

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26410204

研究課題名(和文) 二酸化炭素光触媒還元電位・波長の制御と光燃料電池の援用および動的過程の分光追跡

研究課題名(英文) Control of Potential and Wavelength, Assist by Photofuel Cell, and Spectroscopic Monitoring of Dynamic Process of Photoreduction of Carbon Dioxide

研究代表者

泉 康雄 (Izumi, Yasuo)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50251666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高圧CO₂光燃料化ではPd/TiO₂が最も高活性で、CO₂ + H₂下で反応させた場合には、CO₂圧0.12 MPa, H₂圧0.28 MPaで活性は極大となるのに対し、CO₂ + moisture下で反応させた場合には、全圧0.80 MPaに至るまでラングミュア型の速度依存性を示し、メタン生成の反応次数は0.39だった。競争吸着する前者に対し、後者では水光酸化サイト(TiO₂等)とCO₂光還元サイト(Pd等)が有効に分離されたためと分かった。

関連して、水を媒質とする両極に光触媒を用いる太陽電池で、BiOCl等の正極を背面照射とすることで、リーク電流を抑制し、開放電圧1.91 V/セルを得た。

研究成果の概要(英文)：Pd/TiO₂ was the most active for high-pressure CO₂ photoconversion into fuels. While using CO₂ + H₂, the total photogeneration rates of C-containing products were maximum at CO₂ pressure of 0.12 MPa and H₂ pressure of 0.28 MPa, using CO₂ + moisture the generation rates followed the Langmuir-type rate dependence and the reaction order of methane formation was 0.39. Competitive adsorption occurred under former condition in contrast that sites were effectively separated for photo-oxidation of water (TiO₂, etc) and photo-reduction of CO₂ (Pd, etc) under latter condition.

Associated with this, solar cell for use of photocatalysts on both electrodes and water as a medium was investigated. When the cathode (e.g. BiOCl) was irradiated from back side, leakage currents were suppressed and the open-circuit voltage was increased to 1.91 V per cell.

研究分野：触媒化学、X線分光、環境化学

キーワード：二酸化炭素 水素 酸素欠陥 EXAFS FTIR 太陽電池 起電力 開放電圧

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化と密接に関連して、各種 CO₂ 削減法が研究され、CO₂ を発生しないクリーンエネルギーの開発が進められている。中でも、自然光を利用して CO₂ を有用物質に変換し、また自然光エネルギーを持続可能な方法で電力に変換すれば極めて魅力的である。

光触媒を用いて、CO₂ を化学原料に変換する研究が国内外でここ数年急激に研究されている。自然光を電力に変換するには、太陽電池を使うか、光触媒により水素を得て燃料電池を使う選択が考えられ、国内外で広範に継続して研究されている。ここで、半導体単結晶・色素錯体・白金触媒のコストが普及への問題点となっている。

2. 研究の目的

水を媒質とする、両極に光触媒を用いて水の光酸化と O₂ の光還元をそれぞれ進める太陽電池を実証した。Ag-TiO₂、BiOCl 等光触媒層を高結晶性で電極基板に密接させることで電荷拡散過電圧を抑制し、また光触媒層表面は高活性ポーラス層を形成し活性点数を増加させることで、飛躍的に出力増大させる。セル内の直列抵抗を下げる改良の他、光触媒の改良により過電圧を抑制、理論起電圧 3 V に近づける。

Zn, Cu, Ga 等を含む層状複水酸化物 (LDH) が CO₂ を濃縮・光触媒的還元することを実証した。バンドギャップの大きい LDH に伝導帯下端が -1.5 ~ -1 V に位置する Cu₂O, AgCl, AgBr ナノ結晶と組み合わせるか、LDH 正極電位を上記太陽電池の起電力 3 ~ 1.6 V により負側にシフトさせ、さらに色素で有効励起波長を拡大することにより、CO₂ 光還元を格段に高速化する。光触媒電極の電位・励起波長制御に应答して、動的 X 線吸収微細構造 (XAFS) およびフーリエ変換赤外 (FTIR) 分光追跡を行う。

