

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26810104

研究課題名(和文) 高効率な水酸化反応実現のための光触媒表面制御

研究課題名(英文) Surface controlled photocatalyst for realization of high efficient water oxidation

研究代表者

三石 雄悟 (MISEKI, YUGO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター・主任研究員

研究者番号：70645879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽光を利用した水素製造技術の一つである光触媒に着目し、光触媒粒子の形状制御により望まれない副反応を抑制できるか検討した。その結果、反応中に生成するFe(II)の再酸化反応は熱力学的に水の酸化よりも圧倒的に進行しやすく、性能低下の大きな要因の一つであるが、露出結晶面の違いにより、その反応選択性が劇的に変化することを初めて明らかにした。このように、露出する結晶面の精密制御が、高性能な光触媒開発の指針となることを実証した。さらに、新規酸化物光触媒の開発や既存材料を高活性化手法開発にも合わせて取り組んだ結果、有望な材料をいくつか見出すことにも成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the suppression effect for undesirable backward reaction has been evaluated using shape controlled photocatalyst particles. As a result, it was found that the reaction selectivity of water and Fe(II) for photo-generated holes is drastically changed depending on the type of the exposed crystal facets, although the Fe(II) oxidation proceeds preferentially instead of the water oxidation due to thermodynamically advantageous. Thus, it has been demonstrated that the control of particle shape can be an efficient method to design high efficient photocatalysts. Moreover, the developments of novel photocatalysts and high performance technologies have been also conducted. We successfully developed various attractive materials.

研究分野：光機能性材料

キーワード：光触媒 レドックス 水の酸化反応 水素 太陽光エネルギー変換 酸化物半導体

1. 研究開始当初の背景

太陽エネルギーは、その量が膨大なことから次世代エネルギー源として期待されている。エネルギー安定供給の観点より、化学エネルギーへ変換する技術の開発が求められている。その有力な候補として、『太陽光発電—電気分解水素製造』が挙げられるが、水素の製造コストが高く、化石資源に対抗できる製造コスト (30 円/Nm³程度) の達成には大きな技術革新が必要不可欠である。このような背景から、全く別の革新的な低コスト水素製造技術の候補として、無機半導体光触媒を利用した水分解水素製造が研究されている。光触媒による水分解水素製造では、Fe³⁺/Fe²⁺イオンなどの電子伝達剤 (レドックス) を利用し、水分解反応を 2 種類の光触媒反応に分解し、それを組み合わせた 2 段階励起型反応 (Z-スキーム型) で可視光の利用を達成している。この反応では、光触媒粉末を分散させたレドックス水溶液に照射されるだけで水素を製造できる。そのため、低コストかつ簡便・単純なシステムを構築できる可能性がある。しかし、現状の性能は低く高性能触媒の開発が課題である。太陽光を効率よく利用するには、より長波長までの幅広い可視領域を利用可能な光触媒を開発すること、および光生成した電子および正孔の反応への利用効率 (量子収率) を向上させる要素技術を開発することが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、露出結晶面の異なる酸化タングステン (WO₃) 粉末を調製し、露出結晶面の違いが望まれない副反応に与える影響を調べた。さらに、既存材料の量子収率を向上させる要素技術開発や候補材料拡大を目指した新材料の開発に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 露出結晶面の異なる WO₃ の光触媒性能

露出結晶面の制御された WO₃ として、ナノプレート形状の WO₃ 粉末を調製した。30 mL のイオン交換水に、Na₂WO₄·2H₂O (0.5 g) およびシュウ酸 (0.3 g) を溶解し、10 分間攪拌した。その後 pH1 となるように、6M HCl を用いて調整し、さらに 30 分攪拌した。その後 110°C で 24 時間の水熱処理を行った。得られたサンプルは、粉末 X 線回折 (XRD) で結晶構造を確認した後、走査型電子顕微鏡 (SEM) で粒子像を観察した。比較サンプルとして高純度化学製の WO₃ 粉末を用いた。光触媒反応は閉鎖循環型のバッチ式反応装置で行った。光触媒粉末を反応水溶液に懸濁させ、反応評価装置に接続した後に、ロータリーポンプで気相の排気操作を行った。その後、可視光を照射し光触媒反応を行った。生成した酸素はガスクロにより定量した。光源には 300 W Xe

