

令和 4 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2021
課題番号：18K05150
研究課題名(和文) 金属錯体への特異的なプロトン共役電子移動により促進される多電子還元反応系の構築

研究課題名(英文) Development of Molecular Catalysts Promoting Multi-electron Reduction Reactions via Unique Proton-coupled Electron Transfer Pathways

研究代表者
山内 幸正 (Yamauchi, Kosei)
九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：50631769
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：金属中心並びに配位子中心で促進される特異なプロトン共役電子移動(PCET)の反応制御を目的として研究を行った。具体的には、配位子中心PCETを促進することにより、史上最低の低過電圧下(173 mV)で水素生成を促進する反応系を創出に成功した。量子化学計算を行うことで、配位子中心PCET型水素生成の反応制御因子を解き明かした。また、高度な電気化学反応解析を行い、実験的に反応機構を解明した。さらに、金属中心PCETを経て水素生成を促進する新規光反応系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
プロトンと電子が協奏的に移動するプロトン共役電子移動(PCET)は、生体系の重要反応を担い、これまで多くの研究がなされてきた。一方、PCETを効果的に活用し、高効率な人工光合成系を構築した研究例はほとんどない。本研究では、機能性配位子上で進行する特異なPCETを巧みに制御することにより水素生成錯体触媒の過電圧を劇的に低下させることに成功した。また、機能性錯体上で進行するPCET過程の反応制御因子を実験的並びに計算化学的に解き明かした。このように、特異なPCETを経由し水素生成反応を促進する分子性触媒について多角的な研究を展開し、同分野の発展に貢献する種々の価値ある成果を収めた。

研究成果の概要(英文)：We studied the unique proton-coupled electron transfer (PCET) processes which are promoted at either the metal or ligand center. Specifically, we succeeded in developing the new molecular catalyst which promotes hydrogen evolution from water with the exceptionally overpotential of 173 mV by enhancing PCET at the ligand center. Furthermore, DFT calculations were performed to elucidate the factors controlling the ligand-centered PCET leading to hydrogen evolution from water. In addition, advanced electrochemical reaction analysis was performed to experimentally elucidate the reaction mechanism. On the other hand, we developed the new photochemical system which promotes hydrogen evolution from water via metal-centered PCET.

研究分野：錯体化学

キーワード：人工光合成 プロトン共役電子移動(PCET) 錯体触媒 水素生成

1. 研究開始当初の背景

今後急増が予測されるエネルギー需要を賄う有力な技術として、太陽光エネルギーを化学エネルギーへと変換する人工光合成に大きな期待が寄せられている。その中で、天然の光合成で行われているように可視光を駆動力に水から電子を取り出し、水や二酸化炭素を還元し水素、一酸化炭素、ギ酸、またはメタノールなどの還元生成物を得る反応系の構築が理想とされる。そのような背景のもと、研究代表者らは金属錯体触媒の多電子還元機能に興味を持ち研究を推進しており、最も理想的な系とされる完全水溶液系において高い安定性と優れた水素生成機能を有する錯体触媒の創出に成功した。

具体的には、白金錯体触媒やコバルト錯体触媒が、1電子及び1プロトンが M(II) (M = Pt, Co) 中心へ協奏的に移動する金属中心プロトン共役電子移動 (Proton Coupled-Electron Transfer: PCET) により生成する M(III)-H (ヒドリド) 種を経由する特異的な反応機構で水素が生成することを明らかにした。他方、比較的低い過電圧下 (330 mV) で水からの水素生成触媒反応を促進するニッケル錯体が、配位子中心 PCET 過程を経由し水素生成を促進することが見出された。

2. 研究の目的

本研究では、上述した特異な PCET の反応制御を目的として研究を行った。具体的には、配位子中心 PCET を促進することにより、より低過電圧下で水素生成を促進する反応系を創出した。また、高度な電気化学反応解析を行い、実験的な反応機構の解明に取り組んだ。さらに、金属中心 PCET を経て水素生成を促進する新規光反応系を構築した。

