

令和 2 年 5 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05961

研究課題名（和文）精密制御積層膜を用いた二酸化炭素光燃料化高速化と動的作過程の顕微分光追跡

研究課題名（英文）Faster Photoconversion of Carbon Dioxide into Fuels Using Precisely Controlled Layers and the Monitoring of Dynamic Operation Steps by Microscopic Spectroscopy

研究代表者

泉 康雄 (Izumi, Yasuo)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50251666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：二酸化炭素の光燃料化を中心に基礎的研究を行った。再生可能エネルギーにより、CO₂を再び燃料にすることができれば、新たなカーボンニュートラルサイクルを構築できる。継続研究を基に、層状複水酸化物およびTiO₂を基にして、高圧条件および精密制御積層膜をテストしたが、試料中炭酸イオンおよび結晶水等の存在のため、CO₂からメタノールおよびメタン生成経路を証明できなかった。そこで、ZrO₂に銀および金を添加した触媒を開拓し、質量クロマトグラムの経時追跡により、¹³C CO₂から¹³CO生成を直接証明した。さらに、X線スペクトルにより、銀および金が光を熱に変換し、活性化水素によりCO₂還元が進むことを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CO₂の光燃料化の研究は広く行われているが、CO₂からの反応経路を明らかにした研究は非常に限られている。本研究では同位体標識¹³C CO₂を用いて、質量クロマトグラムにより¹³C CO₂から¹²COへの経路を直接明らかにした点に学術的意義がある。赤外スペクトルも併用することで、光触媒表面での¹³C CO₂からの変換も明らかにしている。X線スペクトルにより、銀および金が光を吸収し、それが熱に変わる際の温度変化をCO₂光燃料化反応中に追跡する方法も確立した。並行して実施した、単セルで2 V以上得られる光触媒式太陽電池と合わせて、実用化も目指す点で社会的意義も有する。

研究成果の概要（英文）：Fundamental study mostly focusing on photoconversion of CO₂ into fuels was performed. If CO₂ can be converted into fuels again using renewable energy, new carbon-neutral cycle can be formed. Based on our continued study, layered double hydroxides and TiO₂ were used as the basis of catalysts and high pressure conditions and precisely controlled multilayer were tested for the CO₂ photoconversion. However, due to the presence of carbonate ions, crystal water, etc. in these samples, the formation route of methanol and methane starting from CO₂ cannot be proven. Then, we explored catalysts of ZrO₂ combined with silver and/or gold, and directly proved the formation route of ¹³CO stating from ¹³C CO₂ by monitoring the mass chromatogram. Furthermore, based on X-ray spectra, the conversion of light energy into heat and the activated hydrogen proceed CO₂ reduction were discovered.

研究分野：触媒化学、X線分光、環境化学

キーワード：低炭素化学 再生可能エネルギー 触媒・化学プロセス 太陽電池 二酸化炭素 光燃料化 同位体標識 光触媒

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

CO₂ 光燃料化が世界中で盛んに行われていたが、さらなる高活性化が強く求められていた。一方、一定の高活性を得たとする報告も CO₂ からの反応経路がほとんどの場合全く不明であり、信頼できる反応解析が不可欠になっていた(文献1)。

申請者らの研究では、CO₂ 光燃料化について層状複水酸化物の金属の組み合わせを選び、さらに高圧条件で反応させることにより、高活性化を進めている段階だった。そのため、以下のような研究アプローチを考えていた。

半導体同士の p-n 接合および金属ナノ粒子のドット積層により光酸化反応および光還元反応とを分離し、CO₂ 光燃料化に最も有効な積層成分は何か、スクリーニングする。疎水/親水表面の薄層転写、薄層剥離、結晶子の結晶系・サイズ・面方位の精密制御、合金ナノ粒子の組成・配置の制御により、CO₂ 光燃料化を 1 mmol h⁻¹ g_{cat}⁻¹ 以上まで高速化する。