ランプを用い、照射波長は各種カットオフフィルターにより制御した。

(2) PbCrO₄ 光触媒による水の酸化反応

PbCrO₄ は室温での沈澱法により調製した。Pb(NO₃)₂ および (NH₄)₂CrO₄ をそれぞれ 1.6 mmol 別々に溶解させ、均一に溶けた前駆体溶液を一気に混ぜ合わせることで沈澱を得た。その後 900rpm の条件で 1 時間熟成させた後空气中 70°C で乾燥させた。必要に応じて Pt 助触媒を化学還元法で担持した。光触媒反応は (1) と同様の閉鎖循環型のバッチ式反応装置にて行った。

(3) CoO_x/Fe₂O₃ 光触媒を用いた Z スキーム型水分解

Fe₂O₃:Ti, Sr 光触媒は既報 (Y. Miseki, et al, *Chem. Lett.*, 2014, **43**, 1560.) に従い、シュウ酸法により調製した。200 mL ビーカーにイオン交換水 10 mL、シュウ酸 1.0 g、Fe(NO₃)₂·9H₂O 水溶液、SrCl₂ 水溶液、および Ti[O(CH₂)₃CH₃] エタノール-水混合溶液を加え、ホットスターラーを用いて 150°C、300rpm の条件で蒸発乾固させ、前駆体シュウ酸鉄を得た。これを 350°C のマントルヒーターで仮焼成したのち、700°C の電気炉で 5 h 焼成し、Fe₂O₃:Ti, Sr を得た。必要に応じて光電着法で様々な金属イオンを用いた表面処理を行った。光触媒反応は (1) と同様の閉鎖循環型のバッチ式反応装置にて行った。

(4) 酸化鉄と酸化インジウムを複合化させた新規光触媒による水の酸化反応

In₂O₃/Fe₂O₃ は液相法により調製した。In(NO₃)₃ および Fe(NO₃)₃ 水溶液を様々な比率で混合し、ホットスターラーを用いて 150°C 15 分で蒸発乾固させ、前駆体を得た。これを 500°C で仮焼成したのち、空气中 1000°C 10 時間電気炉で焼成することで、In₂O₃/Fe₂O₃ を調製した。光触媒反応は (1) と同様の閉鎖循環型のバッチ式反応装置にて行った。

(5) BiVO₄ の高性能化手法の開発

BiVO₄ 粉末は液固相法により調製した。5 mmol の Bi₂O₃ および V₂O₅ 粉末を、0.7 M の HNO₃ 水溶液 (50mL) に溶液温度を制御しながら懸濁させることで調製した。必要に応じて、調製溶液に様々な金属イオンを添加した。光触媒反応は (1) と同様の閉鎖循環型のバッチ式反応装置にて行った。照射光は L42 カットオフフィルターもしくは BP450 バンドパスフィルターで制御した。生成した Fe²⁺イオンは、フェナントロリン法にて定量した。

