

令和元年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06130

研究課題名(和文)窒化炭素系半導体と金属錯体を融合した二酸化炭素固定化光触媒の創出

研究課題名(英文) Development of photocatalytic CO₂ reduction systems using hybrids of carbon nitride semiconductors and metal complexes

研究代表者

前田 和彦 (Maeda, Kazuhiko)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：40549234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：ルテニウム錯体と有機半導体窒化炭素からなるハイブリッド光触媒は、可視光照射により二酸化炭素をギ酸へと効率的に還元変換することができる。本研究では錯体、半導体両者に着目し、光触媒活性向上、生成物分布の制御を狙いとした。従来報告してきたギ酸生成に有効なルテニウム単核錯体/窒化炭素ハイブリッドに関しては、銀ナノ粒子をナノシート状窒化炭素に担持することで飛躍的な性能向上を実現した。二酸化炭素還元生成物の生成物分布の制御の点においては、金属錯体を従来のルテニウム系からルテニウムとレニウムの複核系、あるいは鉄系へと変えることで、ギ酸ではなく一酸化炭素を選択的に得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化炭素の固定化反応は、学術的にも社会的にも重要な課題である。本研究により、可視光で二酸化炭素を還元する金属錯体/半導体ハイブリッド光触媒における世界最高性能を更新し、従来困難だった水溶液中での反応駆動をはじめ実証するなど、インパクトのある成果を多数得ることができた。結果として、錯体化学と半導体光触媒の境界領域を、二酸化炭素還元を切り口として大きく広げ発展させることができた。本研究に関する発表論文の被引用件数の合計がすでに200回を超えていることは、関連する学術領域への波及効果の大きさを明確に示している。

研究成果の概要(英文)：Hybrid photocatalysts that consist of ruthenium complex and organic semiconductor carbon nitride are capable of reducing carbon dioxide into formic acid upon visible light. This research project aimed at improving the efficiency of the hybrid system by refining both the metal complex and the semiconductor parts, as well as controlling the product distribution of carbon dioxide reduction. Modification of carbon nitride nanosheets with silver nanoparticles resulted in significant enhancement of efficiency of carbon dioxide reduction in ruthenium-complex/carbon nitride hybrid system. Regarding the control of the product distribution, selective carbon monoxide formation was realized by changing metal complex from previously reported ruthenium to ruthenium-rhenium binuclear complex (or iron complex).

研究分野：エネルギー変換型光触媒

キーワード：光触媒 金属錯体 二酸化炭素固定 半導体 人工光合成

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

金属錯体や半導体を光触媒とした CO₂ 還元は、ギ酸や CO といった有用物質を常温常圧下で製造できる反応として注目され、30 年以上も前から国内外で精力的に研究されている。我々は最近、有機高分子半導体である窒化炭素と Ru 錯体を融合したハイブリッド材料を光触媒とすることで、太陽光の主成分である可視光照射下で CO₂ を還元し、高選択的にギ酸を得ることに成功した。Ru や Re を中核とした金属錯体は、CO₂ を高効率かつ高選択的に還元する優れた均一系光触媒として働くが、その光酸化力は弱く、強い還元剤が存在しないと働かない。一方、半導体を単独で光触媒として用いた場合、プロトン還元が併発して CO₂ 還元の選択率を低下させる問題がある。我々の開発した錯体/半導体の複合光触媒は、錯体と半導体それぞれの長所である高い触媒性能と高い光酸化力に注目して設計されたものである。

本ハイブリッド光触媒系では、可視光励起によって半導体に生じた電子(e⁻)と正孔(h⁺)が表面へと移動し、それぞれ酸化還元反応に消費されることで完結する。特に、伝導帯の e⁻ は半導体表面の錯体へと移動して CO₂ 還元を起こす必要がある。したがって、光吸収・キャリア移動に関わる半導体と CO₂ 還元に関わる錯体それぞれの設計が、本光触媒系を高効率化する上で重要になると考えられる。しかし本系において高い光触媒活性と生成物選択率を得る上で、どのような特性をもつ半導体あるいは錯体が有効なのかは、研究開始当初十分にわかっていなかった。また、これまでの報告のほとんどは有機溶媒中での検討にとどまっており、環境負荷の小さい水中での検討例はほとんどない状況だった。