3. 研究の方法

[Zn₃Ga(OH)₈]₂CO₃·mH₂O を始めとする LDH および半導体を合成し、適宜液相還元法で Pd, Ag, Cu 等のナノ粒子と複合させた。これらの光触媒を懸濁させガラス基板上に塗布して薄膜とし、石英窓付き高圧反応器 (論文 2, 3) 中で CO₂ + H₂ あるいは CO₂ + moisture 混合ガス (0 ~ 0.80 MPa) を満たして Xe アーク灯からの紫外可視光を照射しながら反応試験を行った。

Ti K および Pd K 吸収端 XAFS スペクトルは適宜光反応セルとアーク灯を持ち込み、高エネルギー加速器研究機構のビームライン 9A, 9C, 12C, NW10A で行った。FTIR スペクトルは FT/IR-4200 (日本分光) に石英窓付きの光反応セルを直結させて測定した。

太陽電池の光電極は ITO 膜付ガラス上に上記と同様に光触媒を薄膜化し、固体高分子膜を挟んだ塩酸中に各光電極を浸漬、電流・電圧特性等を評価した。

4. 研究成果

まず LDH へ負電位をとる半導体ナノ粒子 Cu₂O, AgCl, AgBr 等を組み合わせる実験を試みたが、CO₂ 光燃料化反応条件で酸化および金属化の問題があり、安定な促進剤とすることはできなかった。そこで、表面プラズモン共鳴を示す金および銀ナノ粒子あるいは銅フタロシアニンを促進剤とすると、銀ナノ粒子は光活性化された電子を LDH に送り込む効果を示し (論文 13)、銅フタロシアニンは直接 CO₂ 還元作用した (論文 11)。また、CO₂ 光燃料化セルとして、固体高分子型燃料電池を利用し、TiO₂ および WO₃ を用いた光負極と LDH を用いた光正極によりメタノールを得ることを示した (論文 18)。

LDH ベースの光触媒の改良を進める内、研究分野の動向 (図 2) も踏まえて、反応条件の最適化の検討を進めた。水素および水蒸気を CO₂ の還元剤に用いた場合いずれも、Pd/TiO₂ が最も高活性だった。触媒の形態は 10 mg の薄膜状にするのがよいが、光燃料化の第 2 ステップとみなせる CO₂ + H₂ 下での反応では、CO₂ 圧 0.12 MPa, H₂ 圧 0.28 MPa の場合に極大速度でメタンを生成することが分かり、金属 Pd ナノ粒子への CO₂ と H の吸着競合が原因と考えられた (論文 3)。CO₂ + moisture 下での反応では、メタン生成の CO₂ 反応次数は 0.39 で Langmuir 式に従い増加し、反応圧 0.80 MPa では後者の反応速度が速かった。水は TiO₂ 表面で、CO₂ は Pd 表面でサイト分離されて酸化還元されるためと考えられた。

水が光酸化される際の TiO₂ を Ti K 吸収端 XAFS によりその場追跡したところ、Ti-O および Ti(-O)-Ti 配位数が光照射化では有意に減少し、·OH ラジカルの反応に伴う酸素欠陥サイトの形成が示された。消灯後は配位数は元に戻り、光酸化により生じた O₂ の一部は TiO₂ 表面に再吸着してしまうことが分かった (学会 3, 7)。

高圧 CO₂ + H₂ 下での LDH ベース光触媒の活性化にも成功した (論文 2) が、CO₂ + moisture 下での実験は今後実施する。

水を媒質とする、両極に光触媒を用いる太陽電池では、動作原理の検証から本研究を始めた。まず、負極で水を光酸化して生じた O₂ がセル内で固体高分子膜の孔を通過し正極に移行、正極では光還元されて水に戻ること、本セルが独立して光をエネルギー源として発電することを示した (論文 10)。