4. 研究成果

(1) 露出結晶面の異なる WO₃ の光触媒性能

ナノプレート状 WO_3 粒子(以後 NP- WO_3)を調製できると報告されている手法 (X. Su, et al, *Mater. Lett.*, 2010, **64**, 1232) を参考に、 WO_3 粉末を調製した。Fig. 1 にその SEM 像を示す。このように比較的均質なナノプレート WO_3 が得られ、高純度化学製の市販品 (以後 Com- WO_3) と比べて露出結晶面を精密制御することに成功した。粉末 X 線回折パターンを測定することにより、水の酸化反応に高活性なモノクリニック相の単相で調製されていることを確認した。そこで次に、この露出結晶面の制御が光触媒性能に与える影響について評価した。その結果を Table 1 に示す。 Fe^{3+} のみを含む水溶液からの性能は、Com- WO_3 の方が高かった。さらに反応水溶液へ予め Fe^{2+} を 0.5mM 添加した場合の性能評価を行ったところ、Com- WO_3 では Fe^{2+} 添加により性能が 1/2 程度になったのに対し、NP- WO_3 では 1/5 と大きく低下した。さらにこの NP- WO_3 を様々な温度で熱処理した結果、500°C 程度までの熱処理ではナノプレート構造を維持していたが、700°C での熱処理を行うことで Com- WO_3 と同様に様々な結晶面が露出した粒子へと形状が変化した。その場合の光触媒活性は、粒子形状に強く関連し、700°C で焼成したナノプレート由来の WO_3 粒子の性能は市販品と同程度となった。このことから、露出結晶面の違いが、 Fe^{2+} の再酸化という望まれない逆反応速度に大きく影響し、初期の光触媒性能にも影響していることが明らかとなった。反応中に生成する Fe^{2+} は熱力学的に水よりも圧倒的に酸化されやすい。この熱力学的に不利な状況下であっても露出結晶面の違いにより、その反応の選択性が変化することが明らかとなった。このことから、粒子形状を逆反応が進行しにくい結晶面のみが露出する形状へ

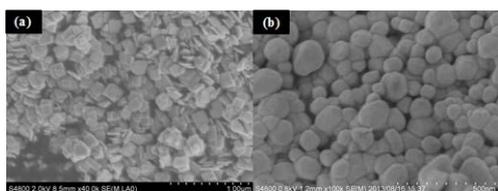


Fig 1. SEM images of (a) NP- WO_3 and (b) Com- WO_3 particles without any thermal treatment

Table 1. Effect of initial Fe^{2+} concentration in reactant solution on photocatalytic O_2 evolution over WO_3

Catalyst	Reactant solution	O_2 evolution rate/ μmolh^{-1}
Com- WO_3	2mM Fe^{3+}	24
Com- WO_3	2mM Fe^{3+} + 0.5mM Fe^{2+}	11
NP- WO_3	2mM Fe^{3+}	5.2
NP- WO_3	2mM Fe^{3+} + 0.5mM Fe^{2+}	1
NP- $\text{WO}_3^{(a)}$	2mM Fe^{3+}	15
NP- $\text{WO}_3^{(a)}$	2mM Fe^{3+} + 0.5mM Fe^{2+}	4
NP- $\text{WO}_3^{(b)}$	2mM Fe^{3+}	20
NP- $\text{WO}_3^{(b)}$	2mM Fe^{3+} + 0.5mM Fe^{2+}	10

Catalyst: 0.4 g, reactant solution: 300 mL, light source: 300 W Xe-arc lamp attached with L42 cut-off filter.

(a): 500C 2h, (b): 700C 2h

と精密制御することができれば、さらに高い性能を実現できることが強く支持された。

(2) PbCrO_4 光触媒による水の酸化反応

混合する $\text{Pb}^{2+}/\text{Cr}^{6+}$ 比率および pH を制御することで、結晶構造の異なるクロム酸鉛複合酸化物を作り分けできると報告されている (J. H. Xiang, et al, *Cryst. Growth Des.*, 2014, **4**, 1311)。Fig. 2 に今回調製した複合酸化物の XRD パターンを示す。報告されている通り、 PbCrO_4 (斜方晶)、 PbCrO_4 (単斜晶)、および Pb_2CrO_5 (単斜晶) の単相が調製できた。Table 2 に今回調製した複合酸化物の水の酸化反応の結果を示す。吸収スペクトルの吸収端より、これら複合酸化物のバンドギャップは 2.1~2.4 eV 程度と見積もられた。硝酸銀水溶液からの酸素生成反応を評価した結果、 PbCrO_4 (斜方晶) および Pb_2CrO_5 (単斜晶) はほとんど活性を示さなかったが、 PbCrO_4 (単斜晶) のみ比較的高い活性を示した。可逆レドックスの一つである IO_3^- 存在下での水の酸化反応を評価した結果、助触媒未担持では、全く活性を示さなかったが、助触媒として Pt を導入した PbCrO_4 (単斜晶) が活性を示した。カットオフフィルターを用いた波長応答性の評価より、540nm までの長波長領域まで利用できることも確かめられた。このように、レドックス媒体を用いた水の酸化反応に 540nm までの幅広い可視光を利用できる数少ない酸化物新材料の開発に成功した。

