

人工光合成ユニットの戦略的共重合による高効率化学エネルギー生産系の創出

Strategic polymerization of Artificial Photosynthetic Units to Create Highly Efficient Chemical Energy Production Systems

研究代表者 東京工業大学理学院 教授 近藤 美欧*

Mio KONDO

Artificial photosynthesis replicates the processes of natural photosynthesis and involves oxidation and reduction half-reactions, both essential transformations of small molecules. As artificial photosynthesis holds the potential to address critical energy and environmental challenges facing humanity, developing catalysts for these transformations is of immense practical importance. In this research project, we set out to design highly efficient chemical energy production systems by strategically polymerizing artificial photosynthetic units. To enhance the efficiency of water oxidation, we developed a functionally integrated catalytic system featuring charge-transport sites positioned near the catalytically active center. Electrochemical polymerization of a metal-complex-based catalyst with carbazole groups produced the desired system, which demonstrated significantly higher activity for electrochemical water oxidation compared to the analogous molecular catalyst lacking charge-transport sites. Our findings strongly indicate that integrating catalytic centers with charge-transport functionalities offers substantial strategy for advancing high-performance water oxidation catalysts.

要旨

人工光合成の実現は、人類が直面するエネルギーおよび環境問題の解決策として注目を浴びている。この人工光合成反応は小分子の変換反応から構成されるため、これらの反応に対する良好な触媒の開発が要請される。本研究課題では、人工光合成ユニットの戦略的な共重合による効率的な小分子変換系の構築を目指した。カルバゾール基を含む金属錯体触媒を電気化学的に重合することで、機能統合型の触媒材料を得た本材料は、関連する他の触媒材料と比較し、高い活性を示した。

1. まえがき

昨今の環境問題やエネルギー問題の観点から、持続可能な社会の実現のためのクリーンなエネルギー生産の需要が高まっている。そして、天然の光合成を模倣し太陽光のエネルギーを化学エネルギー源へと変換することができる人工光合成反応への期待は極めて大きい。中でも、水の酸化反応($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$)は、地球上に豊富に存在する水を原料として、化学燃料などの生産に必要なプロトンや電子の供給源として利用できる反応であることから、極めて重要な反応である。天然においてこの反応は、光化学系 II と呼ばれるタンパク質が担っており、温和な条件下での高効率な反応が実現していることが知られている。活性中心の酸素発生複合体(oxygen evolving

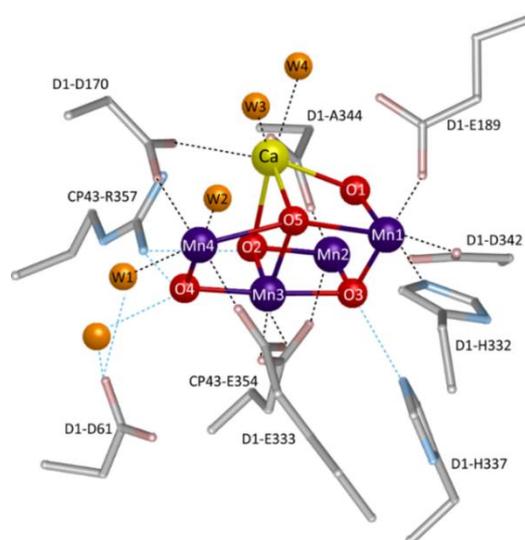


図1 OECの構造

complex: OEC, 図1)は、電荷やプロトン・基質である水を輸送するアミノ酸残基に囲まれており、このような複雑な構造が高効率な反応の鍵であると考えられる。一方、金属錯体を基盤とした水の酸化反応触媒系では、活性中心の構築や電極上への担持が主たる関心であり、OECの周囲の環境を模倣した例は非常に少ない。そこで本研究では、酸素発生反応の高効率化を目的に、触媒活性中心の周囲の環境に着目した新たな酸素発生触媒システムの構築について研究を行った。以下では研究の遂行により得られた成果についてその詳細を記述する。

* 大阪大学大学院工学研究科 准教授

2. ポリマー型触媒材料の開発

2.1 設計戦略

上述の通り、光合成系において酸化側の半反応である水の4電子酸化による酸素発生反応以後単に酸素発生反応と記述する)を担うユニットに着目すると、OECは電荷を輸送するアミノ酸残基(電荷伝達サイト)に囲まれており(図2)この電荷伝達サイトの存在が酸素発生反応の進行にあたって重要な役割を果たすことが知られている。

