

令和 6 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01614

研究課題名（和文）触媒ナノ界面の3次元原子電場構造解析

研究課題名（英文）Three dimensional electric-field imaging at catalytic-interface

研究代表者

石川 亮（Ishikawa, Ryo）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任准教授

研究者番号：20734156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、TiO₂(110)基板に担持した白金ナノ粒子の高温における劣化機構を明らかにするため、白金ナノ粒子の3次元構造および原子ダイナミクスの解析を行った。独自に開発を行った高速電子顕微鏡法を用いることにより、40ミリ秒の時間分解能でTiO₂基板上的白金3量体を追跡した。第一原理計算との併用により、投影2次元像から白金3量体の3次元構造再生に成功した。得られた3次元構造から、白金3量体は正三角形を保持しつつ、3次元回転と並進によりTiO₂基板上を運動することが分かった。また、白金はチタンを避け、酸素との結合・切断を繰り返しながら選択的な経路を運動していることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の走査透過型電子顕微鏡では、高い空間分解能を有するものの、時間分解能に大きな制約が課されていた。また、2次元投影像しか得られないため、3次元の原子構造を取得することは極めて困難であった。本研究では、比較的な単純な構造を有するナノ粒子に着目し、事前知識に基づいた3次元構造の再生を行った。第一原理計算を併用することにより、白金3量体の原子ダイナミクスの追跡に成功した。本研究によって確立した研究手法を拡張・展開することで、3次元構造の時間発展を追跡する新たな分野の開拓が期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigate the mechanisms underlying the high-temperature degradation of platinum nanoparticles supported on TiO₂(110) substrates. We analyzed both the 3D structure and the atomic dynamics of the platinum nanoparticles. Employing our high-speed electron microscopy, we were able to track platinum trimer on the TiO₂ substrate with a temporal resolution of 40 milliseconds. Through synergistic use of first-principles calculations, we successfully reconstructed the 3D structures of these platinum trimers from their projected 2D images. We elucidated that the platinum trimers maintain an equilateral triangular shape while they move across the TiO₂ substrate through 3D rotations and translations. Furthermore, our results revealed that the platinum preferentially migrates along selective pathways, repeatedly forming and breaking bonds with oxygen while avoiding direct interactions with titanium atoms.

研究分野：材料科学

キーワード：原子分解能電子顕微鏡法 3次元構造解析 原子ダイナミクス 不均一触媒 貴金属ナノ粒子 TiO₂

1. 研究開始当初の背景

金属酸化物に代表される半導体・絶縁体基板に担持した貴金属ナノ粒子は、排ガスの被毒化や選択的化学反应を促進する不均一触媒として広く用いられている。高温領域において高い触媒活性を示すことが知られているものの、同時に粒成長も促進されるため、時間とともに活性の低下や極端な劣化が大きな課題となっている。これらの触媒の発現・劣化機構については、未だに議論が行われており、統一的な見解には至っていない。これは、触媒ナノ界面の原子・電子構造の直接観察が欠如しているからである。また、触媒が利用される高温では、ナノ粒子は絶えず運動しており、原子ダイナミクスを追跡することにより、触媒活性点や劣化機構の解明に役立つと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、TiO₂ 基板と白金ナノ粒子の間に形成されるナノ界面の原子・電子構造および3次元構造解析を行うことにより、触媒発現や劣化機構を考察する。また、ナノ粒子の原子ダイナミクスを追跡し、白金ナノ粒子の高温における原子レベルの挙動を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

原子レベルで平坦なTiO₂(110)を基板とし、超高真空中で担持した白金ナノ粒子を触媒系とした。劣化機構の初期状態を明らかにするため、低温領域 (<250°C) に試料を電子顕微鏡中で加熱し、原子分解能を有する電子顕微鏡 (STEM) により観察を行った。また、動的観察を実現するため、独自に開発した高速電子顕微鏡法を用い、原子分解能を保持しつつ40 ミリ秒の時間分解能での観察を行った。さらに、得られた時間分解型STEM像の解析を行い、第一原理計算と融合し、40 ミリ秒の時間分解能での白金3量体(Pt₃)の3次元における動的挙動について明らかにした。高速電子顕微鏡法では、結像に利用できる電子線量が極めて少ないため、得られる原子分解能像の信号雑音比が低い。そこで、3次元データセットを活用し、TiO₂ 基板のコントラストを取り除き、白金3量体のコントラストを抽出する画像処理法についても検討を行った。