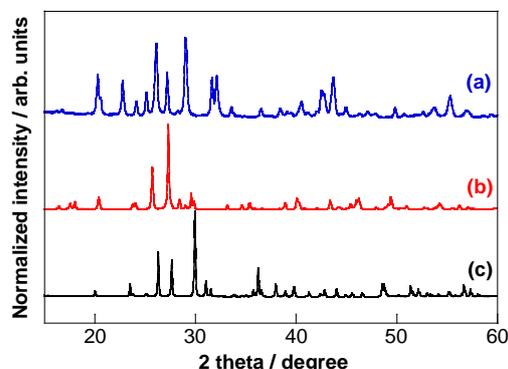


Fig 2. XRD patterns of (a) PbCrO_4 (orthorhombic), (b) PbCrO_4 (monoclinic), and (c) Pb_2CrO_5 (monoclinic).

Table 2. Effect of initial Fe^{2+} concentration in reactant solution on photocatalytic O_2 evolution over WO_3

Catalyst	Band gap / eV	O_2 evolution rate/ μmolh^{-1}	
		AgNO_3	NaIO_3
PbCrO_4 (ortho.)	2.4	1.5	0
PbCrO_4 (mono.)	2.3	26	0
Pb_2CrO_5 (mono.)	2.1	0	0
Pt/ PbCrO_4 (ortho.)	2.4	1.0	0.2
Pt/ PbCrO_4 (mono.)	2.3	58	9.4
Pt/ Pb_2CrO_5 (mono.)	2.1	0	0

Catalyst: 50 mg, reactant solution: 300 mL, light source: 300 W Xe-arc lamp attached with L42 cut-off filter.

(3) コバルトで修飾した Fe_2O_3 光触媒を用いた Z スキーム型水分解系の構築

Fig. 3a に、可視光照射下における $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ および $\text{CoO}_x\text{-Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ の NaIO_3 水溶液からの酸素生成を示す。 $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ に CoO_x を導入することで、 NaIO_3 水溶液からの酸素生成活性が向上した。Fig. 3b に、可視光照射下における $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ および $\text{CoO}_x\text{-Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ の異なる濃度の NaI を含む NaIO_3 水溶液からの酸素生成を示す。 CoO_x 未修飾の $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ では 0.25 mM の NaI を共存させると、 NaI が存在しない場合に比べて活性が 5% 程度まで激減した。一方 CoO_x で修飾した $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ では 36% 程度と、活性が比較的維持された。このことから、 CoO_x は、 I^- が再酸化されて IO_3^- となる逆反応を抑制する効果があると考えられる。また、 NaIO_3 水溶液だけでなく、逆反応の起こらない AgNO_3 犠牲剤水溶液においても CoO_x の導入により酸素生成活性が向上した。このことより、 CoO_x は逆反応の抑制だけでなく酸素生成速度の向上にも効果があるとわかった。Fig. 4 に水素生成用光触媒に $\text{Ru}/\text{SrTiO}_3:\text{Rh}$ 、酸素生成用光触媒に高性能化した $\text{CoO}_x\text{-Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ を用いた Z-scheme 反応の結果を示す。 $\text{Ru}/\text{SrTiO}_3:\text{Rh}$ と組み合わせて、レ

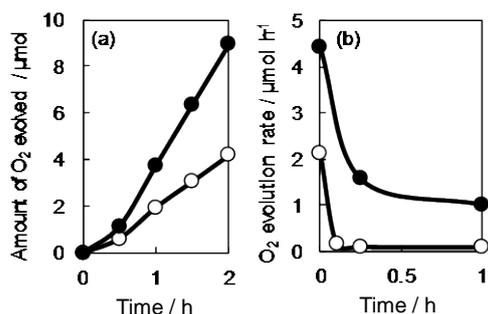


Fig. 3. (a) Time course and (b) NaI concentration dependence of photocatalytic O_2 evolution from aqueous NaIO_3 solutions under visible light irradiation.

●: $\text{CoO}_x\text{-Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ (0.1 g), ○: $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$ (0.1 g), light source: 300 W Xe lamp ($\lambda > 420 \text{ nm}$)

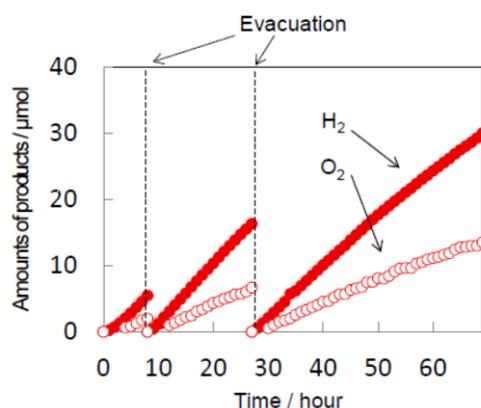


Fig. 4. Overall water splitting into H_2 and O_2 via Z-scheme system. $\text{Ru}/\text{SrTiO}_3:\text{Rh}$: 0.1 g, $\text{CoO}_x\text{-Fe}_2\text{O}_3:\text{Ti}, \text{Sr}$: 0.2 g, reactant solution: aqueous H_2SO_4 solution (300 mL, pH 2.7), light source: 300 W Xe lamp ($\lambda > 420 \text{ nm}$)

ドックスを用いない固体間での Z-scheme 反応を試みたところ、水の完全水分解に成功した。このように、 Fe_2O_3 光触媒を初めて Z-scheme 反応の酸素生成用光触媒として利用することに成功した。

(4) 酸化鉄と酸化インジウムを複合化させた新規光触媒による水の酸化反応

表 1 に In_2O_3 、 Fe_2O_3 、 $\text{In}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{O}_3$ を用いた可視光照射下における AgNO_3 水溶液からの酸素生成活性を示す。1000°C という高温で処理した In_2O_3 および Fe_2O_3 はいずれも単独では酸素生成活性を示さなかった。これに対して、 In と Fe を混合して調製した場合には興味深いことに、比較的高い酸素生成活性が得られた。波長依存性についても調査したところ、照射光波長を $\lambda < 500 \text{ nm}$ の可視光に制限した場合においても酸素生成反応が進行することがわかった。表 1 で用いた各触媒の粉末 X 線回折パターンを図 1 に示す。 In_2O_3 由来のピーク (ca. 30.6°) は高角度側、 Fe_2O_3 由来のピーク (ca. 33.2°) は低角度側にシフトした。このことから、 In_2O_3 に Fe が、 Fe_2O_3 に In がそれぞれ置換していることがわかった。続いて、どちらが活性種かを同定するために、 AgNO_3 水溶液中で光触媒反応を行った後の Ag の析出挙動について、EDX による元素マッピングで評価を行った。その結果、 In_2O_3 粒子が存在する位置に Ag が均等に分布しており、 Ag^+ の還元が In_2O_3 上で起こっていることが示唆された。このことから、活性種は Fe ドープ In_2O_3 であることが分かった。最後に、今回調製し

Table 3. Photocatalytic O_2 evolution over $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$

In:Fe	O_2 evolution rate / $\mu\text{mol h}^{-1}$
1:0 (In_2O_3)	0
91:9	3.2
87:13	7.9
75:25	10
67:33	6.3
0:1 (Fe_2O_3)	0

Catalyst: 0.1 g, reaction solution: 20 mM AgNO_3 (300 mL), light source: 300 W Xe-lamp attached with L42.

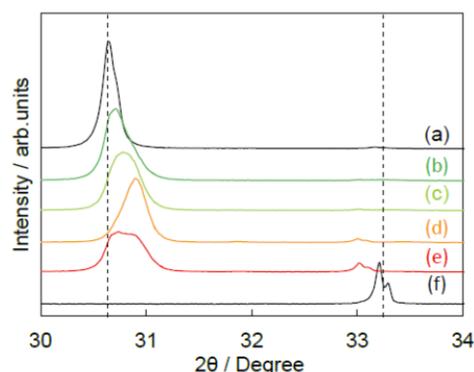


Fig. 5. XRD patterns of $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ complex oxides prepared at 1273K for 10h. $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3 =$ (a) 100:0, (b) 91:9, (c) 87:13, (d) 75:25, (e) 67:33, and (f) 0:100.

た Fe ドープ In_2O_3 を酸素生成用光触媒、水素生成用光触媒に $\text{Ru}/\text{SrTiO}_3:\text{Rh}$ を用いた Z-scheme 型水分解反応を試みた。その結果、図 3 に示す通り、水素、酸素が化学量論的 ($\text{H}_2/\text{O}_2=2$) に生成した。このように、500nm までの長波長領域を利用できる Fe ドープ In_2O_3 が Z-scheme 型水分解反応の酸素生成用光触媒として利用できることを明らかにした。

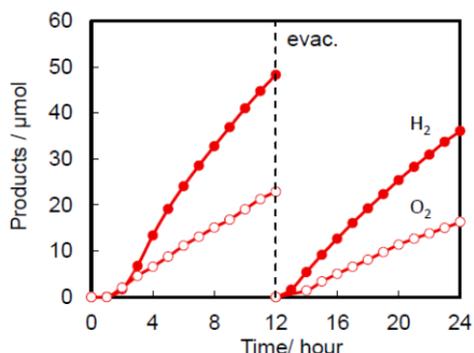


Fig. 6. Overall water splitting into H_2 and O_2 via Z-scheme system. $\text{Ru}/\text{SrTiO}_3:\text{Rh}$: 0.1 g, Fe doped In_2O_3 : 0.2 g, reactant solution: aqueous 2 mM $\text{V}_2(\text{SO}_4)_3$ solution (300 mL, pH 1.7), light source: 300 W Xe lamp ($\lambda > 420$ nm)

(5) BiVO_4 の高性能化手法の開発

従来法では、水の酸化反応に活性な scheelite 型構造の monoclinic 相を得るために長時間の攪拌が必要であった (A. Iwase, et al, *J. Sol. Energy Eng.*, 2010, **132**, 21106.). 今回、調製時の水温を上昇させるだけで 4 時間程度と比較的短時間で monoclinic 相の単相が得られることがわかった。表 1 に様々な条件で調製した BiVO_4 光触媒による Fe^{3+} イオンを含む水溶液からの酸

Table 4. Photocatalytic water oxidation in the presence of $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ aqueous solution under visible light over BiVO_4 with various preparation condition

Preparation condition		additive	activity $/\mu\text{mol h}^{-1}$	QY (%)
Temp.	time			
RT	48 h	—	185	13
80°C	4 h	—	247	17
80°C	4 h	Ga^{3+}	316	21

Catalyst: 0.4 g, reaction solution: 4 mM $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ (300 mL), light source: 300 W Xe-lamp attached with L42 or BP450.

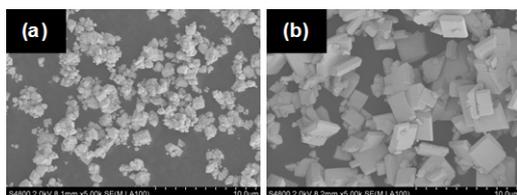


Fig. 7. SEM images of BiVO_4 particles prepared at (a) RT and (b) 80 degree.

素生成活性を示す。調製時の水温を 80°C に上昇させることで、従来法と比べ光触媒性能が大幅に向上することがわかった。SEM で粒子観察を行ったところ、従来法の粒子の粒径は 1 μm 程度であったのに対し、80°C で調製した BiVO_4 は 10 μm 程度と非常に大きく粒成長していた (図 1)。更なる性能向上を目指し、調製時の水溶液中に様々な金属イオンを共存させて BiVO_4 を調製し、その光触媒性能を評価した。その結果、調製時に Ga イオンを少量共存させた場合、さらに大幅に性能が向上することがわかった。450nm の単色光照射下での量子収率を測定した結果、21% と比較的高い量子収率が得られた。このように、異種元素共存下で調製することにより、 BiVO_4 光触媒を大幅に高性能化することに成功した。

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 1 件)

Y. Miseki, K. Sayama, Photocatalytic water oxidation over PbCrO_4 with 2.3 eV band gap in IO_3^-/I^- redox mediator under visible light, *RSC Adv.*, 査読有, **5**, (2015), 1452-1455. DOI: 10.1039/c4ra13049a.

[学会発表] (計 14 件)

(1) 藤田佳那, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 複合光触媒による可逆レドックスを用いた可視光照射下での水の酸化反応, 日本化学会 第 96 春季年会 (2016), 2016/03/25, 同志社大学 京田辺キャンパス.

(2) 寺島直宏, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, Fe^{3+} レドックスイオンを用いた TiO_2 光触媒による水の酸化反応に対する光量依存性, 日本化学会 第 96 春季年会 (2016), 2016/03/25, 同志社大学 京田辺キャンパス.

(3) Y. Miseki, K. Sayama., Photocatalytic water oxidation over PbCrO_4 with 2.3 eV band gap in IO_3^-/I^- redox mediator under visible light, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, 2015/12/19, Honolulu, America.

(4) 藤田佳那, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 複合光触媒による可視光照射下での水の酸化反応, 第 22 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 2015/12/04, 東京理科大学 野田キャンパス.

(5) 寺島直宏, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, 光触媒を利用した水の酸化反応の光量依存性と鉄の特異吸着の関係, 第 22 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 2015/12/04, 東京理科大学 野田キャンパス.

(6) 三石雄悟, 佐山和弘, 水の酸化反応に活性な BiVO_4 への元素置換効果, 第 116 回 触

媒討論会, 2015/09/16, 三重大学.

(7) 藤田佳那, 福康二郎, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, Fe系複合酸化物光触媒による可視光照射下での水の酸化反応, 第116回触媒討論会, 2015/09/16, 三重大学.

(8) 藤田佳那, 間島悠, 福康二郎, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, 表面修飾した Fe_2O_3 光触媒による可視光照射下での水の酸化反応, 日本化学会 第95春季年会 (2015), 2015/03/27, 日本大学 理工学部船橋キャンパス.

(9) 藤田佳那, 三石雄悟, 郡司天博, 佐山和弘, $In_2O_3-Fe_2O_3$ 複合光触媒による可視光照射下での水の酸化反応, 第22回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 2015/12/04, 東京理科大学 野田キャンパス.

(10) K. Fujita, Y. Majima, Y. Miseki, T. Gunji, K. Sayama, Water oxidation over surface-modified Fe_2O_3 photocatalyst under visible light, First International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis, 2015/09/03, Noda city, Tokyo University of Science.

(11) Y. Miseki, K. Sayama., Water oxidation accompanied with IO_3^- reduction over $PbCrO_4$ photocatalyst, 2014/12/10, 第24回日本MRS年次大会, 横浜.

(12) 三石雄悟, 佐山和弘, $PbCrO_4$ 光触媒によるヨウ素酸イオン存在下での酸素生成反応, 第114回触媒討論会, 2014/09/27, 広島大学 東広島キャンパス.

(13) Y. Miseki, K. Fuku, T. Funaki, H. Kusama, N. Onozawa, Y. Konishi, O. Kitao, K. Sayama., Spatial separation of reduction and oxidation reaction sites on WO_3 particle, 20th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, 2014/07/29, Berlin, Germany.

(14) 三石雄悟, 間島悠, 郡司天博, 佐山和弘, 600nmまで応答可能な光触媒を用いたヨウ素酸イオン存在下での水の酸化反応, 第33回光がかかわる触媒化学シンポジウム, 2014/07/18, 東京理科大学 葛飾キャンパス.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 特徴的な吸収バンドを有する半導体光触媒およびその製造方法

発明者: 三石雄悟, 佐山和弘

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2015-23338

出願年月日: 2015年11月30日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三石 雄悟 (MISEKI YUGO)

産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター・主任研究員

研究者番号: 70645879

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: