

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04534

研究課題名（和文）ナノflexoelectricityの解明とbucklingメモリ素子の創製

研究課題名（英文）Elucidation of nano-flexoelectricity and creation of buckling memory devices

研究代表者

澄川 貴志（Sumigawa, Takashi）

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：80403989

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,930,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ナノドメインを有する強誘電体に曲げ変形を与えた際に生じるマルチフィジックス現象について検討を行った。実験は、二重片持ち梁形状を有する試験片を用いて透過型電子顕微鏡内で行った。梁の間に位置する試験部に曲げ変形を与えると、変形量の増加に伴いナノドメインは消失し、除荷を行うと再度出現した。除荷後のドメイン壁の方向は、負荷前のものに対して90°回転していた。これは、ナノサイズの材料中に発生する急峻なひずみ勾配によるフレクソエレクトリック現象に起因するものと思われる。形状の異なる試験片を用いた追加の実験によってメカニズムの検証を行った。さらに、この現象を利用した座屈デバイスの試作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノサイズの強誘電体材料中に生じるナノドメインについて、曲げ負荷を与えた際に消失することおよび除荷によって再度出現することをその場観察試験によって明らかにすることに成功した。除荷時に現れるナノドメインは、曲げの方向に起因した分極を有することを示し、この現象を利用することで、ドメインスイッチングを実現できることがわかった。本成果は、ナノサイズの強誘電体材料中のひずみ勾配を利用して力学的にドメインの分極方向を制御できることを示すものであり、材料力学分野における新しいマルチフィジックス現象の開拓に貢献するものである。機械的なメモリデバイス創製のための基礎を得たことは、社会的な意義としても価値がある。

研究成果の概要（英文）：In this project, multiphysics phenomena induced by bending deformation of nano-sized ferroelectrics with well-ordered domains were investigated. Experiments were performed on specimens with a double cantilever beam geometry in a transmission electron microscope. When the test section between the beams was subjected to bending deformation, the domains disappeared with increasing deformation and reappeared after unloading. The direction of the domain walls after unloading was rotated by 90° relative to those before loading. This may be caused by the flexoelectric phenomenon due to the steep strain gradient in the nano-sized material. The mechanism was verified by additional experiments using specimens with different geometries. In addition, prototype buckling devices were fabricated to exploit this phenomenon.

研究分野：材料力学、材料強度学

キーワード：ナノ フレクソエレクトリシティ 強誘電体 座屈 メカニカルメモリ

1. 研究開始当初の背景

内部に自発分極を有する強誘電体は、アクチュエータや低消費電力メモリといった幅広い産業用途に利用されている。強誘電体内部には、同じ分極方向を有する領域(ドメイン)が分布している。マクロ材では、その分布はランダム且つ粗大であるが、強誘電体がナノサイズまで小さくなると表面の反電場の影響を受けた特有の構造(ナノドメイン構造)が発現する。この特性は、高密度メモリや小型発電素子(エナジーハーベスタ)の実現の際には考慮する必要がある。

強誘電体内の分極は、外部からの電場、磁場およびひずみ場によって反転・制御することができる。電場や磁場に対する分極応答に関しては、これまでに多くの研究がなされているが、ナノサイズの強誘電体に関してひずみ場に対する応答についての実験研究例は極めて少ない。

ひずみ場に起因した強誘電体の特徴的応答として、フレクソエレクトリック(Flexoelectric)現象が挙げられる。これは、材料に曲げ変形が加わった際、その内部のひずみ勾配によって特有の分極を生じる現象である。この現象は、マクロ材では圧電効果に比べると実用性に乏しい弱い効果であるためほぼ無視されてきたが、ナノスケールにまで縮小化した材料に曲げ変形が加わると、そのひずみ勾配は超急峻化され、効果が拡大し、支配的な特性となることが予測されている。加えて、ナノドメイン構造とこの効果との重畳により、マクロ材とは異なる特徴的な現象を生じる可能性がある。しかし、実験による評価の困難さが現象解明のボトルネックとなっており、その詳細は世界的にも明らかにされていない。

