

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01880

研究課題名（和文）大気圧下での貴金属表面構造とその触媒活性の解明

研究課題名（英文）Study of surface structure and catalytic activity of noble metals under atmospheric pressure

研究代表者

白澤 徹郎（Shirasawa, Tetsuro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：80451889

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）：大気圧酸素下で単結晶貴金属触媒表面上に形成する表面酸化物の構造を決定するとともに、そのCO酸化触媒活性との関係を明らかにすることを目的として、放射光X線分析および赤外分光を用いたガス触媒表面反応のその場観察システムを整備した。触媒表面の試料として、Pt子層で被覆したPd(111)表面を用い、表面X線回折法によりその表面構造を明らかにし、酸素還元活性との相関についての知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車排ガス規制が強化され続ける昨今、排ガス中の一酸化炭素等の有害物質を無害物質に変える触媒の高効率化への要望がさらに高まっている。これら排ガス触媒に用いられる白金やパラジウムなどの貴金属の使用量削減のためにも、触媒反応を理解した上での合理的な触媒デザインが重要である。本研究では、大気圧酸素下で貴金属触媒表面上に形成する表面酸化物の構造と、その触媒活性との関係を明らかにすることを目的とした。大気圧下でのその場観察が可能な、放射光X線散乱法および吸収分光法や、赤外吸収分光法の計測システムを整備し、白金でコートしたパラジウム表面の構造を決定し、酸素還元活性との相関に関する知見の獲得に成功した。

研究成果の概要（英文）：In order to determine the structure of surface oxides formed on a single-crystal noble metal catalyst surface under atmospheric pressure and to clarify the relationship between the surface structures and their catalytic activity for CO oxidation, we have developed an in-situ observation system for the surface reactions using synchrotron radiation and infrared spectroscopy. The Pd(111) surface coated with a Pt coating layer was used as the catalyst surface sample, and the surface structure was determined by surface X-ray diffraction. We found a correlation between the surface structure and the oxygen reduction activity.

研究分野：表面科学

キーワード：表面科学 触媒 貴金属 放射光分析 赤外分光

## 1. 研究開始当初の背景

国内外で自動車排ガス規制が強化され続ける昨今、排ガス中の一酸化炭素(CO)等の有害物質を二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)等の無害物質に変える触媒の高効率化への要望がさらに高まっている。これら排ガス触媒に用いられる白金(Pt)やパラジウム(Pd)などの貴金属の使用量削減のためにも、触媒反応を十分に理解した上での合理的な触媒デザインが重要である。複雑な触媒反応機構の理解を進めるためには、反応の舞台である触媒表面の構造および電子状態や吸着分子の状態を原子・分子レベルで理解することが重要である。粒子状である実材料の表面現象を原子レベルで分析することは極めて難しいため、Ertl 博士等のノーベル化学賞(2007年)の業績に代表されるように、貴金属単結晶表面をモデル触媒に用いた触媒反応の素過程に関する基礎研究が古くから行われており、酸素やCO分子の吸着構造や、CO分子の酸化反応( $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ )に伴う表面構造の変化などが解明されてきた。実触媒が動作する大気圧環境は多くの表面分析法にとって過酷であるため、これら研究は超高真空をベースとした表面分析に留まっていたが、近年、この圧力ギャップを埋め、大気圧に近い環境下で表面分析するための技術開発が進められている。

研究開始当初は、準大気圧下で動作するX線光電子分光法(NAP-XPS)の普及に代表されるように、環境下での表面分析技術の開発が進み、主に準大気圧下での表面現象のその場観察が精力的に進められていた。しかし、NAP-XPSなどの電子を用いた表面分析法の圧力上限は現状で約0.1気圧であり、まだ実環境との隔りがあり、実触媒の反応機構を議論するに不十分な可能性が高い。事実、2017年に、Pt表面上において大気圧酸素下でのみ安定な表面Pt酸化物やナノPt酸化物が観察されるとともに、CO酸化活性の向上が示唆されるなど[Nat. Commun. 8, 429 (2017)]、大気圧下での表面現象の重要性を再認識させる事実が報告され始めていた。触媒反応の全容解明には、触媒表面の構造や、電子状態や、吸着分子の状態を、原子・分子スケールでかつ実時間で知る必要があるが、大気圧下での表面現象を統合的に調べた報告は極めて少ない状況であった[Chem. Soc. Rev. 46, 4347 (2017)]。