光正極としては Ag-TiO₂ および BiOCl がよく (論文 12) さらに両光電極への光照射方向を表裏とする実験を行ったところ、光触媒側から照射すると活性化される表面サイト数の点では有利だが、反応サイトから電極までの電荷拡散過電圧 (0.23 ~ 0.41 V) が生じた。このため、光電極への背面照射が高起電力を得るのに有利だった。一方、負極からの励起電子が正極の電子トラップサイト (酸素欠陥や金属ナノ粒子) に直接移行してしまうリー

ク電流が、特に正極を正面照射としたときに認められた。

BiOCl 等の p 型半導体光触媒を正極用を選び、正極を背面照射とすることで、正極の価電子帯に残るホールがバンドの曲がりにより電極近傍に移動し、負極から移行した励起電子と有効に結合し、リーク電流を抑制した。以上より、開放電圧 1.91 V、セル出力 55.8 μ W (セル面積 1.3 cm^2) を実現した (論文 1)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 24 件)

- (1) “Solar cell for maximizing voltage up to the level difference of two photocatalysts: optimization and clarification of electron pathway”, Mao Yoshida, Yuta Ogura, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi, *RSC Advances*, 査読有, **7**(32), 19996–20006 (2017). DOI: 10.1039/C7RA02600E
- (2) “Selective Photoconversion of Carbon Dioxide into Methanol Using Layered Double Hydroxides at the Reaction Pressure of 0.40 MPa”, Masaya Miyano, Hongwei Zhang, Mao Yoshida, and Yasuo Izumi, *Energy Technology*, 査読有, **5**(6) 頁数未定 (2017). DOI: 10.1002/ente.201600578
- (3) “Efficient Volcano-type Dependence of Photocatalytic CO₂ Conversion into Methane Using Hydrogen at Reaction Pressures up to 0.80 MPa”, Shogo Kawamura, Hongwei Zhang, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, Masaya Miyano, Yusuke Yoshida, Mao Yoshida, and Yasuo Izumi, *Journal of Catalysis*, 査読有, **345**, 39–52 (2017). DOI: 10.1016/j.jcat.2016.10.024
- (4) “Harnessing self-supported Au nanoparticles on layered double hydroxides comprising Zn and Al for enhanced phenol decomposition under solar light”, Gaku Mikami, Florentina Grosu, Shogo Kawamura, Yusuke Yoshida, Gabriela Carja, and Yasuo Izumi, *Applied Catalysis B*, 査読有, **199**, 260–271 (2016). DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.06.031
- (5) “Recent advances in the preferential oxidation (PROX) of carbon monoxide: photocatalysis versus thermocatalysis, noble versus inexpensive metals, and their reaction mechanisms”, Yusuke Yoshida and Yasuo Izumi, *Catalysis Surveys from Asia*, 査読有, **20**(3), 141–166 (2016). DOI: 10.1007/s10563-016-9216-8
- (6) “Efficient Volcano-type Dependence of Photocatalytic CO₂ Conversion into Methane Using Hydrogen on Reaction Pressure up to 0.80 MPa”, Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2015*, 査読無, **33B**, 2014G631 (2016). http://pfwww.kek.jp/acr/2015pdf/part_b/pf15b0383.pdf
- (7) “Binary metal (Ti, Cu) oxyhydroxy–organic (terephthalate) framework: an interface model nanocatalyst for hydrogen purification”, Yusuke Yoshida and Yasuo Izumi, *Journal of Catalysis*, 査読有, **332**, 1–12 (2015). DOI: 10.1016/j.jcat.2015.09.007
- (8) “Preferential Photooxidation of CO in Hydrogen Across the Crystalline Face Boundary over Spheroidal ZnO Promoted by Cu Ions”, Yusuke Yoshida, Takaomi Itoi, and Yasuo Izumi, *Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, **119**(37), 21585–21598 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07240
- (9) Correction to “Preferential Photooxidation of CO in Hydrogen Across the Crystalline Face Boundary over Spheroidal ZnO Promoted by Cu Ions”, Yusuke Yoshida, Takaomi Itoi, and Yasuo Izumi, *Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, **119**(46), 26242–26242 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b10590
- (10) “Recyclable Photofuel Cell for Use of Acidic Water as a Fuel”, Yuta Ogura, Mao Yoshida, and Yasuo Izumi, *Oil & Gas Science and Technology*, 査読有, **70**(5), 853–862 (2015). DOI: 10.2516/ogst/2015031
- (11) “Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide using Zn–Cu–Ga Layered Double Hydroxides Assembled with Cu Phthalocyanine: Cu in Contact with Gaseous Reactant is Needed for Methanol Generation”, Shogo Kawamura, Naveed Ahmed, Gabriela Carja, and Yasuo Izumi, *Oil & Gas Science and Technology*, 査読有, **70**(5), 841–852 (2015). DOI: 10.2516/ogst/2015020
- (12) “Photofuel cell comprising titanium oxide and bismuth oxychloride (BiO_{1-x}Cl_{1-y}) photocatalysts for use of acidic water as a fuel”, Yukiko Fujishima, Seiji Okamoto, Mao Yoshida, Takaomi Itoi, Shogo Kawamura, Yusuke Yoshida, Yuta Ogura, and Yasuo Izumi, *Journal of Materials Chemistry A*, 査読有, **3**(16), 8389–8404 (2015). DOI: 10.1039/C4TA06824F
- (13) “Tailoring assemblies of plasmonic silver/gold and zinc-gallium layered double hydroxides for photocatalytic conversion of carbon dioxide using UV-visible light”, Shogo Kawamura, Puscasu Magda Cornelia, Yusuke Yoshida, Yasuo Izumi, and Gabriela Carja, *Applied Catalysis A*, 査読有, **504**, 238–247 (2015). DOI: 10.1016/j.apcata.2014.12.042
- (14) “Characterization of Plasmonic Nanoparticles and Dyes Assembled with Layered Double Hydroxides to Promote the Photoreduction of Carbon Dioxide into Fuels”, Shogo Kawamura and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2014*, 査読無, **32B**,