2. 研究の目的

本研究ではこのような状況を打破すべく、金属錯体と窒化炭素系半導体両者に着目して研究を行った。金属錯体については、ハイブリッド光触媒系への導入例がない新規なものを用いることで、CO₂ 還元反応選択率の制御を狙った。可視光吸収・電荷分離機能を担う窒化炭素系半導体については、ナノ粒子（貴金属や酸化物）による修飾を施すことで、光触媒反応活性の向上を試みた。さらには、広域可視光の有効利用という観点からも窒化炭素系半導体の改良を行った。これらの研究を通じて、金属錯体/窒化炭素系半導体ハイブリッドの光触媒化学に新たな知見を加え、可視光と CO₂ を原料として有用物質を作り出す新たな光触媒系を構築することを目指した。

3. 研究の方法

金属錯体/窒化炭素半導体ハイブリッド光触媒系としては、図 1 に示す 2 つの異なる系を検討した。これらはいずれも研究開始時点で確立された系であるが、ポイントは金属錯体が担う機能により分類できることである。すなわち、錯体が光吸収過程に直接関与せずに触媒としてのみ振る舞い、半導体のみの光励起を用いる場合(図 1A)と、錯体が光吸収にも関与した二光子過程で進行する場合(図 1B)である。

金属錯体および窒化炭素系半導体をそれぞれ合成した。これらのハイブリッド材料は、金属錯体を溶解させた有機溶媒中に窒化炭素を分散させる典型的な吸着法により得た。必要に応じて、窒化炭素系半導体には Ag や TiO₂ のナノ粒子を担持した。得られた材料のキャラクタリゼーションには、粉末 X 線回折法、紫外可視拡散反射分光法、赤外吸収分光法、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、X 線光電子分光法、X 線吸収分光法、エネルギー分散型 X 線分光法などを用いた。

光触媒反応は、調製したハイブリッド材料を電子ドナー（トリエタノールアミンや EDTA）を含んだ溶液中に分散させ、1 気圧の CO₂ で飽和させた後、400

W 高圧水銀ランプを光源として光照射することで行った。反応中の液相の温度は室温に保ち、照射光の波長は溶液フィルターで制御した。気相および液相生成物の定性定量には、ガスクロマトグラフィー、キャピラリー電気泳動をそれぞれ用いた。尚、全ての系において ¹³C で標識された ¹³CO₂ を用いて光触媒反応を行い、還元生成物が系中の CO₂ 由来であることを確認した。

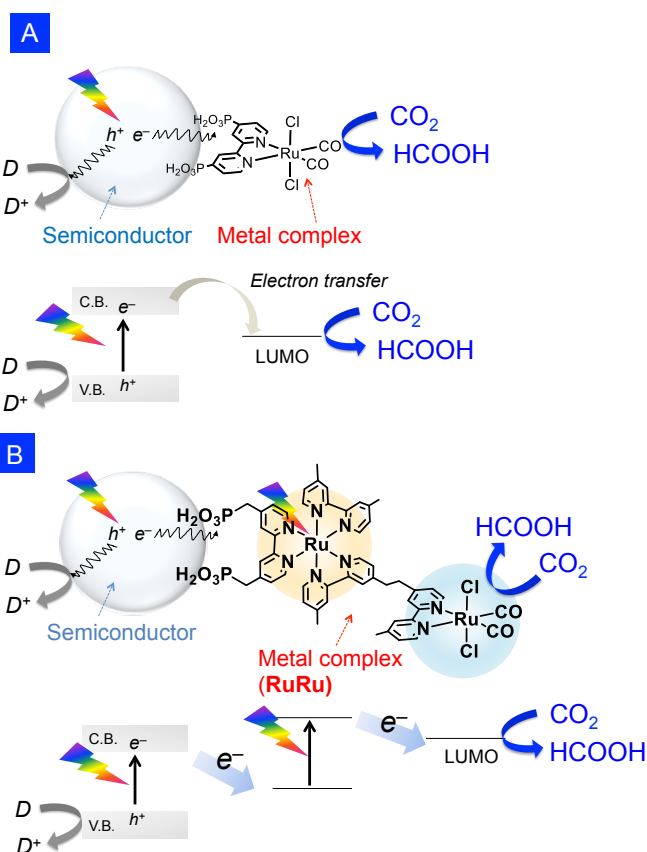
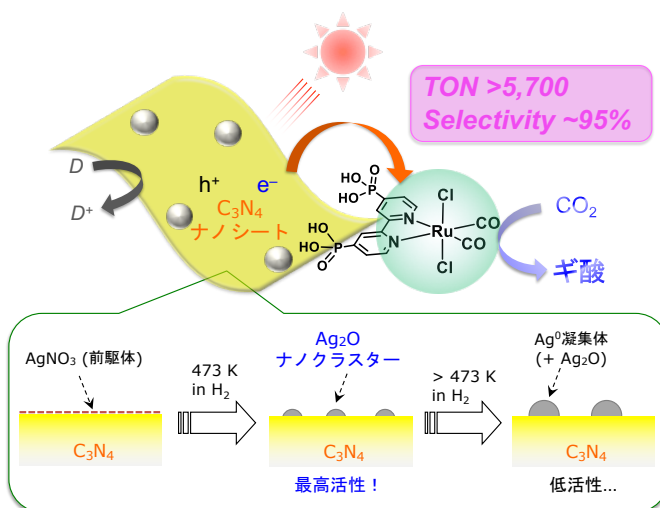


図 1. CO₂ 還元にも有効な金属錯体/半導体ハイブリッド光触媒. (A) 一光子励起型. (B) 二光子励起型.

4. 研究成果

[Ag ナノ粒子担持による Ru(II) 単核錯体/窒化炭素ハイブリッド光触媒の高活性化]

我々は、Ru(II) 単核錯体吸着窒化炭素ハイブリッド光触媒が可視光による CO₂ 還元反応において高選択的にギ酸を生成することをすでに報告している (*Chem. Commun.* 2013, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015 など)。本研究では、ナノシート状窒化炭素の表面に Ag ナノ粒子を担持し、そこに Ru(II) 単核錯体を吸着担持したものを光触媒に用いると、光触媒性能が大きく向上することを見出した。特に触媒耐久性を示すターンオーバー数 (TON: 錯体の物質量をベースに計算したもの) に関しては、従来系と比べて 3~5 倍向上し、最大で 5700 以上に達した (図 2)。この値は、単核錯体/半導体ハイブリッド光触媒における最高値となった。

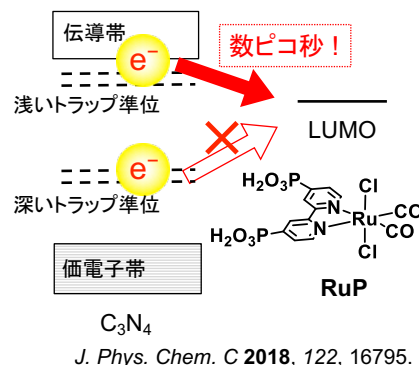


J. Mater. Chem. A 2018, 6, 9708.

図 2. Ru(II) 単核錯体/Ag/C₃N₄ ナノシートハイブリッド光触媒による高効率 CO₂ 還元

さらに本系の担持条件の変化による Ag の局所構造変化を EXAFS で調べ、光触媒活性と比較した。含浸水素還元法で調製した Ag 担持窒化炭素について Ag-K 殻 EXAFS 測定を行った結果、金属 Ag だけでなく Ag₂O の構造を持つ Ag 種が確認された。CO₂ 還元活性が最も高い条件で調製した場合、ほぼ Ag₂O の構造を持っていることが確認された。一方、担持量や加熱温度を上昇させると凝集した金属 Ag の構造が Ag₂O と共存するようになった。このような金属 Ag 凝集体を含む複合光触媒では CO₂ 還元活性が低くなったことから、凝集種を生成させずに Ag を担持することが高活性化に重要であると結論した。