3. 研究の方法

研究に用いた錯体触媒は、文献法または新規の手法により合成を行い、その同定には、¹H NMR、元素分析、ESI-TOF MS、単結晶 X 線構造解析などを用いた。合成した金属錯体触媒については各種測定によりその触媒機能を評価した。また、電気化学的手法を用い水素生成過電圧の算出等を行った。

4. 研究成果

a) 新規低過電圧駆動型水素生成触媒の開発

PCET を促進するために π 共役系、並びに多数のプロトン受容部位を有する機能性配位子を基盤とする新規ニッケル錯体触媒 ($[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$, $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$) を合成し、その電気化学的水素生成触媒特性の評価をおこなった。興味深いことに、pH=9 の水溶液において図 1 に示す $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$ (pypzdt = pyrido-[2,3-*b*]pyrazine-2,3-dithiolate) および $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$ (qdt = quinoxaline-2,3-dithiolate) は、それぞれ 173 mV および 227 mV という極めて低い過電圧下で水素生成を促進することが見出された。また、 $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$ の水溶液に対し印加過電圧 280 mV で定電位電解を行い生成した水素を定量したところ、本錯体は 20 時間にわたって持続的に水素を生成する高耐久の分子性触媒であることが判明した。そのファラデー効率と触媒回転数 (TON) は 97% と 1400 と見積もられ、優れた水素生成触媒特性が示された。一方、配位子 (pypzdtH₂) のみの存在下で同様の定電位電解を行ったところ、水素の生成は観測されず、触媒的な水素生成に対しニッケル中心が重要な役割を担うことが確認された。次にそれぞれの錯体触媒に関して Pourbaix 図を作成したところ、共に 1 電子/1 プロトン移動に基づく配位子中心 PCET 過程が水素生成のトリガーとなることが明らかにされた (図 1 A)。

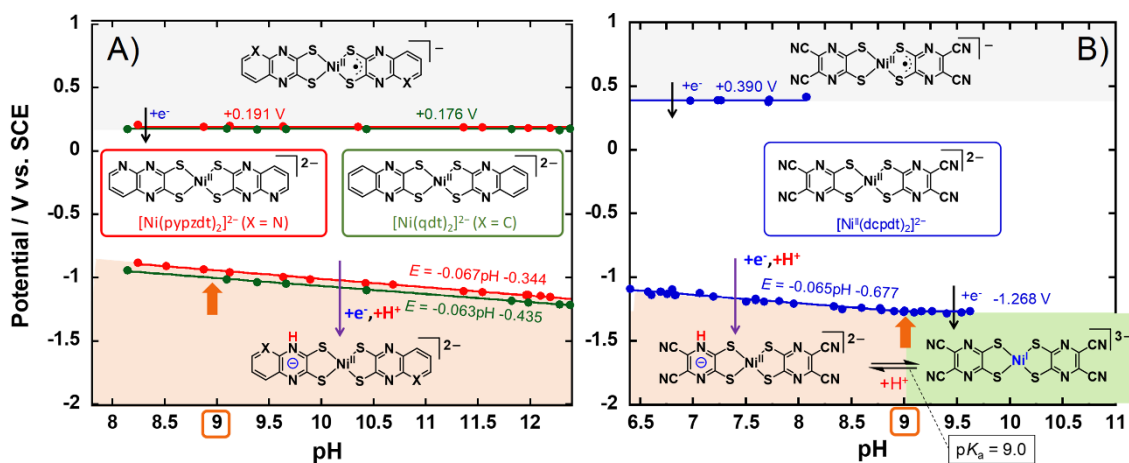


図 1. A) $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$, $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$, 並びに B) $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ の電位-pH 図 (プールのベイク図)

