

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02812

研究課題名(和文) ナノ光触媒の励起ダイナミクス

研究課題名(英文) Excitation Dynamics of Nano-Photocatalysts

研究代表者

藤塚 守 (FUJITSUKA, MAMORU)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：40282040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：半導体光触媒を用いた高効率な光エネルギー変換系の構築には、半導体と増感剤や助触媒が形成する不均一界面で生じる化学反応過程を時間空間的に正しく理解することが不可欠であることから、本研究ではサブピコ秒から数十数百ピコ秒の時間領域での正孔と電子のダイナミクスをフェムト秒時間分解拡散反射等の時間分解分光で明らかにするとともに、半導体光触媒の活性点での反応を単一粒子レベルで評価を行った。その結果、高効率な半導体光触媒を達成するための電子移動過程や活性点に関する情報が得られた。これらの結果は半導体光触媒のさらなる高活性化への設計指針になるものと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、フェムト秒時間分解拡散反射等の時間分解分光や顕微鏡を用いた単一粒子レベルの分光を用いることにより、時間および空間分解的に半導体光触媒の反応を明らかにした。時間分解分光からは光励起により生じた電子および正孔が長寿命化することおよび十分な酸化還元力を保持することが触媒反応に重要なことを明示し、また、単一粒子レベルの検討からは触媒反応には半導体のどのような構造が寄与しているかを明らかにした。これらの結果は触媒設計に寄与する点において学術的に意義がある。また、再生可能エネルギーである太陽光の利用を前提とした可視近赤外光への応答性や低コスト化の検討は社会的に意義あるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Harnessing solar energy to produce fuels including H₂ or valuable chemicals using semiconductor photocatalysts is important for establishing a sustainable society. The dynamics of photogenerated charge carrier lies at the core of the photocatalysis. In this research project, by means of both time-resolved spectroscopy and single particle spectroscopy, we studied dynamics of photogenerated charge and heterogeneity of semiconductor photocatalytic reactions to provide rational design of highly active semiconductor photocatalysts.

研究分野：光化学

キーワード：半導体光触媒 レーザーフラッシュホトリシス 単一粒子分光 貴金属ナノ粒子 人工光合成

1. 研究開始当初の背景

半導体光触媒において光吸収によって生じる正孔および電子のダイナミクスは触媒活性を直接左右するため、研究者の関心を集めている。電荷ダイナミクスの検討において従来は電荷再結合に起因するバルクレベルの時間分解発光測定が主に行われてきたが、近年では、電荷挙動の全体像を評価することが可能なフェムト秒過渡吸収測定が行われるようになってきている。過渡吸収測定は米国 Notre Dame 大学の Kamat 教授らがいち早くフェムト秒過渡吸収測定を光触媒系に適用し、ナノ半導体粒子などの過渡吸収測定を行っている。また、徳島大学の古部教授らは光を透過しない固体光触媒の検討に有効な時間分解拡散反射測定を実現し、近赤外領域に生じる電子の挙動を詳細に検討している。また、単一粒子発光による触媒の検討は神戸大学の立川教授により行われている。このように高速分光および単一粒子分光による検討は触媒機能の本質に迫る測定手段として国内学の研究者によって認識されているが、サブピコ秒からミリ秒オーダーの時間領域で可視から近赤外までの時間分解拡散反射測定および単一粒子分光が測定可能であり、同時に複合化したナノ触媒など種々のナノ光触媒を調製できる研究者は世界的に見ても限られていた。従って、本研究の遂行により、触媒活性や機能発現メカニズムなどの面において、多くの研究者にとって有用な知見となることが予想された。

2. 研究の目的

半導体光触媒は、光エネルギーを吸収することで水を分解し、エネルギーとして利用可能な水素や酸素を発生するが、多くの場合、光を捕集し、電子または正孔を供給する光増感剤(有機色素、半導体ナノ粒子、貴金属ナノ粒子など)と、高効率に電子の授受を行う酸化・還元触媒から構成されている。これらの同種・異種材料が形成するナノスケールの不均一界面で引き起こされる化学反応過程を時間空間的に正しく理解することは、高効率な光エネルギー変換系の構築において重要かつ必須である。特に、光励起にともない生じる正孔・電子対および電荷分離過程、電荷の拡散とトラッピング過程、さらに助触媒等への電荷移動過程などはサブピコ秒から数十数百ピコ秒の時間領域でおこり(図1)、後続過程の収率を大きく左右することから、当該時間領域の正孔と電子のダイナミクスに関する知見は、半導体光触媒設計に不可欠な知見である。さらに、従来のバルク試料を対象とした測定法では、触媒の組成、サイズ、形状など、反応効率に影響する因子が平均化されてしまうため、触媒活性を単一粒子レベルで評価することが望まれる。以上の点から、光触媒活性に直接関与するキャリアダイナミクスの解明と不均一性を十分考慮した触媒設計を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では太陽光の紫外から近赤外までの光を用いた水分解による水素発生を実現し、高効率化するため、光増感剤で修飾したナノサイズの半導体光触媒(ナノ光触媒)の開発を行う。合成したナノ光触媒については水素発生効率などの評価のほかに、(1)フェムト秒およびナノ秒レーザーを用いた時間分解拡散反射測定(図2)を用いた、正孔・電子対の生成、電荷分離、トラッピング、金属ナノ粒子などへの電荷移動過程などの実時間観測、(2)ナノ光触媒の単一粒子分光による触媒構造および形状に対する依存性ならびに不均一性を検討することを行うことで、水素発生の活性種である正孔および電子の挙動を検討

