

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01716

研究課題名（和文）CO<sub>2</sub>光還元活性を示すAgナノ粒子修飾光触媒材料の構造解析および反応機構解析研究課題名（英文）Characterization of Ag-modified photocatalysts and investigation of their mechanisms for photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O

研究代表者

寺村 謙太郎 (Teramura, Kentaro)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80401131

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）：H<sub>2</sub>Oを電子源とするCO<sub>2</sub>光還元においては、H<sub>2</sub>O光還元がCO<sub>2</sub>光還元比べて進行しやすいため、CO<sub>2</sub>光還元生成物であるCOに比べてH<sub>2</sub>O光還元生成物であるH<sub>2</sub>の方が多く生成することが多い。本研究では、CO<sub>2</sub>光還元には必須となるAgナノ粒子助触媒に注目し、含浸法・光析出法・化学還元法など各種の方法でAgナノ粒子助触媒を光触媒に修飾し、H<sub>2</sub>Oを電子源とするCO<sub>2</sub>光還元について活性比較を行った。その結果、Agナノ粒子は主に光触媒の還元面に展開され、CO<sub>2</sub>還元サイトとして機能することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、人類が持続可能な社会を構築するためには、太陽光などの再生可能エネルギーを利用して、人類に必要な資源やエネルギーを作り出していく必要がある。本研究で対象にした「H<sub>2</sub>Oを電子源とするCO<sub>2</sub>光還元」は植物が行っている光合成を模倣しており、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oから化学物質を得られる人工光合成技術として注目を浴びている。この化学反応はH<sub>2</sub>Oの光還元による水素生成と競争するためにその制御が求められている。本研究では新規光触媒の開発とAgナノ粒子助触媒機能の解明によってCO生成速度を向上させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：The formation rate of CO is normally lower than that of H<sub>2</sub> for the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an electron donor because the redox potential of CO<sub>2</sub> to CO is more negative than the H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub> redox potential. Thus, the reduction of CO<sub>2</sub> competes with the production of H<sub>2</sub> from H<sub>2</sub>O (overall water splitting) even in the presence of CO<sub>2</sub>. In this study, we focused on Ag nanoparticle co-catalysts, which are essential for CO<sub>2</sub> photoreduction, and modified them on the surface of photocatalysts by various methods such as impregnation, photodeposition, and chemical reduction methods, and compared their activity for the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O as an electron donor. Ag nanoparticles were mainly dispersed on the reduction surface of the photocatalyst and functioned as a CO<sub>2</sub> reduction site.

研究分野：触媒化学

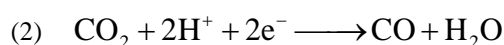
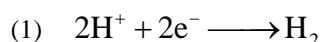
キーワード：Agナノ粒子 光触媒 CO<sub>2</sub>光還元 光電析法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

H<sub>2</sub>O を電子源とする CO<sub>2</sub> の光還元は植物が行っている光合成を模倣しており、人類が持続可能な社会を構築するためには、いずれ実現しなければならない夢の反応(人工光合成)として注目を浴びてきた。現在、多くの研究グループがこのテーマに参入しているが、CO<sub>2</sub> が H<sub>2</sub>O を電子源として還元されていることを科学的に証明している例はほとんどない。すなわち、生成した還元生成物が導入した CO<sub>2</sub> 由来であるかわからない(<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> を用いた同位体実験を行っていない)、H<sub>2</sub>O を電子源として利用しているかわからない(量論的な O<sub>2</sub> の生成を確認していない)、

CO<sub>2</sub> の光還元が主として進行しているかわからない(水分解による H<sub>2</sub> の生成は見えていない)等、報告に不備が多いのが現状である。特に については、CO<sub>2</sub> 還元生成物が CO の場合、下の化学式で示すように CO<sub>2</sub> の光還元は H<sub>2</sub>O 由来の H<sup>+</sup> の光還元と競争するため、高い CO への選択性を実現するにはこれらの反応を制御することが必須である。



本研究グループでは 2014 年よりこの研究テーマに着手し、先に示した から の問題点をすべて解決した 20 種類の光触媒を報告している。

$R_{\text{CO}}$  by MS =  $R_{\text{CO}}$  by GC <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> を基質として用いて、質量分析計で定量した <sup>13</sup>CO の生成速度 とガスクロマトグラフで定量した CO の生成速度 が等しい。すなわち、基質として用いた <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> が確実に還元されていることを示す。

