

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289232

研究課題名(和文) Beyondグラフェンを目指した新規原子膜技術の開発

研究課題名(英文) Development of novel atomic film technology toward post-graphene electronics

研究代表者

長田 実 (OSADA, Minoru)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・准主任研究者

研究者番号：10312258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、酸化物ナノシートをベースにグラフェンを凌駕する新規原子膜材料の開発を行った。半導体性を有する酸化チタン、酸化マンガンナノシートに対し、第一原理計算に基づく材料設計を行い、高い電子移動度を有する伝導性ナノシートの開発に成功した。また、高誘電性ナノシートの開発とその応用を進め、10nmの極薄膜で最高の誘電率を有するナノシートの合成に成功し、高性能のキャパシタ、ゲートデバイスを開発した。さらに、異なる機能のナノシートの積層集積により、人工強誘電体、マルチフェロイック材料、メタマテリアル、アクチュエータ材料など、グラフェンや他の2次元材料では実現しえない高次機能材料の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop novel atomic film technology using 2D oxide nanosheets. Through first-principles materials design, we developed new conducting nanosheets ( $\text{TiO}_2:\text{F}$ ,  $\text{MnO}_2:\text{F}$ ) with high-electron mobility. We also discovered high-k oxide nanosheets ( $\text{Ca}_2\text{NaN}_{n-3}\text{NbnO}_{3n+1}$ ) with the highest permittivity in the ultrathin region ( $< 10$  nm). We utilized these nanosheets as building blocks in the LEGO-like assembly, and successfully developed various functional nanodevices such as all-nanosheet FETs, high-density capacitors, artificial ferroelectrics/multiferroics, magneto-plasmonic metamaterials, actuator crystals, etc. Our work is a proof-of-concept for creating new functional nanodevices beyond graphene and other 2D materials.

研究分野：ナノ材料科学

キーワード：ナノシート 原子膜技術 2次元電子状態

## 1. 研究開始当初の背景

現在のシリコン半導体電子素子は、素子を微細・集積化することで、高機能化を実現してきた。しかし、スケーリングと呼ばれるこの技術では、シリコン技術の限界が見え始めており、新しい材料の導入が不可欠となっている。このブレークスルー技術として、層状化合物の単層により得られる2次元ナノシートを用いた電子素子が検討されており、候補材料として炭素の単原子層シートであるグラフェンに加え、酸化物、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{BN}$  を代表とする無機ナノシートが大きな注目を集めている。

こうしたナノシートの最大の魅力といえるのが、2次元電子状態や極薄原子膜という特徴にある。ナノシートでは、3次元から孤立2次元となることで、同じ組成でありながら電気特性も変貌を遂げる。例えば、元々の層状化合物が金属的であっても、ナノシートでは電界が容易に透過し、電子密度の変調が可能になるなど従来の電気的特性の概念が変わる。さらに、ナノシートは薄さ故に、レゴブロックのように積み重ねるだけで材料間の相互作用を自在に制御でき、新しい融合機能をデザインすることが可能となる。グラフェンはこうした孤立2次元系に関する新しい可能性と応用を切り拓き、超高速電子伝導や量子ホール効果など数多くの素晴らしい物性、機能が見出された。グラフェンは単純かつ美しい2次元構造と炭素の  $sp^2$  結合がつくる特異な電子構造がこれらの物性の発現の鍵であるが、その一方でグラフェンには多様性が欠けているともいえる。これに対して、無機ナノシートは究極の2次元性と共に、組成、構造、機能の多様性を具備しており、2次元ナノ物質の新しい舞台として注目されている。これまでに、剥離ナノシート化が報告された層状化合物としては、酸化物、水酸化物、カルコゲナイド、窒化ホウ素など広範な機能性材料がある。

我々のグループではこれまで、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をベースとした材料研究を推進しており、様々な組成、構造を有する層状遷移金属酸化物の剥離ナノシート化を達成し、金属、半導体、絶縁体(誘電体)、磁性体など多彩な機能材料として得られることを明らかにしてきた。さらに、酸化物ナノシートにおいては、特異な2次元ナノ状態が実現することに着目し、ボトムアップ集積により構造と電子状態を精密に制御した超格子を作製することで電磁気物性の人工的制御を実現し、巨大誘電機能、巨大磁気光学効果、界面誘起強誘電性など数多くの革新的機能の開拓に成功している。本研究構想は、こうした研究の一環から得られたもので、ワイドギャップ半導体性を有す

る酸化物ナノシートの精密ドーピングにより、高い電子移動度を有する半導体ナノシートや高い誘電機能を有するナノシートが開発できれば、酸化物ナノシートの有する2次元電子状態、高移動度、高誘電率などの物性的優位性が活躍する機能性原子膜の開拓とともに、新しいデバイスが実現するのではという着想に至った。

## 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、次世代エレクトロニクスの開発を目指した新しい試みとして、層状金属酸化物の単層剥離により得られる分子シート「酸化物ナノシート」に注目し、グラフェンを凌駕する新規原子膜材料の開発を行う。酸化チタン系、ペロブスカイト系ナノシートに対して、第一原理計算に基づく元素ドーピングとバンド構造制御を行い、高い電子移動度を有する半導体ナノシートやグラフェンでは実現しえない高い誘電機能を有するナノシートを探索する。さらに、高誘電性ナノシート単体あるいは半導体ナノシートとのヘテロ接合によりゲートデバイス、キャパシタを作製し、酸化物ナノシートの有する2次元電子状態、高移動度、高誘電率などの物性的優位性が活躍する原子膜デバイス技術を開発し、グラフェンを凌駕する日本発の新規電子材料の創製を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、酸化物ナノシートの有する2次元電子状態、高移動度、高誘電率などの物性的優位性が活躍する原子膜技術の開発と、そのデバイス化を推進するために必要な基礎研究を進める。この目的のために、以下の4課題を設定した。

【課題1】酸化物ナノシートの特性制御技術の確立と高伝導性ナノシートの開発

【課題2】新規高誘電体ナノシートの開拓

【課題3】ナノシートのヘテロ接合による強電界固体素子の構築

【課題4】酸化物ナノシートにおける新規原子膜機能の開拓

## 4. 研究成果

【課題1】酸化物ナノシートの特性制御技術の確立と高伝導性ナノシートの開発

酸化物ナノシートにおいて、精密ドーピングによる特性制御技術を確立し、ナノシート単体として高い電子移動度を有する高伝導性ナノシートの探索を行った。半導体性を有する酸化チタンナノシート( $\text{Ti}_{0.91}\text{O}_2$ )および酸化マンガンナノシート( $\text{MnO}_2$ )に対し、第一原理計算に基づく材料設計により、種々の元素置換によるドーピング効果やバンド構造の制御を行い、金属状態、高電子移動度を示すナノシートの開発を進めた。その結果、

$\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{W}^{6+}$ ,  $\text{N}^-$ ,  $\text{F}^-$ を置換した酸化チタンナノシート、 $\text{N}^-$ を置換した酸化マンガンナノシートでは、金属状態が実現することを明らかにした。この知見に基づき、 $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{W}^{6+}$ ,  $\text{N}^-$ ,  $\text{F}^-$ 少量ドーピングあるいは共置換によりドーピングを精密に制御した酸化チタンナノシートを作製し、特性評価を行ったところ、ITOに匹敵する高伝導性 ( $\sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ) と高い電子移動度 ( $> 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) を有することを確認した (図1)。

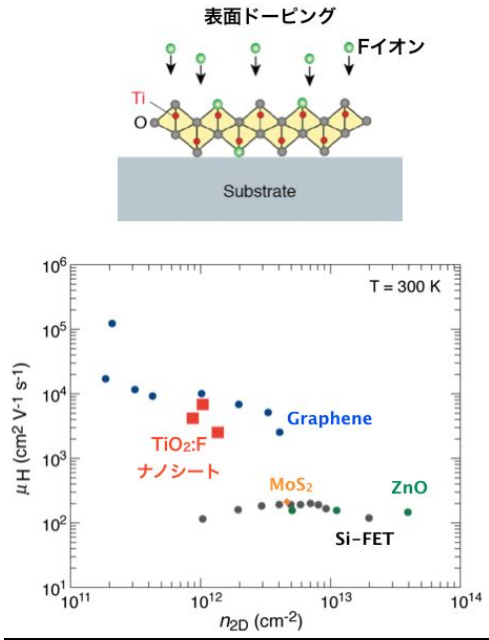


図1 . 表面ドーピングによる F 置換酸化チタンナノシートの作製 (上) と移動度 (下) .

