

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05969

研究課題名(和文) チップ増強ラマン分光法を用いた水電解触媒の電極反応解析に関する研究

研究課題名(英文) TERS analysis of electrochemical catalysis for water electrolysis

研究代表者

原 正則 (Masanori, Hara)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40457825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、グラフェン等のナノ炭素材料を担体に適用した水電解用の新規アノード触媒の合成および電極触媒上における反応挙動のin-situ TERS測定による反応挙動解明を目的とした研究である。ナノ炭素担体の使用によるIrO<sub>2</sub>触媒のナノ粒子化により10倍程度の活性の向上に成功し、さらに担体への異種元素の導入および触媒の合金化による電子状態の修飾により、さらなる活性の向上に成功した。in-situ測定法の開発では測定用のモデル電極の開発を行い、TERS用の電極作製を行った。一方で、in-situ測定の不安定さによりTERSシグナルの検出には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、再生可能エネルギーの有効活用のための電力貯蔵・供給システムに用いる高性能な水電解槽の電極材料開発を目的とした研究であり、本研究を通して合成した高活性な電極触媒は水電解による水素製造の効率向上と安価な水素の生成に貢献するものである。また、本研究で開発しているin-situ TERS測定法は、電極表面上での反応およびその分布を直接観察できる手法であり、その測定により触媒の反応挙動を解明することにより、今後の更なる触媒開発を促進できると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim to develop a novel catalyst with nanocarbon supports such as graphene for water electrolyzer and analyze reaction phenomena of water electrolysis on the electrocatalysts by in-situ tip enhanced Raman spectroscopy (TERS) measurement. We successfully synthesized IrO<sub>2</sub> or IrRuO<sub>2</sub> nanoparticle catalysts supported on heteroatom-doped nanocarbon materials and improved its catalytic activity for oxygen reduction reaction. For development of in-situ measurement, we prepared a model electrode of IrO<sub>2</sub> nanoparticles supported on graphene, which was synthesized by chemical vapor deposition, as an electrode for in-situ TERS measurement. However, because of low stability of the system, we was not able to obtain any spectra of water electrolysis reaction.

研究分野：電気化学

キーワード：水電解 酸化イリジウム グラフェン担体 電気化学AFM チップ増強ラマン分光法 水熱合成法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在、環境問題およびエネルギー問題は大きな社会問題の一つとなっており、これらを解決するためのクリーンで高効率な電力供給システムの開発が必要とされている。太陽光や風力、水力などを利用した再生可能エネルギーでの発電の余剰電力を利用した水の電気分解などにより水素を製造・貯蔵し、発電時にはこれらを燃料として用いる電力貯蔵-発電システムは、低環境負荷な水素社会のエネルギー供給システムとして期待されている。また、近年では、水素を燃料に用いる燃料電池自動車が市販されるなど水素燃料の利用範囲が拡大しており、今後さらに水素を用いる燃料電池などの普及が進むことが予想されている。

このエネルギー貯蔵-供給システムの実用化には、低コストでの水素および水素キャリア分子の製造技術の確立が求められている。特に、水電解での水素製造においては、更なるエネルギー効率の向上やシステムの簡素化に加えて、電極触媒の低コスト化と長時間の耐久性および安定性の向上が求められている。プロトン交換膜(PEM)などの固体高分子膜を用いた膜電極接合体(MEA)型の水電解システム(固体高分子形水電解槽:PEWE)は、水電解装置の中でも高電流条件での作動性と電位変動に対する応答性の速さから、次世代の水素製造システムとして期待されている。しかし、電極触媒に貴金属触媒を使用するために高コストであり、また触媒の耐久性も未だに不十分といった問題がある。そのため、高活性かつ高耐久性を有する電極触媒、特に過電圧が大きく高電位で使用される酸素発生反応(OER)用のアノード触媒の開発が求められており、そのためには、高活性・高耐久性を有する新規の電極触媒の合成、および水電解セルの作動条件の最適化が必要とされている。

この課題の解決に向けてナノ炭素材料などの新規な材料を用いたアノード触媒(図1)の合成、および水電解セルの実作動条件下における電極上での反応挙動・分布の観察、劣化挙動の解析が必要とされている。特に、反応挙動の解明には、水電解セルを模擬した環境において電極触媒の反応挙動や分布をその場観察(in-situ 測定)により簡易に測定できる in-situ チップ増強ラマン分光法(TERS、図2)などの手法の開発が必要とされている。

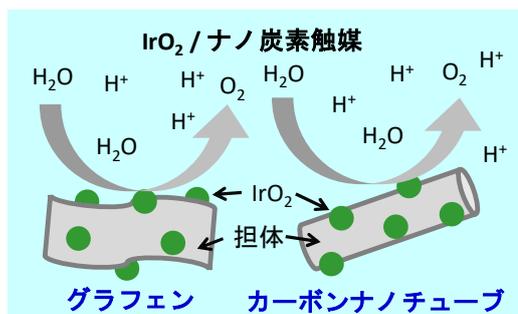


図1 IrO<sub>2</sub>担持ナノ炭素触媒 (IrO<sub>2</sub>-rGOおよびIrO<sub>2</sub>-CNT) のモデル図.

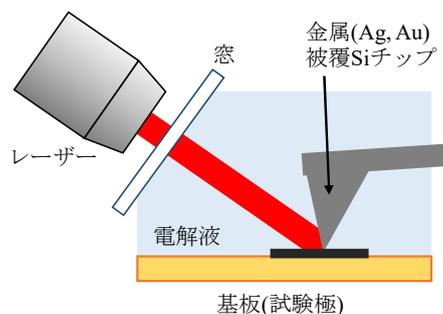


図2 in-situ TERS測定セルの模式図

### 2. 研究の目的

本研究は、グラフェン等の高耐久性を有するナノ炭素材料を担体に適用した水電解用の新規電極触媒の合成、および電極触媒上における反応挙動の in-situ TERS 測定を行い、水電解における電極上の反応挙動および反応分布について明らかにすることを目的とした研究である。この目的の達成のため、本研究では、水電解の電極触媒として高い反応活性を有する酸化イリジウム(IrO<sub>2</sub>)等を、高い耐久性を持つナノ炭素材料であるグラフェン上に高分散させた新規触媒の合成、および原子間力顕微鏡(AFM)とラマン分光法を組み合わせた TERS を用いた in-situ 測定法と in-situ 測定用のモデル電極の開発を行った。さらに、開発した電極触媒を用いて in-situ TERS 測定を行うことで水電解の反応挙動の解析を行い、高活性触媒の開発につなげることを目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、ナノ炭素材料を担体に適用した水電解用の新規電極触媒の合成、および高空間分解能を有する TERS 測定法を電気化学測定条件に適用した in-situ 測定により電極触媒上における反応挙動および反応分布を解明することを目的とした研究計画である。

本研究では、以下の項目の研究を実施した。

- (1) ナノ炭素材料を担体に用いた新規の水電解用電極触媒の合成
- (2) in-situ 測定用のモデル電極の作製
- (3) in-situ TERS 用の電気化学セルの作製、および水電解用電極の in-situ TERS 測定

以下に、各項の実験方法を述べる。

#### (1) ナノ炭素材料を担体に用いた新規の水電解用電極触媒の合成

【触媒合成法】グラフェン担体の原料に用いる酸化グラフェン(GO)は、グラファイトの化学劈開処理(改良 Hummers 法)により作製した。カーボンナノチューブ(CNT)担体には多層CNTを用い、合成の前処理として濃硫酸と濃硝酸の混合溶液中で表面の酸化処理を行った。GOに窒素およびボロンのドーパしたグラフェン(N-rGOおよびB-rGO)は、尿素もしくは酸化ボロンとGOの混合溶液を凍結乾燥し、水熱合成反応もしくは不活性雰囲気での熱合成(800℃もしくは

1000°C、1時間)を行うことにより作製した

電極触媒の酸化イリジウム ( $\text{IrO}_2$ ) は、 $\text{H}_2\text{IrCl}_6$  錯体と担体となるナノ炭素材料 (GO、CNT) を混合した溶液を用い、80°Cで6時間攪拌後、150°Cにおいて水熱反応を行うことにより、 $\text{IrO}_2$  ナノ粒子が還元されたナノ炭素材料担体 (rGO もしくは CNT) 上に担持された触媒 ( $\text{IrO}_2$ -rGO、 $\text{IrO}_2$ -CNT、 $\text{IrO}_2$ -N-rGO、 $\text{IrO}_2$ -B-rGO) を合成した。 $\text{IrO}_2$  と  $\text{RuO}_2$  の合金触媒は、 $\text{H}_2\text{IrCl}_6$  および  $\text{RuCl}_3$  錯体と GO を混合した溶液を 80°Cで6時間攪拌後、150°Cで4時間水熱処理を行うことにより  $\text{IrRuO}_x$  ナノ粒子の担持と担体の還元反応を行い、 $\text{IrRuO}_x$ -rGO、 $\text{IrRuO}_x$ -N-rGO、 $\text{IrRuO}_x$ -B-rGO 触媒を合成した。

【触媒評価法】電極触媒の物性評価は、透過電子顕微鏡(TEM)、走査型電子顕微鏡(SEM)、エネルギー分散型 X 線分析(EDX)、X 線回折(XRD)、熱重量分析(TG)、X 線光電子分光(XPS)、フーリエ変換赤外分光(FT-IR)、ラマン分光法を用いて行った。酸素発生反応に対する触媒活性は電気化学測定法 (リニアスイープボルタンメトリー (LSV) 法、サイクリックボルタンメトリー (CV) 法、およびクロノポテンシオメトリー (CP) 法) により行った

### (2) in-situ 測定用のモデル電極の作製

【モデル電極合成法】炭素源に  $\text{CH}_4$  ガス、銅基板を金属触媒に用いた化学気相成長法 (CVD) 法 (1035 °C、6 時間) によりグラフェンを合成した。合成したグラフェンは、スピンコート法によりポリメタクリル酸メチル(PMMA、MW = 850k)を被覆し、Bubble transfer method によって銅基板から  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上に転写した。その後、UV-オゾン処理 (処理時間:0 ~ 5 分)を用いて CVD グラフェンへの欠陥導入を行った。 $\text{IrO}_2$  ナノ粒子触媒の担持は、Ir 錯体 ( $\text{Ir}(\text{OH})_4$ )溶液をグラフェン表面に滴下・乾燥させた後、エタノール/水混合溶液中で水熱合成 (100 °C、4 時間) により行い、 $\text{IrO}_2$  触媒担持 CVD グラフェンモデル電極 (図3) を作製した。

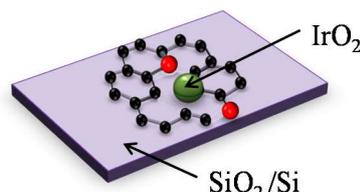


図3 AFM測定用の $\text{IrO}_2$ 担持CVD グラフェン触媒の模式図。

【モデル電極評価法】CVD グラフェンおよび担持された  $\text{IrO}_2$  ナノ粒子触媒の評価法には、ラマン散乱分光法、原子間力顕微鏡(AFM)、SEM、EDX、XPS を用いた。

### (3) in-situ TERS 用の電気化学セルの作製、および水電解用電極の in-situ TERS 測定

【測定法】AFM の電気化学測定には、本研究室に設置してある AFM 装置 (Inova) 用の電気化学測定セル (EC cell) を用いた (図4)。基板電極として Au 電極、溶液には 0.01 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液を用い、電位制御下における電極表面構造を in-situ AFM 測定により行った。大気中における TERS 測定では、探針に Au/Ag/Au 薄膜を蒸着した Si チップを用い、Au 薄膜上に担持した GO の計測を行った。

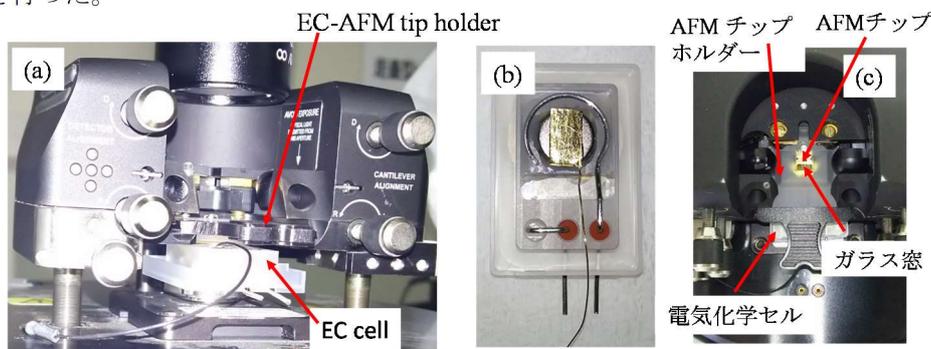


図4 (a) in-situ TERS測定装置、(b)TERS用電気化学測定セルおよび(c)AFMチップホルダーの写真。

## 4. 研究成果

### (1) ナノ炭素材料を担体に用いた新規の水電解用電極触媒の合成<sup>1,2)</sup>

#### ・触媒の比表面積向上の影響

水熱合成法により作製した  $\text{IrO}_2$ -rGO および  $\text{IrO}_2$ -CNT 触媒の TEM 像を図5に示す。TEM 像より、 $\text{IrO}_2$  ナノ粒子は rGO および CNT の担体上に均一に分散しており、平均粒径は rGO 担体上では 1.5 nm、CNT 担体上では 1.7 nm であることが確認された。XRD および XPS 測定より、担体に用いたナノカーボンが水熱処理中に還元されており、合成した触媒の  $\text{IrO}_2$  の電子状態はどの触媒でもほぼ同様であることが確認された。また、 $\text{IrO}_2$  担持量は、原料である Ir 錯体の導入量だけでなく、担体として用いたナノカーボン材料の表面積および酸化処理による表面上の欠陥密度の違いによっても変化することが分かった。

図6に  $\text{IrO}_2$  ナノ粒子化による触媒活性向上の評価として、0.1 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中における  $\text{IrO}_2$ -rGO および  $\text{IrO}_2$ -CNT 触媒上での、電気化学測定より求めた 1.5 V での OER 活性の比較を示す。なお、比較として担体のない  $\text{IrO}_2$  粒子 (粒径 5 ~ 10 nm 程度) を触媒に用いた OER 活性評価の結果を合わせて示す。 $\text{IrO}_2$ -rGO、 $\text{IrO}_2$ -CNT 触媒ともに担体の無い  $\text{IrO}_2$  粒子を用いたものに比べて 10 倍以上高い OER 活性を示した。高導電性のナノカーボン担体上に高比表面積の  $\text{IrO}_2$  ナノ微粒子を高分散担持することにより、高い OER 活性を持つ触媒を合成できることが示された。

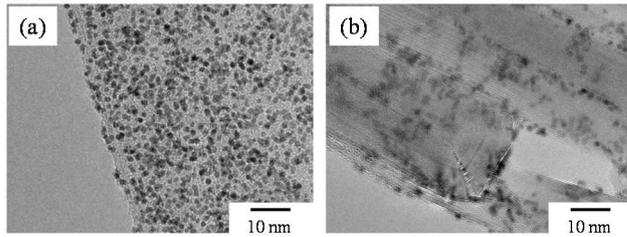


図5 (a) IrO<sub>2</sub>-rGOおよび(b) IrO<sub>2</sub>-CNTのTEM像。

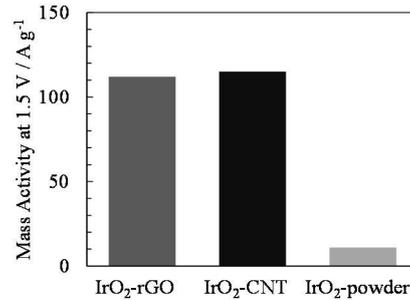


図6 IrO<sub>2</sub>-rGOおよびIrO<sub>2</sub>-CNT触媒の酸素発生反応に対する活性. 測定電位: 1.5 V vs RHE

#### ・触媒の比活性向上の影響

触媒の電子状態の修飾による比活性の向上について調査するため、グラフェン担体への異種元素（窒素およびホウ素）ドーピングによる効果(N-rGO (N:約 10 wt.%), B-rGO (B:約 2 wt.%)担体)および IrO<sub>2</sub> と RuO<sub>2</sub> の合金化による効果について評価を行った。異種元素をドーピングしても GO の構造に大きな変化は認められなかった。水熱合成により N-rGO 担体上に IrO<sub>2</sub> ナノ粒子を担持した IrO<sub>2</sub>-N-rGO、rGO および N-rGO 担体上に IrRuO<sub>x</sub> 粒子を担持した IrRuO<sub>x</sub>-rGO および IrRuO<sub>x</sub>-N-rGO の TEM 像を図 7 に示す。どの触媒上においても、触媒のナノ粒子が高分散担持されていることが分かる。平均粒径は IrO<sub>2</sub> 粒子では約 1.5 nm であるのに対し、IrRuO<sub>x</sub> 粒子では rGO 上で約 1.9 nm、N-rGO 上で約 1.7 nm であり、合金化により粒径が増大することが分かった。

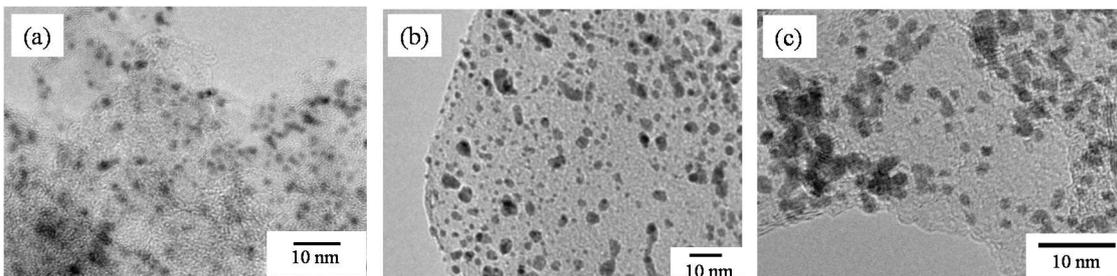


図7 (a) IrO<sub>2</sub>-N-rGO、(b) IrRuO<sub>x</sub>-rGOおよび(c) IrRuO<sub>x</sub>-N-rGO触媒のTEM像。

XPS および EDX による担体の組成および化学構造の評価より、N-rGO では N 原子は pyridinic、pyrrolic、graphitic 構造および N-oxide を形成していることが分かった。一方、ホウ素をドーピングした場合には、B 原子は borinic、boronic、および graphitic 構造を形成していることが分かった。IrO<sub>2</sub> 触媒の電子状態への影響について調査するため、担体への N および B のドーピングおよび触媒合金化の組成比による Ir 4f の XPS ピーク変化を評価した。Ir 4f<sub>7/2</sub> ピークのピーク位置変化より、ナノカーボン担体上に担持した IrO<sub>2</sub> 触媒は、バルクの IrO<sub>2</sub> 粒子に比べてピーク位置が低束縛エネルギー側にシフトし、B ドーピングや Ru との合金化により、ピーク位置の低エネルギー側へのシフトがより大きくなることが分かった。これより、担体への異種元素ドーピングおよび触媒の合金化が、IrO<sub>2</sub> 触媒粒子の電子状態に影響を与えることが明らかとなった。

担体への異種元素ドーピングおよび IrO<sub>2</sub> 触媒の RuO<sub>2</sub> との合金化による OER 触媒活性への影響について、0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中における N-rGO および B-rGO 上に担持した IrO<sub>2</sub> および IrRuO<sub>x</sub> 触媒上での OER 測定結果 (1.55 V) の比較を図 8 に示す。IrO<sub>2</sub>-N-rGO および IrO<sub>2</sub>-B-rGO 触媒上において、IrO<sub>2</sub> ナノ粒子を担持した IrO<sub>2</sub>-rGO 触媒と比較し、3.3 倍および 6 倍高い OER 活性を示すことが分かった。異種元素で修飾したグラフェン担体上に IrO<sub>2</sub> ナノ微粒子を高分散担持することにより、IrO<sub>2</sub> 粒子の電子状態が担体による影響で変化し、高い OER 活性が得られたと考えられる。さらに、IrRuO<sub>x</sub> ナノ粒子を担持した触媒の活性評価より、合金化により IrO<sub>2</sub> ナノ粒子を担持した場合に比べ 1.3 ~ 1.6 倍程度 OER 活性が向上し、2 つの相乗効果により最大で IrO<sub>2</sub>-rGO 触媒の約 10 倍まで活性が向上することが分かった。以上の測定より、触媒の電子状態の制御により水電解触媒の活性を制御できることが明らかとなった。

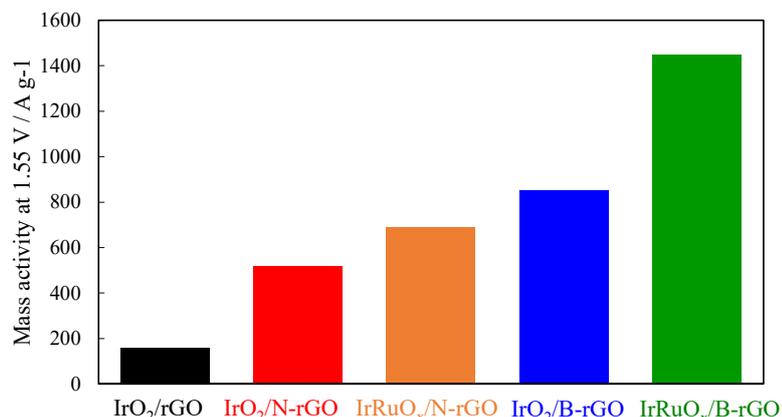


図8 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中における異種元素(N, B)ドーピンググラフェン担体上に IrO<sub>2</sub> および IrRuO<sub>x</sub> 触媒の OER 活性. 測定電位: 1.55 V vs RHE

### (2) in-situ 測定用のモデル電極の開発<sup>3)</sup>

活性評価において触媒として利用している粉末試料では、担体などの構造粗さが大きく、 $\text{IrO}_2$  ナノ粒子を明確に測定することは容易ではない。そのため、AFM を用いた in-situ 測定に向けて、AFM 測定に利用可能なナノスケールで平坦なモデル電極の作製を行った。モデル担体として原子レベルで平坦な CVD 法により合成した単層グラフェンを用い、水熱合成法により  $\text{IrO}_2$  ナノ粒子を担持することで構造制御されたモデル電極の作製を行った。ナノ粒子触媒の担持を行うため、前処理として CVD グラフェンにオゾン処理による欠陥の導入を行った。作製した  $\text{IrO}_2$  担持グラフェンの AFM 像とその構造モデルを図 9 に示す。ナノスケールで構造制御された平坦な単結晶グラフェン上に、平均粒径 4 nm 程度の  $\text{IrO}_2$  ナノ粒子を高分散担持することに成功した。一方、オゾン処理を行わない場合には、ほとんど  $\text{IrO}_2$  粒子が担持されず、サイズも約 9 nm と大きくなっており、担体の欠陥がナノ粒子担持過程において核生成や粒子成長に大きな役割を果たすことが分かった。

作製したモデル電極を用いて電位制御下で AFM 測定を行うことにより、水電解触媒上での OER の in-situ AFM および in-situ TERS 測定が可能になると考えられる。これらの電極を用いた in-situ AFM 測定および in-situ TERS 測定により、電極上のナノスケールでの反応挙動および反応分布の解明の進展に寄与することが期待される。

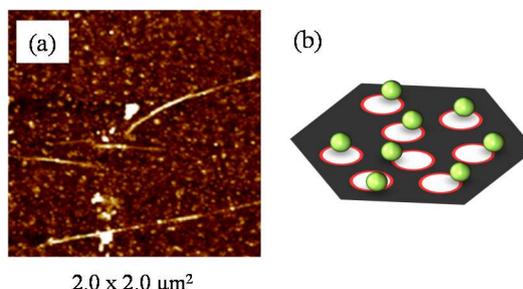


図9 CVDグラフェン上に $\text{IrO}_2$ ナノ粒子を担持したモデル電極の(a) AFM像および(b)構造のモデル。

### (3) in-situ AFM および in-situ TERS による電極表面の計測

AFM 探針先端での電場増強効果を利用した顕微ラマン分光測定を用いた、電位制御下における溶液中での電極触媒の局所構造および表面上での反応のその場観察法として、in-situ TERS 測定システムの開発を行った。水電解触媒を用いた表面構造計測の前測定として、in-situ AFM 装置を用いたグラフェン材料の電位制御下における形状観察 (図 10) を行った。電位による表面吸着物の吸着・脱離が観察された。

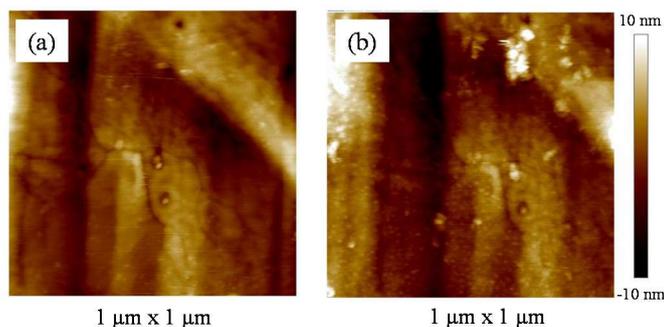


図10 0.01 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM HQ溶液中におけるGOを吸着したAu板表面の電位変化. (a) -0.9 V, (b) -0.2 V vs Pt wire

しかしながら、溶液中における AFM 測定では計測が不安定であり、TERS 測定に必要とされる長時間の安定な作動が得られず、in-situ AFM 測定用のモデル電極が必要であることが分かった。大気中においては TERS による GO 測定に成功しており、測定系の安定化を進めると共に計測に用いる探針のラマン増強感度を向上することで in-situ TERS 測定が可能となると考えられる。本研究においては、電位制御下における TERS シグナルの検出には成功しなかったが、今後の更なるセルの改良およびモデル電極の適用により、水電解触媒の反応挙動を in-situ TERS 測定で直接観察することが出来ると期待される。

#### 【文献】

- 1) M. Hara, R. Badam, G. J. Wang, H.-H. Huang, M. Yoshimura, Synthesis and Evaluation of Iridium Oxide Nanoparticle Catalysts Supported on Nitrogen-Doped Reduced Graphene Oxides., *Electrochemical Society Trans.*, **85**, 27-35, (2018).
- 2) R. Badam, M. Hara, H.-H. Huang, M. Yoshimura, Synthesis and Electrochemical Analysis of Novel  $\text{IrO}_2$  Nanoparticle Catalysts Supported on Carbon Nanotube for Oxygen Evolution Reaction., *Int. J. Hydro. Energy*, **43**, 18095-18104 (2018).
- 3) S. Ogawa, M. Hara, S. Suzuki, P. Joshi, M. Yoshimura, Controlled Deposition of Iridium Oxide Nanoparticles on Graphene., *Electrochemistry*, accepted.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hara Masanori, Badam Rajashekar, Wang Guan Jhong, Huang Hsin-Hui, Yoshimura Masamichi	4. 巻 85
2. 論文標題 Synthesis and Evaluation of Iridium Oxide Nanoparticle Catalysts Supported on Nitrogen-Doped Reduced Graphene Oxides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 27 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/08511.0027ecst	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 Badam Rajashekar, Hara Masanori, Huang Hsin-Hui, Yoshimura Masamichi	4. 巻 43
2. 論文標題 Synthesis and electrochemical analysis of novel IrO <sub>2</sub> nanoparticle catalysts supported on carbon nanotube for oxygen evolution reaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 18095 ~ 18104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2018.08.034	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 Shuhei Ogawa, Masanori Hara, Seiya Suzuki, Prerna Joshi, Masamichi Yoshimura	4. 巻 88
2. 論文標題 Controlled Deposition of Iridium Oxide Nanoparticles on Graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Masanori Hara, Rajashekar Badam, Guan Jhong Wang, Hsin-Hui Huang and Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Synthesis and Evaluation of Iridium Oxide Nanoparticle Catalysts Supported on Nitrogen-Doped Reduced Graphene Oxides
3. 学会等名 233rd Electrochemical Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Prerna Joshi, Rajashekar Badam, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Effect of Nitrogen Doping Amount on Electrocatalytic Activity of IrO <sub>2</sub> on Nitrogen-doped Graphene for Excellent Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Prerna Joshi, Rajashekar Badam, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Design and Evaluation of IrO <sub>2</sub> on Nitrogen-doped Reduced Graphene Oxide as an Electrocatalyst for Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Evaluation of IrO <sub>2</sub> Activity as an Electrocatalyst for Oxygen Evolution Reaction by Heteroatom doped Reduced Graphene Oxide
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原正則、Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, 吉村雅満
2. 発表標題 水電解アノード用の新規触媒IrRuO <sub>x</sub> 合金ナノ粒子担持グラフェンの合成
3. 学会等名 電気化学会 第86回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rajashekar Badam, Kanishka De Silva, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 IrO <sub>2</sub> /carbon Nano Hybrids as Efficient Oxygen Evolution Reaction Catalysts
3. 学会等名 FiMPART ' 17 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Hara, Rajashekar Badam, Kanishka De Silva, Hsin-Hui Huang, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Fabrication and Evaluation of Nanocarbon supported Iridium Oxide catalysts for Water Electrolysis
3. 学会等名 PGIS research Congress 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rajashekar Badam, Masanori Hara, Hsin-Hui Huang, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 IrO <sub>2</sub> Based Modified Graphene Materials as Efficient Oxygen Evolution Reaction Catalysts
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rajashekar Badam, Wang Guan Jhong, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 IrO <sub>2</sub> Decorated Nitrogen Doped Graphene Electrocatalysts for Efficient Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 電気化学会第85回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hara, Rajashekar Badam, Hsin-Hui Huang, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Synthesis of Novel IrRuOx / Graphene Catalyst for Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 Th 54th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原正則, Rajashekar Badam, Hsin-Hui Huang, 吉村雅満
2. 発表標題 酸素発生反応IrRuOx / Graphene触媒の合成と特性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Hara, Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Synthesis and Evaluation of Novel Iridium Ruthenium Oxide Catalysts Supported on Reduced Graphene Oxide for Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 235rd Electrochemical Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Ogawa, Seiya Suzuki, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Preparation of IrO2 nanoparticles on CVD graphene by hydrothermal method
3. 学会等名 The 57th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原正則, Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, 吉村雅満
2. 発表標題 異種元素ドーピンググラフェン上に担持したIrRuOx触媒の合成と活性評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Enhance the Electrocatalytic Activity of IrO <sub>2</sub> via Boron-doping of Carbon Support
3. 学会等名 2019年電気化学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原正則
2. 発表標題 ナノカーボン担体を用いた新規水電解触媒の開発
3. 学会等名 第30回電解プロセス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Prerna Joshi, Hsin-Hui Huang, Masanori Hara, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Boron doped Reduced Graphene Oxide as a Catalyst Support for Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 ICSPM 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Hara, Prerna Joshi, Masamichi Yoshimura
2. 発表標題 Development of novel iridium oxide catalysts supported on modified nanocarbons for oxygen evolution reaction
3. 学会等名 FiMPART 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊田工業大学表面科学研究室 <a href="https://www.toyota-ti.ac.jp/surface/index.html">https://www.toyota-ti.ac.jp/surface/index.html</a>
--

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