本研究ではさらに、Ru(II) 単核錯体/Ag/C₃N₄ 融合光触媒系の電子移動ダイナミクスを時間分解可視-赤外分光法により観測することにも成功した。窒化炭素上に担持された Ag ナノ粒子は、窒化炭素の光励起によって生じた励起電子をトラップして電荷分離を促進していること、そして窒化炭素の伝導帯付近に生成した電子が、Ru(II) 錯体へ数ピコ秒の速い時間オーダーで移動していることを明らかとした (図 3)。一方、深いトラップ準位に捕捉された電子は錯体へ移動しづらいことも判明し、窒化炭素系半導体においては反応性の高い電子の密度を増やすことが高活性化に寄与するという新たな材料設計指針を得た。

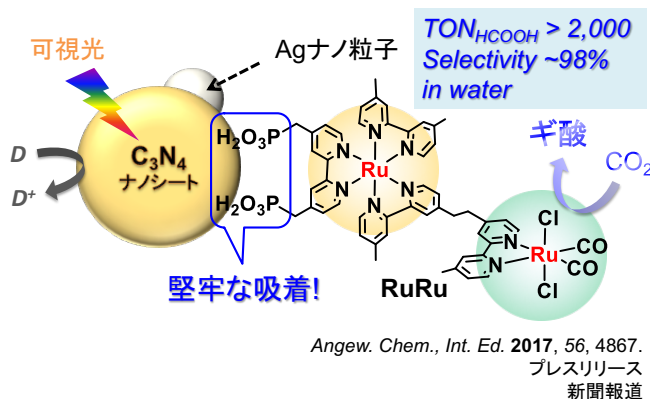


J. Phys. Chem. C 2018, 122, 16795.

図 3. C₃N₄ から Ru(II) 単核錯体への超高速電子移動

[水溶液中での高効率 CO₂ 還元の実現]

上記の Ru(II) 単核錯体/Ag/窒化炭素ハイブリッド光触媒は、CO₂ 飽和させた有機溶媒中で効率良く働く一方で、水溶液中での性能に問題を抱えていた。本研究では、より高耐性が期待できる Z スキーム型反応機構を利用する Ru(II) 二核錯体 (RuRu) を組み込んだハイブリッド光触媒系を構築し、水溶液中での光触媒活性向上を狙った。種々検討した結果、ナノシート状 C₃N₄ (あるいはその Ag 担持体) を半導体部位として用いると、錯体-窒化炭素間の強固な吸着が実現できることを発見した。そしてその結果として、アルカリ水溶液中を含む広い pH 範囲で駆動できる CO₂ 還元光触媒系の構築に成功した。ギ酸生成の TON は従来の 3 倍の 2000 以上に達し、選択率も 70% 弱から最大で 95% 以上へと大幅に改善した (図 4)。



Angew. Chem., Int. Ed. 2017, 56, 4867.
プレスリリース
新聞報道

図 4. Ru(II) 二核錯体/Ag/C₃N₄ ナノシートハイブリッド光触媒による水中での CO₂ 還元

TON は従来の 3 倍の 2000 以上に達し、選択率も 70% 弱から最大で 95% 以上へと大幅に改善した (図 4)。

[CO 選択生成を可能とする新型ハイブリッド光触媒]

上記の成果も含め、これまでに報告されたハイブリッド光触媒はいずれもギ酸を主生成物として得るものだが、CO₂ は 2 電子還元を受けることにより、工業的価値が大きい CO へも変換でき

る。CO₂をCOへ選択的に還元する新規ハイブリッド光触媒の開発を目的として、金属錯体部にRu(II)-Re(I)二核錯体(RuRe)、半導体部にメソポーラス窒化炭素を適用した結果、還元剤トリエタノールアミン存在下、可視光によりCO₂を主にCOへ触媒的に還元することに成功した(図5)。さらに、RuReの吸着密度を増大することで光触媒活性が向上することを見出した。具体的には、ゾルゲル法を用いてアモルファスSiO₂を窒化炭素上に高分散担持すると、錯体の吸着量が最大で107 μmol g⁻¹に達し、未修飾時と比較して4倍量となった。その結果として、光触媒活性