4. 研究成果

図1にTiO₂ 基板上に担持された白金3量体を含む領域を拡大した環状暗視野像を示す。従来は数秒程度の時間分解能しかなかったため、ナノ粒子の動的観察は困難であった。しかし、高速電子顕微鏡法の開発により、6.64秒間に166フレームの原子分解能像が取得でき、白金3量体の構造変化の追跡が可能であることが分かる。観察された原子ダイナミクスは電子線照射の影響も無視できないが、高温(250°C)に加熱していることが主な原因である。ここでは、時間方向に平均化した像(図1左上)を各フレームから引き去ることにより、TiO₂ 基板由来のコントラストを除去し、白金3量体の位置を明瞭化した。実験では2次元投影像しか得られないが、金属は稠密な構造が安定であることを仮定すると、白金3量体は正三角形が安定であると予想できる。この仮定に基づき、2次元像から3次元構造の再生を行った。得られた3次元構造は、第一原理計算との結果とも良い一致を示した。図2に再生した白金3量体の3次元構造の時間発展を示す。白金は酸素と結合を形成する傾向にあり、酸素との結合数が多いほどエネルギー的に安定であることが第一原理計算より明らかとなった。しかし、すべての配置について酸素と結合することは不可能であり、#0、#27のように白金単原子のみが基板の酸素と結合している場合も存在する。しかし、存続時間は80ミリ秒以下であり、準安定構造を経由しながら次の安定構造へと変化していく様子が原子レベルで初めて捉えられた。このような解析は、高い時間分解能と3次元構造再生を両立することで初めて可能となった。

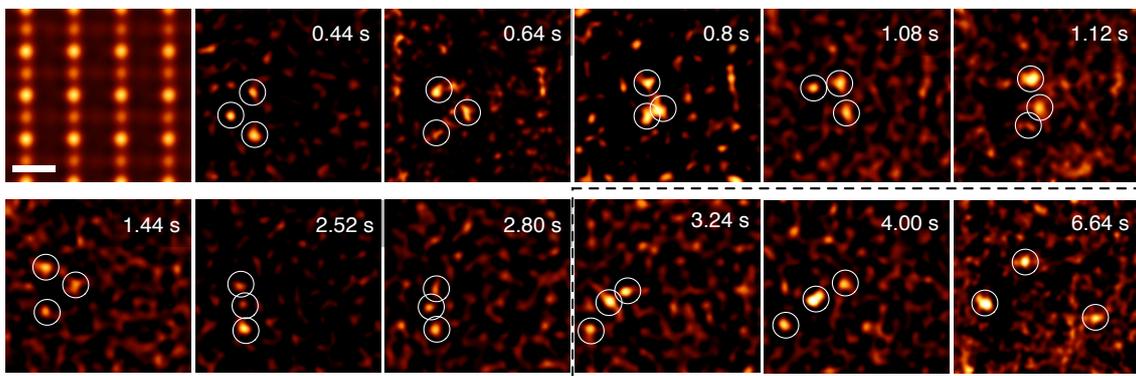


図1. (左上) 時間平均を行った TiO_2 基板の原子像. TiO_2 基板の原子像と代表的なフレームの差分像. 各フレームの右上に時間を示し, 白金の原子位置を白丸で示している. 3.24 秒から白金3量体が分解していく様子が捉えられた.

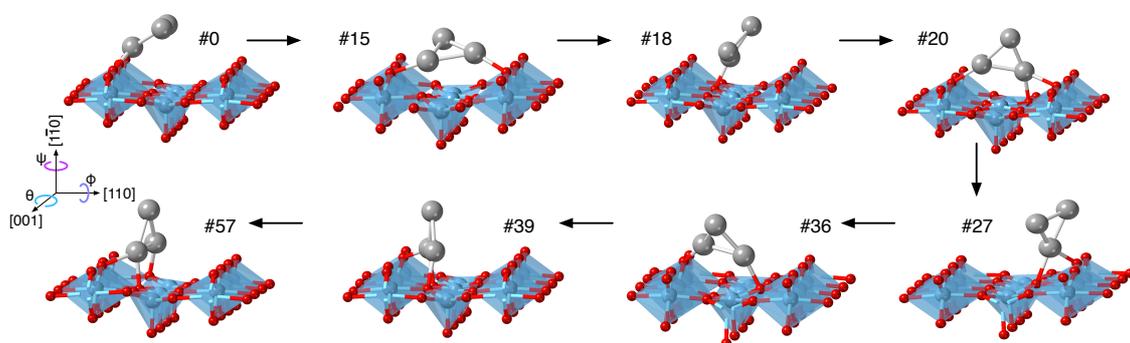


図2. 図1の実験データから再構成された白金3量体の3次元構造ダイナミクス.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Futazuka Toshihiro, Ishikawa Ryo, Shibata Naoya, Ikuhara Yuichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Grain boundary structural transformation induced by co-segregation of aliovalent dopants	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-32935-4	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 Y.H. Ikuhara X. Gao K. Kawahara C.A.J. Fisher A. Kuwabara R. Ishikawa H. Moriwake Y. Ikuhara	4. 巻 14
2. 論文標題 Atomic-Level Changes during Electrochemical Cycling of Oriented LiMn2O4Cathodic Thin Films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials and Interfaces	6. 最初と最後の頁 6507-6517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscami.1c18630	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 Ishikawa Ryo, Morishita Shigeyuki, Tanigaki Toshiaki, Shibata Naoya, Ikuhara Yuichi	4. 巻 72
2. 論文標題 Spatial and phase resolution in electron microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 78-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfac045	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 Ishikawa Ryo, Shibata Naoya, Oba Fumiyasu, Taniguchi Takashi, Ikuhara Yuichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Single atom microscopy in wide bandgap nitrides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Ceramic Technology	6. 最初と最後の頁 166 ~ 173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ijac.14134	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 R. Ishikawa T. Tanigaki Y. Fukuda	4. 巻 72
2. 論文標題 Resolution does matter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfad010	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 R. Ishikawa Y. Ueno Y. Ikuhara N. Shibata	4. 巻 22
2. 論文標題 Direct Observation of Atomistic Reaction Process between Pt Nanoparticles and TiO ₂ (110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4161-4167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c00929	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. Kawahara R. Ishikawa S. Sasano N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 71
2. 論文標題 Atomic-resolution STEM image denoising by total variation regularization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 302-310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfac032	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 S. Sasano R. Ishikawa K. Kawahara A. Mineshige N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 557
2. 論文標題 Formation of La-rich tysonite nano-precipitates in fluorite Ba _{0.6} La _{0.4} F _{2.4}	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Power Sources	6. 最初と最後の頁 232581
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpowsour.2022.232581	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. Han R. Zhu X. Li M. Wu R. Ishikawa B. Feng X. Bai Y. Ikuhara P. Gao	4. 巻 126
2. 論文標題 Two-Dimensional Room-Temperature Giant Antiferrodistortive SrTiO ₃ at a Grain Boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 225702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.225702	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 R. Ishikawa R. Tanaka K. Kawahara N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 15
2. 論文標題 Atomic-Resolution Topographic Imaging of Crystal Surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 9186-9193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.1c02907	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 R. Ishikawa R. Tanaka S. Morishita Y. Kohno H. Sawada T. Sasaki M. Ichikawa M. Hasegawa N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 222
2. 論文標題 Automated geometric aberration correction for large-angle illumination STEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ultramicroscopy	6. 最初と最後の頁 113215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultramic.2021.113215	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. Kawahara R. Ishikawa K. Nakayama N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 483
2. 論文標題 Room temperature fluoride ion conductivity in defective $\text{La}_{1-x}\text{KSb}_x\text{F}_{4-3x}$ polycrystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Power Sources	6. 最初と最後の頁 229173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpowsour.2020.229173	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 S. Sasano R. Ishikawa G. Sanchez-Santolino H. Ohta N. Shibata Y. Ikuhara	4. 巻 21
2. 論文標題 Atomistic origin of Li-ion conductivity reduction at (Li ₃ xLa ₂ /3)TiO ₃ grain boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6282-6288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c02174	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 G. Schusteritsch R. Ishikawa A.R. ElmasImane K. Inoue K.P. McKenna Y. Ikuhara C.J. Pickard	4. 巻 21
2. 論文標題 Anatase-like Grain Boundary Structure in Rutile Titanium Dioxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2745-2751
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c04564	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 Wei Jiake, Feng Bin, Ishikawa Ryo, Yokoi Tatsuya, Matsunaga Katsuyuki, Shibata Naoya, Ikuhara Yuichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Direct imaging of atomistic grain boundary migration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 951 ~ 955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-020-00879-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 -

1. 著者名 H. Yamahara B. Feng M. Seki M. Adachi M. Sarker T. Takeda M. Kobayashi R. Ishikawa Y. Ikuhara Y. Cho H. Tabata	4. 巻 2
2. 論文標題 Flexoelectric nanodomains in rare-earth iron garnet thin films under strain gradient	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Materials2021	6. 最初と最後の頁 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00199-y	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 Q. Zheng T. Feng J.A. Hachtel R. Ishikawa Y. Cheng L. Daemen J. Xing J.C. Idrobo J. Yan N. Shibata Y. Ikuhara B.C. Sales S.T. Pantelides M. Chi	4. 巻 7
2. 論文標題 Direct visualization of anionic electrons in an electride reveals inhomogeneities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabe6819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abe6819	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

