

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05245

研究課題名（和文）可視光応答型半導体光触媒と生体触媒によるハイブリッド型人工光合成系の開発

研究課題名（英文）Development of artificial photosynthesis system based on hybrid system with visible-light-driven semiconductor photocatalyst and bio-catalyst

研究代表者

東 正信（Hgiashi, Masanobu）

大阪公立大学・人工光合成研究センター・特任准教授

研究者番号：10711799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：光エネルギーを有用な化学物質に変換する人工光合成は、現在人類が抱えているCO₂排出量増加による環境問題やエネルギー問題を解決できる方法の一つとして注目されている。本研究では、無機半導体光触媒と生体触媒を複合化した新規人工光合成系の構築を試みた。その結果、酸窒化物光アノードと硫化物光カソードからなる光電極系と、天然の補酵素NADH(還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド)と乳酸脱水素酵素(LDH)からなる生体触媒系、および光電極系と生体触媒系を連結するロジウム錯体を用いることで、可視光照射下において水を電子源にしたNADH再生およびその後の生体触媒反応が進行することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで生体触媒を使った反応の多くは、トリエタノールアミンなどの犠牲還元剤を使用しており、持続的な反応ではなかった。本研究では、酸窒化物光アノードと硫化物光カソードからなる光電極系を導入することで水を電子源にすることが可能となり、持続的な生体触媒反応が可能となった。またNADHは様々な酵素の補酵素として機能するため、本研究で水を電子源としたNADH再生系を構築したことによって、生体触媒反応系への応用が可能である。

ギ酸脱水素酵素は二酸化炭素をギ酸に変換する触媒であり、この系に導入することで水を電子源に二酸化炭素を水素のエネルギーキャリアとして利用されるギ酸に変換できるため社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Artificial photosynthesis, which converts light energy into useful chemical substances, is attracting attention as a method to solve the environmental and energy problems that humanity is currently facing due to increased CO₂ emissions. In this study, we attempted to construct a novel artificial photosynthesis system by combining an inorganic semiconductor photocatalyst and a biocatalyst. As a result, by using a photoelectrode system consisting of an oxynitride photoanode and a sulfide photocathode, a biocatalyst system consisting of the natural coenzyme NADH (reduced nicotinamide adenine dinucleotide) and lactate dehydrogenase (LDH), and a rhodium complex connecting the photoanode system and the biocatalyst system, we have demonstrated that biocatalytic reaction proceeded via NADH regeneration using water as an electron source under visible light irradiation.

研究分野：光触媒、光電気化学

キーワード：人工光合成 光触媒 光電極 生体触媒

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光エネルギーを有用な化学物質に変換する人工光合成は、現在人類が抱えている CO₂ 排出量増加による環境問題やエネルギー問題を解決できる方法の 1 つとして注目されている。これまで光触媒を用いた水分解や CO₂ の還元などが報告されている。光触媒は比較的容易に水を電子源にすることは可能だが、反応の選択性を制御することは難しく適切な助触媒を開発する必要がある。一方、生体触媒は目的の反応を 100% で進行させることが可能である。例えば、ギ酸脱水素酵素(FDH)は天然の補酵素 NADH(還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド)または人工補酵素メチルビオローゲン(MV)の 1 電子還元体(MV[•])から電子を受け取り、CO₂ を選択的にギ酸に還元できる。しかし、これまで報告されてきた生体触媒系の多くは、光増感剤として有機分子を用いており、水を電子源にする(水を酸化する)ことは困難であるため、反応を進行させるためには、トリエタノールアミンなどの犠牲還元剤が必要であった。つまり、持続的な反応は不可能であった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では両触媒の長所を組み合わせた光触媒-生体触媒系の構築を試み、水を電子源にした生体触媒反応の実証を目的とした。

3. 研究の方法

光触媒として、高い還元能と可視光吸収能を有する硫化物光触媒(CdS、CuInS₂)を用い、生分解性高分子の原料となる乳酸を、乳酸脱水素酵素(LDH)を用いてピルビン酸から変換する系、また FDH と組み合わせた CO₂ からのギ酸変換系を構築した。