## 2. 研究の目的

大気圧酸素下で単結晶貴金属触媒表面上に形成する表面酸化物の構造を決定するとともに、そのCO酸化触媒活性との関係を明らかにすることを目的とした。大気圧下でのその場観察が可能な、放射光X線散乱法およびX線吸収分光法や、赤外吸収分光法を駆使して、反応条件下での触媒表面の大域的および局所的構造と、その価数状態や、吸着分子状態を明らかにして、反応過程の全容を明らかにし、触媒活性の向上に資する知見を獲得することを目的とした。

## 3. 研究の方法

実材料であるナノ粒子表面のほとんどが(111)面で終端されることを勘案して、単結晶(111)表面を研究対象とした。原子レベルで清浄な貴金属表面を準備し、圧力と温度を制御した反応条件下において表面構造と触媒活性の同時計測を目指した。大域的な表面構造の観察には表面X線回折法を用い、静的な構造解析により触媒表面の原子配列構造を明らかにした後に、研究代表者等が開発を進めている高速測定法を用いて、表面酸化層などの原子配列構造の変化をその場追跡することを狙った。表面の触媒元素の局所構造及び価数状態の解析には、X線吸収微細構造(XAFS)法を用いた。これら放射光X線による分析を行うために、その場観察用フロー式小型反応室の製作を行った。また、吸着分子状態の分析のために、フーリエ赤外反射吸収分光装置を新たに整備した。さらに、これら放射光X線分析や赤外光による表面観察と同時に、触媒活性の変化をモニターするために、四重極質量分析計を用いた反応ガス(O<sub>2</sub>, CO)および反応生成ガス(CO<sub>2</sub>)の分圧測定を行うためのガスフロー/ガス分析システムを構築した。

## 4. 研究成果

### (1) その場観察システムの整備

その場観察用フロー式小型反応室の製作について、反応室内のガス置換時が媒反応を著しく律することが無いように、試料室の容量が極力小さく、かつ、超高真空の試料準備室と脱着可能にし、原子レベルで清浄な表面をその場観察できるように製作した。当初の予定では試料室の容量は15 mLを想定していたが、詳細な検討の結果、放射光X線分析に必要な試料の上下動機構と加熱機構を備えると、試料室の容15 mLを満たすことが極めて困難であることが判明したため、容量30 mLにて製作を行った。X線透過窓として用いるBe窓の接合部における度重なる真空リークの発生や、試料の上下駆動時のガスリークなどの問題が生じたが、到達真空度 $2 \times 10^{-8}$  Paと、0.5気圧での酸素ガスフローが可能なセルの製作に成功した。

触媒表面の吸着種をその場観察するためのフーリエ変換赤外分光光度システムの製作について、干渉計部分から赤外光を外部に取り出し、上述したフロー式小型反応室内の試料に照射して、放射光をMCT検出器にて高感度検出するシステムを製作した。触媒表面に吸着した酸素種やCO分子を察するために、測定波数域を中赤外域の4000 cm<sup>-1</sup>から400cm<sup>-1</sup>に設定した。また、パッ

クグラウンドとなる水蒸気や二酸化炭素の影響を小さくするために、試料室外 および検出器部分を真空排気できるようにした。標準試料として Pt 表面を用いて反射赤外スペクトルを測定し、表面吸着した水分子の検出に成功した。また、ガスフロー/ガス分析システム (図2) を新たに整備し、超高真空中での試料準備と、大気圧下でのその場表面分析と同時に、反応ガス ( $O_2$ ,  $CO$ ) および反応生成ガス ( $CO_2$ ) の分圧を測定することを可能にした。

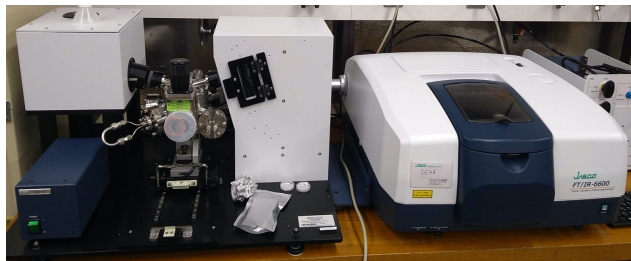


図1: 本課題で新たに製作したその場観察赤外反射吸収分光システム

(2) Pt 被覆 Pd(111) 表面の構造解明  
触媒表面の試料として、Pt 子層で被覆した Pd(111) 表面を用い、表面 X 線回折法によりその表面構造を明らかにした。Pd 表面を Pt 原子層で被覆することで、酸素の 2p 電子軌道と相互作用する Pd の d 電子軌道の位置が変化して酸素元反応活性が向上することが予測されていたが、その表面構造と酸素還元活性との関係は明らかにされていなかった。

