



広島大学



PRESS RELEASE

報道機関各位

【リリース日時】

2026 年 9 月 18 日(金) 14 時(資料配布)

【配信先】

文部科学記者会、科学記者会、茨城県政記者クラブ、筑波研究学園都市記者会、兵庫県政記者クラブ、中播磨県民センター記者クラブ、西播磨県民局記者クラブ、広島大学関係報道機関

2026 年 9 月 18 日

総合科学研究機構

量子科学技術研究開発機構

広島大学

J-PARC センター

韓国原子力研究院

リラクサー強誘電体はなぜ広い温度域で巨大応答を示すのか —相転移の「遅さ」と持続する「臨界的な揺らぎ」を解明—

【発表のポイント】

- 超音波エコーやソナー、各種センサなどに用いられる高性能圧電材料「リラクサー強誘電体」が、圧力や電氣的な刺激をわずかに加えるだけで、大きく変形したり、大きな電気信号を生じたりする「巨大応答」を、なぜ広い温度範囲で示すのかという長年の謎に迫る
- SPring-8※1 での急冷放射光 X 線回折により相転移の進行が極めて遅いことを解明し、J-PARC※2 などでの中性子散乱により臨界的な揺らぎが広い温度域に残ることを発見。両者を結び付け、巨大応答を支える新たな仕組みを提示

【概要】

総合科学研究機構(CROSS)、量子科学技術研究開発機構(QST)、広島大学大学院先進理工系科学研究科、J-PARC センター、韓国原子力研究院の共同研究グループは、代表的なリラクサー強誘電体 PMN-xPT(マグネシウムニオブ酸鉛-チタン酸鉛固溶体)について、SPring-8 での急冷放射光 X 線回折と、J-PARC および韓国の研究用原子炉 HANARO での中性子散乱を組み合わせ、その巨大応答の起源を調べました。リラクサー強誘電体は、電気信号と機械的な変形を高効率で相互変換できる高性能材料で、超音波エコーやソナー、各種センサなどへの応用が進められています。通常の強誘電体では、大きな応答は相転移温度のすぐ近くに限られます。これに対してリラクサー強誘電体では、巨大な応答が広い温度範囲にわたって現れますが、なぜこのような状態が実現するのかは長年の謎でした。

本研究では、モルフォトロピック相境界(MPB)※3 付近の PMN-xPT を急冷すると、ゆっくり冷却した場合に生じる巨視的な構造相転移が大幅に抑制されることを発見しました。これは、この物質の相転移の進行が極めて遅く、急冷によって相転移を「追い越す」ことができることを示しています。

さらに、中性子散乱により物質内部の極性ナノ領域(PNR)※4 が、巨大応答の現れる広い温度範囲で、空間的にも時間的にも「スケールフリー」な臨界的相関※5 を示すことを明らかにしました。

これらの結果から、相転移の進行が極めて遅いために、本来は相転移点近傍に限られる臨界的な揺らぎが広い温度範囲で持続し、それがリラクサー強誘電体特有の巨大応答を支えているという新たな理解を与えました。この成果は、長年謎とされてきた巨大応答の起源に新たな理解を与えるとともに、冷却速度を用いて物質の状態や機能を制御する新しい可能性を示すものです。

本研究成果は、現地時間 2026 年 9 月 8 日米国物理学会の学術誌 Physical Review Materials に Letter として掲載されました。また、同誌が選ぶ特に重要な論文として Editors' Suggestions に選出されました。

【研究の背景】

圧電材料は、電気信号と機械的な変形を相互に変換できることから、医療用超音波エコー、ソナー、各種センサなどに広く利用されています。中でも PMN-xPT に代表されるリラクサー強誘電体は、電場や応力に対して非常に大きな誘電応答・圧電応答（以下、本稿ではこれらを総称して「巨大応答」と呼ぶ）を示す高性能材料として知られています。

通常の強誘電体では、相転移温度に近づくとさまざまな大きさの揺らぎが発達する「臨界現象」が起こり、大きな誘電応答が現れます。しかし、そのような巨大応答は通常、相転移温度のごく近傍に限られます。

一方、リラクサー強誘電体では、巨大な応答が非常に幅広い温度範囲で現れます。物質内部には、電気分極の向きが局所的にそろったナノメートルサイズの PNR が存在することが知られていますが、なぜ臨界的な揺らぎが広い温度域に維持されるのかは明らかになっていませんでした。

研究グループは、相転移そのものの進行が非常に遅いため、本来は相転移点付近だけに現れる臨界的な揺らぎが広い温度範囲に引き延ばされ、それが巨大応答を支えているのではないかと仮説を立てました。この仮説を検証するため、相転移の速さを調べる急冷実験と、PNR の空間的・時間的な揺らぎを調べる中性子散乱実験を組み合わせて検証しました。

【研究の内容と成果】

研究グループはまず、SPring-8 の BL22XU で PMN-xPT 単結晶を高温から急冷し、その結晶構造を放射光 X 線回折で調べました。

急冷放射光 X 線回折

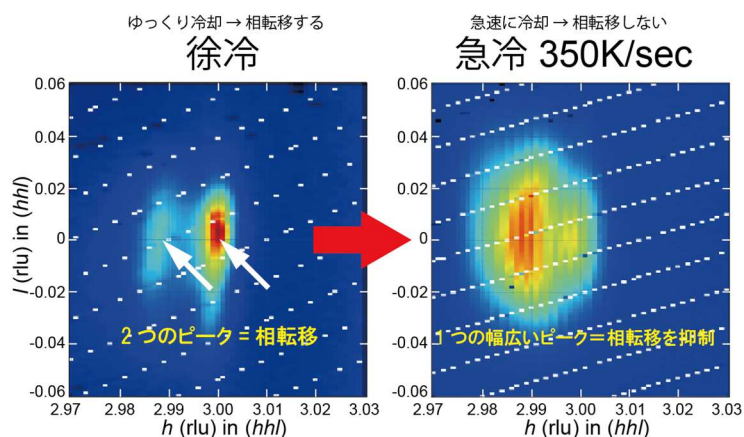
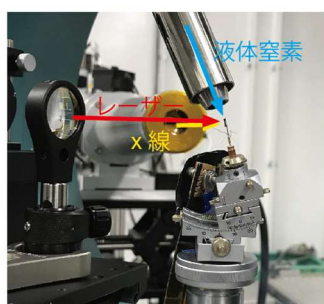


図1 急冷による構造相転移の抑制。PMN-30%PT をゆっくり冷却すると、構造相転移により X 線回折ピークが 2 つに分裂する。一方、350 K/s で急冷するとピーク分裂がほぼ消失し、巨視的な構造相転移が抑制される。

PMN-30%PT (PMN が 70%、PT が 30%) をゆっくり冷却すると、X 線回折ピークが明瞭に分裂し、結晶全体の構造が変化する「構造相転移」することが確認されました (図 1)。しかし、冷却速度を毎秒 250 K 以上にするとピーク分裂が次第に小さくなり、毎秒 350 K では巨視的な構造相転移がほぼ抑制されました。同様の現象は組成の異なる試料でも観測されました。

この結果は、MPB 近傍では複数の結晶状態が競合することによって相転移の進行が著しく遅くなっており、十分に速く冷却すれば、相転移が完了する前に低温まで到達できることを示しています。

次に、HANARO での中性子小角散乱と、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ※2 の BL14 AMATERAS および BL02 DNA を用いた中性子準弾性散乱により、PNR の空間的・時間的な相関を調べました。

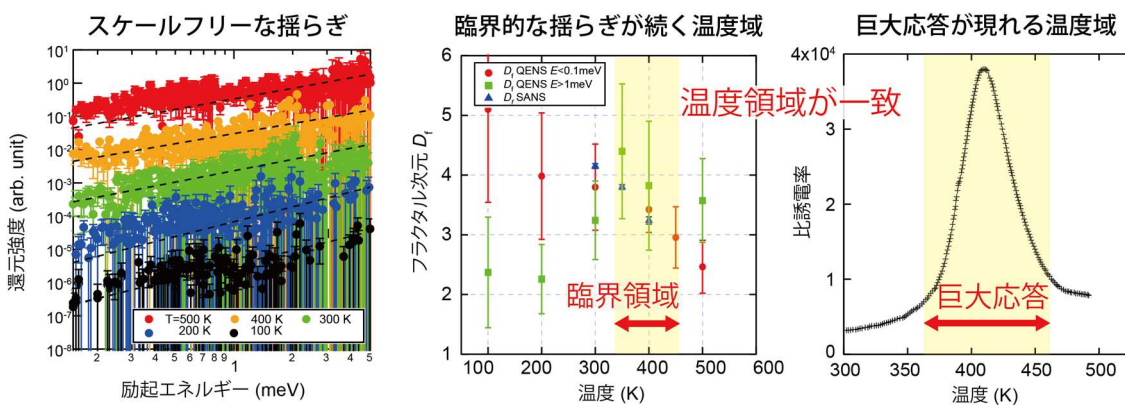


図2 巨大応答を支える臨界的な揺らぎ。中性子散乱から、極性ナノ領域の揺らぎが幅広い空間・時間スケール

にわたる「スケールフリー」な性質を持つことが分かった(左)。空間相関と時間相関から独立に求めたフラクタル次元は相転移温度付近で一致し(中央)、臨界的な相関が現れる温度領域は、巨大な誘電応答が現れる温度領域(右)と大きく重なる。

その結果、巨大応答が現れる広い温度範囲で、PNR の空間相関と時間相関の双方が「べき乗則」に従うスケールフリーな性質を持つことが分かりました(図2)。これは、本来は相転移点近傍に特徴的な臨界的相関が、リラクサー強誘電体では広い温度範囲にわたって維持されていることを示しています。

さらに、相転移温度付近では、異なる空間・時間スケールを観測する複数の中性子散乱実験から得られた結果が同じスケーリング則(規則性)を示しました。これにより、PNR が空間的にも時間的にも幅広いスケールにわたって相関した臨界的な状態にあることが明らかになりました。これらの実験結果から得られた新たな描像を図3に模式的に示します。

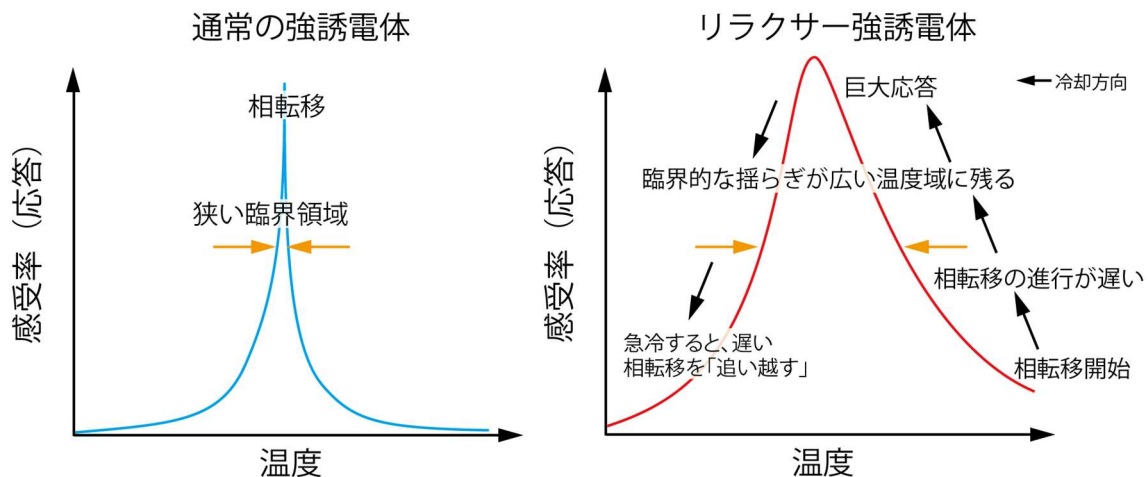


図3 リラクサー強誘電体の巨大応答を説明する物理描像。通常の強誘電体では、臨界的な揺らぎと巨大応答は相転移点近傍の狭い温度領域に限られる。一方、リラクサー強誘電体では相転移の進行が遅いため、臨界的な揺らぎが広い温度範囲にわたって残り、それが巨大応答を支える。さらに、冷却が相転移の進行より速い場合には、巨視的な構造相転移が抑制される。

【研究の意義と今後の展望】

本研究は、リラクサー強誘電体に特有の広い温度範囲での巨大応答を、相転移の「遅さ」という観点から理解する新たな描像を示したものです。

複数の状態が競合することで相転移の進行が遅くなり、本来は相転移点近傍に限られる臨界的な揺らぎが広い温度範囲に残ります。そして、その臨界的な揺らぎがリラクサー強誘電体の巨大応答を支えていると考えることで、これまで別々に議論されてきた相転移、極性ナノ領域、巨大応答を一つの枠組みで理解することができます。