CdS 光アノードは、透明導電性ガラス電極 FTO 上にケミカルバス法で CdS を 2 分間堆積させた後、N₂ 雰囲気中 300 ~ 500 °C で 30 分間焼成することで得た。CuInS₂ 光カソードは既報を参考に電析により Cu と In を Mo 基板に堆積させ、H₂S 雰囲気下にて 520 °C、30 分間焼成することにより得た。その後、10% KCN 溶液で 2 分間エッチング処理することで Cu_xS を除去した。さらに、CuInS₂ 表面上にケミカルバス法により 75 °C、3 分間で CdS を製膜した。TaON 光アノードは、予め各種助触媒 (CoO_x、RhO_x、IrO_x) を含浸担持させた TaON 粒子を用いて、既報を参考に作製した。また、CaTaO₂N 光アノードの調製も行った。出発原料となる Ta₂O₅ と CaCO₃ をモル比 1:2.2 (Ca/Ta=1.1) かつ重量約 1 g となるようにはかり取り、フラックス剤 RbCl をモル比 RbCl/Ta₂O₅ = 0 ~ 40 になるように添加した。よく混合した後、アルミナボートに移し管状炉でアンモニア気流中 (100 mL/min) にて 950 °C、8 時間焼成した。最後に水でよく洗浄した。CoO_x の含浸担持は Co(NO₃)₂ 水溶液を用い 300 または 400 °C で焼成することで行った。その後の電極化は TaON と同様に行った。得られた電極の性能評価は光電気化学測定により行った。光源には L-42 カットオフフィルターを装着した 300 W Xe ランプを用いた。

4. 研究成果

4 - 1. 安定な CdS 光アノードの調製と LDH を用いた乳酸生成への適用

CdS は光溶解が容易に進行するため不安定であるが、[Fe(CN)₆]⁴⁻ は酸化できることを報告している。そこで、K₄[Fe(CN)₆] 水溶液中にて安定に機能する CdS 光アノードの調製条件を検討した。Fig. 1 は N₂ 中での焼成処理が、定電位条件下(-0.5 V vs Ag/AgCl)における光電流に与える影響を示している。未焼成、200、300 °C 焼成の場合は時間の経過とともに光電流は減少していった。これは速やかに CdS の光溶解が進行したためと考えられる。反応後の XRD 測定および SEM 像から、CdS の大部分は K₂Cd[Fe(CN)₆] に変化していた。一方、400 °C で焼成した電極の場合は徐々に増加し安定した光電流が観測された。これは、シンタリングにより CdS 電極の形態が平滑化し、表面積が減少することで光溶解がある程度抑制され、その結果、CdS 表面を覆うように K₂Cd[Fe(CN)₆] 微粒子が生成したためと考えられる。500 °C 焼成した場合は、光電流がほとんど流れなかったが、不純物(CdO)の結晶化が進行していたことから、不純物が関与していると考えられている。

400 °C で焼成した CdS 電極とカーボンペーパー(CP)電極を対極とする 2 電極式において光電気化学特性を評価した。電解質溶液にはリン酸緩衝液(pH 7)を用い、アノード側には 0.1 M K₄[Fe(CN)₆] 溶液を、カソード側には Rh 錯体 [Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺ を 0.1 ~ 5 mM 添加した。[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺ は NAD⁺ を選択的に酵素活性を有する 1, 4-NADH に還元できる触媒である。0.1 mM の時は -0.2 ~ 0.1 V の電圧印加時においても光電流値は 20 μA cm⁻² 程度と極めて低かったが、0.5 mM 以上では明確な光電流が観測され(約 300 μA cm⁻² at 0 V)、0 V 以下の電圧印加時においても明確な光電流が観測された。これは無バイアス条件下で CdS 光アノードは CP 対極上で [Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺ を還元できることを示唆している。次にカソード側にさらに NAD⁺ (1 mM) を添加し NADH の生成反応を行った。高速液体クロマトグラフで反応液を分析した結果、NAD⁺ の還元生成物として、わずかに 1, 6-NADH が生成したが、主に 1, 4-NADH が生成していることを確認した。時間とともに NADH の生成量は増加していき、90 分で NAD⁺ の NADH への変換率はおよそ 67% であった。最後に、カソード側にピルビン酸と LDH を添加することで、再生した

NADH を用いたピルビン酸からの乳酸生成を行った。Fig. 2 に示すように 4 時間にわたって安定に乳酸は生成し、その量は 34.2 μmol となった。この量は用いた $[\text{Cp}^*\text{Rh}(\text{bpy})\text{H}_2\text{O}]^{2+}$ (15 μmol)、 NAD^+ (30 μmol)、LDH (0.55 nmol) の量を超えた。今後適切な酸素生成系と組み合わせることで水を電子源にできる可能性がある。