$e^- / h^+ = 1$  電荷分離で生じた電子の量 ( $e^-$ ) と正孔の量 ( $h^+$ ) が等しい。電子の量と正孔の量はそれぞれ還元生成物と酸化生成物の生成速度から計算できる。

$2R_{\text{CO}} / (2R_{\text{CO}} + 2R_{\text{H}_2}) \times 100 > 50\%$  H<sub>2</sub>O の光分解由来の H<sub>2</sub> の生成速度 に比べて CO の生成速度の方が大きい。

我々は を「電子の選択率」と呼んでおり、電荷分離によって生成した電子が先ほど示した式(1)と(2)のどちらに消費されるかを端的に示す値である。Kudo らは酸化物半導体の ALa<sub>4</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>15</sub> (A = Ca, Sr, and Ba) に Ag ナノ粒子を修飾すると、H<sub>2</sub>O を電子源とする CO<sub>2</sub> の光還元が効率よく進行し、主生成物として CO が得られることを見出した。<sup>[1]</sup>我々は様々な種類の酸化物半導体と金属ナノ粒子の組み合わせについて、細かく検討を行ってきた。その結果、以下に示す 3 つのことを明らかにした。

1. Ag ナノ粒子以外の金属ナノ粒子は CO<sub>2</sub> の光還元活性を示さない。
2. 助触媒としての Ag ナノ粒子の修飾は必要条件ではあるが十分条件ではない。
3. CO への選択性は粒子の粒径に依存する。

すなわち、Ag ナノ粒子の修飾は必須であるが、何故必要なかがわかっていない。現状では各研究者が反応機構を提案して議論するという段階ではなく、様々な酸化物半導体粉末に Ag ナノ粒子を修飾して、選択的に CO<sub>2</sub> を還元する光触媒を報告しているにすぎないため、今後互いに議論が深まるプラットフォームが必要となると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は H<sub>2</sub>O を電子源とする CO<sub>2</sub> の光還元に必要な不可欠な光触媒への Ag ナノ粒子の修飾の意味を明らかにすることである。この目的を達成するには

光触媒活性の比較検討が可能となる一連の光触媒群の保有、  
粒径や形状の異なる Ag ナノ粒子の合成・修飾手法の確立、  
Ag 種の構造解析や反応機構解析など各種解析手法の検討

が必要になる。現在のところ、CO<sub>2</sub> の光還元は玉石混淆の状態であり、真に CO<sub>2</sub> を還元していると主張できる研究グループは数少ない。我々は 1997 年より CO<sub>2</sub> の光活性化のテーマに着手し、2014 年から H<sub>2</sub>O を電子源とする CO<sub>2</sub> の光還元へと研究テーマの幅を広げてきた。本研究では、我々の強みである を生かして、酸化物半導体をベースとして利用し、 および について検討

を行う．これまでにあらかじめ合成した金属ナノ粒子を酸化物半導体に修飾する研究は多くなされてきた．しかしながら， $\text{CO}_2$ の光還元において実施するには2つの問題点がある．問題点(1)は加熱によるAgナノ粒子の凝集・変形である．金属ナノ粒子は一般的にその粒径や形状を保持させるために，保護剤と呼ばれる有機化合物の添加が必須とされている．一方，金属ナノ粒子と酸化物半導体の界面を形成させるには保護剤はむしろ不要である．そのため，保護剤の除去のために高温で焼成することが多い．その際に金属ナノ粒子は凝集・変形するため，思った通りの修飾をすることは困難である．これに関連して問題点(2)は，保護剤の除去が十分になされずに炭素残渣が残存して， $\text{CO}_2$ の還元生成物を与えてしまうことである．常時 $^{13}\text{C}$ を用いることは現実的ではなく，保護剤なしのAgナノ粒子合成および修飾が望ましい．本研究では問題点(1)と(2)を解決するため，これらの修飾法の改良を行い，Agナノ粒子の粒径や形状と活性・選択性の関係を明らかにする．さらに，我々は活性サイトへの $\text{CO}_2$ の吸着・光活性化・脱離という観点から反応機構を提案し，触媒設計にフィードバックしてきた．光触媒の研究分野においては電荷分離の効率が議論されることが多く，表面反応についてはほとんど議論されていない．我々は光触媒上に $\text{CO}_2$ が吸着可能な吸着サイトが存在していると考えており，このような立場で触媒設計を行っているグループは非常にまれである．この触媒設計指針はこれまでの光触媒材料合成を大きく変革するため，その波及効果は大きいと考えられる．