また、以前報告した $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ (過電圧 330 mV) のプールベイ図 (図 1 B) と比較すると、オレンジ色の矢印で示す pH = 9 の条件で、 $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$, $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$ はより正側の電位領域で配位子中心 PCET が促進されることが判明した。実際、 $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$ と $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$ がより低過電圧下で水素生成を促進することから、 π 系の拡張が還元電位の正電位シフトを招き、低過電圧化につながったと結論づけた。さらに、 $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$ と $[\text{Ni}(\text{qdt})_2]^{2-}$ の比較を行うと、より多くのプロトンメディエーターを導入した $[\text{Ni}(\text{pypzdt})_2]^{2-}$ がより正側の領域で配位子中心 PCET を駆動し、実際に過電圧も低いことが理解できる。このようにプロトン受容部位/ヘテロ原子の導入が、配位子中心 PCET の促進につながり、さらなる低過電圧化を可能にすることを今回初めて明らかにした。

以上、従来の系から π 系の拡張、並びにプロトン受容部位の導入を行うことで配位子中心 PCET を促進し、世界最低の過電圧下で水素生成を駆動する分子触媒を創製することに成功した。

b) 低過電圧駆動型水素生成触媒の機構解明

$[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ の触媒反応機構について、DFT 計算を用い詳細な解析を行った。具体的には、 $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ の還元過程、及びプロトン付加過程のエネルギーを計算し、それぞれの素過程における酸化還元電位と酸解離定数 (pK_a) を見積もった (図 2)。その結果、 $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ は水素生成が実際に進行する電位、及び pH 条件において、逐次的な配位子中心 PCET を駆動し、3つのプロトンがピラジンの窒素ドナー上に付加する 2 電子還元/3プロトン付加種を形成することが示された。また後続の配位子からニッケル中心への吸熱的な分子内 PCET によりニッケル(III)ヒドリド遷移状態を生成し、その後発熱的に水素を生成する (-8.0 kcal/mol) ことを突き止めた。本反応の活性化障壁は 16.6 kcal/mol と算出され、電気化学実験を通して得られた水素生成の反応速度 (16.4 kcal/mol) と良い一致を示した。すなわち、DFT 計算で得られた遷移状態を経た水素生成反応が、電気化学実験条件下においても進行することを強く示唆する計算化学結果を得るに至った。本章は、 $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ が、逐次的な配位子中心 PCET を駆動した後進行する配位子から中心金属への分子内 PCET による金属ヒドリド種の形成を経由し水素生成を促進する特異的な反応系であることを明らかにした。

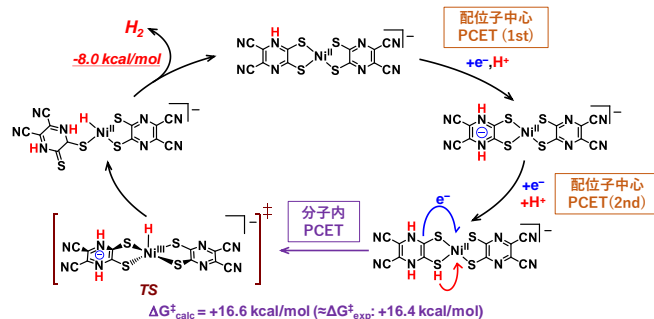


図 2. $[\text{Ni}(\text{dcpdt})_2]^{2-}$ の推定触媒反応機構

c) 水素生成触媒反応の電気化学的解析

ヘテロレプティックニッケル錯体 $\text{Ni}(\text{bpy})(\text{dcbdt})$ ($\text{bpy} = 2,2'$ -bipyridine, $\text{dcbdt} = 4,5$ -dicyanobenzene-1,2-dithiolate; 図 3) を合成し、その有機溶媒中における水素生成触媒機能について詳細な研究を展開した。まず、酸を含む DMF 中で $\text{Ni}(\text{bpy})(\text{dcbdt})$ のサイクリックボルタメトリーを行ったところ、本錯体の第二還元過程に連動した触媒電流が観測された。次に、DFT 計算により詳細な反応機構解析を行った結果、 $\text{Ni}(\text{bpy})(\text{dcbdt})$ の第二還元過程は bpy 配位子部位への還元であると帰属されるとともに、ニッケル(II)ヒドリド形成を高速に駆動する配位子中心 PCET 過程であることを見出した (図 3)。すなわちこの水素生成過程は、EECC 機構で進行することがわかる。一方、詳細な電気化学解析を行い水素生成反応における各種素過程の速度パラメーターを決定したところ、水素生成過電圧の低下が配位子中心 PCET の高速化によりもたらされることを明らかにした。同様の解析をホモレプティックニッケル錯体 $[\text{Ni}(\text{dcbdt})_2]^{2-}$ で行ったところ、 $[\text{Ni}(\text{dcbdt})_2]^{2-}$ も配位子中心 PCET によりヒドリド中間種を形成することを確認した。一方、この反応過程が触媒反応の律速段階となり、それにより水素生成過電圧が大きく上昇することが考察された。さらなる計算化学的解析により、触媒反応に先駆けて生成する $\text{Ni}(\text{bpy})(\text{dcbdt})$ の一電子還元種におけるニッケルと配位子間の非結合性軌道への電子の局在化が、第二還元過程と連動し進行する配位子中心 PCET におけるプロトン付加速度を上昇させることを突き止めた。

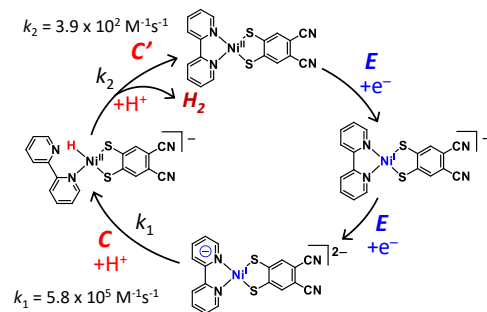
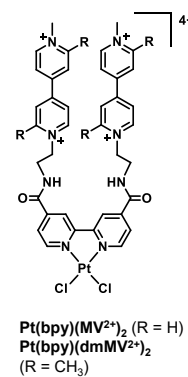


図 3. $\text{Ni}(\text{bpy})(\text{dcbdt})$ の推定触媒反応機構

d) 水素生成触媒反応の電気化学的解析

金属中心 PCET を駆動する白金錯体を基盤とする分子性光触媒について、導入する電子貯蔵部位の酸化還元特性を制御することで光水素生成反応の高効率化を達成し、その反応機構を詳細

