

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03395

研究課題名(和文)ペロブスカイト原子膜の物性制御と高機能誘電体デバイスへの応用

研究課題名(英文)Control of physical properties of atomically-thin perovskite films and its application to high-performance dielectric devices

研究代表者

長田 実(Osada, Minoru)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：10312258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代誘電体デバイスの開発を目指した新たな試みとして、層状金属酸化物の単層剥離により得られる酸化物ナノシートに注目し、高機能の誘電材料、デバイスの開発を行った。巨大誘電特性、サイズ効果フリー機能など特異的誘電特性を有するペロブスカイトナノシートをモデルケースに、0.5-3 nmの臨界薄膜で実現する特異物性の機構解明とともに誘電物性の制御技術を確認し、新規高誘電・強誘電性ナノシートを開発した。さらに、ナノシートを1層ずつ精密集積する原子層エンジニアリングにより、他の誘電材料で実現しえない高容量ナノキャパシタ、原子膜デバイスを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、エレクトロニクスの基盤技術である誘電材料・デバイスが直面している課題に対して、材料・プロセスの基礎に戻って新たなコンセプトを創出しようとする提案、画期的な素材・プロセスの採用で従来技術の置き換えや現行デバイス性能の限界を突破する先端エレクトロニクスを追求する提案を含んだ極めてチャレンジ性の高いテーマである。特に本研究で開発した原子膜high-k技術をベースとした高性能コンデンサ、蓄電キャパシタは、従来の材料、技術では到達できない超高容量、高エネルギー密度を実現するものであり、革新的デバイスの創出・発展への貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Ultrathin films with high-k dielectric/ferroelectric properties form the basis of modern electronics. With the further miniaturization of electronic devices, conventional materials are expected to experience challenge because of their critical thickness, where the dielectric/ferroelectric responses are unstable or even disappeared if the film thickness is reduced to the nanometer scale or below a two-dimensional (2D) limit. In this study, we try to explore 2D dielectrics/ferroelectrics and related device applications. Through detailed investigations on critical properties at 0.5-3 nm scale, we clarified dielectric/ferroelectric responses at 2D limit, and discovered new high-k dielectric/ferroelectric nanosheets. We also utilized layer-by-layer engineering of 2D nanosheets, and successfully developed 2D capacitors/FETs with improved performances.

研究分野：無機材料、ナノ材料化学

キーワード：2次元材料 酸化物ナノシート 高誘電体 強誘電体

1. 研究開始当初の背景

ペロブスカイト酸化物は、その構造に起因した強誘電性、強磁性、超電導性など特異な物性を示す。中でも、チタン酸バリウム (BaTiO_3)、チタン酸鉛 (PbTiO_3) に代表されるペロブスカイトは、強誘電性に付随する巨大な誘電率、圧電性を示し、コンデンサ、薄膜メモリ、圧電素子など、電子デバイスへの応用が長年にわたって研究されてきた。近年の電子デバイスの小型化、高性能化の進展は目覚ましく、誘電体、強誘電体においても半導体微細プロセスとの融合による微細、集積化が必須となっている。しかしながら、ペロブスカイトをベースとした誘電体、強誘電体の多くは、セラミックスの粒子サイズの減少や薄膜化に伴い誘電特性が著しく低下する「サイズ効果」を示すことが広く知られている。このサイズ効果は、材料科学、固体物理分野における数十年來の謎であるが、発現機構については未解明であり、応用面からもその早急な解明が待たれている。特に最先端の電子デバイスにおいては、サイズ効果が顕著に発現する 50nm 以下のナノ粒子や超薄膜の利用が検討されており、誘電体、強誘電体におけるサイズ効果の理解は、将来の電子デバイスの高機能化や設計に係る極めて重要な知見となる。

