

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05669

研究課題名（和文）H<sub>2</sub>O分解反応に作用する光触媒の機能解明とそれに基づく可視光応答光触媒の開発研究課題名（英文）Development of photocatalyst working under visible light based on the elucidation of the photocatalytic properties to the overall H<sub>2</sub>O splitting

研究代表者

酒多 喜久 (Sakata, Yoshihisa)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：40211263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：H<sub>2</sub>O分解反応に実用化レベルで作用できる光触媒の開発を目的として、SrTiO<sub>3</sub>光触媒のこの反応に対する光触媒特性の向上要因の解明を行った。光触媒を高純度原料で合成しNaイオンのような低原子価の金属イオンをドーピングして有効な水素生成反応助触媒を担持することで光触媒活性が目覚ましく向上すること、酸素生成反応助触媒の共担持により更に活性と寿命が向上した。特に、光触媒粒子の露出結晶面を調製条件制御により制御し、そこにそれぞれの助触媒を効率よく担持した光触媒を用いると吸収光子をすべて光触媒反応に利用できることを見出した。これらの特性向上要件を他のH<sub>2</sub>O分解反応が可能な光触媒への適用を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光触媒によるH<sub>2</sub>O分解反応は光エネルギーを用いてH<sub>2</sub>を直接H<sub>2</sub>Oから生成させる重要な光触媒反応であるが、光触媒自身の活性は低く、この反応の実用化を視野に入れた場合、光触媒活性向上とその要因の解明は必須である。本研究は、SrTiO<sub>3</sub>光触媒について、そのバルクや表面を修飾して、光触媒反応過程を制御することで、この反応に対して実用化レベルの高い光触媒活性を発現させることに成功し、その活性向上メカニズムを解明した。さらに、得られた知見に基づいて、別の光触媒についてH<sub>2</sub>O分解反応に対する高活性化を実現した。これらの成果は太陽光と光触媒によるH<sub>2</sub>OからH<sub>2</sub>を製造するプロセス開発に関して重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：The elucidation of the factors for the improvement of the photocatalytic performance to the overall H<sub>2</sub>O splitting was performed on SrTiO<sub>3</sub> photocatalysts to develop the photocatalysts acted to the photocatalytic reaction at the practical level. The photocatalytic activity improved remarkably with using the low valent cation, such as Na ion, doped SrTiO<sub>3</sub> prepared with using high purity low materials with loading effective co-catalyst for hydrogen production reaction. The photocatalytic activity and the life further improved by co-loading a co-catalyst for oxygen production reaction. Particularly, applying the photocatalyst that controlling the surface crystal facets and effective loading the co-catalysts to the reaction, the photocatalytic reaction proceeded with utilizing the almost all adsorbed photon. These factors for the improvement of the photocatalytic property were investigated to adopt to the other photocatalysts.

研究分野：触媒化学

キーワード：光触媒 H<sub>2</sub>O 分解反応 高活性化 SrTiO<sub>3</sub> 金属イオンドーピング 助触媒 表面制御 水素製造

### 1. 研究開始当初の背景

半導体光触媒による  $H_2O$  分解反応は、光照射により触媒中に生成した電子と正孔が直接  $H_2O$  を還元・酸化して  $H_2$ 、 $O_2$  を生成する基本的な光触媒反応である。さらに、 $H_2O$  分解反応は、常温常圧下では非自発過程の反応であり、この条件で光触媒を用いて反応が進行すれば光エネルギーを化学エネルギーへ直接変換できる魅力ある化学反応システムを構築できる。近年のエネルギー・環境問題を背景に、この反応が人工光合成の中核を担う反応として注目され、この反応に有効に作用できる光触媒の開発に関する研究が精力的に行われている。これらの中で、半導体光触媒は有望な光触媒である。しかし、開発された光触媒の光触媒活性や光応答性は太陽エネルギーを有効に変換するという観点からは不十分であり、この反応を太陽光下で有効に進行させることの出来る光触媒の開発が期待されている。これらの研究の中で  $H_2O$  分解反応に対する光触媒活性について、紫外線照射下ではあるが酸化物半導体光触媒に関して目覚ましい発展が見られた。特に、太陽光に含まれる近紫外光照射下でも  $H_2O$  分解反応を進行させることが出来る  $SrTiO_3$  について、アルカリ金属イオンや  $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Ga^{3+}$ 、 $In^{3+}$  イオンのような、 $Sr^{2+}$  イオンまたは  $Ti^{4+}$  イオンと置換可能な低原子価のイオンをドーピングすることで、光触媒活性は著しく向上し、さらに、 $Al^{3+}$  イオンをフラックス法でドーピングした  $SrTiO_3$  を光触媒とすると、 $H_2O$  分解反応に対して波長 360 nm の単色光照射下での見かけの量子収率が 55%、太陽エネルギー変換効率も 0.5% を示し、植物光合成と同程度の太陽エネルギー変換効率を示す光触媒となることが報告された。このような太陽光照射下でも用いることの出来る光触媒が開発されたことにより、この光触媒を用いて実際に太陽光照射下で  $H_2O$  から  $H_2$  を生成させるモデルシステムの構築が可能となった。