これに対応して、100 μm 以下の放射光 X 線・赤外線・紫外可視光線ビームを水平/垂直偏光で照射することで、水平位置および方向に応じた価数・結合長・配位数・表面種・バンドギャップ・表面局在プラズモン共鳴波長を得て、サイト間での電荷/中間種の移行過程も含む、積層膜による CO₂ 光燃料化過程を解明する。

一方、CO₂ からの反応経路については、上記の反応開発の進歩にリンクさせて、高活性な触媒が見つければ、高活性なほど反応経路は追跡・把握しやすいと考えていた。

さらに、両極に光触媒を用いる太陽電池についての研究も進めていた。他の太陽電池や燃料電池と異なり、原理的に単セルで 1.9 V の起電力を得ていたが、上記計画と同様の積層膜により、光触媒式太陽電池を理論的起電力 3 V に近づける研究アプローチを考えていた。

2. 研究の目的

上記の背景から、研究開始時点で CO₂ 光燃料化について最も高活性だった Pd-TiO₂ および Zn-Cu-Ga 層状複水酸化物を薄膜化し、また高圧反応条件にし、反応ガス (CO₂, H₂, H₂O) の分圧や薄膜厚みを段階的に変えることで高活性化を図った。

これに対応して、¹³CO₂ を用いてガスクロマトグラフ-質量分析 (GC-MS) およびフーリエ変換赤外分光 (FTIR) により光変換反応を追跡した。

これらの光触媒では表面反応が鍵を握っており、表面吸着種の挙動およびそこから得られる同位体標識生成物をモニターする。表面吸着種の挙動および CO₂ 由来の吸着種の挙動を CO₂ 光燃料化活性と関連づけることを目的とする。

3. 研究の方法

CO₂ 光燃料化試験については、本研究開始時点ですすでに行っていた薄膜形成法および高圧光反応セルを利用した。さらに、¹³CO₂ を用いた反応追跡では ¹³CO₂ から光燃料への反応経路を調べる上で、オンラインでの反応分析が極めて望ましい。そこで光反応装置に GC-MS および FTIR をオンライン接続した装置を作成した。

反応経路の理解のための分析実験は、上記の 1 項に記したようであるが、放射光 X 線による実験では熱振動因子の変化を相関 Debye モデルを基に詳細に解析するやり方を確立し、光触媒中の活性サイトが光照射に伴い温度上昇するのを直接観測できるようにした。

4. 研究成果

半導体結晶として層状複水酸化物を用いることでメタノールを、TiO₂ を用い Pd ナノ粒子と組み合わせることでメタンを得た。しかし ¹³CO₂ を用いた光反応試験では、いずれも ¹²C を中心とする還元生成物が得られた(文献2,3)。前者では層間の炭酸アニオンおよび水も光転化し得ること、後者を炭素フリーで合成しても ¹³C 生成物が中心とはならなかった。後者では、自然界から微量酢酸がアルコールよりも優先して吸着するという報告もあることから、ここで本研究方針を、光触媒に残存する吸着物あるいは不純物を見極めながら真の ¹³CO₂ 光燃料化過程を見極めることへと軌道修正した。

さらに半導体を探索した結果、ZrO₂ が安定して ¹³CO₂ を ¹³CO に光転化することが分かった。さらに銀ナノ粒子を 5.0 重量% 加えると活性は 3.9 倍増大した(図1)。ZrO₂ は CO₂ を吸着させ、そのうち化学吸着サイトが活性点であることを明らかにしたが、紫外光により電荷分離した電子と結合すると考えられる。一方、銀は可視光を吸収して局在表面プラズモン共鳴を起こし、脱励起時に 392 K まで昇温することが分かった。還元剤として用いた H₂ がこの昇温 Ag サイトで活性化され、スピルオーバーして電荷分離したホールと CO₂ 由来の O 原子と結合すると推定した(文献4)。

同様にして、還元剤を水とすることもテストし、H₂ 生成との競合反応となったが、Ag-ZrO₂ 光触媒に Mg²⁺ イオンを加えることで H₂ 生成は抑制され、¹³CO 生成選択的にすることが出来た(文