### 3．研究の方法

光触媒の合成には，固相法・沈殿法・フラックス法などの各種の合成法にて行った．光触媒粉末の物性評価はX線回折(XRD)，X線光電子分光法(XPS)，走査型電子顕微鏡(SEM)，透過型電子顕微鏡(TEM)，紫外可視拡散反射スペクトル測定(UV-DRS)を用いて行った．光触媒粉末に対し，助触媒であるAgを含浸法(impregnation, IMP)・光析出法(photodeposition, PD)・化学還元法(chemical reduction, CR)にて修飾した．含浸法による助触媒担持では，M-STOを10 mLの純水に分散させ，0.1 M  $\text{AgNO}_3$ 水溶液を加えた．353 Kのホットバス上で純水が完全に蒸発するまで攪拌し，残った粉末を空気流通下で723 Kで2時間焼成した．化学還元法による助触媒担持では，光触媒を純水に分散させ，金属前駆体として0.1 M  $\text{AgNO}_3$ 水溶液，還元剤として0.4 M  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ 水溶液を加え，353 Kで1.5時間攪拌した．得られた粉末を1 Lの純水を用いて濾過して回収し，室温で保存した．光析出法による助触媒担持では，光触媒を1 Lの純水に分散させ，Arを $60 \text{ mL min}^{-1}$ で30分間流通させた後，0.1 M  $\text{AgNO}_3$ 水溶液を加えた．さらに1時間Arを流通させた後，流速を $30 \text{ mL min}^{-1}$ に変更し，400 W 高圧水銀灯を用いて2時間照射した．得られた粉末を濾過して回収し，室温で保存した． $\text{CO}_2$ 光還元は $\text{CO}_2$ 流通型回分式反応装置を用いて行った．光触媒0.2-0.5 gを0.1 M  $\text{NaHCO}_3$ 水溶液0.2-1.0 Lに分散し， $\text{CO}_2$ ガスを $30 \text{ mL min}^{-1}$ で流通させながら，400 W 高圧水銀灯またはLEDランプを用いて反応管内部もしくは外部から照射を行った．生成物はTCD-GC及びメタナイザーを取り付けたFID-GCにより定量した．

### 4．研究成果

#### Ag 助触媒へのCoの添加効果

$\text{Al-SrTiO}_3$ に助触媒であるAgとCoナノ粒子を異なるpHで光析出法によって修飾した光触媒を用いて $\text{H}_2\text{O}$ を電子源とする $\text{CO}_2$ 光還元を行った．pH調節を行わず光析出をした場合，pHはほぼ7.0付近であり，CO生成への選択率が58%程度であった．また，pHを4.0に調整して光析出を行うと，活性はほとんど示さなかった．一方で，pHを10に調整して光析出を行うと， $\text{H}_2$ 生成速度が抑制され，CO生成速度が2.9倍に増加した．その結果，COへの選択率が95.7%に向上した．さらに，pHを11.5に調整して光析出を行うと，COへの選択性は維持したまま，CO生成速度が大幅に低下した．それぞれの試料のSEM像を観察したところ，すべての試料において，Agナノ粒子は $\text{Al-SrTiO}_3$ の還元サイトに，Coナノ粒子は酸化サイトに析出していることを確認した．粒径が変化していることが確認されたため，紫外可視拡散反射スペクトルを測定したところ，Agナノ粒子のプラズモン吸収に由来するピーク強度がpHの増加に従って大きくなるという挙動を示した．これからの結果により，光析出中のpHはAgの光触媒上への析出に影響を与え，粒径と分散性を制御できるため， $\text{CO}_2$ 光還元活性が変化したと結論した．

次にメタノールを犠牲剤とした光析出法によってAgとCoナノ粒子を修飾した $\text{Al-SrTiO}_3$ を用いて $\text{H}_2\text{O}$ を電子源とする $\text{CO}_2$ 光還元を行った．メタノールを加えなかった場合に比べ，加え

た場合はいずれもより高いCO生成速度とCOへの選択率を示した。Agに対して5,10等量のメタノールを加えると3.5倍以上のCO生成速度と90%を超えるCOへの選択率を示した。AgとCoを逐次的に光析出し,2種類目の金属の光析出の際にのみメタノールを加えた。その結果,Coナノ粒子を先に析出させたのちAgの前駆体とメタノールを加えて再度光析出させた試料において共光析出と同様の活性向上を確認した。一方で,Agナノ粒子を先に析出させたのちCoの前駆体とメタノールを加えて光析出させたものは活性向上を確認できなかった。X線光電子スペクトル測定の結果,Agは0価であり,Coはすべて3価であることを確認した。Agナノ粒子は金属ナノ粒子であり,Coナノ粒子はCoOOHであると結論した。