一方、光触媒を用いた太陽エネルギー変換の実用化を考慮した場合、さらに 10 倍程度の太陽エネルギー変換効率が必要になり、高活性で  $H_2O$  分解可能な可視光応答性光触媒開発を目的とした研究が進められている。ここでは、金属窒化物・酸窒化物、硫化物のような可視光に反応できる化合物半導体や植物光合成を模倣し 2 種類の化合物半導体を組み合わせたシステム、さらに、金属イオンをドーピングして禁制帯のエネルギーを制御した光触媒の開発が検討されているが、実用化レベルの超高活性光触媒の開発には至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究は光触媒による  $H_2O$  分解反応を通して太陽エネルギーを有効に化学エネルギーへ変換可能な光触媒の開発にある。この目標の下、本研究では、高活性化が実現した酸化物光触媒について、その高活性発現要因を光照射により光触媒バルク内に生成した電子・正孔キャリアの挙動を反応速度論的および分光学的に解明し、解明した知見に基づいて、他の酸化物光触媒で高活性化因子の付与法について調製法、修飾法について検討する。次に、可視光応答性の窒化物、硫化物、酸窒化物半導体や金属イオンドーピング型酸化物半導体について、酸化物光触媒と同様に  $H_2O$  分解反応に対する光触媒活性発現要件と高活性化を実現するための条件を検討する。これらの検討結果から得られた知見に基づいて  $H_2O$  分解反応に高活性を示す光触媒の調製要件の解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

光触媒の混合酸化物および金属イオンドーピング混合酸化物は、錯体重合法、固相法により所定温度で焼成して調製した。フラックス法による光触媒調製は、調製した混合酸化物、ドーパントの酸化物と十分な量のフラックス剤であるアルカリまたはアルカリ土類塩化物を均一に混合して所定温度で行った。調製された光触媒は水素生成反応 (HER) 助触媒  $Rh_yCr_{2-y}O_3$ 、または HER 助触媒と酸素生成反応 (OER) 助触媒  $CoO_x$  を共担持した後、光触媒反応に用いた。光触媒による水分分解反応は、通常、一定容積の閉鎖循環系に取り付けた内部照射型石英製反応管、光源には 450 W 高圧水銀灯を用い、反応管内で光触媒をよく脱気した水に懸濁し光照射を行った。生成した気体はガスクロマトグラフで分析した。光触媒活性は 1 時間当たりの  $H_2$ 、 $O_2$  の生成速度で示す。水分分解反応の見かけの量子収率 (AQY) は、上方照射型反応管を用い、バンドパスフィルターを用いて所定の波長の単色光を照射して光触媒による水分分解反応を行い、水素生成活性から反応に利用された光子数を、さらに同条件で照射光強度をシリコンダイオード検知器により計測して照射光子量を求め、照射光子数に対する光触媒反応に利用された光子数の割合から算出した。光触媒のキャラクタリゼーションは、X 線回折、UV-Vis 拡散反射スペクトル、SEM、TEM-EDS、ラマン分光法、過渡吸収スペクトルにより行った。

### 4. 研究成果

(1)  $H_2O$  分解反応に高い活性を示す金属イオンドーピング  $SrTiO_3$  (M- $SrTiO_3$ ) 光触媒の調製法・調製条件の検討を、Na イオンをドーパントとした Na イオンドーピング  $SrTiO_3$  (Na- $SrTiO_3$ ) 光触媒を例にして検討した<sup>1</sup>。これまで含浸法により、M- $SrTiO_3$  光触媒を調製した場合<sup>2</sup>、用いる  $SrTiO_3$  の