献4)。金をZrO₂に加えることもCO₂光還元にも有効であったが、Auはデバイ温度が高く、紫外可視光照射時に324 Kまでの昇温で光から熱への変換のCO₂還元への効果は限定的だった(文献5)。

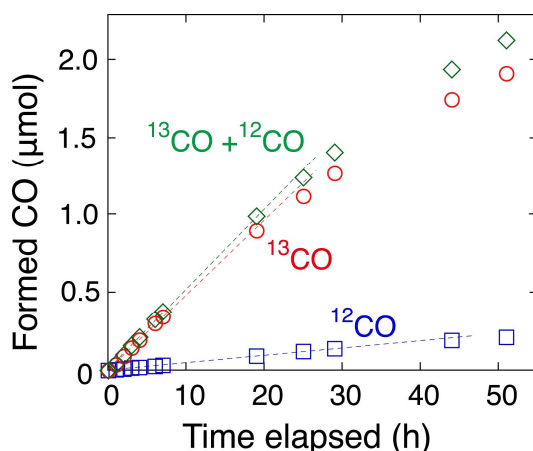


図 1. ¹³CO₂ (2.3 kPa)と H₂ (21.7 kPa)雰囲気下で紫外可視光を照射した Ag (5.0 wt. %)-ZrO₂ (0.100 g) による、¹³CO and ¹²CO 生成の経時変化。

本研究での活性は0.66 μmol h⁻¹ g_{cat}⁻¹ (¹³CO; 図1)に留まっているが、本研究の方法論で、ただし本研究終了直後の、引き続き科学研究費20H02834開始直後に338 μmol h⁻¹ g_{cat}⁻¹ (¹³CH₄)が達成されている。

サブテーマとして、両極に光触媒を用いる太陽電池でも着実な成果を挙げた。天然色素を負極へ添加(文献6)および負極半導体の改良(文献7; 図2)により、単セルでの起電力2.1 Vを達成している。

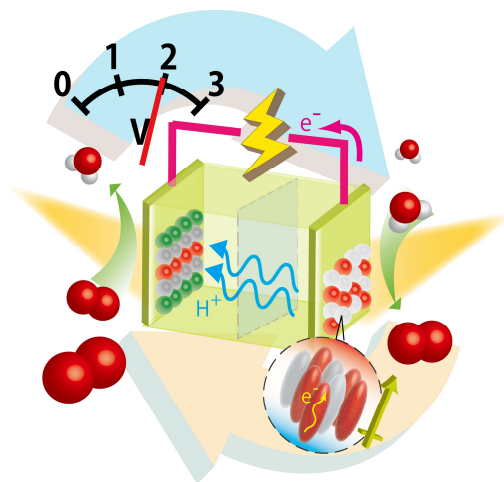


図 2. 両極に光触媒膜を用いる高電圧型太陽電池。分極しやすいTiO₂がAC/DCインピーダンスが低く、また水からO₂、プロトン、および電子を生じるのに有利で、そのため単セルで2 Vの起電力を実現した。(文献7の号の表紙 <https://pubs.acs.org/toc/ascecg/8/3>)

引用文献

- (1) “Recent advances in the photocatalytic conversion of carbon dioxide to fuels with water and/or hydrogen using solar energy and beyond”,
Yasuo Izumi, *Coordination Chemistry Reviews*, **257**, 171–186 (2013). DOI: 10.1016/j.ccr.2012.04.018
- (2) “Optimized photoreduction of CO₂ exclusively into methanol utilizing liberated reaction space in layered double hydroxides comprising zinc, copper, and gallium”,
Lukas Anton Wein, Hongwei Zhang, Kazuki Urushidate, Masaya Miyano, and Yasuo Izumi, *Applied Surface Science*, **447**, 687–696 (2018). DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.046
- (3) “Why Is Water More Reactive Than Hydrogen in Photocatalytic CO₂ Conversion at Higher Pressures? Elucidation by Means of X-Ray Absorption Fine Structure and Gas