- 2014G631 (2015). http://pfwww.kek.jp/acr/2014pdf/part_b/pf14b0113.pdf
- (15) "Site Structure of $\text{BiO}_{1-x}\text{Cl}_{1-y}$ Photocathode in Photofuel Cell that Uses Acidic Water as a Fuel", Mao Yoshiba, Yuta Ogura, and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2014*, 査読無, **32B**, 2013G159 (2015). http://pfwww.kek.jp/acr/2014pdf/part_b/pf14b0089.pdf
- (16) "水および二酸化炭素を燃料とする光燃料電池", 河村省梧, 吉羽真緒, 小倉優太, 泉康雄, 燃料電池開発情報センター機関誌「燃料電池」, 査読無, **14**(4), 44-48 (2015). <http://www.fcdic.com/ja/kikanshi/VOL14-4.pdf>
- (17) "水を媒質とする光燃料電池", 小倉優太, 吉羽真緒, 泉康雄, 化学工業, 査読無, **66**(3), 206-211 (2015). <http://www.kako-sha.co.jp/2015contentskagaku.html>
- (18) "Photocatalytic conversion of carbon dioxide into methanol in reverse fuel cells with tungsten oxide and layered double hydroxide photocatalysts for solar fuel generation", Motoharu Morikawa, Yuta Ogura, Naveed Ahmed, Shogo Kawamura, Gaku Mikami, Seiji Okamoto, and Yasuo Izumi, *Catalysis Science & Technology*, 査読有, **4**(6), 1644-1651 (2014). DOI: 10.1039/C3CY00959A
- (19) "X-ray evaluation of the boundary between polymer electrolyte and platinum and carbon functionalization to conduct protons in polymer electrolyte fuel cells", Kazuki Oka, Yuta Ogura, and Yasuo Izumi, *Journal of Power Sources*, 査読有, **258C**, 83-88 (2014). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.040
- (20) "Monitoring of Electron Flow in Layered Double Hydroxides to Photoreduce Carbon Dioxide into Fuels", Yasuo Izumi, Shogo Kawamura, Motoharu Morikawa, and Ahmed Naveed, *Photon Factory Activity Report 2013 (Highlights)*, 査読有, **31A**, 36-37 (2014). http://pfwww.kek.jp/acr2013pdf/part_a/13ah2_4.pdf
- (21) Control and monitoring of the valence of Ce-doped Y-zeolites for CO_2 conversion, Gaku Mikami and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2013*, 査読無, **31B**, 2012G683 (2014). http://pfwww.kek.jp/acr2013pdf/part_b/pf13b0172.pdf
- (22) Structure transformation of BiOCl as photocatalyst to reduce oxygen in photofuel cell, Yukiko Fujishima, Seiji Okamoto, Mao Yoshiba, Yuta Ogura, and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2013*, 査読無, **31B**, 2013G159 (2014). http://pfwww.kek.jp/acr2013pdf/part_b/pf13b0177.pdf
- (23) "水を燃料とする光燃料電池", 小倉優太, 岡本誓志, 藤嶋幸子, 吉羽真緒, 泉康雄, コンバーテック, 査読無, **42**(7), 38-40 (2014). <http://www.ctiweb.co.jp/jp/converttech/con-bk/295>
- (24) 水を燃料とする光燃料電池, 小倉優太, 吉羽真緒, 泉康雄, 千葉大学環境報告書 2014, 査読無, 22 (2014). http://www.chiba-u.ac.jp/general/approach/environment/files/2014Env.Report_all.pdf
- [学会発表](計 39件)
- (1) Mao Yoshiba, Yuta Ogura, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, and Yasuo Izumi, "Solar Cell for Maximizing Voltage up to the Band Gap: Optimization and Clarification of Electron Pathway", *IUMRS-ICAM 2017 (15th International Conference on Advanced Materials)*, August 27-September 1, 2017, Kyoto University, Kyoto.
- (2) Hongwei Zhang, Masaya Miyano, Shogo Kawamura, Magda C. Puscasu, Gabriela Carja, and Yasuo Izumi, "Photocatalytic challenge of carbon dioxide conversion into fuels supported by spectroscopy", *2nd International Workshop Advances on Photocatalysis (AdvPhotoCat-E 2017)*, July 16, 2017, Heraklion, Greece.
- (3) Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, Masaya Miyano, Mao Yoshiba, Yasuo Izumi, "Why is water more reactive than H_2 in photocatalytic CO_2 conversion into fuels at reaction pressure up to 0.80 MPa?", *253rd ACS National Meeting & Exposition*, April 3, 2017, San Francisco, USA.
- (4) 泉康雄・吉田祐介「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」科学技術振興機構・千葉大学新技術説明会、2017年2月28日、科学技術振興機構(東京都千代田区)。
- (5) 吉羽真緒・丹波雅之・小島隆・泉康雄「両極に光触媒を用いる太陽電池で3Vの高電圧を生ずる電子移行過程の最適化」日本化学会第97春季年会講演予稿集II、3A8-13、2017年3月18日、慶応大学(神奈川県横浜市)。
- (6) 宮野雅也・張宏偉・吉羽真緒・泉康雄「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」日本化学会第97春季年会講演予稿集II、3A8-42、2017年3月18日、慶応大学(神奈川県横浜市)。
- (7) 張宏偉・宮野雅也・吉羽真緒・泉康雄「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？」日本化学会第97春季年会講演予稿集II、3A8-43、2017年3月18日、慶応大学(神奈川県横浜市)。
- (8) 泉康雄「二酸化炭素の光燃料化と光燃料電池の研究」1210 あかりんアワー、2017年4月25日、千葉大学(千葉県千葉市)。
- (9) Mao Yoshiba, Hongwei Zhang, Masayuki Tamba, Takashi Kojima, Yasuo Izumi, "Designed films using TiO_2 or Pd-TiO_2 for a solar cell comprising two photocatalysts and photocatalytic conversion of CO_2 into fuels", *Institute for Global Prominent Research*