ひずみ勾配は、曲げ変形によって発生させることができる。曲げ変形では、圧縮変形や引張変形に比べて小さな力で大きなひずみ場を得ることができ、曲げ剛性が極めて小さいナノ材料では、その効果は大きくなる。このことは、「微小な力学的(機械的)入力」で「大きな電気的効果」を取り出せることを示唆しており、この特性は、機械的な機構により情報記録するメカニカルメモリを実現するものと考えられる。一般的な不揮発メモリは、“静電気・光学・磁気”を用いたものであるが、材料の劣化や電磁波等の外乱を受けた場合、記録情報は消失する。しかし、機械的機構によるメモリは、これらの外乱の影響を受けない。高信頼性データ保守の観点からは、方式の異なる複数の記憶媒体をベストミックスして用いる必要があるが、メカニカルメモリに関しては、研究および開発例は極めて少ない。

2. 研究の目的

本研究では、ひずみ勾配を制御した強誘電体ナノ試験体に対する電子顕微鏡内その場観察力学試験を実施し、フレクソエレクトリック現象に起因した力学応答を評価することを目的とする。また、条件を変えた実験や数値シミュレーションによりその現象についての解明を試みる。さらにナノ構造体のフレクソエレクトリック現象を応用したメカニカルメモリ機構について検討し、デバイスの試作を実施する。

3. 研究の方法

本研究では、ナノドメイン構造を有する微小な材料に対して曲げ変形を与え、その内部に存在するナノドメイン構造の変化について透過型電子顕微鏡(TEM: Transmission electron microscope)を用いてその場観察した。対象材料は、代表的な強誘電体であるチタン酸バリウム(BaTiO_3)とした。図1(a)は、作製した試験片の走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning electron microscope)像を示す。試験片の加工には、集束イオンビーム(FIB: Focused ion beam)を用いた。試験片は二重片持ち梁形状を有しており、梁の間に幅約 $1\mu\text{m}$ 、高さ約 700nm および厚さ約 300nm の試験部が存在する。試験部については、FIB加工によって導入された表面加工層の除去のためにアルゴンイオンを用いた超低加速ミリング処理を施した。試験片の片方の梁の上部に対し、負荷チップを用いて鉛直下向き負荷を与える(図1(b))と、試験部に曲げ変形を生じさせることができる。図1(c)は、負荷前の試験部のTEM観察結果の一例を示す。試験部を約 300nm まで薄片化したことにより、内部に生じているドメインを明瞭に観察できている。表面が有する反電場によって、内部にはストライプ状のナノドメインが発生している。

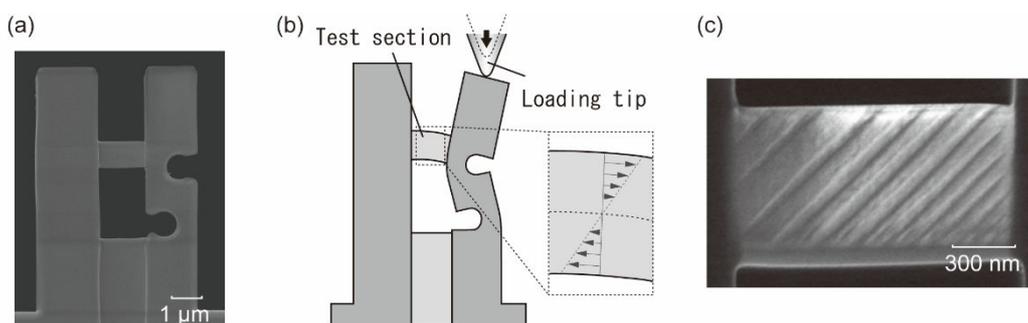


図1 (a)試験片のSEM観察像, (b)負荷方法, (c)試験部に生じたナノドメイン。

さらに、フェーズフィールド法に基づいて分極場を秩序変数で表現し、その時間発展方程式を解くことにより、ひずみや電場の負荷のもとで得られる分極構造を計算した。すなわち、分極場 $P_i(x, t)$ を秩序変数とし ($i = 1, 2, 3$ は分極の向きを表す)、時間依存 Ginzburg-Landau 方程式

$$\frac{\partial P_i(x, t)}{\partial t} = -L \frac{\delta F}{\delta P_i(x, t)} \quad (1)$$

