

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14542

研究課題名（和文）ナノ反応場設計による電気化学反応素過程の制御

研究課題名（英文）Tuning electrochemical reactions via reaction field design

研究代表者

片山 祐 (Katayama, Yu)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：70819284

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000 円

研究成果の概要（和文）：層状酸化物の層間に金属錯体からなる触媒活性サイトを導入し、層間を反応の舞台（＝ナノ反応場）に見立てた電極触媒の合成に成功した。具体的には、活性サイトとして単一の金属錯体を用いるものに加えて、複数種の金属錯体が共存状態で存在するものの合成に成功している。オペランド分光法を用いて各種電気化学反応中の層間環境の観察にも成功した。これらの結果により、ナノ反応場での電極触媒反応の活性を司る因子として、（1）ナノ反応場特有の隣接活性サイト間の協奏的反応メカニズム、（2）溶媒の水素結合ネットワーク変調効果を提案するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で設計に成功したナノ反応場は、電気化学反応に必要な要素（触媒、溶媒、第三体分子）が収容され、目的とする反応基質のみがアクセス可能な電気化学反応場である。ナノ反応場の設計が深化すれば、電気エネルギーによる物質変換（Power-to-X）を担う電気化学反応の理想形である「普遍的な原料から、所望の生成物のみを、必要最小限のエネルギーで得ること」の実現に一步近づく。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded in synthesizing electrocatalysts in which catalytically active sites consisting of metal complexes are introduced between the layers of layered manganese oxides, and the layers are regarded as a reaction field (= nano reaction field). Specifically, in addition to using a single metal complex as the active site, we have succeeded in synthesizing electrocatalysts in which multiple metal complexes exist in a coexistent state. Furthermore, the interlayer environment during various electrochemical reactions was successfully observed using operando spectroscopy. These results led us to propose (1) a concerted reaction mechanism between adjacent active sites specific to nano-reaction fields and (2) the modulation effect of solvent on the hydrogen bonding network, as factors controlling the activity of electrocatalytic reactions in nano-reaction fields.

研究分野：電気化学

キーワード：ナノ反応場 電極触媒 オペランド分光

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い。これらは一定の成果をあげているが、「触媒反応が実際に進行する」活性サイト・反応場の特性が触媒活性に与える影響は明確でなく、その直接的な設計・制御は実現できていない。一方、申請者は研究開始までに、以下の3点が触媒最表面設計における鍵パラメータであることを見出している。

(1) 活性サイトの「配位」状態：Ru-O-Ruの結合角の違いにより、O₂p軌道の相対位置が変化し、Ru-O結合エネルギーが変化する。

(2) 活性サイト間の「距離」：Ru活性サイトと隣接O(H)サイトが特定の位置関係となるとき、Ru上の反応中間体(OOad)は隣接O(H)サイトとの相互作用により安定化される。

(3) 活性サイト周辺の水分子ネットワーク：触媒表面と界面近傍の溶媒(本系では水分子)との非共有結合性相互作用により、反応種拡散性・反応中間体安定性が変化する。

しかしながら以下の問題により、これら鍵パラメータの触媒設計への応用はなされていない。

(1) 固体最表面の配位状態(=結晶面)を正確に制御することが困難

(2) 活性サイト間の位置関係は結晶構造により一意的に決定され、個別設計が困難

(3) 多様な相互作用パターンを有す水分子を液相状態のままコントロールすることが困難

これらを解決することは、従来の固体結晶材料系では不可能である。申請者が合成に成功した「ホスト-ゲスト交互積層体」は、これらの要件を満たす、全く新しい材料系であり、その学理の深化を狙って研究を開始した。

2. 研究の目的

層間二次元ナノ空間に整列した金属錯体を活性点と捉え、これまで個別の制御が不可能だった(1)活性サイトの「配位」状態・(2)活性サイト間の「距離」・(3)反応場を形成する水分子ネットワークの3点の制御を軸として、バルク材料における理論活性(理論最大値)を凌駕する触媒を構築する。そのために、以下の3点を検討する。

