

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04125

研究課題名(和文) クラスタ錯体によるエネルギーキャリアのテーラーメイド合成

研究課題名(英文) Metal cluster complexes for tailor-made production of energy carrier molecules

研究代表者

正岡 重行 (Masaoka, Shigeyuki)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20404048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：風力や太陽光など、安定供給に難のある再生可能エネルギーを有効に活用するため、電気エネルギーを化学エネルギーに効率よく変換する多電子酸化還元触媒の開発が求められている。本研究では、一分子中に複数の金属イオンを含むクラスタ錯体を研究開発の中心に据え、触媒開発のための基礎研究を推進した。具体的には、高い酸素発生触媒能を示す鉄五核クラスタ錯体に対して、配位子部位への官能基導入もしくは金属イオンの置換を行い、それらの構造変化が触媒能に対してどのような影響が表れるかを調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究「クラスタ錯体によるエネルギーキャリアのテーラーメイド合成」では、新規クラスタ錯体の設計、合成、構造解析、電子状態解析ならびに触媒機能評価という一連のプロセスを経て、クラスタ錯体の多電子酸化還元触媒としての潜在能力を顕在化させることに成功した。本研究成果は、再生可能エネルギーを主たるエネルギー源とした次世代エネルギー循環社会の構築に向け、重要な学術的/社会的意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：The effective utilization of renewable energies such as wind and solar power is an important research target to solve emerging global environmental and energy problems in these days. One of ways to utilize such energies is to synthesize chemical fuels by the electricity obtained from the renewable energies. These reactions are the small molecule conversion reactions via multi-electron reduction/oxidation processes. Therefore, the development of molecular catalysts for the reactions is highly desired.

In this research, we have aimed to develop a series of pentanuclear molecular catalysts for small molecule conversion. Several new pentanuclear complexes have been synthesized by changing their components; metal ions and organic ligands, and their catalytic activity for small molecule conversion have systematically been investigated.

研究分野：錯体化学

キーワード：クラスタ錯体 酸化還元反応

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

風力・太陽光などの再生可能エネルギーの有効利用は、エネルギー問題の解決に向けた重要な課題である。1つの方策として、これらの再生可能エネルギーから得られる電力を用いて、水素やアルコールなどのエネルギーキャリアを電解合成し、貯蔵・輸送する手法が考えられる。これらエネルギーキャリアを電解合成するためには、水、二酸化炭素などの小分子を原料に、多電子の酸化もしくは還元反応を行う必要があり、それらの反応を高効率かつ高選択的に促進する電極触媒の開発が求められている。

天然では、水の4電子酸化 ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$) や窒素の6電子還元 ($\text{N}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{NH}_3$) などの多電子酸化還元を担う生体酵素の活性中心に、複数の金属イオンが小空間に精密に集約・配置された多核クラスター錯体が含まれている(窒素固定: Fe_7Mo 八核クラスター錯体、酸素発生: Mn_4Ca 五核クラスター錯体)。しかしながら、このような多核クラスター錯体を人工的に構築し、多電子酸化還元反応の触媒へと適用した研究例は極めて少ない。

我々は、 Mn_4Ca 五核クラスターの構造と反応機構からヒントを得て、酸素発生触媒機能の発現に重要なのは、①多核クラスター構造、②フレキシブル骨格、③隣接配位不飽和サイト、の3要素ではないかとの着想を得た。そのような仮説に基づき研究を進め、単一分子内に5つの鉄イオンを含む Fe_5 クラスター錯体が、水の4電子酸化による酸素発生反応に対する触媒として極めて高い活性を有することを見出した¹。上記①~③の着想は、酸素発生反応のみでなく、多様な多電子酸化還元反応の触媒開発に展開できる重要かつ萌芽的な知見であると考えのもと、本研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、エネルギーキャリアを高効率かつ高選択的に合成できる電極触媒の創出をめざし、生体酵素の活性中心の構造ならびにこれまでの研究から得た着想に従い、①多電子プール能、②フレキシブル骨格、③配位不飽和サイトという3つの特徴を有するクラスター錯体を用いることとした。特に、酸素発生反応に対して高い活性を示す Fe_5 クラスター錯体の分子構造を基盤骨格と定め、新規触媒分子の設計、合成ならびに多電子酸化還元反応に対する触媒機能を評価した。さらに、触媒反応機構を反応中間体の電子状態も含めて深く考察し、更なる機能向上に向けた分子設計指針の取得を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、多電子プール能・フレキシブル骨格・配位不飽和サイトの3つの特徴を併せ持つクラスター錯体として、単一分子中に5つの金属イオンを有する五核クラスター錯体を研究開発の中心に据え、金属イオンの変化ならびに配位子の化学修飾に基づく構造変化が触媒機能にどのような影響をもたらすかを検討した。

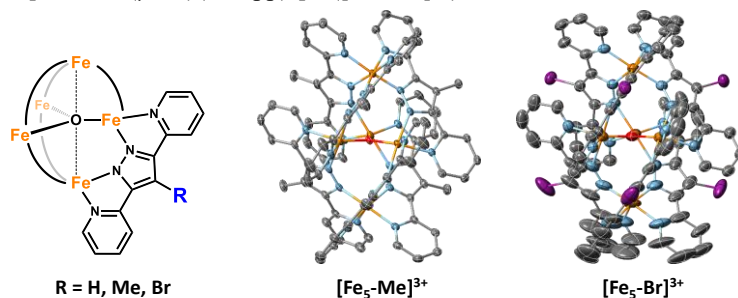
4. 研究成果

研究項目①: 配位子の化学修飾に基づく酸素発生触媒機能の制御²

水の酸化による酸素発生反応は、4電子の移動と酸素-酸素の結合生成を同時に行う必要があり、そのための触媒開発は困難であるとされてきた。我々は以前に、5つの鉄イオンを含む Fe_5 クラスター錯体 $[\text{Fe}^{\text{II}}_4\text{Fe}^{\text{III}}(\mu_3\text{-O})(\text{bpp})_6]^{3+}$ ($[\text{Fe}_5\text{-H}]^{3+}$) が電気化学的な酸素発生反応に対して高い活性ならびに耐久性を有する触媒として働くことを報告した¹。しかしながら、触媒反応を開始するのに必要な過電圧が大きいたことが課題として残っていた。そこで、過電圧を下げるため bpp^- 配位子に電子供与性もしくは電子求引性の置換基を導入し、置換基が酸素発生過電圧に与える影響について調査した。

電子供与基を導入した新規 Fe_5 クラスター錯体として $[\text{Fe}^{\text{II}}_4\text{Fe}^{\text{III}}(\mu_3\text{-O})(\text{Me-bpp})_6]^{3+}$ ($[\text{Fe}_5\text{-Me}]^{3+}$) を、電子求引基を導入したものとして $[\text{Fe}^{\text{II}}_4\text{Fe}^{\text{III}}(\mu_3\text{-O})(\text{Br-bpp})_6]^{3+}$ ($[\text{Fe}_5\text{-Br}]^{3+}$) を合成した(下図)。紫外可視吸収分光において、

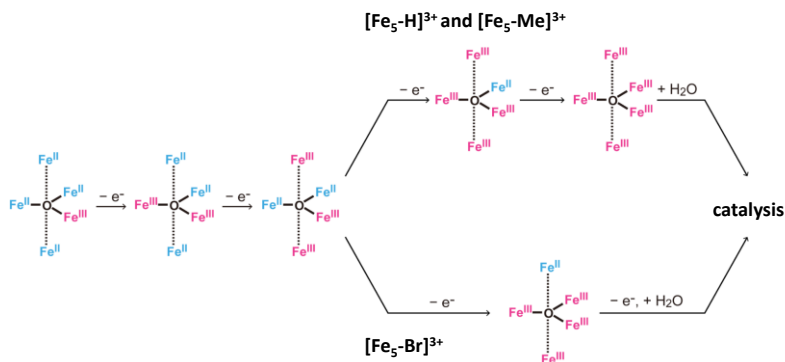
$[\text{Fe}_5\text{-Me}]^{3+}$ と $[\text{Fe}_5\text{-Br}]^{3+}$ のどちらに対しても、 $[\text{Fe}_5\text{-H}]^{3+}$ と同様の Fe^{II} 中心から配位子への金属配位子間電子遷移 (MLCT) に対応する吸収帯が観測された。サイクリックボルタンメトリー (CV) 測定により、 $[\text{Fe}_5\text{-H}]^{3+}$ 、 $[\text{Fe}_5\text{-Me}]^{3+}$ および $[\text{Fe}_5\text{-Br}]^{3+}$ の三種全てにおいて還元



側に1つ、酸化側に4つの酸化還元波が観測され、 $[\text{Fe}_5\text{-H}]^{3+}$ が有する多段階の酸化還元能は置換基の導入後も保持されていることがわかった。 $[\text{Fe}_5\text{-Me}]^{3+}$ の全ての酸化還元波は $[\text{Fe}_5\text{-H}]^{3+}$ よりもより負の電位にて観測され、反対に $[\text{Fe}_5\text{-Br}]^{3+}$ ではより正の電位にて観測された。これらの結果は、配位子部位に電子供与基もしくは電子求引基を導入することにより、酸化還元電位を任意に制御できることを示唆している。次いで、少量の水存在下での CV を測定したところ、電気触媒的な酸素発生反応の進行に対応する不可逆な電流の立ち上がり(触媒電流)が観測された。ITO 電極を用いて定電位電解(CPE)をおこなった結果、 $[\text{Fe}_5\text{-Me}]^{3+}$ および $[\text{Fe}_5\text{-Br}]^{3+}$ を触媒として用いた

際の実効率はそれぞれ 92%、86%であった。これら二種の錯体の触媒回転数(TOF)は[Fe₅-H]³⁺よりは低い、過去に報告された鉄錯体触媒と比較では良好な値を示した。また、CPE 前後での ITO 電極の紫外可視吸収分光、電解液の DLS 測定ならびに CPE 後の ITO 電極を用いた電気化学測定により、CPE 反応中に不均一な堆積物やナノ粒子が形成していないことが明らかとなった。これらの結果より [Fe₅-Me]³⁺および [Fe₅-Br]³⁺は酸素発生反応のための分子性電極触媒として機能していることが実証された。さらに興味深いことに、どちらの触媒系においても、[Fe₅-H]³⁺を用いた系よりも低い電位で酸素発生反応が進行していることが見出された。

[Fe₅-Me]³⁺の場合、酸素発生反応に伴う不可逆な電流の立ち上がりは4つ目の酸化波に近い電位で観測されている。このことは、[Fe₅-Me]³⁺の4電子酸化体が水分子との反応およびそれに続く酸素発生反応を引き起こしていることを示している。すなわち、電子供与性のメチル基の導入は、4電子酸化体が生成する電位を下げ、結果として酸素発生開始電位の低下に有利に働いたと解釈できる。対照的に [Fe₅-Br]³⁺の場合は、酸素発生反応に伴う不可逆な電流は4つ目の酸化波よりも負の電位にて観測された。このことは、[Fe₅-Br]³⁺では3電子酸化体と水との反応が触媒反応の引き金となっていることを示唆している。次に分光電気化学測定を用いてこれら3つの Fe₅ クラスター錯体の電子状態を調査したところ、[Fe₅-Br]³⁺の3電子酸化体は[Fe₅-H]³⁺や[Fe₅-Me]³⁺とは異なる電子状態を有していることが分かった(右図)。以上より、3電子酸化体の電子状態の違いが水との反応性の違いを引き起こし、結果として[Fe₅-Br]³⁺の酸素発生開始電位の低下につながったと解釈された。

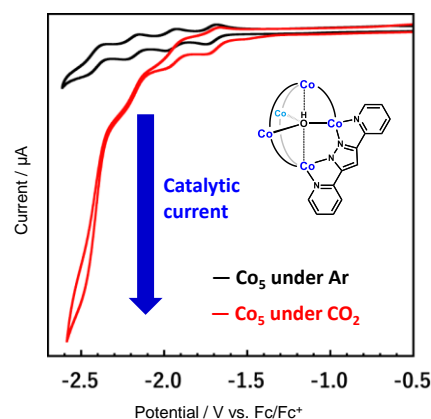
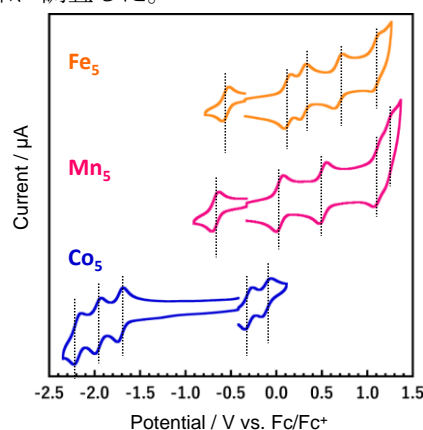