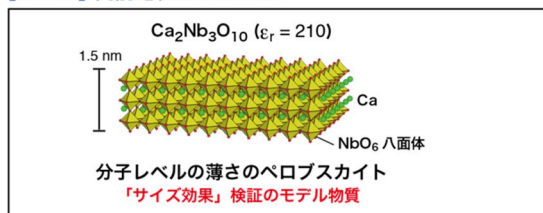
サイズ効果に関する既往の研究では、ナノ粒子あるいは薄膜が主に検討されているが、組成変動や欠陥のないペロブスカイトナノ構造の形成が困難であり、プロセスや化学的不安定性に由来した外的因子により、ナノサイズでの本質的な誘電応答が得られないという課題があった。特に薄膜系においては、外的因子の影響が顕著であり、製膜時の基板界面反応、欠陥生成、格子不整合など、いわゆる低誘電率界面層「デッドレイヤー」の問題が指摘されている。申請者は上記課題を解決し、真にサイズ効果を検証し、材料設計やデバイス開発につなげるためには、ペロブスカイトナノ結晶を利用し、その単体での特性評価を行うことが有効であるとの仮説を立てた。さらに、この特性評価のためには、電気特性の劣化原因となる外的因子を排除した素子作製技術を併せ持つことが重要であるとの着想に至った。

申請者らは、層状酸化物の単層剥離により得られる酸化物原子膜「酸化物ナノシート」に注目し、ナノシートの有する特異物性や優れたプロセス技術の活用により高度な電磁気機能の創製を目指した研究を進めてきた [1, 2]。本研究構想は、こうした研究の一環から得られたもので、ナノシートをベースとするペロブスカイト原子膜の利用により、数 nm の臨界薄膜での誘電・強誘電物性の検証とともに、原子層エンジニアリングによる高機能誘電体素子の創製を目指そうというものである。

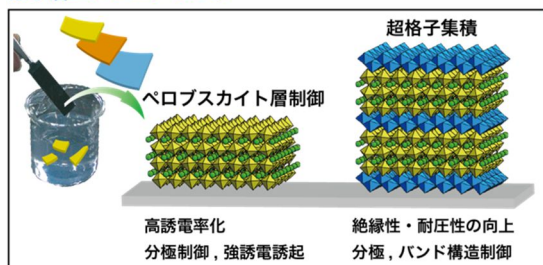
2. 研究の目的

本研究では、次世代誘電体デバイスの開発を目指した新たな試みとして、層状金属酸化物の単層剥離により得られる酸化物原子膜「酸化物ナノシート」に注目し、0.5~3 nm の臨界薄膜での誘電・強誘電物性の検証とともに、原子層エンジニアリングによる高機能誘電体デバイスの開発を行う。巨大誘電特性、サイズ効果フリー機能など特異的誘電特性を有するペロブスカイトナノシートをモデルケースに、ナノ領域で実現する特異物性の機構解明とともに誘電物性の制御技術を確立し、新規高誘電・強誘電性ナノシートの開発につなげる。さらに、高誘電・強誘電性ナノシートを 1 層ずつ精密集積する原子層エンジニアリングにより、高容量ナノキャパシタ、原子膜デバイスを作製し、他の誘電材料で実現しえない高機能の誘電体デバイスの創製を目指す (図 1)。

【シース】高誘電性ナノシート



原子層エンジニアリング



【ゴール】高機能誘電体デバイスの創製

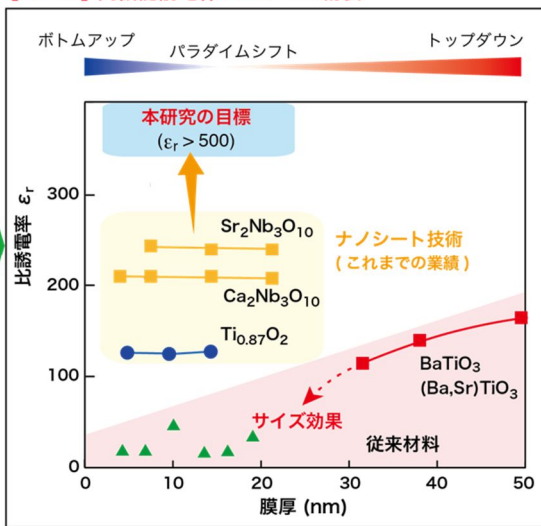


図 1. 【研究構想図】ペロブスカイト原子膜の物性制御と高機能誘電体デバイスへの応用。

3. 研究の方法

本研究では、申請者オリジナルのナノシート技術を発展させ、従来の材料、技術では実現できない誘電機能を持つ素子の開発と、それを推進するために必要な基礎研究を進めた。この目的達成のために、以下の3課題について検討した。