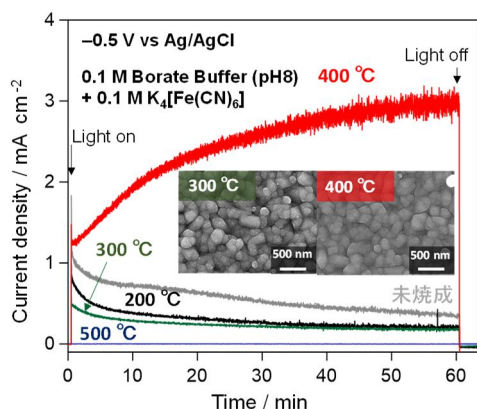


Fig. 1 Time courses of photocurrents over various CdS electrodes. Inset : SEM images of CdS electrode before reaction

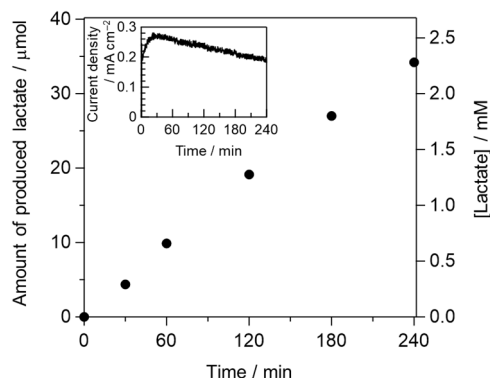


Fig. 2 Time course of produced lactate over two-electrode system consisting of CdS photoanode and CP counter electrode in phosphate buffer solution (pH 7.0) at 0 V vs. CP under Ar gas flow and visible light irradiation. Anode side: 0.1 M $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, Cathode side: 10 mM sodium pyruvate, 2.0 mM NAD^+ , 1.0 mM $[\text{Cp}^*\text{Rh}(\text{bpy})\text{H}_2\text{O}]^{2+}$, and 25 units LDH. Inset: Time course of photocurrent density.

4 - 2 . CuInS_2 光カソードと FDH を用いた光電気化学的 CO_2 還元

本系では人工補酵素 MV(電子伝達体)を用い、その MV の有無における $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソードの光電気化学特性を評価した(Fig. 3)。MV 非存在下の場合、わずかにカソード光電流が観測されるものの、MV を添加することで明確に光電流が増加した。これは $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソード上で MV の還元が進行していることを強く示唆している。定電位条件下($-0.4 \text{ V vs Ag/AgCl}$)において MV を含む溶液中で $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソードの安定性を評価したところ、1 時間わたって安定した光電流が流れた。この際、生成した MV の 1 電子還元体($\text{MV}\cdot$)のファラデー効率は約 35%と低かった。他の考えられる還元生成物である H_2 のファラデー効率が 0.36%と極めて低く、ほとんど生成していないことを考えると、生成した $\text{MV}\cdot$ が外部から侵入した O_2 と速やかに反応し($\text{MV}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{MV} + \text{O}_2\cdot$)消失したと考えられる。以上のことから、 $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソードは安定かつ選択的に MV を $\text{MV}\cdot$ に還元できると言える。次に、MV を含む溶液中において $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソードの光電変換効率(IPCE)を求めたところ、 $-0.5 \text{ V vs Ag/AgCl}$ 下において、500 nm: 64%、600 nm: 62%、700 nm: 64%と比較的高い値を示した。2 室セルを用いて光電気化学的 CO_2 還元を検討した結果(Fig. 4)、FDH 非存在下の場合においてもギ酸がわずかに生成したが(46 nmol for 6 h)、FDH を添加することでその生成量は顕著に増加した(274 nmol)。この量は添加した FDH の量(38.5 nmol)より多かったことから、光電極系において FDH は安定に機能していると考えられる。これらの結果から、 $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ 光カソード上で光還元された MV ($\text{MV}\cdot$)が FDH に電子を渡すことで、FDH 内で CO_2 がギ酸に還元されたと結論した。

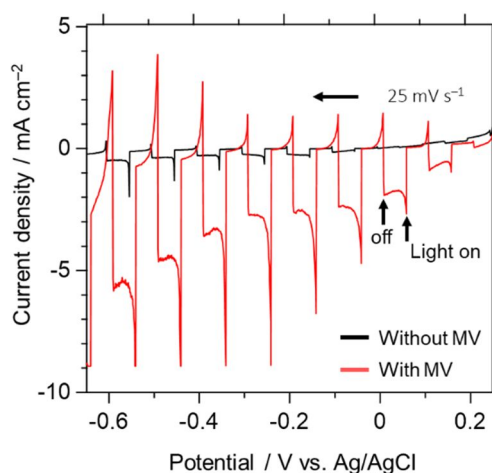


Fig. 3 Current-potential curves for $\text{CdS}/\text{CuInS}_2$ photocathodes in phosphate buffer solution (0.1 M, pH 7) with and without MV (10 mM) under visible-light irradiation.

