

平成 30 年 8 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04594

研究課題名(和文)原子数制御されたサブナノクラスターとセリア・ジルコニア担体との相互作用と触媒活性

研究課題名(英文) Interaction between size-controlled subnano clusters and ceria and zirconia substrates and catalytic activity

研究代表者

安松 久登 (Yasumatsu, Hisato)

豊田工業大学・工学部・客員教授

研究者番号：20281660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：分子やエネルギーを効率よく他の分子やエネルギーに変換できる触媒は、一般にナノ粒子とそれを保持する担体で構成される。超微小物質「クラスター」と担体との相互作用を活用した高性能触媒を目指して、正確な個数の白金原子で構成される白金クラスターを、セリア、ジルコニア、シリコンの担体上に調製し、CO酸化やNO還元触媒活性や耐久性を計測した。シリコン担体では、白金基板よりも数十度も低温から反応が始まり、活性も高いことが分かった。最も高活性なのは白金30原子のクラスターで、酸素の吸着確率が高いことがその要因であった。セリアやジルコニア担体はシリコン担体よりもクラスターの耐熱性が高いことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Catalysts, which can convert molecules and energies to preferable forms, consist of nano particles and supporting substrates. To aim high-performance catalyst utilizing interaction between clusters (ultrafine particles) and substrates, catalytic activity and durability in CO oxidation and NO reduction proceeding on Pt clusters consisting of definite number of Pt atoms bound to CeO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and Si substrates. The reactions on the Pt clusters on Si start at temperatures lower by several tens degrees with higher activity than Pt plates. The highest activity was observed for Pt clusters with 30 Pt atoms due to higher probability of O<sub>2</sub> adsorption. The durability of the Pt clusters on the CeO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> substrates is higher than the Si substrate.

研究分野：クラスター科学、表面科学、分子科学

キーワード：白金クラスター シリコン担体 CO酸化 NO還元 セリア担体 ジルコニア担体

### 1. 研究開始当初の背景

金属ナノ粒子を担体に固定した物質は、触媒の代表的な形態である。触媒の性能(反応速度、反応選択性、寿命)は、触媒作用を及ぼしたい分子が触媒物質に吸着した際の原子配置や、触媒物質とのやり取りで決定される。すなわち、金属ナノ粒子と担体との相互作用を通じた金属微粒子の形態や電子状態の制御が触媒設計にとって重要な情報となる。

代表的な排ガス浄化触媒である、酸化セリウム(セリア)や酸化ジルコニウム(ジルコニア)に担持された白金ナノ粒子は、酸素過剰雰囲気中で分裂し、還元雰囲気(CO や炭化水素過剰)で再凝集する。分裂や再凝集の機構が解明されていないため、耐久性や触媒活性向上の定量的な道筋が立っていない。

一方、これまでの研究代表者の研究により、白金クラスターをシリコン担体と結合させると、両者間の強い電子的相互作用により、クラスターとシリコン表面とのサブナノ界面に電子が高い密度で局在することがわかった。そこに分子が吸着すると、局在電子を捕獲して活性種が低温で生成されることを突き止めた。この結果は、この系が高い触媒機能を持つことを示している。しかし、反応速度や反応機構はわかっていない。

### 2. 研究の目的

セリア・ジルコニア担体や、シリコン担体に結合させた白金クラスターの触媒性能が、反応ガス分圧やその時間変動に対してどのように変化するのかを定量的に突き止め、その反応機構を解明することを本研究の目的とした。さらに、白金ナノ粒子の微細化と再結合が触媒反応に及ぼす影響や、触媒作用に対する最適サイズ(一つのクラスターを構成する原子数)を明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

セリア、ジルコニア、シリコン担体に担持された単一サイズの白金クラスターを、雰囲気変動により分解された白金ナノ粒子のモデル試料とした。その触媒特性と耐熱性を、それぞれ、表面化学反応速度計測と走査型トンネル顕微鏡(STM)観察により調べた。

[触媒試料の調製] マグネトロンスパッタ法により超高純度の白金クラスターイオンを気相合成し、質量分析法でそのサイズを正確に定めた。クラスターイオンの基板への衝突エネルギーを白金原子あたり 1 eV に制御して、担体基板に衝突(クラスター衝撃)させて担持した。担体上でのクラスターの重畳を避けるため、クラスターの担持数密度を 1 平方マイクロメートルあたり 5 万個以下(30 量体で 15% モノレイヤー相当以下)になるように調製した。