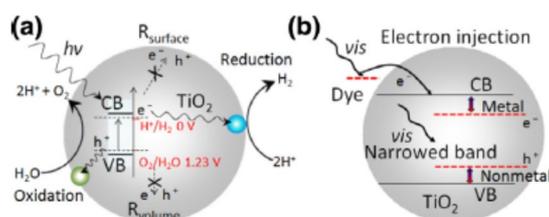


図1. (a) 半導体光触媒(ここではTiO₂)の光照射にともなう正孔・電子対生成および貴金属ナノ粒子への電荷移動および水素と酸素発生過程。(b) 光増感剤または可視光応答型とした半導体光触媒での正孔・電子対生成過程。いずれの過程もピコ秒オーダーからの反応過程がキープロセスである。

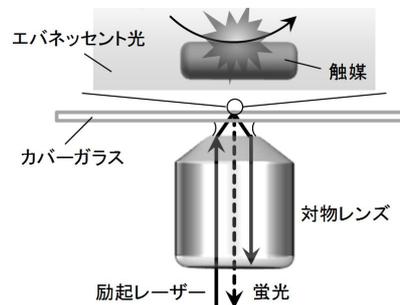
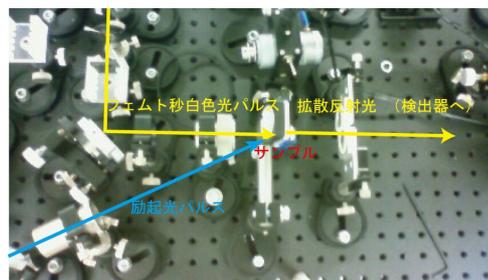


図2. フェムト秒拡散反射の測定装置および全反射顕微鏡による単一粒子分光測定装置の概略。

した。

4. 研究成果

(1) TiO₂ ナノ光触媒の単一分子分光および時間分解分光による検討

(1-1) 半導体光触媒表面で起こる酸化還元過程には光によって生じる電子とホールの共同の解明が不可欠である。しかしながら、活性部位におけるこれらの挙動の解明は困難であることから、本研究では全反射顕微鏡および共焦点顕微鏡を用いることにより、多くの研究者によって検討されている TiO₂ 結晶上の酸化還元過程を単一分子レベルで検討を行った。

単一分子分光および密度汎関数法の検討より、anatase TiO₂ 単一粒子では、表面に顕著な (001) および (101) ファセットに起因する edge および corner に電位およびホールが集まりやすく、反応を起こしていることが解明された。

(1-2) 可視および近赤外光応答型 TiO₂ メソ結晶 (TMC) ナノ光触媒の開発および評価を行った。本研究では、金ナノロッド、またはより安価な光増感剤であるブラックフォスフォラスのナノシート (BPNS) で TMC を修飾することで近赤外まで応答性を示す光触媒を調製し、近赤外光照射による水素発生を確認した。さらに、光触媒活性が NS の厚さに依存することを見出し、薄い NS を用いることで水素発生効率が向上することを示した。

(2) 可視近赤外光応答型グラフィティックカーボンナイトライド (g-C₃N₄) ナノ光触媒の開発および評価。

(2-1) 可視光応答触媒として注目されている g-C₃N₄ に近赤外応答性を付与するため、1000 nm より長波長側に吸収を示す金ナノプリズム (AuTNPs) を修飾した g-C₃N₄ (図 4) を開発した。本触媒による水素発生を確認するとともに、過渡吸収測定により金ナノプリズムに生成するホットエレクトロンの電荷移動過程を確認した (図 5)。

(2-2) 水素発生光触媒であるカーボンナイトライド (CN) は 500-600 度で重合することで

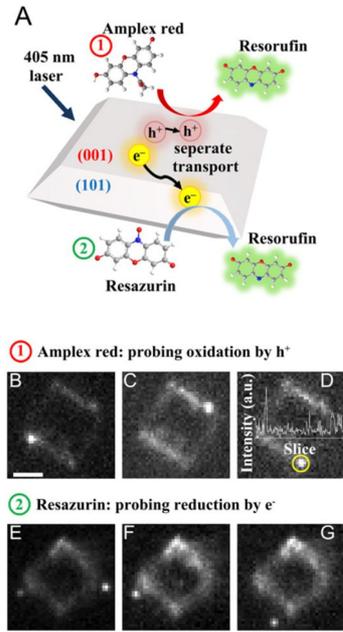


図 3. (A) TiO₂ 表面の酸化還元反応。および (B-D) 酸化反応、(E-G) 還元反応の単一分子発光イメージ。

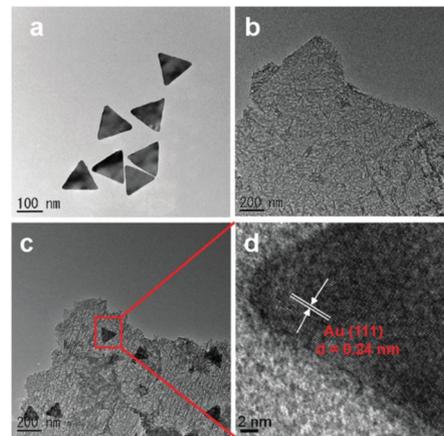


図 4. (a) AuTNP, (b) g-C₃N₄, (c, d) AuTNP 修飾 g-C₃N₄ の TEM 像

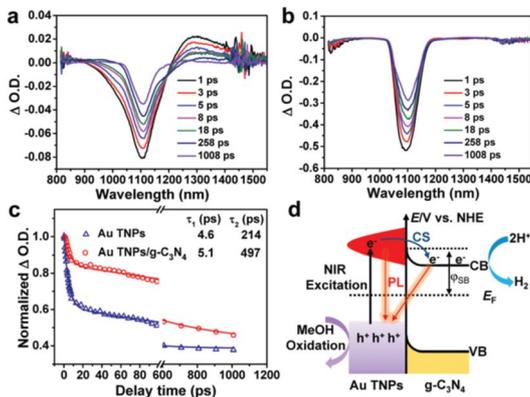


図 5. (a) AuTNPs (b) AuTNP 修飾 g-C₃N₄ の過渡吸収スペクトル。 (c) 過渡吸収 (1100 nm) の時間依存性。 (d) 想定される AuTNP から g-C₃N₄ への電子移動過程。

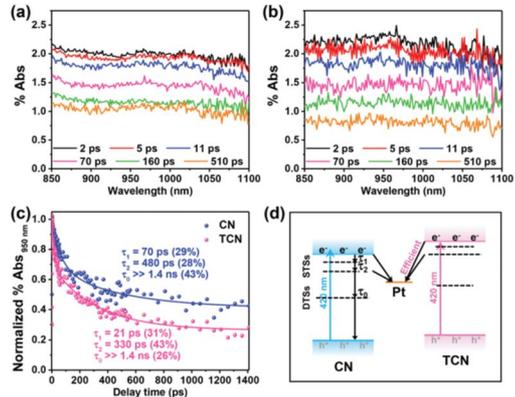


図 6. (a) CN (b) TCN の時間分解拡散反射スペクトル。 (c) 拡散反射 (950 nm) の時間依存性。 (c) CN および TCN に生成した電子の Pt 助触媒へのトラップ過程。

graphite 構造となり、それ以上の温度では分解した構造を有する TCN となる。CN と比較し TCN に関する検討例は少ないことより、本研究ではフェムト秒時間分解拡散反射を用い反応ダイナミクスの検討を行った。FTIR および XPS より TCN は C-O および C=O を含むことが示され、CN ヘテロ環構造が若干失われていることが確認された。また、吸収スペクトルおよび VB XPS より、CB tail 幅が広がっていることが確認された。水素発生速度も TCN は CN よりも高い値を示すことが確認され、特に長波長領域でその傾向が顕著であることが示された。420 nm のフェムト秒レーザー励起で得られた時間分解拡散反射スペクトルより、TCN ではより高速に shallow trap state に電荷がトラップされることが確認され、熱分解により生成した酸素関連サイトが shallow trap 生成と助触媒である Pt への電子移動の効率化に寄与していることが示された(図 6)。

(2-3) 電子移動の高効率化を目指し、 C_3N_4/Pt 触媒の界面での電子移動(IET)をフェムト秒時間分解拡散反射測定で検討した。 C_3N_4 をバンドギャップ励起した場合には、効率的な IET により、 H_2 発生が起こるものの、バンド端を励起した場合には、電子が deep trap されるため IET は効率的ならず、 H_2 発生量が減少されることが示された(図 7)。

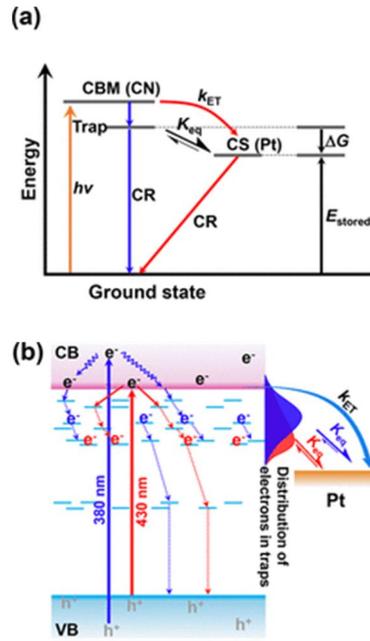


図 7. (a) C_3N_4/Pt 触媒の界面での IET エネルギーダイアグラム。(b) IET の励起エネルギー依存性

(3) 可視近赤外光応答型ナノ光触媒の開発および評価。

(3-1) 水素発生光触媒である $ZnIn_2S_4$ (ZIS) の触媒活性の Ni ドープ(Ni-ZIS)の影響を検討した。DFT 計算および XAFS より Ni は Zn 原子を置き換える形でドープされており、Ni ドープにより近接の S の電子的性質が変化することで、水素発生効率が向上することが示された。さらにフェムト秒時間分解拡散反射スペクトル測定より電荷寿命が向上することが示され、水素発生効率の向上につながっていることが示された(図 8)。