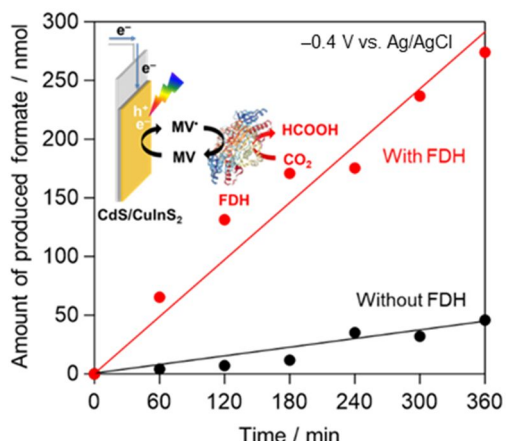


Fig. 4 Time courses of produced formate over the cathode side in two-compartment cell system at $-0.5 \text{ V vs. Ag/AgCl}$ with and without FDH (20 units) under visible-light irradiation. Anode side: 0.1 M HEPES buffer solution (pH 7), Cathode side: 0.1 M HEPES buffer solution (pH 7) and 10 mM MV.

4 - 3 . CuInS₂ 光カソード、TaON 光アノード、LDH を用いた水を電子源とした光電気化学的乳酸生成

[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺の有無における CdS/CuInS₂ 光カソードの光電気化学特性を評価した。[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺非存在下ではわずかに光電流が観測されたが、[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺を添加することで光電流は顕著に増加した。これは CdS/CuInS₂ 光カソード上で[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺が還元されていることを示唆している。次に、2 室セルを用い NAD⁺の NADH への還元を試みた。カソード側には、[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺と NAD⁺(40 μmol)を添加した。光照射 3 時間において 13 μmol の NADH が生成し、NAD⁺から NADH への変換率は 32%であった。次に、LDH および生成した NADH を用いた光電気化学的乳酸生成を行った。光照射時間とともに定期的に乳酸が生成し、光照射 30 時間で 79 μmol の乳酸が生成した。ピルビン酸から乳酸への変換率は 39%であった。30 時間での乳酸生成量は、用いた [Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺ (20 μmol)、NAD⁺(40 μmol)、LDH(27 nmol) の物質以上生成しており、[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺、NAD⁺/NADH が電子伝達体として、また LDH が触媒として機能したことが示された。外部回路を流れた電子数(208 μmol)は、用いた CuInS₂ の物質(9.3 μmol)を大きく超えており、CuInS₂ が安定に光カソードとして機能していることを示している。また、各種対照実験([Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺、NAD⁺、LDH 非存在下、[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺非存在下、NAD⁺非存在下、LDH 非存在下)において、ほとんど乳酸の生成が観測されなかったことから、CuInS₂ の励起電子が[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺、NAD⁺、LDH を介してピルビン酸を乳酸に還元したと言える。

次に酸素生成系(TaON 光アノード)と組み合わせるため、各種助触媒(CoO_x、RhO_x、IrO_x)担持が TaON 光アノードの光電気化学特性に与える影響を検討した。その結果、光電流のオンセットポテンシャルは担持助触媒の種類により異なり、CoO_x: -0.45、RhO_x: -0.55、IrO_x: -0.60 V vs Ag/AgCl と、IrO_x を担持した場合、最も負側のオンセットポテンシャルであった。また、いずれのオンセットポテンシャルは、CdS/CuInS₂ 光カソードのオンセットポテンシャル(0.03 V vs Ag/AgCl)より負側であり、これら電極を組み合わせた場合、無バイアスで水を電子源にした NADH 再生ならびに乳酸生成が可能であることを示唆している。