- (課題1) 新規高誘電性・強誘電性ナノシートの設計、開発
- (課題2) ナノシートの原子層エンジニアリング技術の開発
- (課題3) ナノシートを基幹ブロックとする高機能誘電体素子の創製

4. 研究成果

(1) 新規高誘電性・強誘電性ナノシートの設計、開発：

材料設計指針の検討のため、巨大誘電特性、サイズ効果フリー機能など特異物性を有するペロブスカイトナノシートをモデルケースに、ナノ領域で実現する特異物性の機構解明を進めた。この目的のために、ペロブスカイト1格子単位 (~0.4 nm) で厚みを精密に制御したペロブスカイトナノシート ($\text{Ca}_2\text{Na}_{m-3}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+1}$; $m = 3 - 6$) (図2) を合成し、走査型プローブ顕微鏡により0.5 ~ 3 nmの臨界膜厚での誘電・強誘電物性の検証を行った。その結果、ペロブスカイトナノシートでは、従来材料 (BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) で臨界膜厚とされる~1.5 nm (3格子) 以下でも誘電・強誘電物性が維持されることを確認した [3, 4]。

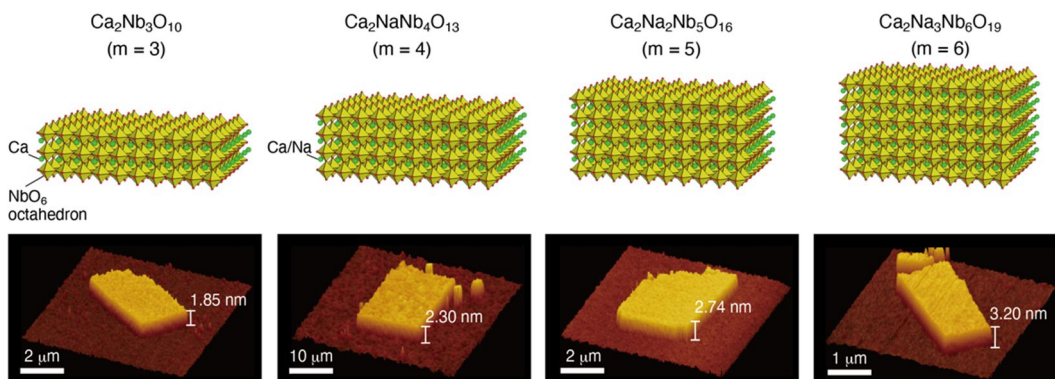


図2. ホモロガス系列ペロブスカイト型ナノシート $\text{Ca}_2\text{Na}_{m-3}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+1}$ ($m = 3, 4, 5, 6$) の結晶構造図(上), 原子間力顕微鏡による単一ナノシートの形状像(下)。

さらに、誘電体デバイス应用到に好適な、高い誘電率と優れた絶縁性を有する新規高誘電・強誘電性ナノシートの探索を行った(図3)。これまで開発したペロブスカイトナノシート ($\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Nb}_3\text{O}_{10}$, $\epsilon_r = 210 \sim 240$) に対して、第一原理計算に基づく材料設計により元素置換や分極構造の最適化を行い、誘電特性の更なる向上やバンドオフセット制御による絶縁性、耐電圧特性 (> 4MV/cm) の制御を試みた。その結果、高誘電率化には八面体層数の制御が有効となること、特に $\text{Ca}_2\text{Na}_{m-3}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+1}$ では400以上の高い誘電率が実現し、 $\text{Ca}_2\text{Na}_2\text{Nb}_5\text{O}_{16}$ では強誘電体特性が発現することを確認した。