(3-2) Lanthanum titanium oxide ($La_2Ti_2O_7$) に Bi をドープしたナノシート光触媒を合成し、光照射下での水の完全分解反応を検討した。未ドープの $La_2Ti_2O_7$ では表面のトラップサイトの存在が光触媒活性を制限しており、水素発生用の助触媒である Cobalt phosphate (Co-Pi) および白金(Pt) ナノ粒子を修飾しても表面のトラップサイトを取り除けないが、Bi を $La_2Ti_2O_7$ ナノシートにドープした場合には表面の Bi でトラップサイトを効率的に取り除くことができ、Co-Pi/Bi- $La_2Ti_2O_7/Pt$ ナノシート触媒では 5 at.% まで Bi をドープすると触媒活性が向上することが示された。

(3-3) 可視光を吸収し水分解により水素を発生する低コストな光触媒を開発することを目的して Mo_2C ナノシート触媒の開発を検討した。 Mo_2C ナノシート(Mo_2C)は液相中で超音波照射し剥離することで調製した。 Mo_2C に CdS ナノ粒子を担持することで $7.7 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ の水素発生が確認された。この値は剥離していない Mo_2C/CdS の 6 倍の値であり、CdS 単独使用および

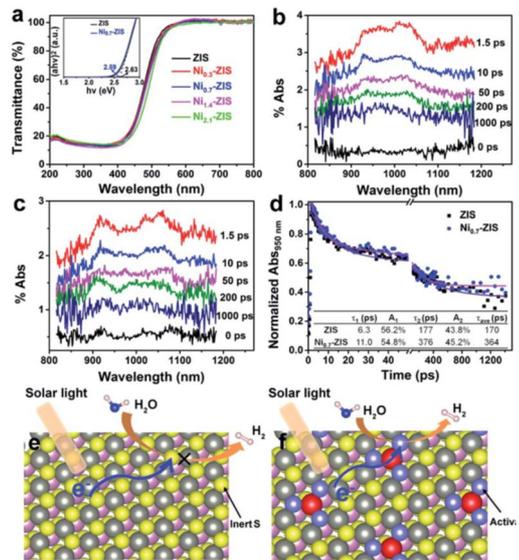


図 8. ZIS および Ni-ZIS の(a)拡散反射スペクトル、(b-d)時間分解拡散反スペクトルおよび拡散反射(950 nm)の時間依存性、(e, f)電子移動過程。

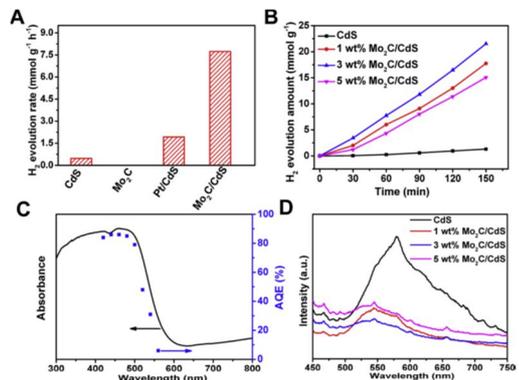


図 9. (a, b) Mo_2C による水素発生。(c) AQE の波長依存性。(d) CdS の発光スペクトル

Pt/CdS に比べても 16 および 4 倍と非常に高い値であることが示された(図 9)。さらに 3 wt% Mo₂C /CdS の 460 nm における量子収率は 86%と見積もられた。この高い量子収率は CdS に照射することで生じた電子が Mo₂C に効率よく移動していることと、Mo₂C の活性サイトが高度に分布していることに起因していることが示された。

(3-4) Photoelectrocatalysis (PEC)反応の高効率化を目指し、優れた PEC 特性を示す self-interpersed porous nanoplates assembled WO₃ (s-i-WO₃)の調整、その反応性の検討を行った。Bisphenol A (BPA)の分解反応において、PEC 系では 93.7%の分解収率が確認され、この値は光触媒反応(22.0%)および電気触媒反応(43.8%)の値より、著しく高いものであることを確認した。この高い触媒活性は二次元多孔質構造(図 10)に起因していると考えられ、また、光照射により生成した電子・正孔ペアの分離移動過程が効率的であることを示している。さらに hydroxy radical が本反応系では主要な活性酸素種であることが示された。

(3-5) 水中の汚染物質の除去においても光触媒の適用が有効であることが知られているが、その触媒活性は結晶面に大きく依存することが知られている。本研究では Ag₃PO₄ による ciprofloxacin (CIP)、sulfamethoxazole (SMX)、tetracycline (TC)分解反応の検討を結晶面に注目することで行った。{111}facet を特徴とする Ag₃PO₄は{100}にくらべ CIP分解において 1.83 倍の高活性を示すことを確認した。フェムト秒拡散反射測定(図 11)からは電荷再結合過程が結晶面に依存して変化することが確認されたことから、電荷寿命の長さが分解反応速度を左右することが確認された。

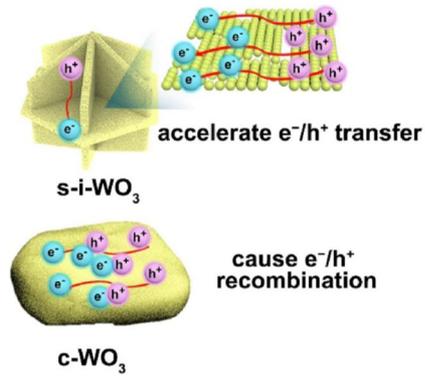


図 10. s-i-WO₃ および c-WO₃ の構造および電子ホールペアの再結合過程。

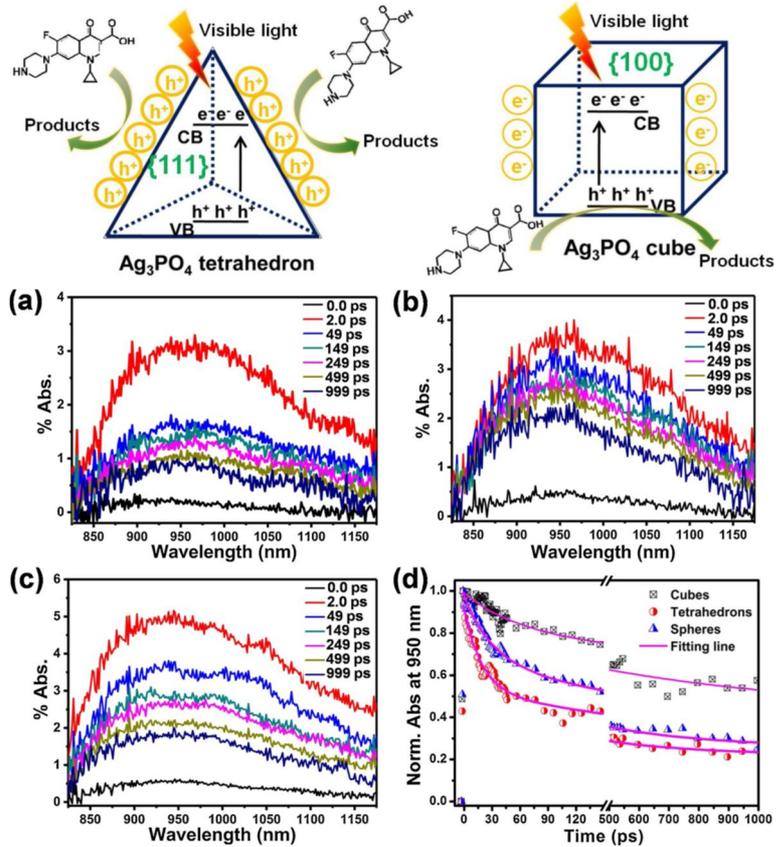


図 11. Ag₃PO₄ tetrahedron および cube. (a) Ag₃P₄ tetrahedron, (b) cube, (c) sphere の時間分解拡散反射スペクトルおよび(d) 950 nm における拡散反射の時間依存性