- Chromatography-Mass Spectrometry”,
Hongwei Zhang and Yasuo Izumi, *Frontiers in Chemistry*, **6**, Article 408 (2018). DOI: 10.3389/fchem.2018.00408
- (4) “Dual Photocatalytic Roles of Light: Charge Separation at the Band Gap and Heat via Localized Surface Plasmon Resonance To Convert CO₂ into CO over Silver–Zirconium Oxide”,
Hongwei Zhang, Takaomi Itoi, Takehisa Konishi, and Yasuo Izumi, *Journal of the American Chemical Society*, **141**(15), 6292–6301 (2019). DOI: 10.1021/jacs.8b13894
- (5) “Dual origins of photocatalysis: light-induced band-gap excitation of zirconium oxide and ambient heat activation of gold to enable ¹³CO₂ photoreduction/conversion”,
Hongwei Zhang, Takaomi Itoi, Kaori Niki, Takehisa Konishi, and Yasuo Izumi, *Catalysis Today*, accepted for publication. DOI: 10.1016/j.cattod.2020.02.040
- (6) “Solar Cell with Photocatalyst Layers on Both the Anode and Cathode Providing an Electromotive Force of Two Volts per Cell”,
Kazuki Urushidate, Shigemitsu Matsuzawa, Keisuke Nakatani, Jifu Li, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**(9), 11892–11903 (2018). DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b02166
- (7) “Polarizability and Catalytic Activity Determine Good Titanium Oxide Crystals but Not Homogeneity in Solar Cells Using Photocatalysts on Both Electrodes”,
Kazuki Urushidate, Jifu Li, Keisuke Hara, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi, *ACS Environmental Chemistry and Engineering* **8**(3), 1406–1416 (2020). DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b05576

