

平成 30 年 4 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04187

研究課題名(和文) 全固体光触媒を用いた水を電子源とした二酸化炭素の光還元系の構築

研究課題名(英文) Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor by Using All-Solid-State Photocatalysts

研究代表者

寺村 謙太郎 (Teramura, Kentaro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80401131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：H<sub>2</sub>Oを電子源としたCO<sub>2</sub>の光還元活性を示すAg/ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光触媒の合成条件の最適化を行った。その結果、COの生成速度が117 μmol/hに達した。さらにその時のCOへの選択率は87.4%であった。また、この光触媒系におけるすべての検討で、量論的なO<sub>2</sub>の生成速度が観察された。さらに<sup>13</sup>C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>による同位体実験から<sup>13</sup>COのみが生成することを確認した。また、反応条件の検討から高いCOへの選択性を得るには、pHを高く(すなわち、H<sup>+</sup>の濃度を低く)、p[CO<sub>2</sub>]を低く(すなわち、CO<sub>2</sub>の濃度を高く)保つことが重要であると結論した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in designing a highly selective photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> to CO by using Ag-modified, Zn-doped Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The formation rate of CO and selectivity toward CO evolution were 117 μmol/h and 87.4%, respectively. In particular, we highlight that O<sub>2</sub> was stoichiometrically evolved and that CO was derived from the introduced CO<sub>2</sub>. The investigation for the reaction conditions showed that a low reaction temperature, high partial pressure of CO<sub>2</sub>, and high concentration of NaHCO<sub>3</sub> are important for achieving highly selective photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O.

研究分野：触媒化学

キーワード：二酸化炭素 水 酸化ガリウム 銀 人工光合成

## 1. 研究開始当初の背景

我々はこれまでに活性点金属として Ag を修飾し、さらに  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  を担持した  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  触媒 (以下、 $\text{Ag}/\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$  と記載する) が  $\text{H}_2\text{O}$  を電子源とした  $\text{CO}_2$  の光還元非常に高い活性 ( $\text{CO}$  の生成速度:  $108 \mu\text{mol}/\text{h}$ ,  $\text{CO}$  への選択性: 90%) を示すことを見出した (*Chem. Eur. J.*, **2014**, *20*, 9906-9909). この反応の特徴としては、量論的に  $\text{CO}_2$  を光還元可能である、他に例を見ない高い活性を示す、選択的に  $\text{H}_2\text{O}$  を電子源として  $\text{CO}_2$  を光還元するの 3 点が挙げられる。 $\text{Ag}/\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$  光触媒の開発経緯は以下の通りである。我々はこれまでに  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が  $\text{H}_2$  を電子源とした  $\text{CO}_2$  の光還元非常に高い活性を示すことを見出した (*J. Phys. Chem. C*, **2010**, *114*, 8892-8898). しかしながら、電子源を  $\text{H}_2\text{O}$  とした場合、 $\text{CO}_2$  の光還元は進行せず  $\text{H}_2\text{O}$  の光還元のみが進行した。一方、山口大学・酒多准教授との共同研究によって、Zn をドーブした  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が未ドーブの  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  に比べて  $\text{H}_2\text{O}$  の完全光分解に高い活性を示すことを見出している (*ChemSusChem*, **2011**, *4*, 181-184). そこで、Zn をドーブした  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  を用いた電子源を  $\text{H}_2\text{O}$  とした  $\text{CO}_2$  の光還元を検討したところ、活性点金属として Ag を用いた時に最も高い  $\text{CO}$  の生成速度および  $\text{CO}$  への選択率 (ここで示す選択率とは光照射によって生成した電子が  $\text{CO}_2$  の光還元で使用された割合とする) を示した。Zn 種の担持量が増加するとともに水素の生成活性が抑制され Zn を 3 mol% 以上担持すると  $\text{CO}$  への選択率は飛躍的に向上し、90% 以上となった。市販の  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  に  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  を担持して、高温で焼成しても、同様な  $\text{H}_2$  生成活性の抑制効果が観察されたため、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  の相互作用が  $\text{CO}$  への選択性に影響を与えていると考えられる。XAFS 測定の結果により、抑制効果が表れた触媒の表面には  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  が生成されていることを明らかにした。