- Kickoff Symposium, Chiba University, Program & Abstract*, p.41, November 14, 2016, Chiba University, Chiba.
- (10) Yusuke Yoshida, Yasuo Izumi, “Synthesis of a model interface catalyst using binary metal oxyhydroxy–organic framework and its application for preferential oxidation of CO in H₂”, *Abstracts of 16th International Congress on Catalysis*, July 5, 2016, Beijing, China.
- (11) Hongwei Zhang, Shogo Kawamura, Yasuo Izumi, “Reductant (water/H₂), pressure, and thickness matter. Photocatalytic conversion of CO₂ into fuels using Pd/TiO₂ and BiOCl”, *Abstracts of 16th International Congress on Catalysis*, July 7, 2016, Beijing, China.
- (12) Shogo Kawamura, Hongwei Zhang, Yasuo Izumi, “Optimization of photocatalytic conversion of CO₂ into fuels: Dependence on reductant (water/H₂), pressure, and thickness of photocatalysts”, *251st ACS National Meeting & Exposition*, ENFL397, March 16, 2016, San Diego, USA.
- (13) 吉羽真緒・森井萌愛・小倉優太・泉 康雄「両極に光触媒を用いる水を媒質とした太陽電池の高起電力化と効率的電子移行過程の解明」第 118 回触媒討論会 A 予稿集、3I01、2016 年 9 月 23 日、岩手大学(岩手県盛岡市)。
- (14) 山崎隼一・下芝千晶・吉田祐介・泉 康雄「銅とチタンを含む単シート状 binary MOF の合成と CO 選択酸化活性」第 118 回触媒討論会 A 予稿集、3C03、2016 年 9 月 23 日、岩手大学(岩手県盛岡市)。
- (15) 張 宏偉・河村省梧・泉 康雄「高圧 CO₂ 光燃料化における水を還元剤とした場合の特異な CO₂ 還元機構」第 118 回触媒討論会 A 予稿集、2I05、2016 年 9 月 22 日、岩手大学(岩手県盛岡市)。
- (16) 泉 康雄「一酸化炭素(CO)除去装置(触媒) — 燃料電池用水素ガス中の一酸化炭素を除去する触媒 —」産学合同技術シーズ交流会、千葉市産業振興財団主催、2016 年 9 月 27 日、三井ガーデンホテル(千葉県千葉市)。
- (17) 泉 康雄「水を燃料とする光燃料電池 — 光触媒が拓く高起電力 —」産学合同技術シーズ交流会、千葉市産業振興財団主催、2016 年 9 月 27 日、三井ガーデンホテル(千葉県千葉市)。
- (18) 張 宏偉・河村省梧・泉 康雄「水を還元剤とする CO₂ 光燃料化反応の光触媒の探索と反応ガス圧依存性」日本化学会第 96 春季年会講演予稿集 II、1B1-52、2016 年 3 月 24 日、同志社大学(京都府京田辺市)。
- (19) 河村省梧・張 宏偉・泉 康雄「水素を還元剤とする CO₂ 光燃料化反応の光触媒の探索と膜厚および反応ガス圧依存性」日本化学会第 96 春季年会講演予稿集 II、1B1-51、2016 年 3 月 24 日、同志社大学(京都府京田辺市)。