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hongwei Zhang, Takaomi Itoi, Takehisa Konishi, and Yasuo Izumi	4. 巻 141
2. 論文標題 Dual Photocatalytic Roles of Light: Charge Separation at the Band Gap and Heat via Localized Surface Plasmon Resonance To Convert CO ₂ into CO over Silver-Zirconium Oxide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 6292-6301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/jacs.8b13894	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 Hongwei Zhang, Takaomi Itoi, Kaori Niki, Takehisa Konishi, and Yasuo Izumi	4. 巻 未定
2. 論文標題 Dual origins of photocatalysis: light-induced band-gap excitation of zirconium oxide and ambient heat activation of gold to enable 13CO ₂ photoreduction/conversion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cattod.2020.02.040	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 Kazuki Urushidate, Jifu Li, Keisuke Hara, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Polarizability and Catalytic Activity Determine Good Titanium Oxide Crystals but Not Homogeneity in Solar Cells Using Photocatalysts on Both Electrodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Environmental Chemistry and Engineering	6. 最初と最後の頁 1406-1416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acssuschemeng.9b05576	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 漆館和樹, 泉 康雄	4. 巻 28
2. 論文標題 色素が起電力と出力を増幅する光燃料電池	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 クリーンエネルギー	6. 最初と最後の頁 23-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 泉 康雄	4. 巻 73
2. 論文標題 両極に光触媒を用い、色素が起電力と出力を増幅する太陽電池	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉾山	6. 最初と最後の頁 15-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 原 慶輔, 漆館和樹, 泉 康雄	4. 巻 75
2. 論文標題 低コストな光触媒式太陽電池の実用化に向けて-光触媒結晶の分極率と光触媒活性が電池性能向上の鍵	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Hongwei Zhang, Takehisa Konishi, and Yasuo Izumi	4. 巻 36
2. 論文標題 Monitoring of Heat via Localized Surface Plason Resonance to Convert CO2 over Silver-Zirconium Oxide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2018	6. 最初と最後の頁 2016G577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Kazuki Urushidate, Mao Yoshiba, and Yasuo Izumi	4. 巻 36
2. 論文標題 Transformation of Silver Site over TiO2 Effectively Used on the Photocathode of Solar Cell	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2018	6. 最初と最後の頁 2018G649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 泉 康雄	4. 巻 61
2. 論文標題 会員の声 西千葉での, 言いたい放題2019	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 触媒	6. 最初と最後の頁 317-317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Hong Pang, Xianguang Meng, Hui Song, Wei Zhou, Gaoliang Yang, Hongwei Zhang, Yasuo Izumi, Toshiaki Takei, Wipakorn Jewasuan, Naoki Fukuta, and Jinhya Ye	4. 巻 244
2. 論文標題 Probing the Role of Nickel Dopant in Aqueous Colloidal ZnS Nanocrystals for Efficient Solar-Driven CO ₂ Reduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B	6. 最初と最後の頁 1013-1020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2018.12.010	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 Hongwei Zhang and Yasuo Izumi	4. 巻 6
2. 論文標題 Why Is Water More Reactive Than Hydrogen in Photocatalytic CO ₂ Conversion at Higher Pressures? Elucidation by Means of X-Ray Absorption Fine Structure and Gas Chromatography-Mass Spectrometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 Article 408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2018.00408	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 Kazuki Urushidate, Shigemitsu Matsuzawa, Keisuke Nakatani, Jifu Li, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi	4. 巻 6
2. 論文標題 Solar Cell with Photocatalyst Layers on Both the Anode and Cathode Providing an Electromotive Force of Two Volts per Cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 11892-11903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.8b02166	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 Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, Yasuo Izumi	4. 巻 35A
2. 論文標題 Why Is Water More Reactive Than Hydrogen in Photocatalytic CO ₂ Conversion? - Elucidation by Means of X-ray Absorption Fine Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2017 (Highlights)	6. 最初と最後の頁 36-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hongwei Zhang, Lukas Anton Wein, and Yasuo Izumi	4. 巻 35
2. 論文標題 Monitoring of Electron Diffusion During High-Pressure CO ₂ Photoconversion in Layered Double Hydroxides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2017	6. 最初と最後の頁 2016G577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kawamura Shogo, Zhang Hongwei, Tamba Masayuki, Kojima Takashi, Miyano Masaya, Yoshida Yusuke, Yoshiba Mao, Izumi Yasuo	4. 巻 345
2. 論文標題 Efficient volcano-type dependence of photocatalytic CO ₂ conversion into methane using hydrogen at reaction pressures up to 0.80 MPa	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 39 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2016.10.024	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 Zhang Hongwei, Kawamura Shogo, Tamba Masayuki, Kojima Takashi, Yoshiba Mao, Izumi Yasuo	4. 巻 352
2. 論文標題 Is water more reactive than H ₂ in photocatalytic CO ₂ conversion into fuels using semiconductor catalysts under high reaction pressures?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 452 ~ 465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2017.06.016	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 Miyano Masaya, Zhang Hongwei, Yoshiba Mao, Izumi Yasuo	4. 巻 5
2. 論文標題 Selective Photoconversion of Carbon Dioxide into Methanol Using Layered Double Hydroxides at 0.40 MPa	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy Technology	6. 最初と最後の頁 892 ~ 900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ente.201600578	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 Miyano Masaya, Zhang Hongwei, Yoshiba Mao, Izumi Yasuo	4. 巻 5
2. 論文標題 Inside Cover: Selective Photoconversion of Carbon Dioxide into Methanol Using Layered Double Hydroxides at 0.40 MPa (Energy Technol. 6/2017)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy Technology	6. 最初と最後の頁 770 ~ 770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ente.201700288	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 Mao Yoshiba, Yuta Ogura, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, Yasuo Izumi	4. 巻 7
2. 論文標題 A solar cell for maximizing voltage up to the level difference of two photocatalysts: optimization and clarification of the electron pathway	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 19996 ~ 20006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7RA02600E	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 Lukas Anton Wein, Hongwei Zhang, Kazuki Urushidate, Masaya Miyano, Yasuo Izumi	4. 巻 447C
2. 論文標題 Optimized photoreduction of CO2 exclusively into methanol utilizing liberated reaction space in layered double hydroxides comprising zinc, copper, and gallium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 687 ~ 696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2018.04.046	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 Hongwei Zhang and Yasuo Izumi	4. 巻 34
2. 論文標題 Behavior of Oxygen During Photocatalytic CO ₂ Conversion into Fuels Using Pd/TiO ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2016	6. 最初と最後の頁 2014G631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Yusuke Yoshida and Yasuo Izumi	4. 巻 34
2. 論文標題 EXAFS Characterization of an Interface Model Nanocatalyst: Binary metal (Ti, Cu) Oxyhydroxy-Organic Framework	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2016	6. 最初と最後の頁 2015G586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Masaya Miyano, Hongwei Zhang, and Yasuo Izumi	4. 巻 34
2. 論文標題 Demonstration of In Situ High-Pressure Photocatalytic Cell for XAFS Measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2016	6. 最初と最後の頁 2016G577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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27件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Hongwei Zhang, Takaomi Itoi, Takeshi Konishi, and Yasuo Izumi
2. 発表標題 Dual photocatalytic roles of light: charge separation at the band gap and heat via localized surface plasmon resonance to photoconvert CO ₂ into CO over silver-zirconium oxide
3. 学会等名 257th ACS National Meeting & Exposition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hongwei Zhang and Yasuo Izumi
2. 発表標題 CO ₂ photoreduction to CO using Ag-ZrO ₂
3. 学会等名 Artificial Photosynthesis, Faraday Discussion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, and Yasuo Izumi
2. 発表標題 Monitoring of Active Site Structure of Pd/TiO ₂ Photocatalyst Under the Reaction Conditions of CO ₂ Photoconversion into Fuels
3. 学会等名 International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth - Material Research, Characterization and Imaging by In situ/Operando XAFS and X-ray Techniques- (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 康雄
2. 発表標題 環境をよくする新たな光触媒とその動作原理
3. 学会等名 2018年第1回千葉大学化学教育研究懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 漆館和樹・泉 康雄
2. 発表標題 色素が起電力と出力を増幅する光燃料電池
3. 学会等名 科学技術振興機構・千葉大学新技術説明会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 漆館和樹・松澤繁光・李 佶夫・小島 隆・泉 康雄
