

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H02055

研究課題名(和文) 界面の光励起プロセスを利用した人工光合成システムの研究開発

研究課題名(英文) Development of artificial photosynthesis system driven by interfacial photo-excitation process

研究代表者

宮内 雅浩 (Miyuchi, Masahiro)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：60443230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：異種半導体間における界面電荷移動遷移(IFCT)による可視光光触媒反応が知られるが、有機物分解反応に限定されていた。これまでの研究は粉末系に限定され、電荷分離や反応サイトの可視化が困難であった。そこで本研究ではIFCTの電荷分離と反応サイトの可視化、そして、この原理を用いた水分解反応の実現を目的とした。

半導体パターン薄膜のケルビンプローブ顕微鏡による解析によって界面のIFCT遷移を実証した。また、光触媒反応で担持される微粒子を原子間力顕微鏡で観察することで、化学反応サイトの可視化に成功した。これらの知見をもとに、酸化銅/酸化チタンからなる電極を開発し、可視光照射下での水分解反応に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した「よく定義された薄膜モデルを用いたケルビンプローブ顕微鏡/原子間力顕微鏡による観察」は、様々な物質の界面での電荷移動や化学反応サイトを理解する一助となる。また、本研究では界面電荷移動遷移(IFCT)の機構を用い、これまでこの遷移では報告例の無かった「可視光照射による水分解反応」を達成した。今後、この機構を用いた様々な物質の人工光合成への展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)： Interfacial charge transfer (IFCT) is known to drive photocatalysis under visible light. However, its mechanism study is insufficient and its reactions are limited to the organic decomposition. Herein, the purpose of this study is to prove the IFCT mechanism clearer and to achieve the photocatalytic overall water splitting under visible light using the IFCT mechanism. Based on a well-defined thin film model sample, I successfully visualized the IFCT by Kelvin probe force microscopy. In addition, chemical reaction sites are also visualized by observing photo-deposited metal particles by atomic force microscopy. Further, we fabricated the Cu(II) nanoclusters-grafted TiO₂ electrode and achieved its water splitting reaction under visible light.

研究分野：無機光エネルギー変換材料

キーワード：光触媒 界面電荷移動遷移 薄膜 ナノクラスター 可視光 水分解 ケルビンプローブ顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

異種材料間における界面電荷移動遷移 (Interfacial Charge Transfer: IFCT) は以前から理論的に予想されてきた (Hush et al. *Electrochimica Acta* 13, 1005, 1968)。半導体における IFCT には 2 種類あって、半導体の価電子帯から酸化剤となる物質への遷移 (Band to Oxidant Charge Transfer: BOCT) そして、還元剤となる物質から伝導帯への遷移 (Reductant to Band Charge Transfer: RBCT) が知られる (Sutin et al. *J. Phys. Chem. B* 110, 25181, 2006)。近年、これらの遷移が光触媒反応に適用され、BOCT は Cu(II) や Fe(III) クラスターを担持した TiO₂ (Irie et al. *Chem. Phys. Lett.* 457, 202, 2008) RBCT は Cr(III) クラスター担持 TiO₂ で実証された。いずれのケースでも、可視光の照射で 2-プロパノールを酸化分解できることが報告されている (Irie et al. *Appl. Catal. B: Environ.* 96, 142, 2010)。また、この原理を利用した応用として、気相有機物の酸化に加え、可視光による超親水性、抗菌・抗ウイルス性能なども報告されている (Miyachi et al. *J. Phys. Chem. Lett.* 7, 75, 2016)。しかしながら、IFCT の機構を用いた水からの水素生成など、人工光合成反応への応用例は無かった。

IFCT の機構解明に関しては、特に Cu(II)-TiO₂ での BOCT 遷移の解析がおこなわれ、X 線吸収端近傍構造や (Irie et al. *J. Phys. Chem. C* 113, 10761, 2009) 電子スピン共鳴解析により (*J. Phys. Chem. C* 115, 21283, 2011) 可視光照射下での界面でのキャリア生成が明らかにされている。一方、これらの解析は粉末状のサンプルを対象としており、電荷移動がおよぶ空間的な距離や化学反応サイトの可視化が困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、IFCT 遷移の更なる機構の解明、そして、この遷移を利用した可視光応答型人工光合成システムの実現を目的とした。