[触媒性能の計測] 代表的な排ガス処理反応

である CO 酸化と NO 還元を調べた。CO 酸化の場合には、分圧の O<sub>2</sub> と CO を連続的に供給しながら触媒試料を徐々に昇温し(0.2-0.3 K s<sup>-1</sup>)、触媒表面上の酸化反応で生成された CO<sub>2</sub> を質量分析法により定量した。この測定結果から、準静的過程で一個の白金原子が一秒間に酸化できる CO 分子数(ターンオーバーレイト、以降 TOR と略す)の絶対値を求めた。これにより、他の報告と定量的な比較ができる。さらに、ガス組成変動に対する応答を調べるために、O<sub>2</sub> 分圧と触媒温度を固定して、CO 分圧を変化させた直後の TOR の経時変化を計測した。実験結果をシミュレーション解析することにより、素反応過程の反応速度定数を求めた。

NO 還元では、反応原料に NO、CO、O<sub>2</sub> を用いて、CO 酸化と同様な計測を行った。

同一試料に対して触媒反応を繰り返すことにより、耐久性を調べた。

[高温耐性計測] 担持クラスター試料を超高真空中で加熱し、室温まで放冷した後、STM で観察した。同一のクラスター触媒試料に対して加熱と STM 観察を繰り返すことにより、クラスターの形態変化を加熱温度の関数として調べた。さらに、触媒昇温時の最高温度を徐々に上げながら CO 酸化を繰り返して、CO<sub>2</sub> 生成が停止した直前の最高温度を触媒の失活温度とした。

### 4. 研究成果

本実験研究の成否の要となる表面反応速度計測装置の改良を行った。触媒生成物の検出感度を高めることと、検出器に対して触媒試料を再現よく設置できるようにしたこと、信号対雑音比と計測の再現性を飛躍的に高めた。特に、検出器の電子銃で生成される背景信号を高い精度と再現性で除去できることが重要であった。その結果、白金重量が数十ナノグラムという極微量の触媒試料に対して、TOR の絶対値を高い精度で計測できるようになった。さらに、TOR の過渡変化を 100 ミリ秒以下の時間分解能で計測できるようになった。

これを用いて、まず、シリコン基板に担持された単一サイズ白金クラスター(サイズは 10、20、30、45、60、71)の CO 酸化を調べた。O<sub>2</sub> と CO の連続供給により準静的過程での CO 酸化 TOR を測定した結果、シリコン担体に担持された白金 Pt 単結晶 Pt 表面よりも低温で CO 酸化が開始され、TOR の絶対値も大きいことが分かった。この反応では、O<sub>2</sub> の反結合性分子軌道への電子捕獲で活性な原子状酸素が CO を酸化する。高濃度の局在電子が低温活性の原動力となる。

TOR の過渡計測に対する数値シミュレーションでは、単結晶白金表面での CO 酸化反応に対して提唱されている Langmuir-Hinshelwood 機構に基づいて、4 つの素反応過程、すなわち、CO の触媒への吸

脱着、酸素の解離吸着、吸着 CO と解離吸着酸素の触媒上での分子衝突による CO<sub>2</sub> 生成、の連立レート方程式を数値積分した。白金(110)単結晶表面の素反応過程の速度定数と比較した結果、シリコン担体に担持された単一サイズ白金クラスター30 量体の酸素吸着確率が、白金(110)表面の 1.5 倍もあることがわかった。白金(110)表面は、白金単結晶の中でも CO 酸化効率が高いが、シリコン担体に担持された白金クラスターは、これよりもさらに高い活性を持つことがわかった。

CO 酸化の TOR が最大になる白金クラスターのサイズは 30 であることがわかった。同一試料に対して 1 カ月以上触媒実験を繰り返しても、この高い活性は維持される。

セリアやジルコニア担体に担持された白金クラスターに関する研究では、クラスターサイズを 30 に固定して、セリア層の厚さに対する CO 酸化触媒活性の依存性とその活性が失われる触媒温度を計測した。その結果、セリアやジルコニア担体に担持された白金クラスターの耐熱性はシリコン担体に比べて高いことがわかった。セリアやジルコニア表面の高い安定性と白金との強い結合性に由来すると考えている。現在、定量的比較をするべく解析を進めている。