2. 発表標題 光触媒TiO ₂ , BiOCl膜の均質化および色素添加による高電圧型太陽電池の改良
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張 宏偉・糸井貴臣・小西健久・泉 康雄
2. 発表標題 銀-酸化ジルコニウムを用いたCO ₂ 光還元における光の二元的役割：バンドギャップでの電荷分離と局在表面プラズモン共鳴経路の熱
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 漆館和樹・李 佶夫・松澤繁光・小島 隆・泉 康雄
2. 発表標題 構造制御したTiO ₂ ナノ粒子による高電圧型太陽電池の特性向上
3. 学会等名 千葉大学グローバルプロミネント研究基幹シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 漆館和樹・松澤繁光・泉 康雄
2. 発表標題 両極に光触媒を用いた太陽電池への有機色素の添加効果
3. 学会等名 第122回触媒討論会A予稿集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張 宏偉・泉 康雄
2. 発表標題 ZrO ₂ 系光触媒を用いたCO ₂ 光燃料化活性の改良と反応機構
3. 学会等名 第122回触媒討論会A予稿集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, Masaya Miyano, Mao Yoshiba, Yasuo Izumi
2. 発表標題 Why is water more reactive than H ₂ in photocatalytic CO ₂ conversion into fuels at reaction pressure up to 0.80 MPa?
3. 学会等名 253rd ACS National Meeting & Exposition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hongwei Zhang, Masaya Miyano, Shogo Kawamura, Magda C. Puscasu, Gabriela Carja, and Yasuo Izumi
2. 発表標題 Photocatalytic challenge of carbon dioxide conversion into fuels supported by spectroscopy
3. 学会等名 2nd International Workshop Advances on Photocatalysis (AdvPhotoCat-E 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mao Yoshiba, Yuta Ogura, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi
2. 発表標題 Solar Cell for Maximizing Voltage up to the Band Gap: Optimization and Clarification of Electron Pathway
3. 学会等名 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuo Izumi
2. 発表標題 Introduction to the principle of XAFS and EXAFS and their applications to characterization of catalysts
3. 学会等名 Research Methods for Advanced Environmental Catalysis, Wuhan University, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuo Izumi
2. 発表標題 Activation of CO ₂
3. 学会等名 Research Methods for Advanced Environmental Catalysis, Wuhan University, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuo Izumi
2. 発表標題 A solar cell for use of acidic water enabling open-circuit voltage of 2 V
3. 学会等名 Open Lecture at Key Laboratory of Material Chemistry for Energy Conversion and Storage, Huazhong University of Science and Technology, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉 康雄
2. 発表標題 二酸化炭素の光燃料化と光燃料電池の研究
3. 学会等名 千葉大学図書館、1210あかりんアワー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉 康雄・吉田祐介
2. 発表標題 チタン-銅-有機ハイブリッド細孔性結晶の発明と一酸化炭素選択酸化への応用
3. 学会等名 科学技術振興機構・千葉大学新技術説明会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張 宏偉・宮野雅也・吉羽真緒・泉 康雄
2. 発表標題 0.80 MPaまでのCO ₂ 光燃料化で水が水素より高反応性なのはなぜか？
3. 学会等名 日本化学会第97春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮野雅也・張 宏偉・吉羽真緒・泉 康雄
2. 発表標題 0.40 MPaでの層状複水酸化物を使った二酸化炭素からメタノールへの選択光還元
3. 学会等名 日本化学会第97春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉羽真緒・丹波雅之・小島 隆・泉 康雄
2. 発表標題 両極に光触媒を用いる太陽電池で3 Vの高電圧を生ずる電子移行過程の最適化
3. 学会等名 日本化学会第97春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 漆館和樹・吉羽真緒・小島 隆・泉 康雄
2. 発表標題 両極を光触媒とする太陽電池における正極オキシ塩化ピスマスの均一性・安定性の改良
3. 学会等名 第120回触媒討論会A予稿集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張 宏偉・泉 康雄
2. 発表標題 CO ₂ 光燃料化各反応条件に対応した活性サイト構造の放射光XAFS追跡
3. 学会等名 第120回触媒討論会A予稿集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中原 憬・泉 康雄・吉武英昭
2. 発表標題 ナノ構造ジルコニア担持金触媒の金の化学状態及びZrO ₂ の表面酸点が、 γ -不飽和アルデヒド-アルコール反応の選択性に与える影響
3. 学会等名 第120回触媒討論会A予稿集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五島 穰、小島 隆、吉羽真緒、泉 康雄、上川直文
2. 発表標題 多孔性粒子を用いた多孔性チタニア薄層の作製
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第30回秋季シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 漆館 和樹・松澤 繁光・Jifu Li・小島 隆・泉 康雄
2. 発表標題 両極の光触媒層の改良による太陽電池の高開放電圧・高出力化
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lukas Anton Wein・張 宏偉・宮野 雅也・泉 康雄
2. 発表標題 亜鉛、銅、ガリウムを含む層状複水酸化物の層間反応場解放によるメタノールのみへのCO2光還元最適化
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会講演予稿集II
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 色素が起電力と出力を増幅する光燃料電池	発明者 泉 康雄、漆館和樹、 松澤繁光	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-107691	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 燃料電池	発明者 泉 康雄、小倉優太、 藤嶋幸子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、6213958	取得年 2017年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

泉 康雄と表面化学グループのウェブサイト http://cat.chem.chiba-u.jp/index.html 泉 康雄と表面化学グループの研究論文 http://cat.chem.chiba-u.jp/Pages/Papers.html 泉 康雄と表面化学グループの著書・総説 http://cat.chem.chiba-u.jp/Pages/Reviews.html 泉 康雄と表面化学グループの研究紹介 http://cat.chem.chiba-u.jp/Pages/Topics.html 泉 康雄の言いたい放題 http://cat.chem.chiba-u.jp/Pages/Diary.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
--	---------------------------	-----------------------	----