IFCT の機構解明については、よく定義されたモデル薄膜を用い、ケルビンプローブ顕微鏡 (Kelvin Probe Force Microscope: KPFM) によって光励起キャリアの可視化を試みた。また、パターン化膜を用い、光還元 (酸化) 反応で担持される微粒子を原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) で観察することで、化学反応サイトの可視化を試みた。

また、上記モデル薄膜での知見を多孔質半導体電極に展開し、IFCT の機構を利用した可視光による水素生成反応を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

IFCT 機構解明のため、単結晶が流通している (100) 面のチタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) を基板として用い、その上に CuO と Cr₂O₃ 薄膜をパルスレーザー堆積 (PLD) 法を用いて成膜した。Cr₂O₃ 膜では RBCT 遷移、CuO 膜では BOCT 遷移を解析することになる。KPFM の解析では PLD 成膜時にメタルマスクを用いない (パターン化しない) 薄膜を用いた。

また、AFM による化学反応サイトの可視化のため、PLD 成膜時に 100 μm の正方形の穴が施してあるメタルマスクを介し、パターン化した Cr₂O₃ 膜を SrTiO₃ 基板上に成膜した。このサンプルを硫酸マンガン水溶液中、または、塩化金酸水溶液中で可視光を照射後、サンプルを洗浄、乾燥したのち、AFM で微粒子の析出を観察した。硫酸マンガン水溶液では酸化マンガンの析出 (酸化反応) 塩化金酸水溶液では金の析出 (還元反応) を観察することができる。硫酸マンガン水溶液中での電子捕捉剤として Na₂S₂O₈ を溶解した。また、塩化金酸水溶液中での正孔捕捉を確認するため質量数 18 の酸素を含む水分子 (H₂¹⁸O) を用い、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を用いて ¹⁸O₂ の生成を評価した。

更に、BOCT 遷移を利用した可視光による水からの水素生成を達成するため、CuO ナノクラスターを担持した TiO₂ 多孔質電極を用い、可視光照射下での水素生成、ならびに、酸素生成を評価した。

4. 研究成果

いずれの膜も、X 線回折にてピークを示さず、アモルファス状であることが示唆された。成膜したサンプルに対し、可視光レーザー (波長: 405, 470, 532, 635 nm)

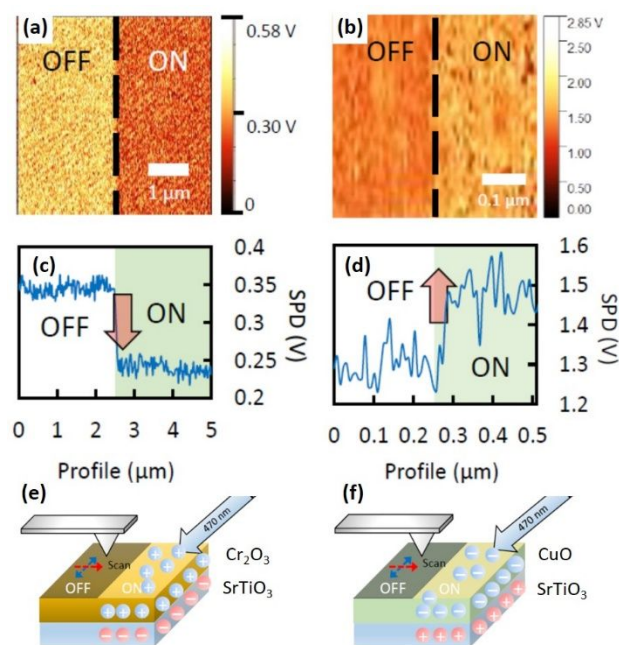


図 1 可視光オン・オフ時の KPFM 像(a: Cr₂O₃, b: CuO), 表面電位 (SPD) のラインプロファイル(c: Cr₂O₃, d: CuO), 電荷分布の模式図(e: Cr₂O₃, f: CuO)