種類により、調製された光触媒の活性が著しく変化した。そこで、調製法、調製条件を変化させて調製した Na-SrTiO<sub>3</sub> を光触媒として用いその光触媒活性への影響を検討した。先ず、調製法の影響について検討した。その結果、錯体重合法を用い最適調製条件で調製した Na-SrTiO<sub>3</sub> の光触媒活性は H<sub>2</sub> が 28 mmol/h, O<sub>2</sub> が 14 mmol/h であった。一方、固相法を用いて最適調製条件で調製した Na-SrTiO<sub>3</sub> は原料の TiO<sub>2</sub> の純度に依存した。その結果を図 1 に示す。低純度の TiO<sub>2</sub> を原料とした場合、光触媒活性は低く、高純度の TiO<sub>2</sub> を原料とした光触媒、活性が高いことが判った。最も光触媒活性が高かった純度 99.99% の TiO<sub>2</sub> を用いて調製した Na-SrTiO<sub>3</sub> の光触媒活性は H<sub>2</sub> が 45.5 mmol/h, O<sub>2</sub> が 22.8 mmol/h で 365 nm 単色光照射時の AQY は 33.7% を示した。XRD や SEM の結果より、調製法や条件の相違による Na-SrTiO<sub>3</sub> の結晶の状態や粒子形態には大きな変化が見られなかった。これらの結果より、光触媒調製時の原材料の純度が金属イオンドープ SrTiO<sub>3</sub> 光触媒の H<sub>2</sub>O 分解反応活性に大きく影響することが判明した。

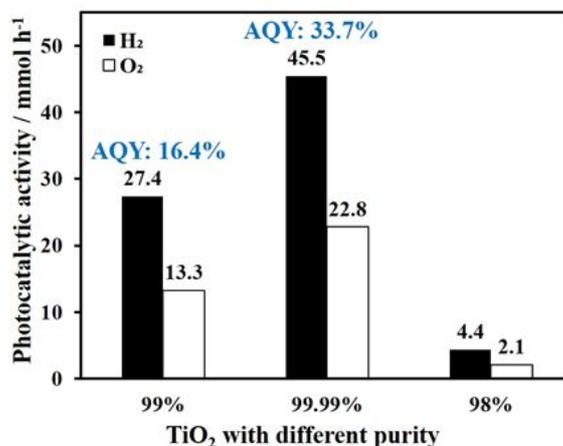


図 1、各種純度の TiO<sub>2</sub> を原料として調製した Na-SrTiO<sub>3</sub> の H<sub>2</sub>O 分解反応活性

(2)の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する光触媒特性への OER 助触媒 CoO<sub>x</sub> 共担持効果を検討した。その結果、CoO<sub>x</sub> を更に光電着法で最適 (0.05 wt%) 共担持した Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub>/Na-SrTiO<sub>3</sub>/CoO<sub>x</sub> 光触媒を用いると光触媒活性は 1.2 倍程度向上し、更に、Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub>/Na-SrTiO<sub>3</sub> を光触媒とすると Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> 助触媒の酸化劣化に伴い光触媒反応時間が数時間で活性が劣化し始めるのに対して、CoO<sub>x</sub> を共担持した光触媒は劣化がほとんど起こらず、50 時間以上の長時間定常的に H<sub>2</sub>O 分解反応を進行させることが出来ることを確認した。CoO<sub>x</sub> の担持量を増加させると活性は担持量増加に伴って徐々に低下したが、光触媒の寿命には影響しなかった。これらの結果から、OER 助触媒 CoO<sub>x</sub> の共担持は OER 活性点を形成させることで、HER 助触媒である Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> 助触媒の酸化劣化を抑制でき、その結果、光触媒活性の向上のみならず、光触媒の寿命を著しく改善することが判明した。

