

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05815

研究課題名(和文)人工ペプチドで架橋した金属二核錯体の合成と光化学的CO₂還元触媒反応研究課題名(英文)Syntheses and Their Photocatalytic CO₂ Reduction of Dinuclear Metal Complexes with Peptide Linkages

研究代表者

石田 斉(Ishida, Hitoshi)

北里大学・理学部・准教授

研究者番号：30203003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ルテニウム錯体を触媒とする光化学的CO₂還元反応について、ルテニウム錯体の配位子に導入した置換基が触媒活性にどのような効果を与えるか検討した。ビピリジン配位子にメチル基を導入した場合、その導入位置によって触媒活性が変化することを見出し、逆電子移動過程の影響について議論した。また錯体触媒の機能化を目指して、非天然アミノ酸を含むペプチド鎖を導入したルテニウム錯体を新規に合成した。とくにペプチド鎖で連結したルテニウム二核錯体は、単核錯体異なる生成物選択性を示すことを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光化学的CO₂還元反応は、将来の化石燃料の枯渇などの資源問題、大気中のCO₂濃度増大による地球温暖化などの環境問題に関連した鍵反応であり、その触媒開発は極めて重要である。これまでにいくつかの優れた触媒が知られているが、より高活性、高耐久性の触媒を開発するためには、触媒反応機構を知り、その要件を満たす触媒を探索する必要があるが、CO₂還元触媒機構には未だに完全には解明されていない。本研究ではルテニウム錯体触媒の置換基効果を通して触媒反応機構に切り込んでおり、その成果は学術的のみならずCO₂資源化にもつながることから社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Substituent effects of the ruthenium complexes have been investigated on the photocatalytic CO₂ reduction. The positions of methyl groups introduced in the bipyridyl ligand of the ruthenium complexes affect the catalytic activities. The effects have been discussed in terms of back electron transfer from the catalyst to the photosensitizer. In this work, the functionalization of the metal complexes by utilizing the peptides containing unnatural bipyridyl amino acid has also been assessed. Specifically, the ruthenium dinuclear complex linked with a peptide has been newly synthesized, and the photocatalytic CO₂ reduction is found to show the different product selectivity from that by the mononuclear complex.

研究分野：錯体化学・光化学・生体機能関連化学・ペプチド化学

キーワード：二酸化炭素還元 ルテニウム ペプチド 非天然アミノ酸 光触媒 分子触媒 人工光合成

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素(CO₂)資源化は環境・資源問題に関連して喫緊の課題となっている。CO₂を還元する触媒としていくつかの金属錯体が知られており、これらは分子レベルでの設計、合成が可能なことから分子触媒として注目を集めている。[1] これまでにルテニウム錯体、レニウム錯体などが高活性なCO₂還元触媒となることが知られており、その安定性の高さから、反応中間体の検出など様々な研究がなされている。特にルテニウム錯体は、一酸化炭素(CO)を選択的に生成するレニウム錯体とは異なり、COとギ酸(反応系中ではギ酸イオンとして存在することからHCOO⁻と表記する)の両方を生成し、その生成物選択性は反応条件に大きく影響されるが、生成反応機構に関してはまだ十分には明らかにされていない。[2] 最も議論となっているのは、ギ酸生成機構である(図1)。金属錯体触媒は還元により配位子を脱離した配位不飽和種を生成し、CO₂が配位した¹-CO₂付加体となった後、プロトン化によるH₂O分子の脱離を経てカルボニル錯体となり、COを生成すると考えられている。このことからギ酸生成に関しては、¹-CO₂付加体がプロトン化したカルボン酸錯体の還元により起こるとい機構が提案され、プロトン強度が強い条件下ではCOが、低い条件下ではギ酸生成が有利になることをうまく説明できるなど一定の成果を挙げてきた。[3] これに対して有機金属化学分野では一般的に、ギ酸錯体が金属ヒドライド錯体へのCO₂挿入反応によって生成すると考えられていることから、¹-CO₂付加体を經由しないギ酸生成機構が広く認められている。[4] しかしこの機構ではギ酸が選択的に得られる場合は説明できるが、反応条件によりCO/ギ酸選択性が変化することをうまく説明できない。そのため、証拠がないにもかかわらず、ギ酸錯体がカルボン酸錯体へ異性化するという機構まで提案されるに至った。[5] 我々も近年、*trans*(Cl)-Ru(bpy)(CO)₂Cl₂ (bpy: 2,2'-ビピリジン)を触媒とする光化学的CO₂還元反応において、生成物が触媒濃度に依存し、触媒濃度が高くなるとギ酸の一酸化炭素に対する選択性が高くなるという従来の考え方では説明できない現象を見出し、触媒反応中に生じるダイマー錯体が選択的にギ酸を生成する反応機構を提唱した。[6] この機構は、生成物選択性の触媒濃度依存性を説明することには成功したが、同錯体は還元条件下ではポリマー錯体となることが知られており、そのポリマー錯体がCOを選択的に生成するという報告とは相いれない。[7] また我々も、同じ錯体をメソポーラス有機シリカに担持した固体触媒の開発研究を行ったが、錯体触媒は担持により固定されており、ダイマー化できないと考えられるにもかかわらずギ酸の生成が認められるなど、必ずしもすべての系の説明には至っていない。[8]

