



国立大学法人 東京工業大学

国立大学法人 名古屋大学

公益財団法人 高輝度光科学研究センター

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

圧電体の複雑な結晶構造変化の高速応答を直接測定

—IoT センサーの高性能化に期待—

【要点】

- ・ IoT センサー等で利用される圧電体の結晶構造が高速で変化する様子を観察
- ・ 圧電性の発現機構解明に貢献
- ・ 新規の圧電性物質の探索や非鉛圧電体材料の開発を加速

【概要】

東京工業大学物質理工学院（同大学元素戦略研究センター兼任）の 舟窪浩教授と同大学院総合理工学研究科の 江原 祥隆 博士後期課程学生（当時）、同大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所の 安井 伸太郎 助教、名古屋大学大学院工学研究科（科学技術振興機構さきがけ研究者兼任）の 山田 智明 准教授、高輝度光科学研究センター（JASRI）の 今井 康彦 主幹研究員、物質・材料研究機構技術開発・共用部門（先端材料解析研究拠点シンクロトロンX線グループグループリーダー併任）の 坂田 修身 ステーション長、ニューサウスウェールズ大学（オーストラリア）の ナガラジャンバラノール 教授らの研究グループは、電圧によって形状が変化する圧電体結晶について、原子の変位、単結晶領域の再配列などの複雑な現象が、1億分の4秒(40ナノ秒)（用語1）の短時間に高速で起きていることを、大型放射光施設SPring-8(用語2)の高輝度放射光を用いた時間分解X線回折実験によって、世界で初めて解明しました。

圧電体は、インクジェットプリンタや3次元プリンタ、カメラの手振れ防止機構等に幅広く用いられ、最近では、身の回りにある振動から発電する“振動発電”や建物等の異常振動のセンサー等への応用が期待されるなど、永続的に使用できる自立電源としてIoTセンサーネットワークへの応用も期待されています。

今回の成果は、英国のオンライン科学雑誌「サイエンティフィックレポート (Scientific Reports)」に8月29日付で掲載されました。

● 研究の背景

結晶が外力に応じて誘電分極を生じる効果を圧電効果、結晶に電圧を加えることで結晶が歪む効果を逆圧電効果と言います。このような現象を示す物質が圧電体です。これは、電気的エネルギーを機械的エネルギーに、逆に機械的エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギー変換物質とも言えます。ライターの着火石（機械的エネルギーの電気エネルギーへの変換）からプリンタのインクジェットヘッドや自動車のエンジンへの燃料の噴射ノズル（電気エネルギーを機械的変位に変換）、さらには、デジタルカメラの手ぶれ防止機構（機械的エネルギーの電気エネルギーへの変換）まで、我々の暮らしの中で広く使用されています。

最近では、自動車のエンジンや高速道路の車の走行による振動で発電し、振動を検出する機能と組み合わせて、安全安心を支えるバッテリー不要の IoT センサーネットワークとして注目を集めています。

この圧電性は、電圧を加えることや機械的な力を加えることによって起きる結晶自身の伸びの他に、ドメインと呼ばれる微小領域の結晶の向きの変化等の複数の現象が同時に起きることが知られていましたが、個々の現象がどのくらいの速度で起きるかはわかっていませんでした。

● 研究手法・成果

我々は、大型放射光施設 SPring-8 表面界面構造解析ビームライン BL13XU、および同施設の物質・材料研究機構のビームライン BL15XU の数マイクロメートルに集光した高輝度単色パルス X 線を、最も広く使用されている圧電体であるチタン酸ジルコン酸鉛膜上に形成した電極に照射し、200 ナノ秒幅のパルス電圧を印加して観察し、回折データを電荷量の変化とともに高速で記録しました（図1）。ここでは電圧を加えると、結晶の伸びや電圧印加方向へのドメインの再配列等が起こっていることが判明しました。また、この際、結晶の単結晶領域（図2で赤と青で示した領域）の傾斜角度が同時に変化していることも明らかになりました（解析した現象のモデル図を図2に示す）。

注目すべき点は、こうした複雑な現象は同時に起こっており、そのスピードは今回試料で測定可能な1億分の4秒(40ナノ秒)よりも速いことを世界で初めて明らかにしたことです（図3）。