最後に、各助触媒を担持した TaON 光アノードと CdS/CuInS₂ 光カソードを用い、NADH 再生を介したピルビン酸からの乳酸生成を無バイアス条件下で行った。いずれの場合も光電流が観測されたが、オンセットポテンシャルが一番正側であった CoO_x/TaON 光アノードを用いた場合は極めて光電流値は低かった。これに対し、RhO_x/TaON、IrO_x/TaON 光アノードの順で光電流は増加しており(2 時間後の光電流それぞれ、0.15 mA、0.27 mA)、TaON 光アノードのオンセットポテンシャルが系全体の性能に寄与していることが明らかになった。Fig. 5 に IrO_x/TaON を用いた場合の乳酸および酸素生成の経時変化を示す。光照射と共に乳酸および酸素の同時生成が確認され、暗時にはその生成は停止した。生成量は、乳酸: 9.8 μmol、酸素: 4.8 μmol となりファラデー効率はそれぞれ 92%、93%となった。また、H₂ の生成はほとんど観測されなかった。これらの結果より、Fig. 6 に示すように TaON 中に光生成した正孔の大部分は水の酸化に、CuInS₂ の励起電子の大部分は、[Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺、NAD⁺、LDH を介してピルビン酸の還元消費されたと言える。RhO_x/TaON 光アノードを用いた場合も乳酸および酸素の同時生成は確認されたが、CoO_x/TaON 光アノードの場合は乳酸および酸素の同時生成は確認できなかった。このように適切な助触媒を担持した TaON 光アノードおよび CdS/CuInS₂ 光カソードを用いることで、無バイアスかつ水を電子源にした NADH 再生を介したピルビン酸からの乳酸生成を実証した。

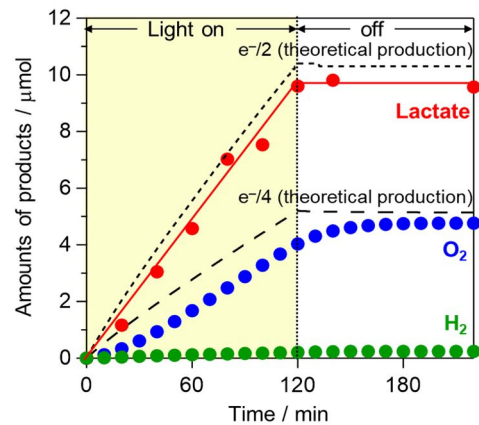


Fig. 5 Time course of produced lactate and O₂ over the combination system of CdS/CuInS₂ photocathode, IrO_x/TaON photoanode and [Cp*Rh(bpy)(H₂O)]²⁺ under visible light irradiation without an external bias.

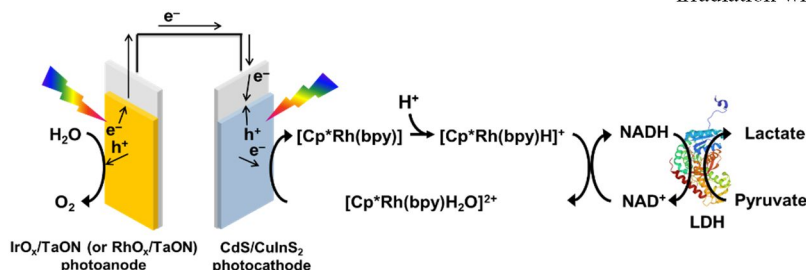


Fig. 6 Photoelectrochemical lactate production via *in situ* NADH regeneration over a hybrid system consisting of IrO_x/TaON photoanode, CdS/CuInS₂ photocathode and LDH using water as an electron source.

4 - 4 . 水の酸化用 CaTaO₂N 光アノードの調製

上記のように、光アノードと光カソードを組み合わせることで水を電子源にした系を構築できたが、光アノード系のみでの構築を目指し、TaON より伝導帯位置が負側にある複合型酸窒化物 CaTaO₂N 光電極の調製方法を検討した。