#### Ag助触媒へのFeの添加効果

これまでの我々の検討から,  $K_2YTa_5O_{15}$  光触媒にAgを光析出法で修飾してもCOへの選択率が30%程度にとどまることが分かっていた。光析出法でAg-Fe助触媒を共修飾したところ,COへの選択率は80%程度に向上した。Ag-Fe/ $K_2YTa_5O_{15}$ のAg K-edgeおよびFe K-edgeのXANESスペクトルからAg種は金属状態のAg,Fe種はFeOOHとして担持されていることが分かった。さらに透過電子顕微鏡(TEM)による分析から,それぞれ平均粒子径165nm,10nmのAg金属とFeOOHがアモルファス状態ではなく結晶状態で光触媒表面上に分散されている様子が観察された。光電析中に反応溶液中の $Fe^{2+}$ , $Fe^{3+}$ を定量し,Fe助触媒の担持メカニズムを検討した。前駆体として添加した $Fe^{3+}$ は照射開始後すぐに $Fe^{2+}$ へ還元され,2時間後には96%が $Fe^{2+}$ となった。また,溶液中の全Fe量は照射開始2時間後まで緩やかに減少し,2~5時間後までの間に急激に減少した。また,Fe種がすべて光触媒上に担持されたと考えられる照射6時間後以降は,水分解により $H_2$ と $O_2$ が一定の生成速度で生成した。XANESおよびTEMの結果を合わせて考えると,前駆体の $Fe^{3+}$ が照射により $Fe^{2+}$ へ還元され,この $Fe^{2+}$ が $K_2YTa_5O_{15}$ に生じた正孔によって $Fe^{3+}$ へ再酸化される際に結晶構造を持つFeOOHとして担持されると考えられる。このようなAg-Fe助触媒は $K_2YTa_5O_{15}$ だけでなく, $Al-SrTiO_3$ , $Mg-SrTiO_3$ , $Ga_2O_3$ に修飾した場合でも同様に $CO_2$ 光還元活性が向上することから,FeOOHは様々な光触媒に対して汎用的に用いることができる助触媒であると結論した。

#### MgをドープしたSrTiO<sub>3</sub>(Mg-STO)を用いたH<sub>2</sub>Oを電子源とするCO<sub>2</sub>光還元活性

Figure 1に,Ag及びCo助触媒を共担持した各種金属ドープしたSrTiO<sub>3</sub>(STO)光触媒を用いた,H<sub>2</sub>Oを電子源とするCO<sub>2</sub>光還元における各生成物(CO,H<sub>2</sub>,O<sub>2</sub>)の生成速度とCOの選択率を示す。u-STO(無ドープ),Li-STO,Ca-STO,Mn-STO,Zn-STO,Y-STO,W-STOがほとんど活性を示さなかった一方で,Al-STOやMg-STOは十分なCO生成速度を示した。Mg-STOは既報のAl-STOの2倍のCO生成速度(~20  $\mu\text{mol h}^{-1}$ )を示し,見かけの量子効率も0.05%であった。また,Mg-STOを用いた場合のCO生成速度はu-STOを用いた場合の23倍であった。この反応では2電子還元生成物(H<sub>2</sub>,CO)と4電子酸化生成物(O<sub>2</sub>)が化学量論比通りに生成したことから,反応溶液中のH<sub>2</sub>Oが電子源として機能していると考えられる。さらに,H<sub>2</sub>の生成はほとんど見られず,COの選択率は99%以上であった。また,<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>を基質とした同位体実験により,生成したCOが反応管に供給したCO<sub>2</sub>由来であることを確認した。

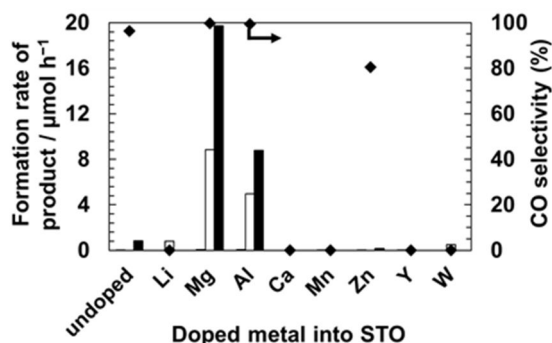


Figure 1 Formation rates of CO (black), H<sub>2</sub> (gray), and O<sub>2</sub> (white) and the selectivity toward CO evolution (diamond) in the photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> by H<sub>2</sub>O over u-STO and a series of M-STO photocatalysts (M = Li, Mg, Al, Ca, Mn, Zn, Y, and W) with Ag and Co cocatalysts.