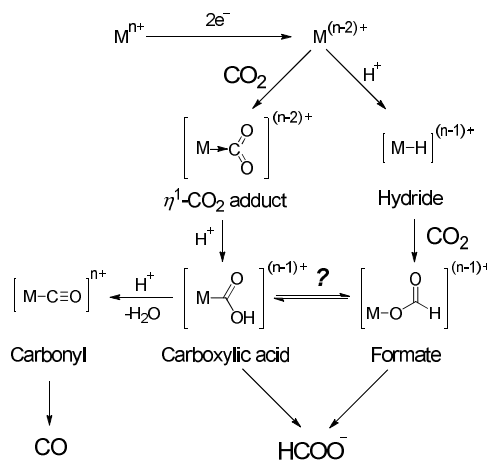


図1. 金属錯体によるCO₂還元触媒反応: COとギ酸生成機構.

以上のように、特にルテニウム錯体を触媒とするCO₂還元反応においては、生成物(CO/HCOO⁻)選択性を説明できる一般的な反応機構の理解が必要であり、我々は触媒構造の違いが反応、特に生成物選択性に及ぼす効果を検討することで、より反応を理解できるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、ルテニウム-ビピリジン錯体 *trans*(Cl)-Ru(bpy)(CO)₂Cl₂ の誘導体による光化学的CO₂還元反応を詳細に検討し、その反応機構について考察することを目的とする。とくにルテニウム錯体をペプチド鎖を用いて連結することで、ダイマー化を促進させ、生成物選択性がどのように変化するかを調べることを目的とする。金属錯体触媒のペプチド鎖による機能化により、異なる機能性金属錯体を自在に接続できると考えており、本研究を通して合成方法等を確立することにより、様々な機能性金属錯体を連結、協同化させることによって、人工光合成への応用が可能になると考えている。

3. 研究の方法

光化学的CO₂還元反応は、ルテニウムトリス(ビピリジン)錯体を光増感剤、1,4-ジヒドロニコチンアミド(BNAH)を電子源とし、触媒量のルテニウム錯体(Cat.)を溶解したCO₂飽和DMA/水(9:1)溶液中に可視光(> 400 nm)照射することによって行った(図2)。反応生成物は、ガスクロマトグラフィーで定量した。[9]

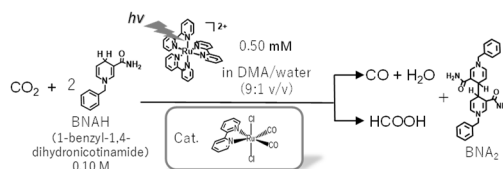


図2. ルテニウム錯体触媒による光化学的CO₂還元反応.

4. 研究成果

本研究では、ルテニウム錯体の置換基効果の基礎的情報を得るために、2,2'-ピピリジン配位子に2つのメチル基を導入した錯体について、導入位置が4,4'位、5,5'位、6,6'位の3つの異なる錯体を系統的に合成した(図3) [10] これらの錯体のうち、5,5'-ジメチル錯体(Ru5dmb)は新規化合物であり、単結晶構造解析結果も報告している。これら3種類のルテニウム錯体のうち、6,6'-ジメチル錯体(Ru6dmb)は最も活性が低いがCOを選択的に生成した。6,6'位に置換基を有する場合、立体障害から還元ダイマーを生成しないことから、ギ酸が生成しないことはダイマー錯体がギ酸生成の中間体となる機構と一致する結果である。一方、4,4'ならびに5,5'-ジメチル錯体(Ru4dmb, Ru5dmb)は触媒低濃度における活性は一致しており、COとギ酸の両方が生成した。興味深いことに、触媒高濃度条件ではRu5dmbのほうが高活性であることが示された。本研究では、CO₂還元触媒活性を光反応により評価している。触媒高濃度条件では光増感分子からの電子移動速度が律速になるため、触媒活性に依存せず同じ値をとるものと考えられていたが、Ru4dmbとRu5dmbの場合はその活性が異なる値を示した。このことは、光増感分子-触媒間の電子移動には逆電子移動過程が存在し、Ru5dmbの場合はRu4dmbよりも逆電子移動が抑えられているために、高濃度条件下では高活性に見えることを示している。この結果は、光触媒反応において逆電子移動過程を抑えることが重要であることを示しているだけでなく、触媒活性評価の際に濃度依存性など詳細に検討する必要があることを示している。