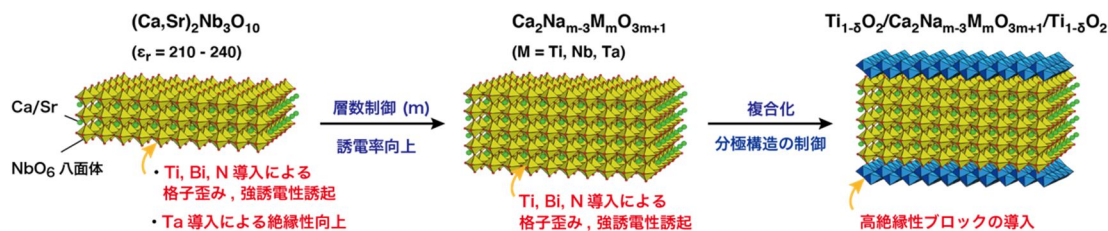


図3. 新規高誘電性・強誘電性ナノシートの設計、開発。

(2) ナノシートの原子層エンジニアリング技術の開発：

ナノシートの優れた性能を十分に引き出し、新たなデバイスを実現させるためには優れた素子作製技術を併せ持つことが重要である。誘電体デバイスでは、特性劣化の原因となるボイド・クラックや薄膜/基板界面の反応層を除去した高品位ナノ薄膜を実現する必要がある。本課題では、これまでに開発してきたラングミュア・プロジェクト(LB)法について、ナノシートのサイズ、表面圧の最適化や磁場・電場印加下での稠密配列技術などの高度化を図り、高品位ナノ薄膜を実現する新技術の検討を行った。個々のナノシートのサイズ、厚みに対応して、トラフに展開後の静置時間や転写圧力の最適化を行い、ナノシートを稠密配列、レイヤーバイレイヤー累積して多層膜を構築する技術を確認した。課題1で開発したホモロガス系列ペロブスカイト型ナノシート $\text{Ca}_2\text{Na}_{m-3}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+1}$ ($m = 3, 4, 5, 6$) について単層、多層膜の作製を行ったところ、秩序性の高い多層膜の構築に成功した。このナノシートでは、

m および積層回数を変えることにより、原子レベルで化学組成と構造を精密に制御した単層膜、多層膜の作製が可能となった(図4)。さらに、ナノシートの稠密配列を2種類以上のナノシートで行う超格子集積技術や、光学観察技術をベースに光学顕微鏡下でナノシートを各種金属の目的の位置に転写するデバイス構築技術を開発した。

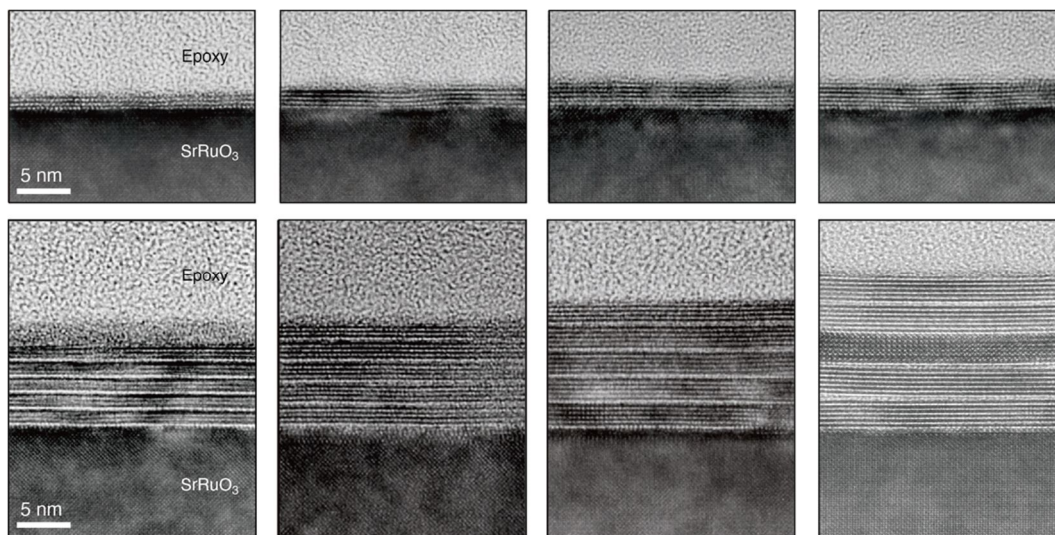


図3 . SrRuO₃ 原子平滑基板上に作製した Ca₂Na_{m-3}Nb_mO_{3m+1} 単層膜、積層膜の断面透過型電子顕微鏡像。

以上、本研究で開発した技術は、ビームエピタキシーなどを駆使した人工格子構築技術に匹敵するレベルの精細なナノ構造制御を、簡便、安価、低環境負荷のプロセスにより達成した点に意義があり、新しいナノ製造技術としての活用が期待される。