を解く。 L は時間発展の際の勾配に相当する係数であり、 F は系の全自由エネルギーである。さらに、Flexoelectricity 効果を導入するため、式 (1) に対して、Cao らの方法に倣って Flexoelectricity 項を追加した。本研究では、材料モデルは BaTiO_3 単結晶を対象とし、 xy 平面に広がる 2 次元モデルとして、文献で紹介されているフーリエ変換法を用いたフェーズフィールド法解析を行った。 xy 平面上のサイズ $L_x \times L_y = 250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ の正方形セルをメッシュ分割 (128×128) して計算を行った。 x 軸を横軸にとって材料長手方向とし、 y 軸に垂直な上下面を表面と模擬するため、セルの上端・下端の 3 メッシュ分の分極を強制的にゼロとした。初期の分極分布はランダムに与え、一定の外部ひずみ・電場負荷条件のもと、式 (1) の時間発展を十分なステップ数行った。尚、引張りおよび曲げの負荷は、図 2 に示すように x 方向のひずみ (ϵ_x) を与えることで表現した。

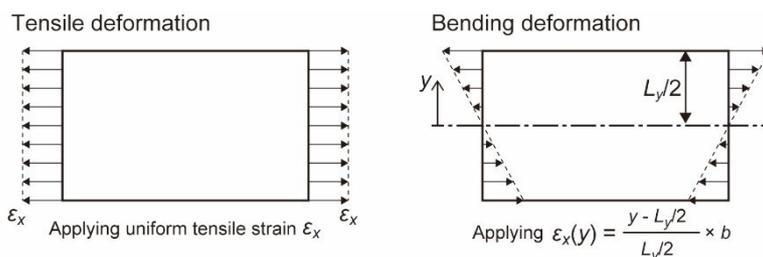


図 2 解析における引張と曲げの負荷方法。

4. 研究成果

図 3 は、試験部に曲げ変形を加えた際のドメイン構造の変化に関する模式図を示す。初期の試験部には、ドメイン壁が左斜め上方に延びるストライプ状のナノドメインが存在していた (図 3(a))。負荷によって試験部に対して上に凸となる曲げ変形が与えられると、一つ置ききのナノドメインは試験部左上方において幅が狭くなり、順次消失を始めた (図 3(b))。続いて曲げ変形量を増加させると、最終的に試験部全体のナノドメインはすべて消失した (図 3(c))。さらに、この状態から除荷を行うと、一度消滅したドメインが再び現れ (図 3(d))、完全除荷の状態では右斜め上方へと領域が広がるナノドメインによって試験片全体が占有された (図 3(e))。このように、ナノドメインは試験部に曲げ変形を与えると消失し、完全に除荷を行うと再形成されるが、負荷前後の構造を比較すると両者のドメイン壁の方向は 90 度回転した関係にあった。尚、初期状態でドメイン壁が右斜め上方に延びる同形状の試験片を用いて同様の負荷 (上に凸となる曲げ変形) 試験を別途行った結果、曲げ変形の増加によってナノドメインは消失したものの、除荷によって再度現れたナノドメインは右斜め上方に延びており、負荷前後でその方向は変わらなかった。すなわち、これらの結果は、上に凸の曲げ変形を与えた後に除荷を行うと、右上方に延びるナノドメインが力学的に形成されることを示唆している。ここで、負荷前に試験部に生じていた分極およびドメイン壁の方向を仮に図 4(a) のように考えると、最初は曲げ変形によって横方向の分極を有するドメインが大きくなり (図 4(b))、最終的には単一のドメインとなる (図 4(c))。このとき、試験部は上に凸の曲げ変形状態が保持されており、除荷を行うと Flexoelectricity の効果によって上方を向いた分極が現れる (図 4(d))、これによりその後は右斜め上向きのドメイン壁が形成され、完全な除荷時には初期とは異なるナノドメインが形成される (図 4(e))。すなわち、曲げ変形の負荷および除荷によって、ドメインのスイッチングを行うことができる可能性がある。