- (20) Yasuo Izumi, Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, Shogo Kawamura, “Photocatalytic conversion of carbon dioxide to fuels using layered double hydroxide-based catalysts: Optimized performance and the reaction mechanism”, *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PacifiChem) 2015*, December 16, 2015, Honolulu, USA.
- (21) Elena Florentina Grosu, Gaku Mikami, Shogo Kawamura, Magda Cornelia Puscasu, Yasuo Izumi, and Gabriela Carja, “Self-assemblies of plasmonic gold/silver and ZnO based mixed metal oxides for efficient UV and solar-driven photocatalysis”, *International Conference on Advanced Complex Inorganic Nanomaterials 2015*, July 14, 15, 2015, Namur, Belgium.
- (22) Shogo Kawamura, Elena Florentina Grosu, Yasuo Izumi, and Gabriela Carja, “Mediating oxidation state of plasmonic gold grown on layered double hydroxides matrices for UV and solar driven photocatalysis”, *AdvPhotoCat 2015*, July 7, 2015, Iași, România.
- (23) Yusuke Yoshida and Yasuo Izumi, “Optimized Geometry of Neighboring Formate Oxidation and O₂ Reduction Sites on Designed Cu-ZnO Photocatalysts for Photo-PROX Reaction of CO”, *Book of Abstract of 27th International Conference on Photochemistry*, PCSC-PO-TUE-44, June 30, 2015, Jeju, Korea.
- (24) Shogo Kawamura and Yasuo Izumi, “Spectroscopic Monitoring and Optimization of the Photoreduction of Carbon Dioxide into Fuels Using Layered Double Hydroxides”, *Book of Abstract of 27th International Conference on Photochemistry*, PCSC-PO-TUE-10, June 30, 2015, Jeju, Korea.
- (25) 吉羽真緒・小倉優太・森井萌愛・泉 康雄「光燃料電池の電極表面反応を高速化する光触媒の探索と内部抵抗を低減化する 2 層構造形成による高出力化」第 116 回触媒討論会 A 予稿集、3I18、2015 年 9 月 18 日、三重大学(三重県津市)。
- (26) 長谷川博紀・河村省梧・泉 康雄、層剥離および増感成分により層構造を制御した層状複水酸化物を用いた二酸化炭素光還元反応、第 116 回触媒討論会 A 予稿集、3I07、2015 年 9 月 18 日、三重大学(三重県津市)。
- (27) 吉田祐介・下芝千晶・泉 康雄「銅とチタンを含む binary MOF 合成法の改良と水素中 CO 選択酸化反応特性」第 116 回触媒討論会 A 予稿集、1F25、2015 年 9 月 16 日、三重大学(三重県津市)。
- (28) 吉田祐介・泉 康雄、Cu イオン吸着酸化亜鉛光触媒による CO 光 PROX 反応での酸化・還元反応サイトの特定と反応機構、日本化学会第 95 春季年会講演予稿集 II、1F7-44、2015 年 3 月 26 日、日本大学(千葉県船橋市)。