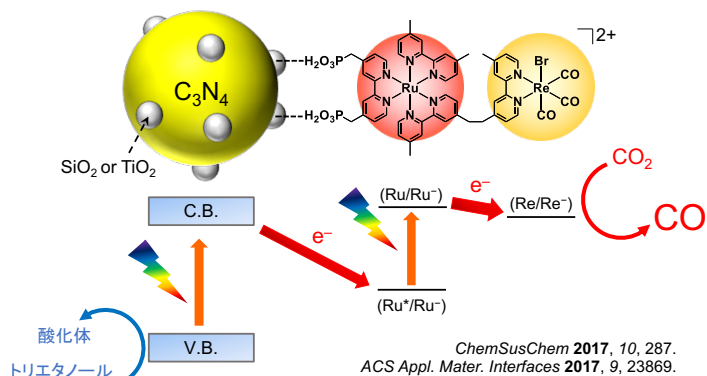


図5. Ru(II)-Re(I)二核錯体/C₃N₄ハイブリッド光触媒によるCO₂のCOへの選択還元

は錯体の吸着量に応じて直線的に増加し、未修飾のもの比べて2.5倍の活性向上に成功した。

本系のさらなる高活性化を目指して研究を進めた結果、ナノシート状窒化炭素の表面をルチル型TiO₂ナノ粒子で修飾し、そこにRuReを吸着担持したものを光触媒に用いると、同量のRuReを含むTiO₂なしのもの比べて約4倍のCO生成速度が得られた。触媒耐久性を示すターンオーバー数も73に達し、従来の約4倍の値を記録した。TiO₂修飾により高活性が得られる要因を明らかにするため、可視-近赤外過渡吸収分光法で窒化炭素の光励起キャリアダイナミクスを調べたところ、TiO₂で修飾した窒化炭素では励起電子が大幅に長寿命化していることが判明した。さらには、耐久性低下に直結するRuReの脱着が、TiO₂修飾によって大幅に抑制されることもわかった。これらが高いCO生成速度、およびターンオーバー数に繋がったものと結論した。

本研究では、選択的CO生成を可能とする新たなハイブリッド光触媒系構築のための国際共同研究も実施した。その結果、パリ第7大学のMarc Robert教授のグループと共同でFe(II)錯体触媒を組み込んだ窒化炭素融合光触媒系を構築し、CO生成において過去最高となる触媒回転数155、みかけの量子収率4.2%、CO選択率95%以上を達成した(図6)。

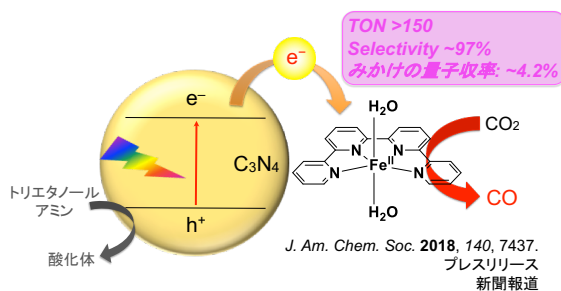
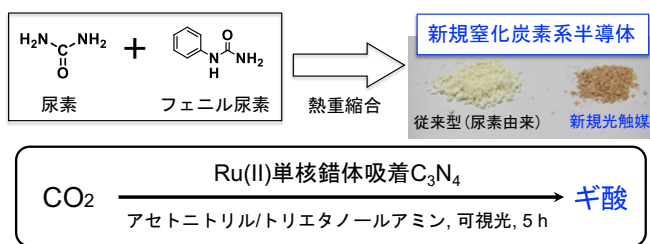


図6. Fe(II)単核錯体/C₃N₄混合光触媒系によるCO₂のCOへの選択還元

[広域可視光を有効利用できるC₃N₄系半導体の開発]

以上の研究で用いた窒化炭素はバンドギャップが2.7~2.8 eVと比較的大きく、広域可視光の利用という観点では満足なものではない。本研究では、尿素とフェニル尿素の熱重合によって得られる窒化炭素が最大で700 nm程度までの可視光を吸収し、Ru(II)単核錯体と融合することでCO₂をギ酸へと変換する光触媒となることを見出した。尿素のみから得た従来型の窒化炭素では反応が進行しなかった480 nm以上の可視光照射下でも、ギ酸を生成することが判明した(図7)。尚、本研究はThe University of New South WalesのRose Amal教授との共同研究成果である。



前駆体	照射波長 / nm	ギ酸 / μmol
尿素	> 400	0.96
尿素+フェニル尿素	> 400	2.01
尿素	> 480	trace
尿素+フェニル尿素	> 480	0.70

活性倍増!
従来光触媒が応答しない長波長でも反応が駆動!

ACS Sustainable Chem. Eng. 2018, 6, 15333.

図7. 共重合を利用した広域可視光応答型C₃N₄の合成とCO₂還元反応の高活性化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件・全て査読有)

原著論文

- (1) K. Wada, M. Eguchi, O. Ishitani, K. Maeda, Activation of the Carbon Nitride Surface by Silica in a CO Evolving Hybrid Photocatalyst. *ChemSusChem* 2017, 10 (1), 287-295. DOI: 10.1002/cssc.201600661.
- (2) R. Kuriki, M. Yamamoto, K. Higuchi, Y. Yamamoto, M. Akatsuka, D. Lu, S. Yagi, T. Yoshida, O. Ishitani, K. Maeda, Robust Binding between Carbon Nitride Nanosheets and a Binuclear Ruthenium(II) Complex Enabling Durable, Selective CO₂ Reduction

- under Visible Light in Aqueous Solution. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2017**, *56* (17), 4867–4871. DOI: 10.1002/anie.201701627.
- (3) K. Wada, C. S. K. Ranasinghe, R. Kuriki, A. Yamakata, O. Ishitani, K. Maeda, Interfacial Manipulation by Rutile TiO₂ Nanoparticles to Boost CO₂ Reduction into CO on a Metal-Complex/Semiconductor Hybrid Photocatalyst. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9* (28), 23869–23877. DOI: 10.1021/acsami.7b07484.
 - (4) K. Maeda, D. An, C. S. K. Ranasinghe, T. Uchiyama, R. Kuriki, T. Kanazawa, D. Lu, S. Nozawa, A. Yamakata, Y. Uchimoto, O. Ishitani, Visible-light CO₂ reduction over a ruthenium(II)-complex/C₃N₄ hybrid photocatalyst: the promotional effect of silver species. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6* (20), 9708–9715. DOI: 10.1039/C8TA03245A.
 - (5) C. Cometto, R. Kuriki, L. Chen, K. Maeda, T.-C. Lau, O. Ishitani, M. Robert, A Carbon Nitride/Fe Quaterpyridine Catalytic System for Photostimulated CO₂-to-CO Conversion with Visible Light. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140* (24), 7437–7440. DOI: 10.1021/jacs.8b04007.
 - (6) K. Maeda, D. An, R. Kuriki, D. Lu, O. Ishitani, Graphitic carbon nitride prepared from urea as a photocatalyst for carbon dioxide reduction under visible light with the aid of a mononuclear Ru(II) complex. *Beilstein J. Org. Chem.* **2018**, *14*, 1806–1812. DOI: 10.3762/bjoc.14.153.
 - (7) R. Kuriki, C. S. K. Ranasinghe, Y. Yamazaki, A. Yamakata, O. Ishitani, K. Maeda, Excited-State Dynamics of Graphitic Carbon Nitride Photocatalyst and Ultrafast Electron Injection to a Ru(II) Mononuclear Complex for Carbon Dioxide Reduction. *J. Phys. Chem. C* **2018**, *122* (29), 16795–16802. DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b03996.
 - (8) C. Tsounis, R. Kuriki, K. Shibata, J. J. M. Vequizo, D. Lu, A. Yamakata, O. Ishitani, R. Amal, K. Maeda, Copolymerization Approach to Improving Ru(II)-Complex/C₃N₄ Hybrid Photocatalysts for Visible-Light CO₂ Reduction. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2018**, *6* (11), 15333–15340. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b03782.

総説

- (9) 栗木 亮, 熊谷 啓, 前田 和彦, 石谷 治, 金属錯体と半導体を複合化した光触媒および光電気化学セルによる CO₂ 還元反応. *表面科学*, **2017**, *38* (6), 291–296. DOI: 10.1380/jsssj.38.291.
- (10) R. Kuriki, K. Maeda, Development of hybrid photocatalysts constructed with a metal complex and graphitic carbon nitride for visible-light-driven CO₂ reduction. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2017**, *19* (7), 4938–4950. DOI: 10.1039/C6CP07973C.
- (11) K. Maeda, CO₂ reduction using oxynitrides and nitrides under visible light. *Progress in Solid State Chem.* **2018**, *51*, 52–62. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2017.11.003.
- (12) K. Maeda, Metal-Complex/Semiconductor Hybrid Photocatalysts and Photoelectrodes for CO₂ Reduction Driven by Visible Light. *Adv. Mater.* **2019**, 1808205. DOI: 10.1002/adma.201808205.

[学会発表] (計 25 件)

招待講演 (国際会議)

- (1) K. Maeda, Visible-light CO₂ reduction using metal-complex/semiconductor photocatalysts. The 6th Sino-Japan bilateral young chemist forum (July 2, 2016, Dalian University of Technology, Dalian, China).
- (2) K. Maeda, Z-scheme reduction of carbon dioxide with visible light using a binuclear metal complex and a semiconductor. SPIE Optics + Photonics for Sustainable Energy (August 31, 2016, San Diego Convention Center, San Diego, USA).
- (3) K. Maeda, Molecular-based heterogeneous photocatalysts for solar fuel production. 2nd Joint Workshop between NTU, Singapore and Tokyo Tech (November 17, 2016, Tokyo Institute of Technology).
- (4) K. Maeda, CO₂ reduction and water oxidation by new semiconductor photocatalysts” International Conference on Catalysis and Chemical Engineering (February 23, 2017, The Double Tree by Hilton Baltimore-MWI Airport, MD, USA).
- (5) K. Maeda, New Semiconductor Photocatalysts Designed for CO₂ Reduction and Water Oxidation under Visible Light. The 7th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics 2017 (July 26, 2017, Grand Copthorne Waterfront Hotel, Singapore).
- (6) K. Maeda, Photocatalytic Water Splitting and CO₂ Fixation Using Oxynitrides and Nitrides. The 9th International Symposium on Nitrides and Related Materials (August 30, 2017, 北海道大学).
- (7) K. Maeda, Construction of artificial photosynthetic assemblies using semiconductors, nanoparticles, and metal complexes. International Symposium on Chemistry for Solar