研究項目②：新規コバルト五核クラスター錯体の合成と二酸化炭素還元触媒能³

地球温暖化の原因の一例となっている二酸化炭素 (CO₂) を多電子還元し、エネルギーに富んだ物質へと変換することが可能な CO₂ 還元反応は、CO₂ の再資源化に向けた技術として近年大きな注目を集めている。特に、太陽光を駆動力とした CO₂ 還元反応系の開発は、クリーンなエネルギー循環システムの創出を可能にする点で極めて魅力的である。本研究では、小分子変換反応の触媒として有用な分子群になると考えられる M₅ クラスター錯体に注目し、特に、優れた還元特性を示すことで知られるコバルトイオンをその骨格中に導入した錯体を新規に合成・設計し、得られた錯体の小分子の多電子還元反応に対する活性を詳細に調査した。

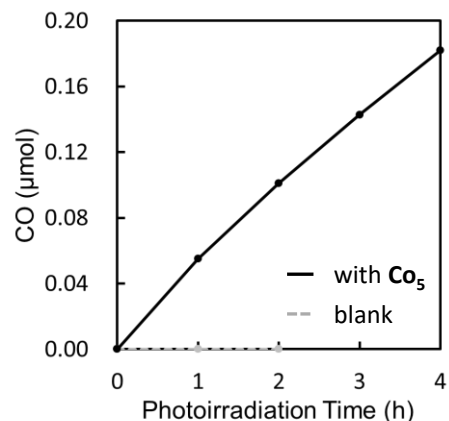
Fe₅ クラスター錯体 (Fe₅) の鉄イオンをコバルトイオンに置換したコバルト五核クラスター錯体 ([Co₅OH(bpp)₆]³⁺, Co₅) の合成は以下の手法により行った。酢酸コバルト四水和物と配位子 Hbpp をメタノール中、塩基の存在下において 40 °C で 10 分間加熱した。得られた反応溶液に対し、飽和テトラフルオロホウ酸ナトリウム水溶液を過剰量添加した後、溶液を冷蔵庫で 1 時間静置することで褐色の沈殿が生成した。沈殿を濾過によって回収し水で洗浄した後、真空下で乾燥させた。得られた固体をアセトニトリルに溶解させ、ジエチルエーテルをゆっくりと上記拡散させることで、[Co₅OH(bpp)₆](BF₄)₃·2H₂O の結晶を得た。得られた結晶については、ESI-TOF-MS・元素分析・単結晶 X 線構造解析によって同定した。

Fe₅, Mn₅ ならびに Co₅ のアルゴン雰囲気下でのサイクリックボルタメトリー測定の結果を右に示す。Fe₅ ならびに Mn₅ では酸化側に 4 つ、還元側に 1 つの酸化還元波を示したのに対し、Co₅ では酸化側に 2 つ (-0.3、-0.1 V (vs. ferrocene/ferrocenium (Fc/Fc⁺))), 還元側に 3 つ (-1.7、-2.0、-2.2 V) の可逆な酸化還元波を示した。そして、酸化側の 2 つの酸化還元波は上下のコバルトイオンがそれぞれ II 価から III 価へ酸化される過程、還元側の 3 つの酸化還元波は中央部分のコバルトイオンが II 価から I 価へと還元される過程に由来すると帰属した。この Co₅ の酸化還元挙動は、酸化側に 4 つ、還元側に 1 つの可逆な酸化還元波を示す Fe₅ や Mn₅ のものとは大きく異なっていた。このことから、Co₅ は Fe₅ や Mn₅ と比較してより多電子還元能に優れていることが示唆された。



そこで次に、**Co5** の二酸化炭素 (CO₂) 雰囲気下でのサイクリックボルタンメトリー測定を行った。その結果、-2.2 V 付近に不可逆な電流の立ち上がり (触媒電流) が観測された。以上の事実は、**Co5** が電気化学的な CO₂ 還元触媒として機能することを示唆している。**Co5** の電気化学的触媒能を調査する目的で、定電位電解による触媒能の評価を行った。その結果、**Co5** 存在下でのみ CO₂ 還元反応の生成物である一酸化炭素 (CO) やギ酸の形成が確認された。したがって、**Co5** は電気化学的 CO₂ 還元に対する触媒として機能することが示された。