照射前後の KPFM を観察した。KPFM の探針はあらかじめ仕事関数がわかっている Pt-Ir コートしたものをを用い、KPFM 像をスキャンする途中で光照射をオンにした。図 1 に、膜厚が 3 nm の Cr_2O_3 と CuO 膜に対して 470 nm の可視光をオン・オフした場合の KPFM 像を示す。光をオンにした場合、 Cr_2O_3 膜では表面電位がダウンシフトし、逆に CuO 膜ではアップシフトした。これらの結果は、可視光照射によって Cr_2O_3 側に正孔が、 CuO 側には電子が集まり、それぞれ、RBCT、BOCT 遷移が起こっていることを示唆している(図 1 e,f)コントロールの実験として、 SrTiO_3 のみ、 Cr_2O_3 と SrTiO_3 の間にアルミナ (Al_2O_3) 絶縁膜を挟んだもの、石英 (SiO_2) 基板に Cr_2O_3 を異なる膜厚で堆積したもの、 SiO_2 に CuO を堆積したサンプルについて、可視光オン・オフ時の KPFM のラインプロファイルも観察したが、いずれも光オン・オフで明確な変化が認められなかった。すなわち、図 1 で見られた電位の変化は、 Cr_2O_3 と CuO が SrTiO_3 に直接接触していることが重要であることが示された。

次に、 Cr_2O_3 膜について照射光の波長依存性や膜厚依存性について評価した。 SrTiO_3 上に堆積した膜厚 3 nm の Cr_2O_3 膜について、その吸収スペクトルと表面電位変化量の波長依存性(アクションスペクトル)を図 2 に示す。この結果、IFCT による可視光吸収に応じて表面電位が変化している様子が確認できた。

SrTiO_3 基板上に異なる膜厚で堆積した Cr_2O_3 膜に対し、波長 470 nm の可視光を照射した場合の KPFM(図 3 a-c)そして、それらの表面電位の変化量と膜厚の関係を示す(図 3 d)。膜厚が 3 nm と極薄の場合、光照射時の表面電位の変化が顕著であった一方、膜厚を数十 nm に厚くすると電位の変化が観測できなくなった。膜厚を厚くすると透過率が下がり励起光が薄膜と基板界面まで届かなくなることや、IFCT によって電荷分離がおよぶ距離がナノメートルオーダーに制限されたことが考えられる。

Cr_2O_3 パターン膜を硫酸マンガン水溶液、または、塩化金酸水溶液に浸漬し、可視光を照射し可視光を照射したあとのレーザー顕微鏡像と AFM 像を図 4 に示す。光触媒反応による粒子の析出は、いずれの場合も島状のパターン膜のエッジの部分に選択的に析出した。X 線光電子分光(XPS)の結果から、それぞれ、酸化マンガン(MnO_2)と金属状の金(Au)が析出していることを確認した。AFM によってパターン膜のエッジ部分にフォーカスして観察すると、 MnO_2 粒子は Cr_2O_3 膜側に、 Au は基板の SrTiO_3 側に析出していた。これらの結果は、KPFM が示唆した可視光による RBCT 遷移、すなわち、 Cr_2O_3 に正孔、 SrTiO_3 に電子が生成している結果と矛盾しなかった。 Au の還元析出の実験系において、ヘッドスペースのガスを GC-MS で分析したところ、同位体の水の酸化による $^{18}\text{O}_2$ の生成も確認した。また、我々は TiO_2 基板上的 CuO パターン化薄膜においても、BOCT 遷移による化

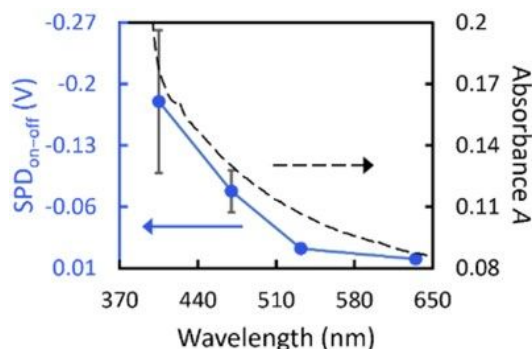


図 2 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SrTiO}_3$ の吸収スペクトルと異なるレーザーを用いた SPD のアクションスペクトル