NO 還元でも、白金単結晶表面よりも低温で進行した。この反応でも、NO 分子が反結合性分子軌道に電子を捕獲して活性化されて触媒が作用する。従って、シリコン基板に担持された白金クラスターの局在電子による電子供与能の高さは普遍的であることが示された。現在、定量的な解析を進めている。

シリコン表面上に担持された白金クラスター30 量体は、同表面上に担持された 10 量体や Pt 原子よりも熱安定性が高いことがわかった。Pt<sub>30</sub> は Pt-Si 結合で Si 基板に結合されているが、クラスター内には強い Pt-Pt 結合を持つ。一方、Pt<sub>10</sub> では、クラスター内の Pt 原子間に Si 原子が陥入している。従って、Pt<sub>30</sub> クラスター内への Si 原子の拡散は起こりにくが、Pt<sub>10</sub> では、より低温で Si 原子がクラスター内に拡散できると考えられる。すなわち、Si 基板に担持された Pt クラスターの熱安定性は、基板の Si 原子のクラスター内への拡散に支配されていると言える。

## 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 5 件 )

- (1) ‘基板に担持されたサイズ選別白金クラスターの担持形態とその温度変化のSTM 観察’, 福井信志、安松久登、ナノ学会会報、**16**, 45-51 (2018)、査読有。
- (2) (Communications) ‘Bimetallic Ag-Pt sub-nanometer supported clusters as highly efficient and robust oxidation catalysts’, F. R. Negreiros, C. Yin, A. Halder, A. Singh, G.

Barcaro, L. Sementa, E. C. Tyo, M. J. Pellin, S. Bartling, K.-H. Meiwes-Broer, S. Seifert, P. Sen, S. Nigam, C. Majumder, N. Fukui, H. Yasumatsu, S. Vajda and A. Fortunelli, *Angew. Chem. Int. Ed.* **57**, 1209–1213 (2018); DOI: 10.1002/anie.201709784、査読有。

- (3) ‘シリコン基板に担持された単原子層単一サイズ白金クラスターの特異的触媒活性とクラスター・担体間相互作用’, 安松久登、福井信志、*表面科学*, **38**, 406-412 (2017); DOI: 10.1380/jsssj.38.406。
- (4) ‘Size dependence of thermal stability of Pt clusters bound to Si substrate surface prepared by cluster impact deposition’, Nobuyuki Fukui and Hisato Yasumatsu, *Eur. Phys. J. D* **71**, 186 (2017); DOI: 10.1140/epjd/e2017-80066-1、査読有。
- (5) ‘Steady-State Reaction Kinetics and Size Dependence of CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Directly Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, *Cat. Sci. Tech.* **6**, 6910–6915 (2016); DOI: 10.1039/C6CY00623J、査読有。

[ 学会発表 ] ( 計 36 件 )

- (1) Hot topics talk, ‘Low-temperature dissociation of NO molecule in catalytic reduction on size-selected platinum cluster disk bound to silicon substrate’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 19th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters, Hangzhou, China, August 12-17, 2018.
- (2) Invited talk, ‘Low-temperature catalysis of NO reduction and CO oxidation on size-selected platinum cluster disk bound to silicon substrate surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The 2018 Cluster-Surface Interaction Workshop (CSI 2018), Trondheim, Norway, June 18-21, 2018.
- (3) ‘Low-temperature catalysis in simultaneous NO reduction and CO oxidation on size-selected platinum cluster disk bound to silicon substrate surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, Asian Symposium on Nanoscience and Nanotechnology 2018 "Fundamentals and applications of Nanoclusters and Nanoparticles", Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, May 12-14, 2018.
- (4) ‘シリコン表面に担持された単一サイズ白金クラスターディスクによる NO 還元と CO 酸化の低温触媒’, 安松久登、福井信志、ナノ学会第 16 回大会、東京、2018 年 5 月 10 – 12 日。
- (5) Invited talk, ‘Prominent Low-Temperature Catalytic Activity in CO Oxidation and NO Reduction by Uni-Sized Pt Clusters Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu,