調製した試料の XRD 測定を行ったところ、フラックス剤 RbCl 未使用の場合は、CaTaO₂N 由来のピーク以外にも不純物由来のピークが観察された。RbCl/Ta₂O₅ 比=0.2~4 と RbCl の濃度が増加すると不純物由来のピークが消失し、CaTaO₂N がほぼ単相で得られた。さらに RbCl の濃度が増加すると不純物由来のピークが観察された。単相で得られた試料の吸収端はおよそ 520 nm であり、RbCl 濃度が高いほど吸収端より長波長側の光吸収が増加していた。この吸収はアニオン欠陥由来の吸収に寄与しており、電子伝導性が増加していることを示唆している。得られた CaTaO₂N 光電極の光電気化学特性評価の結果を Fig. 7 に示す。RbCl/Ta₂O₅ 比が 0.2 ~ 4 と増加するにつれ光電流は増加していった。これは、長波長側の光吸収もあわせて増加していることから、CaTaO₂N 粒子の電子伝導性が向上したためと考えられる。RbCl/Ta₂O₅ 比 20 の電極では光電流が減少したが、これは不純物を含んでいたため、CaTaO₂N 粒子間または CaTaO₂N-基板間の電子移動が阻害されたと考えられる。以後の実験では RbCl/Ta₂O₅ 比 4 の CaTaO₂N を用いた。

次に含浸担持中の空気焼成処理が光電気化学特性に与える影響を調べた。400 °C 焼成した場合は著しく光電流が減少したが (54 ± 2 μA cm⁻² at 0.4 V_{Ag/AgCl})、300 °C 焼成した場合は増加した (54 ± 100 μA cm⁻² at 0.4 V_{Ag/AgCl})。XRD 測定の結果、Co 種とともに CaTaO₂N を 400 °C で空気焼成することでピークがブロード化しており、CaTaO₂N が分解したため光電流が減少したと考えられる。一方 300 °C 焼成の場合は、ピークに大きな変化は見られなかったため分解はしておらず、CaTaO₂N 表面に担持された CoO_x が水の酸化を促進したため光電流が増加したと考えられる。定電位条件下で電極の安定性を評価したところ、CoO_x 無担持の場合は光照射の開始とともに光電流は著しく減少し、10 分後にはほとんど観測されなくなった。一方、CoO_x を担持した場合は、比較的安定な光電流が 1 時間観測された。この時外部回路を流れた電子の物質量 (10.3 μmol) は、CaTaO₂N の量 (7.5 μmol) を超えた。このように安定に水を酸化できる CaTaO₂N 光アノードの開発に成功した。また、この光アノードは、TaON では光電流が観測されなかった無バイアス条件下にて、ロジウム錯体 [Cp*Rh(bpy)H₂O]²⁺ を還元できることを見出した。