## 2. 研究の目的

我々はこれまでに 高効率な光触媒 ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) に、 $\text{H}_2$  生成の阻害剤 ( $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$ ) を担持し、 $\text{CO}_2$  の還元の活性点となる金属 (Ag) を修飾するというプロセスで、 $\text{Ag}/\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$  が  $\text{H}_2\text{O}$  を電子源とした  $\text{CO}_2$  の光還元非常に高い活性を示すことを明らかにした。この触媒は、量論的に  $\text{CO}_2$  を光還元可能であり、非常に高い  $\text{CO}_2$  の転化率を示し、 $\text{H}_2\text{O}$  を電子源として選択的に  $\text{CO}$  を生成するという特長がある。これまでにないタイプの光触媒であり、本研究では、 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  と Ag の役割を明らかにし、高機能化のメカニズムを提案することを目的としている。

## 3. 研究の方法

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  は一般的な沈殿法によって合成した。

$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$  の水溶液にアンモニア水溶液を pH が 8.9 になるまで滴下した。得られた  $\text{Ga}(\text{OH})_3$  をろ過・洗浄し、353 K で乾燥した。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は  $\text{Ga}(\text{OH})_3$  を 1273 K で 6 時間焼成して得られた。 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  を修飾させた  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は含浸法を用いて調製した。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  を  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  の水溶液に超音波処理をして分散させ、323 K で真空乾燥させた。この混合物を 1223 K で 6 時間焼成して  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  を修飾させた  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ( $\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) を得た。続いて、得られた  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  に光電析法によって Ag を担持して、Ag を担持した  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  修飾  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ag}/\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) を合成した。担持量は  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  が 3 mol%, Ag が 1 wt% になるように調製した。また、比較のために  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  を担持していない  $\text{Ag}/\text{Ga}_2\text{O}_3$  を調製した。

水中での  $\text{CO}_2$  の光還元活性の評価は、 $\text{CO}_2$  流通型回分式反応装置を用いて行った。光触媒 0.5 g を 0.1 M  $\text{NaHCO}_3$  水溶液中 (1.0 L) に懸濁させ、 $\text{CO}_2$  を  $30 \text{ mL min}^{-1}$  で流通し、400 W Hg ランプで光照射を行った。生成物は TCD-GC 及びメタナイザー付きの FID-GC により定量した。 $^{13}\text{CO}_2$  を用いた実験では、TCD-GC によって生成ガスを分離した後、四重極型質量分析計によって  $^{12}\text{CO}$  と  $^{13}\text{CO}$  を同定した。

*in situ* FT-IR スペクトル測定では、試料 50 mg を直径 10 mm のディスクに加圧成型し、真空ラインに直結した透過型の *in situ* セル内のホルダーにセットした。測定はすべて、窓材に  $\text{CaF}_2$  を用い、分解能  $4 \text{ cm}^{-1}$ 、積算回数 128 回で行った。*in situ* セル内への  $\text{CO}_2$  の導入及び光照射に伴う試料表面の吸着種変化のスペクトルを測定した。光照射は 200 W Hg-Xe ランプを用いて行った。

## 4. 研究成果

$\text{ZnGa}_2\text{O}_4/\text{Ga}_2\text{O}_3$  光触媒の合成条件の最適化を行なったところ、3.0 mol% の  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  を修飾し、1223 K で 6 h 焼成したときに最も高い  $\text{CO}_2$  の転化率および  $\text{CO}$  への選択率を示した。また、助触媒として Ag を 1.0 wt%、光電析法を用いて担持したときに最も高い  $\text{CO}_2$  の転化率および  $\text{CO}$  への選択率を示した。Figure 1 は  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  の修飾量に対する各生成物の生成速度を示している。修飾量が増加するにしたがって、 $\text{H}_2$  の生成速度が徐々に抑制された。特に 3.0 mol% 以上修飾した場合において、 $\text{H}_2$  の生成速度はほぼ 0 であった。一方で、 $\text{CO}$  の生成速度はほぼ一定で変化せず、結果として  $\text{CO}$  への選択性が向上し、3.0 mol% 以上ではほぼ 100% に達した。また、注目すべきは、この光触媒系におけるすべての検討で、量論的な  $\text{O}_2$  の生成速度が観察された。さらに  $^{13}\text{CO}_2$  による同位体実験から  $^{13}\text{CO}$  のみが生成することを確認した。

$\text{CO}_2$  が  $\text{H}_2\text{O}$  に溶解すると  $\text{H}_2\text{CO}_3$  となり、平衡によって  $\text{HCO}_3^-$  及び  $\text{CO}_3^{2-}$  が共存する。Figure 2 に  $\text{H}_2\text{O}$  を電子源とする  $\text{CO}_2$  の光還元

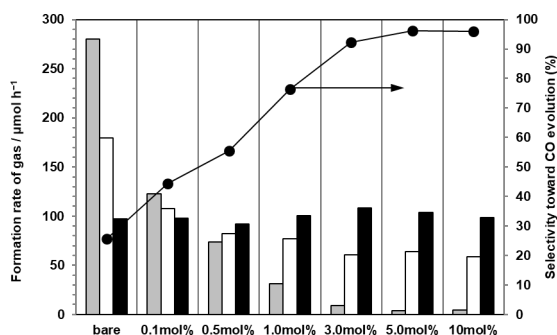


Figure 1 Rates of CO (black), O<sub>2</sub> (white), and H<sub>2</sub> (gray) evolution and selectivity toward CO evolution in the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> with H<sub>2</sub>O over Ag-loaded Zn-modified Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with various amounts of Zn species. Reaction conditions: amount of catalyst, 1.0 g; cocatalyst: 1.0 wt%; volume of water, 1.0 L; flow rate of CO<sub>2</sub>, 30 mL min<sup>-1</sup>; concentration of NaHCO<sub>3</sub>, 0.1 mol L<sup>-1</sup>; light source, high pressure mercury lamp (400 W).

における反応温度に対する H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO の生成速度および pH, p[CO<sub>2</sub>] の変化を示す。反応温度を上げると, pH はほとんど変わらないが, p[CO<sub>2</sub>] は増加した。それに伴い, H<sub>2</sub> の生成が CO<sub>2</sub> の生成に比べて有利となり, CO への選択率が減少した。一方, CO<sub>2</sub> の分圧を高くすると, p[CO<sub>2</sub>] は減少していき, CO への選択率が向上した。すなわち, CO への選択率は H<sub>2</sub>O 中の CO<sub>2</sub> の濃度に依存していると結論した。この反応においては, NaHCO<sub>3</sub> の添加が必須であり, 無添加の場合には H<sub>2</sub>O の光分解が優先して進行した。NaHCO<sub>3</sub> の濃度が低い場合には, CO だけではなく H<sub>2</sub> の生成速度も向上した。さらに濃度が高くなると H<sub>2</sub> の生成速度が一定となり, CO の生成速度のみが増加した。NaHCO<sub>3</sub> の濃度を 1.2 M とした場合に CO の生成速度は最も速くなった (168.1  $\mu\text{mol h}^{-1}$ )。また, NaHCO<sub>3</sub> の濃度が高

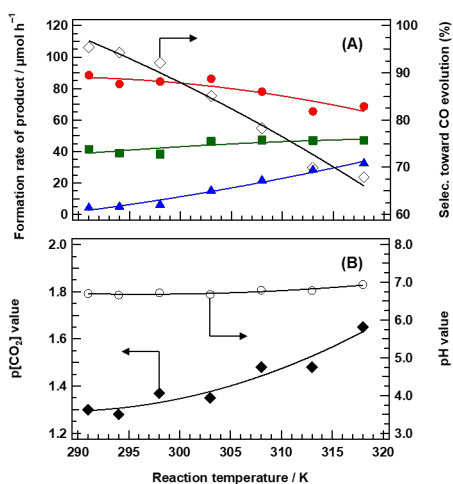


Figure 2 Temperature-dependent (A) formation rates of CO (circle), H<sub>2</sub> (triangle), and O<sub>2</sub> (square), and selectivity toward CO evolution (open diamond), and (B) p[CO<sub>2</sub>] (diamond) and pH (open circle) values for the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O. Catalyst: Ag (1.0 wt%)/ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (3.0 mol%)/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.5 g), solution: H<sub>2</sub>O (1.0 L), additive: 0.10 M NaHCO<sub>3</sub>, flow rate of CO<sub>2</sub>: 30 mL/min.

くなるにしたがって, pH は上昇し, p[CO<sub>2</sub>] は減少した。以上の結果より, 高い CO への選択性を得るには, pH を高く (すなわち, H<sup>+</sup> の濃度を低く), p[CO<sub>2</sub>] を低く (すなわち, CO<sub>2</sub> の濃度を高く) 保つことが重要であると結論した。CO<sub>2</sub> の光還元にも H<sup>+</sup> が必須であり, 高い選択性を達成するには, 活性点へ速やかに CO<sub>2</sub> 分子を供給する必要があると考えられる。

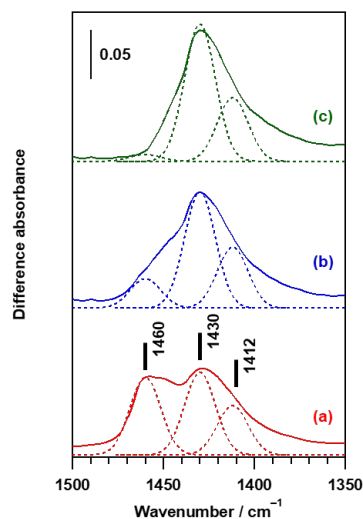


Figure 3 Difference IR spectra of adsorbed CO<sub>2</sub> species on ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (3.0 mol%)/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under photoirradiation for (a) 0 h, (b) 0.5 h, and (c) 1 h.

Figure 3 は ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に CO<sub>2</sub> を導入した後, 光照射を行った際の赤外吸収スペクトルである。ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に CO<sub>2</sub> を導入したところ, 1450 から 1550 cm<sup>-1</sup> 付近に bicarbonate 種に由来するバンドが観察された。これらのバンドは Zn<sup>2+</sup> 上 (*m*-HCO<sub>3</sub>-Zn: 1412 cm<sup>-1</sup>) および Ga<sup>3+</sup> 上 (*m*-HCO<sub>3</sub>-Ga: 1430 cm<sup>-1</sup>) の monodentate bicarbonate 種, Ga<sup>3+</sup> 上の bidentate bicarbonate 種 (*b*-HCO<sub>3</sub>-Ga: 1460 cm<sup>-1</sup>) 由来のバンドに帰属した。光照射 1 時間後に *b*-HCO<sub>3</sub>-Ga が消失し, *m*-HCO<sub>3</sub>-Ga へと変化する様子が観察された。さらに光照射を続けると, *m*-HCO<sub>3</sub>-Ga が消失し, formate 種に帰属されるバンドが現れた。formate 種は一般に, 光分解して CO を生成することが知られている。本反応においても, この formate 種を中間体として CO が生成していると結論した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

1. **Highly efficient photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> into solid CO using H<sub>2</sub>O as a reductant over Ag-modified ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**  
Wang, Zheng; Teramura, Kentaro; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro  
Journal of Materials Chemistry A: Materials for Energy and Sustainability (2015), 3(21), 11313-11319. **Selected as a Hot Paper**  
DOI:10.1039/C5TA01697E
2. **Tuning the selectivity toward CO evolution in the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O through the**

- modification of Ag-loaded Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with a ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> layer**  
Wang, Zheng; [Teramura, Kentaro](#); Huang, Zeai; [Hosokawa, Saburo](#); [Sakata, Yoshihisa](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Catalysis Science & Technology (2016), 6(4), 1025-1032.  
**Selected as a back cover**  
DOI:10.1039/C5CY01280E
- Photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> in water using fluorinated layered double hydroxides as photocatalysts**  
Iguchi, Shoji; [Teramura, Kentaro](#); [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Applied Catalysis, A: General (2016), 521, 160-167.  
DOI:10.1016/j.apcata.2015.11.023
  - A ZnTa<sub>2</sub>O<sub>6</sub> photocatalyst synthesized via solid state reaction for conversion of CO<sub>2</sub> into CO in water**  
Iguchi, Shoji; [Teramura, Kentaro](#); [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Catalysis Science & Technology (2016), 6(13), 4978-4985.  
DOI:10.1039/C6CY00271D
  - Preparation of transition metal-containing layered double hydroxides and application to the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> in water**  
Iguchi, Shoji; Hasegawa, Yudai; [Teramura, Kentaro](#); [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Journal of CO<sub>2</sub> Utilization (2016), 15, 6-14.  
DOI:10.1016/j.jcou.2016.04.001
  - Investigation of the electrochemical and photoelectrochemical properties of Ni-Al LDH photocatalysts**  
Iguchi, Shoji; Kikkawa, Soichi; [Teramura, Kentaro](#); [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Physical Chemistry Chemical Physics (2016), 18(20), 13811-13819  
DOI:10.1039/C6CP01646D
  - Fabrication of well-shaped Sr<sub>2</sub>KTa<sub>5</sub>O<sub>15</sub> nanorods with a tetragonal tungsten bronze structure by a flux method for artificial photosynthesis**  
Huang, Zeai; [Teramura, Kentaro](#); [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Applied Catalysis, B: Environmental (2016), 199, 272-281.  
DOI:10.1016/j.apcatb.2016.06.039
  - Which is an Intermediate Species for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as the Electron Donor: CO<sub>2</sub> Molecule, Carbonic Acid, Bicarbonate, or Carbonate Ions?**  
[Teramura, Kentaro](#); Hori, Kazutaka; Terao, Yosuke; Huang, Zeai; Iguchi, Shoji; Wang, Zheng; Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Journal of Physical Chemistry C (2017), 121(16), 8711-8721.  
DOI:10.1021/acs.jpcc.6b12809
  - Flux method fabrication of potassium rare-earth tantalates for CO<sub>2</sub> photoreduction using H<sub>2</sub>O as an electron donor**  
Huang, Zeai; [Teramura, Kentaro](#); Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Catalysis Today (2018), 300, 173-182.  
DOI:10.1016/j.cattod.2017.03.043
  - Efficient photocatalytic carbon monoxide production from ammonia and carbon dioxide by the aid of artificial photosynthesis**  
Huang, Zeai; [Teramura, Kentaro](#); Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Chemical Science (2017), 8(8), 2574-2580.  
DOI:10.1039/c7sc01851g
  - Highly selective photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by water over Ag-loaded SrNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> nanorods**  
Pang, Rui; [Teramura, Kentaro](#); Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Applied Catalysis, B: Environmental (2017), 218, 770-778.  
DOI:10.1016/j.apcatb.2017.06.052
  - CO<sub>2</sub> capture, storage, and conversion using a praseodymium-modified Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photocatalyst**  
Huang, Zeai; [Teramura, Kentaro](#); Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Journal of Materials Chemistry A: Materials for Energy and Sustainability (2017), 5, 19351-19357  
DOI:10.1039/c7ta04918h
  - Drastic improvement in the photocatalytic activity of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modified with Mg-Al layered double hydroxide for the conversion of CO<sub>2</sub> in water**  
Iguchi, Shoji; Hasegawa, Yudai; [Teramura, Kentaro](#); Kidera, Shotaro; Kikkawa, Soichi; [Hosokawa, Saburo](#); Asakura, Hiroyuki; [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Sustainable Energy & Fuels (2017), 1(8), 1740-1747.  
DOI:10.1039/c7se00204a
  - Enhancement of CO Evolution by Modification of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with Rare-earth Elements for the Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O**  
Tatsumi, Hiroyuki; [Teramura, Kentaro](#); Huang, Zeai; Wang, Zheng; Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
Langmuir (2017), 33(49), 13929-13935.  
DOI:10.1021/acs.langmuir.7b03191
  - Sodium Cation Substitution in Sr<sub>2</sub>KTa<sub>5</sub>O<sub>15</sub> toward Enhancement of Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> Using H<sub>2</sub>O as an Electron Donor**  
Huang, Zeai; Yoshizawa, Sumika; [Teramura, Kentaro](#); Asakura, Hiroyuki; [Hosokawa, Saburo](#); [Tanaka, Tsunehiro](#)  
ACS Omega (2017), 2(11), 8187-8197.  
DOI:10.1021/acsomega.7b01305
- [学会発表](計21件:招待講演のみ)
- Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O As an Electron Donor over Ag/ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Invited lecture)**  
[Kentaro Teramura](#), Zheng Wang, [Saburo Hosokawa](#), [Tsunehiro Tanaka](#)  
227th ECS Meeting B07 Inorganic/Organic Nanohybrids for Energy Conversion, Chicago, Illinois, United States of America, 9:00-9:20, May 27, 2015
  - Photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an electron donor (Invited lecture)**  
Kentaro Teramura, Zheng Wang, [Saburo Hosokawa](#),

- Tsunehiro Tanaka  
2015 Energy Materials and Nanotechnology (EMN) Qingdao Meeting, Solar Cells and Photocatalysis IV, Qingdao, People's Republic of China, 10:45-11:10, June 16, 2015
3. **二酸化炭素の光還元-全固体光触媒による人工光合成技術確立に向けて-**  
寺村謙太郎  
2015年7月26日 12:30-13:30  
触媒学会 第55回オーロラセミナー  
ほろしん温泉 ほたる館
  4. **Photoreduction of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an electron donor over all-solid-state photocatalysts (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Zheng Wang, Shoji Iguchi, Hiroyuki Tatsumi, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
2015年9月9日 16:10-16:40  
2015年光化学討論会 シンポジウム「太陽光エネルギーと触媒が織りなす物質変換のための人工光合成」  
大阪市立大学杉本キャンパス
  5. **Photoreduction of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an electron donor using various solid-state photocatalysts (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Zheng Wang, Shoji Iguchi, Hiroyuki Tatsumi, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
228th ECS Meeting L06: Photocatalysts, Photoelectrochemical Cells, and Solar Fuels, Phoenix, Arizona, United States of America, 9:10-9:40, October 14, 2015
  6. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura  
International CO<sub>2</sub> Mini Symposium at KAIST "CO<sub>2</sub> Conversion for Applications", Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, 15:40-16:20, November 30, 2015
  7. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura  
26<sup>th</sup> IUPAC International Symposium on Photochemistry, Osaka Central Public Hall, Japan, 15:40-16:20, April 5, 2016
  8. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura  
International Symposium on Nanostructured Photocatalysts and Catalysts (NPC2016), Osaka University, Japan, 10:00-10:20, April 9, 2016
  9. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Zheng Wang, Shoji Iguchi, Hiroyuki Tatsumi, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
229th ECS Meeting B07: Inorganic/Organic Nanohybrids for Energy Conversion, San Diego, California, United States of America, 8:00-8:20, May 30, 2016
  10. **Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor Using All-Solid-State Photocatalysts (invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Hiroyuki Tatsumi, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
The 6th Sino-Japan bilateral young chemist forum - Photocatalysis for water splitting and CO<sub>2</sub> reduction, Dalian, PR China, 10:45-11:15, July 2, 2016
  11. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura  
The 5th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE2016), Taichung, Taiwan, 11:15-11:30, November 10, 2016
  12. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Hiroyuki Tatsumi, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
9<sup>th</sup> Singapore International Chemistry Conference (SICC9), Singapore, 13:50-14:10, December 12, 2016
  13. **Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor Using All-Solid-State Photocatalysts (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Hiroyuki Tatsumi, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
International Conference on Catalysis and Chemical Engineering (CCE-2017), Baltimore, United States of America, 15:20-15:40, February 23, 2017
  14. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
The 2017 MRS Spring Meeting, NM4: Novel Catalytic Materials for Energy and Environment, #NM4.8.05, Phoenix, United States of America, April 20, 2017
  15. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
231st ECS Meeting B07: Inorganic/Organic Nanohybrids for Energy Conversion, New Orleans, Louisiana, United States of America, 8:40-9:00, May 29, 2017
  16. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Invited lecture)**  
Kentarō Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
231st ECS Meeting, I03: Renewable Fuels via Artificial Photosynthesis 2, New Orleans, Louisiana, United States

- of America, 10:00-10:30, May 31, 2017
17. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited lecture)**  
Kentaro Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
Nano-Micro Conference 2017, Shanghai, PR China, 10:20-10:45, June 21, 2017
  18. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited lecture)**  
Kentaro Teramura, Kasutaka Hori, Yosuke Terao, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka  
International Symposium on Chemistry for Solar Energy Application 2017, Kindai University, Osaka, 10:45-11:15, August 31, 2017
  19. **Highly Concentrated CO Evolution for Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor (Invited department seminar)**  
Kentaro Teramura  
Department seminar for Department of Chemical Engineering of National Taiwan University, National Taiwan University, Taipei, Republic of Taiwan, 15:30-16:30, December 15, 2017
  20. **Artificial Photosynthesis Using All-Solid-State Photocatalysts -Photocatalytic Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an Electron Donor- (Keynote lecture)**  
Kentaro Teramura  
Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials (GREEN2017), GIS TAIPEI TECH CONVENTION CENTER, Taipei, Republic of Taiwan, 09:00-09:40, December 22, 2017
  21. **Drastic Improvement in the Photocatalytic Activity with Layered Double Hydroxides for the Conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O (Invited lecture)**  
Kentaro Teramura  
Keio International Symposium on 2D Materials 2018 (K2D-18), Hiyoshi Campus, Keio University, Kanagawa, 13:20-14:00, February 22, 2018

〔その他〕

[http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/~moleng\\_04/index.html](http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/~moleng_04/index.html)

## 6 . 研究組織

- (1) 研究代表者  
寺村 謙太郎 (TERAMURA, Kentaro)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80401131
- (2) 連携研究者  
田中 庸裕 (TANAKA, Tsunehiro)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：70201621
- (3) 連携研究者  
細川 三郎 (HOSOKAWA, Saburo)

京都大学・実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点ユニット・特定准教授  
研究者番号：90456806

- (4) 連携研究者  
酒多 喜久 (SAKATA, Yoshihisa)  
山口大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：40211263