PTモードだけでなく水酸基のフリップフロップ運動(FFモード)でも分極反転しうる稀有な幾何学配置を有していた。さらに分極理論計算により、PTモ



(図2) 有機反誘電体のエネルギー貯蔵性能と無機物(反強誘電体バルク結晶、リラクサ)との比較。上(下)段は体積(重量)当たりの密度。1はSQA, 2はFDC。



(図3) 水素結合型有機物質(a)DHBA および(b)H-dabco-ReO₄ 塩での分極反転に想定されるPTおよびFFモード。

ドとFFモードに対応する分極ベクトル成分は互いに逆向きという興味深い結果が得られた(図3a)。同図のように電場を印加した場合、両モードでOH水素の配向が互いに逆向きになることから、強電場下の結晶の絶対構造をX線回折の異常分散効果に基づき決定すれば、どちらのモードによる分極反転なのか特定できることも分かる。DHBA結晶は強誘電性を示しポーリング自体は可能であったが、異常分散効果の小さい軽元素のみの構成ゆえに、放射光X線回折を以てしても絶対構造の決定は困難と判明した。一方、自発分極の大きさの実験値($\approx 5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)がFFモードの理論値($5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$; PTは $7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)に近く、かつ分極反転に対する重水素置換効果が微小であった事実から、FFモードであることが示唆された。より明確に反転モードを裏付ける代替手段を探し求める中、ポーリング後の構造がどちらのOH水素配置をとるかで圧電応答の符号が変わる原理が活用できることに気が付いた。この原理に基づき正逆圧電 d 定数の理論値と実測値の照合により反転モードを簡便に特定できることを実証すると同時に、負の d_{11} 定数(実測値: 正圧電効果 $-7.7\text{pC}/\text{N}$ 、逆圧電効果 $-4.8\text{pm}/\text{V}$)をもつDHBA結晶はFFモードであることを確定できた。

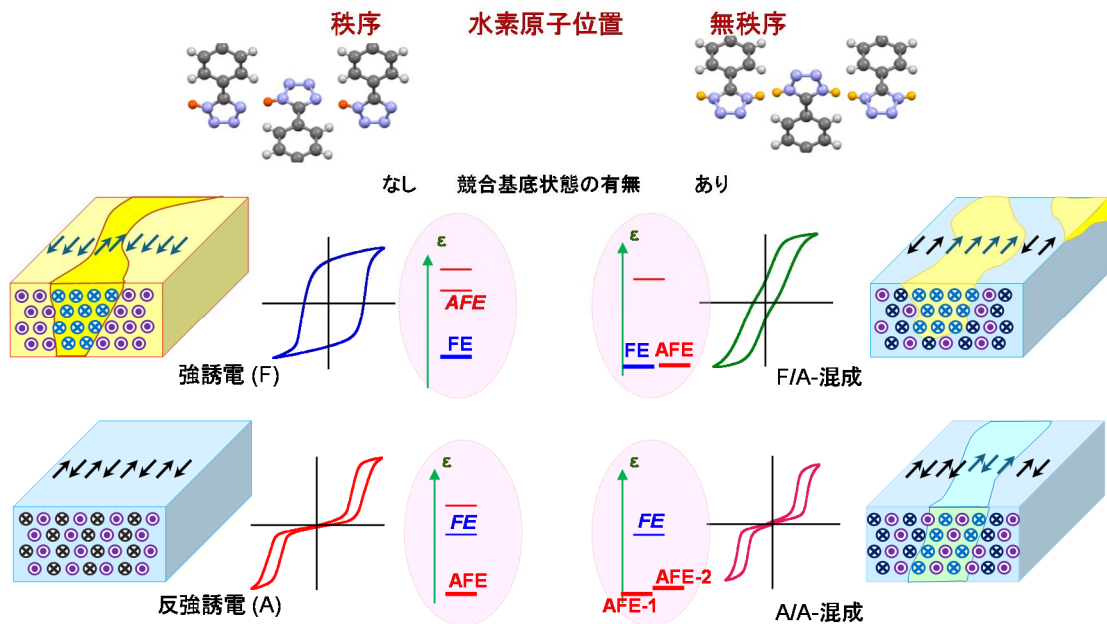
同様の水素配置をもつ周辺化合物について系統的に調べた結果、 $0 \cdot \cdot \cdot 0$ 距離が短い($< 2.68 \text{ \AA}$)物質はPTモード、長い($> 2.75 \text{ \AA}$)とFFモード、その中間はNPTLのように抗電場が測定限界を超えて動作禁制となることが分かった。これにより、水素結合長に関する強誘電体/反強誘電体の明確な設計指針が抽出できた。これをもとに実際に、 $2.90\text{-}2.91 \text{ \AA}$ もの長い $0 \cdot \cdot \cdot 0$ 距離をもつ、 1 -ジヒドロキシ- $1,3$ -ジイソプロピルベンゼン(DHIB)結晶にて、二重ループ型の分極ヒステリシス曲線が得られ、FFモードをもつ新奇な相変化物質を見出すことができた。

