

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26288005

研究課題名(和文) 硬X線XAFSイメージング分光による固体触媒ミクロ構造と反応性の可視化

研究課題名(英文) Hard X-ray XAFS Imaging for The Visualization of Heterogeneous Solid Catalysts

研究代表者

唯 美津木 (TADA, Mizuki)

名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授

研究者番号：70396810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：固体触媒の空間構造を可視化する手法として、X線吸収微細構造法とイメージング手法を組み合わせたイメージングXAFS法を立ち上げ、固体触媒材料の2次元/3次元XAFS構造解析を行った。極細X線ビームを用いた走査型顕微XAFS法により、自動車排ガス浄化に用いられるCe-Zr酸化物について、酸素吸蔵・放出過程における粒子内部のCe価数をイメージングすることに成功した。酸化物粒子内の酸素拡散の様子が可視化され、酸素吸蔵と放出過程で異なる反応様式で反応が進行することが分かった。また、結像型イメージングXAFS法やCT-XAFS法を立ち上げ、樹状型酸化鉄結晶の相転移過程や電極触媒の3次元分布を可視化した。

研究成果の概要(英文)：XAFS imaging techniques combining X-ray absorption fine structure and imaging techniques have been developed to visualize the spatial structures of heterogeneous catalysts. Scanning nano-XAFS using focused X-ray nanobeam was applied to Ce-Zr mixed oxide solid-solution particles for automobile exhausting processes. The distribution of Ce oxidation states in the Ce-Zr mixed oxide particles was imaged for their oxygen storage and release processes, showing different reaction modes for the oxygen storage and release processes. We also developed imaging XAFS using a zone plate and CT-XAFS and applied them to visualize the phase transitions of iron oxide crystals and the distribution of electrocatalysts.

研究分野：無機化学

キーワード：固体触媒 XAFS 可視化 イメージング 不均質性 顕微分光

1. 研究開始当初の背景

化成品合成、燃料電池発電など、様々な物質変換・エネルギー変換に汎用されている不均一系固体触媒は、その構造に基づく優れた触媒特性を示す物質群である。酸化物をはじめとした固体触媒材料の多くは、高温での安定性、高い触媒活性を示し、その構造と触媒性能の相関が研究されている。しかしながら、固体材料は様々な空間スケールで不均質性を内在する材料であり、固体触媒における触媒活性種の空間分布、組成、その電子状態や配位構造などの局所構造の違い、ドメイン構造などを直接明らかにすることは様々な分光法が発展した今日においても依然として難しい課題である。これらの構造パラメータは、固体触媒材料の不均質性を表すだけでなく、その反応様式や特性の違いにも影響しており、その解明は触媒反応特性の理解においても重要である。

典型的な固体触媒材料は、長周期の結晶構造を有さない材料であることが多く、X線結晶構造解析による構造解析はできない。結晶性の物質でなくても局所構造の解析が可能なX線吸収微細構造法(XAFS法)が固体触媒材料の局所構造解析には汎用されているが、一般的なXAFS測定では、mmサイズのX線ビームを用いた測定がなされており、照射ビーム径に含まれる試料の平均構造情報が得られる。このため、 μm ~ nm スケールの空間オーダーで、固体触媒材料の局所構造の空間分布を得るには、イメージング計測法とXAFS分光法を合わせたイメージングXAFS法が必要である。顕微鏡計測は、高い分解能で固体材料の構造情報が得られる手法の一つであるが、化学情報の欠如や測定環境の制限などの観点から、触媒反応が進行しているその場(in situ)における計測が困難である場合も多い。これに対し、硬X線XAFSは、硬X線の高い透過力を利用して、in situ環境における計測ができる観点からも、イメージングへの展開が求められていた。

これらの研究背景を踏まえ、本研究では高輝度放射光源を利用して、構造イメージング手法とXAFS分光法を組み合わせたイメージングXAFS計測法を確立し、固体触媒のin situイメージングXAFS計測を行うことを目的とした。非破壊のin situイメージングXAFS計測を通じて、固体触媒材料の不均質性、空間構造を明らかにすることで、触媒活性種の空間分布や反応様式を可視化することを目指した。

2. 研究の目的

本研究では、SPring-8の高輝度放射光源を利用して、X線集光ナノビームを用いた走査型顕微XAFS計測、ゾーンプレートを用いた結像型顕微XAFS計測、PC上で3次元像の

再構成計算を行うCT-XAFS計測等を立ち上げ、反応条件におけるin situイメージングXAFS計測を可能にすることを目的とした。更に、測定によって得られたイメージングXAFSデータの解析方法を立ち上げ、2次元、3次元の空間情報を可視化できる解析手法を整備することを目的とした。

測定対象には、自動車排ガス浄化の触媒である三元触媒系において極めて重要な役割を果たすCe-Zr酸化物固溶体材料や、酸化鉄触媒粒子を選定し、イメージングXAFS計測に適した測定試料の調製を確立した。これらの試料におけるイメージングXAFS解析結果を基に、固体触媒材料中の反応性の可視化を検討した。

3. 研究の方法

(1) In situ イメージング XAFS 法の開発

硬X線を用いたイメージングXAFS法として、(a) X線ナノビームを用いた走査型顕微XAFS、(b) 結像素子を用いた結像型顕微XAFS、(c) コンピューターによる再構成計算に基づくトモグラフィ-XAFS法、ラミノグラフィ-XAFS法などの測定法がある。本研究では、これらのイメージングXAFS計測法として、以下の開発・整備を行った。

(a)は、Kirk-Partick Baezミラーと呼ばれる楕円型の鏡面ミラーを集光素子として用い、極細のX線を作成し、それを試料に照射しながら、ピエゾステージ等に乗せた試料を2次元的に走査することによって、各点におけるXAFSスペクトルを得る手法である。比較的簡単な光学配置で2次元データが得られる反面、空間分解能はKBミラーで集光するX線のビーム径に依存し、現状では100 nmオーダーの空間分解能になる。本研究では、100 nmオーダーに集光した硬X線ビームを用い、試料のドリフトを低減しながら試料のスキャン幅を細かくとることによって、 μm サイズの酸化物粒子内部の元素の化学状態の2次元分布を可視化することを検討した。

(b)では、フレネルゾーンプレートを用いた結像型イメージングXAFS計測法を新たに立ち上げることを目指した。XAFS計測に必要なエネルギー範囲のスキャン時に生じるフレネルゾーンプレートの色収差を補正し、50 nmの空間分解能を有した2次元結像型イメージングXAFSデータの取得を検討した。また、そのデータ解析に必要な上下左右のズレ及び計測画像の拡大率を補正する画像レジストレーションプログラムを開発し、測定したイメージングデータのデータ処理方法を検討した。また、結像型イメージングXAFSを用いて、合成した樹状型酸化鉄結晶粒子における相転移・劣化過程における酸化鉄結晶相の空間分布の計

測・評価を行った。

(c)では、試料を3次元的に回転させながら、各回転角度で透過像を撮像し、一連の透過像群をPC上で再構成計算することによって、試料の3次元像を得るコンピュータトモグラフィ(CT)法とXAFS分光法を組み合わせたCT-XAFS法を立ち上げ、そのデータ解析プログラムを立ち上げた。

4. 研究成果

(1) 2次元走査型顕微XAFS法によるCe₂Zr₂O_x酸化物固溶体内の酸素吸蔵・放出過程の反応様式の可視化

自動車の排ガス浄化システムでは、NO_x等の還元と炭化水素、一酸化炭素などの酸化反応を同時に進行させることが必要であり、系中の酸素量の制御が極めて重要になっている。この鍵物質として、Ceのレドックスを利用した酸素吸蔵・放出能を有するCe系酸化物材料が担体材料として用いられており、その中でもCeとZrが規則配列したCe₂Zr₂O_x酸化物固溶体粒子は、バルク量論に近い酸素吸蔵・放出を起こすことが知られている。Pt, Pd等の金属微粒子を担持すると還元による酸素放出過程が促進されるが、酸素吸蔵・放出過程において、Ce₂Zr₂O_x粒子内部でどのようにCeの価数変化が進行し、バルク内部を酸素拡散が伝搬するのか、その詳細を空間的に明らかにした研究はなかった。

我々は、このCe₂Zr₂O_x酸化物固溶体粒子をSiN薄膜基板上に高分散担持させ、走査型顕微XAFSで検出できるミクロンサイズの市販Pt微粒子を分散担持させた試料を調製し、100 nmオーダーの集光X線ビームを用いた走査型顕微XAFS計測により、酸素吸蔵・放出過程におけるCe₂Zr₂O_x粒子内部のCe価数の空間分布を可視化することを検討した。100 μm毎にPtのグリッドを入れたSiN薄膜基板を用い、その表面にCe₂Zr₂O_x粒子とPt粒子を分散担持した。SEM観察から、薄膜基板上におけるCe₂Zr₂O_x粒子とPt粒子の位置を明らかにし、Pt粒子と接地しているCe₂Zr₂O_x粒子およびPt粒子と接地していないCe₂Zr₂O_x粒子を選定した。位置関係を明らかにした試料をin situ顕微XAFS測定用セルに封入し、内部を不活性ガスに置換してCe L_{III}端走査型顕微XAFS計測を行い、測定後、セル内部に必要な反応操作を行った後、同視野で顕微XAFS計測を行うことによって、同一粒子に対して、酸素吸蔵・放出過程におけるCeの価数変化の空間分布を取得した。

SPring-8のBL36XU, BL39XUビームラインにて、KBミラーを用いて409 (h)

×154 (v) nmに集光した硬X線ビーム(Ce L_{III}端エネルギー)を用い、in situ顕微XAFS測定セルに封入した薄膜基板担持試料の走査型顕微XAFS測定を行った。顕微XANESスペクトルの解析のためには、試料のドリフトを極力抑えることが必要であることが分かったため、チラーの循環冷却水温度を精密に制御することによって、試料ドリフトを抑制し、2次元走査測定を可能にした。

Ce L 蛍光X線とPt L 蛍光X線の2次元マッピングを取得し、Ce₂Zr₂O_x粒子とPt粒子の位置関係、それぞれの粒子形状をSEM像と比較したところ、いずれもSEMで観察された位置関係、粒子形状をイメージングできていることが分かり、X線ナノビームを用いた本顕微計測が十分な空間分解能とコントラストを有していることを確認した。次に、エネルギーを変化させ、Ce L_{III}端の吸収端前(5.7000 keV)、Ce³⁺に由来する吸収ピーク位置(5.7302 keV)、Ce⁴⁺に由来する吸収ピーク位置(5.7410 keV)、Ce³⁺, Ce⁴⁺の等吸収点(5.7697 keV)において、蛍光X線マッピングを取得したところ、いずれもCe L_{III}端のXANES強度と対応した明瞭な画像コントラストが得られ、試料の価数変化に応じた強度の変化も観察された。

そこで、Ce³⁺とCe⁴⁺のXANESピーク強度比が試料中に含まれるCe³⁺とCe⁴⁺の量の比と比例関係にあることを利用して、得られた2次元マッピング像からCe₂Zr₂O_x粒子中の各点におけるCe³⁺/Ce⁴⁺の存在比率を算出した。測定は、同一粒子に対し、423 Kで酸素吸蔵させた試料(酸素吸蔵は完結しない)、573 Kで酸素吸蔵させた試料(酸素吸蔵が完結)、423 Kで酸素放出させた試料(酸素放出は完結しない)、573 Kで酸素放出させた試料(酸素放出が完結)の4つに対して行い、1つの反応条件の顕微XAFS測定が終了後、XAFSセル内で粒子を反応させ、次の反応条件の試料の測定を実施した。得られた一連の顕微XAFS計測では、Ce₂Zr₂O_x粒子内部の各点において、十分なS/N比を有したCe L_{III}端XANESスペクトルが得られ、粒子内におけるCe価数の2次元分布が得られた。

酸素吸蔵過程では、Ce₂Zr₂O_x粒子内部のCe酸化数の分布が明瞭なコントラストで観察され、酸素吸蔵によるCe³⁺からCe⁴⁺への酸化が、担持したPt粒子の位置とは無関係に進行していることがわかった。423 Kでの反応後は、粒子内部に価数の分布が観察され、573 Kでの反応で酸化が完結した。また、Ptが接地していない粒子でも粒子内のCeが完全に4+に変わっており、酸素吸蔵過程は表面に担持したPtとは無関係に、Ce₂Zr₂O_x粒子の不均質性に応じて、固溶体粒子表面から反応が始まり、バルク内部を酸素拡散が伝搬していくことを示唆

している。

一方、酸素放出過程では、 Ce^{4+} から Ce^{3+} への価数変化は、Ptが接地した箇所から進行していく様子が観察された。423 Kでの還元過程では、Ptの接地位置のみでCeの価数変化が見られ、573 Kまで反応温度を上げると、粒子全体にCeの還元が広がる様子が可視化された。また、Ptが接地していない $Ce_2Zr_2O_x$ 粒子では、423 Kの反応ではCeの還元がほとんど進行しておらず、573 Kに反応温度を上げて、還元が完結しなかった。これらの結果は、Ceの還元による酸素放出は、 $Ce_2Zr_2O_x$ 粒子単独でも進行するが、Ptを触媒として進行していることを示唆している。