フェーズフィールド法解析による検討に加えて図 4 に示したメカニズムを実験的にも確定するために、図 5(a) に示す試験片を作製した。この試験片では、試験部上部に梁を配置し、梁の右端に負荷を与えることで、試験部に異なる方向への曲げ変形を与えることができる。梁の右端に対して鉛直下向きの負荷を与えた場合、試験部には左に凸の曲げ変形が生じる。一方、梁の右端に左向きの水平負荷を与えると、試験部には右に凸の曲げ変形が生じる。本負荷実験により得られたナノドメインの変化の様子を示した模式図を図 5(b) に示す。負荷前の試験部には右斜め上に広がるナノドメインが存在しており (図 5(b)-i) 試験片上部右端に鉛直方向下向きの負荷を与えてその後除荷を行うと、初期状態に対してドメイン壁は 90 度回転した (図 5(b)-ii)。さらに異なる方向からの負荷によって試験部に逆方向の曲げを生じさせてその後除荷を行うと、試験部のドメイン壁は更に 90 度回転した (図 5(b)-iii)。本実験によって、図 4 に示したメカ

ニズムが妥当であることを明らかにし、力学的にドメインのスイッチングができることがわかった。

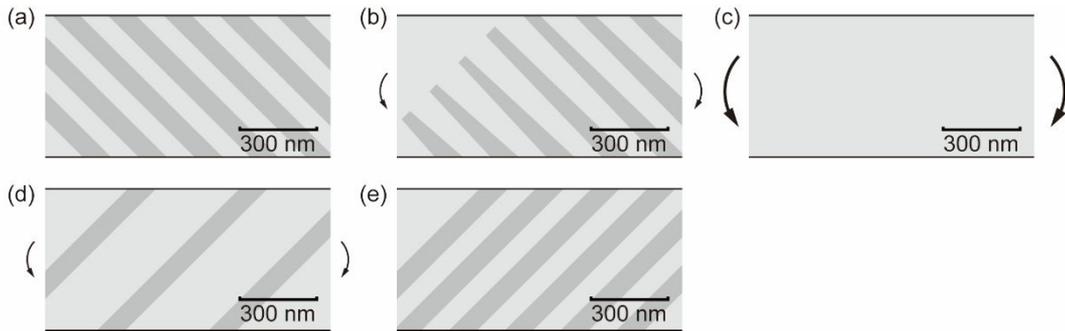


図3 曲げ変形によるナノドメイン構造の変化。

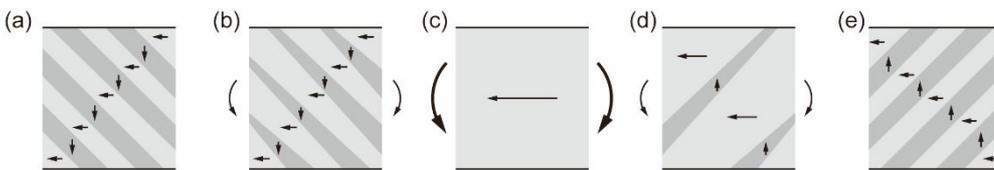


図4 上に凸の曲げ変形による分極方向の変化。

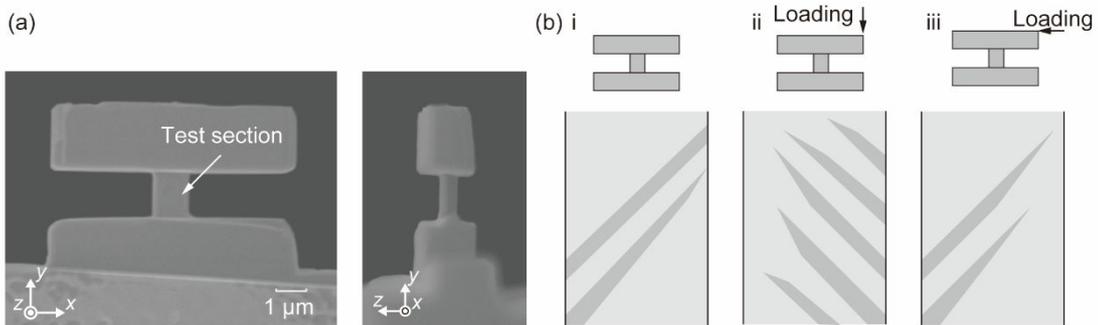


図5 (a)両方向曲げ用試験片, (b)曲げ荷重によって生じるナノドメインの模式図。

続いて、この現象を利用したデバイスの試作を行った。図6(a)は、試作デバイスを示す。デバイスは、シリコン基板と厚さ $1\mu\text{m}$ のPZT単結晶薄膜によって構成されている。シリコン基板はウェットエッチングによって中央をくり抜き、さらに基板端の一部にはスリットが設けられ、その上部でPZT薄膜はフリースタANDING状態となっている(図6(b))。