さらに、本研究は、物質の状態が温度や化学組成だけでなく、「どのくらいの速さで冷却するか」によっても変化することを示しました。今後、冷却速度を新たな制御パラメータとして活用することで、通常の熱平衡状態では得られない構造や機能を引き出

し、高性能な圧電材料やセンサ材料の機能制御につながることが期待されます。

【研究支援】

SPring-8 における放射光 X 線回折実験は、BL22XU において実施されました(課題番号:2019A3785、2020A3787)。本研究は、JSPS 科研費(18K03502、25400355)、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業(JPMXP09A19QS0019、JPMXP09A20QS0025)の支援を受けて実施されました。HANARO の 40 m 中性子小角散乱装置を用いた実験は、韓国政府による National Research Foundation of Korea(NRF-2012M2A2A6004260)の支援を受けました。J-PARC 物質・生命科学実験施設における中性子実験は、課題番号 2013B0064、2014I0002、2018I0002、2019P0501、2019P0502、2020P0502 により実施されました。

【各研究機関の役割】

総合科学研究機構(CROSS): 研究計画、中性子散乱実験、データ解析、研究全体の取りまとめ、論文執筆

量子科学技術研究開発機構(QST): SPring-8 における急冷放射光 X 線回折実験、実験手法の開発・解析

広島大学: SPring-8 における急冷放射光 X 線回折実験、研究結果の議論

J-PARC センター: J-PARC MLF における中性子散乱実験

韓国原子力研究院(KAERI): HANARO における中性子小角散乱実験

【論文情報】

論文タイトル: Sluggish Phase-Transition Kinetics and Extended Critical Correlations in Relaxor Ferroelectrics

掲載誌: Physical Review Materials

著者: 松浦 直人¹、大和田 謙二²、塚田 真也³、町田 晃彦²、菊地 龍也⁴、Young-Soo Han⁵

著者所属:¹総合科学研究機構中性子科学センター、²量子科学技術研究開発機構、³広島大学大学院先進理工系科学研究科、⁴J-PARC センター、⁵韓国原子力研究院

DOI: <https://doi.org/10.1103/tnnk-lhcn>

【本件問い合わせ先】

＜研究に関すること＞

総合科学研究機構 中性子科学センター

主任研究員 松浦 直人(まつうら まさと)

E-mail: m_matsuura@cross.or.jp

TEL: 029-219-5300

＜報道に関すること＞

総合科学研究機構 中性子科学センター 利用推進部 広報担当

E-mail: press@cross.or.jp
TEL: 029-219-5300

量子科学技術研究開発機構 国際・広報部 国際・広報課
E-mail: info@qst.go.jp
TEL: 043-206-3026

広島大学広報グループ
E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp
TEL: 082-424-4518

J-PARC センター 広報セクション
E-mail: pr-section@mlj-parc.jp
TEL: 029-287-9600

【用語解説】

※1: 大型放射光施設 (SPring-8)

兵庫県播磨科学公園都市にある大型放射光施設。SPring-8 の名称は「Super Photon ring-8 GeV」に由来します。放射光とは、電子を光に近い速度まで加速し、その進行方向を磁石によって曲げた際に発生する非常に明るい X 線などの電磁波で、物質の原子配列や電子状態を高精度に調べることができ、材料科学、生命科学など幅広い研究に利用されています。

※2: 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF)

J-PARC は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で茨城県東海村に建設し運用する研究施設。MLF では陽子ビームを水銀標的及び炭素標的に当てて発生する中性子やミュオンを利用して、物質や生命現象の解明、新材料開発などの先端学術研究や産業利用研究が行われています。

※3: モルフォトロピック相境界 (MPB: Morphotropic Phase Boundary)

化学組成を変えたときに、異なる結晶構造を持つ相が接する境界。PMN-xPT ではこの近傍で複数の状態が競合し、非常に大きな誘電・圧電応答が現れます。

※4: 極性ナノ領域 (PNR: Polar Nanoregions)

リラクサー強誘電体内部に形成される、電気分極の向きが局所的にそろったナノメートル (1 メートルの 10 億分の 1) サイズの領域。その空間的な配置や時間的な揺らぎが、リラクサー特有の物性と深く関係しています。

※5: スケールフリーな臨界的相関

特定の長さや時間といった固定された尺度 (スケール) に依存するのではなく、幅広い空間・時間スケールにわたって共通の法則に従う相関。相転移点付近の臨界現象で特徴的に現れます。