(3) ナノシートを基幹ブロックとする高機能誘電体素子の創製：

課題1、2の技術をベースに、各種誘電体デバイスの応用研究を推進した。コンデンサ応用に関しては、高誘電性ナノシートの原子層エンジニアリングにより、現行コンデンサのBaTiO₃膜に対して1/50の薄膜化に相当する10 nmレベルの誘電体超薄膜を形成し、特性評価を行った。Ca₂Na_{m-3}Nb_mO_{3m+1}では、NbO₆八面体1個ずつの原子レベルでの構造制御と自在な特性制御が可能であることを確認し、NbO₆八面体6個の6層型誘電体(Ca₂Na₃Nb₆O₁₉; $m=6$)では、膜厚10 nm以下のナノスケール領域で安定な誘電特性、絶縁性を示し、誘電率470を実現した。図4は、今回開発したペロブスカイトナノシート(Ca₂Na_{m-3}Nb_mO_{3m+1}; $m=3-6$)と従来のペロブスカイト構造誘電体における極薄膜領域での誘電特性を比較したものである。従来のペロブスカイト構造誘電体では、膜厚50 nm以下まで薄膜化すると誘電率が劇的に低下するサイズ効果があり、これが電子素子応用の大きなネックとなっていた。それに対し、今回開発したペロブスカイトナノシートは、膜厚5-20 nmの超薄膜領域で安定した誘電率(210-470)を有し、既存のペロブスカイト構造誘電体の最高値200を大きく上回る誘電率を示した。特に、6層型誘電体(Ca₂Na₃Nb₆O₁₉; $m=6$)では、現行技術で到達困難な10 nm以下の薄膜化と高誘電、絶縁機能($\epsilon_r > 500$, リーク電流密度 $< 10^{-7}$ A/cm²@+1 V)を同時に実現する高容量コンデンサの開発に成功した。さらに、開発した誘電・強誘電性ナノシートにおける動作性、耐久性、耐熱性の向上などに資するデバイス設計を行い、200以上の高温環境下で安定動作する高温コンデンサ、リチウム二次電池に匹敵する高エネルギー密度を有する蓄電キャパシタの開発を進めた [5]。

さらに、本研究で開発したナノシートの原子層エンジニアリング技術を各種電子素子技術に応用し、高機能ナノシートFET、発光制御デバイス、ペロブスカイト太陽電池、蓄電素子などの開発に成功した [6-10]。

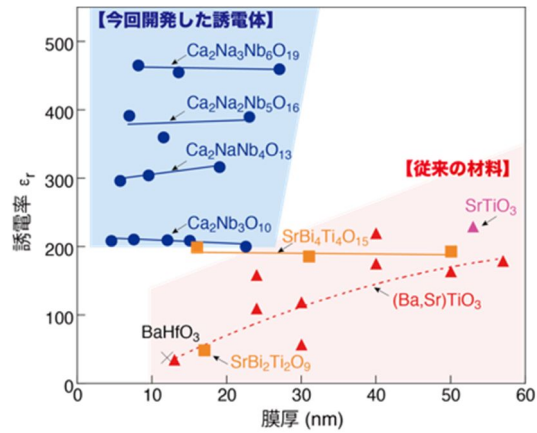


図4 . 今回開発した誘電体ナノシート ($\text{Ca}_2\text{Na}_{n-3}\text{Nb}_n\text{O}_{3n+1}$; $n = 3-6$) と従来のペロブスカイト構造誘電体における超薄膜領域での誘電率の比較。