超高真空下にて表面を原子レベルで清浄化した Pd(111) 表面に Pt を約 1, 2, 3, 4 原子層蒸着し、熱処理した試料について、上記の試料セルを用いて放射光表面 X 線回折により構造解析を行った。図3に、Pt を約 2 原子層被覆した Pd(111) 表面からの X 線 CTR (Crystal truncation rod) 散乱プロファイルを示す。

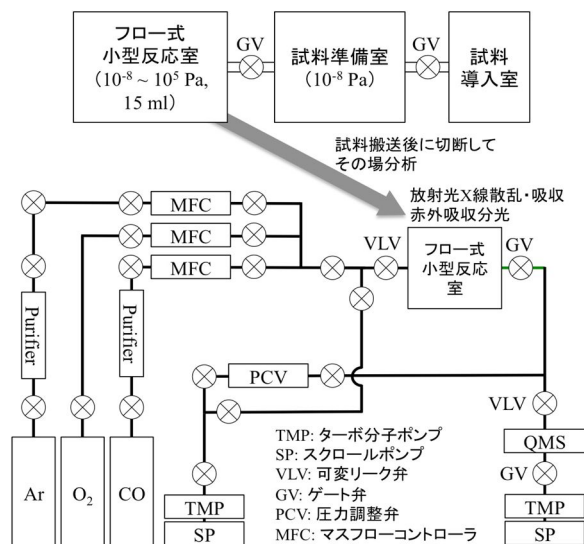


図2: 本課題で新たに製作したガスフロー/ガス分析システム

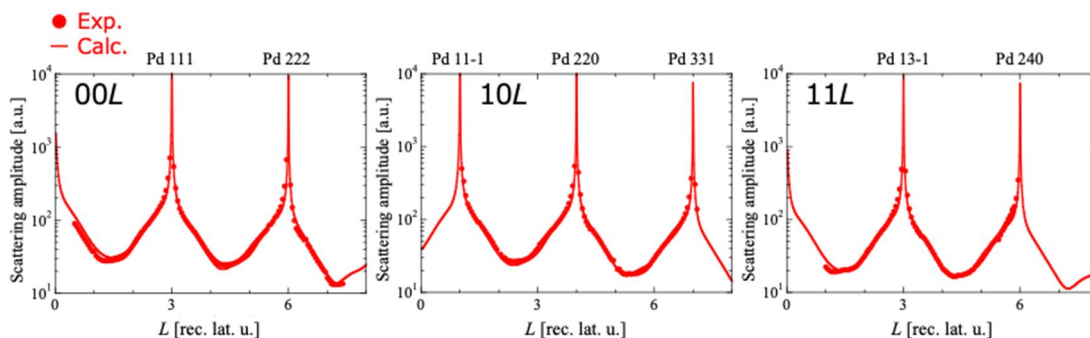


図3: Pt を約 2 原子層被覆した Pd(111) 表面の X 線 CTR 散乱プロファイル。

構造解析を行った結果、図4に示すとおり、各原子層における高さ位置および Pt/Pd の存在比が明らかになった。Pt 原子は Pd 表面を単純に被覆するだけでなく、内部に侵入するとともに Pd 原子を置換して結晶格子位置に収まっていることが分かった。Pt 原子の置換による面内方向の格子定数の変化は検出されず、面直方向に最大約 3% 格子伸長することが分かった。Pt 原子を約 1 原子層蒸着した試料については、Pd 最表面層は約 70% しか被覆されておらず、Pt 原子を約 2 原子層蒸着することではじめて Pd 最表面層が全て Pt 原子で被覆されることが分かった。Pt 原子を 3 原子層以上蒸着した試料においても、Pd 最表面層が全て Pt 原子で被覆されていたが、直下の原子層において Pt の被覆率が増加することが明らかになった。別途測定した酸素還元活性では、Pt を約 2 原子層蒸着したときに最大になることが認められており、それとの対応関係から、Pt 原子層が表面を覆い、かつ下層の Pd 原子存在比が多いときに、酸素還元活性が最大になることが示唆された。今後、電子状態計算との比較・検討により、d バンドの変化と表面構造との関連が明らかになると期待される。また、実触媒表面との関係を明らかにするために、Pt/Pd ナノ粒子 (粒子径約 5 nm) について XAFS 測定を行った。この結果、ナノ粒子表面は Pt で覆われており、単結晶モデル試料の表面構造と対応することが明らかになった。COVID-19 の影響により、十分な実験時間や放射光ビームタイムの確保が難しい状況にあったが、本研究で整備したその