(3)金属イオンドープによる SrTiO<sub>3</sub> 光触媒の状態と H<sub>2</sub>O 分解反応に対する活性向上の機構を Na-SrTiO<sub>3</sub> を例にして検討した。ここでは、XRD 測定、Raman 分光測定による Na イオンのドーピングが SrTiO<sub>3</sub> の結晶状態に与える影響について、更に、過渡吸収スペクトルを測定して、励起電子の反応挙動を検討した<sup>3</sup>。XRD の検討結果から、Na イオンドーピングにより SrTiO<sub>3</sub> の結晶は多少歪むが形態には大きな影響がないことが確認され、Na-SrTiO<sub>3</sub> のラマンスペクトルから、結晶格子に酸素欠陥が生じたときに出現するラマンバンドが観測され、Na イオンのドーピングにより酸素欠陥が生じたことが確認された。過渡吸収スペクトルの測定結果から、Na イオンドープにより、SrTiO<sub>3</sub> の禁制帯にプロトンの還元反応に関与できる励起電子をトラップできる準位が形成されることが確認された。これらを総合して、Na イオンのドーピングが SrTiO<sub>3</sub> の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する光触媒特性に与える影響と Na イオンドープによる活性向上メカニズムを纏めると図 2 のようになる。

SrTiO<sub>3</sub> に Na イオンをドーピングすることで、結晶中に酸素空孔が生じる。それに伴って、禁制帯中に、プロトンの還元反応に関与できる励起電子をトラップするトラップ準位が出現する。このことにより、光照射により生成した電子と正孔の電荷分離

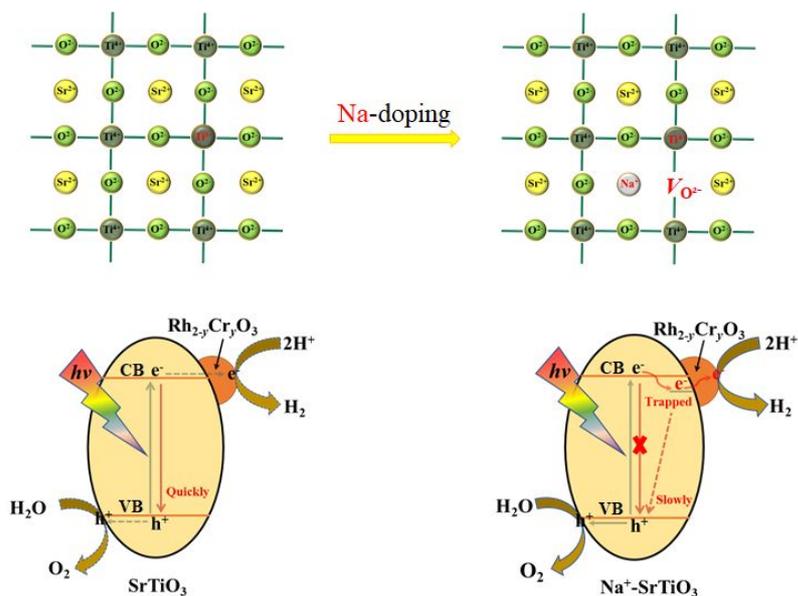


図 2、Na イオンドープの SrTiO<sub>3</sub> の状態への影響と H<sub>2</sub>O 分解反応向上機構の模式図

が促進される。その結果、 $H_2O$  分解反応の活性を向上させることが判明した。

(4) フラックス法で調製した  $Al-SrTiO_3$  光触媒の  $H_2O$  分解反応特性を検討した<sup>4</sup>。光触媒は高純度の  $SrTiO_3$  (99.9%) と  $Al_2O_3$  粉末の混合物とフラックス剤として  $SrCl_2$  を用いて、フラックス法により調製すると、粒子径が数百 nm で、数種類の結晶面が露出した  $Al-SrTiO_3$  が調製出来ることを見出された。この表面上に光電着法により HER 助触媒である  $Rh-Cr_2O_3$  と OER 助触媒である  $CoO_x$  を逐次担持して、 $H_2O$  分解反応に用いた。この光触媒を用いた時の単色光照射下での  $H_2O$  分解反応活性を測定し、見かけの量子収率(AQY)により評価した。その結果、光触媒の光吸収が飽和する波長が 360 nm より短波長の単色光を照射すると AQY がほぼ一定となり、その値が 90% を超えることが観測された。キャラクタリゼーションの結果、HER、OER 助触媒が別々の結晶面に担持され、HER 活性点と OER 活性点が効率的に分離されていることが判明した。この結果から、光触媒が吸収した光子で生成した電子と正孔がほぼ 100% 光触媒反応に使われていることが判明した。この知見より、光触媒による  $H_2O$  分解反応の活性を向上させる新たな因子に、界面の露出結晶面の制御と HER、OER それぞれの助触媒の担持の制御があることが判明した。