目的1 活性錯体の配位子設計による反応活性向上手法の確立

目的2 活性サイト間の距離制御による反応中間体の選択的吸着の実現

目的3 水分子ネットワークの制御法の確立と反応素過程への影響の明確化

3. 研究の方法

研究初期段階は触媒設計指針獲得のため、系統的な配位子設計が可能かつ、従来の固体酸化物材料系にてすでに反応メカニズムの知見が収集できているNi, Cuを中心金属とした錯体にて検討を行った。ターゲット反応はこれまでに申請者がバルク材料にて詳細に検討してきたアンモニア酸化反応とした。錯体のキャラクタリゼーションは電気化学測定、分光測定にて行った。触媒活性評価はCV、Tafel解析をはじめとする基礎電気化学測定により行った。層間での錯体導入状態(=活性サイト間距離)は高エネルギーX線全散乱実験(SPring8)と分子動力学(MD)法により推定した。本研究で活性点と反応場の最適化手法を確立し、反応の鍵となる中間体形成を加速する。

4. 研究成果

4.1 キャラクタリゼーション

合成した各層状MnO₂薄膜は、XRD、XPSによって触媒の合成を確認し、導入したカチオンサイズに相当する層状構造を有することが観察された(Figure 5.1)。

XRDパターンから、電気化学析出直後の薄膜では $2\theta=7.11^\circ, 14.11^\circ, 21.34^\circ$ に層構造特有の等間隔な回折ピークが観測された(Figure 5.1a)。層間距離は、Braggの式($2d \sin\theta = n\lambda$)より1.24 nmと見積もられた。この層間距離は先行研究とも一致しており、MnO₂シートの結晶学的厚み(~0.45 nm)を考慮すると、MnO₂の層間はTBA⁺により支えられていると考えられる。各種金属イオン(Ni²⁺, Cu²⁺)を含む溶液に浸漬後のMnO₂薄膜では、すべて高角度側にシフトした層構造特有のピークが観測された。TBA/MnO₂薄膜と比較して層間距離が減少したため、層間を支えていたTBA⁺が各遷移金属イオンに置換されたことを確認できた。Ni/MnO₂薄膜では、 $10.74^\circ, 12.18^\circ$ にピーク分離できるブロードな001面のピークが観測され、層間距離はそれぞれ0.82 nm、0.73 nm見

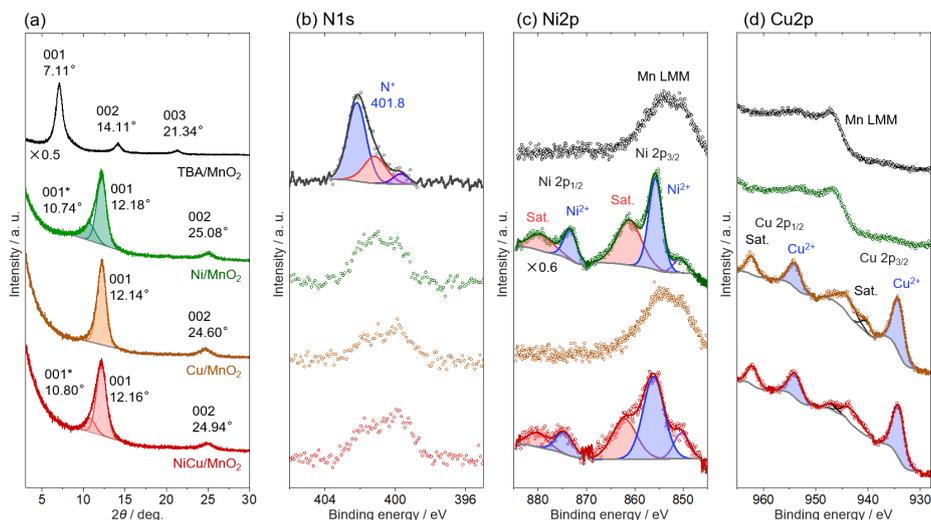


Figure 5.1 (a) XRD patterns of the electrodeposited electrodes with TBA⁺. The patterns were taken before and after immersion for 1 h in solution with the indicated metal ions. XPS spectra of the (b) N1s, (c) Ni2p, and (d) Cu2p photoemission lines for TBA/MnO₂, Ni/MnO₂, Cu/MnO₂ and NiCu/MnO₂. All spectra were calibrated to the adventitious carbon at 284.8 eV and background-corrected using a Shirley background.

積もられた。0.82 nm の層間距離は Ni²⁺錯体の四面体構造のサイズと一致した。0.73 nm の層間距離は水分子一層分に相当し、Ni²⁺錯体が平面正方形構造であると示唆される。一般的に Ni²⁺錯体はバルク中で六配位八面体構造が安定であるが、層間では水和水が層間に存在する特殊な構造水であることから、四配位錯体(四面体構造および平面正方形構造: Ni(OH₂)₄²⁺)で存在する可能性が考えられる。Cu/MnO₂ 薄膜では、12.14° の回折ピークが観測でき、層間距離は 0.73 nm と見積もられた。Cu²⁺錯体は、バルク中でも正方歪みによりヤーンテラー効果が生じ、四配位平面正方形構造(Cu(OH₂)₄²⁺)で存在していることから、層間内でも同様の構造で存在していると考えられる。NiCu/MnO₂ 薄膜では、10.80° および 12.16° にピーク分離できるブロードな回折ピークが観測され、層間距離は 0.82 nm および 0.73 nm となった。Ni/MnO₂ 薄膜および Cu/MnO₂ 薄膜の層間距離と一致するため、Ni(OH₂)₄²⁺ と Cu(OH₂)₄²⁺ の共存が示唆された。

層間に導入された金属イオンの存在は、XPS 測定により Ni(OH₂)₄²⁺ および Cu(OH₂)₄²⁺ が単一イオンで共存していることを確認した(Figure 5.1b~e)。TBA/MnO₂ 薄膜において TBA⁺ のアンモニウム由来の窒素に起因するピークが観測され、各遷移金属イオンを含む水溶液に浸漬することで消失した。したがって、TBA⁺ が各遷移金属とイオン交換されていることが示唆された。特に、NiCu/MnO₂ 薄膜の Ni²⁺ に起因するピークは、Ni/MnO₂ 薄膜と比較して高エネルギー側へのシフト(Δ0.4 eV)が観測された。このシフトは、Ni(OH₂)₄²⁺ および Cu(OH₂)₄²⁺ の共存による Ni(OH₂)₄²⁺ の四面体構造の歪みに起因していると予想される。Cu²⁺ に起因するピークは、結合エネルギーの変化がないことから、Ni(OH₂)₄²⁺ と Cu(OH₂)₄²⁺ での相互作用はなく、孤立イオンとして共存していることが考えられる。長距離秩序構造を、ブラッグ反射と散漫散乱を含む HEXTS 測定により解析した。H₂O 分子由来のピークおよび MnO₂ 骨格の規則的なピークに加え、金属イオン間由来と推測されるピークが観察され、層状 MnO₂ 薄膜は、長距離秩序構造を持つことが示唆された。また、導入された金属イオンによってピーク強度が変化していることから、層構造に揺らぎが生じていることが考えられる。これは、導入金属イオンの構造の歪みに影響すると予想される。各遷移金属溶液に浸漬後は、金属-水酸化結合に由来するピークが観察された(Figure 5.2b)。このことから、層間に金属カチオンが導入されたと同時に、電荷補償のため対アニオンとして水酸化物イオンが存在すると考えられる。感度ファクターを考慮して得られた OH⁻ 対 O₂ の存在比と金属イオン対 Mn の存在比も求めた。本研究で合成された Ni/MnO₂、Cu/MnO₂、NiCu/MnO₂ 薄膜は、それぞれ Ni_{0.10}Mn³⁺_{0.13}Mn⁴⁺_{0.87}O₂OH⁻_{0.07}、Cu_{0.14}Mn³⁺_{0.13}Mn⁴⁺_{0.87}O₂OH⁻_{0.15}、および Ni_{0.05}Cu_{0.12}Mn³⁺_{0.24}Mn⁴⁺_{0.76}O₂OH⁻_{0.10} の組成を持つことがわかった。

4.2 AOR 活性評価

各層状 MnO₂ 薄膜の AOR 活性と選択性は、LSV と GC 測定により Ni²⁺-Cu²⁺共存下で N₂ 選択的な AOR 活性を示すことを確認した(Figure 5.3)。

アンモニア非存在下では、すべての触媒において 1.6 V_{RHE} 付近から OER 電流の増加が観測された。Figure 5.2a より Ni/MnO₂ 薄膜では、1.3–1.4 V_{RHE} で Ni²⁺ の酸化に由来するピークが観測され

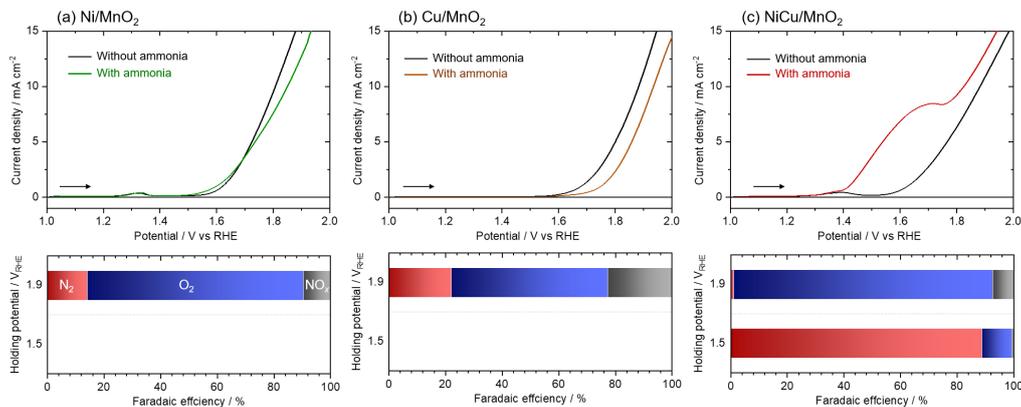


Figure 5.3 Linear sweep voltammograms of (a) Ni/MnO₂, (b) Cu/MnO₂ and (c) NiCu/MnO₂ at 10 mV s⁻¹ in 1.0 M NaOH and 0.1 M NH₄Cl–1.0 M NaOH. Chronoamperogram and calculated faradaic efficiencies for AOR and OER products after 1 h of potentiostatic electrolysis at 1.5 and 1.9 V_{RHE}.

た。アンモニア存在下では OER よりもわずかに早い電位(1.55 V_{RHE})での電流値の増加が観測され、1.9 V_{RHE}での生成物分析の結果でも O₂が 76.1%と最も多く、AOR に由来する電流はほとんど観測されなかった。Cu/MnO₂ 薄膜でも、アンモニア存在下で特徴的な電流増加は観測されず、1.9 V_{RHE}の生成物では O₂が 55.1%と多く、OER の進行が確認された(Figure 5.2b)。しかし、N₂と AOR の副生成物である窒素酸化物(NO_x)も検出され(それぞれ 22.1%, 22.8%)、高電位領域での AOR の進行が示唆された。Ni/MnO₂ 薄膜および Cu/MnO₂ 薄膜での低い AOR 活性は、金属単体であれば金属-中間体の結合エネルギーに起因するが、本研究ではイオン状態であるため、別のパラメータが関係していることも考えられる。また、NiCu/MnO₂ 薄膜では、1.3–1.4 V_{RHE}で Ni²⁺の酸化に由来するピークが観測され、1.4–1.8 V_{RHE}で大きな AOR 電流が観測された。この時の生成物は N₂が 88.8%を占め、N₂選択的な AOR の進行を確認した。また、高電位になると電流はさらに増加するが、O₂生成が確認されたため、高電位領域では OER が進行していることがわかった。TBACl を含まない MnSO₄ 溶液中で電析した MnO₂ と、TBA/MnO₂ 薄膜を 0.5 M NaSO₄ 溶液に浸漬し層間に活性点を含まない Na/MnO₂ 薄膜を作製し同様に LSV 測定を行うと、どちらも AOR が進行しなかった。これより、層状 MnO₂ 薄膜での AOR は層間の金属イオンを介していることがわかり、Ni²⁺–Cu²⁺共存下で N₂ 選択的な AOR が進行することを確認できた。

4.3 AOR 中間体の解析

各層状 MnO₂ 薄膜における AOR 中間体を *in situ* ATR-IR により観察した。測定は、0.1 M NH₄Cl–1.0 M NaOH 溶液中で、1.0–2.0 V_{RHE} の電位範囲で掃引したときの LSV(Figure 5.3)と同時に行った(Figure 5.4)。

NiCu/MnO₂ 薄膜では、Ni(OH)₂ 近傍で脱プロトン化された NH_x が Cu(OH)₂ 近傍で電気化学的に酸化されることが明らかとなった(Figure 5.4)。1.3–1.4 V_{RHE}で Ni(OH)₂ 近傍での酸化が進行すると、1455 cm⁻¹の水和 NH_x由来のピークの減少と 1421 cm⁻¹の脱水 NH_xの増加が観測された。これより、Ni(OH)₂ 近傍での酸化され、脱プロトン化した NH_x が Cu(OH)₂ 近傍に移譲するタンデム反応が進行したことが示唆された。AOR 電流が観測される 1.4–1.8 V_{RHE}では、*in situ* ATR-IR のピークに大きな変化が見られず、AOR が速く進行していると考えられる。ここで、より詳細に反応中間体を観察するために、重水素置換条件での測定を行った。LSV 測定により、NH₄Cl 添加時と比較すると AOR 電流が小さくなり、反応が遅くなることがわかった。その時の *in situ* ATR-IR スペクトルは、OER が開始する 1.6–1.7 V_{RHE}で 1462 cm⁻¹に水素化された NO 由来のピーク(δ(DNO))の増加が観測された。重水置換は、速度論的同位体効果により結合の切断に関わるプロセスが遅くなるということが知られている。N-H 分子の振動エネルギーは水素の質量に依存することから、重水置換により N-D 結合が安定し、N-D 結合の切断が遅くなることが予想される。これらの結果から、OER が進行すると同時に、NO_x を生成する AOR の副反応が進行していることが明らかとなった。そして、OER が支配的になると(>1.8 V_{RHE})、1337 cm⁻¹の NO₂⁻由来のピークと 1282 cm⁻¹のピークの増加が観測された。1282 cm⁻¹のピークは、NO₂⁻の ν(NO)と N₂H₄の ω(HNH)に帰属することができる。N₂H₄ は水素原子が振動モードに関わるピークをもつため、重水素置換条件により低波数シフトするはずである。重水素置換条件においても 1283 cm⁻¹にピークが検出されたことから、1282 cm⁻¹のピークは NO₂⁻と同定することができる。これより、高電位領域になり、OER

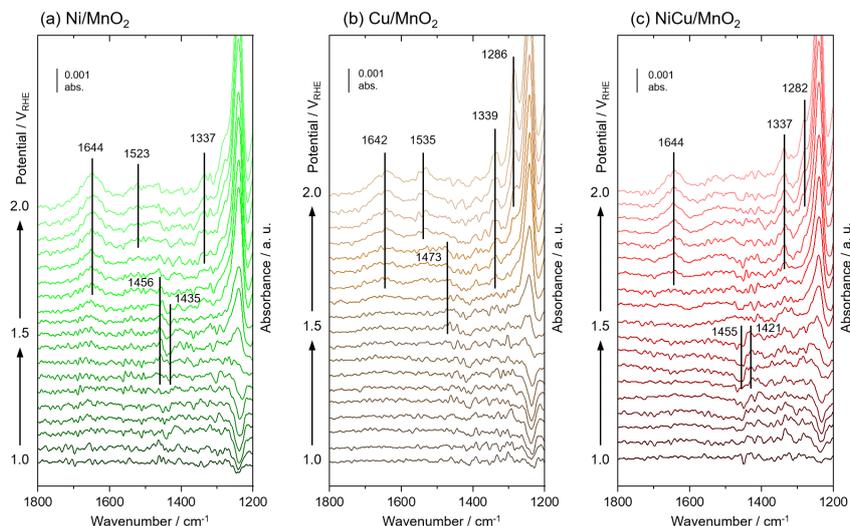


Figure 5.4 *In situ* ATR-IR spectra of (a) NiCu/MnO₂, (b) Ni/MnO₂ and (c) Cu/MnO₂ obtained during linear sweep voltammetry in a potential window from 1.0 V_{RHE} to 2.0 V_{RHE} in 0.1 M NH₄Cl–1 M NaOH. A reference spectrum obtained at 1.0 V_{RHE} in 0.1 M NH₄Cl–1 M NaOH is subtracted.

が支配的になると、OER により生成した O₂ が、AOR の二量化による N₂ 生成を阻害する一方、NO がさらに酸化され NO₂ を生成する AOR の副反応が進行していることが考えられる。以上のことから、NiCu/MnO₂ 薄膜では、Ni(OH)₂²⁺ 近傍で脱プロトン化された NH_x が Cu(OH)₂⁴⁺ 近傍で電気化学的に酸化されることが明らかとなった。したがって、Ni(OH)₂²⁺ と Cu(OH)₂⁴⁺ が別個の反応過程を担うことで、AOR 活性が向上したと考えられる (Figure 5.5)。

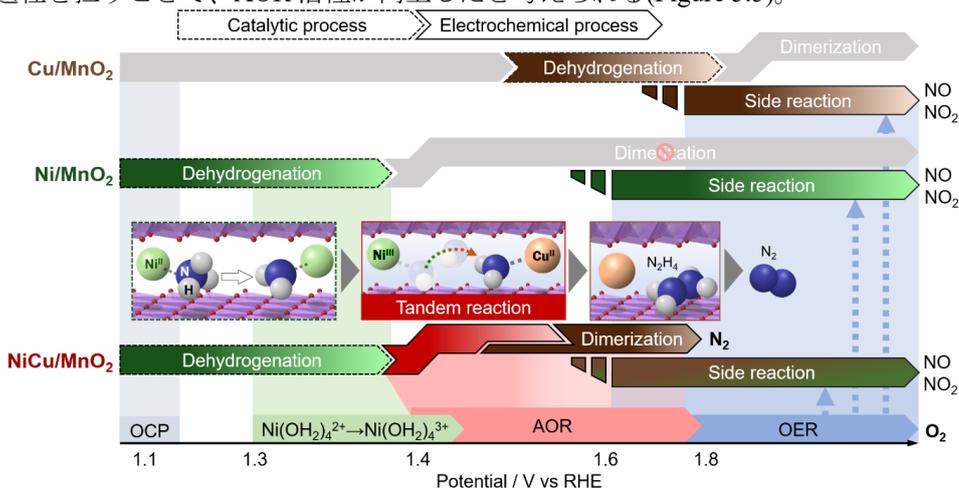


Figure 5.5 Summary of the proposed reaction mechanism for the AOR on Ni/MnO₂, Cu/MnO₂ and NiCu/MnO₂.

4.4 まとめ

本研究では、層状二酸化マンガンに Cu と Ni を孤立イオン状態で共存させ、金属イオン同士で反応中間体を受け渡し、連続で反応するタンデム機構の発現に成功した。層状二酸化マンガンは不均一系触媒でありながら、その層間にはイオンを収容することができる。この層間に Ni²⁺ と Cu²⁺ を共存させ、N₂ 選択的な AOR 活性が得られた。XRD および XPS 解析により、四面体構造および平面正方形構造の Ni 四配位錯体 (Ni(OH)₂²⁺) と平面正方形構造の Cu 四配位錯体 (Cu(OH)₂⁴⁺) が相互作用せず、単一イオンで共存していることを確認した。Ni/MnO₂ 薄膜と Cu/MnO₂ 薄膜では AOR 活性は見られず、Ni²⁺–Cu²⁺ を共存させた NiCu/MnO₂ 薄膜において AOR 活性が観測された。その主生成物は N₂ であり、従来の Ni–Cu 触媒では達成できなかった選択性の制御に成功した。*In situ* ATR-IR による反応中間体の観察により、Ni(OH)₂²⁺ 近傍で NH_x が NH_x へ脱プロトン化 (触媒プロセス) が進行し、Ni³⁺ への酸化と同時に Cu(OH)₂⁴⁺ へ NH_x が移譲され、Cu(OH)₂⁴⁺ 近傍で電気化学的に N₂ へ酸化されるタンデム反応の進行が確認された。このタンデム反応の進行が、N₂ 選択性向上に寄与することが明らかとなった。この単一イオン触媒の共存効果は、従来の合金化によるバルク金属の電子状態を制御した触媒設計にかわる、新たな設計指針として重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Marukawa Ryuichi, Kiso Takayuki, Shimizu Tomohito, Katayama Yu, Nakayama Masaharu	4. 巻 7
2. 論文標題 Layered Manganese Dioxide Thin Films Intercalated with Ag Ions Reduceable In Situ for Oxygen Reduction Reaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 15854 ~ 15861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c00967	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 Akagawa Hiroki, Tsuchiya Naoki, Morinaga Asuka, Katayama Yu, Sumimoto Michinori, Nishikata Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Carboxamide-Directed Stereospecific Couplings of Chiral Tertiary Alkyl Halides with Terminal Alkynes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 9831 ~ 9838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.2c02433	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 Westhead O., Spry M., Bagger A., Shen Z., Yadegari H., Favero S., Tort R., Titirici M., Ryan M. P., Jervis R., Katayama Y., Aguadero A., Regoutz A., Grimaud A., Stephens I. E. L.	4. 巻 -
2. 論文標題 The role of ion solvation in lithium mediated nitrogen reduction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	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/D2TA07686A	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 Tort Romain, Bagger Alexander, Westhead Olivia, Kondo Yasuyuki, Khobnya Artem, Winiwarter Anna, Davies Bethan J. V., Walsh Aron, Katayama Yu, Yamada Yuki, Ryan Mary P., Titirici Maria-Magdalena, Stephens Ifan E. L.	4. 巻 13
2. 論文標題 Searching for the Rules of Electrochemical Nitrogen Fixation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 14513 ~ 14522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.3c03951	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 該当する

1. 著者名 KATAYAMA Yu	4. 巻 91
2. 論文標題 Operando Spectroscopy-Inspired Design of Electrochemical Interface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 101004 ~ 101004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.23-00059	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 Spry Matthew, Westhead Olivia, Tort Romain, Moss Benjamin, Katayama Yu, Titirici Maria-Magdalena, Stephens Ifan E. L., Bagger Alexander	4. 巻 8
2. 論文標題 Water Increases the Faradaic Selectivity of Li-Mediated Nitrogen Reduction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 1230 ~ 1235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.2c02792	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 該当する

1. 著者名 Liang Caiwu, Katayama Yu, Tao Yemin, Morinaga Asuka, Moss Benjamin, Celorrio Veronica, Ryan Mary, Stephens Ifan E. L., Durrant James R., Rao Reshma R.	4. 巻 146
2. 論文標題 Role of Electrolyte pH on Water Oxidation for Iridium Oxides	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 8928 ~ 8938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c12011	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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Asuka Morinaga, Keisuke Shirai, Hiromori Tsutsumi, Masaharu Nakayama, Yu Katayama
2. 発表標題 Activate N ₂ -selective Pathways for Electrochemical Ammonia Oxidation: Dual Active Site Tandem Catalysis in 2D Layered Nanospace
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Operando Analysis of the Electrochemical Process in Confined Space
3. 学会等名 Imperial College London, Electrochemistry Network Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Atomic Scale Understanding of the Electrochemical Interfaces: Operando Surface-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy (SEIRAS)
3. 学会等名 nanoGe Fall Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Revealing the Electrochemical Process in Confined Space by Operando Spectroscopy
3. 学会等名 MIT Special Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森永明日香、白井敬介、小野隆太郎、村上愛、堤宏守、藤井健太、中山雅晴、片山祐
2. 発表標題 表面増強赤外分光法による Ni(II)-Cu(II)共存ナノ空間でのアンモニア酸化反応のオペランド観測
3. 学会等名 第82回分析化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤 岬、小野 隆太郎、森永 明日香、近藤 靖幸、山田 裕貴、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 層状ナノ空間でのサブナノ Pd粒子の電気化学的合成
3. 学会等名 2022年電気化学秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤 岬、小野 隆太郎、森永 明日香、近藤 靖幸、山田 裕貴、片山 祐、堤 宏守
2. 発表標題 二次元層状空間をメタル化反応場とした微細 Pd 粒子の合成とその電気化学特性
3. 学会等名 2022年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野隆太郎、堤宏守、片山祐
2. 発表標題 層状 MnO ₂ 内における Pt 単原子の合成およびその電気化学特性
3. 学会等名 2022年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Probing Electrochemical Interfaces by Operando Spectroscopic Techniques
3. 学会等名 2023 CSC Canadian Chemistry Conference and Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Operando Spectroscopy to Probe Electrolyte-Electrode Interface: Role of Electrolyte-Adsorbate Interaction
3. 学会等名 ISE2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Katayama
2. 発表標題 Operando Spectroscopy to Probe Electrolyte-Electrode Interface: Implication in Energy Storage and Electrolysis Applications
3. 学会等名 MATSUS Spring 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者個人HP https://sites.google.com/view/electrocatalysislab/home</p>

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			