場観察システムを用いた実験を引き続き進め、CO 酸化中における構造変化を明らかにして、反応機構の解明に資する知見を獲得する。

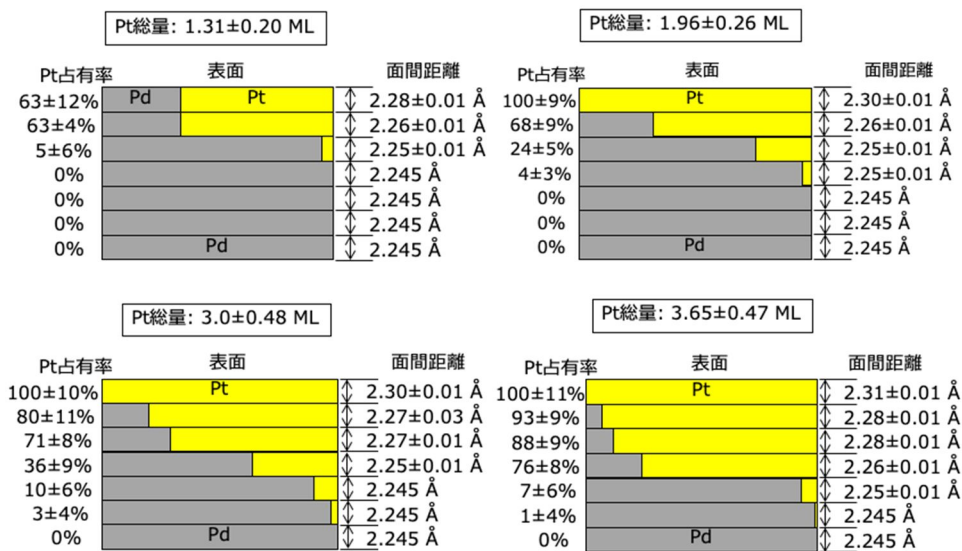


図 4: X 線 CTR 散乱の解析により明らかになった、Pt 原子層を被覆した Pd(111)表面の構造。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Kawasoko Hideyuki, Shirasawa Tetsuroh, Shiraki Susumu, Suzuki Toru, Kobayashi Shigeru, Nishio Kazunori, Shimizu Ryota, Hitosugi Taro                    | 4. 巻<br>3                     |
| 2. 論文標題<br>Low Interface Resistance in Solid-State Lithium Batteries Using Spinel LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>1.5</sub> O <sub>4</sub> (111) Epitaxial Thin Films | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Energy Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>1358 ~ 1363     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsaem.9b01766  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Yashiro Wataru, Shirasawa Tetsuroh, Kamezawa Chika, Voegeli Wolfgang, Arakawa Etsuo, Kajiwara Kentaro   | 4. 巻<br>59                    |
| 2. 論文標題<br>A multi-beam X-ray imaging detector using a branched optical fiber bundle  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>038003 ~ 038003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ab79fd   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Shirasawa Tetsuroh  | 4. 巻<br>17                    |
| 2. 論文標題<br>Real-time Observation of Interface Atomic Structures by an Energy-Dispersive Surface X-ray Diffraction   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>e-Journal of Surface Science and Nanotechnology   | 6. 最初と最後の頁<br>155 ~ 162       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1380/ejssnt.2019.155   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>白澤徹郎, Wolfgang Voegeli, 荒川悦雄, 高橋敏男, 増田卓也, 魚崎浩平  | 4. 巻<br>32                    |
| 2. 論文標題<br>波長分散型X線CTR散乱法による界面現象のその場追跡   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>放射光   | 6. 最初と最後の頁<br>292 ~ 299       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>白澤 徹郎                                    | 4. 巻<br>58              |
| 2. 論文標題<br>X線散乱法による先端薄膜材料評価の現状と課題                  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>計測と制御                                    | 6. 最初と最後の頁<br>717 ~ 724 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.11499/sicejl.58.717 | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Shiraki Susumu, Shirasawa Tetsuroh, Suzuki Tohru, Kawasoko Hideyuki, Shimizu Ryota, Hitosugi Taro                  | 4. 巻<br>10                  |
| 2. 論文標題<br>Atomically Well-Ordered Structure at Solid Electrolyte and Electrode Interface Reduces the Interfacial Resistance | 5. 発行年<br>2018年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Materials & Interfaces   | 6. 最初と最後の頁<br>41732 ~ 41737 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsami.8b08926   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Wada Ken, Shirasawa Tetsuroh, Mochizuki Izumi, Fujinami Masanori, Maekawa Masaki, Kawasuso Atsuo, Takahashi Toshio, Hyodo Toshio | 4. 巻<br>16              |
