

報道機関 各位

熊本大学

## 世界初！エコー診断用圧電単結晶における ナノドメインの交流電圧応答を直接可視化

### (ポイント)

- 交流電圧を加える「交流分極」で圧電単結晶の特性が向上するが、特性向上の鍵であるナノドメインの応答は明らかになっていない。
- 本研究では、「交流電圧印加その場電子顕微鏡法」でナノドメインの応答を可視化した。
- 今後、医療用画像診断装置の高性能化、ひいては医療の高度化につながる可能性がある。

### (概要説明)

熊本大学半導体・デジタル研究教育機構の佐藤幸生教授の研究グループは、エコー診断などに用いられる圧電単結晶におけるナノドメインの交流電圧に対する応答を同研究グループが開発した「交流電圧印加その場電子顕微鏡法」で直接観察することに成功しました。正弦波1つ分の交流電圧でナノドメインの構造が大きく変化する他、短時間処理では1つのマイクロドメインが大きくなる様子、長時間処理では電圧印加方向に垂直な複数のマイクロドメイン帯が発達する様子が観察されました。前者は交流電圧をかける処理による圧電特性の向上、後者は処理を長時間行うことによる特性の劣化に関係していると考えられます。

エコー診断などに用いられる圧電単結晶では、より高い特性を得るために、電圧を加えて、ドメイン<sup>\*1</sup>の向きを揃える「分極処理」を使用前に行います。従来、この処理は直流電圧で行われていましたが、近年、交流電圧を加えることがより有効であると発表され、注目を集めています。しかしながら、適切な交流での分極処理により特性が向上するメカニズムや長すぎる時間で行った場合における特性劣化のメカニズムの詳細はまだわかっていません。そのため、本研究では、同研究グループがこれまでに開発を行ってきた「電圧印加その場電子顕微鏡法」を使って、圧電単結晶に交流電圧を加えながら電子顕微鏡の動画を撮影する実験を行いました。

本研究で得られた成果によって、今後、交流分極による特性向上および特性劣化メカニズムの理解が進めば、エコー診断装置の更なる高性能化につながり、ひいては医療の高度化につながると期待されます。

本成果は令和6年12月13日に米国物理学協会発行の「Applied Physics Letters」に掲載されます。また、本研究は文部科学省科研費補助金学術変革領域研究(B)「超軌道分裂による新奇巨大界面応答」(課題番号: JP23H03804)および基盤研究(B)「誘電特性における界面効果の原子スケールメカニズム解明」(課題番号: JP23K26382)の支援の下で行われました。

## (説明)

### [背景]

力が加わると電気を発生する「正圧電効果」、電圧が加わると変形する「逆圧電効果」を示す材料は圧電体と呼ばれており、電気エネルギーと機械エネルギーの変換素子として、例えば、医療用画像診断装置の1つである「超音波画像(エコー)診断装置」など様々な電子機器に用いられています。圧電体の性能は、力を加えた時に発生する電気量あるいは電圧を加えた時に発生する変形量を表す数値である圧電定数で主に評価され、圧電定数の大きい材料ほどより高い圧電特性を示します。

圧電体はより高い性能を発揮させるために、「分極処理」と呼ばれる所定の大きさ、時間の電圧を事前に加えておく処理を経て用いられています。この分極処理は圧電体内部に形成されているドメインの方向を揃えることで圧電特性を高めるとされています。従来、この分極処理は直流の電圧を使って行われていたのですが、最近、交流電圧での処理(以下では、交流電圧による分極処理を「交流分極」と示します。)が有効であることが発見されて、注目が集まっています。またさらに最近では、交流分極を行う時間が長すぎると特性が劣化してしまう「過分極」と呼ばれる現象も知られています。しかしながら、交流分極による圧電特性向上や劣化のメカニズムについては、まだ詳細が明らかになっていません。

そこで本研究では、試料に電圧を加えながらナノスケールでの構造を観察することができる「電圧印加その場電子顕微鏡法」を駆使して、交流分極におけるドメインの変化を直接観察する実験を行いました。

### [研究の内容]

試料には圧電特性が高くエコー診断装置に用いられている圧電体の単結晶であるPMN-PTを用いました。PMN-PTは、いずれもペロブスカイト型の結晶構造を持つ化合物である $\text{Pb}(\text{M}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ と $\text{PbTiO}_3$ の固溶体で、 $\text{PbTiO}_3$ を約30%含んでいます。

「電圧印加その場電子顕微鏡法」による観察には、本学工学研究機器センターに設置の透過型電子顕微鏡装置と独自のその場観察用試料ホルダーならびにファンクションジェネレータを用いました。また、観察用試料の作製には本学工学研究機器センターに設置の集束イオンビーム装置を用いました。

### [成果]

研究の結果、1センチメートルあたり6000ボルトの振幅を持つ交流電圧を正弦波1つ分だけ加えるとドメインの構造が大きく変わることが分かりました(図1)。さらに実験を続けると、短時間の処理では、1つのマイクロドメインが大きくなっていく様子(図2)、そこからさらに長時間の処理を行

うと電圧印加方向に垂直なマイクロドメインの帯が発達していく様子（図3）が観察されました。

[展開]

今後さらなる研究を行うことで、交流分極による圧電特性向上や劣化のメカニズムが解明されれば、より高い性能を示す分極処理プロセスの開発に繋がります。それにより、エコー診断装置の高性能化、ひいては医療の高度化につながると考えられます。

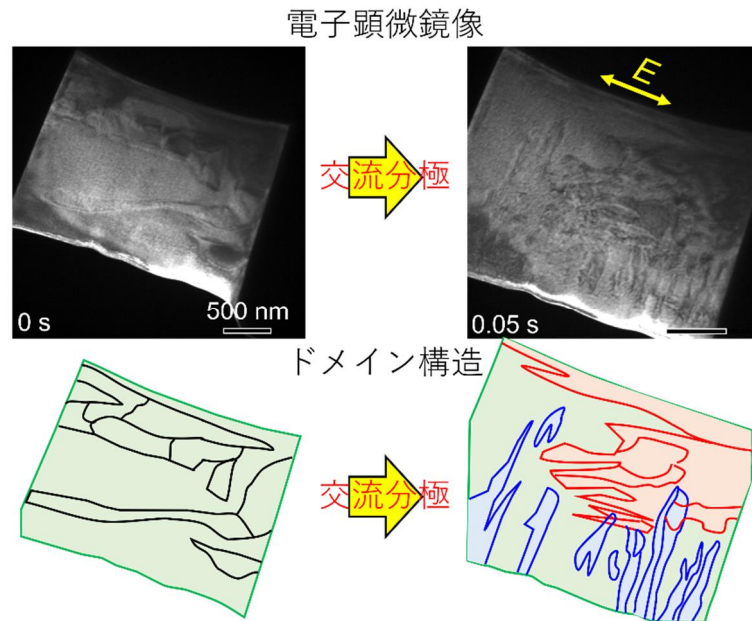


図1. 交流電圧を加える前後の電子顕微鏡像（上段）と像に写っているドメイン構造の模式図（下段）。左が電圧を加える前、右が正弦波1つ分の交流電圧を加えた後（0.05秒の電圧印加後）の像および構造を示す。下段の図では、各ドメインの境界を線で示している。また、右下図の赤いドメインは電圧の印加で横方向に短くなったもの、青いドメインは電圧の印加で発生した縦方向のものを示す。また、電圧を加えた方向は「E」で示す図面真横から少し傾いた方向である。

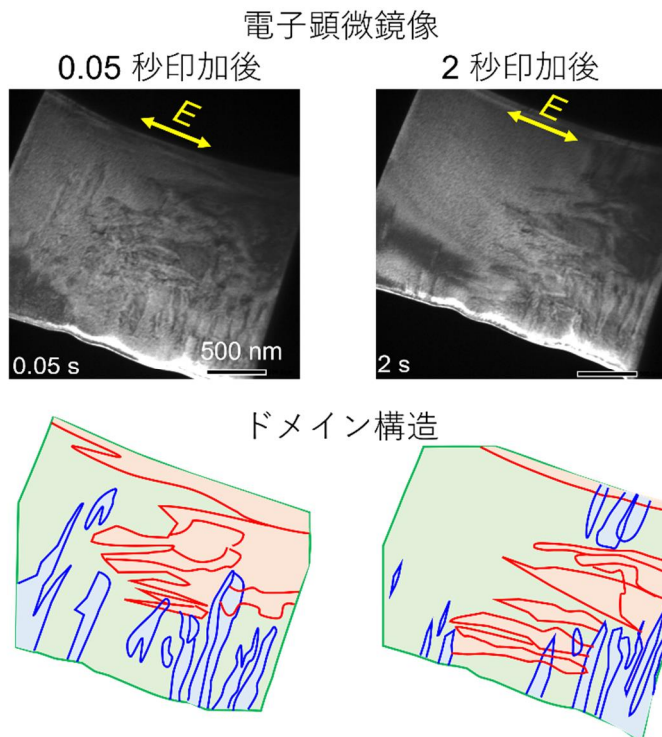


図 2. 交流電圧を0.05秒加えた後（左列）および2秒加えた後（左列）の電子顕微鏡像（上段）と像に写っているドメイン構造の模式図（下段）。

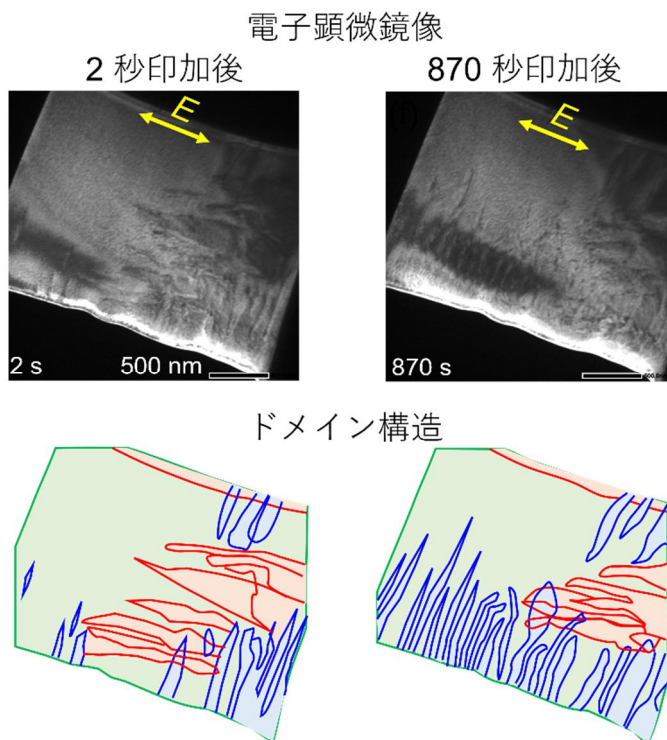


図 3. 交流電圧を2秒加えた後（左列）および870秒加えた後（左列）の電子顕微鏡像（上段）と像に写っているドメイン構造の模式図（下段）。

[用語解説]

※1ドメイン 圧電体の結晶の中で、電気が溜まっている方向が揃っている領域を示す。模式的なイメージの図を図4に示す。1つのドメインの幅がナノサイズのものをナノドメイン、それより大きいマイクロサイズのものをマイクロドメインと言う。

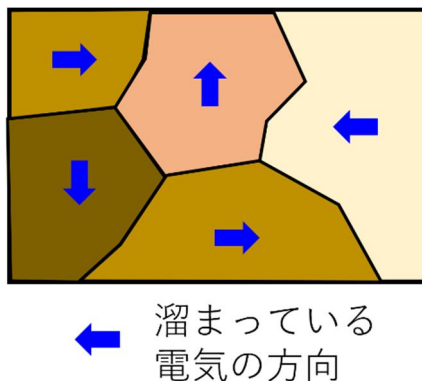


図4. ドメインのイメージ図

(論文情報)

論文名 : Response of ferroelectric nanodomain to alternative-current electric fields in morphotropic phase boundary  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$

著者 : Yukio Sato

掲載誌 : Applied Physics Letters

【お問い合わせ先】

熊本大学半導体・デジタル研究教育機構

担当 : 佐藤 幸生 (教授)

電話 : 096-342-2281

e-mail : sato-yukio@kumamoto-u.ac.jp