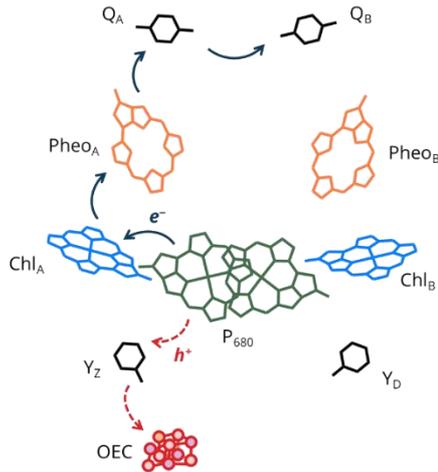


図2 OEC近傍の構造

しかしながら、人工的な小分子変換系の構築に関する既存研究では、触媒活性中心の構築に主眼が置かれ、活性中心近傍への電荷伝達サイトの合理的導入を果たした例は稀少である。したがって、活性中心近傍に機能性ユニットを戦略的に配置し、有用な電荷伝達サイトを構築することができれば、新たな小分子変換触媒の開発へと繋がるのが強く期待できる。以上の考察に基づき、図3aに示す錯体1を新規に設計・合成した。この錯体は、水の酸化反応触媒として機能するコバルトキューバン部位を有する。加えて、配位子として導入したカルバゾール部位は酸化的に二量化し、電荷移動能を有するビスカルバゾールを生成可能である。したがって、錯体1を電気化学的に重合することで活性中心と電荷伝達サイトとを併せ持つ機能統合型酸素発生触媒材料が構築できると期待される(図3b)。

2.2 錯体の合成

$\text{Co}_4\text{O}_4(\text{OAc})_4(\text{py})_4$ 錯体(-OAc=酢酸アニオン、py=ピリジン)とカルバゾール配位子との配位子置換反応を行うことによって、カルバゾール部位を有する

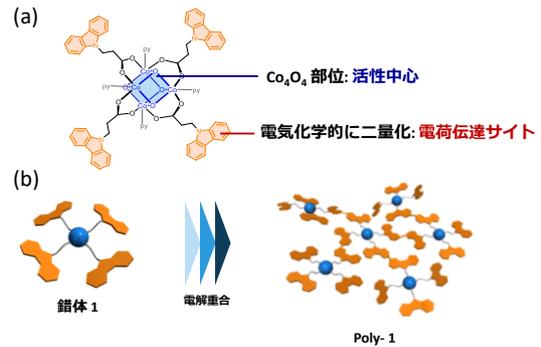


図3 本研究の戦略

Co 錯体 $\text{Co}_4\text{O}_4(\text{czCOO})_4(\text{py})_4$ (錯体1)を合成した。得られた錯体については、元素分析により同定した後、最終的には単結晶X線回折測定によりその分子構造を決定した(図4)。

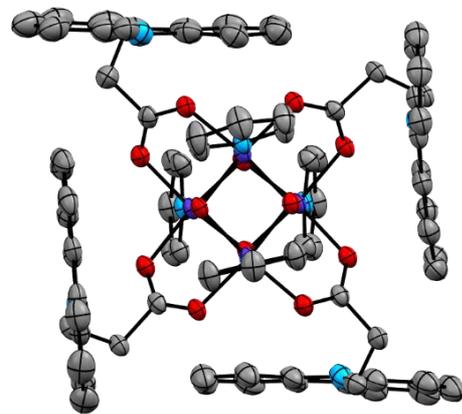


図4 $\text{Co}_4\text{O}_4(\text{czCOO})_4(\text{py})_4$ のORTEP図

2.3 電解重合によるポリマー膜形成

錯体1の0.1Mテトラ-*n*-ブチルアンモニウムヘキサフルオロリン酸塩-ジクロロメタン溶液中で電気化学測定を行ったところ、0.278 V (vs. ferrocene/ferrocenium (Fc/Fc⁺))付近にコバルトキューバン部位の酸化($\text{Co}^{\text{III}}_3\text{Co}^{\text{IV}}/\text{Co}^{\text{III}}_4$)に由来するピークが確認された。更に高電位側まで電位の掃引を行ったところ、カルバゾール部位の酸化と帰属できるピークが0.7 V付近に観測された。電位を負電位側に掃引したところ、新たなピークが0.323, 0.601 Vに出現し、ビスカルバゾール構造の生成が示唆された。更に掃引を繰り返すと、ビスカルバゾール部位に由来するピークの強度の増大が観測され、このことから酸化によりビスカルバゾール部位の二量化が進行することでポリマー上の物質が電極表面に堆積することが

示された。そこで、得られたポリマーの構造を決定するために複数の測定を実施した。まず、紫外-可視-近赤外吸収スペクトル測定においては、420 nm 付近にビスカルバゾールのジカチオン体、800 nm 付近にビスカルバゾールのモノカチオン体由来する吸収帯がそれぞれ観測され、ポリマーがビスカルバゾール骨格を有していることが示された。また、赤外吸収スペクトル測定においては、COO⁻非対称伸縮振動、ピリジン環の伸縮振動、コバルト-オキソ伸縮振動に由来する吸収が観測され(図5)、ポリマー中でキュバン構造が維持されていることが明らかになった。以上の結果より、錯体**1**の電解重合によりCoキュバン骨格とビスカルバゾール部位を有するポリマー(Poly-1)の合成が確認された。