### 【課題2】新規高誘電体ナノシートの開拓

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ナノシートの探索を行った。これまでに開発した厚さ1~2nm で高誘電率を示す酸化物ナノシート ( $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ ,  $\epsilon_r = 210 \sim 240$ ) を対象に、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 ( $> 4\text{MV/cm}$ ) の制御を試みた。予備的な理論計算より、高誘電率が期待されるペロブスカイト・ホモロガス系に注目し、ペロブスカイトユニットを3~6個の範囲で系統的に制御したナノシート ( $\text{Ca}_2\text{Na}_{n-3}\text{M}_n\text{O}_{3n+1}$ ;  $M = \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta}$ ,  $n = 3 \sim 6$  など) を作製した (図2)。ナノ誘電率計測システムにより誘電率、強誘電性の評価を行った結果、 $\text{NbO}_6$ 八面体構造を4層以上内含するペロブスカイトナノシートでは、 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Nb}_3\text{O}_{10}$  を凌ぐ高い電子分極値を示し、400 以上の高誘電率を有することを確認した。また、Nb 席の一部を Ti で置き換えた  $\text{CaLaNb}_2\text{TiO}_{10}$  ナノシートでは、 $\text{TiO}_6$ 八面体の

大きな格子歪みに起因し、強誘電性が誘起されることを明らかにした。

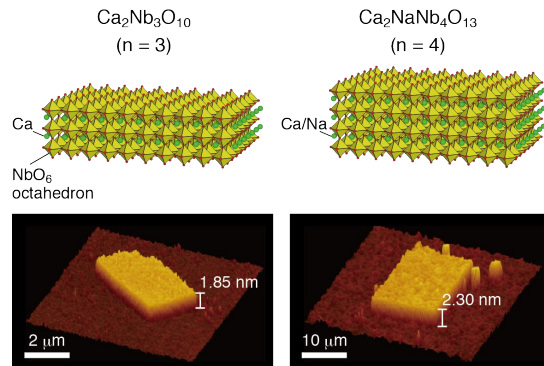


図2 .  $\text{Ca}_2\text{Na}_{n-3}\text{Nb}_n\text{O}_{3n+1}$  ペロブスカイトナノシートの構造 (上) と AFM 像 (下) .

さらに、高誘電性ナノシートの応用研究を推進し、導電性および誘電性の2種類のナノシートを積み木細工のようにサンドイッチ構造に堆積することにより、現行材料を凌駕する世界最小の高性能キャパシタ素子の作製に成功した。また、酸化チタン ( $\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2$ )、ペロブスカイトナノシート ( $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ ) について、高温での構造安定性について調べたところ、約800 まで構造相転移がなく、極めて高い熱安定性を有することを確認した。この知見をベースにナノシートの高温特性について検討したところ、キャパシタ素子は300 まで安定に動作し、高温電子素子の应用到に好適となることを確認した (図3)。

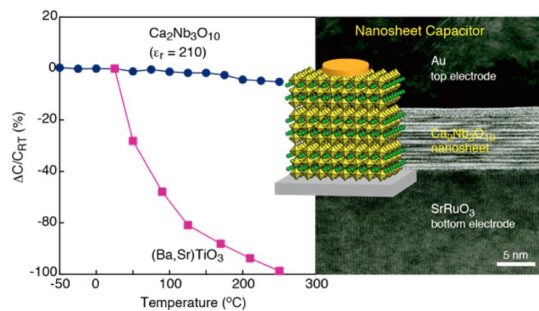


図3 . ナノシートキャパシタの高温誘電特性 (左)  $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$  ナノシートおよび  $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$  の高温誘電特性の比較 . (右)  $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$  ナノシート素子の断面 TEM 像 .