に解き明かすことにも成功した。電子貯蔵部位として MV^{2+} ユニットを分子内に有する $Pt(bpy)(MV^{2+})_2$ は二段階の光化学過程に基づき二電子還元種を形成する。一方、この際安定な分子内ラジカル対を形成することで水素生成に対する反応駆動力を失い、結果としてもう一段階の光化学過程を経て進行する三電子還元種の形成が水素生成反応に必要なことが見出されていた。そこで本研究では、より優れた還元能を持つ $dmMV^{2+}$ ユニットを有する $Pt(bpy)(dmMV^{2+})_2$ を合成し、その光水素生成触媒機能を評価した。その結果、 $Pt(bpy)(dmMV^{2+})_2$ は $Pt(bpy)(MV^{2+})_2$ よりも高効率に光水素生成反応を駆動することを見出した。また光照射後の暗所下における反応挙動を詳細に解析することにより、 $Pt(bpy)(MV^{2+})_2$ では進行しなかった $Pt(bpy)(dmMV^{2+})_2$ の二電子還元種による熱的な水素生成が進行することを明らかにした。具体的には、この二電子還元種による熱的な水素生成と並行し光化学的に進行する三電子還元種による水素生成がほぼ同等の速度で進行することが明らかとなった。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yatsuzuka Koichi, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 57
2. 論文標題 Redox tuning in Pt(bpy)-viologen catalyst-acceptor dyads enabling photocatalytic hydrogen evolution from water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 5183 ~ 5186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CC00903F	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 Yatsuzuka Koichi, Yamauchi Kosei, Kawano Ken, Ozawa Hironobu, Sakai Ken	4. 巻 5
2. 論文標題 Improving the overall performance of photochemical H ₂ evolution catalyzed by the Co-NHC complex via the redox tuning of electron relays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sustainable Energy & Fuels	6. 最初と最後の頁 740 ~ 749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SE01597K	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 El-Ghamry Hoda A., Yamauchi Kosei, Sakai Ken, Farghaly Thoraya A.	4. 巻 516
2. 論文標題 Unexpected structure of enamione Pd(II) complex in comparison with Cu(II) complex: Synthesis, characterization, DNA binding and antitumor activity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Inorganica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 120117 ~ 120117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ica.2020.120117	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 Call Arnau, Cibian Mihaela, Yamamoto Keiya, Nakazono Takashi, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 9
2. 論文標題 Highly Efficient and Selective Photocatalytic CO ₂ Reduction to CO in Water by a Cobalt Porphyrin Molecular Catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 4867 ~ 4874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.8b04975	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 Wang Jia Wei, Yamauchi Kosei, Huang Hai Hua, Sun Jia Kai, Luo Zhi Mei, Zhong Di Chang, Lu Tong Bu, Sakai Ken	4. 巻 58
2. 論文標題 A Molecular Cobalt Hydrogen Evolution Catalyst Showing High Activity and Outstanding Tolerance to CO and O ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 10923 ~ 10927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201904578	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 Sakaguchi Yuto, Call Arnau, Cibian Mihaela, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 55
2. 論文標題 An earth-abundant system for light-driven CO ₂ reduction to CO using a pyridinophane iron catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 8552 ~ 8555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC04191E	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 Zhang Xian, Cibian Mihaela, Call Arnau, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 9
2. 論文標題 Photochemical CO ₂ Reduction Driven by Water-Soluble Copper(I) Photosensitizer with the Catalysis Accelerated by Multi-Electron Chargeable Cobalt Porphyrin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 11263 ~ 11273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b04023	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 Hamaguchi Tomohiko, Kai Keisuke, Ando Isao, Kawano Ken, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 505
2. 論文標題 A dinuclear nickel catalyst based on metal-metal cooperation for electrochemical hydrogen production	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 119498 ~ 119498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ica.2020.119498	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 Aimoto Yutaro, Koshiba Keita, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 54
2. 論文標題 A family of molecular nickel hydrogen evolution catalysts providing tunable overpotentials using ligand-centered proton-coupled electron transfer paths	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 12820 ~ 12823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC07467D	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 Koshiba Keita, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 48