<引用文献>

- 1) **M. Osada**, T. Sasaki: “Two-dimensional dielectric nanosheets: Novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks”, *Adv. Mater.*, **24**, 209-228 (2012). [Highlighted in Frontispieces]
- 2) **M. Osada**, T. Sasaki: “Nanoarchitectonics in dielectric/ferroelectric layered perovskites: from bulk 3D systems to 2D nanosheets”, *Dalton Trans.*, **47**, 2841-2851 (2018).
- 3) B-W. Li, **M. Osada**, Y-H. Kim, Y. Ebina, K. Akatsuka, T. Sasaki: “Atomic layer engineering of high-κ ferroelectricity in 2D perovskites”, *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 10868-10874 (2017).
- 4) **M. Osada**, T. Sasaki: “The rise of 2D dielectrics/ferroelectrics”, *APL Mater.*, **7**, 120902 (2019).
- 5) M-S. Khan, H-J. Kim, T. Taniguchi, Y. Ebina, T. Sasaki, **M. Osada**: “Layer-by-layer engineering of two-dimensional perovskite nanosheets for tailored microwave dielectrics”, *Appl. Phys. Exp.*, **10**, 091501 (2017).
- 6) S. Sekizaki, **M. Osada**, K. Nagashio: “Molecularly-thin anatase field-effect transistors fabricated through the solid state transformation of titania nanosheets”, *Nanoscale*, **9**, 6471-6477 (2017).
- 7) T. Taniguchi, S. Li, L. Nurdiwijayanto, Y. Kobayashi, T. Saito, Y. Miyata, S. Obata, K. Saiki, H. Yokoi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Tsukagoshi, Y. Ebina, T. Sasaki, **M. Osada**: “Tunable chemical coupling in two-dimensional van der Waals electrostatic heterostructures”, *ACS Nano*, **13**, 11214-11223 (2019).
- 8) T-P. Chen, C-W. Lin, S-S. Li, Y-H. Tsai, C-Y. Wen, W. J. Lin, F-M. Hsiao, Y-P. Chiu, K. Tsukagoshi, **M. Osada**, T. Sasaki, C-W. Chen: “Self-assembly atomic stacking transport layer of 2D layered titania for perovskite solar cells with extended UV stability”, *Adv. Energy Mater.* **8**, 1701722 (2018).
- 9) A. P. Thilakan, J-X. Li, T-P. Chen, S-S. Li, C-W. Chen, **M. Osada**, K. Tsukagoshi, T. Sasaki, A. Yabushita, K-H. Wu, C-W. Luo: “Origin of extended UV stability of 2D atomic layer titania-based perovskite solar cells unveiled by ultrafast spectroscopy”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 24, 21473-21480 (2019).
- 10) M-L. Mekonnen, C-H. Chen, **M. Osada**, W-N. Su, B-J. Hwang: “Dielectric nanosheet modified plasmonic-paper as highly sensitive and stable SERS substrate and its application for pesticides detection”, *Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **225**, 117484 (2020).