### 【課題3】ナノシートのヘテロ接合による強電界固体素子の構築

高誘電性ナノシートの新しい試みとして、強電界固体素子などへの応用を進めた。この目的のために、従来評価が困難であった高誘電性ナノシートを光学的に評価する技術を開発し、層数評価と共に、ヘテロデバイスを構築する転写技術を確認した (図4)。

この技術をベースに、ナノシート単体、半導体ナノシートとのヘテロ接合により各種 FET デバイスを構築し、酸化物ナノシートの

有する2次元電子状態、高移動度、高誘電率などの物性的優位性が活躍する原子膜デバイス技術を開発した。さらに、高誘電性ナノシートとの融合デバイスについても検討を行い、高誘電性ナノシートを用いたグラフェンデバイスの構築と FET 動作確認に成功した。

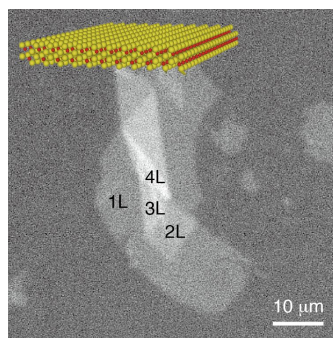


図4 . 光学顕微鏡による酸化チタンナノシートの層数評価 .

#### 【課題4】酸化物ナノシートにおける新規原子膜機能の開拓

半導体、強磁性を示す酸化チタンナノシート ( $\text{Ti}_{0.91}\text{O}_2$ ,  $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  など) をベースに、第一原理計算を援用した材料設計により、精密ドーピングやバンド構造制御を行い、室温でハーフメタル特性を有するナノシートの開発に成功した。

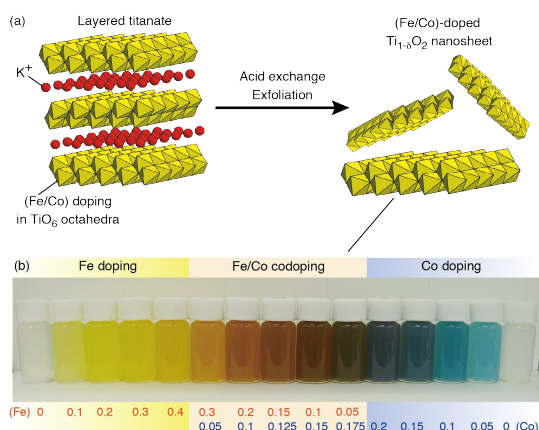


図5 . 酸化チタンナノシートの精密ドーピング .

さらに、異なる機能のナノシートの積層集積により、構造と電子状態を精密に制御した人工超格子を構築し、鉛フリー人工強誘電体、強誘電性/強磁性ナノシートのマルチフェロイック材料、巨大磁性効果を示す磁性プラズモン材料、近赤外領域で負の屈折率を示すメタマテリアル、誘電体ナノシートをベースとしたアクチュエータ材料など、グラフェンや他の2次元材料では実現しえない高次機能材料の開発に成功した。

#### 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計18件)

- 1) B-W. Li, M. Osada, Y. Ebina, S. Ueda, T. Sasaki: “Coexistence of Magnetic Order and Ferroelectricity at 2D Nanosheet Interfaces”, *J. Am. Chem. Soc.* 印刷中 (2016) [査読有].
- 2) J. Kimura, I. Takuwa, M. Matsushima, T. Shimizu, H. Uchida, T. Kiguchi, T. Shiraishi, T. J. Konno, T. Shibata, M. Osada, T. Sasaki, H. Funakubo: “Thermally Stable Dielectric Responses in Uniaxially (001)-Oriented  $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  Nanofilms Grown on a  $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$  Nanosheet Seed Layer”, *Scientific Reports* **6**, 20713 (2016) [査読有].
- 3) H-J. Kim, M. Osada, Y. Ebina, W. Sugimoto, K. Tsukagoshi, T. Sasaki: “Hunting for Monolayer Oxide Nanosheets and Their Architectures”, *Scientific Reports* **6**, 19402-1 (2016) [査読有].
- 4) 長田 実, 佐々木高義: “2次元ナノクリスタルの現状と将来展望”, セラミックス, **51**, 230-233 (2016) [査読有].
- 5) Y-S. Kim, M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata, T. Aida: “Thermoresponsive Actuation Enabled by Permittivity Switching in an Electrostatically Anisotropic Hydrogel”, *Nature Mater.*, **14**, 1002-1007 (2015) [査読有].
- 6) Y-H. Kim, L. Dong, M. Osada, B-W. Li, Y. Ebina, T. Sasaki: “Artificial Design for New Ferroelectrics Using Nanosheet-Architectonics Concept”, *Nanotechnology*, **26**, 244001-1-6 (2015) [査読有].
- 7) Y-H. Kim, M. Osada, L. Dong, H-J. Kim, T. Sasaki: “High-Temperature Dielectric Responses of Molecularly-thin Titania Nanosheet”, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **123**, 335-339 (2015) [査読有].
- 8) S-S. Kim, T. V. Khai, V. Kulish, Y-H. Kim, H-G. Na, A. Katoch, M. Osada, P. Wu, H-W. Kim: “Tunable Bandgap Narrowing Induced by Controlled Molecular Thickness in 2D Mica Nanosheets”, *Chem. Mater.*, **27**, 4222-4228 (2015) [査読有].
- 9) M. Osada, T. Sasaki: “Nanosheet Architectonics: A Hierarchically Structured Assembly for Tailored Fusion Materials”, *Polym. J.*, **47**, 89-98 (2015) [査読有].
- 10) 長田 実, 佐々木高義: セラミックス系ナノシートのエネギー材料応用への期待, セラミックス, **50**, 861-863 (2015) [査読有].
- 11) B. W. Li, M. Osada, Y. Ebina, K. Akatsuka, K. Fukuda, T. Sasaki: “High Thermal Robustness of Molecularly Thin Perovskite Nanosheets and Implications for Superior Dielectric Properties”, *ACS Nano*, **8**, 5449-5461 (2014) [査読有].

- 12) C. Wang, M. Osada, Y. Ebina, B. W. Li, K. Akatsuka, K. Fukuda, W. Sugimoto, R. Ma, T. Sasaki: "All-Nanosheet Ultrathin Capacitors Assembled Layer-by-Layer via Solution-Based Processes", *ACS Nano*, **8**, 2658-2666 (2014) [査読有].
- 13) Y. H. Kim, H. J. Kim, M. Osada, B. W. Li, Y. Ebina, T. Sasaki: "2D Perovskite Nanosheets with Thermally-Stable High- $\kappa$  Response: A New Platform for High-Temperature Capacitors", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 19510-19514 (2014) [査読有].
- 14) M. Osada, S. Yoguchi, I. Masayuki, B. Li, Y. Ebina, Katsutoshi Fukuda, Y. Kotani, K. Ono, S. Ueda, T. Sasaki: "Controlled Doping of Semiconducting Titania Nanosheets for Tailored Spinelectronic Materials", *Nanoscale* **6**, 14227-14236 (2014) [査読有].
- 15) 長田 実, 佐々木高義, "ナノシートコーティング法", *溶接学会誌*, **83**, 13-17 (2014) [査読有].
- 16) W. Li, S-L. Li, K. Komatsu, A. Aparecido-Ferreira, Y-F. Lin, Y. Xu, M. Osada, T. Sasaki, K. Tsukagoshi: Realization of Graphene Field-Effect Transistor with High- $k$   $\text{HfCa}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$  Nanoflake as Top-Gate Dielectric, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 023113 (2013) [査読有].
- 17) C. Jung, T. Ohnishi, M. Osada, K. Takada, T. Sasaki, "Oriented Film Growth of  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  Dielectrics on Glass Substrates Using 2D Nanosheet Seed Layer", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 4592-4596 (2013) [査読有].
- 18) 長田 実, 佐々木高義, "酸化物ナノシートが拓くポストグラフェン技術", *化学と工業*, **66**, 903-905 (2013) [査読有].
- [学会発表](計 68 件)
- 1) M. Osada: "Atomic LEGO Games with 2D Oxide Nanosheets", E-MRS, フランス・リール (2016.05).
- 2) M. Osada: "High-Temperature Dielectric Materials from Atomically-Thin Perovskites", CICMT 2016, 米国・デンバー (2016.04).
- 3) 長田 実: "酸化物ナノシートが拓く新しい電子材料技術", 日本電子材料技術協会セミナー2016, 東京 (2016.02).
- 4) M. Osada: "Novel 2D Materials from Layered Oxides", 2<sup>nd</sup> International Conference on 2D Layered Materials, 香港 (2016.01).
- 5) M. Osada: "Hierarchically Structured Assembly of Inorganic Nanosheets for Tailored Fusion Materials", Pacfichem 2015, 米国・ホノルル (2015.12).
- 6) M. Osada: "2D Nanosheet Architectonic for Tailored Electronics", Pacfichem 2015, 米国・ホノルル (2015.12).
- 7) M. Osada: "2D Oxide Nanosheets: Emerging Non-Graphene Materials", 第25回日本MRS年次大会, 横浜 (2015.12).
- 8) 長田 実: "酸化物と金属の接合", 第112回マイクロ接合研究委員会, 東京 (2015.11).
- 9) M. Osada: "2D Oxide Nanosheets and Nanosheet-Based Electronics", IUMRS-ICAM 2015, 韓国・済州島 (2015.10).
- 10) 長田 実: "ナノシート: 原子膜技術が拓く新しい電子材料技術", 第5回CSJ化学フェスタ, 東京 (2015.10).
- 11) 長田 実: "セラミックスナノクリスタルがつくる新しい誘電体技術", 日本セラミックス協会第28回秋季シンポジウム, 富山 (2015.09).
- 12) 長田 実: "酸化物ナノシートの異常熱安定性とその応用", 日本セラミックス協会第28回秋季シンポジウム, 富山 (2015.09).
- 13) 長田 実: "強磁性ナノシートと金ナノ粒子のハイブリッド集積と磁性プラズモン応用", 日本セラミックス協会第28回秋季シンポジウム, 富山 (2015.09).
- 14) 長田 実: "2次元酸化物ナノシートのアーキテクニクスとその応用", 第76回応用物理学会 秋季学術講演会, 名古屋 (2015.09).
- 15) M. Osada: "Solution-Based Room Temperature Ceramic Coating Using Nanosheet Deposition", PacRim 11, 韓国・済州島 (2015.08).
- 16) M. Osada: "Molecularly Thin Film Electronics Based on Oxide Nanosheets", PacRim 11, 韓国・済州島 (2015.08).
- 17) M. Osada: "2D Oxide Nanosheets: A New Platform for Ceramic Nanocoating", 11<sup>th</sup> CMCEE, カナダ・バンクーバー (2015.06).
- 18) M. Osada: "Hierarchically Structured Assembly of 2D Nanosheets for Tailored Electronic Materials", ICCCI 2015, 倉敷 (2015.06).
- 19) M. Osada: "2D Oxide Nanosheets and Heterostructures", TCECM 2016, 台湾・宜蘭 (2015.05).
- 20) 長田 実: "酸化物ナノシートをベースとした分子膜技術とその応用", 新化学技術協会 新素材分科会講演会, 東京 (2015.04).
- 21) M. Osada: "2D Oxide Nanosheets: New Solution to Nanoelectronics", 2015 MRS Spring Meeting & Exhibit, 米国・サンフランシスコ (2015.04).
- 22) 長田 実: "2次元酸化物ナノシートのメタモルフォロジ" 応用物理学会春季学術講演会, 平塚 (2015.03).

- 23) M. Osada: “2D Oxide Nanosheet: A New Platform for High-Temperature Capacitors”, EMN Ceramic Meeting 2015, 米国・オーランド (2015.01).
- 24) M. Osada: “Nanocrystal Technology towards Future Energy Materials”, International Symposium on Nano Energy Materials 2014, 中国・重慶, (2014.12).
- 25) M. Osada: “LEGO Games with Nanocrystals”, Visual-JW 2014, 大阪 (2014.11).
- 26) M. Osada: “Atomic LEGO Games with 2D Nanocrystals”, Ewha Chemistry and Nanoscience International Symposium 2014, 韓国・ソウル (2014.11).
- 27) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets”, Indo-Japan Program on Graphene and Related Materials, インド・バンガロール (2014.11).
- 28) M. Osada: “2D Oxide Nanosheet from Layered Ceramics”, 9th Asian Meeting on Electroceramics, 中国・上海 (2014.10).
- 29) 長田 実: ナノの積木細工でつくる未来材料, 第4回CSJ化学フェスタ, 東京 (2014.10).
- 30) M. Osada: “2D Atomic Layers from Layered Ceramics”, Advanced Ceramics and Application III, セルビア・ベオグラード (2014.09).
- 31) 長田 実: “酸化物ナノシートでつくる新しいハイブリッド材料”, 日本セラミックス協会第27回秋季シンポジウム, 鹿児島 (2014.09).
- 32) M. Osada: “LEGO-Like Game with 2D Oxide Nanosheets for Tailored Electronic and Energy Devices”, ICNM 2014, モーリシャス (2014.08).
- 33) M. Osada: “Solution-Based Ceramic Coating Using Nanosheet Deposition Technique”, 15<sup>th</sup> IUMRS-ICA, 福岡 (2014.08).
- 34) M. Osada: “Molecular Thin Film Technology Based on 2D Oxide Nanosheets”, CIMTEC 2014, イタリア・モンテカティーニテルメ (2014.06).
- 35) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets”, Materials Science and Engineering Seminar, Inha University, 韓国・仁川 (2014.05).
- 36) 長田 実: “酸化物ナノシートを利用した誘電キャパシタ技術”, 電気化学会第81回大会, 大阪 (2014.03).
- 37) M. Osada: “Solution-Based Assembly of Oxide Nanosheets”, Advanced Nanocrystals & Processing towards Low Carbon Society, 大阪 (2014.03).
- 38) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets and Devices”, Trend in Nanotechnology Japan 2014, 東京 (2014.01).
- 39) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets: Moving Post Graphene Technology”, 5<sup>th</sup> PCGMR/NCKU Symposium on Nanotechnology and Nanomaterials, 台湾・台南 (2013.12).
- 40) 長田 実: “テラロードエレクトロニクスを目指した2次元酸化物ナノシートの精密集積”, 第23回日本MRS年次大会, 横浜 (2013.12).
- 41) M. Osada: “New Functional Nanosheets from Layered Ceramics”, 第30回日韓国際セラミックスセミナー, 北九州 (2013.11).
- 42) M. Osada: “2D Nanomaterials: To Graphene and Beyond”, International Workshop on Nanoporous and Nanostructured Materials, フランス・モンペリエ (2013.09).
- 43) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets: New Solution to Nanoelectronics”, 5th Intl. Conf. on Recent Progress in Graphene Research, 東京 (2013.09).
- 44) M. Osada: “2D Oxide Nanosheets”, SAS-IVF-JST Workshop, スロバキア・スモレンス (2013.07).
- 45) M. Osada: “Smart High-k Dielectrics”, CCMR 2013, 韓国・済州島 (2013.06).
- 46) M. Osada: “2D Nanosheets from Layered Ceramics: To Graphene and Beyond”, PacRim 10, 米国・サンディエゴ (2013.06).
- 47) M. Osada: “Unit-Cell-Level Assembly of Artificial Perovskite Superlattices”, PacRim 10, 米国・サンディエゴ (2013.06).
- 48) M. Osada: “2D Oxide Materials beyond Graphene”, 9th International Nanotechnology Conference (INC 9), ドイツ・ベルリン (2013.05).
- 他、20件
- 〔図書〕(計1件)
- 1) 佐々木高義, 長田 実: “ナノシートで作る新しい空間材料”, ナノ空間材料ハンドブック, 402-410 (2016).
- 〔産業財産権〕
- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)
- 〔その他〕
- ホームページ等
- [http://samurai.nims.go.jp/OSADA\\_Minoru-j.html](http://samurai.nims.go.jp/OSADA_Minoru-j.html)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
- 長田 実 (OSADA, Minoru)
- 物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・准主任研究者
- 研究者番号: 10312258