次に、**Co5** の光化学的 CO₂ 還元反応に対する触媒活性について検討した。光増感剤として Ir(ppy)₃ (Hppy = 2-phenylpyridine)、犠牲還元剤として 1,3-dimethyl-2-phenyl-2,3-dihydro-1H-benzo[d]imidazole (BIH)、触媒として **Co5** を含む N,N-dimethylacetamide (DMA) / トリフルオロエタノール (TFA) 溶液に可視光 (青色 LED、420 nm) を照射したところ、CO₂ 還元生成物が生じることが示された (右図)。加えて、対照実験の結果から、**Co5**、光増感剤、犠牲還元剤、CO₂、光のすべての要素が反応の進行に必要であることが示された。更に、同位体ラベリング実験として、¹³CO₂ 雰囲気下で反応を行ったところ反応生成物として ¹³CO が検出された。これらの結果から、**Co5** が触媒として機能し、CO₂ が基質として還元されることが明らかとなった。したがって、**Co5** は光化学的 CO₂ 還元における触媒として機能することが示された。



<引用文献>

1. A pentanuclear iron catalyst designed for water oxidation, M. Okamura, M. Kondo, R. Kuga, Y. Kurashige, T. Yanai, S. Hayami, V. K. K. Praneeth, M. Yoshida, K. Yoneda, S. Kawata, S. Masaoka, *Nature*, **2016**, 530, 465.
2. Pentanuclear Iron Catalysts for Water Oxidation: Substituents Provide Two Routes to Control Onset Potentials, V. K. K. Praneeth, M. Kondo, M. Okamura, T. Akai, H. Izu, S. Masaoka, *Chem. Sci.*, **2019**, 10, 4628.
3. Effect of metal ion substitution on the catalytic activity of a pentanuclear metal complex, T. Akai, M. Kondo, S. K. Lee, H. Izu, T. Enomoto, M. Okamura, Y. Saga, S. Masaoka, *Dalton Trans.*, **2020**, 49, 1384.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Akai Takuya, Kondo Mio, Lee Sze Koon, Izu Hitoshi, Enomoto Takafumi, Okamura Masaya, Saga Yutaka, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 Effect of metal ion substitution on the catalytic activity of a pentanuclear metal complex | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Dalton Transactions | 6. 最初と最後の頁 1384 ~ 1387 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1039/C9DT04684D | 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 Kamakura Yoshinobu, Chinapang Pondchanok, Masaoka Shigeyuki, Saeki Akinori, Ogasawara Kazuyoshi, Nishitani Shigeto R., Yoshikawa Hirofumi, Katayama Tetsuro, Tamai Naoto, Sugimoto Kunihisa, Tanaka Daisuke | 4. 巻 142 |
| 2. 論文標題 Semiconductive Nature of Lead-Based Metal-Organic Frameworks with Three-Dimensionally Extended Sulfur Secondary Building Units | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society | 6. 最初と最後の頁 27 ~ 32 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/jacs.9b10436 | 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 Uraguchi Daisuke, Tsuchiya Yuto, Ohtani Tsuyoshi, Enomoto Takafumi, Masaoka Shigeyuki, Yokogawa Daisuke, Ooi Takashi | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Unveiling Latent Photoreactivity of Imines | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition | 6. 最初と最後の頁 3665 ~ 3670 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/anie.201913555 | 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 Izu Hitoshi, Kondo Mio, Saga Yutaka, Iwami Hikaru, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 Rational Synthetic Strategy for Heterometallic Multinuclear Complexes | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Chemistry Letters | 6. 最初と最後の頁 125 ~ 128 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1246/cl.190815 | 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 Enomoto Takafumi, Kondo Mio, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Proton Coupled Electron Transfer Induced by Near Infrared Light | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemistry - An Asian Journal | 6. 最初と最後の頁 2806 ~ 2809 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/asia.201900863 | 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 Kuwano Ryoichi, Yokogi Masashi, Sakai Ken, Masaoka Shigeyuki, Miura Takashi, Won Sungyong | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Room-Temperature Benzylic Alkylation of Benzylic Carbonates: Improvement of Palladium Catalyst and Mechanistic Study | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Organic Process Research & Development | 6. 最初と最後の頁 1568 ~ 1579 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/acs.oprd.9b00210 | 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 Praneeth Vijayendran K. K., Kondo Mio, Okamura Masaya, Akai Takuya, Izu Hitoshi, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Pentanuclear iron catalysts for water oxidation: substituents provide two routes to control onset potentials | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Science | 6. 最初と最後の頁 4628 ~ 4639 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SC00678H | 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 Lee Sze Koon, Kondo Mio, Okamura Masaya, Enomoto Takafumi, Nakamura Go, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 140 |
| 2. 論文標題 Function-Integrated Ru Catalyst for Photochemical CO2 Reduction | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society | 6. 最初と最後の頁 16899 ~ 16903 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b09933 | 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 Lee Sze Koon, Kondo Mio, Nakamura Go, Okamura Masaya, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 54 |