電荷寿命の長さが分解反応速度を左右することが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計39件（うち査読付論文 39件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Li Xinxu, Shigemitsu Hajime, Goto Tomoyo, Kida Toshiyuki, Sekino Tohru, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 4
2. 論文標題 Porphyrin covalent organic nanodisks synthesized using acid-assisted exfoliation for improved bactericidal efficacy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 2992 ~ 2995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2na00318j	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 Liu Zuoyue, Okada Yuta, Ichinose Yuma, Saitoh Daisuke, Ieda Naoya, Yamasaki Seiji, Nishino Kunihiko, Nakagawa Hidehiko, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 6
2. 論文標題 Vanadyl Naphthalocyanine-Doped Polymer Dots for Near-Infrared Light-Induced Nitric Oxide Release and Bactericidal Effects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 1487 ~ 1495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.2c05566	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 Wang Wei-Kang, Zhou Lu-Lu, Cao Hong-Yang, Liu Peng-Xi, Li Xiu-Yan, Fujitsuka Mamoru, Xu Juan, Majima Tetsuro	4. 巻 618
2. 論文標題 Self-Interspersed mesoporous nanoplates assembled WO ₃ boosts photoelectrocatalytic pollutants degradation: Enhancing separation and transfer of hole/electron pairs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 156686 ~ 156686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2023.156686	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 Li Xinxu, Su Zheming, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 10
2. 論文標題 Zinc porphyrin covalent organic nanodisks synthesized from covalent organic frameworks and their photocatalytic antibacterial activity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JCIS Open	6. 最初と最後の頁 100083 ~ 100083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jciso.2023.100083	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 Saitoh Daisuke, Suzuki Ayumi, Ieda Naoya, Liu Zuoyue, Osakada Yasuko, Fujitsuka Mamoru, Kawaguchi Mitsuyasu, Nakagawa Hidehiko	4. 巻 21
2. 論文標題 Photoinduced NO-release from polymer dots doped with an Ir(III) complex and N-methyl-N-nitroso-4-aminophenol	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Organic & Biomolecular Chemistry	6. 最初と最後の頁 2983 ~ 2989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3ob00047h	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 Liu Zouyue, Nguyen Hieu Thi Minh, Asanuma Daiki, Tojo Sachiko, Yamaji Minoru, Kawai Kiyohiko, Pratz Guillem, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 13
2. 論文標題 Red, green, and blue radio-luminescent polymer dots doped with heteroleptic tris-cyclometalated iridium complexes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 15126 ~ 15131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3ra01216f	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 Asanuma Daiki, Minh Nguyen Hieu Thi, Liu Zuoyue, Tojo Sachiko, Shigemitsu Hajime, Yamaji Minoru, Kawai Kiyohiko, Mori Tadashi, Kida Toshiyuki, Pratz Guillem, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 5
2. 論文標題 Radioluminescence from polymer dots based on thermally activated delayed fluorescence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 3424 ~ 3427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3na00308f	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 Zhuang Bo, Tojo Sachiko, Fujitsuka Mamoru	4. 巻 6
2. 論文標題 Electronic and Structural Properties of 2,3 Naphthalimide in Open Shell Configurations Investigated by Pulse Radiolytic and Theoretical Approaches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemistrySelect	6. 最初と最後の頁 3331 ~ 3338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.202100417	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 Takada Tadao, Nishida Koma, Honda Yuriika, Nakano Aoi, Nakamura Mitsunobu, Fan Shuya, Kawai Kiyohiko, Fujitsuka Mamoru, Yamana Kazushige	4. 巻 22
2. 論文標題 Stacked Thiazole Orange Dyes in DNA Capable of Switching Emissive Behavior in Response to Structural Transitions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemBioChem	6. 最初と最後の頁 2729 ~ 2735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cbic.202100309	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 Shigemitsu Hajime, Tamemoto Tomoe, Ohkubo Kei, Mori Tadashi, Osakada Yasuko, Fujitsuka Mamoru, Kida Toshiyuki	4. 巻 57
2. 論文標題 A cyanine dye based supramolecular photosensitizer enabling visible-light-driven organic reaction in water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 11217 ~ 11220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cc04685c	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 Yamazaki Suzuko, Kutoh Masanari, Yamazaki Yukari, Yamamoto Nanami, Fujitsuka Mamoru	4. 巻 6
2. 論文標題 One-Pot Synthesis of Long Rutile TiO ₂ Nanorods and Their Photocatalytic Activity for O ₂ Evolution: Comparison with Near-Spherical Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 31557 ~ 31565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c04003	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 Cai Xiaoyan, Mao Liang, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro, Kasani Sujun, Wu Nianqiang, Zhang Junying	4. 巻 15
2. 論文標題 Effects of Bi-dopant and co-catalysts upon hole surface trapping on La ₂ Ti ₂ O ₇ nanosheet photocatalysts in overall solar water splitting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Research	6. 最初と最後の頁 438 ~ 445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-021-3498-5	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 Kawai Kiyohiko, Fujitsuka Mamoru	4. 巻 51
2. 論文標題 Single-molecule Fluorescence Kinetic Sandwich Assay Using a DNA Sequencer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 139 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.210726	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 Li Xinxu, Nomura Kota, Guedes Arnaud, Goto Tomoyo, Sekino Tohru, Fujitsuka Mamoru, Osakada Yasuko	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhanced Photocatalytic Activity of Porphyrin Nanodisks Prepared by Exfoliation of Metalloporphyrin-Based Covalent Organic Frameworks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 7172 ~ 7178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c06838	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 Xue Jiawei, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 56