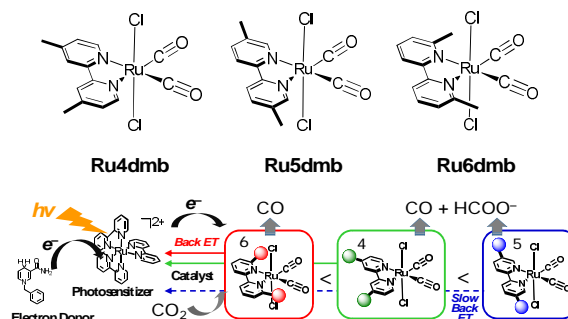


図3. メチル基を有するルテニウム-ピピリジン錯体: メチル基の導入位置が光化学的CO₂還元反応に及ぼす影響.

次に、最も逆電子移動が抑えられることが期待できる5,5'位にアミノ基およびカルボキシル基もつピピリジン型非天然アミノ酸(5Bpy)を配位子とするルテニウムペプチド錯体を合成した(図4)。非天然アミノ酸ならびにペプチドの合成は、既に報告した方法に準じて行った。[11-13] 図4に示した3種類のルテニウム錯体はいずれもCO₂還元触媒能を示し、COとギ酸を生成した。比較のために合成したルテニウム単核錯体による光化学的CO₂還元反応において触媒濃度依存性を調べたところ、無置換体と同様に生成物選択性の触媒濃度依存性が見られ、高濃度条件ではギ酸生成比が高くなることが示された。一方、ペプチド鎖で連結したルテニウム二核錯体では、実験可能な範囲内では生成物選択性の触媒濃度依存性は観測されなかった。このことは単核錯体がダイマーを形成する際には錯体濃度の2次比例すると考えられるのに対し、連結二核錯体の場合は錯体濃度の1次に比例するため、反応生成物選択性を示す速度論から濃度項が消えるためと議論している(論文準備中)。

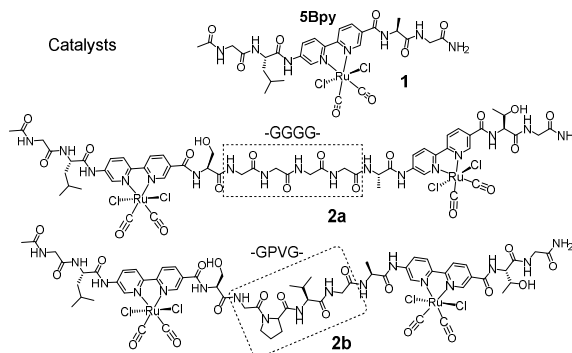


図4. ビピリジン型非天然アミノ酸を含むペプチドで架橋したルテニウム二核錯体.

以上の研究以外に、ルテニウム錯体の合成方法改良を検討し、2つの異なる2座配位子と2つの異なる単座配位子をもつ2種類の異性体対を初めて合成した。[14] また、近年は元素戦略の観点からマンガン錯体のCO₂還元触媒活性が注目されており、本研究においてもマンガン錯体による光化学的CO₂還元反応を検討し、本触媒反応系でもルテニウム錯体と同様に還元活性を示すことを見出した。今後は、マンガン錯体についてもペプチド連結錯体を合成し、その触媒活性を評価したいと考えている。

<引用文献>

- [1] 石谷・野崎・石田 『人工光合成: 光エネルギーによる物質変換の化学』 三共出版(2015).
- [2] Y. Kuramochi, O. Ishitani, H. Ishida, *Coord. Chem. Rev.*, **2018**, *373*, 333-356.
- [3] H. Ishida, K. Tanaka, T. Tanaka, *Organometallics*, **1987**, *6*, 181-186.
- [4] J. R. Pugh, M. R. M. Bruce, B. P. Sullivan, T. J. Meyer, *Inorg. Chem.*, **1991**, *30*, 86-91.
- [5] C. W. Machan, M. D. Sampson, C. P. Kubiak, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, 8564-8571.