#### STO光触媒への金属ドープの効果

Figure 2にu-STO,Mg-STO,Al-STO,Zn-STOのSEM像を示す。u-STOは{100}面のみが露出した純粋な立方体形状であった。Mg-STOは辺が割れた立方体形状であり,{100}面に加えて

{110}面が露出していると考えられる．この形状は, Figure 2(c) に示す Al-STO と同様であったことから, Al-STO について報告されている面選択的な電荷分布が Mg-STO においても発現していることが示唆された．実際に, 光析出法を用いて Ag 及び Co 粒子を担持し, 各粒子を TEM によって観察したところ, Ag は{100}面に, Co は{110}面に選択的に担持されていることが分かった．また, XANES スペクトルの解析から, Ag 粒子は  $\text{Ag}^0$  として, Co 粒子は  $\text{CoOOH}$  と  $\text{Co}_3\text{O}_4$  の混合物として Mg-STO 表面に担持されていることが分かった．よって, Al-STO 同様, Mg-STO 表面では光照射によって生じた励起電子と正孔が, それぞれ{100}面と{110}面に選択的に分布していることを見出した．一方, Figure 2(d) に示す Zn-STO を始め, Al や Mg 以外の金属をドーパントとした場合は, u-STO の場合と同様に{100}面のみが露出した純粋な立方体形状であった．これらの結果から光触媒粒子形状に由来する異方的な電荷分布が, Mg-STO の高い  $\text{CO}_2$  光還元活性をもたらしたと結論した．

Figure 3 は, 355 nm のレーザーパルスをポンプ光として測定した u-STO, Al-STO, Mg-STO の過渡吸収スペクトルを示している．中赤外域 ( $\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ ) の吸収は伝導帯中の自由電子, 近赤外域 ( $\sim 11000\text{ cm}^{-1}$ ) の吸収は格子欠陥に捕捉された電子 (トラップ電子), 可視域 ( $\sim 20000\text{ cm}^{-1}$ ) の吸収はトラップ電子と正孔の両方によるものであると帰属されている．

Figure 3(a), (b), (c) を比較すると, STO への Mg ドープ, Al ドープにより自由電子の量はほとんど変化しないことが分かった．一方, Mg や Al ドープによって近赤外域 ( $\sim 11000\text{ cm}^{-1}$ ) の吸収が大きくなった．これは, 伝導帯下端から貴方向に  $5000\text{ cm}^{-1}$  ( $0.62\text{ eV}$ )  $-17000\text{ cm}^{-1}$  ( $2.1\text{ eV}$ ) の範囲に形成された準位にトラップされた電子の量が増加したことを示唆している．実際の光触媒反応では, 連続的な光照射により, これらのトラップ電子が伝導帯に再び励起され,  $\text{CO}_2$  還元反応に寄与すると考えられる．また, u-STO は可視域 ( $20000\text{ cm}^{-1}$ ) の吸収が Mg-STO や Al-STO よりも大きかったが, この領域はトラップされた正孔による吸収も含んでおり,  $\text{CO}_2$  還元反応に寄与する電子の量は比較的少ないと考えられる．これらのことから, STO への Mg や Al ドープによって励起電子のトラップ準位が増え, 正孔との再結合が抑制されたことが Mg-STO や Al-STO が高い  $\text{CO}_2$  光還元活性を有する要因であると結論した．

#### 参考文献

- [1] K. Iizuka, T. Wato, Y. Miseki, K. Saito, A. Kudo, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 20863-20868.

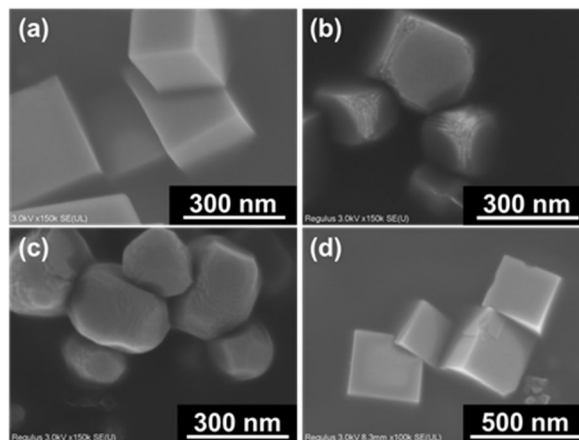


Figure 2 SEM images of (a) u-STO, (b) Mg-STO, (c) Al-STO, and (d) Zn-STO

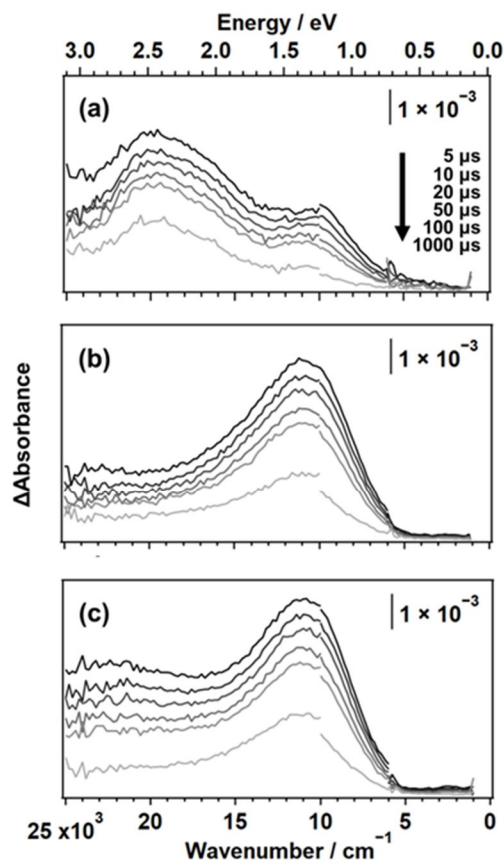


Figure 3 Transient absorption spectra of (a) u-STO, (b) Mg-STO, and (c) Al-STO irradiated by UV (355 nm) laser pulses under 20 Torr  $\text{N}_2$ .

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iguchi Shoji, Ikeda Yuki, Naniwa Shimpei, Tanaka Tsunehiro, Teramura Kentaro	4. 巻 97
2. 論文標題 Photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> using K <sub>2</sub> YTa <sub>5</sub> O <sub>15</sub> photocatalyst in the presence of silver-iron dual cocatalyst	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 uoae033
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/bulcsj/uoae033	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 Nakamoto Takechi, Iguchi Shoji, Naniwa Shimpei, Tanaka Tsunehiro, Teramura Kentaro	4. 巻 13
2. 論文標題 Mg-doped SrTiO <sub>3</sub> photocatalyst with Ag-Co cocatalyst for enhanced selective conversion of CO <sub>2</sub> to CO using H <sub>2</sub> O as the electron donor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Catalysis Science & Technology	6. 最初と最後の頁 4534 ~ 4541
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d3cy00576c	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 Morishita Masashige, Asakura Hiroyuki, Hosokawa Saburo, Tanaka Tsunehiro, Teramura Kentaro	4. 巻 13
2. 論文標題 Kinetic Study of Heterogeneous Photocatalytic CO <sub>2</sub> Reduction: Development of a General Formula for Relations between Activity and Reaction Conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 6966 ~ 6973
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acscatal.2c05823	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, Xuanwen; Tanaka, Tsunehiro*; Teramura, Kentaro*	4. 巻 321
2. 論文標題 High selectivity toward CO evolution for the photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O as an electron donor over Ag-loaded -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Catalysis, B: Environmental	6. 最初と最後の頁 122027
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apcatb.2022.122027	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, Xuanwen; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*; Teramura, Kentaro*	4. 巻 320
2. 論文標題 Tuning Ag-modified NaTaO <sub>3</sub> to achieve high CO selectivity for the photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> using H <sub>2</sub> O as the electron donor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Catalysis, B: Environmental	6. 最初と最後の頁 121885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2022.121885	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, Xuanwen; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*; Teramura, Kentaro*	4. 巻 5
2. 論文標題 Exploring Effective Non-metal Inorganic Cocatalysts for the Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> Using H <sub>2</sub> O as an Electron Donor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 11379-11385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.2c01865	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, Xuanwen; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*; Teramura, Kentaro*	4. 巻 410
2. 論文標題 Effect of the in situ addition of chromate ions on H <sub>2</sub> evolution during the photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> using H <sub>2</sub> O as the electron donor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 273-281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2022.05.045	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, Xuanwen; Teramura, Kentaro*; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of Zinc Hydroxide as an Abundant and Universal Cocatalyst for the Selective Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 4313-4317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.202100633	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, Xuanwen; Teramura, Kentaro*; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*	4. 巻 298
2. 論文標題 Shift of active sites via in-situ photodeposition of chromate achieving highly selective photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O over ZnTa <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Catalysis, B: Environmental	6. 最初と最後の頁 120508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2021.120508	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, Shuying; Teramura, Kentaro*; Hisatomi, Takashi; Domen, Kazunari; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*	4. 巻 9
2. 論文標題 Highly Selective Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide by Water over Al-SrTiO <sub>3</sub> Photocatalyst Modified with Silver-Metal Dual Cocatalysts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 9327-9335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.1c00151	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, Shuying; Teramura, Kentaro*; Hisatomi, Takashi; Domen, Kazunari; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*	4. 巻 12
2. 論文標題 Dual Ag/Co cocatalyst synergism for the highly effective photocatalytic conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O over Al-SrTiO <sub>3</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 4940-4948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc00206f	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, Shuying; Teramura, Kentaro*; Asakura, Hiroyuki; Hosokawa, Saburo; Tanaka, Tsunehiro*	4. 巻 125
2. 論文標題 Effect of Zn in Ag-Loaded Zn-Modified ZnTa <sub>2</sub> O <sub>6</sub> for Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1304-1312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c08464	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33件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 光還元におけるSrTiO <sub>3</sub> 光触媒への各種金属イオンのドーピング効果
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川田稀士, 西本大夢, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 ZnTa <sub>2</sub> O <sub>6</sub> 光触媒のZn/Ta比がCO <sub>2</sub> 光還元活性に及ぼす効果
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小坂井明, 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 金属ドーピングSrTiO <sub>3</sub> 光触媒を用いた正孔捕捉剤存在下でのCO <sub>2</sub> 光還元
3. 学会等名 電気化学会第91回大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大塚恭平, 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 膜 - 光電極接合体の作製と光電気化学特性の評価
3. 学会等名 電気化学会第91回大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 光還元におけるSrTiO <sub>3</sub> 光触媒への各種金属イオンのドーブ効果
3. 学会等名 第133回触媒討論会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中本嵩市, 小坂井明, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 金属ドーブSrTiO <sub>3</sub> を用いたCO <sub>2</sub> 光還元における正孔捕捉剤としてのアルコールの添加効果
3. 学会等名 第42回固体・表面光化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takechi Nakamoto, Shoji Iguchi, Shimpei Naniwa, Tsunehiro Tanaka, Kentaro Teramura