| 2. 論文標題 Low-overpotential CO ₂ reduction by a phosphine-substituted Ru(II) polypyridyl complex | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Communications | 6. 最初と最後の頁 6915 ~ 6918 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8cc02150c | 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 Enomoto Takafumi, Kondo Mio, Asada Mizue, Nakamura Toshikazu, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 122 |
| 2. 論文標題 Near-IR Light-Induced Electron Transfer via Dynamic Quenching | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 11282 ~ 11287 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b02591 | 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 Praneeth Vijayendran K. K., Kondo Mio, Woi Pei Meng, Okamura Masaya, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 81 |
| 2. 論文標題 Electrocatalytic Water Oxidation by a Tetranuclear Copper Complex | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 ChemPlusChem | 6. 最初と最後の頁 1123 ~ 1128 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1002/cplu.201600322 | 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 Yoshida Masaki, Kondo Mio, Okamura Masaya, Kanaike Mari, Haesuwannakij Setsiri, Sakurai Hidehiro, Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 198 |
| 2. 論文標題 Fe, Ru, and Os complexes with the same molecular framework: comparison of structures, properties and catalytic activities | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Faraday Discussions | 6. 最初と最後の頁 181 ~ 196 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6FD00227G | 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 Okabe Yuki、Lee Sze Koon、Kondo Mio、Masaoka Shigeyuki | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 Syntheses and CO2 reduction activities of -expanded/extended iron porphyrin complexes | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry | 6. 最初と最後の頁 713 ~ 725 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00775-017-1438-3 | 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13件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 13件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of molecular modules for artificial photosynthesis |
| 3. 学会等名 3rd Chulalongkorn University-Osaka University Joint Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of molecular catalysts for small molecule conversion |
| 3. 学会等名 Invited lecture, Department of Chemistry, National Chung Hsing University (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of molecular catalysts for small molecule conversion |
| 3. 学会等名 Invited lecture, iCAST, National Chung Hsing University (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Fe5 catalysts for water oxidation: Substituents provide two routes to control onset potentials |
| 3. 学会等名 3rd International Solar Fuels Conference (ISF-3), International Conference on Artificial Photosynthesis-2019 (ICARP2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Modules for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 Korea-Taiwan-Japan Biological Inorganic Chemistry Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Modules for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 12th China-Japan Joint Symposium on Metal Cluster Compounds (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Modules for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 The 69th Conference of Japan Society of Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Modules for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 5th Japan-Taiwan-Singapore-Hong Kong Quadrilateral Symposium on Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Catalysts for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 HeKKSaGOn in Heidelberg, Functional Molecules for Energy Conversion, Catalysis and Nanotechnology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Development of Molecular Catalysts for Artificial Photosynthesis |
| 3. 学会等名 15th International Symposium on Applied Bioinorganic Chemistry (ISABC15) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Pentanuclear iron catalysts for water oxidation |
| 3. 学会等名 9th Asian Biological Chemistry Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 Molecular Catalysts Designed for Water Oxidation |
| 3. 学会等名 8th Asian Biological Inorganic Chemistry Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeyuki Masaoka |
| 2. 発表標題 A Pentanuclear Iron Catalyst Designed for Water Oxidation |
| 3. 学会等名 5th International Symposium on Solar Fuels and Solar Cells (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 近藤美欧、正岡重行 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 化学同人 | 5. 総ページ数 224 |
| 3. 書名 高機能性金属錯体が拓く触媒科学 | |

〔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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |