

平成 30 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249150

研究課題名(和文) ナノ構造制御合金表面系の物理構築に基づいたオンボード脱水素触媒のラポレベル開発

研究課題名(英文) Dry-process, labo-level fabrication of de-hydrogenated catalysts based on surface nano-structure control

研究代表者

和田山 智正 (WADAYAMA, TOSHIMASA)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：20184004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)： エネルギーキャリア分子などの電極表面における反応特性と実触媒表面の原子配列・構造との関係を原子・分子レベルで検討するための要素技術開発、並びに脱水素反応や直接エタノール型燃料電池の電極反応、さらに二酸化炭素の電気化学還元 to 有効な触媒のラポレベル開発を目指したものである。具体的には、分子線エピタキシ(MBE)法によりPtやAuの基本低指数単結晶基板(M(hkl))に第2元素Xを添加して作製したX/M(hkl)について、その表面構造解析や表面電気化学応答や反応過電圧の検討結果に基づき、過電圧の低い触媒を得る上で適切な合金最表面原子配列・組成を議論した。

研究成果の概要(英文)： Molecular behaviors of several molecules, e.g., energy carrier molecules, organic hydrides, alcohol, carbon dioxide on electrode surfaces are important subjects for future energy systems and, therefore, developments of effective electro-catalysts with suitable surface atomic arrangements and compositions are required. In this study, well-defined model catalysts (X/M(hkl)) are fabricated through molecular beam epitaxy (MBE) of alloying elements X on the low-index single crystal surfaces of Pt and Au (M(hkl); M=Pt, Au). Then, surface structural analysis, electrochemical measurements are performed for the prepared X/M(hkl) model catalysts and discussed the relation between surface atomic arrangements, alloy compositions and catalytic properties.

研究分野：材料界面物性

キーワード：触媒・化学プロセス ナノ材料 表面・界面物性 燃料電池 エネルギーキャリア 二酸化炭素電解還元

1. 研究開始当初の背景

水素ガスを大気中の酸素と結合させ駆動力を得る燃料電池自動車(FCV)は、環境負荷が低く、次世代水素エコノミー成立の鍵を握る。しかし、水素生成、水素製造所から水素ステーションまでの搬送、水素ステーションの新規設置など、技術開発とインフラ整備のコストバランスを考慮したシステム構築が必要不可欠である。一方、水素ガスをハンドリングする際の問題を考えると、水素を含む物質(エネルギーキャリア)の代替利用とその循環プロセスの実現も構想されている。水素の貯蔵媒体として、従来はLaNi₅やバナジウム系の水素吸蔵合金や遷移金属錯体であるボロハイドライド等の無機系材料が検討されてきた。最近ではそれらに加え、よりハンドリングの容易な常温で液体(液化可能)のメチルシクロヘキサン(MCH)などの有機ハイドライドやアンモニア(NH₃)の利用が提案されている。そのような状況下において、エネルギーキャリアを主体とする水素エコノミーの実現に向けて、触媒科学、材料科学、電気化学が総合して取り組むべき研究開発対象に、エネルギーキャリアの低コスト合成、循環・再利用のための物質純度の維持、並びにオンサイトでキャリア分子から水素へ変換(脱水素)するための高効率触媒開発が挙げられる。脱水素反応自体は、エネルギー効率(活性化エネルギー)を無視すれば、熱的に進行させることが可能である。しかし、たとえば常温で液体の水素エネルギーキャリアのFCVへの応用を考えると、キャリア分子からの脱水素反応を、オンボードで、エネルギー効率よく、しかも瞬時に、経済性を加味して行うことが必須である。そのためにはレスポンスの点で難のある熱的プロセスよりも、印加電位により自在に、しかも精密な反応制御の可能な電気化学プロセスの利用が有利と考えられ。本研究は、サブナノレベルで構造規制された合金表面上におけるMCHやNH₃の電気化学的脱水素反応を対象とする。現状、エネルギーキャリア分子からの水素生成に対して、効率に優れ(低過電圧)、しかも副反応生成物のない(少ない)電極触媒設計に関しては、材料選択を含めて一定の方向性が打ち出されているとは言い難い。従って、モデル表面系の構築とその触媒特性の解明が実触媒材料開発を進める上で不可欠な要素技術開発課題であると考え。高度に制御された表面格子構造と反応雰囲気における基礎的表面的過程の理解は、特定の条件下でのみ成立する表面分子挙動の計算科学的描像、さらに実条件下におけるその場分子観察と互いに相補的であり、実触媒開発には必要不可欠である。