2. 論文標題 Shallow trap state-enhanced photocatalytic hydrogen evolution over thermal-decomposed polymeric carbon nitride	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 5921 ~ 5924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC01870H	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 Shi Xiaowei, Mao Liang, Dai Chao, Yang Ping, Zhang Junying, Dong Fuyuan, Zheng Lingxia, Fujitsuka Mamoru, Zheng Huajun	4. 巻 8
2. 論文標題 Inert basal plane activation of two-dimensional ZnIn ₂ S ₄ via Ni atom doping for enhanced co-catalyst free photocatalytic hydrogen evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 13376 ~ 13384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0TA03992F	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 Liu Zuoyue, Jung Kyung Oh, Takahata Ryo, Sakamoto Masanori, Teranishi Toshiharu, Fujitsuka Mamoru, Pratz Guillem, Osakada Yasuko	4. 巻 10
2. 論文標題 Hard X-ray excited optical luminescence from protein-directed Au-20 clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 13824 ~ 13829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA01935F	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 Shimakoshi Hisashi, Shichijo Keita, Tominaga Shiori, Hisaeda Yoshio, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 49
2. 論文標題 Catalytic Dehalogenation of Aryl Halides via Excited State Electron Transfer from the Co(I) State of B12 Complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 820 ~ 822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200241	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 Xu Jie, Tojo Sachiko, Fujitsuka Mamoru, Kawai Kiyohiko	4. 巻 5
2. 論文標題 Dynamics of Single Stranded RNA Looping Probed and Photoregulated by Sulfonated Pyrene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemistrySelect	6. 最初と最後の頁 8002 ~ 8008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.202002231	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 Tashiro Keigo, Murafuji Toshihiro, Sumimoto Michinori, Fujitsuka Mamoru, Yamazaki Suzuko	4. 巻 44
2. 論文標題 The formation mechanism of ZnTPyP fibers fabricated by a surfactant-assisted method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 13824 ~ 13833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NJ02829K	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 Anai Yuki, Shichijo Keita, Fujitsuka Mamoru, Hisaeda Yoshio, Shimakoshi Hisashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Synthesis of a B12-BODIPY dyad for B12-inspired photochemical transformations of a trichloromethylated organic compound	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 11945 ~ 11948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC04274A	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 Shigemitsu Hajime, Tani Youhei, Tamemoto Tomoe, Mori Tadashi, Li Xinxin, Osakada Yasuko, Fujitsuka Mamoru, Kida Toshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Aggregation-induced photocatalytic activity and efficient photocatalytic hydrogen evolution of amphiphilic rhodamines in water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 11843 ~ 11848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SC04285D	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 He Shaoxiong, Zhai Chunyang, Fujitsuka Mamoru, Kim Sooyeon, Zhu Mingshan, Yin Renli, Zeng Lixi, Majima Tetsuro	4. 巻 281
2. 論文標題 Femtosecond time-resolved diffuse reflectance study on facet engineered charge carrier dynamics in Ag3PO4 for antibiotics photodegradation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 119479 ~ 119479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2020.119479	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 Xu Jie, Fan Shuya, Xu Lei, Maruyama Atsushi, Fujitsuka Mamoru, Kawai Kiyohiko	4. 巻 60
2. 論文標題 Control of Triplet Blinking Using Cyclooctatetraene to Access the Dynamics of Biomolecules at the Single Molecule Level	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 12941 ~ 12948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202101606	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 Ruan Daming, Xue Jiawei, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 55
2. 論文標題 Ultrafast spectroscopic study of plasmon-induced hot electron transfer under NIR excitation in Au triangular nanoprism/g-C3N4 for photocatalytic H2 production	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 6014 ~ 6017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC02574J	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 Shi Xiaowei, Kim Sooyeon, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 254
2. 論文標題 In situ observation of NiS nanoparticles depositing on single TiO2 mesocrystal for enhanced photocatalytic hydrogen evolution activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 594 ~ 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2019.05.031	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 Fujitsuka Mamoru, Lu Chao, Zhuang Bo, Kayahara Eiichi, Yamago Shigeru, Majima Tetsuro	4. 巻 123
2. 論文標題 Size-Dependent Relaxation Processes of Photoexcited [n]Cycloparaphenylenes (n = 5-12): Significant Contribution of Internal Conversion in Smaller Rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 4737 ~ 4742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.9b03334	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 Choi Jungkweon, Tojo Sachiko, Ahn Doo Sik, Fujitsuka Mamoru, Miyamoto Shunichi, Kobayashi Kazuo, Ihee Hyotcherl, Majima Tetsuro	4. 巻 25
2. 論文標題 Proton Transfer Accompanied by the Oxidation of Adenosine	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 7711 ~ 7718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201900732	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 Zhu Mingshan, Fujitsuka Mamoru, Zeng Lixi, Liu Minghua, Majima Tetsuro	4. 巻 256