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 5件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Li, Y-C Lin, W. Zhao, J. Wu, Z. Wang, Z. Hu, Y. Shen, D-M. Tang, J. Wang, Q. Zhang, H. Zhu, L. Chu, W. Zhao, C. Liu, Z. Sun, T. Taniguchi, M. Osada, W. Chen, Q-H. Xu, A. T. Wee, K. Suenaga, F. Ding, G. Eda	4. 巻 17
2. 論文標題 Vapour-Liquid Solid Growth of Monolayer MoS2 Nanoribbons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Mater.	6. 最初と最後の頁 535&-542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-018-0055-z	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 T. Jia, Z. Fan, J. Yao, C. Liu, Y. Li, J. Yu, B. Fu, H. Zhao, M. Osada, E. N. Esfahani, Y. Yang, Y. Wang, J-Y. Li, H. Kimura, Z. Cheng	4. 巻 10
2. 論文標題 Multifield Control of Domains in a Room-Temperature Multiferroic 0.85BiTi0.1Fe0.8Mg0.103-;0.15CaTiO3 Thin Film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 20712-20719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.8b05289	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 Z. Yu, Z. Cheng, G. Tsekouras, X. Wang, X. Kong, M. Osada, S-X. Dou	4. 巻 281
2. 論文標題 High Areal Capacitance and Rate Capability Using Filled Ni Foam Current Collector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 761-768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2018.06.007	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 K. Sano, Y. Onuma-Arazoe, Y. Ishida, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki, T. Hikima, T. Aida	4. 巻 57
2. 論文標題 Extra-Large Mechanical Anisotropy of a Hydrogel with Maximized Electrostatic Repulsion between Cofacially Aligned 2D Electrolytes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Angew. Chem. Int. Ed.	6. 最初と最後の頁 12508-12513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201807240	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 K. Tsukiyama, M. Takasaki, N. Kitamura, Y. Idemoto, Y. Oaki, M. Osada, H. Imai	4. 巻 11
2. 論文標題 Enhanced Oxide-Ion Conductivity of Solid-State Electrolyte Mesocrystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 4523-4530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8NR09709G	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 M. Osada, T. Sasaki	4. 巻 47
2. 論文標題 Nanoarchitecture in Dielectric/Ferroelectric Layered Perovskites: From Bulk 3D Systems to 2D Nanosheets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Dalton Trans.	6. 最初と最後の頁 2841-2851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7DT03719H	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 E. Verveniotis, Y. Okawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Taniguchi, M. Osada, C. Joachim, M. Aono	4. 巻 10
2. 論文標題 Self sensitization and Photo Polymerization of Diacetylene Molecules Self Assembled on a Hexagonal Boron Nitride Nanosheet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 206-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym10020206	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 該当する

1. 著者名 T. P. Chen, C.-W. Lin, S.-S. Li, Y.-H. Tsai, C.-Y. Wen, W. Lin, F.-M. Hsiao, Y.-P. Chiu, K. Tsukagoshi, M. Osada, T. Sasaki, C.-W. Chen	4. 巻 8
2. 論文標題 Self-Assembly Atomic Stacking Transport Layer of Two-Dimensional Titania for Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Adv. Energy Mater.	6. 最初と最後の頁 1701722-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201701722	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 M. S. Khan, H-J. Kim, T. Taniguchi, Y. Ebina, T. Sasaki, M. Osada	4. 巻 10
2. 論文標題 Layer-by-Layer Engineering of Two-Dimensional Perovskite Nanosheets for Tailored Microwave Dielectrics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 091501-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.091501	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 B. W. Li, M. Osada, Y-H. Kim, Y. Ebina, K. Akatsuka, T. Sasaki	4. 巻 139
2. 論文標題 Atomic Layer Engineering of High-k Ferroelectricity in 2D Perovskites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 10868-10874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b05665	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 K. Matsuba, C. X. Wang, K. Saruwatari, Y. Uesusuki, K. Akatsuka, M. Osada, Y. Ebina, R. Ma, T. Sasaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Neat Monolayer Tiling of Molecularly Thin Two-Dimensional Materials in One Minute	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advance	6. 最初と最後の頁 e1700414-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.1700414	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 S. Sekizaki, M. Osada, K. Nagashio	4. 巻 9
2. 論文標題 Molecularly-Thin Anatase Field-Effect Transistors Fabricated through the Solid-State Transformation of Titania Nanosheets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6471-6477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7NR01305A	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36件（うち招待講演 28件 / うち国際学会 23件）

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Room-Temperature Ceramic Nanocoating Using 2D Nanosheets
3. 学会等名 12th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxides and Devices
3. 学会等名 12th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxide Nanosheets: Exploring New Flatland
3. 学会等名 3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Controlled Assembly of 2D Nanosheets for Tailored Electronics
3. 学会等名 10th International Conference on Microwave Materials and their Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxides: Frontier for Energy and Environmental Issues
3. 学会等名 4th E-MRS & MRS-J Bilateral Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Nanoarchitectonics with 2D Oxides
3. 学会等名 3rd Taiwan-Japan Workshop on Nanospace Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Atomic Layer Engineering of 2D Perovskites
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting on Modern Ferroelectrics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxides
3. 学会等名 VISTEC-NTU International Symposium on Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Solution-Based Deposition of 2D Nanosheets for Ceramic Nanocoating
3. 学会等名 8th Tsukuba International Coating Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 The Rise of 2D Ferroelectrics
3. 学会等名 JSPS A3 Joint Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Ferroelectrics
3. 学会等名 2019 Taiwan-Nippon Workshop on Innovation of Emergent Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Osada, T. Sasaki
2. 発表標題 Atomic Layer Engineering of 2D Perovskites
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Shi, M. Osada, T. Sasaki
2. 発表標題 Synthesis and Characterization of 2D Conducting Oxides
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 酸化物ナノシートの精密集積とその応用
3. 学会等名 日本ゾル-ゲル学会第15回セミナー(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 酸化物ナノシートが拓く新しい複合イオン化合物
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第31回秋季シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 2次元ナノシートを活用した元素ブロック材料
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第31回秋季シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 ナノシートコーティング：現状と課題
3. 学会等名 セラミックコーティング研究体・研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生川涼介, 山本瑛祐, 長田 実
2. 発表標題 酸化タングステンの合成とフェトクロミック特性の評価
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱上 修, 山本瑛祐, 長田 実, 海老名保男, 佐々木高義
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡によるペロブスカイトナノシートの誘電特性評価
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 萩原和樹, 山本瑛祐, 小林 亮, 長田 実
2. 発表標題 BaTiO ₃ ナノ結晶の水熱合成と誘電特性の評価
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋太嗣, 山本瑛祐, 長田 実
2. 発表標題 酸化コバルトナノシートの合成と伝導特性
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中健大, 山本瑛祐, 長田 実, 海老名保男, 佐々木高義
2. 発表標題 ペロブスカイトナノシートの超格子集積と誘電特性評価
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木拓真, 施 越, 萩原和樹, 山本瑛祐, 長田 実
2. 発表標題 酸化ニッケルナノ結晶の合成と伝導特性
3. 学会等名 平成30年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Electronic Devices Based on 2D Oxides
3. 学会等名 2nd Nippon-Taiwan Workshop on Innovation of Emergent Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Nanohybrids towards New Electronics
3. 学会等名 2018 CICS International Symposium on Inorganic Nanostructures and Nanohybrids (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Atomic Layer Engineering of 2D Perovskites
3. 学会等名 International Conference on Two-Dimensional Layered Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxides: Exploring New Flatland
3. 学会等名 2017 NEA Symposium of Emerging Materials Innovation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxide Nanosheets: Moving beyond Graphene
3. 学会等名 2nd World Congress and Expo on Materials Science & Nanoscience (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 2D Oxide Nanosheets: Exploring New Flatland
3. 学会等名 IUMRS-ICAM 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Controlled Doping in 2D Oxide Semiconductors for Tailored Spinelectronic Materials
3. 学会等名 29th International Conference on Defects in Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada, S-S. Kim, P. Wu, H-W. Kim
2. 発表標題 Controlled Molecular Thickness in 2D Mica Nanosheets for Tailored Semiconductors
3. 学会等名 International Clay Conference (ICC 16) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 Nanosheet Architectonics: Atomic Layer Engineering of Functional Oxides
3. 学会等名 19th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Osada
2. 発表標題 High-k Ferroelectricity at 2D Limit
3. 学会等名 3rd Taiwan Consortium of Emergent Crystalline Materials (TCECM 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 ナノテクが拓く新しいセラミックス技術
3. 学会等名 日本セラミックス協会東海支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 溶液法によるセラミックスナノコーティング
3. 学会等名 電気学会フレキシブルセラミックスコーティング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長田 実
2. 発表標題 電気・磁気・光学応用が進むナノシート結晶
3. 学会等名 日本学術振興会 第161委員会第101回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 長田 実, 佐々木高義	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 6
3. 書名 Nanoparticle Technology Handbook	

1. 著者名 長田 実	4. 発行年 2018年
2. 出版社 テクノシステム	5. 総ページ数 5
3. 書名 粉体の表面処理・複合化技術集大成 - 基礎から応用まで -	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----