[学会発表] 計30件(うち招待講演 13件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 今田 隆浩 石川 亮 川原 一晃 佐々野 駿 幾原 雄一 柴田 直哉
2. 発表標題 深さ断層法によるSrTiO ₃ 傾角粒界の3次元構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今田 隆浩 石川 亮 川原 一晃 佐々野 駿 幾原 雄一 柴田 直哉
2. 発表標題 深さ断層法によるSrTiO ₃ 傾角粒界の3次元表面構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第65回シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々野 駿 石川 亮 川原 一晃 嶺重, 温 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 Ba _{0.6} La _{0.4} F _{2.4} 固体電解質における微細構造解析および化学分析
3. 学会等名 第63回電池討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々野 駿 石川 亮 川原, 一晃 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 フッ化物イオン電池用正極材料LaCu5の充放電特性およびフッ化・脱フッ化機構
3. 学会等名 公益社団法人日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原 一晃 石川 亮 佐々野 駿 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 Total variation正則化を用いた原子分解能STEM像のノイズ除去
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原 一晃 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 Cs添加KSbF4のフッ化物イオン伝導
3. 学会等名 第63回 電池討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 亮
2. 発表標題 第171回総会および講演会
3. 学会等名 セラミックス材料解析に向けた先端電子顕微鏡法の開発（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 亮
2. 発表標題 情報計測オンラインセミナー
3. 学会等名 深さ断層法による原子分解能3次元計測（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 深さ断層法による3次元電子顕微鏡の開発と応用
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第65回シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 亮 神保 雄 寺尾 光央 西川 雅史 上野 裕次郎 森下 茂幸 向井 雅貴 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 TVレート原子分解能STEM法の開発と原子ダイナミクス
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 亮
2. 発表標題 Towards three-dimensional atom-by-atom imaging by STEM depth sectioning
3. 学会等名 学際的顕微研究領域 若手研究部会 2022年度シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ishikawa
2. 発表標題 Toward three-dimensional and dynamic observations by atomic-resolution STEM
3. 学会等名 RIKEN Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ishikawa
2. 発表標題 Towards three-dimensional atom-by-atom imaging by STEM depth sectioning
3. 学会等名 NUS Dept. Materials Science and Engineering Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ishikawa N. Shibata Y. Ikuhara
2. 発表標題 Three-dimensional imaging by large-angle illumination STEM
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ishikawa N. Shibata Y. Ikuhara
2. 発表標題 For the development of dynamic observation in atomic-resolution STEM
3. 学会等名 2nd International Conference on Materials for Humanity (MH22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kawahara R. Ishikawa N. Shibata Y. Ikuhara
2. 発表標題 Fluoride ion conductivity of Cs-doped KSbF4
3. 学会等名 23rd International Conference on Solid State Ionics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sasano R. Ishikawa K. Kawahara A. Mineshige N. Shibata Y. Ikuhara
2. 発表標題 Nano-scale two-phase separation in Ba _{0.6} La _{0.4} F _{2.4} solid-state electrolyte
3. 学会等名 23rd International Conference on Solid State Ionics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Toshihiro R. Ishikawa N. Shibata Y. Ikuhara
2. 発表標題 Co-Segregation of Aliovalent Dopants at α -Al ₂ O ₃ 13 Grain Boundary
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ishikawa Ryo Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Three Dimensional Imaging by STEM depth sectionig
3. 学会等名 The Sixth Conference on Frontiers of Aberration Corrected Electron Microscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ishikawa Ryo Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Three-dimensional and dynamic STEM imaging at atomic resolution
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawahara Kazuaki Ishikawa Ryo Nakayama Kei Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Fluoride ion conductivity of potassium tetrafluoroantimonate (KSbF4)
3. 学会等名 The 14th Pacific Rim Conference of Ceramic and Glass Technology（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川原 一晃 石川 亮 仲山 啓 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 KSbF4のフッ化物イオン伝導
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川原 一晃 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 Rb添加KSbF4(K1-xRbxSbF4)のフッ化物イオン伝導
3. 学会等名 第62回 電池討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawahara Kazuaki Ishikawa Ryo Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Rb添加KSbF4のフッ化物イオン伝導
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第34回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川原 一晃 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 Cs添加KSbF4(K1-xCsxSbF4)のフッ化物イオン伝導
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sasano Shun Ishikawa Ryo Ohta Hiromichi Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Li-ion conductivities, atomic and electronic structures of (Li ₃ xLa _{2/3-x})TiO ₃ tilt grain boundaries
3. 学会等名 14th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Futazuka Toshihiro Ishikawa Ryo Shibata Naoya Ikuhara Yuichi
2. 発表標題 Co-segregation mechanism of Ca/Si on 13 grain boundary in -Al ₂ O ₃
3. 学会等名 14th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二塚 俊洋 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 -Al2O3 13粒界におけるCa/Si偏析機構の解明
3. 学会等名 日本金属学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 亮
2. 発表標題 3次元電子顕微鏡法の開発と応用
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 学際的顕微研究領域若手研究部会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 亮 柴田 直哉 幾原 雄一
2. 発表標題 機能コアにおける3次元構造解析
3. 学会等名 日本金属学会 2021年秋期講演大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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