- Energy Applications 2017 (August 31, 2017, 近畿大学).
- (8) K. Maeda, Metal-Complex/Semiconductor Hybrid Photocatalysts for Carbon Dioxide Fixation. 第 67 回錯体化学討論会シンポジウム (September 16, 2017, 北海道大学).
 - (9) K. Maeda, Visible light CO₂ reduction and water oxidation on modified semiconductor photocatalysts. 232nd Electrochemical Society (ECS) Meeting (October 3, 2017, Washington DC, USA).
 - (10) K. Maeda, Photocatalytic CO₂ Reduction and Water Oxidation Using Surface-Modified Semiconductors. Symposium on Nanomaterials for Environmental Purification and Energy Conversion (February 21, 2018, 北海道大学).
 - (11) K. Maeda, Artificial photosynthetic assembly constructed with metal complexes, nanoparticles and semiconductors. The 2018 MRS Spring Meeting (April 3, 2018, Phoenix Convention Center, USA).
 - (12) K. Maeda, Surface modified semiconductor photocatalysts for carbon dioxide reduction and water oxidation. Beilstein Organic Chemistry Symposium 2018 (April 26, 2018, Potsdam, Germany).
 - (13) K. Maeda, Chemical approach to artificial photosynthesis using semiconductors, nanoparticles and metal complexes. The 2018 International Symposium on Advancement and Prospect of Catalysis Science & Technology (July 27, 2018, The University of Sydney, Australia).
 - (14) K. Maeda, Visible-Light Reduction of Carbon Dioxide on Metal-Complex/Carbon Nitride Hybrid Photocatalysts. The 43rd International Conference on Coordination Chemistry (August 1, 2018, Sendai International Center, Japan).
 - (15) K. Maeda, Materials for Artificial Photosynthesis from Mixed-Anion Compounds to Organic Polymers. The 3rd International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (November 1, 2018, Newcastle Exhibition and Convention Center, Newcastle, Australia).

招待講演 (国内会議)

- (16) 前田和彦, 半導体と錯体を融合した革新的光触媒系の構築. 錯体学会若手の会東海地区勉強会 (2016 年 11 月 26 日, 分子科学研究所岡崎コンファレンスセンター).
- (17) 前田和彦, 金属錯体と半導体の特徴を活かした二酸化炭素還元光触媒の創出. 第 27 回グリーンケミストリーフォーラム (2017 年 3 月 15 日, 東京工業大学).
- (18) 前田和彦, 固体光触媒を用いた水の光分解、二酸化炭素の光還元反応. 第 2 回固体化学フォーラム研究会 (2017 年 6 月 14 日, 東北大学金属材料研究所).
- (19) 前田和彦, 半導体、錯体、ナノ粒子をビルディングブロックとしたエネルギー変換型光触媒系の構築. 第 402 回触媒科学研究所コロキウム (2017 年 7 月 7 日, 北海道大学).
- (20) 前田和彦, 半導体と錯体が教えてくれた光触媒研究の面白さ. 錯体化学若手の会 関東支部前期勉強会 2018 (2018 年 5 月 26 日, 東京大学).
- (21) 前田和彦, 半導体光触媒を中核とした水の分解・CO₂の固定化反応. 京都工芸繊維大学環境科学センター第 1 回技術セミナー (2018 年 12 月 21 日, 京都工芸繊維大学).

口頭発表 他 7 件

- (22) 和田啓佑, 石谷治, 前田和彦, Ru(II)-Re(I)二核錯体と TiO₂/C₃N₄ からなるハイブリッド光触媒を用いた可視光駆動 CO₂還元 (2017 年 03 月 18 日, 慶應義塾大学).
- (23) R. Kuriki, O. Ishitani, K. Maeda, Visible-light-driven Z-scheme Photocatalyst Constructed with Carbon Nitride and a Ru(II) Binuclear Complex for CO₂ Reduction. International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications (CMCEE-12) (7 月 23 日, シンガポール).

ポスター発表 他 9 件

- (24) 栗木亮, 中島拓哉, 石谷治, 前田和彦, Ru(II)二核錯体と有機半導体との複合体を光触媒とした水中での可視光駆動型 CO₂還元反応. 第 119 回触媒討論会 (2017 年 03 月 21 日, 首都大学東京).
- (25) 安大賢, 栗木亮, 石谷治, 前田和彦, Ru(II)錯体/Ag/C₃N₄ 光触媒における Ag の局所構造と可視光 CO₂還元反応の相関. 日本化学会第 98 春季年会 (2018 年 3 月 21 日, 日本大学).

[図書] (計 1 件)

- (1) R. Kuriki, K. Maeda, Chapter 12: Hybrid Z-scheme nanocomposites for photocatalysis. Woodhead Publishing in Materials, *Multifunctional Photocatalytic Materials for Energy* 2018, 総ページ数: 344 (担当ページ: 289-306).

[その他]

ホームページ等

<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~ishitani/member/kmaeda/Home.html>

6. 研究組織