2. 論文標題 Consecutive ligand-based PCET processes affording a doubly reduced nickel pyrazinedithiolate which transforms into a metal hydride required to evolve H ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 635 ~ 640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8DT04497J	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 Koshiba Keita, Yamauchi Kosei, Sakai Ken	4. 巻 -
2. 論文標題 Ligand based PCET Reduction in a Heteroleptic Ni(bpy)(dithiolene) Electrocatalyst Giving Rise to Higher Metal Basicity Required for Hydrogen Evolution	5. 発行年 2019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.201900400	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 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 山内幸正
2. 発表標題 錯体化学で理解する人工光合成反応過程
3. 学会等名 錯体化学若手の会第1回ウェブ勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosei Yamauchi, Toshihiro Koga, Yasunobu Wakafuji, Ken Sakai
2. 発表標題 Electrochemical CO ₂ Reduction to CO with Low Overpotentials by Co-NHC Complexes
3. 学会等名 錯体化学会第70回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosei Yamauchi
2. 発表標題 Nickel(II) Dithiolate Molecular Catalysts Promoting Hydrogen Evolution from Water with Low Overpotentials
3. 学会等名 International Conference on Photocatalysis and Photoenergy 2019 (ICoPP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Yamauchi
2. 発表標題 Electrochemical Hydrogen Evolution from Water Promoted by Metal Complexes
3. 学会等名 New Trends in Photophysics and Photochemistry and their Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内幸正
2. 発表標題 金属錯体触媒による低過電圧水素生成反応
3. 学会等名 九州錯体化学懇談会50周年記念シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei YAMAUCHI, Keita KOSHIBA, Yutaro AIMOTO, Ken SAKAI
2. 発表標題 Molecular Catalysts Promoting Hydrogen Production from Water via Unique Proton-coupled Electron Transfer Processes
3. 学会等名 錯体化学会第69回討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀俊弘、山内幸正、酒井 健
2. 発表標題 コバルトNHC錯体を触媒とした二酸化炭素還元反応
3. 学会等名 錯体化学会第69回討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Yamauchi, Keita Koshiba, Yutaro Aimoto, Ken Sakai
2. 発表標題 MOLECULAR CATALYSTS PROMOTING HYDROGEN EVOLUTION FROM WATER VIA THE LIGAND-BASED PROTON-COUPLED ELECTRON TRANSFER PROCESSES
3. 学会等名 International Conference on Artificial Photosynthesis-2019 (ICARP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamauchi, K. Koshiba, Y. Aimoto, K. Kawano, and K. Sakai
2. 発表標題 Molecular Catalyst Promoting Hydrogen Evolution with Low Overpotential
3. 学会等名 ICCC2018: Post-Conference in Fukuoka “Transition Metal Chemistry towards Sustainable Energy Conversion and Various Advanced Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yamauchi, K. Koshiba, Y. Aimoto, and K. Sakai
2. 発表標題 Nickel Dithiolate Molecular Catalysts Promoting Hydrogen Evolution from Water with Low Overpotentials
3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内幸正、脇山史彬、酒井 健
2. 発表標題 光水素生成反応を促進する白金錯体触媒の速度論的研究
3. 学会等名 第30回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosei Yamauchi, Ken Kawano, Ken Sakai
2. 発表標題 Thermodynamic Aspects of Hydrogen Evolution Reactions Catalyzed by Metal-NHC Complexes
3. 学会等名 錯体化学会第68回討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yamauchi, Y. Aimoto, K. Koshiba, and K. Sakai
2. 発表標題 A Family of Molecular Nickel(II) Dithiolate Catalysts Promoting Hydrogen Evolution from Water with Low Overpotentials via the Ligand-centered PCET Processes
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀俊弘、山内幸正、酒井 健
2. 発表標題 多座電子供与性配位子を有する金属錯体触媒の合成と水素生成機能
3. 学会等名 錯体化学会第68回討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaro Aimoto, Keita Koshiba, Kosei Yamauchi, Ken Sakai
2. 発表標題 Nickel(II) Dithiolene Complexes Bearing Polyazaphthalene Units Catalyzing H ₂ Evolution from Water with Low Overpotentials
3. 学会等名 錯体化学会第68回討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Koga, K. Kawano, K. Yamauchi, K. Sakai
2. 発表標題 Hydrogen Evolution Catalyzed by New Nickel(II) complexes Having NHC Ligands
3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aimoto, K. Koshiba, K. Yamauchi, K. Sakai
2. 発表標題 Electrochemical Hydrogen Evolution from Water with Low Overpotentials Catalyzed by Nickel(II) Dithiolene Complexes
3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相本雄太郎、山内幸正、酒井 健
2. 発表標題 ピラジンジチオレン錯体触媒による水からの低過電圧水素生成反応
3. 学会等名 錯体化学若手研究会 錯体化学若手の会夏の学校2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 管 昌権、山内幸正、酒井 健
2. 発表標題 アントラキノン骨格を有する新規ニッケル錯体の合成と水素生成触媒機能
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学 錯体化学研究室 http://www.scc.kyushu-u.ac.jp/Sakutai/jp/index.html

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
---------	---------