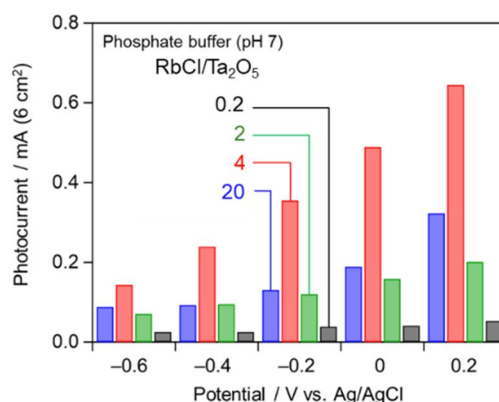


Fig. 7 Photocurrent-potential relationship of CaTaO₂N electrode under visible light irradiation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Toyodome Takumi, Amao Yutaka, Higashi Masanobu	4. 巻 45
2. 論文標題 Photoelectrochemical reduction of CO ₂ to formate over a hybrid system of CuInS ₂ photocathode and formate dehydrogenase under visible-light irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 14803 ~ 14807
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d1nj02481g	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 Higashi Masanobu, Tanaka Itsuki, Amao Yutaka, Yoshida Tomoko	4. 巻 46
2. 論文標題 Fabrication of a stable CdS photoanode for photoelectrochemical CO ₂ reduction under visible-light irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 5932 ~ 5938
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d1nj06073b	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 Higashi Masanobu, Toyodome Takumi, Kano Koya, Amao Yutaka	4. 巻 460
2. 論文標題 Photoelectrochemical lactate production from pyruvate via in situ NADH regeneration over a hybrid system of CdS photoanode and lactate dehydrogenase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 142590 ~ 142590
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.electacta.2023.142590	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21件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 東 正信
2. 発表標題 半導体光触媒と生体触媒を組み合わせた二酸化炭素還元系の開発
3. 学会等名 第6回 九州工業大学グリーンマテリアル研究センター 環境セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東 正信
2. 発表標題 半導体光触媒と生体触媒を組み合わせたハイブリッド型人工光合成系の開発
3. 学会等名 信州大学先鋭材料研究所講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanobu Higashi
2. 発表標題 Development of stable CdS photoanode for artificial photosynthesis
3. 学会等名 2nd International Meet & Expo on Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (SEMICONMEET2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanobu Higashi
2. 発表標題 Fabrication of Stable CdS Photoanode for CO2 Reduction under Visible-light Irradiation
3. 学会等名 2nd International Carbon Chemistry and Materials Conference (CCM-2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanobu Higashi
2. 発表標題 Preparation of Stable CdS Photoanode for CO2 Reduction under Visible-light Irradiation
3. 学会等名 6th International Conference on Catalysis and Chemical Engineering (CCE-2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanobu Higashi
2. 発表標題 Fabrication of a Stable CdS Photoanode for CO ₂ Reduction by Combination of Biocatalyst under Visible-light Irradiation
3. 学会等名 7th Edition of Global Energy Meet (GEM-2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanobu Higashi, Takumi Toyodome, Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Yutaka Amao
2. 発表標題 Photoelectrochemical CO ₂ Reduction to Formate over Hybrid System of CdS Photoanode and Formate Dehydrogenase under Visible Light Irradiation
3. 学会等名 241th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanobu Higashi, Takumi Toyodome, Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Yutaka Amao
2. 発表標題 Photoelectrochemical CO ₂ Reduction to Formate over Hybrid System of CdS Photoanode and Formate Dehydrogenase under Visible Light Irradiation
3. 学会等名 19th International Symposium on relations between Homogeneous and Heterogeneous Catalysis (ISHHC19) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanobu Higashi, Takumi Toyodome, Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Yutaka Amao
2. 発表標題 Photoelectrochemical CO ₂ Reduction to Formate over Hybrid System of CdS Photoanode and Formate Dehydrogenase under Visible Light Irradiation
3. 学会等名 9th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCAT9) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanobu Higashi, Takumi Toyodome, Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Yutaka Amao
2. 発表標題 Photoelectrochemical CO ₂ Reduction to Formate over Hybrid System of CdS Photoanode and Formate Dehydrogenase under Visible Light Irradiation
3. 学会等名 12th International Conference on Environmental Catalysis (ICEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊留 拓弥、天尾 豊、東 正信
2. 発表標題 可視光応答型CuInS ₂ 光カソードと生体触媒を組み合わせたCO ₂ 還元系の構築
3. 学会等名 第12回触媒科学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 いつき, 吉田 朋子, 東 正信
2. 発表標題 CO ₂ 還元を目指した安定なCdS光アノードの開発
3. 学会等名 第12回触媒科学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東 正信
2. 発表標題 半導体光触媒と生体触媒を組み合わせたハイブリッド型CO ₂ 還元系の構築
3. 学会等名 第1回若手研究者研究発表会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 いつき, 吉田 朋子, 東 正信
2. 発表標題 CO2還元を目指した安定な金属硫化物光アノードの開発
3. 学会等名 CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Masanobu Higashi
2. 発表標題 Fabrication of CdS photoanodes for CO2 reduction under visible light
3. 学会等名 ALC '21 (13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東 正信, 豊留 拓弥, 天尾 豊
2. 発表標題 半導体光電極と生体触媒を組み合わせた二酸化炭素還元系の開発
3. 学会等名 光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanobu Higashi
2. 発表標題 Development of Z-scheme water splitting system using metal sulfide photocatalyst under visible light irradiation
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS)2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊留 拓弥、天尾 豊、東 正信
2. 発表標題 CuInS ₂ 光カソードと生体触媒を組み合わせた可視光応答型CO ₂ 還元系の構築
3. 学会等名 第51回石油学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itsuki Tanaka, Tomoko Yoshida, Masanobu Higashi
2. 発表標題 Fabrication of metal sulfide photoanodes for CO ₂ reduction under visible light
3. 学会等名 Pacifichem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Toyodome, Yutaka Amai, Masanobu Higashi
2. 発表標題 Development of photoelectrochemical system with CuInS ₂ photocathode and formate dehydrogenase for visible-light driven CO ₂ reduction to formate
3. 学会等名 Pacifichem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanobu Higashi, Tomoya Ishibashi, Yutaka Amai
2. 発表標題 Photoelectrochemical CO ₂ reduction to formate with the sacrificial reagent free system of TiO ₂ photoanode and formate dehydrogenase
3. 学会等名 Pacifichem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ
<https://www.omu.ac.jp/orp/biocatalyst/>

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
---------	---------