さらに既存の強誘電体の中から同様のモデル物質として、有機・無機複合型物質Hdabco-ReO₄塩を探し当てた[引用文献]。この塩では、プロトン化したジアザピシクロ[2.2.2]オクタン(Hdabco⁺)分子がNH⁺⋯N型水素結合で鎖状連結し、分極反転過程として、Hdabco⁺分子回転(FFモード)とHdabco⁺イオン間のPTモードが競合しうる(図3b)。圧電 d_{33} 定数の実測値(正圧電効果 $+5.1\text{pC}/\text{N}$)の符号は正であり、理論値との比較によりPTモードであることが実証できた。なお、当物質では自発分極の配向に関し多軸自由度が想定されたことから、本課題で強電場オペランド分光評価装置として立ち上げたテラヘルツ波発生法による強誘電ドメインイメージング装置を活用して、多軸性分極ドメイン構造の3次元的可視化にも成功できた。

(3) 秩序相の競合 (発表論文4)

一連のフェニルテトラゾール類やイミダゾール類について単結晶構造解析、分極ヒステリシス測定、密度汎関数理論(DFT)計算を行った結果、極性(FE)や反極性(AFE)の基底状態がほぼ縮退(競合)状態を伴っている場合、常に無秩序な水素結合が生じることが明らかになった。図4には、水素原子の秩序状態と秩序構造の相対的な安定性、ドメイン状態、分極履歴特性の相関性について模式的に示した。水素の乱れに2つの異なる起源(FE状態とAFE状態が競合するケースと複数の異なるAFE秩序状態が競合するケース)があることを見出した。前者の場合、強誘電性タイプの一重ループと反強誘電性タイプ二重ループとの中間的な分極履歴曲線が現れた(ここでF/A-混成状態と呼称)。その例として、5-(4-フルオロフェニル)-1*H*-テトラゾールが挙げられる。一方、複数のAFE秩序状態が競合し合う場合には、反強誘電体と変わらぬ二重ループ型の分極履歴特性が得られ、良好なエネルギー貯蔵機能が得られた(例: 5-フェニル-1*H*-テトラゾール)。

なお、FE状態に比べAFE状態のエネルギー準位の安定化が著しい場合には、水素原子位置の乱れの有無にかかわらず電場誘起相転移が困難となることも明らかとなった。これまで、数多くの2,4,5-三置換型-1*H*-イミダゾール結晶において、水素原子位置に乱れがあり、それは水素原子の動きやすさを連想させたものの、一切分極ヒステリシスに何らの分極スイッチ現象が見いだされず、謎とされていた。今回のシミュレーションにより、こうした実験結果についても、首尾一貫した説明を与え、謎を解き明かすことができた。



(図4) 水素結合型有機物質による種々の誘電体。各秩序状態の相対的な安定性がもたらす水素位置の秩序性(ミクロ)、ドメイン状態(メゾスコピック)と分極ヒステリシス特性(マクロ)の模式図。

(4) 電場誘起相変化の類型化と総括

水素結合型物質について、相変化をもたらす分極スイッチ機構には従来のPTモードだけでなく、FFモードがあることを見出した。一方、相変化の形態は2種類に大別できることが分かった。第一種は、異なる秩序相間の転換であり、その具体例として、反強誘電秩序状態から強誘電秩序状態が強制された四角酸などの反強誘電体のほか、極性軸が90度回転した別の強誘電秩序相が電場で誘起できた(傾角強誘電体)PhMDAも一例に加わった。第二種とは、無電場下で水素原子位置が乱れている誘電体が舞台で、その秩序-無秩序に伴う相変化が相当する。一連のフェニルテトラゾール類やイミダゾール類においては、反強誘電秩序が無いまま、見かけ上反強誘電体とほぼ同様の二重ループ型の分極履歴特性を示した。理論計算の結果、長距離秩序阻害要因として複数の秩序状態の競合が特定された。

一方、エネルギー貯蔵デバイスに向けては、水素原子の秩序・無秩序に関係なく良好なエネルギー貯蔵特性が見いだされたことから、第一種、第二種を問わず活用できるものと見込まれる。エネルギー貯蔵量を増やす指針として、従来のように高分極性分子を活用することももちろんのこと、相変化のスイッチ電場を強化するためにFE状態に対するAFE状態の安定化の度合いを適切に制御できれば良いこと、精度の良い結晶構造データがあれば、理論計算でこれらを的確に予見できることを明らかにできた。

以上のように、各種実験と理論計算の協働を通じて、分極反転性能の正確な予測と実証性、相変化や長距離秩序の有無とその起源、動作機構の形態などの首尾一貫した理解が一気に深まった。これにより、機能性強化に向けた材料設計にも資する数多くの知見が多く得られ、大いに意義があった。

<引用文献>

Z. Yao, Z. Song, H. Hao, Z. Yu, M. Cao, S. Zhang, M. T. Lanagan, H. Liu, *Adv. Mater.*, 29巻, 2017, 1601727.

S. Horiuchi, S. Ishibashi, *J. Phys. Soc. Jpn.* 89巻, 2020, 051009.

M. Szafranski, A. Katrusiak, G. J. McIntyre, *Phys. Rev. Lett.* 89巻, 2002, 215507.

<発表論文>

1 : S. Horiuchi, S. Ishibashi, *Chem. Sci.*, 12巻, 2021, 14198-14206.