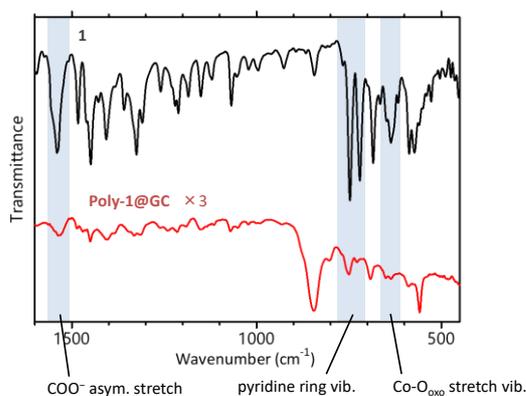


図5 Poly-1のFT-IR スペクトル

2.4 Poly-1の電荷移動特性ならびに触媒能

Poly-1の電荷輸送能を調査するために、Poly-1生成させた電極を作用電極として用いた電気化学的インピーダンス測定を実施した。その結果、同じコバルトキュバン型の活性中心の構造を持つポリマーでない錯体(Co₄O₄(PhCOO)₄(py)₄(PhCOOH = benzoic acid))と比較して小さな電荷移動抵抗値が得られ、Poly-1が高い電荷輸送能を持つことが判明した。引き続き、水の酸化反応に対する触媒能を調査するために、緩衝液中でPoly-1のサイクリックボルタメトリー測定を行った結果、中性条件で触媒反応を示す大幅な電流値の増加が観測された。引き続き、反応の生成物を定量するために、定電位電解(1.30 V (vs. Ag/AgCl))を実施した。1時間の定電位電解において、1.55 Cの電荷が流れ、反応終了後に気相をガスクロマトグラフィーで分析したところ、90%を超える

ファラデー効率で酸素の発生が確認された。また、H₂¹⁸Oを用いた同位体ラベリング実験の結果から、発生した酸素の酸素原子は水由来であることが確認され、水の酸化反応が触媒的に進行することが示された。同様の定電位電解実験をCo₄O₄(PhCOO)₄(py)₄を用いて行ったところ、酸素発生反応がほとんど進行しなかったことから、ビスカルバゾール部位の存在が触媒反応に不可欠であることが判明した。更に、Poly-1の触媒活性を他のコバルト含有型分子性触媒と比較すると、より低い酸素発生過電圧ならびに高いファラデー効率を示すことが明らかになった。以上の結果より、物質変換能と電子/ホール輸送能との機能統合を行うことが良好な酸素発生触媒材料の創出にあたって新たな戦略となることが示された。

3. ポリマー型触媒の汎用性拡大拡大

3.1 コバルトフタロシアニンを触媒活性点とするポリマー型触媒の開発

本研究では、コバルトフタロシアニン錯体(Co(czPc))に注目した。Co(czPc)は、(a)コバルトフタロシアニンコアと(b)9H-カルバゾール-9-エトキシ置換基の2つの機能単位から構成される。コバルトフタロシアニンは、CO₂還元、水素発生、水酸化の触媒として広く研究されている。また、前述の結果より、カルバゾール部分は電気化学的酸化によりビスカルバゾールユニットを形成し、電荷輸送サイトを構築可能であることが示されている。以上の理由から、Co(czPc)を電気化学的に重合すると、ポリマー型触媒poly-Co(czPc)が得られると期待した。

Co(czPc)を合成し、元素分析、マトリックス支援レーザー脱離イオン化質量分析、およびいくつかの分光測定によって特性評価を行った。更に得られた錯体について、電気化学的条件下で酸化すると、電極表面上にポリマーが堆積することが明らかになった。そこで、得られたポリマーについて各種測定を行うことで、分析した。まず、UV-Vis-NIR吸収測定の結果から、フタロシアニンコアがポリマー内で凝集していることが示唆された。次に、ビスカルバゾール基導入の効果を電気化学的インピーダンス測定で解析した。その結果、poly-Co(czPc)はドロップキャストしたCo(tBuPc)と比較して高い電荷輸送能を示した。また、poly-Co(czPc)は、中性緩衝液中で電

気化学的な水の酸化反応に対して触媒能を示し、生成物はガスクロマトグラフィーにより酸素であると決定された。さらに、poly-Co(czPc)は、非ポリマー系であるCo(tBuPc)よりも多量の生成物を生成し(図6)、ファラデー効率も高かった。このように、本研究は、分子系触媒に導電性骨格を導入することで、触媒能を向上させることができることを明らかにしており、この戦略は、さまざまな分子系触媒に広く適用可能である。また、本研究は、高い導電性を有する金属フタロシアニン修飾電極を得るための汎用的なアプローチを提供するものであり、様々な機能を有するスマートマテリアルの開発につながるものと期待される。

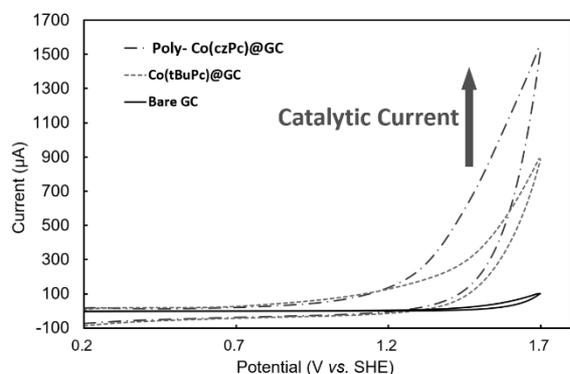


図6 poly-Co(czPc)の触媒能の比較

3.2 ルテニウム単核錯体を触媒活性点とするポリマー型触媒の開発

本研究では、2つの異なる機能性ユニット、すなわち (i) Ru(bda) (bda²⁻ = 2,2'-bipyridine-6,6'-dicarboxylate) コアと (ii) カルバゾール配位子を持つ新規金属錯体2を設計した。Ru(bda) コアを触媒中心として選択したのは、Sunと共同研究者が2012年に初めて報告したように、Ru(bda) コアが高活性な水酸化触媒であることが知られているからである。さらに、Ru(bda) コアの軸位置にイソキノリン配位子を配位させると、触媒活性をかなり高めることができる。したがって、錯体2の電気化学的重合により、電荷輸送サイトを持つ新規ルテニウム錯体ベースのポリマー触媒(Poly-2)が得られると期待した。

Ru錯体2を図7に示すように合成した。まず、9-[2-(4-ピリジニル)エチル]カルバゾール(czpy)を

カルバゾールの4-ビニルピリジンによるN-アルキル化によって合成した。その後、Ru(dmsO)₄Cl₂ (dmsO = ジメチルスルホキシド) を MeOH および Et₃N 中、N₂ 雰囲気下で 2,2'-bipyridine-6,6'-dicarboxylic acid (H₂bda) と反応させた。czpy の添加後、軸 dmsO 配位子の czpy による置換により錯体2が形成された。粗混合物をアルミナカラムクロマトグラフィーで精製し、再結晶した後、錯体2を収率34%で単離した。錯体2は、¹H NMR スペクトル、元素分析、MALDI-MS、および単結晶 X 線回折分析によって同定された。

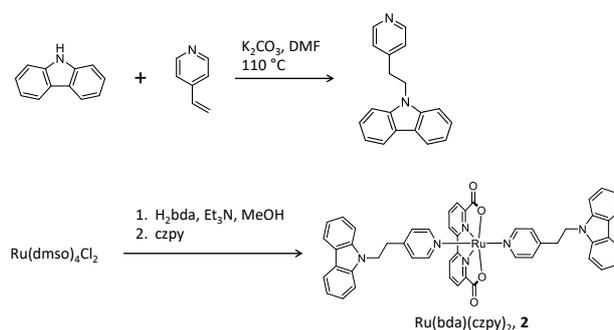


図7 錯体2の合成スキーム

錯体2の電気化学的挙動を、有機溶媒(1%トリフルオロ酢酸(TFA)存在下、MeCN中0.1Mテトラ-*n*-ブチルアンモニウム過塩素酸塩(TBAP))中でサイクリックボルタメトリー(CV)により調べた。TFAをCVの溶液に加えたのは、純粋なMeCN中では錯体2の溶解度が低いためである。TFAの添加により、MeCN中の錯体2の透明な黄色溶液が得られた。最初のスキャンでは、約0.7Vに大きなピークが観察され(vs. Fc/Fc⁺)、これはカルバゾール部分の酸化とそれに続く二量化に起因するものであった。リバーシブルスキャンとそれに続くスキャンでは、約0.5Vと0.8Vに2つの可逆的な酸化還元ピークが観察され、これらのピークはビスカルバゾール部分の2段階の酸化還元反応に起因すると考えられた。したがって、錯体2はカルバゾール部分の二量化を介した電気化学的酸化によって重合したことが示唆された。

poly-2の形成をさらに確認するために、UV-Vis-NIRスペクトル測定を実施した。透明電極(ITOプレート)を作用電極として、0.1M TBAPと1% TFAを含むMeCN中の0.2mMの錯体2溶液を用い、定電位(1.3V vs Ag/Ag⁺)を30~150秒間印加した。電解後の電極(2@ITO)のUV-Vis-NIR吸収スペクトルを図8に示す。いずれの場合も、約420nmを中心

とするバンドと約 800 nm のブロードバンドが観測され、その強度は電解時間が長くなるにつれて徐々に増加した。この長波長バンドは、主に混合原子価ビスカルバゾールユニットの間隔電荷移動遷移、または Robin-Day クラス III 系の場合の電荷共鳴に起因すると考えられる。これらの結果は、電気化学的酸化によるビスカルバゾール部分の形成と一致する。

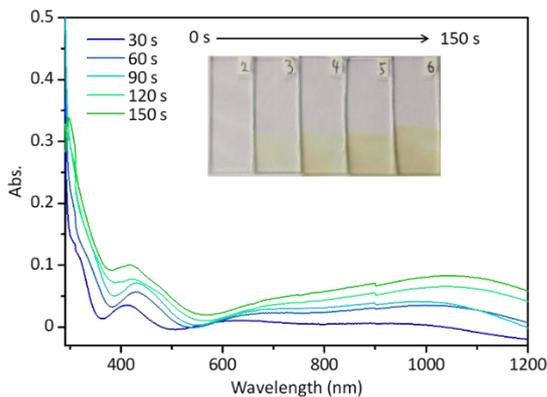


図8 poly-2 の紫外可視吸収スペクトル

poly-2 は FT-IR 分光法によっても分析した。図 9 に示すように、重合前 (2) と重合後 (2@ITO) では、配位 COO⁻ とピリジンの振動モード (1600 cm⁻¹) とピリジンの環振動モード (~750 cm⁻¹) に対応する吸収バンドが観測された。Poly-2 の場合、1100cm⁻¹ に ClO₄⁻ に由来する吸収バンドも観測された。これらのデータは、錯体 2 の触媒中心の構造が重合後も維持されていたことを示唆している。以上の結果より、ビスカルバゾール部分と Ru(bda) コアの両方を持つ重合体 (Poly-2) の形成が確認された。Poly-1 の前駆体

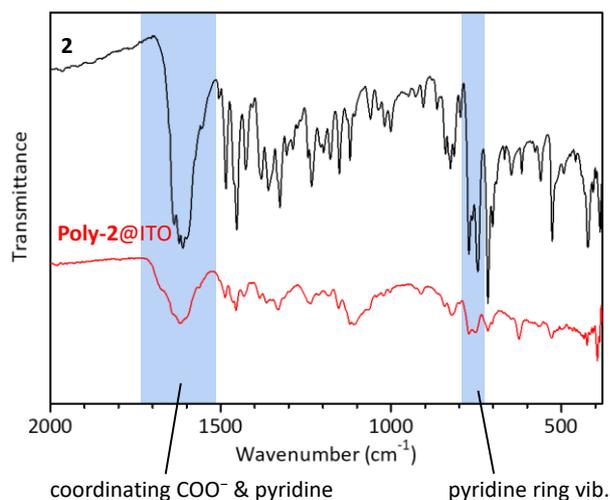


図9 poly-2 の FT-IR スペクトル

にはカルバゾール部位が 4 つ存在するのに対し、Poly-2 の前駆体にはカルバゾール部位が 2 つしか存在しないため、Poly-1 とは異なり、Poly-2 の構造は一次元高分子であると考えられる。

Poly-2 の電荷移動能を明らかにするために、未修飾のグラッシーカーボン(GC)電極と Poly-2 で修飾した GC 電極(Poly-2@GC)、そしてビスカルバゾール部位を持たない錯体、Ru(bda)(iqPh)₂ で修飾した GC 電極 (Ru(bda)(iqPh)₂@GC) について電気化学インピーダンス分光法(EIS)測定を水性媒体中で行った。堆積した触媒の量は、Poly-2 と Ru(bda)(iqPh)₂ の間でほぼ同じであった (20 nmol)。図 10 は、バイアス電位 1.50 V vs RHE で測定した EIS スペクトルである。ナイキストプロットの半円の直径は、bare GC, Ru(bda)(iqPh)₂@GC, Poly-2@GC の順に小さくなった。等価回路へのフィッティングにより得られた電荷移動抵抗 (RCT) 値は、bare GC, Ru(bda)(iqPh)₂@GC, Poly-2@GC で 4908, 2000, 190.8 Ω であった。特に、Poly-2@GC の RCT 値は、bare GC の 3.8%、Ru(bda)(iqPh)₂@GC の 9.6%に過ぎなかった。これらの結果は、Poly-2 に埋め込まれたビスカルバゾール部分によって電荷移動能力が大幅に向上したことを明確に示している。