さらに、このデバイスの両側に圧縮荷重を与えることで、フリースタANDING部の薄膜を座屈させて曲げ変形を生じさせることができる。デバイスに圧縮荷重を与えることのできる治具を開発し(図6(c))、圧電応答顕微鏡(PRM: Piezo-Response Microscope)を用いてこのデバイスの特性について計測を行った。図6(d)は、PRM測定結果(面外方向の分極)を示す。曲げ方向(図中上下方向)に対して垂直な方向に応答が出ていることがわかる。

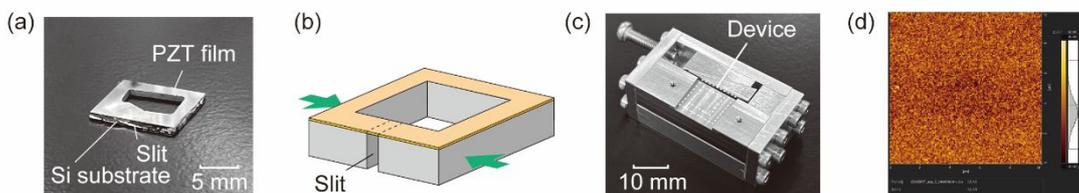


図6 (a)試作したバックリングデバイス, (b)デバイスの動作機構, (c)圧縮荷重用具, (d) PRM測定結果。

当初は飛び移り座屈現象を利用して二種類の分極状態を実現することを想定していたが、フレクソエレクトリック効果によって、異なる不揮発な分極状態を作れたことは新たな発見であった。マクロ材において単純な一方荷重によって分極状態を変化させることはこれまでに報告されているが、これは荷重時にのみに限った現象である。ナノサイズの材料について、力学的なドメインスイッチング現象の可能性を見出したことは、国内外でのインパクトは大きい。今後はこの原理を利用した実デバイスの実現が期待される。

<引用文献>

A. Schilling, D. Byrne, G. Catalan, K. G. Webber, Y. A. Genenko, G. S. Wu, J. F. Scott, and J. M. Gregg, Domains in Ferroelectric Nanodots, Nano Letters, Vol.9 No.9. 2009, 3359-3364.

Y Cho, S Hashimoto, N Odagawa, K Tanaka, Y Hiranaga, Nanodomain manipulation for ultrahigh density ferroelectric data storage, Nanotechnology, Vol.17 No.7, 2007, S137.