- Nanomaterials and Devices by Cluster Beam Deposition in the 2018 MRS Spring Meeting, Phoenix, AL, U.S.A., April 2-6, 2018.
- (6) ‘Catalytic Properties of Low-Temperature NO Reduction Driven by Platinum Cluster Disks Bound to Silicon Substrate Surface’ (英語での発表) Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 日本化学会第 98 春季年会、船橋、2018 年 3 月 20 - 23 日。
- (7) Invited talk, ‘Low-temperature catalytic activity in CO oxidation and NO reduction by uni-sized Pt clusters bound to Si substrate having electron accumulation’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The Eleventh General Meeting of Asian Consortium for Computational Materials Science - Virtual Organization (ACCMS-VO12), Sendai, Miyagi, Japan, December 17-19, 2017.
- (8) ‘Low-temperature catalytic activity driven by uni-sized Pt clusters bound to Si surface in CO oxidation and NO reduction’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 5th Ito International Research Center Conference “Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces: From a single molecule to catalytic reaction”, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, November 20-23, 2017.
- (9) ‘Geometry control of size selected Pt cluster supported on substrate by cluster impact deposition’, Nobuyuki Fukui and Hisato Yasumatsu, 5th Ito International Research Center Conference “Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces: From a single molecule to catalytic reaction”, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, November 20-23, 2017.
- (10) Invited talk, ‘Low-temperature catalytic activity of CO oxidation and NO reduction driven by uni-sized Pt clusters bound to Si substrate’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The Eighth International Symposium "Atomic Cluster Collisions: fission, fusion, electron, ion and photon impact" (ISACC 2017), Varadero, Cuba, October 2-6, 2017.
- (11) ‘クラスター衝撃法を用いた基板担持白金クラスターの形状制御とその熱安定性’, 福井信志、安松久登、第 11 回分子科学討論会、仙台、2017 年 9 月 15 - 18 日。
- (12) ‘シリコン基板に結合させた白金クラスターディスクによる CO 酸化触媒過程のクラスターサイズ効果’, 安松久登、福井信志、2017 年真空・表面科学合同講演会：第 37 回表面科学学術講演会・第 58 回真空に関する連合講演会、横浜、2017 年 8 月 17 - 19 日。
- (13) Invited talk, ‘Prominent catalytic activity by Pt clusters bound to Si substrate in CO oxidation and NO reduction’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 9<sup>th</sup> General Meeting of Asian Consortium for Computational Materials Science (ACCMS9), Kuala Lumpur, Malaysia, August 8-11, 2017.
- (14) Invited talk, ‘Geometry Control of Supported Pt<sub>N</sub> Cluster on Si Substrate by Cluster Impact Deposition’, Nobuyuki Fukui and Hisato Yasumatsu, 9<sup>th</sup> General Meeting of Asian Consortium for Computational Materials Science (ACCMS9), Kuala Lumpur, Malaysia, August 8-11, 2017.
- (15) 招待講演、‘クラスター担持技術と表面化学’、福井信志、安松久登、固体表面研究会、仙台、2017 年 3 月 28 日。
- (16) Invited talk, ‘Low-temperature and anti-poisoning catalysis driven by uni-sized monatomic-layered Pt clusters on Si surface’, Hisato Yasumatsu, 2017 Annual Joint Symposium Florida Chapter of the AVS Science and Technology Society and the Florida Society for Microscopy (2017 FLAVS/FSM), Oland, Florida, U.S.A., March 6, 2017.
- (17) Invited talk, ‘Low-temperature and anti-CO-poisoning characteristics in catalytic CO oxidation driven by uni-sized Pt clusters directly bound to Si substrate, Pt<sub>N</sub>/Si’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The Eleventh General Meeting of Asian Consortium for Computational Materials Science - Virtual Organization (ACCMS-VO11), Sendai, Miyagi, Japan, December 19-21, 2016.
- (18) ‘シリコン基板に担持された単一サイズ白金クラスターによる CO 酸化触媒過程における酸素活性化の促進とクラスターサイズ依存性’、安松久登、福井信志、2016 年真空・表面科学合同講演会、名古屋国際会議場、名古屋、2016 年 11 月 29 - 12 月 1 日。
- (19) Invited talk, ‘Cluster-size dependence of catalytic process driven by uni-sized Pt clusters directly bound to Si surface through steady-state and transient measurements’, Hisato Yasumatsu, Seminar, Dr. Claude Henry in charge, Former Director, Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille (CINaM)-CNRS, Marseille, France, October 10, 2016.
- (20) Invited talk, ‘Size dependence of catalytic CO-oxidation driven by uni-sized Pt clusters directly bound to Si surface through steady-state and transient measurements’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, International Conference "Dynamics of Systems on the Nanoscale" (DySoN Conference 2016), Bad Ems, Germany, October 3 - 7, 2016.
- (21) Invited talk, ‘Cluster-size dependence of catalytic process driven by uni-sized Pt