2. 発表標題 Mg-doped SrTiO <sub>3</sub> Photocatalyst with Ag - Co Cocatalyst for Enhanced Selective Conversion of CO <sub>2</sub> to CO Using H <sub>2</sub> O as the Electron Donor
3. 学会等名 OKCAT2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 MgドーブSrTiO <sub>3</sub> を用いたCO <sub>2</sub> 光還元における正孔捕捉剤としてのアルコールの添加効果
3. 学会等名 第17回触媒道場
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田稀士, 西本大夢, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 超音波還元法によりAg助触媒を担持したZnTa206光触媒の水を電子源としたCO2光還元活性
3. 学会等名 第17回触媒道場
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小坂井 明, 中本 嵩市, Wang Shuying, 井口 翔之, 浪花 晋平, 田中 庸裕, 寺村 謙太郎
2. 発表標題 AlドーブSrTiO3を用いたCO2光還元における正孔捕捉剤としてのアルコールの添加効果
3. 学会等名 第17回触媒道場
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡晋太郎, 浪花晋平, 井口翔之, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 MgドーブSrTiO3を用いたCO2光還元における正孔捕捉剤の添加効果
3. 学会等名 第132回触媒討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田稀士, 西本大夢, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 超音波還元法により Ag助触媒を担持した ZnTa206光触媒の CO2光還元活性
3. 学会等名 第132回触媒討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小坂井 明, 中本 嵩市, Wang Shuying, 井口 翔之, 浪花 晋平, 田中 庸裕, 寺村 謙太郎
2. 発表標題 AlドーブSrTiO <sub>3</sub> を用いたCO <sub>2</sub> 光還元における正孔捕捉剤の添加効果
3. 学会等名 第132回触媒討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 水を電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元活性を示すSrTiO <sub>3</sub> 光触媒へのMgドーブの効果
3. 学会等名 第43回夏の研修会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 水を電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元活性を示すSrTiO <sub>3</sub> 光触媒へのMgドーブの効果
3. 学会等名 第19回触媒化学ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本嵩市・小坂井明・井口翔之・浪花晋平・田中庸裕・寺村謙太郎
2. 発表標題 MgドーブSrTiO <sub>3</sub> を用いたCO <sub>2</sub> 光還元における正孔捕捉剤の添加効果
3. 学会等名 第42回光がかかわる触媒化学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoji Iguchi, Shimpei Naniwa, Tsunehiro Tanaka, and Kentaro Teramura
2. 発表標題 Development of photocatalysts for CO <sub>2</sub> conversion with H <sub>2</sub> O
3. 学会等名 2023 Taiwan International Conference on Catalysis (TICC-2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小坂井 明, 中本 高市, Wang Shuying, 井口 翔之, 浪花 晋平, 田中 庸裕, 寺村 謙太郎
2. 発表標題 AlドーピングSrTiO <sub>3</sub> を用いたCO <sub>2</sub> 光還元における犠牲剤添加効果
3. 学会等名 触媒学会西日本支部第14回触媒科学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoji Iguchi, Shuying Wang, Shimpei Naniwa, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka, Kentaro Teramura
2. 発表標題 Al-Doped SrTiO <sub>3</sub> Photocatalyst for Selective CO <sub>2</sub> Reduction with Water as a Reductant
3. 学会等名 243rd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takechi Nakamoto, Shoji Iguchi, Shimpei Naniwa, Tsunehiro Tanaka, Kentaro Teramura
2. 発表標題 Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O as an Electron Donor over Mg-doped SrTiO <sub>3</sub>
3. 学会等名 243rd ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中本嵩市, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 水を電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元におけるSrTiO <sub>3</sub> 光触媒へのMgドーブの効果
3. 学会等名 第131回触媒討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田有輝, 井口翔之, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 Effect of Fe addition to Ag / K <sub>2</sub> YTa <sub>5</sub> O <sub>15</sub> photocatalyst on the conversion of CO <sub>2</sub> using H <sub>2</sub> O as an electron donor
3. 学会等名 OKCAT2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中本嵩市, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> 光還元活性を示すMgドーブSrTiO <sub>3</sub> の調製法の検討
3. 学会等名 第130回触媒討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田有輝, Shuying Wang, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 H <sub>2</sub> Oを電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元におけるAg - Fe助触媒の添加効果
3. 学会等名 第130回触媒討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xuanwen XU, Kentaro TERAMURA, Hiroyuki ASAKURA, Saburo HOSOKAWA, Tsunehiro TANAKA
2. 発表標題 Development of Zinc Hydroxide as an Abundant and Universal Cocatalyst for the Selective Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O
3. 学会等名 The 9 th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCAT9) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中本嵩市, 浪花晋平, 田中庸裕, 寺村謙太郎
2. 発表標題 MgドープSrTiO <sub>3</sub> を用いたH <sub>2</sub> Oを電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元
3. 学会等名 第41回光がかかわる触媒化学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Teramura, Shuying Wang, Soichi Kikkawa, Rui Pang, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka
2. 発表標題 Catalyst Design and Development for Highly Selective Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O as an Electron Donor
3. 学会等名 239th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Teramura, Shuying Wang, Soichi Kikkawa, Rui Pang, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka
2. 発表標題 Artificial Photosynthesis by Heterogenous Photocatalysts -Photocatalytic Reduction of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O as an Electron Donor
3. 学会等名 18th International Conference on Carbon Dioxide Utilization (ICCDU2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Teramura, Shuying Wang, Soichi Kikkawa, Rui Pang, Zeai Huang, Shoji Iguchi, Zheng Wang, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Tsunehiro Tanaka
2. 発表標題 Highly concentrated CO evolution for photo-catalytic conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O as electron donor
3. 学会等名 1st Japan-China Symposium on Catalysis (1stJCSC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xuanwen XU, Kentaro TERAMURA, Hiroyuki ASAKURA, Saburo HOSOKAWA, Tsunehiro TANAKA
2. 発表標題 Development of Zinc Hydroxide as an Abundant and Universal Cocatalyst for the Selective Photocatalytic Conversion of CO <sub>2</sub> by H <sub>2</sub> O
3. 学会等名 第128回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田有輝, Shuying WANG, 寺村謙太郎, 朝倉博行, 細川三郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Ag-Fe助触媒を修飾したAlドープSrTiO <sub>3</sub> によるH <sub>2</sub> Oを電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元
3. 学会等名 第128回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田有輝, Shuying WANG, 寺村謙太郎, 朝倉博行, 細川三郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Ag-Fe助触媒を修飾したAlドープSrTiO <sub>3</sub> によるH <sub>2</sub> Oを電子源とするCO <sub>2</sub> 光還元
3. 学会等名 第129回触媒討論会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 中本嵩市, 寺村謙太郎, 朝倉博行, 田中庸裕
2. 発表標題 MgドーブSrTiO3を用いたH2Oを電子源とするCO2光還元
3. 学会等名 第129回触媒討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------