Y. Cao, A. Morozovska, S.V. Kalinin, Pressure-induced switching in ferroelectrics: Phase-field modeling, electrochemistry, flexoelectric effect, and bulk vacancy dynamics, Physical Review B, Vol.96, 2017, 184109.

小山敏幸, 高木知弘, フェーズフィールド法入門, 丸善出版, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sumigawa Takashi, Shimada Takahiro, Huang Kai, Mizuno Yuki, Hagiwara Yohei, Ozaki Naoki, Kitamura Takayuki	4. 巻 22
2. 論文標題 Ultrasmall-Scale Brittle Fracture Initiated from a Dislocation in SrTiO ₃	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2077 ~ 2084
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c00005	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 該当する
1. 著者名 Umeno Yoshitaka, Kawai Emi, Kubo Atsushi, Shima Hiroyuki, Sumigawa Takashi	4. 巻 16
2. 論文標題 Inductive Determination of Rate-Reaction Equation Parameters for Dislocation Structure Formation Using Artificial Neural Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16052108	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 Shima Hiroyuki, Sumigawa Takashi, Umeno Yoshitaka	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonsingular Stress Distribution of Edge Dislocations near Zero-Traction Boundary	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 4929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma15144929	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 Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka, Sumigawa Takashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Analytic formulation of elastic field around edge dislocation adjacent to slanted free surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 220151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.220151	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 Hattori Ken, Sakai Yuya, Pamasii Liliyany N., Irmikimov Aydar, Higashi Takaaki, Yang HaoBang, Shi XiaoQian, Guo FangZhun, Osaka Ai I., Tanaka Hidekazu, Imori Takushi, Komori Fumio, Hattori Azusa N.	4. 巻 20
2. 論文標題 Accessibility of ARPES for Three-dimensionally Architected Si{111}7×7 Facet Surfaces on Micro-patterned Si(110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 214 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2022-038	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 Osaka Ai I., Hattori Azusa N.	4. 巻 65
2. 論文標題 Realization of Non-degrading Huge Resistance Changes in the Metal Oxide Nanostructures Utilizing the Perfect Crystal Growth Techniques	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 321 ~ 326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.321	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 Chen Wufan, Wang Xiaoyuan, Yan Yabin, Sumigawa Takashi, Kitamura Takayuki, Feng Miaolin, Xuan Fu-Zhen	4. 巻 90
2. 論文標題 Bending stress relaxation of microscale single-crystal copper at room temperature: An in situ SEM study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - A/Solids	6. 最初と最後の頁 104377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.euromechsol.2021.104377	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 該当する

1. 著者名 Zhuo Yizhi, Xia Zhijie, Qi Yuan, Sumigawa Takashi, Wu Jianyang, Sestak Petr, Lu Yinan, Hakonsen Verner, Li Tong, Wang Feng, Chen Wei, Xiao Senbo, Long Rong, Kitamura Takayuki, Li Liangbin, He Jianying, Zhang Zhiliang	4. 巻 33
2. 論文標題 Simultaneously Toughening and Stiffening Elastomers with Octuple Hydrogen Bonding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2008523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202008523	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 該当する

1. 著者名 Huang Kai, Sumigawa Takashi, Kitamura Takayuki	4. 巻 806
2. 論文標題 Experimental evaluation of loading mode effect on plasticity of microscale single-crystal copper	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 140822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.140822	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 該当する

1. 著者名 Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka, Sumigawa Takashi	4. 巻 15
2. 論文標題 Spot-Ladder Selection of Dislocation Patterns in Metal Fatigue	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 1028 ~ 1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym15051028	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 Kubo Atsushi, Kawai Emi, Sumigawa Takashi, Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka	4. 巻 31
2. 論文標題 Defect formation mechanisms in metal nanowire under cyclic loading: a molecular dynamics study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 065020 ~ 065020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-651X/acea3b	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 Tobise Akihiro, Shima Hiroyuki, Akiba Yuri, Umeno Yoshitaka, Kawai Emi, Kubo Atsushi, Abe Masataka, Sumigawa Takashi	4. 巻 65
2. 論文標題 Surface outflow effect on dislocation structures in micrometer-sized metals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Extreme Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 102094 ~ 102094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eml.2023.102094	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40件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Observation of fatigue dislocation structure in micro-sized Ni single crystal specimen
3. 学会等名 2023 International Joint Symposium on Convergence Technology of Mechanical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 In Situ Observation of Fracture Dominated by a Single Dislocation and its Governing Mechanics
3. 学会等名 MS&T22 Technical meeting and Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Experimental Investigation of the Fatigue Behavior of Three-dimensionally Small Micro-sized Metals
3. 学会等名 MATERIALS STRUCTURE & MICROMECHANICS OF FRACTURE (MSMF10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Azusa N. Hattori
2. 発表標題 Prominent metal-insulator transition properties in the three-dimensional nanostructured strongly correlated oxides
3. 学会等名 Bangladesh Crystallographic Association 7th Conference of BCA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Azusa N. Hattori
2. 発表標題 Modulation of metal-insulator transition properties in the three-dimensionally controlled nano-micro space
3. 学会等名 International Conference on Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飛世 昂大
2. 発表標題 疲労した金属の転位組織形成メカニズム解明への数理的アプローチ
3. 学会等名 日本材料学会第7回マルチスケール材料力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木 敏行
2. 発表標題 曲げ負荷を受けるBaTiO ₃ ナノ単結晶のドメイン構造変化の観察
3. 学会等名 日本材料学会第8回材料WEEK
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石坂 大和
2. 発表標題 単一すべり方位を有するナノNi単結晶のTEM内引張圧縮負荷挙動観察
3. 学会等名 日本材料学会第8回材料WEEK
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 穴田 悠樹
2. 発表標題 引張圧縮負荷を受けるマイクロNi単結晶の疲労転位組織形成過程観察
3. 学会等名 日本材料学会第8回材料WEEK
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角田 純平
2. 発表標題 VO2単結晶ナノ薄膜のモット転移に関する面内単軸ひずみ感受性評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飛世 昂大
2. 発表標題 マイクロ金属の疲労転位組織形成パターンに関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部 梓
2. 発表標題 ナノ構造化による強相関Ni酸化物への水素ドーブ抵抗変調特性制御
3. 学会等名 材料学会第8回材料WEEK
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Azusa N. Hattori
2. 発表標題 Emergent Ferromagnetic properties for the Fe nanofilms on the architected three-dimensional patterned surfaces
3. 学会等名 International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Characteristic Fatigue of Micro-Sized Single Crystal Nickel
3. 学会等名 The 6th International Conference on Materials and Reliability (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Fatigue of Micro-sized Single Crystal Copper under Tension-compression Cyclic Loading
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澄川 貴志
2. 発表標題 微小スケール金属の疲労実験と組織観察
3. 学会等名 日本金属学会研究会No.82 "微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング" 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Fatigue of Micro-sized metals
3. 学会等名 5th International Conference on Structural Integrity and Durability (ICSID 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澄川 貴志