- [6] Y. Kuramochi, J. Itabashi, K. Fukaya, A. Enomoto, M. Yoshida, H. Ishida, *Chem. Sci.*, **2015**, *6*, 3063-3074.
- [7] M. N. Collomb-Dunand-Sauthier, A. Deronzier, R. Ziessel, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1994**, 189-191.
- [8] Y. Kuramochi, M. Sekine, K. Kitamura, Y. Maegawa, Y. Goto, S. Shirai, S. Inagaki, H. Ishida, *Chem. Eur. J.*, **2017**, *23*, 10301-10309.
- [9] Y. Kuramochi, M. Kamiya, H. Ishida, *Inorg. Chem.*, **2014**, *53*, 3326-3332.
- [10] Y. Kuramochi, J. Itabashi, M. Toyama, H. Ishida, *ChemPhotoChem*, **2018**, *2*, 314-322.
- [11] H. Ishida, M. Kyakuno, S. Oishi, *Biopolymers (Peptide Science)*, **2004**, *76*, 69-82.
- [12] H. Ishida, Y. Maruyama, M. Kyakuno, Y. Kodera, T. Maeda, S. Oishi, *ChemBioChem*, **2006**, *7*, 1567-1570.
- [13] Y. Shiina, S. Oishi, H. Ishida, *Tetrahedron Lett.*, **2012**, *53*, 1249-1252.
- [14] M. Toyama, T. Takizawa, I. Morita, N. Nagao, Y. Kuramochi, H. Ishida, *Chem. Eur. J.*, **2019**, *25*, 16582-16590.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ishida Hitoshi, Machan Charles, Robert Marc, Iwasawa Nobuharu	4. 巻 8
2. 論文標題 Editorial: Molecular Catalysts for CO ₂ Fixation/Reduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2020.00059	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 該当する
1. 著者名 Toyama Mari, Takizawa Takako, Morita Itaru, Nagao Noriharu, Kuramochi Yusuke, Ishida Hitoshi	4. 巻 25
2. 論文標題 Syntheses and Characterization of a Pair of Isomers of Heteroleptic Bis(Bidentate) Ruthenium(II) Complexes with Two Different Monodentate Ligands	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 16582 ~ 16590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201903706	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 Itoh Kennosuke, Takashino Atsushi, Ohtsuka Atsushi, Kobe Mizuki, Sawamura Shunsuke, Kato Ryo, Hirayama Shigeto, Karaki Fumika, Mizuguchi Takaaki, Sato Noriko, Tokunaga Ken, Toda Yasunori, Suga Hiroyuki, Ishida Hitoshi, Fujii Hideaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Synthesis of 1,2,5 Oxadiazinane Derivatives by Photochemical Cycloaddition of Nitrones with Diaminomethanes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	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) 10.1002/cptc.202000004	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 Kuramochi Yusuke, Ishitani Osamu, Ishida Hitoshi	4. 巻 373
2. 論文標題 Reaction mechanisms of catalytic photochemical CO ₂ reduction using Re(I) and Ru(II) complexes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Coordination Chemistry Reviews	6. 最初と最後の頁 333 ~ 356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ccr.2017.11.023	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 石田 育	4. 巻 47
2. 論文標題 犠牲試薬ってなに？	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 カーボン・エネルギーコントロール社会協議会(CanApple)ニュース	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 石田 育、竹田 浩之	4. 巻 72
2. 論文標題 ICCC2018シンポジウム報告 : (S07) Molecular catalysts for CO2 fixation/reduction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bull. Jpn. Soc. Coord. Chem.	6. 最初と最後の頁 91-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Kuramochi Yusuke, Itabashi Jun, Toyama Mari, Ishida Hitoshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Photochemical CO2 Reduction Catalyzed by Trans(Cl)-[Ru(2,2 -bipyridine)(CO)2Cl2] Bearing Two Methyl Groups at 4,4 -, 5,5 - or 6,6 -Positions in the Ligand	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 314 ~ 322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cptc.201700201	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37件(うち招待講演 5件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Toshiya Motegi, Atsushi Ohtsuka, Chiaki Kojima, Jun Itabashi, Masaya Kamiya