(5)  $H_2O$  分解反応に高活性を発現させる要件を Mg イオンドープ  $SrTiO_3$  光触媒の調製法・条件の検討と検証で行った。その結果、Mg イオンをドープすると Na イオンが Sr サイトにドープと同様に、Mg イオンは  $SrTiO_3$  の Ti サイトにドープされて酸素空孔を結晶内に生じさせて光触媒活性を向上させること、高純度の原料を用いて固相法で調製すると有効な光触媒が調製出来ることを確認した。そこで、 $Rh_{0.7}Cr_{1.3}O_3$  を助触媒として錯体重合法、固相法、フラックス法で調製した Mg- $SrTiO_3$  の  $H_2O$  分解反応に対する光触媒活性を比較したところ、フラックス法で調製した Mg- $SrTiO_3$  の光触媒活性が最も高く、450W 高圧水銀灯照射下、内部照射型反応管を用いた  $H_2O$  分解反応の検討での光触媒活性は  $H_2$ :60 mmol/h,  $O_2$ :30 mmol/h となり固相法で調製した Mg- $SrTiO_3$  の 3 倍、錯体重合法で調製した Mg- $SrTiO_3$  の 6 倍の活性を示した。そこで、フラックス法で調製した Mg- $SrTiO_3$  に注目して、助触媒の担持条件と光触媒活性の関係を検討した。その結果を図 3 に示す。フラックス法では固相法で調製した  $SrTiO_3$  と所定量の MgO を均一に混合し、 $SrCl_2$  をフラックス剤として 1000 °C 以上で焼成して調製した。調製された光触媒は  $Al-SrTiO_3$  と同様、粒子径が数 100 nm で、数種類の結晶面が露出した単結晶粒子であった。図 3 は、(a)HER 助触媒  $Rh_yCr_{2-y}O_3$  の担持と方法と OER 助触媒  $CoO_x$  の共担持とその時の  $H_2O$  分解反応活性の関係を 365 nm 単色光照射時の見かけの量子収率(AQY)で示した結果、および(b) HER、OER 助触媒の最適量を光電着法で逐次担持した Mg- $SrTiO_3$  光触媒の各波長の光照射での  $H_2O$  分解反応の AQY と光触媒の UV 拡散反射スペクトルを同次元で示した結果である。図 3(a)より、この光触媒の  $H_2O$  分解反応に対する見かけの量子収率(AQY)は HER 助触媒の担持法および OER 助触媒の共担時の有無で見かけの量子収率は変化した。ここでは OER 助触媒を共担持により AQY は向上し、更に、HER 助触媒も光電着法で担持すると AQY は 90% 近くとなる。この結果から、フラックス法で調製した  $Al-SrTiO_3$  光触媒と同様、HER、OER 助触媒を光触媒表面に有効に共担持することで、光触媒表面上の HER、OER 反応場が有効に分離し、 $H_2O$  分解反応が非常に高い量子収率で進行することが判る。図 3(b)より、AQY は光触媒の光吸収強度に伴い増加して、光吸収が飽和する波長 360 nm よりも短波長の光照射により AQY は 90% を超え、 $Al-SrTiO_3$  と同様に吸収した光をほぼ 100% 利用して  $H_2O$  分解反応を進行出来る光触媒になることが判る。

これらの結果より、 $SrTiO_3$  光触媒において、 $H_2O$  分解反応の光触媒活性を大幅に向上させるためには、金属イオンドープによるバルクの修飾で、光照射により生成した電子と正孔の分離能の向上と有効な HER 助触媒および OER 助触媒の共担持が必要であり、更に、光触媒表面を制御して、HER、OER それぞれに有効な結晶面を露出させ、そこに有効に助触媒

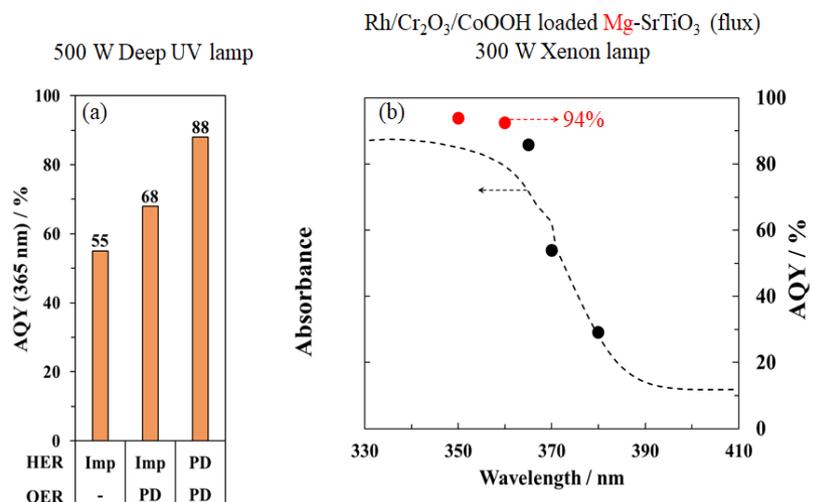


図 3 フラックス法で調製した Mg- $SrTiO_3$  光触媒による  $H_2O$  分解反応; (a) HER 助触媒  $Rh_yCr_{2-y}O_3$  の担持と方法と OER 助触媒  $CoO_x$  の共担持とその時の  $H_2O$  分解反応活性の関係 (365 nm 単色光照射時の見かけの量子収率 (AQY))、(b) HER、OER 助触媒を光電着法で逐次担持した光触媒の各波長での AQY と光触媒の UV 拡散反射スペクトル

を担持することで H<sub>2</sub>O 分解反応に究極の効率を示す光触媒となることが判明した。

(6) SrTiO<sub>3</sub> の高活性化条件に基づいて BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 光触媒の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する光触媒活性・特性の向上に関しての検討を行った<sup>5</sup>。Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> 助触媒を担持した BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> を光触媒として、H<sub>2</sub>O 分解反応を行ったところ、反応初期は比較的高い活性で H<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> が化学量論比で生成したが、時間とともに生成量が減少し、2 時間程度で失活した。これは、この光触媒の光照射で生成した正孔の反応性が高いため、Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> 助触媒の酸化劣化速度が速いことを示している。そこで、金属イオンドープ SrTiO<sub>3</sub> 光触媒に倣い、OER 助触媒 CoO<sub>x</sub> の共担持を行った。その結果、含浸法で CoO<sub>x</sub> を共担持した Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub>/BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/CoO<sub>x</sub> を光触媒として H<sub>2</sub>O 分解反応を行った時、活性の向上のみならず、光触媒の寿命が大幅に改善され、30 時間以上の定常的な光触媒反応が観測された。そこで、H<sub>2</sub>O 分解反応に対する BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 光触媒の調製法の検討を HER 助触媒 Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> と OER 助触媒 CoO<sub>x</sub> を共担持した光触媒で検討した。その結果を図 4 に示す。図 4 には、HER 助触媒 Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> を担持した錯体重合法、固相法で調製した BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> に含浸法で CoO<sub>x</sub> を共担持した光触媒と HER 助触媒を担持した固相法で調製した BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> に光電着法で CoO<sub>x</sub> 助触媒を担持した光触媒の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する光触媒活性を示す。図 4 の結果より、この光触媒は含浸法で調製するよりも固相法で調製する方が有効であることが判る。XRD 測定の結果から BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> の結晶自身の状態の相違は観測できないが、SEM による形態観測の結果より、錯体重合法で調製した BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 結晶の粒子径は数十 nm であるのに対して固相法で調製したものは数百 nm である。結晶粒子の形態の相違が光触媒活性に大きく影響していることが判った。更に、共担持する OER 助触媒 CoO<sub>x</sub> は含浸法よりも光電着法で担持する方が有効であることが判る。この時、光触媒活性も大きく向上する。最適条件の光触媒の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する波長 313 nm 単色光照射時の見かけの量子収率 (AQY) は 41% であった。この結果は、他の光触媒でも金属イオンドープ SrTiO<sub>3</sub> 光触媒に基づくことで H<sub>2</sub>O 分解反応に対して AQY が数十% を示す光触媒となりえることを示している。

同様な取り組みを H<sub>2</sub>O 分解反応に活性を示す La<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、Na<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub>、Sr<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、等の酸化物光触媒で検討を行っている。

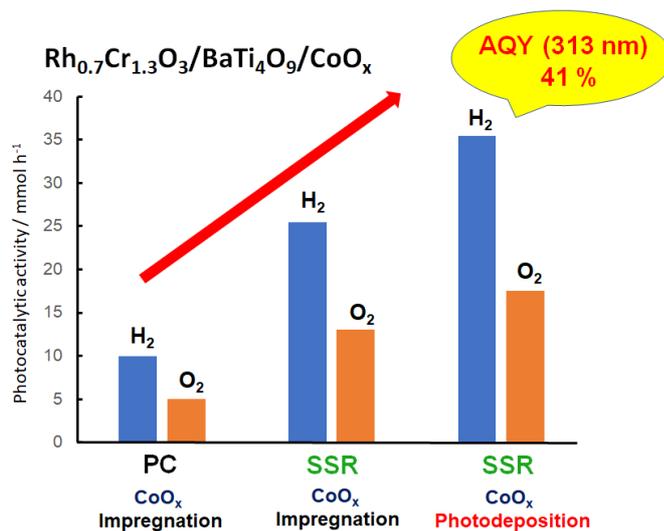


図 4、Rh<sub>0.7</sub>Cr<sub>1.3</sub>O<sub>3</sub> 助触媒を担持した錯体重合法、固相法で調製した BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> に CoO<sub>x</sub> を担持した光触媒の H<sub>2</sub>O 分解反応に対する光触媒活性