2. 論文標題 Dual function of graphene oxide for assisted exfoliation of black phosphorus and electron shuttle in promoting visible and near-infrared photocatalytic H ₂ evolution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 117864 ~ 117864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2019.117864	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 Sun Zhichao, Fujitsuka Mamoru, Shi Chuan, Zhu Mingshan, Wang Anjie, Majima Tetsuro	4. 巻 3
2. 論文標題 Efficient Visible Light Driven Hydrogen Generation on g C ₃ N ₄ Coupled with Iron Phosphide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 540 ~ 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cptc.201800260	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 Zhu Mingshan, Zhai Chunyang, Kim Sooyeon, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 10
2. 論文標題 Monitoring Transport Behavior of Charge Carriers in a Single CdS@CuS Nanowire via In Situ Single-Particle Photoluminescence Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4017 ~ 4024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b01517	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 Tahara Keishiro, Koyama Haruya, Fujitsuka Mamoru, Tokunaga Ken, Lei Xu, Majima Tetsuro, Kikuchi Jun-Ichi, Ozawa Yoshiki, Abe Masaaki	4. 巻 84
2. 論文標題 Charge-Separated Mixed Valency in an Unsymmetrical Acceptor-Donor-Donor Triad Based on Diarylboryl and Triarylamine Units	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 8910 ~ 8920
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.9b00836	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 Wang Wei-Kang, Chen Jie-Jie, Lou Zai-Zhu, Kim Sooyeon, Fujitsuka Mamoru, Yu Han-Qing, Majima Tetsuro	4. 巻 116
2. 論文標題 Single-molecule and -particle probing crystal edge/corner as highly efficient photocatalytic sites on a single TiO ₂ particle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 18827 ~ 18833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1907122116	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 Yamazaki Yukari, Fujitsuka Mamoru, Yamazaki Suzuko	4. 巻 2
2. 論文標題 Effect of Organic Additives during Hydrothermal Syntheses of Rutile TiO ₂ Nanorods for Photocatalytic Applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 5890 ~ 5899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.9b01334	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 Xue Jiawei, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 11
2. 論文標題 Shallow Trap State-Induced Efficient Electron Transfer at the Interface of Heterojunction Photocatalysts: The Crucial Role of Vacancy Defects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 40860 ~ 40867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acсами.9b14128	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 Shichijo Keita, Fujitsuka Mamoru, Hisaeda Yoshio, Shimakoshi Hisashi	4. 巻 907
2. 論文標題 Visible light-driven photocatalytic duet reaction catalyzed by the B12-rhodium-titanium oxide hybrid catalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Organometallic Chemistry	6. 最初と最後の頁 121058 ~ 121058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jorganchem.2019.121058	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 Ruan Daming, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 264
2. 論文標題 Exfoliated Mo2C nanosheets hybridized on CdS with fast electron transfer for efficient photocatalytic H2 production under visible light irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 118541 ~ 118541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2019.118541	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 Shi Xiaowei, Mao Liang, Yang Ping, Zheng Huajun, Fujitsuka Mamoru, Zhang Junying, Majima Tetsuro	4. 巻 265
2. 論文標題 Ultrathin ZnIn2S4 nanosheets with active (110) facet exposure and efficient charge separation for cocatalyst free photocatalytic hydrogen evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 118616 ~ 118616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2020.118616	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 Xue Jiawei, Fujitsuka Mamoru, Majima Tetsuro	4. 巻 12
2. 論文標題 Near Bandgap Excitation Inhibits the Interfacial Electron Transfer of Semiconductor/Cocatalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 5920 ~ 5924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b20247	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Xinxi LI, Guedes ARNAUD, Kota NOMURA, Yasuko OSAKADA, Mamoru FUJITSUKA
2. 発表標題 Synthesis and photocatalytic improvement of metal-porphyrin containing nanodisks from covalent organic frameworks
3. 学会等名 2021年光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zuoyue LIU, Guillem PRATX, Mamoru FUJITSUKA, Yasuko OSAKADA
2. 発表標題 Color variants of photoluminescent polymer dots doped with iridium complexes
3. 学会等名 2021年光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jie XU, Shuya FAN, Lei XU, Atsushi MARUYAMA, Mamoru FUJITSUKA, Kiyohiko KAWAI
2. 発表標題 Using Triplet-Triplet Energy Transfer Kinetics to Access the Dynamics of Biomolecules at the Single-Molecule Level
3. 学会等名 2021年光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zuoyue LIU, Kyung Oh JUNG, Ryo TAKAHATA, Masanori SAKAMOTO, Toshiharu TERANISHI, Mamoru FUJITSUKA, Guillem PRATX, Yasuko OSAKADA
2. 発表標題 Hard X-ray excited optical luminescence from protein-directed Au ₂₀ clusters
3. 学会等名 2020年web光化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jie XU, Shunichi MIYAMOTO, Sachiko TOJO, Mamoru FUJITSUKA, Kiyohiko Kawai
2. 発表標題 Sulfonated Pyrene as Both a Probe and a Photoregulator for Single-Stranded Oligonucleotide Looping
3. 学会等名 2020年web光化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mamoru Fujitsuka
2. 発表標題 Ultrafast laser spectroscopic studies on electron transfer processes of the excited radical ions
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 山崎 鈴子
2. 発表標題 水熱法によるルチル型酸化チタンナノロッド光 触媒の合成における添加剤の効果
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤塚 守
2. 発表標題 強く相互作用した芳香族イミド分子 間における励起ラジカルアニオンの電子移動
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山路 稔
2. 発表標題 放射線化学的手法によるジアリルエテンの光化学的性質の研究
3. 学会等名 第62回放射線化学討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

HOME| 藤塚研究室
<https://mec.isir-sanken.jp/labs/mec/>

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