

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15360

研究課題名（和文）オペランド分光法による触媒近傍分子間相互作用の理解とその触媒反応場設計への応用

研究課題名（英文）Operando Spectroscopy Study on the Electrochemical Interfaces

研究代表者

片山 祐 (Katayama, Yu)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：70819284

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、適応範囲が広くかつ強力な触媒設計法として、複数の機能を持たせた修飾分子による、反応中間体をとりにくく「局所反応場」設計法を検討した。高価なチオール系分子にかわる表面修飾分子を合成し、その電気化学活性と反応メカニズムを評価した。各種表面修飾分子を検討した結果、安価な有機分子と硫黄からなる機能性オリゴマー分子が表面修飾分子として利用可能であることを明らかにした。さらに反応メカニズム解析の結果、表面修飾分子の疎水性と立体障害が電気化学反応プロセスに影響を与えることが分かった。本成果はその他のエネルギー、物質変換反応に応用でき、「テラーメイド触媒」開発の一助となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の環境問題の深刻化や化石資源の枯渇に伴い、経済発展と自然環境保全が両立した「持続可能な社会」の実現が求められる。その鍵となるのが、（電極）触媒反応の特性向上である。本研究では、実際に反応が進行する触媒の最表面の特性をピンポイントで制御し、最適化する手法の確立を試みた。新たに開発した安価な分子を、触媒表面に20%程度修飾するだけで有意な活性向上が見られた。本手法であれば、既存の様々な材料に適用でき、その特性を向上できる。本成果と既存技術との相乗効果により、エネルギー効率に優れた触媒の開発が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We explored the reaction mechanisms on surface-modified Pt in the alkaline environment by tracking the reaction intermediates using operando infrared spectroscopy. We selected sulfur-organic copolymer, synthesized from S8 and organic molecule, as a surface modifier. Cyclic voltammogram and X-ray photoelectron spectroscopy confirm the successful surface modification of the Pt surface. The alcohol oxidation activity of surface-modified Pt was increased compared to the pristine Pt electrode. The degree of activity enhancement became more substantial with the increase in alkyl chain length of alcohol fuels (methanol < propanol < 1-butanol), suggesting the hydrophobicity and/or steric hindrance of the surface modifier play a key role in facilitating the oxidation reaction. The surface modification can be an effective strategy to tune the energetics of crucial reaction intermediates, leading to further improvements in electrocatalytic activity for the various electrochemical reactions.

研究分野：電気化学

キーワード：オペランド分光法 分子表面修飾 アルコール酸化反応

1. 研究開始当初の背景

近年の環境問題の深刻化や化石資源の枯渇に伴い、経済発展と自然環境保全が両立した「持続可能な社会」の実現が求められる。その鍵となるのが、(電極)触媒反応の特性向上である。これまでに、触媒材料、特にそのバルクの性質に着目した研究開発例は多く、材料の合金化などによるバルク電子状態の制御がその代表として挙げられる^[1]。これらは一定の成果をあげているが、常に問題となるのが、バルクの特性和実際に反応に関与する触媒最表面の特性との乖離である。そこで比較的簡単に触媒最表面を設計できる手法として触媒表面修飾が注目されている。特に、緻密な自己組織化膜の立体障害を応用した例は多数報告されており、防食剤としての応用^[2]のほか、近年では中空円錐構造など特殊な構造を持つ分子の修飾により反応選択性を制御した例もある^[3]。また、適切に表面修飾分子を選択することで触媒近傍の活性種濃度を上昇させ、活性を向上させた研究もある^[4]。以上の例からも、適切な表面修飾により反応の選択性・活性を制御可能であることは明らかである。

一方で申請者らは、これまで表面敏感なオペランド分光法を用いることで触媒表面上で進行する触媒プロセスの解明に取り組んできた。その中で、Pt電極上に希土類酸化物を修飾すると、希土類酸化物表面上の水酸基が電極近傍の水と水素結合し、触媒近傍の水分子ネットワークに影響を与え、触媒活性・選択性に影響することを見出した^[5]。さらなる実験・理論両面からの検討の結果、活性種-近傍分子間の非共有結合性相互作用が反応エントロピーに影響を与えることも明らかとした^[6]。これらの因子は反応活性化エネルギーに直接影響を与えるにも関わらず、これまで触媒設計に応用された例はない。

[1] Markovic, N. M. *et al. Surf. Sci. Rep.* **45**, 117 (2002). [2] Love, J. C. *et al. Chem. Rev.* **105**, 1103 (2005). [3] Genorio, B. *et al. Nat. Mater.* **9**, 998-1003 (2010). [4] Snyder, J. *et al. Nat. Mater.* **9**, 904-907 (2010). [5] Katayama, Y. *et al. ACS Catal.*, **6**, 2026-2034 (2016). [6] Huang, B. *et al. Phys. Chem. Chem. Phys.*, **20**, 15680-15686 (2018).

2. 研究の目的

これまで電極触媒材料開発はバルク特性の制御が主流であった。本研究では、より適応範囲が広くかつ強力な手法として、複数の機能を持たせた修飾分子による、反応中間体を取りまく「局所反応場」設計法を確立する。より普遍的でかつ強力な触媒設計指針の構築のために、既存の触媒設計に応用されている表面修飾分子の①立体障害、②触媒近傍活性種濃度の制御に加えて、反応活性化エネルギーに直接作用する③触媒近傍の水分子構造と④活性種-近傍分子間相互作用を考慮した、複数の機能を持つ修飾分子により触媒表面の設計・最適化を行う(図1)。以下、本研究の目的を具体的に列挙する。

- ・上述の①～④の因子を取り入れた官能基を有す、多機能表面修飾分子の設計により、反応素過程の精密な制御を試みる。
- ・中間体・電極近傍の溶媒構造のオペランド観察により、修飾分子による中間体の表面安定性や反応機構への影響を解明する。
- ・実験的・理論的理解に基づき、触媒設計因子(官能基特性、分子鎖長など)を明確化する。

3. 研究の方法

(1) 機能性オリゴマー分子の合成と電極表面への修飾

主に官能基の疎水・親水性、嵩高さなどのパラメータに着目し、オリゴマー合成に用いるモノマー分子を設計、合成する。これらのモノマーをスルフィド結合を介して重合させ、複数機能を持ったオリゴマーを得る。表面修飾には金属-S間の強い相互作用を用いる。ここで、スルフィ

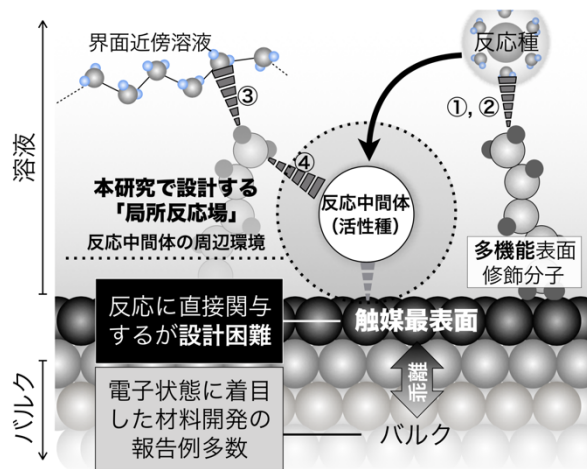


図1 本研究の概要

ド結合が開裂し金属-S 結合となることで、モノマーの表面への修飾を試みる。この際に生じる金属-S(H)種を電気化学的に取り除くことで、修飾分子間に反応活性サイトが存在するような理想的な構造を実現する。また、スルフィド結合長を変化させて表面修飾時に生成する金属-S(H)種の量を制御することで、各修飾分子間の間隔を設計を狙う。これにより立体障害の程度を制御する。

ターゲットとする触媒反応として、燃料電池デバイスへの応用が期待されるアンモニア酸化反応、アルコール酸化反応を塩基性の両条件にて検討する。触媒特性の評価は、基礎的な電気化学測定(サイクリックボルタンメトリー、対流ボルタンメトリー、クロノアンペロメトリーなど)にて行う。これにより、修飾分子の特性と反応活性(反応過電圧、活性化エネルギーなど)との相関を明らかにする。

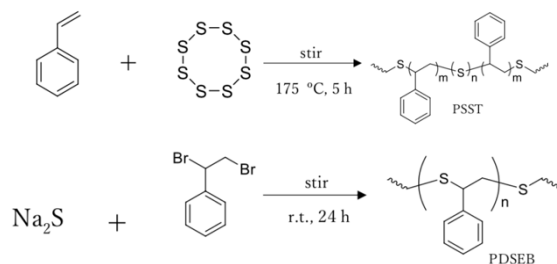
(2) 電気化学反応メカニズム解析

得られた電極に対し、オペランド分光測定として表面増強効果を利用した FT-IR (SEIRAS) 測定を行う。ターゲットとする触媒反応は上述の通りである。反応中間体の表面安定性・反応機構への影響は吸着種由来の IR 吸収により考察可能であり、強度から生成量と吸着形態を、波数から吸着種の同定と表面安定性への影響を評価する。溶媒構造による影響は、水分子の水素結合ネットワークへの寄与によって波数が変化する、表面近傍の水分子由来の OH 伸縮振動に着目して検討を進める。局所反応場への修飾分子による影響は、CO 吸着種などをプローブ分子として利用し、その吸収波数・被覆率を用いることで考察する。

4. 研究成果

(1) 機能性オリゴマー分子の合成と電極表面への修飾

以下に示す方法で、機能性オリゴマー分子を2種類合成した。PSST はスチレンユニット間にランダムな長さのスルフィド結合が存在する。一方、PDSEB はスチレンユニットが硫黄原子を介して連なった構造を持つ。これにより、表面修飾した際のスチレンユニット間の間隔を制御できる。



Scheme 1 機能性オリゴマー分子の合成法

得られた機能性オリゴマー分子は NMR, IR, XPS でキャラクター化を行い、目的物質の生成を確認した。これらの分子の Pt モデル電極上への修飾、さらに電気化学環境下での安定性も確認した。修飾分子中のスルフィド結合長が電極の修飾分子被覆率に影響を及ぼすことも明らかとなった。異なるスルフィド結合長をもつ表面修飾分子を合成することで、既存手法では困難であった正確な修飾分子の表面被覆率の制御に成功した。実際にこれらの電極でアルコール酸化反応を進行させたところ、分子被覆率が 20%程度の場合に未修飾 Pt 電極と比較して高い活性を示すことが明らかとなった。

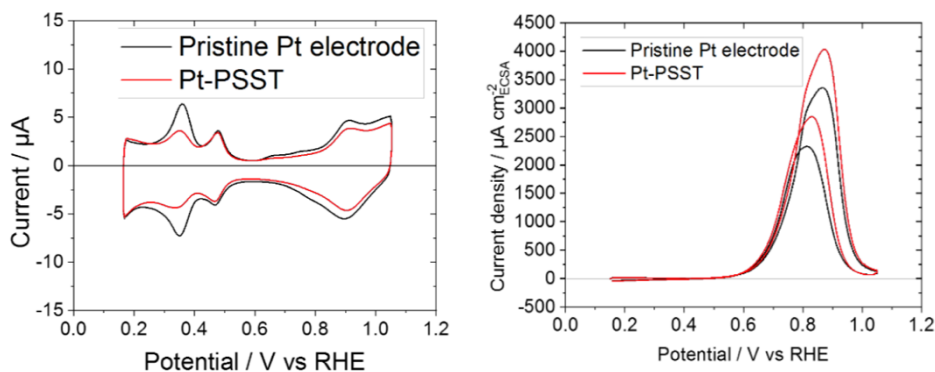


図2 分子修飾前後での(左)0.1 M KOH中、(右)0.1 M KOH-0.1 M MeOH中でのサイクリックボルタモグラム。

(2) 電気化学反応メカニズム解析

測定は以下に示すオペランド分光セルにて実施した。最も顕著な活性向上効果が現れたプロパノール酸化反応について、メカニズムの詳細を検討した。

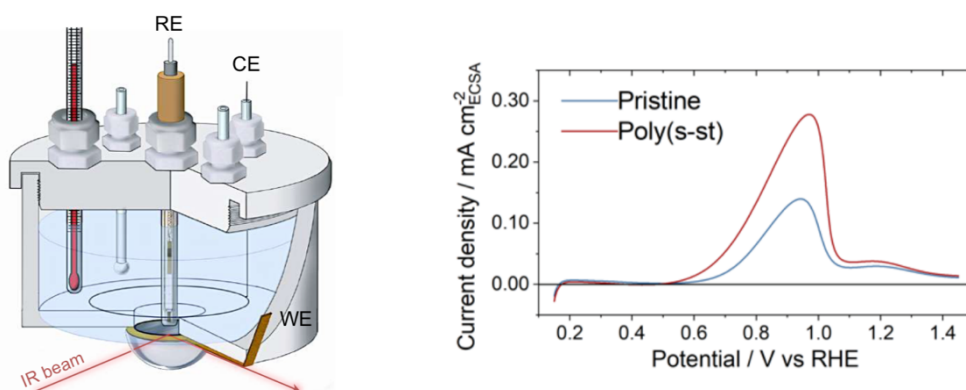


図3 (左) オペランド分光セルの概略図。(右) 得られた分子修飾前後での0.1 M KOH-0.1 M プロパノール中でのサイクリックボルタモグラム。

得られた赤外スペクトルを詳細に解析した結果、プロパノールはまず自己解離的なプロセスにより Pt 表面上で CO 吸着種に変換されることが明らかとなった。このプロセスへの表面修飾分子の明確な寄与は見られなかった。一方、プロパノールが Pt 表面に酸素原子を介して急チェックして生じる吸着プロピオニル (1500~1600 cm^{-1} の領域に見られる) 生成に、表面修飾分子が大きく寄与していることが明らかとなった。これは、表面修飾分子の疎水性、もしくは立体障害により、プロパノールが酸素を介して垂直に表面に吸着するプロセスが有利になったためだと考えられる。

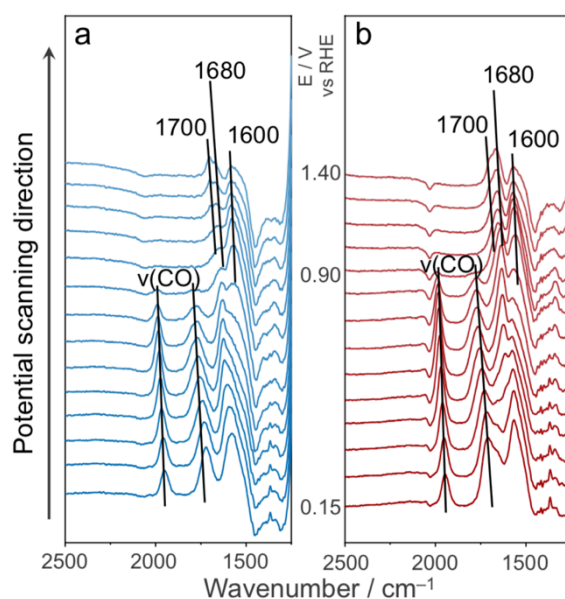


図4 0.1 M KOH-0.1 M プロパノール中でのサイクリックボルタモグラムと同時に得られた赤外スペクトル。(a) Pt 電極、(b) 分子修飾 Pt 電極。

また、今回の検討により、Pt 表面でのプロパノール酸化反応が2つの経路で進行することも明らかになった。1つ目の経路はプロパノールの自己解離による CO 生成と、それに引き続く CO 酸化反応による一般的なアルコール酸化反応と類似した経路、2つ目の経路はプロピオニルの吸着から始まる、アルデヒド、カルボン酸への段階的な酸化反応である。前者で生じる反応中間体 (CO) は触媒表面活性サイトをブロックする作用があり、酸化電流値の低下の一因となる。表面修飾によって、プロピオニル生成が促進されたことで、2つ目の経路が有利になり、酸化電流値の増大に繋がったものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Rao Reshma R., Kolb Manuel J., Giordano Livia, Pedersen Anders Filsoe, Katayama Yu, Hwang Jonathan, Mehta Apurva, You Hoydoo, Lungler Jaclyn R., Zhou Hua, Halck Niels Bendtsen, Vegge Tejs, Chorkendorff Ib, Stephens Ifan E. L., Shao-Horn Yang	4. 巻 3
2. 論文標題 Operando identification of site-dependent water oxidation activity on ruthenium dioxide single-crystal surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Catalysis	6. 最初と最後の頁 516 ~ 525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41929-020-0457-6	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 該当する
1. 著者名 Matsuoka Riho, Shibata Masayuki, Matsuo Kousuke, Sai Ryansu, Tsutsumi Hiromori, Fujii Kenta, Katayama Yu	4. 巻 53
2. 論文標題 Importance of Lithium Coordination Structure to Lithium-Ion Transport in Polyether Electrolytes with Cyanoethoxy Side Chains: An Experimental and Theoretical Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9480 ~ 9490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c01634	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 Sawayama Saki, Morinaga Asuka, Mimura Hideyuki, Morita Masayuki, Katayama Yu, Fujii Kenta	4. 巻 13
2. 論文標題 Fluorophosphate-Based Nonflammable Concentrated Electrolytes with a Designed Lithium-Ion-Ordered Structure: Relationship between the Bulk Electrolyte and Electrode Interface Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 6201 ~ 6207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c19293	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 Huang Botao, Myint Kyaw Hpone, Wang Yanming, Zhang Yirui, Rao Reshma R., Sun Jame, Muy Sokseiha, Katayama Yu, Corchado Garcia Juan, Fraggedakis Dimitrios, Grossman Jeffrey C., Bazant Martin Z., Xu Kang, Willard Adam P., Shao-Horn Yang	4. 巻 125
2. 論文標題 Cation-Dependent Interfacial Structures and Kinetics for Outer-Sphere Electron-Transfer Reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4397 ~ 4411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c10492	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 該当する

1. 著者名 Kazahaya Natsuho, Katayama Yu, Tsutsumi Hiromori	4. 巻 -
2. 論文標題 Contribution of Metal Additives on the Electrochemical Process Involving Solid Sulfur and Soluble Lithium Polysulfide in Lithium Sulfur Batteries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemElectroChem	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) 10.1002/celec.202100353	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 Yamada Koki, Yuasa Shohei, Matsuoka Riho, Sai Ryansu, Katayama Yu, Tsutsumi Hiromori	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved ionic conductivity for amide-containing electrolytes by tuning intermolecular interaction: the effect of branched side-chains with cyanoethoxy groups	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	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) 10.1039/D1CP00852H	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 Rao Reshma R., Huang Botao, Katayama Yu, Hwang Jonathan, Kawaguchi Tomoya, Lunger Jaclyn R., Peng Jiayu, Zhang Yirui, Morinaga Arika, Zhou Hua, You Hoydoo, Shao-Horn Yang	4. 巻 -
2. 論文標題 pH- and Cation-Dependent Water Oxidation on Rutile RuO ₂ (110)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	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) 10.1021/acs.jpcc.1c00413	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 該当する

1. 著者名 Mezzavilla Stefano, Katayama Yu, Rao Reshma, Hwang Jonathan, Regoutz Anna, Shao-Horn Yang, Chorkendorff Ib, Stephens Ifan E. L.	4. 巻 123
2. 論文標題 Activity-or Lack Thereof-of RuO ₂ -Based Electrodes in the Electrocatalytic Reduction of CO ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 17765 ~ 17773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b01431	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 該当する

1. 著者名 Morinaga Asuka, Tsutsumi Hiromori, Katayama Yu	4. 巻 20
2. 論文標題 Electrospun Cu Deposited Flexible Fibers as an Efficient Oxygen Evolution Reaction Electrocatalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemPhysChem	6. 最初と最後の頁 2973 ~ 2980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cphc.201900663	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 Zhang Yirui, Katayama Yu, Tataro Ryoichi, Giordano Livia, Yu Yang, Fraggedakis Dimitrios, Sun Jame Guangwen, Maglia Filippo, Jung Roland, Bazant Martin Z., Shao-Horn Yang	4. 巻 13
2. 論文標題 Revealing electrolyte oxidation via carbonate dehydrogenation on Ni-based oxides in Li-ion batteries by in situ Fourier transform infrared spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy & Environmental Science	6. 最初と最後の頁 183 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9EE02543J	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 該当する

1. 著者名 Kemizaki Yuta, Katayama Yu, Tsutsumi Hiromori, Ueno Kazuhide	4. 巻 10
2. 論文標題 Redox-active glyme Li tetrahalogenoferrate(iii) solvate ionic liquids for semi-liquid lithium secondary batteries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 4129 ~ 4136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA10149G	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 -

1. 著者名 Karayaylali Pinar, Zhang Yirui, Giordano Livia, Katayama Yu, Tataro Ryoichi, Yu Yang, Maglia Filippo, Jung Roland, Shao-Horn Yang	4. 巻 167
2. 論文標題 The Role of Diphenyl Carbonate Additive on the Interfacial Reactivity of Positive Electrodes in Li-ion Batteries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 040522 ~ 040522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/ab78fe	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 該当する

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 片山 祐
2. 発表標題 電極-電解質界面での電気化学反応のリアルタイム解析
3. 学会等名 日本分析化学会中国四国支部 宇部・山陽小野田地区講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内山 駿作、森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 銅-強誘電体複合ファイバーの開発とその酸素発生触媒への応用
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yamada, R. Sai, T. Hitaka, Y. Katayama, and H. Tsutsumi
2. 発表標題 Operando Infrared Spectroscopy Study on Electrode-Electrolyte Interface in Lithium Secondary Batteries Using Polyethylene Oxide-Based Electrolyte
3. 学会等名 PRIME2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Morinaga, S. Uchiyama, H. Tsutsumi, and Y. Katayama
2. 発表標題 Mechanistic Insights on Enhanced Activity of Cu-Deposited Fibrous Electrocatalyst for Oxygen Evolution Reaction
3. 学会等名 PRIME2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Matsumoto, A. Morinaga , H. Tsutsumi, and Y. Katayama
2 . 発表標題 Understanding the Enhanced Methanol Oxidation Reactivity on Sulfur-Organic Compound Decorated Pt Electrode in Alkaline Media
3 . 学会等名 PRiME2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 N. Kazahaya, N. Uesugi, Y. Katayama, and H. Tsutsumi
2 . 発表標題 High-Performance Lithium-Sulfur Batteries with Metal-Deposited Graphite Cathode and Lithium Polysulfide Catholyte
3 . 学会等名 PRiME2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R. Matsuoka, M. Shibata, K. Matsuo, R. Sai, H. Tsutsumi, K. Fujii, and Y. Katayama
2 . 発表標題 Lithium Local Coordination Structure in Polyether-Based Electrolyte with Cyanoethoxy Sidechain: An Experimental and Theoretical Approach
3 . 学会等名 PRiME2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 内山 駿作、森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2 . 発表標題 銅-強誘電体複合ファイバー触媒による高効率水電解
3 . 学会等名 日本銅学会第60回記念講演大会
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 祐
2. 発表標題 銅-強誘電体複合ファイバー触媒による高効率水電解
3. 学会等名 第31回繊維学会西部支部セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東中 大輝、日高 祐、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 白金多結晶電極上での自己組織化膜のオンサイト変換とそのアンモニア酸化反応挙動への影響
3. 学会等名 第35回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡 里歩、崔 亮秀、柴田雅之、藤井健太、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 実験・理論手法の協奏による配位構造解析に基づくシアノ基含有ポリエーテル系電解質でのイオン輸送特性の理解
3. 学会等名 第35回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村 徳之、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 硫黄鎖長設計による硫黄-有機共重合体の触媒表面修飾率制御とそのメタノール酸化活性への影響
3. 学会等名 第35回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Yamada, Riho Matsuoka, Ryansu Sai, Yu Katayama and Hiromori Tsutsumi
2. 発表標題 Understanding the Electrode-Electrolyte Interface of Polyethylene Oxide-Based Electrolyte for Lithium Secondary Batteries Using Operando Infrared Spectroscopy
3. 学会等名 2020 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Katayama, Shunsaku Uchiyama, Asuka Morinaga and Hiromori Tsutsumi
2. 発表標題 Activation of Electrochemical Water-Splitting by Tuning the Polarity of Cu-Deposited Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) Fibrous Catalyst
3. 学会等名 2020 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuho Kazahaya, Nanami Uesugi, Hiroshi Yoshitani, Takuya Wada, Hiroji Fukui, Yu Katayama and Hiromori Tsutsumi
2. 発表標題 Sulfur-Inserted Polymer-Anchored Edge Exfoliated Graphite for High Performance Lithium-Sulfur Batteries
3. 学会等名 2020 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長崎 峻大、日高 祐、東中 大輝、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 銀薄膜電極の二酸化炭素還元反応活性への基板金属による影響
3. 学会等名 2020年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古城 聖也、風早 夏帆、石田 智也、中山 雅晴、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 グラフェン複合層状マンガンのLi-S電池正極への応用
3. 学会等名 2020年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東中 大輝、日高 祐、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 種々の有機分子を表面修飾した白金電極上でのアンモニア酸化反応挙動
3. 学会等名 2020年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森永 明日香、白井 敬介、名木田 賢治、中山 雅晴、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 層状マンガンの酸化層間での電気化学的アンモニア酸化反応メカニズム：表面増強赤外分光法によるoperando観測
3. 学会等名 2020年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 風早 夏帆、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 硫黄含有カソライトを活性物とするLi-S電池への金属担持炭素正極の応用
3. 学会等名 2020年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内山 駿作、森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 高分子担体設計によるCu上での酸素発生反応促進
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東中 大輝、日高 祐、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 表面修飾分子の末端基設計による白金上でのアンモニア酸化反応活性向上
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 友、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 表面増強赤外分光法による硫黄-有機共重合体修飾Pt電極上での1-プロパノール酸化反応解析
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森永 明日香、白井 敬介、名木田 賢治、堤 宏守、中山 雅晴、片山 祐
2. 発表標題 In situ赤外分光法によるNi ²⁺ -Cu ²⁺ 共存層状二酸化マンガン上でのアンモニア酸化反応機構解析
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 酸素発生反応の特性向上を目的とした銅-高分子複合ファイバー触媒の開発
3. 学会等名 化学電池材料研究会 第44回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山 祐
2. 発表標題 電気化学「界面」のリアルタイム観察
3. 学会等名 化学電池材料研究会 第44回講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 電界紡糸法と無電解銅めっき法により調製した銅ファイバー材料の酸素発生触媒への応用
3. 学会等名 表面技術協会 第140回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松村 徳之、松本 友、崔 亮秀、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 ベンゼン環を有する有機-硫黄共重合体を表面修飾した白金触媒上でのメタノール酸化反応挙動
3. 学会等名 第34回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 風早 夏帆、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 リチウム硫黄電池のための金属担持炭素正極触媒の開発
3. 学会等名 第60回電池討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 友、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 硫黄-有機化合物共重合体を表面修飾したPt電極上でのアルコール酸化反応挙動
3. 学会等名 2019年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森永 明日香、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 三次元ファイバー構造を有するCu触媒上での酸素発生反応挙動
3. 学会等名 2019年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Katayama, Livia Giordano, Reshma R. Rao, Jonathan Hwang and Yang Shao-Horn
2. 発表標題 Atomic Scale Understanding of the Surface (Electro)chemistry of CO ₂ on Platinum Its Implications in Energy Conversion Technology
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山 祐
2. 発表標題 電極-電解質界面での電気化学反応のリアルタイム解析
3. 学会等名 日本分析化学会中国四国支部 宇部・山陽小野田地区講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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		
米国	Massachusetts Institute of Technology		
英国	Imperial College London		