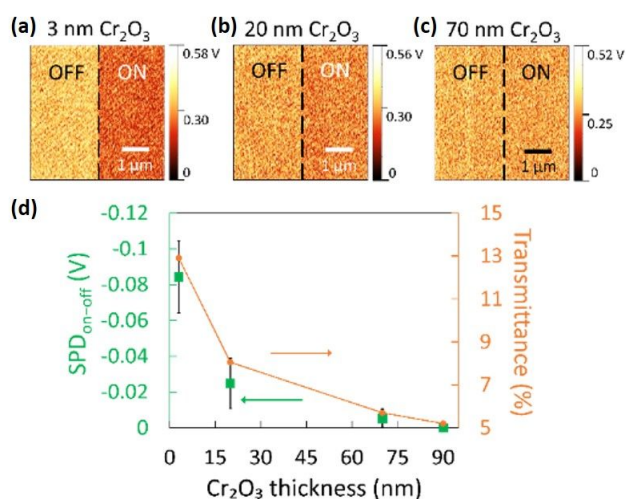


図 3 異なる膜厚 Cr_2O_3 の KPFM 像(a-c)、膜の透過率および表面電位変化量の膜厚依存性(d)

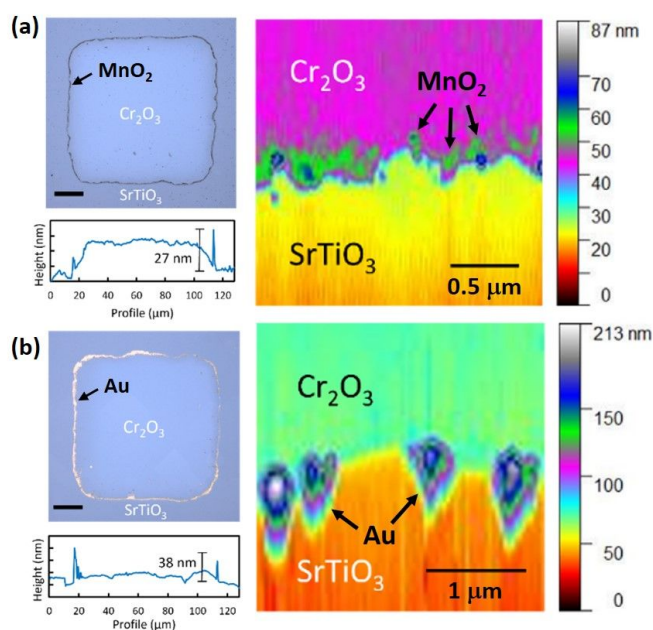


図 4 Cr_2O_3 パターン膜(基板 SrTiO_3)に可視光を照射した後のレーザー顕微鏡像と AFM 像。(a) 硫酸マンガン水溶液中で可視光照射、(b) 塩化金酸水溶液中で可視光照射した結果。

学反応サイトを同様に可視化している。

本研究の結果から予想される薄膜界面での電荷分離のスキームを図5に示す。可視光照射で誘起されたRBCT遷移により基板と膜の界面で一様に電荷分離が起こり、SrTiO₃に電子、Cr₂O₃に正孔が生じる。KPFMの膜厚依存性から、界面で励起した正孔の及ぶ範囲はナノメートルオーダーと予想される。また、島状のパターン膜の中心部では、SrTiO₃に生成した電子と何らかの酸化剤が接触できないため、島の中心部では電子・正孔対が再結合し、化学反応はパターン膜のエッジ部分で選択的に起こる。すなわち、エッジ部分が化学反応サイトになるため、活性点を増やすには島のサイズをナノメートルオーダーに小さくすることが得策である。