- (29) 吉田祐介・泉 康雄「 $Ti_8O_8(OH)_4$ クラスタ架橋 MOF を用いた CuO 担持酸化チタンの CO-PROX 反応活性サイトのモデル化と担体効果の考察」日本化学会第 95 春季年会講演予稿集 II、1F8-31、2015 年 3 月 26 日、日本大学（千葉県船橋市）。
- (30) 河村省梧・Gabriela Carja・泉 康雄「XAFS を用いた可視光増感層状複水酸化物の二酸化炭素光還元反応機構の追跡」日本化学会第 95 春季年会講演予稿集 II、2F7-13、2015 年 3 月 27 日、日本大学（千葉県船橋市）。
- (31) 吉羽真緒・小倉優太・泉 康雄「光燃料電池中の TiO_2 および $BiOCl$ 光触媒の改良」日本化学会第 95 春季年会講演予稿集 II、2F7-12、2015 年 3 月 27 日、日本大学（千葉県船橋市）。
- (32) 小倉優太・吉羽真緒・泉 康雄「水を燃料とする光燃料電池における有機相添加による発電性能向上：酸素のリサイクルに基づく考察」日本化学会第 95 春季年会講演予稿集 II、2F7-30、2015 年 3 月 27 日、日本大学（千葉県船橋市）。
- (33) 泉 康雄「水を燃料とする光燃料電池」(株)電子ジャーナル講演会、2015 年 3 月 16 日、連合会館（東京都文京区）。
- (34) Yuta Ogura, Seiji Okamoto, Yukiko Fujishima, Yasuo Izumi, “Design and optimization of photofuel cell comprising titanium oxide and silver(I/O) photocatalysts for use of water as a fuel”, *Abstract volume Photocatalysis for Energy (Photo4E)*, October 16, 2014, Solaize, Lyon, France.
- (35) Shogo Kawamura, Gaku Mikami, Motoharu Morilawa, Naveed Ahmed, Yasuo Izumi, “Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide using Zn-Cu-Al or Ga Layered Double Hydroxides: Cu in Contact with Gaseous Reactant is Needed for Methanol Generation”, *Abstract volume Photocatalysis for Energy (Photo4E)*, October 15, 2014, Solaize, Lyon, France.
- (36) 三上 岳・泉 康雄「Zn, Cu, M(III)を含むペロブスカイト型金属酸化物を用いた CO_2 の光還元」第 114 回触媒討論会 A 予稿集、3F09、2014 年 9 月 27 日、広島大学（広島県東広島市）。
- (37) 河村省梧・泉 康雄・Gabriela Carja「層状複水酸化物を層間/外表面吸着アニオンおよび LDH 再構築法で増感した光触媒の二酸化炭素光還元作用機構」第 114 回触媒討論会 A 予稿集、3F05、2014 年 9 月 27 日、広島大学（広島県東広島市）。
- (38) 小倉優太・吉羽真緒・泉 康雄「水を燃料とする光燃料電池の直列抵抗値の改良および生成酸素が内部循環するスタンドアロン化」第 114 回触媒討論会 A 予稿集、1F17、2014 年 9 月 25 日、広島大学（広島県東広島市）。
- (39) 小倉優太・吉羽真緒・泉 康雄「水を燃料とする光燃料電池」イノベーション・ジ