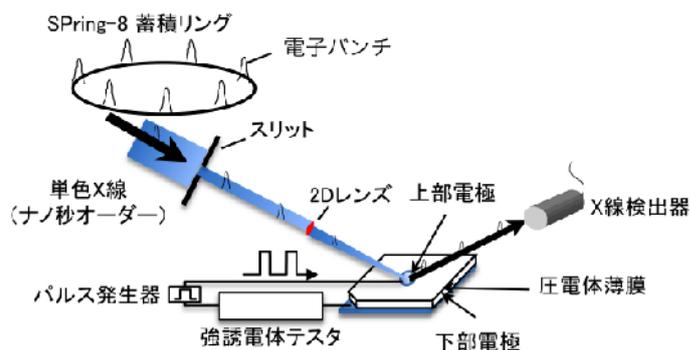


図1 電圧を加えた時の結晶の伸びや、電圧印加方向へのドメインの再配列と電気特性を直接測定できる測定システム（数マイクロメートルに集光した高輝度 X 線を電極上に照射し、電圧印加しながら回折 X 線強度と電荷量の変化を 20 ナノ秒の時間分解能で同時に測定できるシステム。今回の測定では、200 ナノ秒幅のパルス電圧を印加している際の回折プロファイルと電荷量の変化について、加える電圧を固定して、高速で記録することに成功しました）。

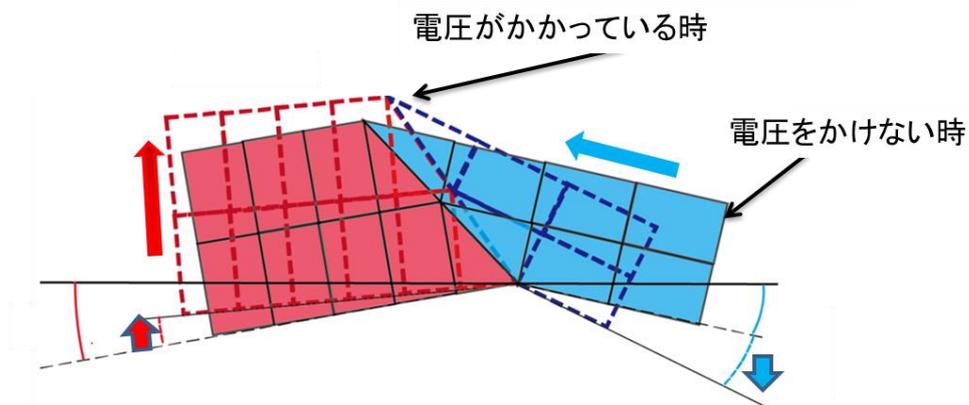


図2 試料に電圧を印加した時に起きる結晶の構造変化の模式図
赤で示した結晶の伸び、青で示した結晶の一部が赤で示した結晶へ変化、青および赤で示した結晶の角度の変化といった複雑な現象が同時に起こっている。

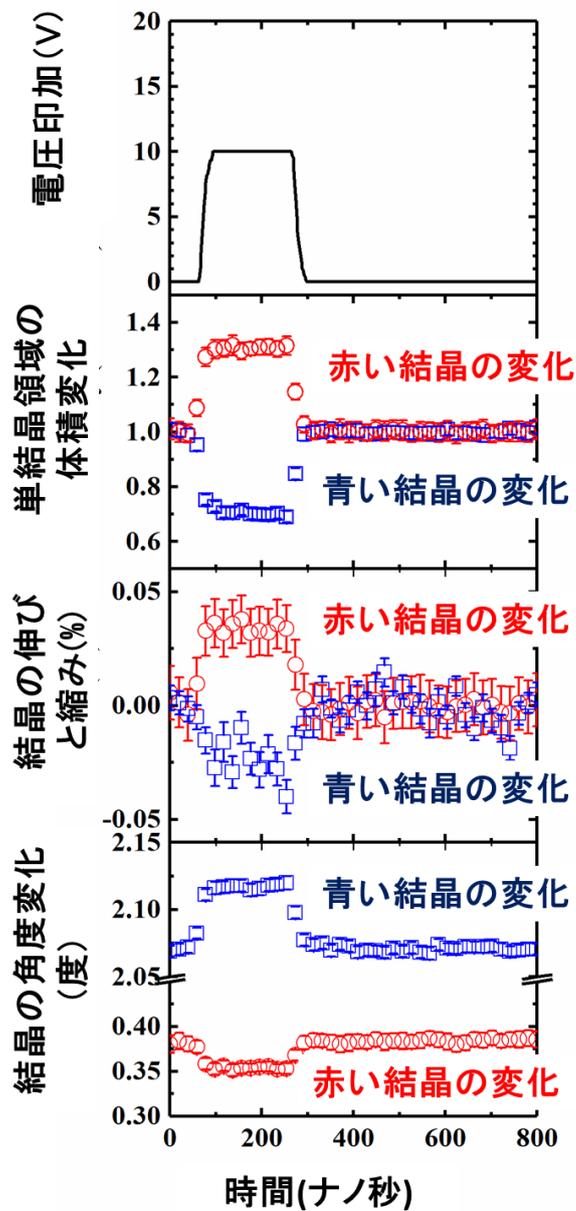


図3 図2の赤と青の結晶の伸びや縮み、青の結晶の赤の結晶への変化、青および赤の結晶の角度の変化といった複雑な現象が測定システムの分解能40ナノ秒よりも速いスピードで同時に起きていることがわかりました。

● 期待される波及効果

今回の成果は、以下に述べる波及効果が期待できます。

a) 圧電性の発現機構の解明

圧電性はこれまで、結晶内の複雑な現象で発現していることがわかっていましたが、それぞれの現象がどのように起こっているか、どのくらいの速度まで追従するかといったことは、十分にわかっていませんでした。本研究では、個々の効果を直接的に高速で測定できるようになったことで、チタン酸ジルコン酸鉛以外の物質における圧電性の発現機構の解明が飛躍的に進むと見込まれます。

b) 圧電体の性能向上への貢献

本研究で、複雑な現象が同時に測定可能になったことで、新規物質を探索した場合にどのような現象が圧電体内で起きているか、また、その応答速度が変化したかを直接測ることができ、これまでトライ&エラーで行ってきた圧電体の物質探索が飛躍的に進むと考えられます。

c) 非鉛圧電体開発の加速による環境問題への貢献

- i) 現在使われている圧電体は、毒性がある鉛を重さで 50%以上含有しており、環境への配慮から非鉛圧電体の開発が強く求められています。
- ii) 今回の成果により、これまで使われている鉛を含有した圧電体のチタン酸ジルコン酸鉛が、どのような機構で大きな圧電性を発現しているかを明らかにできたことで、現在、盛んに開発されている鉛を含まない新規な非鉛圧電体材料の開発が加速されると期待できます。

d) IoT センサーの開発加速への貢献

圧電体は、圧力や振動、加速度、さらには温度等のセンサーとして使用可能です。また、センシングの際に発電を行うことも可能ですので、電源を必要としないセンサー端末を作れる可能性があります。こうしたセンサーをビルや橋に取り付けることで、電池交換不要なセンサー端末を作製でき、この端末をネットワークにつなぐことで“安全で安心な社会”の構築に貢献することが期待できます。

【用語説明】

(用語 1) ナノ秒 : 10 億分の 1 秒のこと。

(用語 2) 大型放射光施設 SPring-8 :

兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す施設。その運転と利用者の支援は JASRI が行っています。SPring-8 の名前は **Super Photon ring-8** GeV に由来します。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する細く強力な電磁波のことです。SPring-8 では、この放射光を用いてナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究を行っています。SPring-8 は、日本の先端科学・技術を支える高度先端科学施設として、日本国内外の大学・研究所・企業から年間延べ 1 万 6 千人以上の研究者に利用されています。

【論文情報】

論文タイトル : *In-situ* observation of ultrafast 90° domain switching under application of an electric field in (100)/(001)-oriented tetragonal epitaxial Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.6})O₃ thin films

※日本語訳 : (100)/(001)配向した正方晶 Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.6})O₃ エピタキシャル薄膜の電界印加時の 90°ドメインの高速応答のその場観察

著者 : Yoshitaka Ehara, Shintaro Yasui, Takahiro Oikawa, Takahisa Shiraishi, Takao Shimizu, Hiroki Tanaka, Noriyuki Kanenko, Ronald Maran, Tomoaki Yamada, Yasuhiko Imai, Osami Sakata, Nagarajan Valanoor, and Hiroshi Funakubo

掲載紙 : Scientific Reports

掲載日 : 2017 年 8 月 29 日 18:00 (日本時間)

DOI: 10.1038/s41598-017-09389-6

今回の研究は、日本学術振興会の科学研究費、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業さきがけ研究の一環として行われました。また、構造解析は、SPring-8 の共用ビームライン (BL13XU) および物質・材料研究機構の専用ビームライン (BL15XU) で実施し、研究成果の一部は、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォーム課題として、物質・材料研究機構微細構造解析プラットフォームの支援を受けて行われたものです。