2. 発表標題 Ruthenium-Peptide Conjugates for Photocatalytic CO2 Reduction toward Artificial Photosynthesis
3. 学会等名 3rd International Solar Fuels Conference (ISF-3), International Conference on Artificial Photosynthesis-2019 (ICARP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Yatsui, Yosuke Suzuki, Tatsuki Morimoto, Yuma Kato, Mamoru Yamamoto, Tomoko Yoshida, Nobuyuki Shimizu, Yuki Kataoka, Yuichi Negishi, Hitoshi Ishida, Kenji Iida
2. 発表標題 Enhancement of CO2 Reduction Using a Near-Field Excitation
3. 学会等名 3rd International Solar Fuels Conference (ISF-3), International Conference on Artificial Photosynthesis-2019 (ICARP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Toshiya Motegi, Atsushi Ohtsuka, Chiaki Kojima, Jun Itabashi, Masaya Kamiya
2. 発表標題 Metal-peptide conjugates for photocatalytic CO2 reduction toward artificial photosynthesis
3. 学会等名 The 56th Japanese Peptide Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田 暁, 内山 洋介, 山村 滋典, 石田 斉
2. 発表標題 ルテニウム(II)トリカルボニルダイマーのDMSO中における脱カルボニル化反応
3. 学会等名 錯体化学会第69回討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸 瑞季, 石田 斉
2. 発表標題 長鎖アルキル基を有するルテニウムトリス(ピピリジン)型錯体の合成: ミセル系における光電子移動反応
3. 学会等名 錯体化学会第69回討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 斉・小田 暁・大塚 敦史・小島 千明
2. 発表標題 人工光合成を目指した光化学的CO2還元分子触媒の開発
3. 学会等名 第13回バイオ関連化学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田 暁・小堀 誠友・大塚 敦史・内山 洋介・山村 滋典・石田 斉
2. 発表標題 ルテニウム-ピラジン-カルボニル錯体：低過電圧で働くCO2還元錯体触媒
3. 学会等名 第31回 配位化合物の光化学討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸瑞季, 石田 斉
2. 発表標題 長鎖アルキル基を有するルテニウム錯体触媒の合成：ミセル系における光化学的CO2還元反応を目指して
3. 学会等名 第31回 配位化合物の光化学討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Molecular CO2 Reduction Catalysts Applicable to Nanomaterials for Artificial Photosynthesis
3. 学会等名 International Congress on Advanced Materials Sciences and Engineering 2019 (AMSE-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Photocatalytic CO ₂ Reduction by Novel Ruthenium-Peptide Complexes
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on the Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds (ISPPCC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 斉、小島千明、大塚敦史、板橋 淳
2. 発表標題 ペプチド錯体触媒で人工光合成を目指す
3. 学会等名 第22回生命化学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Toward Artificial Photosynthesis: Photocatalytic CO ₂ Reduction by Ruthenium Complexes
3. 学会等名 Baltic Conference Series (BCS) Spring 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 斉・大塚敦史・小島千明・北村恭平・板橋淳・神谷将也
2. 発表標題 ルテニウム錯体による光化学的CO ₂ 還元触媒反応：人工光合成を目指して
3. 学会等名 第30回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚敦史・藤村多希・石田 斉
2. 発表標題 ルテニウム錯体の光還元二量化反応と光化学的CO ₂ 還元反応におけるCO/HCOO ⁻ 選択性
3. 学会等名 第30回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Seiyu Kobori, Atsushi Ohtsuka, Yosuke Uchiyama, Shigefumi Yamamura
2. 発表標題 Ruthenium 2,2'-Bipyrazine Dicarboxyldichloride: Synthesis, Crystal Structure, Electro- and Photochemical Characterization
3. 学会等名 錯体化学会第68回討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚 敦史, 石田 斉
2. 発表標題 ルテニウム二核ペプチド錯体による光化学的CO ₂ 還元反応におけるCO/ギ酸選択性
3. 学会等名 錯体化学会第68回討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Ruthenium-Peptide Conjugates for CO ₂ Reduction Catalysts toward Artificial Photosynthesis
3. 学会等名 the 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Ohtsuka, Taki Fujimura, Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Photochemical CO ₂ Reduction Catalyzed by Dinuclear Ruthenium Bipyridyl Complexes
3. 学会等名 the 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 斉・大塚敦史・小島千明・北村恭平・板橋 淳