2. 研究の目的

本提案の特徴は、分子線エピタキシ(MBE)法などのドライプロセスにより金属単結晶表面に極微量の異種金属を添加元素として

堆積し、さらに熱処理を加えることにより高度に制御された表面合金構造を構築することにある。我が国でも単味金属単結晶表面の電気化学特性に関する研究に取り組んでいるグループが存在する。しかし、MBE法を駆使してwell-defined合金表面を構築し、その電気化学特性を系統的に研究している機関は世界的に見てもほとんどない。従って、サブナノレベルで構造規制された合金表面系の基礎解析に基づいて、ドライプロセスによる実触媒開発を目指す本研究は、我々のみが行えるオリジナル研究である。そこで本研究では、次世代エネルギー循環において重要な役割を果たすと考えられる、いくつかの分子に関して、電極表面のミクロ構造(合金組成、原子配列)とその反応特性に関する基礎的検討を通じて両者の関係を原子・分子レベルで解明する。

3. 研究の方法

本研究におけるAu、Pt基板単結晶表面の清浄化、合金化元素としてのCoやSnなどの蒸着、低速電子線回折(LEED)、反射高速電子線回折(RHEED)、高感度反射赤外分光(IRRAS)、走査トンネル顕微鏡(STM)による表面構造解析は約1×10⁻⁸Paの超高真空(UHV)下、その場(in situ)で行った。試料作製装置は準備室、成膜室などにわかれており、基板温度などの堆積条件を制御して、最表面構造を規定したモデル合金電極を分子線エピタキシ(MBE)法やアークプラズマ堆積(APD)法により作製した。得られたモデル合金電極は大気曝露せずにグローブボックス中において開放し、電気化学セルに設置するまでの一連の作業をすべて不活性雰囲気中で行った。電気化学測定はポテンシオガルバノスタット、ファンクションジェネレータ、クーロンメータなどの市販装置と自作の電気化学セルを用いた。参照電極には可逆水素電極を用いた。電解液は目的とする電極反応に応じて電解質を選択肢超純水(Millipore Milli Q Water)を用いて濃度を調整して用いた。

4. 研究成果

(1) メチルシクロヘキサン(MCH)の熱的脱水素

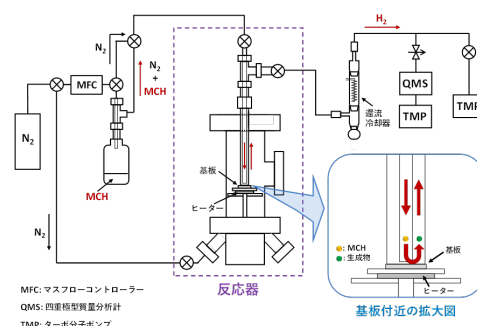


Fig.1 MCH 熱的脱水素反応系
メチルシクロヘキサン(MCH)の電気化学

的脱水素挙動を検討するのに先立ち、熱的脱水素挙動を専用の反応容器を試作した上で検討した。

脱水素触媒としては希少かつ高価である Pt が多く用いられており、さらに Pt に Ni や Co などの卑金属を添加した二元系脱水素触媒の探索も行われている[1-3]。また MCH の脱水素反応に対しては、 Al_2O_3 担持 Pt-Co ナノ粒子が単味 Pt ナノ粒子と同等、あるいは、より高い活性を示すことが報告されている[3]。MCH と類似した構造を有するシクロヘキサン(C_6H_{12})の脱水素反応においても、合金組成比 Pt:Co = 1:1 のナノ粒子を用いると、高活性を発現することが知られている[4,5]。そこで本節では、Pt-Co 合金モデルナノ構造をドライプロセスにより作製し、構築したナノ構造の MCH 熱的脱水素反応に対する触媒活性について Pt-Co 合金組成比や合金表面の Pt 原子配列の影響について調査した結果をまとめる。

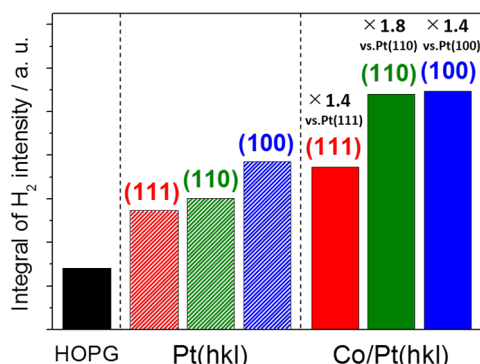


Fig.2 モデル触媒の熱的脱水素特性比較

Pt-Co 合金モデルナノ構造の合金組成比と脱水素活性に関して、反応時の基板温度との関係を検討した結果を Fig.2 に示す。いずれの反応基板温度でも Pt 単味に比べて Pt-Co 合金では、脱水素活性が向上した。燃料電池のカソードにおける酸素還元反応(ORR)に関して、Co 原子との合金化により Pt 原子の d-band center が低下するため ORR 活性が向上するという説明がなされている[5]。本研究においても UHV 中における熱処理により第 2 原子層以下に拡散し局在化した Co 原子が、最表面 Pt 原子から電子を引き抜き、最表面 Pt 原子の 5d 軌道が電子欠損状態になりその結果として d-band center の位置が低下することは十分に考えられる。その結果、MCH の炭素-水素(C-H)結合が弱くなり、脱水素活性が向上したものと考えられる。

(2) MCH の電気化学脱水素

電解液中に溶解させた MCH がどのような電気化学挙動を示すか、さらにどのような電気化学反応生成物が生成するかを検討した。電解液としては 0.1M $HClO_4$ 水溶液および 2M $LiClO_4$ エタノール溶液を用いた。また電極(触媒)としては Pt および Au を検討対象とした。0.1M $HClO_4$ 水溶液に MCH を加えると Pt 多結晶電極で+0.44V、Au 多結晶電極

の場合+0.32V に電流応答が新たに現れた。そこで、Pt 電極では電位範囲 - 0.23~+0.92V、Au 電極では電位範囲-0.18~+1.00V において 19h 連続して掃引速度 10mV/s で CV 測定を行った後に、電解液中の成分について GC-MS クロマトグラム測定を行った。その結果、MCH 還元生成物として 1-メチルシクロヘキセンおよび 1-メチルシクロヘキサノールが検出された。水溶液中の水は、酸触媒の存在下で Markovnikov 則に従ってアルケンに付加しアルコールを生成すること(水和反応)が知られているので、強酸性である $HClO_4$ 水溶液中での水和反応により 1-メチルシクロヘキセンが 1-メチルシクロヘキサノールに変化したものと考察した。本研究における還元反応条件においては、MCH の完全脱水素は進行せず、MCH から 1-メチルシクロヘキセンまでの還元にとどまることがわかった。

次に 2M $LiClO_4$ エタノール溶液において MCH の還元反応を検討すると、Pt(poly)電極では、 $HClO_4$ 電解液中の場合に比較して大きな酸化ピークが - 0.1V 付近に出現した。電位掃引速度 50mV/s の CV における酸化ピーク電流値を $HClO_4$ 電解液中の場合と比較すると約 3.7 倍(0.152 mA/cm² 0.559mA/cm²)となる。さらに、 $HClO_4$ 電解液の場合とは異なり、酸化ピークに対応する還元ピークが-0.2V 付近に明瞭に現れている。これらは MCH のエタノールへの溶解度が水への溶解度に比べ遥かに大きいため、十分な量の MCH 分子が Pt 表面に到達して電気化学反応に寄与し、電位掃引方向に応じて酸化(正方向掃引)・還元(負方向掃引)することに起因すると思われる。一方 Au(poly)電極では、MCH の酸化・還元電流はほとんど認められず、MCH の電気化学的酸化・還元反応はほとんど進行しないといえる。Pt 電極において、+0.4V で定電位保持を行い、生成する気相成分を GC-TCD クロマトグラム測定すると、 H_2 が検出され、水溶液系とは異なり本研究の還元条件において脱水素が進行することがわかる。

(3) オンライン電気化学質量分析系の構築

電極触媒による反応生成物の電位依存性を評価するために、電解液中で発生した反応生成物のその場分析することが不可欠である。そこで、電気化学質量分析法(On-line Electrochemical Mass Spectrometry : OLEMS)装置を新規に試作した。電極反応生成物の質量分析には四重極質量分析器(QMS)を用いた。QMS ではある特定の反応生成物における質量と電荷の比である質量電荷比(m/z 値)に関するシグナル強度を測定し、還元生成物の電位依存性(MSCV)をその場測定することが可能となる。Fig.3 に Gao らの論文[6]を参考に試作した OLEMS 測定系の概略を示した。本研究ではプラスチック多孔質フィルタ(Wintec : PTFE-1.5-290-10)、

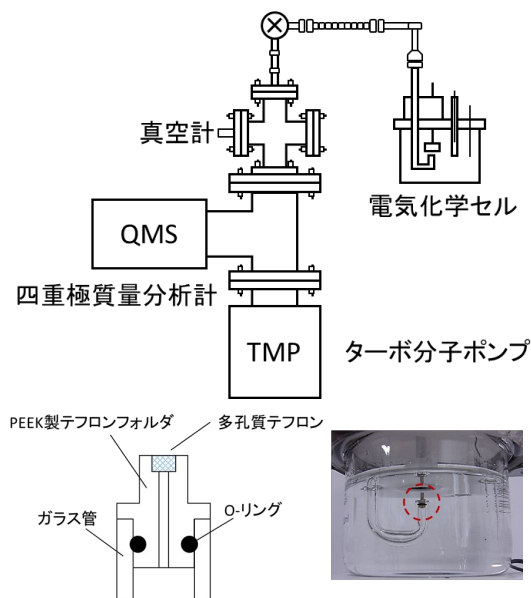


Fig.3 OLEMS装置模式図

繊維状多孔質テフロン (Advantech : PF100)、 porex 社製多孔質テフロン (porex : PM1015)の3種類の多孔質テフロンを用い、QMS(10^{-6} Pa)と電解液(1atm)との差圧を解消した。その上で、水素発生反応及び酸素発生反応を Pt、Au 多結晶電極について OLEMS 測定を行い Pt および Au 電極の酸素発生過電圧に対応した MSCV 曲線が得られ、構築した測定系の有効性を確認した。

(4) アンモニアボラン (NH_3BH_3) の電気化学脱水素

NH_3BH_3 は水素の貯蔵・輸送媒体の中でも水素含有量がとりわけ高く ($19.0\text{wt}\%$, $100\sim 140\text{kg}\cdot\text{H}_2/\text{m}^3$)、非可燃性、非爆発性を有することを利点とする[1,2]。UHV 中で表面清浄化した Au 単結晶($\text{Au}(hkl)$; $hkl = 111, 110, 100$)基板を電気化学測定システムに搬送し、高純度 N_2 ガスにより十分に脱気した 0.1M NaOH 電解液中で CV 測定を行った。 $\text{Au}(hkl)$ 電極の CV および MSCV を Fig.4 にまとめた。Concha らは、Au 多結晶基板表面における NH_3BH_3 の電気化学的酸化反応を In situ フーリエ変換赤外分光法(FTIR)および OLEMS により詳細に調査している[7]。彼らは、 BH_3OH の電気化学反応過程を3つの領域(領域 I ($\sim 0\text{V}$), 領域 II ($0\sim +0.2\text{V}$), 領域 III ($+0.2\text{V}\sim$))に区別して議論している。領域 I における開放電位 (OCP) からの高電位掃引時(\rightarrow 方向)には、MSCV 上に H_2 の生成に対応したイオン電流値の増加が -0.4V 付近に現れている。Concha らは H_2 生成を伴う BH_3OH の加水分解および H_2 生成を伴わない BH_3OH の電気化学的酸化が電極表面で同時に進行することを述べている。したがって、上記のイオン電流値の増加は BH_3OH 加水分解からの H_2 生成に起因すると考えられる。CV 上にも OCP における電流値からの増加

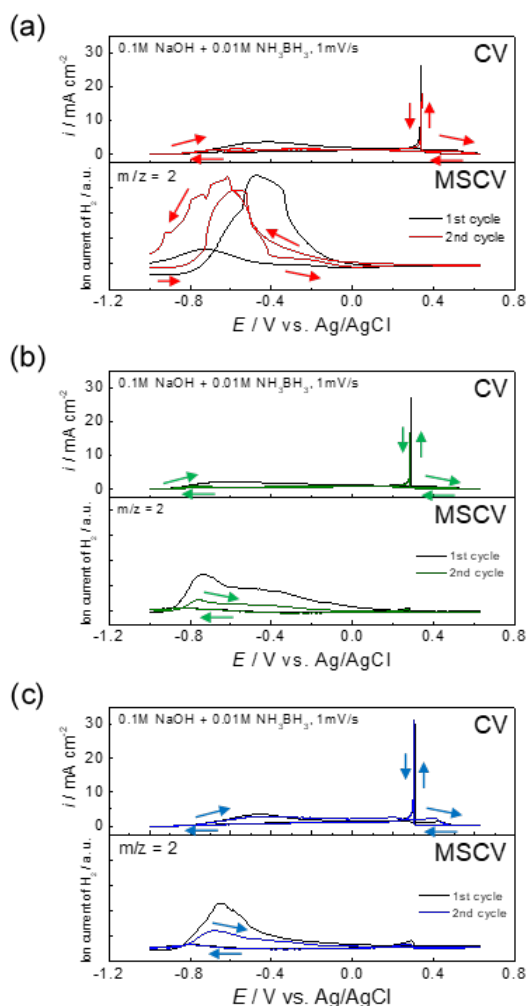


Fig.4 $\text{Au}(hkl)$ 上の NH_3BH_3 の脱水素

が -0.4V 付近に現れている。これは BH_3OH の加水分解により電極近傍に生成した H_2 の電極表面における酸化反応、すなわち水素酸化反応に起因する [8]。 $-1.0\sim 0.0\text{V}$ 付近の領域 I における低電位掃引時(\leftarrow)では、Au 電極の表面原子配列によらず、 BH_3OH 電気化学的酸化に起因すると考えられる CV 上の酸化電流が減少し、MSCV 上においては H_2 生成に対応したイオン電流ピークが現れている。したがって、この領域 I では、 H_2 生成を伴う BH_3OH 加水分解が主に進行すると推察される。領域 II においては、高電位掃引(\rightarrow)、低電位掃引(\leftarrow)ともに、CV 上では BH_3OH 電気化学的酸化に起因するわずかな酸化電流が見られる。MSCV 上でも H_2 発生に起因するイオン電流強度はかなり低い。このことから、領域 II における低電位掃引時(\leftarrow)では、 BH_3OH の電気化学的酸化が優勢であり、 BH_3OH およびその中間生成物($\text{BH}_2\text{OH}_{\text{ad}}$)の電気化学的酸化が進行しているのではないかと考えられる[14]。領域 III では、高電位掃引時(\rightarrow)に電極である $\text{Au}(hkl)$ 表面に Au 酸化物が形成される。したがって、 BH_3OH 電気化学的酸化に起因する CV 上の電流値はかなり低下しており、MSCV においても電極表面の H_2 生成に対応したピーク強度は増加して

いない[14]。一方、低電位掃引時(←)では、CV 上で BH_3OH およびその中間生成物 ($\text{BH}_2\text{OH}_{\text{ad}}$)の電気化学的酸化に起因すると考えられる電流 (0.3V 付近)が増加し、MSCV 上でも、電極表面の H_2 生成に対応したピークが現れ、Au 酸化表面が還元され、 BH_3OH の加水分解および BH_3OH , $\text{BH}_2\text{OH}_{\text{ad}}$ の電気化学的酸化が Au 表面サイト上で進行することに対応したものと考えられる。

(5) Pt および Sn/Pt(hkl)表面におけるエタノールの電気化学酸化反応 (EOR)

0.1M HClO_4 溶液にエタノールを 2M 加えて CV 及び OLEMS 測定を行った。CV 曲線は Pt(hkl)表面構造に依存しており、EOR 電流の立ち上がり電位は Pt(110)や Pt(111)と比較して Pt(100)は著しく高電位であった。DEMS 測定結果は、いずれの Pt(hkl)表面においても CO_2 、 CO 、アセトアルデヒド、酢酸が発生することを示した。特に中間生成物であるアセトアルデヒドは最終酸化生成物である CO_2 より低電位で生成した。各生成物の生成開始電位については Pt(111)、Pt(110)、Pt(100)の順に高電位側であった。これに対して Pt(hkl)表面に 1ML 相当の Sn を堆積後 1000K で熱処理して作製した Sn/Pt(hkl)表面の場合、EOR 立ち上がり電位の序列は Pt(hkl)表面と同じであったが、対応する Pt(hkl)と比較して低電位であり表面 Pt 及び Sn 原子によるアンサンブル効果が示唆された。OLEMS 測定の結果からは Pt(hkl)表面において生成の認められた CO は Sn/Pt(hkl)表面では検出されなかった。更に、Sn/Pt(hkl)表面と Pt(hkl)表面の各反応生成物の生成開始電位を比較すると Sn/Pt(hkl)表面がより低電位に位置し、高活性であることがわかった。

(6) Au(hkl)表面における CO_2 電解還元反応 (ECR)

UHV 中で表面清浄化した Au(hkl)基板を大気曝露することなく不活性雰囲気としたグローブボックス中に搬送し、H 型電気化学セル内に設置した。 N_2 脱気した KHCO_3 中 (0.1M)で CV 測定を行った後、溶液を CO_2 飽和し、-1.4 V ~ 0 V (vs.RHE)の範囲で電位掃引して ECR 還元生成物分析と生成効率の

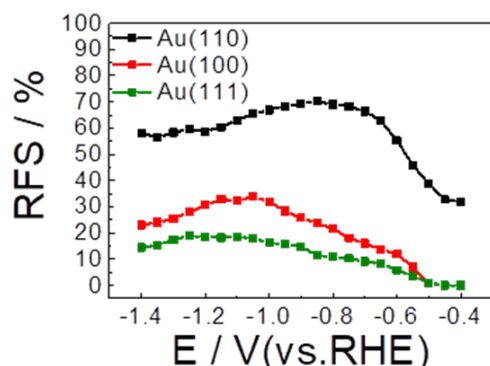


Fig.5 Au(hkl)上の ECR 特性比較

評価を OLEMS システムにより行った。Au(hkl)各電極表面の CV 上の電気化学反応電流と CO 生成に対するイオン電流 ($m/z=28$) の電位依存性 (MSCV) を比較すると (110) が最も低電位から信号が立ち上がった。この時のイオン電流強度を基に CO 還元生成の疑似的な電流効率を見積もり、その電位依存性を Fig.5 にまとめた。以上から、Au 表面における ECR による CO 生成の過電圧は (110) が最小となり、本研究で検討した Au の基本低指数面の中では (110) の ECR 活性が最も高いと言える。

参考文献:

[1] J. Gretz, B. Drolet, D. Kluyskens, F. Sandmann, and O. Ullmann, Int. J. Hydrogen Energy, **19**, (1994), 169.
 [2] E. Newson, TH. Haueter, P. Hottinger, F. Von Roth, G.W.H. Scherer, and TH.H. Schucan, Int. J. Hydrogen Energy, **23**, (1998), 905.
 [3] R.B. Biniwale, S. Rayalu, S. Devotta, and M. Ichikawa, Int. J. Hydrogen Energy, **33**, (2008), 360.
 [4] 瀬川敦司, 紺野博文, 小林幸雄, 吉岐英, 水素エネルギーシステム, **36**, (2011), 16.
 [5] 岡田佳巳, 水素エネルギーシステム, **35**, (2010), 19.
 [6] Y. Gao, H. Tsuji, H. Hattori, and H. Kita, J. Electroanal. Chem., **372**, (1994), 195.
 [7] M.B.M. Concha, M. Chatenet, F.H.B. Lima, and E.A. Ticianelli, Electrochim. Acta, **89**, (2013), 607.
 [8] D.A. Finkelstein, N.D. Mota, J.L. Cohen, and H.D. Abruna, J. Phys. Chem., C, **113**, (2009), 19700.

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4件)

R. Hasegawa, T. Kimura, T. Tanabe, K. Nishihara, A. Taniyama, Y. Oyamama, "Analysis of the specific vibrational modes of goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) by terahertz spectroscopy and calculations of the vibration frequencies of a single molecule using density functional theory" Journal of Biomedical Graphics and Computing **8**, (2018) 29-34. 査読有
 K. Taki, Y. Watanabe, T. Tanabe, H. Ito, M. Ohshima, "Oxygen concentration and conversion distributions in a layer-by-layer UV-cured film used as a simplified model of a 3D UV inkjet printing system" Chemical Engineering Science **158**, (2017) 569-579. 査読有

H.Nakamura, T. Inoue, T. Matsuda, N. Todoroki, T. Wadayama, "On-Line Mass Spectrometry for Electrochemical Oxidation on Well-Defined Sn/Pt(hkl) Electrode Surfaces", ECS Transaction, **75**, (2016) 1029-1033.

査読有

N. Todoroki, N. Yokota, S. Nakahata, H. Nakamura, T. Wadayama, "Electrochemical Reduction of CO₂ on Ni- and Pt-Epitaxially Grown Cu(111) Surfaces", Electroanalysis, **7**, (2016) 97-103. 査読有

[学会発表](計 13 件)

和田山智正、程宏輝、鶴巻碩人、宮川拓、望月智裕、轟直人、「コバルト表面修飾金単結晶表面における二酸化炭素電解還元反応生成物分析」、日本金属学会 2018 年春期講演大会、千葉工大、習志野、2018/3/20.

鶴巻碩人、望月智裕、程宏輝、轟直人、和田山智正、「Pt 電極表面における酸素還元反応の回転ディスク-オンライン質量分析」、電気化学会第 85 回大会、東京理大、東京、2018/3/9.

轟直人、程宏輝、鶴巻碩人、望月智裕、宮川拓、和田山智正、「Au 電極上における CO₂ 還元生成物のオンライン質量分析」、電気化学会第 85 回大会、東京理大、東京、2018/3/10.

程宏輝、鶴巻碩人、井上達彦、轟直人、和田山智正、「Au 基合金単結晶表面系における CO₂ 電解還元生成物のオンライン電気化学質量分析」、電気化学会第 30 回東北若手の会、東北大、仙台、2017/11/24.

程宏輝、鶴巻碩人、井上達彦、轟直人、和田山智正、「Au(hkl)表面合金系における CO₂ 電解還元生成物のその場分析」、第 10 回新電極触媒シンポジウム&宿泊セミナー、三島、2017/10/27.

田邊匡生、小山裕、「Non-destructive Evaluation of Material Conditions Using Terahertz Wave」、平成 28 年度化学系学協会東北大会、いわき、2016/9/11.

鶴巻碩人、程宏輝、轟直人、和田山智正、「よく規定された Au 表面における二酸化炭素電解還元過程のオンライン電気化学質量分析」、日本金属学会 2017 年秋期講演大会、北大、札幌、2017/9/6.

程宏輝、鶴巻碩人、井上達彦、轟直人、和田山智正、「Au(hkl)表面における CO₂ 電解還元反応生成物のオンライン電気化学質量分析」、電気化学会第 84 回大会、首都大学東京、八王子、2017/3/25.

H.Nakamura, T.Inoue, T. Matsuda, N. Todoroki, T. Wadayama, "On-Line

Mass Spectrometry for Electrochemical Oxidation on Well-Defined Sn/Pt(hkl) Electrode Surfaces", PRiME2016, Honolulu, USA, 2016/10/5.

程宏輝、中村大樹、轟直人、和田山智正、「メチルシクロヘキサンの熱的脱水素反応で用いる蒸着 Pt-Co 合金触媒の活性化表面組成探索」、日本金属学会 2016 年秋期講演大会、大阪大、大阪、2016/9/21.

中村大樹、井上達彦、松田哲彦、轟直人、和田山智正、「Sn/Pt(hkl)電極表面におけるエタノール酸化反応のオンライン質量分析」、電気化学会第 83 回大会、大阪大、大阪、2016/3/29

中村大樹、井上達彦、尾本洋二、轟直人、和田山智正、「貴金属表面におけるメチルシクロヘキサンの電気化学挙動」、日本金属学会 2015 年秋期講演大会、九州大、福岡、2015/9/16.

井上達彦、尾本洋二、中村大樹、轟直人、和田山智正、「白金基板上におけるメチルシクロヘキサンの電気化学的挙動」、電気化学会第 82 回大会、横浜国大、横浜、2015/3/15.

[その他]

[受賞](計 2 件)

程宏輝、鶴巻碩人、井上達彦、轟直人、和田山智正、「Au 基合金単結晶表面系における CO₂ 電解還元生成物のオンライン電気化学質量分析」、電気化学会第 30 回東北若手の会、仙台、2017/11/24. 優秀発表賞

中村大樹、井上達彦、尾本洋二、轟直人、和田山智正、「貴金属表面におけるメチルシクロヘキサンの電気化学挙動」、日本金属学会 2015 年秋期講演大会、福岡、2015/9/16. 優秀ポスター賞

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田山 智正(WADAYAMA TOSHIMASA)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号：20184004

(2)研究分担者

田邊 匡生(TANABE TADAO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10333840

(3)連携研究者

轟 直人(TODOROKI NAOTO)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号：10734345