#### 参考文献

1. J. Jiang, K. Kato, H. Fujimori, A. Yamakata, Y. Sakata, *J. Catal.*, **390**, 81-89 (2020)
2. Y. Sakata, Y. Miyoshi, T. Maeda, K. Ishikiriya, Y. Yamazaki, H. Imamura, Y. Ham, T. Hisatomi, J. Kubota, A. Yamakata, K. Domen, *Appl. Catal. A*, **521** 227-232 (2016)
3. K. Kato, J. Jiang, Y. Sakata, A. Yamakata, *ChemCatChem*, **11**, 6349-6354 (2019)
4. T. Takata, J. Jiang, Y. Sakata, M. Nakabayashi, N. Shibata, V. Nandal, K. Seki, T. Hisatomi, K. Domen, *Nature*, **581**, 411-414 (2020)
5. Y. Hiramachi, H. Fujimori, A. Yamakata, Y. Sakata, *ChemCatChem*, **11**, 6213-6217 (2019)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kurikawa Yuya, Togo Masahiro, Murata Michihisa, Matsuda Yasuaki, Sakata Yoshihisa, Kobayashi Hisayoshi, Higashimoto Shinya	4. 巻 10
2. 論文標題 Mechanistic Insights into Visible Light-Induced Direct Hydroxylation of Benzene to Phenol with Air and Water over Pt-Modified WO <sub>3</sub> Photocatalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysts	6. 最初と最後の頁 557 ~ 557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/catal10050557	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 Takata Tsuyoshi, Jiang Junzhe, Sakata Yoshihisa, Nakabayashi Mamiko, Shibata Naoya, Nandal Vikas, Seki Kazuhiko, Hisatomi Takashi, Domen Kazunari	4. 巻 581
2. 論文標題 Photocatalytic water splitting with a quantum efficiency of almost unity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 411 ~ 414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2278-9	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 Jiang Junzhe, Kato Kosaku, Fujimori Hirotaka, Yamakata Akira, Sakata Yoshihisa	4. 巻 390
2. 論文標題 Investigation on the highly active SrTiO <sub>3</sub> photocatalyst toward overall H <sub>2</sub> O splitting by doping Na ion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 81 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2020.07.025	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 Yamakata Akira, Vequizo Junie Jhon M., Ogawa Takafumi, Kato Kosaku, Tsuboi Shoya, Furutani Naohiro, Ohtsuka Masahiro, Muto Shunsuke, Kuwabara Akihito, Sakata Yoshihisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Core-Shell Double Doping of Zn and Ca on -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Photocatalysts for Remarkable Water Splitting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 1911 ~ 1919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.0c05104	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 Hiramachi Yuichi、Fujimori Hiroataka、Yamakata Akira、Sakata Yoshihisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Achievement of High Photocatalytic Performance to BaTi409 Toward Overall H2O Splitting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 6213 ~ 6217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.201901564	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 Kato Kosaku、Jiang Junzhe、Sakata Yoshihisa、Yamakata Akira	4. 巻 11
2. 論文標題 Effect of Na Doping on Electron Decay Kinetics in SrTiO3 Photocatalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 6349 ~ 6354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.201901669	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 Matoba Kuniaki、Matsuda Yasuaki、Takahashi Masanari、Sakata Yoshihisa、Zhang Jinlong、Higashimoto Shinya	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication of Pt/In2S3/CuInS2 thin film as stable photoelectrode for water splitting under solar light irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2020.01.015	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20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 海野優樹・山方啓・酒多喜久
2. 発表標題 H2O分解反応に対するNa2Ti6O13の光触媒特性
3. 学会等名 第126回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒多喜久
2. 発表標題 H <sub>2</sub> O分解反応に高効率で作用できる酸化物光触媒の開発
3. 学会等名 第11回触媒科学研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 海野優樹・山方啓・酒多喜久
2. 発表標題 トンネル構造を有する酸化物Na <sub>2</sub> Ti <sub>6</sub> O <sub>13</sub> のH <sub>2</sub> O分解反応に対する光触媒特性
3. 学会等名 第39回光がかかわる触媒化学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古谷直大・山方啓・酒多喜久
2. 発表標題 Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 光触媒のバルクの状態がその光触媒特性に与える影響
3. 学会等名 第39回光がかかわる触媒化学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 海野優樹・山方啓・酒多喜久
2. 発表標題 トンネル構造を有するNa <sub>2</sub> Ti <sub>6</sub> O <sub>13</sub> のH <sub>2</sub> O分解反応に対する光触媒活性
3. 学会等名 第127回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古谷直大・山方啓・酒多喜久
2. 発表標題 Ga203の結晶相転移がその光触媒特性に与える影響
3. 学会等名 第127回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiang Junzhe, 酒多喜久
2. 発表標題 Preparation of high active SrTiO3 to photocatalytic overall H2O splitting by doping Na ion
3. 学会等名 第38回光がかかわる触媒化学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平町雄一、酒多喜久
2. 発表標題 H2O分解反応に高活性を示すBaTi409光触媒の検討
3. 学会等名 第38回光がかかわる触媒化学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡壁昂也、酒多喜久
2. 発表標題 錯体重合法で調製したLa2Ti207のH2O分解反応に対する光触媒特性
3. 学会等名 第38回光がかかわる触媒化学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Hiramachi, Hirotaka Fujimori, Masaaki Yoshida, Akira Yamakata, Yoshihisa Sakata
2. 発表標題 Improvement of the photocatalytic property of BaTi409 to the overall H2O splitting
3. 学会等名 APCAT-8 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junzhe Jiang, Hirotaka Fujimori, Akira Yamakata, Yoshihisa Sakata
2. 発表標題 Preparation of high active SrTiO3 to photocatalytic overall H2O splitting by doping Na ion
3. 学会等名 APCAT-8 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junzhe Jiang, Hirotaka Fujimori, Akira Yamakata, Yoshihisa Sakata
2. 発表標題 Preparation of high active SrTiO3 to photocatalytic overall H2O splitting by doping Na ion
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平町雄一、酒多喜久
2. 発表標題 BaTi409光触媒によるH2O分解反応に対して高活性化を目指した検討
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡壁昂也、山川創太、酒多喜久
2. 発表標題 H <sub>2</sub> O分解反応に有効に作用できるLn-Ti混合酸化物光触媒の調製
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳瀬光佑、酒多喜久
2. 発表標題 トリアジン、ピリミジン誘導体で修飾して合成した窒化炭素の光触媒特性
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康作, 姜君哲、酒多喜久、山方啓
2. 発表標題 不純物をドーブしたチタン酸ストロンチウムの過渡吸収測定
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junzhe Jiang, Hirotaka Fujimori, Yoshihisa Sakata, Akira Yamakata
2. 発表標題 Preparation of High Active SrTiO <sub>3</sub> for overall H <sub>2</sub> O splitting by doping Na ion
3. 学会等名 第20回MRSJ山口支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junzhe Jiang, Hiroataka Fujimori, Akira Yamakata, Yoshihisa Sakata
2. 発表標題 Investigation on the action of doped Na <sup>+</sup> in SrTiO <sub>3</sub> for the improvement of photocatalytic overall water splitting
3. 学会等名 第125回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 海野優樹、平町雄一、藤森宏高、山方啓、酒多喜久
2. 発表標題 トンネル構造を有するチタン混合酸化物光触媒のH <sub>2</sub> 分解反応に対する特性
3. 学会等名 第125回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田 剛・姜 君哲・酒多喜久・中林麻美子・柴田直哉・Nandal Vikas・関 和彦・久富隆史・堂免一成
2. 発表標題 量子収率約100%で水を分解する微粒子光触媒
3. 学会等名 第125回触媒討論会
4. 発表年 2020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
---------	---------