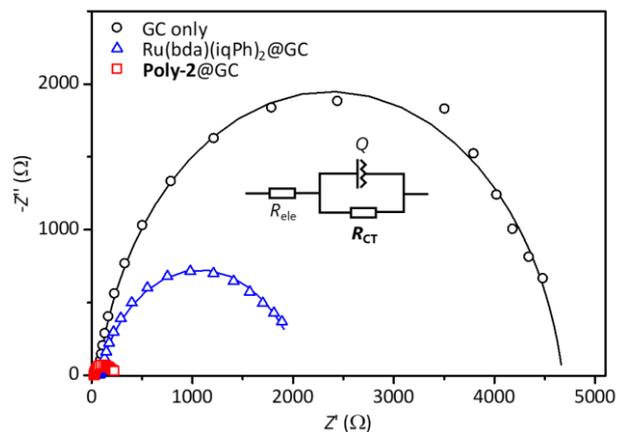


図10 EIS 測定の結果

Poly-2@GC の触媒活性を調べるため、電気化学的測定を行った。図 11a は、リン酸緩衝液 (pH = 7.0) 中における Poly-2@GC の矩形波ボルタンメトリー (SWV) の結果を示している。SWV ピークで区切られた領域は、Ru^{II}, Ru^{III}, Ru^{IV}, および Ru^V に帰属され、

Ru (bda) コアが Poly-2 に保持されていることを示している。Poly-2@GC, Ru(bda)(iqPh)₂@GC, および bare GC のサイクリックボルタンメトリーにおいて, Poly-2@GC の ~1.3 V (vs. RHE) 以上で最大の触媒電流が観測された。さらに, Poly-2@GC のリニアスイープボルタンメトリー (LSV) を 5 mV s⁻¹ のスキャンレートで行った (図 11b)。触媒電流は 1.3 V 以上 (vs. RHE) で明瞭に観察され, オンセット電位と家電圧 (η) は 1.31 V と 493 mV と推定された。

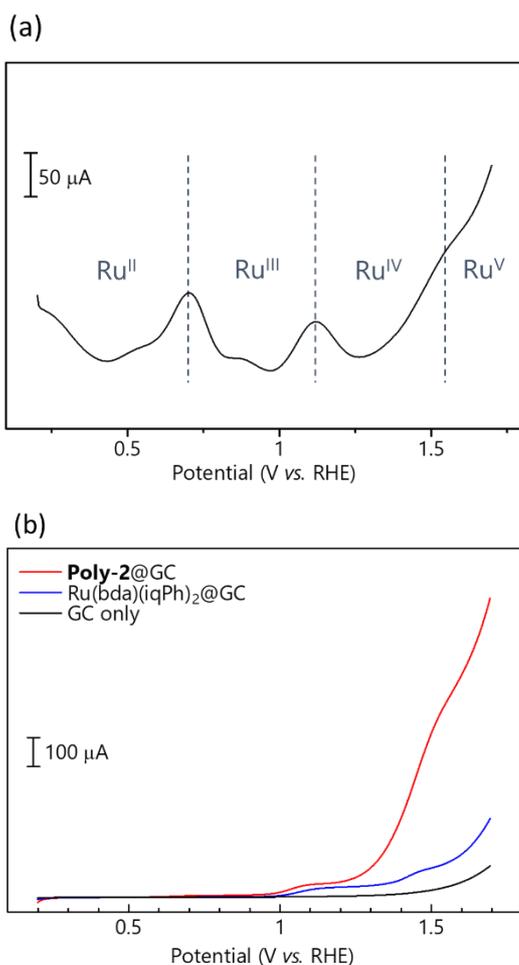


図 11 SWV ならびに LSV 測定の結果

最後に定電位電解を行い, Poly-2 の触媒能を評価した。1.50 V (vs. RHE) で Poly-2@GC を 1 時間電解した結果, 1.28C の電荷が流れ (図 12), ガスクロマトグラフィーで検出された主要生成物として 3.01 μ mol の O₂ が生成した。4 電子過程に基づく反応の最大ファラデー効率は 90.1% と推定された。これらの結果は, poly-2 が電極触媒的な水の酸化を促

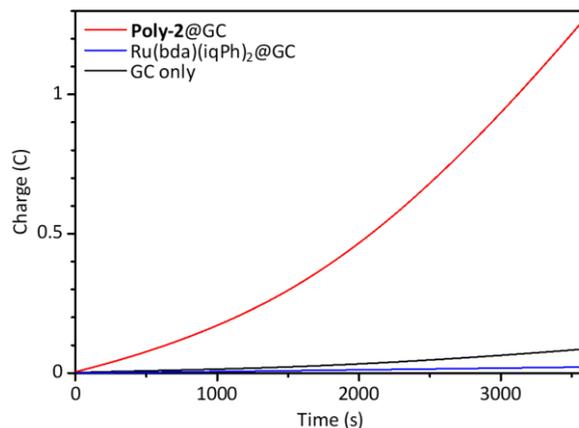


図 12 定電位電解の結果

進することを示している。さらに, ビスカルバゾール骨格を持たない錯体 Ru(bda)(iqPh)₂@GC で電極を修飾した場合, 同じ実験条件で触媒活性はほとんど抑制された (図 12)。この結果は, EIS の測定結果と合わせて, 効率的な触媒反応を達成するためには, 電荷輸送体としてのビスカルバゾール部位と反応中心としての Ru(bda) 部位の組み合わせが不可欠であることを強く示唆している (図 13)。したがって, 電荷輸送ユニットを触媒中心の近くに組み込む戦略は, さまざまな金属錯体触媒に応用できる可能性があることが示された。

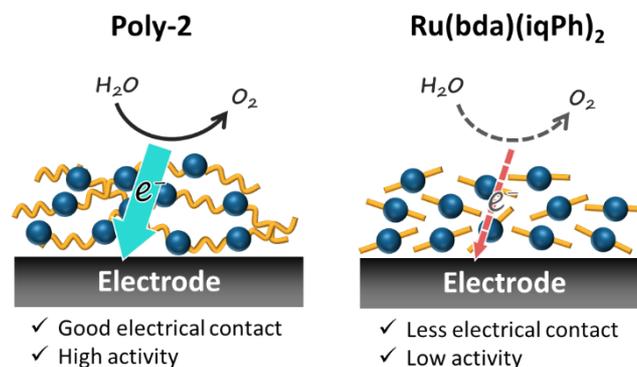


図 12 本研究の意義

以上の結果から, さまざまな触媒ユニットを用いて, ポリマー型電極触媒の開発に成功した。今回開発したポリマー型電極触媒は, その骨格中に導入したビスカルバゾール部位に由来する電荷伝達能の発現により, ポリマー骨格を持たない触媒材料と比較して飛躍的に活性が向上することも見出された。以上より, 電荷サイトと触媒活性中心の統合が極めて有力な戦略となることが実証された。

発表論文

- [1] Hikaru Iwami, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Fabrication of a Function-Integrated Water Oxidation Catalyst by Electrochemical Polymerization of Ruthenium Complexes"
ChemElectroChem, **2022**, *9*, 52-58. (Selected as a Front Cover Picture)
- [2] Kento Kosugi, Maho Imai, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Synthesis and Electrocatalytic CO₂ Reduction Activity of an Iron Porphyrin Complex Bearing a Hydroquinone Moiety"
Chem. Lett., **2022**, *51*, 224-226.
- [3] Kento Kosugi, Hina Kashima, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Copper(II) tetrakis(pentafluorophenyl)porphyrin: Highly Active Copper-based Molecular Catalyst for Electrochemical CO₂ Reduction"
Chem. Commun., **2022**, *58*, 2975-2978. (Selected as a Back Cover Picture)
- [4] Shangxing Li, Hikaru Iwami, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Electrochemical Polymerization of a Carbazole-Tethered Cobalt Phthalocyanine for Electrocatalytic Water Oxidation"
ChemNanoMat, **2022**, *8*, e202200028. (Selected as a Front Cover Picture, featured in virtual issue, Asian Women in Materials Chemistry and Nanoscience)
- [5] Takuya Akai, **Mio Kondo**, Yutaka Saga, and Shigeyuki Masaoka*
"Photochemical hydrogen production based on HCOOH/CO₂ cycle promoted by pentanuclear cobalt complex"
Chem. Commun., **2022**, *58*, 3755-3758. (Selected as a Back Cover Picture)
- [6] Taito Watanabe, Yutaka Saga*, Kento Kosugi, Hikaru Iwami, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Visible Light-Driven CO₂ Reduction with a Ru Polypyridyl Complex Bearing an *N*-Heterocyclic Carbene Moiety"
Chem. Commun., **2022**, *58*, 5229-5232. (Selected as a Back Cover Picture)
- [7] **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka
"Function-Integrated Catalytic Systems for Small-Molecule Conversion: Advances and Perspectives"
Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan, **2022**, *80(11)*, 1055-1064.
- [8] Misa Tomoda †, **Mio Kondo †**, Hitoshi Izu, and Shigeyuki Masaoka* (†equal contribution)
"Brønsted Acid/Base Site Isolated in a Pentanuclear Scaffold"
Chem. Eur. J., **2023**, *29*, e202203253. (Selected as a Front Cover Picture, and Cover Profile)
- [9] Takuya Akai, Yumi Iwamura, **Mio Kondo**, Yutaka Saga, and Shigeyuki Masaoka*
"Metal Ion Substitution in a Pentanuclear Scaffold Provides an Efficient Catalyst for a HCOOH/CO₂ Cycle"
Chem. Lett., **2023**, *52*, 211-214.
- [10] Kento Kosugi, Chiraru Akatsuka, Hikaru Iwami, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Iron-Complex-Based Supramolecular Framework Catalyst for Visible-Light-Driven CO₂ Reduction"
J. Am. Chem. Soc., **2023**, *145*, *19*, 10451-10457. (Selected as a Supplementary Cover Picture)
- [11] Masaki Kitada, Zi Lang Goo, Kento Kosugi, Yutaka Saga*, Nobuto Yoshinari, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Accumulation of Re-Complex-Based Catalytic Centers in Metal-Organic Cages for Photochemical CO₂ Reduction/Insertion"
Chem. Lett., **2023**, *52*, 512-515.
- [12] Maho Imai, Kento Kosugi, Yutaka Saga, **Mio Kondo***, and Shigeyuki Masaoka*
"Introducing proton/electron mediators enhances the catalytic ability of an iron porphyrin complex for photochemical CO₂ reduction"
Chem. Commun., **2023**, *59*, 10741-10744. (Selected as a Back Cover Picture)
- [13] Yutaka Saga*, Yusuke Nakayama, Taito Watanabe, **Mio Kondo**, and Shigeyuki Masaoka*
"Visible-Light-Driven Hydroacylation of Unactivated Alkenes Using Readily Available Acyl Donors"
Org. Lett., **2023**, *25*, 1136-1141.
- [14] Yuma Morii, Taito Watanabe, Yutaka Saga*, Tetsuya Kambe, **Mio Kondo**, and Shigeyuki Masaoka*
"Electrochemical C(sp³)-H Functionalization Using

- Acetic Acid as a Hydrogen Atom Transfer Reagent”
ChemElectroChem, **2024**, *11*, e20240006.
- [15] Taito Watanabe, Phurinat Lorwongkamol, Yutaka Saga*, Kento Kosugi, Tetsuya Kambe, **Mio Kondo**, and Shigeyuki Masaoka*
“Photocatalytic Three-Component Acylcarboxylation of Alkenes with CO₂”
Org. Lett., **2024**, *26*, 6491-6496.
- [16] Hitoshi Izu †, **Mio Kondo** †, Masaya Okamura, Misa Tomoda, Sze Koon Lee, Takuya Akai, Vijayendran K. K. Praneeth, Mari Kanaike, Satoshi Kawata, and Shigeyuki Masaoka* († equal contribution)
“Precise Manipulation of Electron Transfers in Clustered Five Redox Sites”
Angew. Chem. Int. Ed., **2024**, e202408514.
- 口頭発表、受賞等
- [1] **近藤 美歌**
“分子集積に立脚した小分子変換触媒の開発”
産研 次世代材料セミナー 金属有機融合材料に関する最新研究紹介と社会実装に向けた将来展望
大阪大学、吹田キャンパス、2022年8月18日
- [2] **Mio Kondo**
“Construction of Catalysts for Small Molecule Conversions based on the Control of Reaction Fields”
JSCC 72nd Annual Conference, Symposium S5, “Precisely designed metal complex environment for new functions”
九州大学、伊都キャンパス、2022年9月26日
- [3] **近藤 美歌**
“Function-Integration Strategy for Small Molecule Conversions”
2022年度ナノ学会(ナノ機能・応用部会)シンポジウム
彦根勤労会館、2022年12月10日
- [4] **近藤 美歌**
“精密電子移動制御に立脚した酸素発生触媒の開発”
日本化学会第103回春季年会 シンポジウム特別企画| サステイナブル・機能レドックス化学の未来
東京理科大学 野田キャンパス、2023年3月22日
- [5] **近藤美歌**
“機能統合戦略に基づく小分子変換触媒材料の構築”
産総研 第96回触媒化学融合研究センター講演会
産総研 第3/第4会議室及びTeams 配信、2023年4月12日
- [6] **近藤美歌**
“金属錯体の集積に立脚した小分子酸化還元のための触媒材料の開発”
錯体化学若手の会 関東支部 2023年度 後期勉強会
東京工業大学 大岡山キャンパス、2023年12月2日
- [7] **近藤美歌**
“多核金属錯体への導電性間隙導入による高活性酸素発生触媒系の創出”
学術変革領域研究A「超セラミックス」第3回公開シンポジウム
京都大学 吉田キャンパス、2024年1月24日
- [8] **近藤美歌**
“触媒分子の戦略的集積に基づく小分子変換材料の創出”
生物無機化学シンポジウム2024
千里朝日阪急ビル A&H ホール、2024年1月31日
- [9] **近藤美歌**
“触媒分子の戦略的集積に立脚した小分子変換材料の創出”
2024年 光化学討論会 シンポジウム「光を利用した反応の開拓・制御・計測・活用の最前線」
九州大学 伊都キャンパス、2024年9月25日