2. 発表標題 ルテニウム錯体触媒による光化学的CO ₂ 還元反応機構における議論
3. 学会等名 2018年光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 斉・大塚 敦史・小島 千明・板橋 淳
2. 発表標題 ペプチド超分子光触媒による光化学的二酸化炭素還元反応
3. 学会等名 第12回バイオ関連シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Atsushi Ohtsuka, Chiaki Kojima, Jun Itabashi and Masaya Kamiya
2. 発表標題 Artificial Metal-Peptide Conjugates for Photocatalytic CO ₂ Reduction
3. 学会等名 10th International Peptide Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Photocatalytic CO ₂ Reduction by Ruthenium Bipyridyl Complexes toward Artificial Photosynthesis
3. 学会等名 The 10th Asian Photochemistry Conference (APC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 斉・大塚 敦史
2. 発表標題 ルテニウム二核ペプチド錯体によるCO ₂ 光還元触媒反応におけるCO/ギ酸選択性
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田 暁・小堀 誠友・大塚 敦史・内山 洋介・山村 滋典・石田 斉
2. 発表標題 Trans(Cl)-[Ru(2,2'-ピピラジン)(CO) ₂ Cl ₂] : 合成・構造とCO ₂ 還元触媒能
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 斉・佐藤裕亮
2. 発表標題 Trans(Cl)-Ru(bpy)(CO) ₂ Cl ₂ の光還元二量化反応
3. 学会等名 第29回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚敦史・松浦功祐・倉持悠輔・石田 斉
2. 発表標題 ペプチド架橋ルテニウム二核錯体による光化学的CO ₂ 還元触媒反応におけるCO / ギ酸選択性
3. 学会等名 第29回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千明・石田 斉
2. 発表標題 光増感部位二分子をペプチドで架橋した超分子光触媒の開発とCO ₂ 還元触媒能
3. 学会等名 第29回配位化合物の光化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田 斉・小島 千明・大塚 敦史・板橋 淳・神谷将也・倉持 悠輔
2. 発表標題 ルテニウム - ペプチド錯体による光化学的二氧化碳還元触媒反応
3. 学会等名 2017年光化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田 斉・小島 千明・大塚 敦史・板橋 淳・神谷 将也
2. 発表標題 人工ルテニウム - ペプチドによる光化学的CO ₂ 還元触媒反応
3. 学会等名 第11回バイオ関連化学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Yusuke Kuramochi, Masato Sekine, Kyohei Kitamura, Yoshifumi Maegawa, Yasutomo Goto, Soichi Shirai, Shinji Inagaki
2. 発表標題 Photocatalytic CO ₂ Reduction by Bipyridyl Periodic Mesoporous Organosilica (BPy-PMO) Containing Two Different Ruthenium Complexes as Photosensitizing and Catalytic Sites
3. 学会等名 錯体化学会第67回討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千明・石田 斉
2. 発表標題 光増感剤と触媒をペプチド鎖で接続した超分子光触媒による光化学的CO ₂ 還元反応
3. 学会等名 錯体化学会第67回討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚敦史・松浦功祐・倉持悠輔・石田 斉
2. 発表標題 ペプチド鎖で連結したルテニウム錯体触媒による光化学的CO ₂ 還元反応
3. 学会等名 錯体化学会第67回討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 Photocatalytic CO ₂ Reduction by Ruthenium Complexes: Toward Artificial Photosynthesis
3. 学会等名 Japan Italy Bilateral Symposium on Artificial Photosynthesis Using Metal Complexes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida
2. 発表標題 An applicable molecular CO ₂ reduction catalyst to nanomaterials for artificial photosynthesis
3. 学会等名 5th International Conference on Nanotechnology and Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Ishida, Chiaki Kojima, Atsushi Ohtsuka, Jun Itabashi, Masaya Kamiya, Yusuke Kuramochi
2. 発表標題 Synthesis of Novel Ruthenium-Peptide Complexes toward Artificial Metalloenzymes for Photochemical CO ₂ Reduction
3. 学会等名 第54回ペプチド討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚敦史・松浦功祐・倉持悠輔・石田 斉
2. 発表標題 ペプチド鎖で連結したルテニウム二核錯体： CO ₂ 光還元触媒反応における生成物 (CO/ギ酸) 選択性
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会(2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 斉・小島千明
2. 発表標題 ペプチド鎖で連結したルテニウム多核錯体： 光電子移動効率がCO ₂ 光還元触媒反応に及ぼす効果
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会(2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hitoshi Ishida	4. 発行年 2018年
2. 出版社 InTech	5. 総ページ数 25
3. 書名 Carbon Dioxide Chemistry	

〔産業財産権〕

〔その他〕

北里大学 理学部 化学科 反応機構学 石田 斉
<http://kerid-web.kitasato-u.ac.jp/Profiles/35/0003489/profile.html>

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