ャパン 2014 大学見本市、E-08、2014 年 9 月 11-12 日、東京ビッグサイト（東京都江東区）。

〔図書〕(計 2 件)

- (1) 泉 康雄, S&T 出版, “両極に光触媒を用いた水を媒質とする太陽電池技術”, 再生可能エネルギーによる水素製造, 2016, 総頁数 193 (pp.111-116).
- (2) Yasuo Izumi, “Recent Advances (2012-2015) in the Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Fuels Using Solar Energy: Feasibility for a New Energy”, American Chemical Society, “*Advances in CO_2 Capture, Sequestration, and Conversion*”, Fangming Jin, Liang-Nian He, and Yun Hang Hu, Eds., ACS Books Volume 1194, 2015, 総頁数 381 (Chapter 1, pp 1-46). DOI: 10.1021/bk-2015-1194.ch001.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称：一酸化炭素酸化用触媒及びこれを用いた一酸化炭素除去方法

発明者：泉 康雄、吉田祐介

権利者：千葉大学

種類：特許権

番号：特願 2016-004132

出願年月日：2016 年 1 月 13 日

国内外の別：国内

名称：一酸化炭素酸化用触媒及びこれを用いた一酸化炭素除去方法

発明者：泉 康雄、吉田祐介

権利者：千葉大学

種類：特許権

番号：特願 2015-195503

出願年月日：2015 年 9 月 30 日

国内外の別：国内

名称：燃料電池

発明者：泉 康雄、小倉優太

権利者：千葉大学

種類：特許権

番号：特願 2014-242685

出願年月日：2014 年 11 月 30 日

国内外の別：国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

表面化学研究グループのウェブサイト

<http://cat.chem.chiba-u.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉 康雄 (Izumi, Yasuo)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50251666