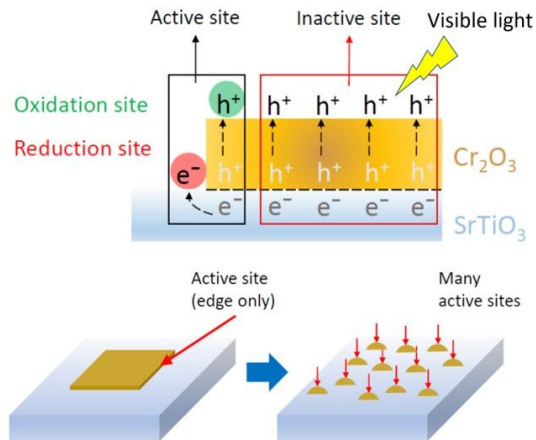


図5 Cr₂O₃/SrTiO₃膜でのRBCT遷移の模式図

次にIFCT遷移を用いた可視光照射による水分解を試みた。IFCTのうち、酸化力が担保できるBOCT遷移を用いた材料系から検討した。前記の良く定義された薄膜におけるメカニズム解析の結果、ナノクラスターを担持した半導体の活性が高いことが予想される。そこで、Cu(II)からなるナノクラスターをTiO₂粒子に担持した電極を作製した。基板には導電性のフッ素ドープ酸化スズ(FTO)コート基板を用いた。図6(a)にCu(II)を担持したTiO₂粒子のTEM像を示す。数ナノメートルオーダーのCu(II)クラスターがTiO₂粒子表面に担持されている様子が観察できた。放射光を用いたX線吸収分光によってCu(II)クラスターの構造を分析したところ、その構造は5配位のピラミッド構造であることを確認した。また、Cu(II)/TiO₂電極に対して可視光を照射した場合の電気化学特性を図6(b)に示したが、p型の光カソード特性が見られ、水素生成が示唆された。コントロールの実験として、Cu(II)を担持したSiO₂、Cu(II)を直接FTO基板にコートしたもの、そして、TiO₂のみからなる電極も評価したが、いずれも光電流が観測できなかった。前記の薄膜での検証結果と同様に、Cu(II)とTiO₂が直接接触していることが重要であることがわかった。

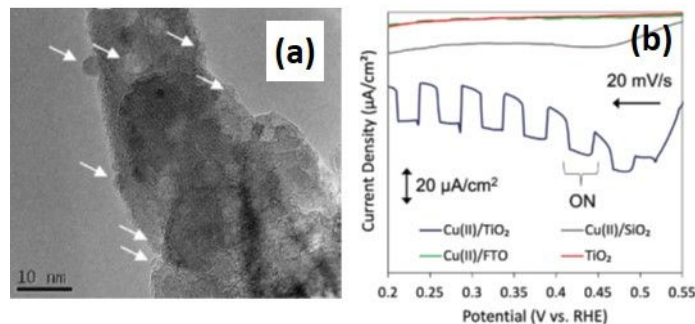


図6 Cu(II)/TiO₂電極のTEM像(a)、その光電気化学特性(b)

次に、このCu(II)/TiO₂電極をH型セルに設置し、一定のバイアス下(0.44V vs RHE)で波長420nm以上の可視光を照射した場合の水分解特性を評価した。結果を図7に示すが、可視光の照射によって作用極では水素が、対極では酸素が生成していることが分かった。酸素については、溶存酸素の影響などで定量性に欠け、作用極で生成した水素量との定量的な比較はできないが、可視光のオン・オフに応じて酸素が生成することから、IFCTの原理で水の分解反応が進むことが強く示唆された。また、このCu(II)/TiO₂電極の光電流のアクションスペクトルを図7(c)に示したが、吸収スペクトルと同様のプロファイル、すなわち、IFCTによる可視光遷移によって反応が進行していることがわかった。95時間の光照

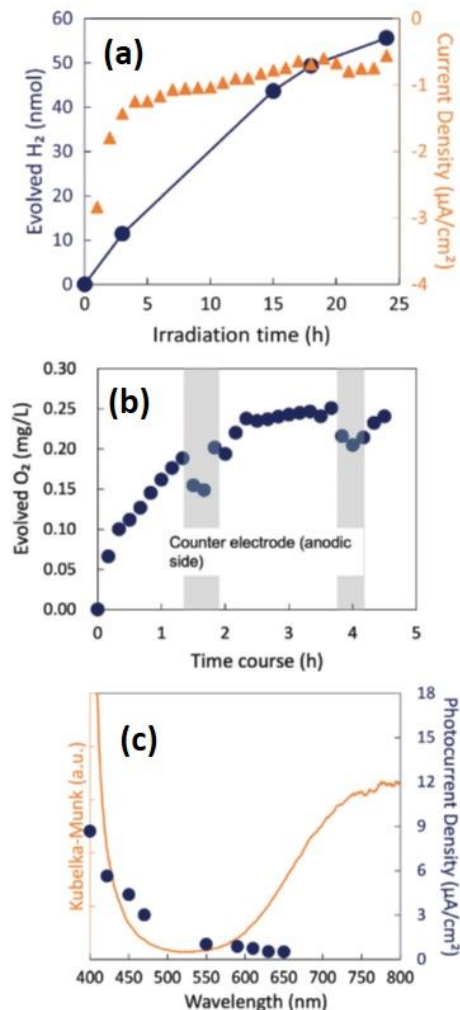


図7 Cu(II)/TiO₂電極の可視光照射下での水素生成(a)、酸素生成(b)、光電流のアクションスペクトル(c)

射でターンオーバー数が1を超え、その時間を超えても水素生成性能が劣化していないことから、自己分解ではなく触媒的に反応が進行していることも示唆された。当初計画では、Cu(II)/TiO₂をカソード、Cr₂O₃/SrTiO₃をアノードとするZ-スキームを構築して水の全分解反応を達成する研究予定を立てていたが、TiO₂に光励起した正孔は強い酸化力を持つため、Cu(II)/TiO₂のみ、すなわち、BOCT 遷移のみでも可視光による水分解を達成することができた。

良く定義された薄膜試料を用い、KPFM と AFM によって電荷分離と化学反応サイトを可視化することができた。こうした解析手法は様々な物質の界面での電荷移動や化学反応サイトを理解する一助となる。また、本研究ではIFCTの機構を用い、これまで報告例の無かった「可視光照射による水分解反応」を達成し、今後、この機構を用いた様々な物質の人工光合成への展開も期待できる。

本研究の主な成果として、良く定義された薄膜による機構解析については、*J. Mater. Chem. A* 10, 752, 2022 に発行された。Cr₂O₃ ナノクラスターを担持した SrTiO₃ 粉末による光触媒反応については、*Appl. Catal. B Environ.* 270, 118883, 2020 に発行され、CuO/TiO₂ 多孔質電極による可視光での水分解反応の成果については、*Small* DOI: 10.1002/smll.202206893, 2023 に発行された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Wardhana Aufandra C., Yamaguchi Akira, Adachi Kiyohiro, Hashizume Daisuke, Miyauchi Masahiro	4. 巻 advanced article
2. 論文標題 Direct Interfacial Excitation from TiO ₂ to Cu(II) Nanoclusters Enables Cathodic Photoresponse for Hydrogen Evolution under Visible Light Irradiation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2206893 ~ 2206893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202206893	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 Wardhana Aufandra Cakra, Yasuhara Sou, Yu Min-Wen, Yamaguchi Akira, Nagao Tadaaki, Ishii Satoshi, Miyauchi Masahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Direct imaging of visible-light-induced one-step charge separation at the chromium oxide/strontium titanate interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 752 ~ 761
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TA08950A	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 Yang-Shin, Yamaguchi Akira, Yang Yue, Abe Hideki, Ueda Shigenori, Tanabe Toyokazu, Miyauchi Masahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Visible-Light-Induced CO ₂ Reduction by Mixed-Valence Tin Oxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 13415 ~ 13419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.1c02896	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 Kujirai Tomoki, Yamaguchi Akira, Fujita Takeshi, Abe Hideki, Miyauchi Masahiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Active site separation of photocatalytic steam reforming of methane using a gas-phase photoelectrochemical system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 8007 ~ 8010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CC02914B	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 Hirabayashi T., Yasuhara S., Shoji S., Yamaguchi A., Abe H., Ueda S., Zhu H., Kondo T., Miyuchi M.	4. 巻 26
2. 論文標題 Fabrication of Hydrogen Boride Thin Film by Ion Exchange in MgB2	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 6212 ~ 6212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules26206212	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 Cho Y., Yamaguchi A., Uehara R., Yasuhara S., Hoshina T., Miyuchi M.	4. 巻 152
2. 論文標題 Temperature dependence on bandgap of semiconductor photocatalysts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 231101 ~ 231101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012330	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 Kawamura Reiya, Yamaguchi Akira, Shimada Chika, Ishibiki Ryota, Fujita Takeshi, Kondo Takahiro, Miyuchi Masahiro	4. 巻 49
2. 論文標題 Acid Assisted Synthesis of HB Sheets through Exfoliation of MgB2 Bulk in Organic Media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1194 ~ 1196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200203	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 Yang Yue, Yamaguchi Akira, Jiang Haoyang, van der Kooy Annabel, Okunaka Sayuri, Hosogai Mariko, Tokudome Hiromasa, Miyuchi Masahiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Green light active photocatalyst for complete oxidation of organic molecules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 9210 ~ 9213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC03279D	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 Miyuchi Masahiro, Sunada Kayano, Hashimoto Kazuhito	4. 巻 10
2. 論文標題 Antiviral Effect of Visible Light-Sensitive CuxO/TiO2 Photocatalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysts	6. 最初と最後の頁 1093 ~ 1093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/catal10091093	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 Cho Yohei, Shoji Shusaku, Yamaguchi Akira, Hoshina Takuya, Fujita Takeshi, Abe Hideki, Miyuchi Masahiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Visible-light-driven dry reforming of methane using a semiconductor-supported catalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 4611 ~ 4614
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC00729C	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 Cakra Wardhana Aufandra, Yamaguchi Akira, Shoji Shusaku, Liu Min, Fujita Takeshi, Hitosugi Taro, Miyuchi Masahiro	4. 巻 270
2. 論文標題 Visible-light-driven photocatalysis via reductant-to-band charge transfer in Cr(III) nanocluster-loaded SrTiO3 system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 118883 ~ 118883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2020.118883	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 Kawamura Reiya, Cuong Nguyen Thanh, Fujita Takeshi, Ishibiki Ryota, Hirabayashi Toru, Yamaguchi Akira, Matsuda Iwao, Okada Susumu, Kondo Takahiro, Miyuchi Masahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Photoinduced hydrogen release from hydrogen boride sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12903-1	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 Jiang Haoyang, Peng Xiaobo, Yamaguchi Akira, Fujita Takeshi, Abe Hideki, Miyauchi Masahiro	4. 巻 55
2. 論文標題 Synergistic photothermal and photochemical partial oxidation of methane over noble metals incorporated in mesoporous silica	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 13765 ~ 13768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cc06170c	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 Koyasu Satoshi, Umezawa Naoto, Yamaguchi Akira, Miyauchi Masahiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Optical properties of single crystalline copper iodide with native defects: Experimental and density functional theoretical investigation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115101 ~ 115101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5082865	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 Koyasu Satoshi, Umezawa Naoto, Baniecki John D., Yamaguchi Akira, Miyauchi Masahiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Growth of Large Single Crystals of Copper Iodide by a Temperature Difference Method Using Feed Crystal Under Ambient Pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 6748 ~ 6756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.8b01024	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 Miyamoto Hironao, Matsuzaki Kosuke, Yamaguchi Akira, Miyauchi Masahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Visible-Light-Active Photoelectrochemical Z-Scheme System Based on Top 5 Clarke-Number Elements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 5954 ~ 5959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.8b00978	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 Toshiki、Yamaguchi Akira、Umezawa Naoto、Miyuchi Masahiro	4. 巻 122
2. 論文標題 Photocatalytic CO2 Reduction Using a Pristine Cu2ZnSnS4 Film Electrode under Visible Light Irradiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 21695 ~ 21702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b04241	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17件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 M. Miyuchi
2. 発表標題 Inactivation of SARS-CoV-2 Viruses by Indoor-Light-Sensitive TiO2-based Photocatalyst
3. 学会等名 Uzbekistan-Japan International Conference on Energy-Earth-Environmen-Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Miyuchi
2. 発表標題 Semiconductor based photocatalyst for antiviral function and fuel production
3. 学会等名 NPG Asia Materials Symposium 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aufandra Cakra Wardhana, Satoshi Ishii, Sou Yasuhara, Akira Yamaguchi, Masahiro Miyuchi
2. 発表標題 Elucidation of Interfacial Charge Excitation in Visible-light-active Cr2O3/SrTiO3 Photocatalyst System
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M Miyauchi
2. 発表標題 Antimicrobial Effect of Photocatalyst and Application to Products
3. 学会等名 8th International Conference for Universal Design in the Cloud 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Kushida, Akira Yamaguchi, Masahiro Miyauchi
2. 発表標題 TiO ₂ -based Photocatalyst for Gas-Phase CO ₂ Recycling
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Kujirai, Akira Yamaguchi, Takeshi Fujita, Hideki Abe, Masahiro Miyauchi
2. 発表標題 Reaction site Separation of Photocatalytic Steam Reforming of Methane With Gas-Phase Photoelectrochemical System
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Miyauchi
2. 発表標題 Current situation on photocatalytic technology in Japan
3. 学会等名 Committee of Asian Standardization for Photocatalytic Material and Products (CASP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yue Yang, Akira Yamaguchi, Yohei Cho, Sayuri Okunaka, Hiromasa Tokudome, Masahiro Miyauchi
2. 発表標題 Bandgap widening of BiVO ₄ by diluting Bi orbital component for higher oxidation activity
3. 学会等名 第25回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aufandra Cakra Wardhana, Akira Yamaguchi, Shusaku Shoji, Taro Hitosugi, Masahiro Miyauchi
2. 発表標題 Visible-Light-Active Photocatalysis over Chromium (III)-grafted Strontium Titanate
3. 学会等名 2019年電気化学秋季大会, Sep. 2019.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Miyauchi
2. 発表標題 Metal-oxide-bases photocatalyst for energy and environment,
3. 学会等名 Tokyo Institute of Technology and Imperial College London's 2nd Workshop on Plastic Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Miyauchi, Shusaku Shoji, Yohei Cho, Akira Yamaguchi, Takeshi Fujita, Hideki Abe
2. 発表標題 Photo-induced Dry Reforming of Methane Using Metal Nanoparticles/ Metal Oxide Photocatalysts
3. 学会等名 Collaborative Conference on Advanced Materials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Miyauchi, Shusaku Shoji, Yohei Cho, Akira Yamaguchi, Takeshi Fujita, Hideki Abe
2. 発表標題 Photocatalytic Uphill Conversion of Natural Gas Reforming
3. 学会等名 第3回光触媒国際シンポジウム(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Miyauchi
2. 発表標題 Metal-oxide-bases photocatalyst for energy and environment
3. 学会等名 Tokyo Institute of Technology and Imperial College London's 2nd Workshop on Plastic Electronics(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Miyauchi
2. 発表標題 TiO ₂ Based Photocatalyst for Environmental Remediation Using the Concept of Interfacial Charge Transfer Driven by Visible Light
3. 学会等名 Energy Materials and Nanotechnology 2018 (EMN 2018)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Miyauchi
2. 発表標題 Interfacial Charge Transfer between Ultrathin CuO _x Film and Rutile TiO ₂ and Its Application for Efficient Photocatalysis
3. 学会等名 22nd International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮内雅浩
2. 発表標題 温和な溶液プロセスによるナノクラスター担持光触媒の開発
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第31回秋季シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮内雅浩
2. 発表標題 環境浄化と人工光合成、それぞれの光触媒の設計
3. 学会等名 光触媒工業会2018年度技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 宮内雅浩	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 365
3. 書名 抗菌・抗ウイルス剤の最新動向	

〔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

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