| 2. 論文標題<br>Observation of Low-Energy Positron Diffraction Patterns with a Linac-Based Slow-Positron Beam                                   | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>e-Journal of Surface Science and Nanotechnology  | 6. 最初と最後の頁<br>313 ~ 319 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1380/ejssnt.2018.313  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Wada Ken, Shirasawa Tetsuroh, Mochizuki Izumi, Fujinami Masanori, Takahashi Toshio, Maekawa Masaki, Kawasuso Atsuo, Kimura Masao, Hyodo Toshio | 4. 巻<br>7                  |
| 2. 論文標題<br>Progress report on construction of a low-energy positron diffraction (LEPD) experiment station at KEK   | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>JJAP Conference Proceedings  | 6. 最初と最後の頁<br>011301-1 ~ 6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7567/JJAPCP.7.011301  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Noguchi Ryo, Takahashi T., Kuroda K., Ochi M., Shirasawa T., Sakano M., Bareille C., Nakayama M., Watson M. D., Yaji K., Harasawa A., Iwasawa H., Dudin P., Kim T. K., Hoesch M., Kandyba V., Giampietri A., Barinov A., Shin S., Arita R., Sasagawa T., Kondo Takeshi | 4. 巻<br>566             |
| 2. 論文標題<br>A weak topological insulator state in quasi-one-dimensional bismuth iodide  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Nature   | 6. 最初と最後の頁<br>518 ~ 522 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41586-019-0927-7  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Shirasawa Tetsuroh, Yoshizawa Shunsuke, Takahashi Toshio, Uchihashi Takashi          | 4. 巻<br>99                 |
| 2. 論文標題<br>Structure determination of the Si(111)- $7\times 3$ -In atomic-layer superconductor | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>100502-1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.99.100502   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>白澤徹郎, Wolfgang Voegeli, 荒川悦雄, 高橋敏男, 松下 正 | 4. 巻<br>53              |
| 2. 論文標題<br>表面X線回折測定の高速度化と固液界面構造のその場追跡              | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>固体物理                                     | 6. 最初と最後の頁<br>525 ~ 530 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                     | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>白澤徹郎                           | 4. 巻<br>27            |
| 2. 論文標題<br>電池性能に関わる界面構造の変化を追跡するX線回折技術の開発 | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>クリーンエネルギー                      | 6. 最初と最後の頁<br>19 ~ 24 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし           | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa  |
| 2. 発表標題<br>Live observation of interface using energy-dispersive surface x-ray diffraction |
| 3. 学会等名<br>2019年日本表面真空学会学術講演会 International Joint Symposium (招待講演) (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                   |
| 2. 発表標題<br>表面X線回折による二次元物質の構造解明    |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                      |
| 2. 発表標題<br>波長分散型CTR散乱法による界面原子層のライブ観察 |
| 3. 学会等名<br>第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2020年                      |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                      |
| 2. 発表標題<br>はじめに：表面・界面でのエネルギー変換・輸送の科学 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会 (招待講演)     |
| 4. 発表年<br>2020年                      |



|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                  |
| 2. 発表標題<br>表面構造解析の現状と高速計算科学への期待  |
| 3. 学会等名<br>データ駆動科学と次世代計算科学（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2019年                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白澤 徹郎、Voegli Wolfgang、荒川悦雄、高橋敏男、松下正  |
| 2. 発表標題<br>Capturing Interface Structures by Fast Surface X-ray Diffraction Measurement         |
| 3. 学会等名<br>The 17th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces（国際学会） |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白澤 徹郎、白木将、西尾和記、清水亮太、一杉太郎   |
| 2. 発表標題<br>Atomic-scale structure analysis for designing low-resistance interfaces of solid-state battery |
| 3. 学会等名<br>The 40th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics（国際学会）                |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白澤 徹郎、Voegli Wolfgang、荒川悦雄、高橋敏男 |
| 2. 発表標題<br>波長分散型CTR散乱によるBi薄膜の特異な成長過程のライブ観察 |
| 3. 学会等名<br>第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム     |
| 4. 発表年<br>2020年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa、Wolfgang Voegeli、Etsuo Arakawa、Takuya Masuda、Toshio Takahashi、Kohei Uosaki、Tadashi Matsushita |
| 2. 発表標題<br>Real-Time Monitoring of Interface Processes by Wavelength Dispersive X-ray CTR Measurements                      |
| 3. 学会等名<br>The 15th International Surface X-ray and Neutron Scattering Conference (国際学会)                                    |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                                     |
| 2. 発表標題<br>X線CTR散乱法による界面の静的および動的構造解析                |
| 3. 学会等名<br>PF研究会「量子ビームと新規合成手法の融合による酸化物の新機能探索」(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa、Wolfgang Voegeli、Etsuo Arakawa、Takuya Masuda、Toshio Takahashi、Kohei Uosaki、Tadashi Matsushita |
| 2. 発表標題<br>Capturing interface processes at the atomic scale by high-speed surface X-ray diffraction                        |
| 3. 学会等名<br>The 9th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (国際学会)                                       |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa  |
| 2. 発表標題<br>Identification of the structure of In/Si(111)- $7\times 3$ surface  |
| 3. 学会等名<br>The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces & Cross-Strait Symposium on Solid Surfaces (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎、内橋隆、吉澤俊介、高橋敏男                         |
| 2. 発表標題<br>インジウム原子層超伝導体Si(111)- $7 \times 3$ -Inの構造決定 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2018年秋季大会                           |
| 4. 発表年<br>2018年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎、Wolfgang Voegeli, 溜池裕太、荒川悦雄、高橋敏男 |
| 2. 発表標題<br>波長分散型X線CTR散乱法によるBi超薄膜成長過程の原子レベル構造解析   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会                       |
| 4. 発表年<br>2018年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎、Wolfgang Voegeli, 溜池裕太、荒川悦雄、高橋敏男 |
| 2. 発表標題<br>X線CTR散乱迅速測定によるBi超薄膜成長過程の原子レベル追跡       |
| 3. 学会等名<br>2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会                |
| 4. 発表年<br>2018年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎、増田卓也、Wolfgang Voegeli, 荒川悦雄、高橋敏男、魚崎浩平、松下正 |
| 2. 発表標題<br>波長分散型表面X線回折による界面構造その場追跡                        |
| 3. 学会等名<br>第21回XAFS討論会                                    |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa、Wolfgang Voegeli、Etsuo Arakawa、Toshio Takahashi、Tadashi Matsushita   |
| 2. 発表標題<br>Atomic Scale Growth Process of Thin Films as Revealed by Fast Surface X-ray Diffraction |
| 3. 学会等名<br>AiMES 2018 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuroh Shirasawa   |
| 2. 発表標題<br>Energy dispersive surface x-ray diffraction for real-time monitoring of interface phenomena          |
| 3. 学会等名<br>2nd International Workshop on Phase Interfaces for Highly Efficient Energy Utilization (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>白澤徹郎                      |
| 2. 発表標題<br>表面X線回折法を用いた界面構造その場追跡      |
| 3. 学会等名<br>2018年電気化学会関東支部セミナー (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                      |

〔図書〕 計1件

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>白澤徹郎 (第6章第3節)          | 4. 発行年<br>2019年 |
| 2. 出版社<br>技術情報協会                 | 5. 総ページ数<br>522 |
| 3. 書名<br>リチウムイオン電池の分析、解析と評価技術事例集 |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                    | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 増田 卓也<br><br>(Masuda Takuya)<br><br>(20466460)               | 国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・グループリーダー<br><br><br>(82108) |    |
| 研究分担者 | Voegeli Wolfgang<br><br>(Voegeli Wolfgang)<br><br>(90624924) | 東京学芸大学・教育学部・准教授<br><br><br>(12604)                       |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |