

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：22604

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24107003

研究課題名(和文)水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム

研究課題名(英文)Development of artificial photosynthetic system with efficient photocatalytic oxidation of water

研究代表者

井上 晴夫(Inoue, Haruo)

首都大学東京・都市環境科学研究科・特任教授

研究者番号：90087304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 95,200,000円

研究成果の概要(和文)：水を電子源とする人工光合成系を確立するために、自然に学び、超えるという姿勢で研究を実施した。天然の光合成、光化学系II(PSII)については、その構造を極低X線ドーズ量条件で初めてX線無損傷構造を明らかにした。さらに光合成水分解反応の鍵となるS2-S3中間状態遷移の反応を追跡し、水分子の挿入過程を初めて観測することに成功した。水を酸化する人工分子触媒の開発についてはコピキタス元素を用いた新奇分子触媒により一電子酸化で誘起される二電子酸化反応により過酸化水素が生成することを初めて見出した。また、新規二核ルテニウム(II)アコ錯体の合成に成功し、これが高い水の酸化触媒活性を示すことを見出した。

研究成果の概要(英文)：Construction of artificial photosynthetic system with water as an electron donor has been studied on the stand point of learning nature and trying to exceed her even in a limited function. The structure of PSII in natural photosynthetic system has been investigated by means of X-ray diffraction study to succeed in revealing an intact structure without any damage under the extremely small X-ray dose conditions. A dynamic behavior of PSII in the transition of S2-S3 has been clearly observed by transient FT-IR spectroscopy to find an insertion process of water molecule into the PSII Kok cycle. Novel molecular catalyst for oxidation of water to form two-electron oxidation product, hydrogen peroxide, initiated by one-electron oxidation of the catalyst has been developed for the first time. Novel type of di-nuclear Ru(II) complex with high reactivity of water oxidation was synthesized.

研究分野：光化学

キーワード：人工光合成 光合成 再生可能エネルギー 水の酸化 過酸化水素 X線回折構造解析 分子触媒 PSII

### 1. 研究開始当初の背景

人工光合成の中で最も重要でブレークスルーが必要なプロセスの一つは水の酸化による酸素の発生である。Meyer (1982) 等によるルテニウム 2 量体錯体の 4 電子化学酸化による酸素の発生の報告以来、光化学プロセスによる水の酸化への展開が期待されたが長い間、困難な状況が続いた。近年光化学プロセスによる酸素発生に関する報告が次々となされ新たな展開が期待される一方で、高効率化には依然として大きいブレークスルーが必要と考えられている。人工光合成の手本となる天然光合成による水の酸化過程の解明は人工光合成系の実現に大きい指針を与えると期待される。光合成、人工光合成の各分野において、世界を先導してきた実績を有する卓越した研究者群を組織化し、分野横断的なオープン・イノベーションを図ることで目的を鮮明にした新学術領域研究をスタートすることが望まれる。

### 2. 研究の目的

人工光合成研究領域の中で A02 班では、水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システムの開発：人工光合成の根幹の一つである「いかにして水を電子源に成し得るか？」に焦点を絞り、天然の光合成酸素発生中心の構造と機能を理解し、光合成色素、タンパク質、有機化学、錯体化学、半導体化学の英知を駆使して、天然の光合成と同等さらにはそれを超える機能を有する太陽光による水の酸化活性化触媒の開発に挑戦する。

### 3. 研究の方法

(1) 天然光合成 PSII の構造解明については独自に開発した結晶化方法により PSII 結晶を得た後、X 線回折構造解析により構造解明を行った。さらに PSII の動的反応挙動については過渡 FT-IR 吸収測定法により検討した。(2) 分子触媒の開発については、新規分子触媒の合成、キャラクタリゼーション、酸化還元特性、電気化学的酸化還元手法、光化学的酸化還元手法、光電気化学的酸化還元手法により検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 光化学系 II (PSII) の構造解明

PSII は天然の光合成において水を分解し大気中に酸素を放出している。その酸素発生クラスター (OEC) の詳細な立体構造は、2011 年に SPring-8 のビームラインを利用した X 線結晶構造解析により 1.9 Å の分解能で報告されたが、その後、X 線照射に伴う Mn 原子の還元により OEC の構造が「損傷」を受けていると指摘されることとなった。2015 年に岡山大学の研究グループは、パルス幅 10 fs の X 線を提供する自由電子レーザー (XFEL) を利用して「X 線損傷を受ける前の」構造を決定して報告した。しかしながらそれについてもなお、理論計算の研究グループからは

OEC 内の原子間距離が X 線還元により変化している可能性があるとの指摘が続いた。本研究では、試料となる PSII 結晶の同型性を高めて多数の試料を準備し、従来からの SPring-8 のビームラインを利用して、XFEL 実験から得られたものより分解能と測定精度の高い回折強度データを収集し、X 線還元による結合距離の変化がないインタクトな OEC の構造を世界で初めて明らかにした。多数の結晶から回折強度測定を行うことにより各結晶に照射される X 線の吸収線量当量 (ドース) を低下させ、かつ様々に変化させて結晶構造解析を行なった結果、OEC 内の原子間距離は一定の閾値 (0.1 MGy) 以下では変化しないことが判明した (Fig. 1)。0.1 MGy を十分に下回る 0.03 MGy の構造解析 (分解能 1.87 Å) では、XFEL 構造に対する理論計算グループからの疑念は解決され、また PSII 結晶を構成する 2 個のモノマーそれぞれの OEC 構造に明瞭な違いが見出された。これは PSII 内部に埋もれた OEC が、結晶内のパッキング環境の小さな違いによりその構造を微妙に変化させることを示唆している。これは、本来ハードな特性を持つ Mn 原子と酸素原子で構成された OEC が、水分解・酸素発生触媒として機能する際に要求される柔軟性を獲得するメカニズムを考察する上で極めて重要な知見を提供していると考えられる。

低 X 線ドースにおける光化学系 II の水分解・酸素発生中心の構造

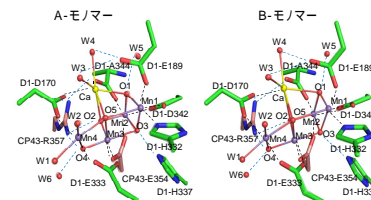


Fig. 1 結晶を構成する 2 個のモノマーの OEC 構造の重ね合わせ。0.03 MGy の X 線ドースで得られた構造を濃く、0.12 MGy の構造を薄く表示した。

#### (2) 光化学系 II の動的挙動

時間分解赤外分光法を用いて、光合成水分解反応の鍵となる S2-S3 中間状態遷移の反応を追跡し、電子、プロトン、水分子の移動の時間挙動を調べた。その結果、まず基質水分子が移動して Mn クラスターに挿入され、その後、プロトン放出を律速とするプロトン共役電子移動反応が起こることが示された (Fig. 2)。

時間分解赤外分光法による光合成水分解過程の解析

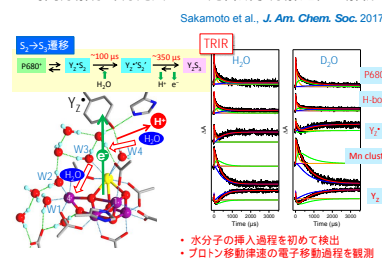


Fig. 2 時間分解 FTIR による光合成水分解過程の解析  
光化学系 II における水分解系周りのタンパ

ク質構造を取り込んだ量子力学 / 分子力学 (QM/MM) 計算により、Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> クラスターのアミノ酸配位子および近傍に存在する水分子クラスターの基準振動解析を行った。その結果、複数の水分子に非局在化した OH 伸縮振動が、水分解の際の速いプロトン放出を可能にすることが示された。また、Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> クラスターの実測赤外スペクトルのシミュレーションに初めて成功し、Mn と Ca を架橋するカルボキシル配位子が 共役上の電荷移動を介して水分子を活性化することが明らかとなった (Fig. 3)。

赤外分光法と量子化学計算による水分解系の構造・反応解析

Nakamura et al., *Biochemistry* 2016  
Nakamura and Noguchi, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016

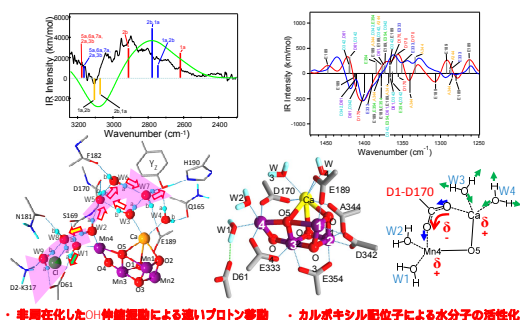


Fig. 3 FTIR スペクトルと QM/MM 基準振動解析

### (3) 新奇分子触媒の開発(1): ユビキタス元素を用いた分子触媒

人工光合成の構築とその社会実装には、複数の重要な鍵がある。最も重要なポイントは、

如何にして水を原料にできるか (如何にして水から電子を取り出すか)、希少元素を用いるのではなくアルミニウムのような資源豊富な汎用元素、ユビキタス元素を如何にして利用できるか、太陽光エネルギーの何パーセントを生成物中に蓄積、貯蔵できたかを評価する「エネルギー変換効率」を如何にして高くできるか、人工光合成反応の生成物としての水の酸化物 (一般的には酸素) と還元物 (水素) を如何にして安全に、かつ容易に分離し得るか、が挙げられる。本研究では、これら ~ を一挙に解決し得る有力な分子触媒として地球上、最も豊富に存在する金属であるアルミニウムを中心元素とする錯体の開発に成功した。人工光合成の実現には学術的には希薄な太陽光エネルギーの下で、分子触媒には間欠的に光が届く条件下で、多電子の移動を段階的に進行させなければならないという光子束密度条件問題と呼ばれる困難性がある。本研究では、この光子束密度条件を回避し得る方法として水分子を従来の 4 電子酸化ではなく、1 電子酸化で誘起される 2 電子酸化の方法を初めて開発した。新奇分子触媒アルミニウムポルフィリンが水分子の酸化分解反応を非常に反応性高く (TOF ~ 2. × 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>)、低い過電圧 (~97 mV) で進行させ、過酸化水素が生成することを見出した。またその詳細な分子機構を明らかにした (Fig. 4)。本研究論文は

ChemSusChem 誌、2017 年 5 月発行の表紙に紹介された。

## Oxidation of water to form H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

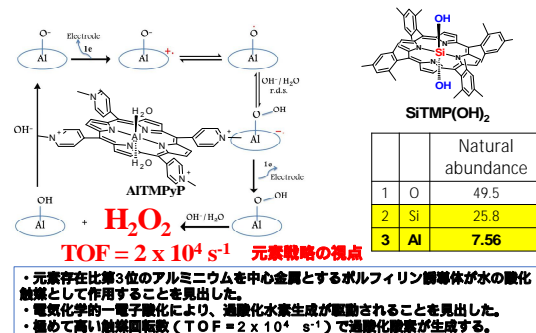


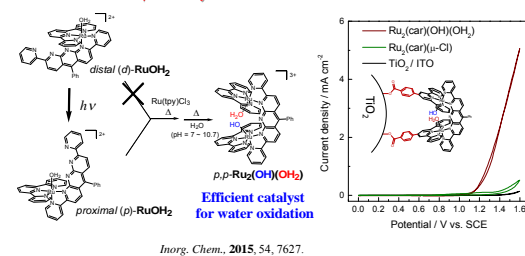
Fig. 4 アルミニウムポルフィリンによる水分子の 2 電子酸化

### (4) 新奇分子触媒の開発(2): Ru 錯体触媒 独自に見出した *distal*-[Ru(tpy)L(OH<sub>2</sub>)]<sup>2+</sup>

( tpy = 2,2': 6', 2''-terpyridine, L = 5-phenyl-2,8-Bis(2- pyridyl)-anthylidine) の *proximal*-[Ru(tpy)L(OH<sub>2</sub>)]<sup>2+</sup> への光異性化反応を利用して、新規二核 Ru 錯体 *proximal, proximal*-[Ru<sub>2</sub>(tpy)<sub>2</sub>L(OH)(OH<sub>2</sub>)]<sup>2+</sup> ( *p,p*-Ru<sub>2</sub>(OH)(OH<sub>2</sub>) ) の合成に成功した。さらに、 *p,p*-Ru<sub>2</sub>(OH)(OH<sub>2</sub>) が均一水溶液系で高い水の酸化触媒活性を示すことを見出した。さらに進んで、ベンジルカルボン酸リンカーを導入した二核 Ru 錯体 *proximal, proximal*-[Ru<sub>2</sub>(car-tpy)<sub>2</sub>L(OH)(OH<sub>2</sub>)]<sup>2+</sup> ( car-tpy = 4'-(4- carboxylphenyl)-2,2':6',2''-terpyridine ( *p,p*-Ru<sub>2</sub>(car)(OH)(OH<sub>2</sub>) ) を合成し、TiO<sub>2</sub> 電極上で 1.1 V から水の酸化に基づく触媒電流が観察された。1.6 V vs SCE における触媒電流は、TiO<sub>2</sub> 電極および μ-Cl 架橋錯体 *proximal, proximal*-[Ru<sub>2</sub>(tpy)<sub>2</sub>L(μ-Cl)]<sup>2+</sup> ( *p,p*-Ru<sub>2</sub>(car)(μ-Cl) ) と比べて、それぞれ約 36 倍および 9.5 倍高い値を示した。このように、 *p,p*-Ru<sub>2</sub>(car)(OH)(OH<sub>2</sub>) が TiO<sub>2</sub> 電極表面で効果的に水の酸化触媒として働くことを明らかにした (Fig. 5)。

## Synthetic Models of Photosynthetic Oxygen Evolving Center Using Metal Complexes and Nanoparticles

Dihydrochloride Ru complex catalyst



*Inorg. Chem.*, 2015, 54, 7627.

Fig. 5 新奇二核 Ru 錯体による水の酸化

## 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 121 件)

1) S. Uto, K. Kawakami, Y. Umena, M. Iwai, M.

- Ikeuchi, J.-R. Shen and N. Kamiya, Mutual relationships between structural and functional changes in a PsbM-deletion mutant of photosystem II, *Faraday Discuss.* 2017 in press. 査読有 DOI: 10.1039/C6FD00213G
- 2) Ayako Tanaka, Yoshimasa Fukushima, Nobuo Kamiya, N. Kamiya, Two different structures of the oxygen-evolving complex in the same polypeptide frameworks of photosystem II. *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139, 1718-1721. 査読有 DOI:10.1021/jacs.6b09666
- 3) H. Sakamoto, T. Shimizu, R. Nagao, T. Noguchi, Monitoring the reaction process during the S2→S3 transition in photosynthetic water oxidation using time-resolve infrared spectroscopy. *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139, 2022-2029. 査読有 DOI: 10.1021/jacs.6b11989
- 4) M. Suga, F. Akita, M. Sugahara, M. Kubo, Y. Nakajima, T. Nakane, K. Yamashita, M. Nakabayashi, Y. Umena, T. Yamane, T. Nakano, M. Suzuki, T. Masuda, S. Inoue, T. Kimura, T. Nomura, S. Yonekura, L.-J. Yu, T. Sakamoto, T. Motomura, J.-H. Chen, Y. Kato, T. Noguchi, K. Tono, Y. Joti, T. Kameshima, T. Hatsui, E. Nango, R. Tanaka, H. Naitow, Y. Matsuura, A. Yamashita, M. Yamamoto, O. Nureki, M. Yabashi, T. Ishikawa, S. Iwata, J.-R. Shen, Light-induced structural changes and the site of O=O bond formation in PSII caught by XFEL. *Nature*, 2017, 543, 131-135. 査読有 DOI: 10.1038/nature21400
- 5) F. Kuttassery, S. Mathew, S. Sagawa, S. N. Remello, A. Thomas, D. Yamamoto, S. Onuki, Y. Nabetani, H. Tachibana, H. Inoue, One Electron-Initiated Two-Electron Oxidation of Water by Aluminum Porphyrins with Earth's Most Abundant Metal. *ChemSusChem.*, 2017, 10, 1909-1915. (Front cover page.) 査読有 DOI: 10.1002/cssc.201700322
- 6) M. Hirahara, M. Yagi, Photoisomerization of ruthenium(II) aquo complexes: mechanistic insight and application development. *Dalton Trans.*, 2017, 3787-3799 査読有 DOI: 10.1039/C7DT00079K
- 7) K. Aiso, R. Takeuchi, T. Masaki, D. Chandra, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, Carbonate ions induce highly performed electrocatalytic water oxidation by cobalt oxyhydroxide nanoparticles. *ChemSusChem.*, 2017, 10, 687-692. 査読有 DOI: 10.1002/cssc.201601494
- 8) Y. Kato, R. Ishii, T. Noguchi, Comparative analysis of the interaction of the primary quinone QA in intact and Mn-depleted photosystem II membranes using light-induced ATR-FTIR spectroscopy. *Biochemistry*, 2016, 55, 6355-6358. 査読有 DOI: 10.1021/acs.biochem.6b01052
- 9) Y. Nabetani, A. Uchikoshi, S. Miyajima, S. Z. Hassan, V. Ramakrishnan, H. Tachibana, M. Yamato, H. Inoue, Synthesis of Double-wall Nanoscroll Intercalated with Polyfluorinated Cationic Surfactant into Layered Niobate and their Magnetic Alignment. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, 18, 12108-12114. 査読有 DOI:10.1039/c6cp01547f
- 10) M. Hirahara, A. Tsukamoto, H. Goto, S. Tada, M. Yagi, Y. Umemura, Visible-light-induced morphological changes of giant vesicles by photoisomerization of a ruthenium aqua complex. *Chem. Eur. J.*, 2016, 22, 2590-2594. 査読有 DOI: 10.1002/chem.201504249
- 11) M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Umena, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen, T. Nakajima, K. Yamaguchi, Theoretical Modeling of Biomolecular Systems I. Large Scale QM/MM Calculations of Hydrogen Bonding Networks of Oxygen Evolving Complex of Photosystem II. *Mol. Phys.*, 2015, 113, 359-384. 査読有 DOI: 10.1080/00268976.2014.960021
- 12) S. Nakamura, T. Noguchi, Infrared detection of a proton released from tyrosine YD to the bulk upon its photo-oxidation in photosystem II. *Biochemistry*, 2015, 54, 5045-5053. 査読有 DOI: 10.1021/acs.biochem.5b00568
- 13) S. N. Remello, F. Kuttassery, T. Hirano, Y. Nabetani, D. Yamamoto, S. Onuki, H. Tachibana, H. Inoue, Synthesis of Water-soluble Silicon-porphyrin: Protolytic behaviour of axially coordinated hydroxy groups. *Dalton Trans.*, 2015, 44, 20011-20020. 査読有 DOI: 10.1039/C5DT03654B
- 14) M. Hirahara, S. Nagai, K. Takahashi, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, New series of dinuclear ruthenium(II) complexes synthesized using photoisomerization for efficient water oxidation catalysis. *Inorg. Chem.*, 2015, 54, 7627-7635. 査読有 DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b01264
- 15) D. Chandra, N. Abe, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, Open pore architecture of an ordered mesoporous IrO<sub>2</sub> thin film for highly efficient electrocatalytic water oxidation. *ChemSusChem.*, 2015, 8, 795-799. 査読有 DOI: 10.1002/cssc.201402911
- 16) S. Nakamura, R. Nagao, R. Takahashi, T. Noguchi, Fourier transform infrared detection of a polarizable proton trapped between photooxidized tyrosine YZ and a coupled histidine in photosystem II: Relevance to the proton transfer mechanism of water oxidation. *Biochemistry*, 2014, 53, 3131-3144. 査読有 DOI: 10.1021/bi500237y
- 17) Y. Kou, S. Nakatani, G. Sunagawa, Y. Tachikawa, D. Masui, T. Shimada, S. Takagi, D. A. Tryk, Y. Nabetani, H. Tachibana, H. Inoue, Visible light-induced reduction of carbon dioxide sensitized by a porphyrin-rhenium dyad metal complex on p-type semiconducting NiO as the reduction terminal end of an artificial photosynthetic system. *J. Catalysis*, 2014, 310, 57-66. 査読有 DOI:10.1016/j.jcat.2013.03.05
- 18) Y. Kou, Y. Nabetani, D. Masui, T. Shimada, S. Takagi, H. Tachibana, H. Inoue, Direct Detection of Key Reaction Intermediates in Photochemical CO<sub>2</sub> Reduction Sensitized by a Rhenium Bipyridine Complex. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136, 6021-6030. 査読有 dx.doi.org/10.1021/ja500403e
- 19) M. Sugiura, K. Koyama, Y. Umena, K. Kawakami, J.-R. Shen, N. Kamiya, A. Boussac, Evidence for an Unprecedented Histidine Hydroxyl Modification on D2-His336 in Photosystem II of *Thermosynechococcus vulcanus* and *Thermosynechococcus elongatus*. *Biochemistry*, 2013, 52, 9426-943. 査読有 dx.doi.org/10.1021/bi401213m
- 20) K. Saito, Y. Umena, K. Kawakami, J. -R. Shen, N. Kamiya, H. Ishikita, Deformation of chlorin rings in the photosystem II crystal structure. *Biochemistry*, 2012, 51, 4290-4299. 査読有 DOI: 10.1021/bi300428s

〔学会発表〕(計 544 件)

- 1) 招待講演, H. Inoue, F. Kuttassery, S. Mathew, S. N. Remello, A. Thomas, D. Yamamoto, S. Onuki, Y. Nabetani, H. Tachibana, 水の酸化の新展開, 日本化学会第97春季年会 中長期シンポジウム 人工光合成 2017 慶應義塾大学(神奈川県横浜市), 2017/3/16.
- 2) 招待講演, 八木政行, 人工光合成のための水の酸化アノード, 日本化学会 第97 春季年会 化学が拓くエネルギー A.イノベーション実用化を志向した太陽光エネルギー変換の最新技術, 慶應義塾大学(神奈川県横浜市) 2017/3/17
- 3) 招待講演, N. Kamiya, Ayako Tanaka, Shohei Daikou, Keisuke Kawakami, and Masayoshi Fukushima, FLEXIBILITY AND PH-DEPENDENCE OF OXYGEN-EVOLVING COMPLEX IN PHOTOSYSTEM II FOUND AT EXTREMELY LOW X-RAY DOSES, International Conference on Artificial Photosynthesis 2017, 立命館大学(京都府京都市) 2017/3/3.
- 4) 招待講演, H. Inoue, F. Kuttassery, S. Mathew, S. N. Remello, A. Thomas, D. Yamamoto, S. Onuki, Y. Nabetani, H. Tachibana, ONE-ELECTRON INITIATED TWO-ELECTRON OXIDATION OF WATER CATALYZED BY MOLECULAR CATALYSTS COMPOSED OF EARTH ABUNDANT ELEMENTS, International Conference on Artificial Photosynthesis 2017, 立命館大学(京都府京都市) 2017/3/4.
- 5) 招待講演, N. Kamiya, Two alternative structures of oxygen-evolving complex in photosystem II found by X-ray crystallography at extremely low doses, International Conference on Applied Crystallography, Houston (USA), 2016/10/18.
- 6) 基調講演, H. Inoue, One-electron Initiated Two-electron Oxidation of Water Catalyzed by Aluminum Porphyrins, Incorporating Earth's Most Abundant Metal as the Central Ion, PRiME 2016, Honolulu (USA), 2016/10/6.
- 7) 招待講演, H. Inoue, Two-Electron Oxidation of Water Catalyzed by Earth Abundant Molecular Catalysts, UK-Japan Solar Driven Fuel Synthesis Workshop: Materials, Understanding and Reactor Design, 英国大使館(東京都千代田区) 2016/6/23.
- 8) 招待講演, M. Yagi, Synthetic models of photosynthetic oxygen evolving center based on metal complexes and nanoparticles, 2nd International Symposium on Chemical Energy Conversion Processes (ISCECP-2) 九州大学(福岡県福岡市) 2016/5/22.
- 9) 招待講演, T. Noguchi, Mechanism of photoreactions in the photosynthetic water-oxidizing enzyme, photosystem II, studied by infrared spectroscopy, 2016年度光化学討論会, 東京大学(東京都目黒区) 2016/9/6.
- 10) 招待講演, 神谷信夫, 光合成から人工光合成へ, CSJ 化学フェスタ, タワーホール船堀(東京都江戸川区) 2016/11/15.
- 11) 招待講演, 神谷信夫, 光合成で水分解・酸素発生を行う PSII の機構および人工光合成, エネルギー工学研究会, エルイン京都(京都府京都市) 2015/5/15.
- 12) 招待講演, T. Noguchi, Shin Nakamura, Ryo Nagao, Role of Tyrosine YZ in proton-coupled electron transfer of water oxidizing reaction in photosystem II, The 7th Asia and Oceania Conference on Photobiology, Academia Sinica, Taipei (Taiwan), 2015/11/17.
- 13) 特別講演, H. Inoue, How can we get through the Bottle Neck in Artificial Photosynthesis? An Alternative Route of Water Oxidation, the 3rd International Symposium on the Photofunctional Chemistry of Complex Systems, Maui (USA), 2015/12/12.
- 14) 招待講演, D. Chandra, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, Nanoarchitectures of mesoporous metal oxides using a block-copolymer template for efficient solar driven and electrocatalytic water splitting, 2015 Asian International Symposium, 日本大学(千葉県船橋市) 2015/3/26.
- 15) 招待講演, M. Yagi, Development of nanostructured metal oxide semiconductor photoanodes for efficient visible-light-driven water oxidation, 11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications, Vancouver (Canada), 2015/6/15.
- 16) 招待講演, 神谷信夫, エネルギー創成と結晶, 結晶学会, 東京大学(東京都文京区), 2014/11/1.
- 17) 招待講演, T. Noguchi, The mechanism of photosynthetic water oxidation in photosystem II and the application to artificial photosynthesis, International Conference on Artificial Photosynthesis 2014, 兵庫県立淡路夢舞台国際会議場(兵庫県淡路市) 2014/11/28.
- 18) 招待講演, M. Yagi, Newly synthesized dinuclear ruthenium complexes with variable bridged and non-bridged oxos as an active catalyst for water oxidation, Molecules and Materials for Artificial Photosynthesis Conference, Cancun (Mexico), 2014/2/7.
- 19) 招待講演, T. Noguchi, FTIR study of photosynthetic water oxidation and application to artificial photosynthesis, 日本分光学会国際シンポジウム「分光学の太陽電池・天然/人工光合成への応用」, 大阪大学(大阪府吹田市) 2013/11/20.
- 20) 招待講演, T. Noguchi, Infrared monitoring of reactions in photosystem II, Gordon Research Conference: Photosynthesis, Davidson College, Davidson (USA), 2012/7/9.

〔図書〕(計 27 件)

- 1) 井上晴夫監修, 講談社, 「人工光合成とは何か」, 2016年, 238 ページ.

〔産業財産権〕

出願状況(計 4件)

1)名称:メソポーラス酸化タンゲステン及びその製造方法、光触媒、並びにメソポーラス酸化タンゲステン電極

発明者:八木政行, Debraj Chandra

権利者:新潟大学

種類:特許

番号:特願 2013-194449

出願年月日:2013/9/19

国内外の別:国内

2)名称:酸化触媒

発明者:井上晴夫、立花宏、鍋谷悠、ファザールラーマン・クッタセリー、佐川正悟、小貫聖美

権利者:首都大学東京

種類:特許

番号:特願 2013-141776(P2013-141776)

出願年月日:2013/7/5

国内外の別:国内

3)名称:メソポーラス酸化イリジウム及びその製造方法、水の酸化触媒、並びにメソポーラス酸化イリジウム電極

発明者:八木政行, 平原将也

権利者:新潟大学

種類:特許

番号:特願 2012-222615

出願年月日:2012/10/5

国内外の別:国内

4)名称:水の酸化触媒、過酸化水素の製造方法、及び過酸化水素製造用キット

発明者:八木政行, 平原将也

権利者:新潟大学

種類:特許

番号:特願 2012-205867

出願年月日:2012/9/19

国内外の別:国内

[その他]

メディアへの出演、紹介など 43件

アウトリーチ 活動 30件

共同研究 42件

ホームページ等

<http://artificial-photosynthesis.net/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 晴夫 (Inoue Haruo)

首都大学東京・都市環境科学研究科・特任教授

研究者番号:90087304

(2)研究分担者

八木 政行 (Yagi Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号:00282971

神谷 信夫 (Kamiya Nobuo)

大阪市立大学・複合先端研究機構・教授

研究者番号:60152865

野口 巧 (Noguchi Takumi)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号:60241246