2. 発表標題 マイクロスケールの金属の疲労
3. 学会等名 第10回RC287「新時代の電子デバイスと電子機器における信頼性設計評価と熱設計に関する研究分科会」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 梓
2. 発表標題 立体表面造形技術を駆使した3次元ナノ超構造・物性の先導的研究
3. 学会等名 2021年 日本表面真空学会学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田 純平
2. 発表標題 面外方向にV-V dimer構造を有するV02単結晶ナノ薄膜のモット転移に及ぼす面内単軸ひずみの影響
3. 学会等名 日本材料学会第7回材料WEEK
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川 博己
2. 発表標題 マイクロ銅単結晶の疲労に及ぼす異材界面の影響
3. 学会等名 日本材料学会第7回材料WEEK
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田 聡志
2. 発表標題 [0 0 1] 多重すべり方位を有するマイクロ銅単結晶の引張圧縮疲労損傷過程のその場観察
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村 知輝
2. 発表標題 設計可能な引張剛性を有するメタマテリアルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田 純平
2. 発表標題 TiO ₂ (001)基板上V02単結晶ナノ薄膜のモット転移に及ぼす面内単軸ひずみの影響
3. 学会等名 日本材料学会第6回マルチスケール材料力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飛世 昂大
2. 発表標題 マイクロNi単結晶の引張圧縮疲労とその内部転位組織
3. 学会等名 日本材料学会第6回マルチスケール材料力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 梓
2. 発表標題 3次元立体表面上の鉄ナノ薄膜での特異な磁気特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshitaka Umeno
2. 発表標題 Machine-learning determination of reaction-diffusion model parameters for dislocation pattern formation
3. 学会等名 GSEMSE2023 Global Summit and Expo on Materials Science and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima
2. 発表標題 Fatigue of nanometals: Dynamical systems theory of dislocation patterning under cyclic load
3. 学会等名 THERMEC'2023 International Conference on Processing & Manufacturing of advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshitaka Umeno
2. 発表標題 Inductive determination of reaction-diffusion model parameters for dislocation pattern formation using machine-learning: Toward deduction-induction integrated multiscale simulation
3. 学会等名 THERMEC'2023 International Conference on Processing & Manufacturing of advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澄川 貴志
2. 発表標題 ナノインデンターを用いた電子顕微鏡内その場観察力学実験
3. 学会等名 フルカージャパン ナノ表面計測事業部 SEM・TEM中の力学試験で微小材料の特性を探る ~ In-situナノインデンター評価技術セミナー ~ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澄川 貴志
2. 発表標題 転位を起点とするナノ SrTiO ₃ の破壊とその力学基準
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第36回秋季シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉坂 浩太
2. 発表標題 引張圧縮負荷を受けるマイクロ Ni 単結晶中の疲労転位構造形成過程の観察
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kim Byungwoon
2. 発表標題 異材界面を有するマイクロ金属単結晶の疲労
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 力学系理論による疲労転位構造の安定性解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 向井 健将
2. 発表標題 集中荷重に対するひずみ分散機能を有するメカニカルメタマテリアルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池本 翔太郎
2. 発表標題 非圧電性材料におけるナノ電界勾配に起因した Converse Flexoelectricity の形状効果
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉坂 浩太
2. 発表標題 引張圧縮繰り返し負荷を受けるマイクロNi単結晶試験片の疲労転位組織形成過程の観察
3. 学会等名 日本材料学会 第9回材料WEEK
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kim Byungwoon
2. 発表標題 3(111)境界を有するマイクロ銅双結晶試験片の引張圧縮疲労損傷
3. 学会等名 日本材料学会 第9回材料WEEK
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田 大輝
2. 発表標題 ナノ金属の引張圧縮疲労試験手法の開発
3. 学会等名 日本材料学会 第9回材料WEEK
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澄川 貴志
2. 発表標題 ナノ～マイクロ材料に関するその場観察力学実験
3. 学会等名 電子情報通信学会 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会主催 第5期 第3回研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 兼子佳久, 田中 啓介, 高橋 可昌, 澄川 貴志, 平方 寛之, 梅野 宜崇	4. 発行年 2024年
2. 出版社 内田老鶴園	5. 総ページ数 248
3. 書名 金属疲労の基礎とメカニクス 結晶学と力学から読み解く金属の疲労	

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 エネルギー材料設計研究室ホームページ https://www.force.energy.kyoto-u.ac.jp/
--

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	梅野 宜崇 (Umeno Yoshitaka) (40314231)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究分担者	島 弘幸 (Shima Hiroyuki) (40312392)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	安部 正高 (Abe Masataka) (50582623)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授 (14301)	

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	服部 梓 (Hattori Azusa) (80464238)	大阪大学・産業科学研究所・准教授 (14401)	

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