2 : Y. Shimoi, S. Tsuzuki, R. Kumai, M. Sotome, S. Horiuchi, *J. Mater. Chem. C*, 10巻, 2022, 10099-10105.

3 : S. Ishibashi, R. Kumai, S. Horiuchi, *Sci. Repo.*, 13巻, 2023, 8810-1-8.

4 : S. Horiuchi, H. Minemawari, S. Ishibashi, *Mater. Horiz.*, 10巻, 2023, 2149-2159.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Horiuchi Sachio, Minemawari Hiromi, Ishibashi Shoji	4. 巻 10
2. 論文標題 Competition of polar and antipolar states hidden behind a variety of polarization switching modes in hydrogen-bonded molecular chains	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Horizons	6. 最初と最後の頁 2149 ~ 2159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2mh01530g	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 Ishibashi Shoji, Kumai Reiji, Horiuchi Sachio	4. 巻 13
2. 論文標題 A straightforward method using the sign of the piezoelectric coefficient to identify the ferroelectric switching mechanism	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8810-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-34923-0	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 Shimoi Yukihiko, Tsuzuki Seiji, Kumai Reiji, Sotome Masato, Horiuchi Sachio	4. 巻 10
2. 論文標題 Competing ferroelectric polarization: hydroxyl flip-flop versus proton-transfer mechanisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 10099 ~ 10105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2TC00233G	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 Horiuchi Sachio, Ishibashi Shoji	4. 巻 12
2. 論文標題 Large polarization and record-high performance of energy storage induced by a phase change in organic molecular crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 14198 ~ 14206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc02729h	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 Ishibashi Shoji、Horiuchi Sachio、Kumai Reiji	4. 巻 5
2. 論文標題 Hydrogen-bonded single-component organic ferroelectrics revisited by van der Waals density-functional theory calculations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 094409-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.094409	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6件(うち招待講演 3件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 五月女 真人、石田 龍馬、堀内 佐智雄、近藤 高志
2. 発表標題 テラヘルツ電磁波発生による分子性強誘電体[Hdabco][ReO4]のドメイン構造の三次元可視化
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石橋 章司、熊井 玲児、堀内 佐智雄
2. 発表標題 圧電定数符号と強誘電スイッチング機構の関係
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 堀内 佐智雄
2. 発表標題 競り合いを活かした自発分極~有機(反)強誘電体結晶の新展開~
3. 学会等名 日本化学会秋季事業第13回CSJ化学フェスタ2023(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀内 佐智雄
2. 発表標題 有機結晶を用いた強誘電体・反強誘電体材料の開発
3. 学会等名 強的秩序とその操作に関わる研究会 第15回夏の学校（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内 佐智雄
2. 発表標題 高分極性有機誘電体結晶の最近の展開
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石橋 章司、堀内 佐智雄
2. 発表標題 Computational Simulations of Electric-Field-Induced Phase Transitions in Hydrogen-Bonded Compounds
3. 学会等名 MRM2021 Materials Research Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 沖本洋一、板谷 治郎、堀内 佐智雄	4. 発行年 2023年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 9
3. 書名 光と物質の量子相互作用ハンドブック（荒川泰彦 監修）第3編 各物質・構造における量子相互作用 第9章 超高速光パルスによる強誘電体の光制御	

1. 著者名 Horiuchi Sachio、Ishibashi Shoji、Yoshinori Tokura	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Woodhead Publishing	5. 総ページ数 40
3. 書名 Chapter 2 Ferroelectric Charge-Transfer Complexes, Ed. Kamal Asadi, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Organic Ferroelectric Materials and Applications	

1. 著者名 Horiuchi Sachio、Ishibashi Shoji、Yoshinori Tokura	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Woodhead Publishing	5. 総ページ数 38
3. 書名 Chapter 3 Hydrogen-Bonded Organic Molecular Ferroelectrics/ Antiferroelectrics, Ed. Kamal Asadi, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Organic Ferroelectric Materials and Applications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究代表者所属研究グループのwebページ https://unit.aist.go.jp/riaep/meso-matg/</p>
--

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	熊井 玲児 (KUMAI Reiji) (00356924)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	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	石橋 章司 (ISHIBASHI Shoji) (30356448)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	五月女 真人 (SOTOME Masato) (40783999)	東京大学・先端科学技術研究センター・助教 (12601)	

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