- clusters directly bound to Si surface through steady-state and transient measurements’, Hisato Yasumatsu, Department Seminar, Prof. Hans-Joachim Freund in charge, Director, Department of Chemical Physics, Fritz Haber Institute der Max Planck Gesellschaft, Berlin, Germany, October 4, 2016.
- (22) Invited talk, ‘Bistability switching in CO-oxidation catalysis driven by uni-sized Pt clusters directly bound to Si surface and cluster-size dependence’, Hisato Yasumatsu, Asian Consortium for Computational Materials Science - Theme Meeting (ACCMS-TM2016) on “First Principles Analysis & Experiment: Role in Energy Research”, Chennai, India, September 22-24, 2016.
- (23) ‘シリコン基板に担持された白金クラスターによる CO 酸化触媒ターンオーバーの過渡計測と分子吸着状態の双安定性に関するクラスターサイズ効果’, 安松久登、福井信志、第 10 回分子科学討論会、神戸ファッションマート、神戸、2016 年 9 月 13 15 日。
- (24) ‘クラスター衝撃法を用いた白金クラスターのシリコン表面への担持とその形状制御’, 福井信志、安松久登、第 10 回分子科学討論会、神戸ファッションマート、神戸、2016 年 9 月 13 15 日。
- (25) Invited talk, ‘Molecular Understanding in Reaction Kinetics of Low-Temperature and Anti-Poisoning CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Directly Bound to Si Substrate Surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The 2016 Cluster-Surface Interaction Workshop (CSI2016), Lemont, U.S.A., May 31-June 3, 2016.
- (26) ‘Geometry control of size-selected Pt cluster on Si substrate deposited by cluster impact’, Nobuyuki Fukui and Hisato Yasumatsu, The 2016 Cluster-Surface Interaction Workshop (CSI2016), Argonne, U.S.A., May 31-June 3, 2016.
- (27) Invited talk, ‘Mass-Spectroscopic Trace of Transient and Steady-State Reaction Kinetics of CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu, Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) Spring Meeting, Hannover, Germany, February 29 - March 4, 2016.
- (28) Invited talk, ‘Transient and Steady-State Reaction Kinetics of CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Directly Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu, Seminar, Prof. M. M. Kappes and PD Dr. Artur Böttcher in charge, Institut für Physikalische Chemie, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Germany, February 26, 2016.
- (29) Invited talk, ‘Transient and Steady-State Reaction Kinetics of CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Directly Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu, Seminar, Professor Thorsten Bernhardt in charge, Institut für Oberflächenchemie und Katalyse, Universität Ulm, Ulm, Germany, February 24, 2016.
- (30) Invited talk, ‘Reaction Kinetics of CO Oxidation Catalyzed by Uni-Sized Pt Clusters Directly Bound to Si Surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, The Tenth Anniversary General Meeting of Asian Consortium for Computational Materials Science - Virtual Organization (ACCMS-VO10), Sendai, Miyagi, Japan, November 1-3, 2015.
- (31) ‘シリコン表面に構築された単一サイズ白金クラスターによる CO 酸化触媒過程における定常状態と過渡的な分子挙動’, 安松久登、福井信志、第 9 回分子科学討論会、東京、2015 年 9 月 16 19 日。
- (32) ‘クラスター衝撃法によりシリコン表面に担持された白金クラスターの幾何構造のサイズおよび衝突エネルギー依存性’, 福井信志、安松久登、第 9 回分子科学討論会、東京、2015 年 9 月 16 19 日。
- (33) 依頼講演、‘Low-Temperature and Anti-Poisoning Catalytic Activity in CO Oxidation Driven by Electrons Accumulated at Sub-Nano Interface between Uni-Sized Pt Cluster Disk and Si Surface’, Hisato Yasumatsu、セミナー（責任者：春田 正毅 教授）首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 分子応用化学域、八王子、2015 年 6 月 24 日。
- (34) ‘Low-Temperature and Highly Anti-Poisoning Catalytic Activity of CO Oxidation Driven by Charge Polarized Sub-Nano Pt Cluster Disk Constructed on Si Substrate Surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 31th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Sapporo, Japan, June 3-5, 2015.
- (35) Invited talk, ‘Low-Temperature, Highly-Selective and Highly-Anti-Poisoning Catalytic Activity Driven by Electrons Accumulated at Sub-Nano Interface between Unisized Pt Cluster Disk and Si(111) Surface’, Hisato Yasumatsu and Nobuyuki Fukui, 4th Annual World Congress of Advanced Materials-2015 (WCAM-2015), Chongqing, China, May 27-29, 2015.
- (36) Invited talk, ‘Low-Temperature and Highly-Anti-Poisoning Catalytic Activity Driven by Electrons Accumulated at Sub-Nano Interface between Uni-sized Pt

Cluster Disk and Si(111) Surface', Hisato Yasumatsu, Seminar, Prof. Bing Zhang in charge, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Wuhan, China, May 25, 2015.

〔図書〕(計2件)

- (1) 'Low-Temperature CO Oxidation Driven by Unisized Monatomic-Layered Pt Clusters Directly Bound to Si Surface', Hisato Yasumatsu, *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*, ed. Klaus Wandelt (Editor-in-Chief), Elsevier, in press (2018); Book ISBN: 9780128097397.
- (2) 市橋正彦、安松久登、コラム、'金属クラスターの化学'、佃達哉 著、サイエンス社 p. 60 (2017); ISBN-13: 978-4781914060.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: Subnanometer to nanometer transition metal CO oxidation catalysts  
発明者: Stefan Vajda, Alessandro Fortunelli and Hisato Yasumatsu  
権利者: 同上  
種類: United States Patent  
番号: 62/233,887 (Provisional Application)、15/276,374 (Application)  
出願年月日: September 28, 2015(Provisional Application)、September 26, 2016 (Application)  
国内外の別: 国外

取得状況(計1件)

名称: Subnanometer to nanometer transition metal CO oxidation catalysts  
発明者: Stefan Vajda, Alessandro Fortunelli and Hisato Yasumatsu  
権利者: 同上  
種類: United States Patent  
番号: US 9,849,445 B2  
取得年月日: Dec. 26, 2017  
国内外の別: 国外

〔その他〕

ホームページ <http://www.clusterlab.jp>

招待セミナー講演開催

- (1) Prof. Abhishek K. Singh (Indian Institute of Science), "Development of Catalysts for a Clean Energy and a Sustainable Environment" (Dec. 12, 2017)
- (2) Dr. Jer-Lai Kuo (Institute of Atomic and Molecular Sciences), "Computational Material Design of Two Dimensional Materials and Their Energy Applications" (May. 12, 2017)
- (3) Prof. Abhishek K. Singh (Indian Institute of

Science), "Transformation of CO<sub>2</sub> to High Value Added CH<sub>4</sub> by Trimetallic Nanoparticles with Ultralow Overpotentials" (Oct. 13, 2016)

- (4) Prof. Dr. Thorsten M. Bernhardt (Universität Ulm), "Adsorption of molecules on graphene-supported iridium clusters" (Jun. 23, 2016)
- (5) Prof. Bing Zhang (Wuhan Institute of Physics and Mathematics), "Dynamic Stark Control of Nonadiabatic Photodissociation of Polyatomic Molecules" (Apr. 15, 2016)
- (6) Prof. Abhishek K. Singh (Indian Institute of Science), "Pt-Poisoning-Free Efficient CO Oxidation on Supported Pt<sub>3</sub>Co Catalyst" (Dec. 15, 2015)
- (7) Dr. Claude R. Henry (Centrenational de la recherche scientifique), "Adsorption Kinetics on Pd and PdAu Cluster Arrays Studied by Molecular Beam Techniques" (Jun. 09, 2015)
- (8) Prof. Dr. Clemens Walther (Leibniz Universität Hannover), "Radioecology of long lived radionuclides at contaminated areas and risk assessment of disposal options for high level radioactive waste" (May 12, 2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安松久登 (YASUMATSU, Hisato)  
豊田工業大学・工学部・客員教授  
研究者番号: 20281660

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

福井信志 (FUKUI, Nobuyuki)  
株式会社コンボン研究所・研究員  
研究者番号: 50510541

(4) 研究協力者

Abhishek K. Singh (Indian Institute of Science)

Dr. Claude R. Henry (Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille)

Prof. Dr. Thorsten M. Bernhardt (Universität Ulm)