一連の走査型顕微 XAFS 計測で、 $Ce_2Zr_2O_x$ 粒子1粒子内部のCeの価数分布とその変化を初めて可視化することに成功した。また、一連の酸素吸蔵・放出過程の解析から、担持されたPtが両過程に与える影響、反応様式の違いを解明した。これらの結果は、担持された金属触媒が複合酸化物粒子の個々の反応性を補いながら、粒子集合体全体の酸素吸蔵・放出過程を促進していることを示しており、金属触媒の担持方法がその反応性に大きく影響することも示唆された。

(2) 結像型イメージング XAFS 法の開発と樹状型酸化鉄結晶の相転移イメージング

酸化鉄は、 NO_x の還元等、様々な反応に活性を示す材料であり、 $\alpha-Fe_2O_3$ 、 $\gamma-Fe_2O_3$ 、 Fe_3O_4 などの複数の量論組成を有する結晶系を持っている。我々は、比較的大きな結晶粒子を形成し、イメージング XAFS で可視化できる程度の構造異方性を有した樹状型酸化鉄結晶に注目し、その酸化還元サイクルにおける相転移や構造劣化が進行する様子を結像型イメージング XAFS 法で可視化することを検討した。

$K_3[Fe(CN)_6]$ の水熱合成から得られた2-5 μm サイズの粒径で、 $\alpha-Fe_2O_3$ の結晶相を持つ樹状型酸化鉄結晶(a)を合成し、これを623 Kで水素還元し、続いて523 Kで酸化して、 $\gamma-Fe_2O_3$ の結晶相を持つ樹状型酸化鉄結晶(b)を得た。これを483 Kまでの温度で還元(c)、酸化(d)して、相転移させ、酸化還元サイクル各段階での樹状型酸化鉄結晶をSiN薄膜基板上に高分散担持した試料基板を調製した。

SPring-8のBL32B2、BL37XUビームラインにて、結像イメージング XAFS 計測系の開発を行った。Si(111)モノクロメータによりFe K端付近(7.0-7.2 keV)で単色化し、コンデンサキャピラリーまたはコンデンサーゾーンプレートにて100 μm サイズに集光したX線を試料に照射して、透過したX線をフレネルゾーンプレートにより

結像し、その実像をX線カメラで撮像した。入射X線を変化させ、その都度フレネルゾーンプレートから発生する色収差を補正しながら、連続撮影を行い、XAFS領域のデータ計測を行った。開発した画像レジストレーションプログラムにより、画像補正を行うと、各入射X線エネルギーでの撮影画像を一致させることができ、これらをエネルギー軸に対して連結することによって、最高50 nmの空間分解能を有するFe K端空間分解 XANES スペクトルを取得することができた。

結像X線イメージと、事前に光学顕微鏡で撮像したイメージを比較すると、基板上の試料座標と形状は一致しており、結像X線イメージが十分な分解能とコントラストを有していることを確認した。Fe K端のエネルギーで入射X線を変化させた際の連続撮影画像データを、画像補正後、連結させると、20-50 μm の視野、75 x 75 nm^2 の空間分解能で、試料粒子全域のFe K端 XANES スペクトルを得ることができた。(a)-(d)の試料における XANES スペクトルの違いを比較した所、それぞれ試料組成に応じたFe K端 XANES スペクトルの形状を反映しており、開発した結像型イメージング XAFS 法が、基板上的酸化鉄結晶粒子に対して、広視野・空間分解で、その結晶相(Feの化学状態)の違いを可視化できていることを明らかにした。

(3) CT-XAFS イメージングの開発

トモグラフィー (CT) 法は、3次元形状を有する試料を光軸に対して回転させながら、各回転角における透過像を撮像し、それを再構成計算することによって、試料の3次元像を得る手法であり、3次元構造分析の手法として広く用いられている。我々は、このCT像を撮像するX線のエネルギーを可変にし、XAFS スペクトルのエネルギー領域のCT像を撮像し、それらを再構成計算することによって、CTによって得られた3次元構造情報から、測定対象元素の量や酸化状態、局所構造などの構造パラメータを3次的に抽出するCT-XAFS イメージング法の開発を行った。

測定する各X線エネルギーについて、透過光の強度 $I_0(E)$ を測定し、その後、測定試料を回転させながら、各回転角に対する透過像 $I(E)$ を2次元検出器で撮像した。撮像した透過像群のデータ解析方法を検討し、低計算コストでの再構成が可能な計算方法を確立した。まず、得られた透過像のデータセットをから(x, y, z)各点におけるX線吸収量 μt を計算した。その後、再構成計算前の透過像において XANES 領域のカーブフィッティング解析を行い、測定元素の量に比例する吸収端のエッジジャンプ量、酸化数と相関のある XANES ピーク強度等の

パラメータを得た。最後に得られたパラメータを再構成計算することで、構造解析に必要な各パラメータの3次元分布を得るプログラムを開発した。このプログラムを用いて、電極触媒材料の3次元再構成解析を行い、Pt触媒の3次元空間分布、酸化数分布を可視化することができた。

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3件)

- 1) 石黒志, 松井公佑, 唯美津木, “走査型顕微 XAFS 法を用いた固体触媒のイメージング”, *触媒*, **59**, 69-75 (2017) (査読有).
- 2) H. Matsui, N. Ishiguro, K. Enomoto, O. Sekizawa, T. Uruga, and M. Tada, “Imaging of Oxygen Diffusion in Individual Platinum/Ce₂Zr₂O_x Catalyst Particles During Oxygen Storage and Release”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 12022-12025 (2016) (査読有).
- 3) 松井公佑, 唯美津木, “空間分解 XAFS による不均一系固体触媒のイメージング解析”, *J. Vac. Soc. Jpn.*, **59**, 307-314 (2016) (査読無).

[学会発表](計21件)

- 1) H. Matsui, N. Ishiguro, K. Enomoto, T. Uruga, O. Sekizawa, and M. Tada, “Nano-XAFS Imaging of Oxygen Diffusion in Pt-Ce₂Zr₂O_x Particles during Oxygen Storage/Release”, 253rd ACS National Meeting, 2017年4月2日~2017年4月6日, サンフランシスコ(米国).
- 2) 石黒志, 松井公佑, 鈴木陽也, 新田清文, 関澤央輝, 寺田靖子, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “結像顕微 XAFS 法による樹状型 FeO_x 結晶粒子の化学状態イメージング”, 第97回日本化学会春季年会, 2017年3月16日~2017年3月19日, 日吉.
- 3) 松井公佑, 石黒志, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “走査型顕微 XAFS 法による Ce₂Zr₂O_x 触媒粒子内の酸素拡散様式イメージング”, 第97回日本化学会春季年会, 2017年3月16日~2017年3月19日, 日吉.
- 4) 永瀬晶子, 黄秀兵, 横田元一, 邨次智, 唯美津木, “高い酸化還元能を有する新規 Ce-Cr-Rh 系複合酸化物の調製とアルコール選択酸化”, 第97回日本化学会春季年会, 2017年3月16日~2017年3月19日, 日吉.
- 5) 鈴木陽也, 松井公佑, 石黒志, 新田清文, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 寺田靖子, 唯美

津木, “走査型顕微 XAFS 分光法による酸化鉄結晶内酸素吸蔵・放出に伴う結晶相分布変化の可視化”, 第97回日本化学会春季年会, 2017年3月16日~2017年3月19日, 日吉.

- 6) 唯美津木, “XAFS イメージングによる固体触媒構造・反応の可視化” 第30回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム(招待講演), 2017年1月7日~2017年1月9日, 神戸.
- 7) 広瀬真, 下村啓, N. Burdet, 松井公佑, 唯美津木, 高橋幸生, “硬 X 線タイコグラフィによる価数識別イメージング”, 第30回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2017年1月7日~2017年1月9日, 神戸.
- 8) 松井公佑, 石黒志, 榎本香里, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “走査型顕微 XAFS 法による Ce₂Zr₂O_x 粒子内の酸素拡散様式の可視化”, 第30回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2017年1月7日~2017年1月9日, 神戸.
- 9) 石黒志, 松井公佑, 鈴木陽也, 関澤央輝, 新田清文, 寺田靖子, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “結像顕微 XAFS 法による樹状型 FeO_x 粒子の化学状態イメージング”, 第30回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2017年1月7日~2017年1月9日, 神戸.
- 10) 鈴木陽也, 松井公佑, 石黒志, 新田清文, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 寺田靖子, 唯美津木, “走査型顕微 XAFS 法による酸化鉄粒子のレドックス能劣化過程における結晶相分布の可視化”, 第30回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2017年1月7日~2017年1月9日, 神戸.
- 11) 松井公佑, 石黒志, 榎本香里, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “Pt/Ce₂Zr₂O_x 触媒粒子の酸素吸蔵・放出サイクルにおける酸素拡散様式イメージング解析”, 第19回 XAFS 討論会, 2016年9月3日~2016年9月5日, 名古屋.
- 12) M. Tada, “In situ XAFS Imaging of Heterogeneous Catalyst”, International Symposium of The Spectroscopical Society of Japan, “Advance Spectroscopy and Imaging with Nanoscale Resolution”(招待講演), 2016年5月25日, 大阪.
- 13) 松井公佑, 石黒志, 榎本香里, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “走査型顕微 XAFS 法による Pt 接触 Ce₂Zr₂O_x 触媒の酸化還元反応下の粒子内 Ce 酸化状態分布イメージング”, 第96回日本化学会春季年会, 2016年3月24日~2016年3月27日, 京都.
- 14) 唯美津木, “イメージング XAFS による燃料電池電極触媒の可視化” 第2回放射光連携ワークショップ「空間階層構造の可視化と物質科学研究」(招待講演), 2016

- 年2月18日,東京.
- 15) 榎本香里, 石黒志, 松井公佑, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “In situ 顕微 XAFS 法による Pt/Ce₂Zr₂O_x 触媒粒子界面の酸化還元反応下における化学状態イメージング”, 第29回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2016年1月9日~2016年1月11日, 柏.
 - 16) 唯美津木, “時間・空間分解 XAFS 分光による固体高分子形燃料電池電極触媒のその場構造解析”, 2015年真空・表面科学合同講演会(招待講演), 2015年12月1日, つくば.
 - 17) 新田清文, 宇留賀朋哉, 関澤央輝, 鈴木基寛, 河村直巳, 水牧仁一朗, 石黒志, 唯美津木, “SPRING-8における新しい顕微 XAFS”, PF 研究会「X線顕微分析の新展開:STXMから硬X線複合分析まで」,2015年10月2日, つくば.
 - 18) 唯美津木, “固体材料の元素可視化”, 第7回岩澤コンファレンス「サステナブル社会のための最先端触媒化学・表面科学」(招待講演), 2015年9月28日~2015年9月29日, 千葉.
 - 19) 榎本香里, 石黒志, 松井公佑, S. Kityakarn, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “In situ 走査型顕微 XAFS 法による Pt 担持 Ce₂Zr₂O_x 粒子触媒の Ce 酸化状態イメージング”, 第95回日本化学会春季年会, 2015年3月26日~2015年3月29日, 船橋.
 - 20) 榎本香里, 石黒志, 松井公佑, S. Kityakarn, 関澤央輝, 宇留賀朋哉, 唯美津木, “In situ 走査型顕微 XAFS 法による Pt 接触 Ce₂Zr₂O_x 粒子の酸化状態イメージング”, 第28回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム, 2015年1月10日~2015年1月12日, 草津.
 - 21) 唯美津木, “空間分解 XAFS 計測による触媒材料構造解析” 第28回日本放射光学会放射光科学合同シンポジウム(招待講演), 2015年1月10日~2015年1月12日, 草津.

〔図書〕(計1件)

- 1) Eds. Y. Iwasawa, K. Asakura, M. Tada, “XAFS Techniques for Catalysis, Nanomaterials, and Surfaces”, Springer, 2017.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

唯 美津木 (TADA, Mizuki)
名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授
研究者番号: 70396810

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

松井 公佑 (MATSUI, Hirosuke)
名古屋大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 90754309

石黒 志 (ISHIGURO, Nozomu)
理化学研究所・放射光科学研究センター・研究員
研究者番号: 20752455

邨次 智 (MURATSUGU, Satoshi)
名古屋大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 20545719

黄 秀兵 (HUANG, Xiubing)
名古屋大学・物質科学国際研究センター・研究員

(4)研究協力者

王 飛 (WANG, Fei)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

宮本 翔太 (MIYAMOTO, Shota)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

榎本 香里 (ENOMOTO, Kaori)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

鈴木 陽也 (SUZUKI, Yoya)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

田口 将寛 (TAGUCHI, Masahiro)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生