

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 ~ 2012

課題番号：21370063

研究課題名（和文）

赤外分光法による光合成水分解反応の分子メカニズムの解明

研究課題名（英文） Elucidation of the molecular mechanism of photosynthetic water oxidation by means of infrared spectroscopy

研究代表者

野口 巧 (NOGUCHI TAKUMI)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：60241246

研究成果の概要（和文）：光誘起フーリエ変換赤外（FTIR）差スペクトル法を用いて、光合成水分解反応について解析を行い、各中間状態遷移におけるプロトン放出数、各遷移の効率、Mnクラスター近傍に存在するアミノ酸の構造と役割、水分解反応への阻害剤の効果、表在性蛋白質による制御機構、などについて明らかにした。また、時間分解赤外法を用いて水分解反応における電子・プロトン移動反応について調べ、酸素が放出される $S_3 \rightarrow S_0$ 遷移においては、電子移動の前にプロトン放出が起こる実験的証拠を得た。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the molecular mechanism of photosynthetic water oxidation using light-induced Fourier transform infrared difference spectroscopy and revealed the number of protons released upon individual intermediate transitions, the efficiencies of transitions, the structures and the roles of amino-acids coupled to the Mn cluster, the effect of an inhibitor on water oxidation reactions, and the regulation mechanism by extrinsic proteins. We also studied proton-coupled electron transfer in the water oxidation reaction using time-resolved infrared spectroscopy and obtained experimental evidence that proton is released before the electron transfer in the $S_3 \rightarrow S_0$ transition, in which molecular oxygen is evolved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：生物科学・生物物理学

キーワード：(1) 光合成 (2) 水分解 (3) 酸素発生 (4) 振動分光 (5) 赤外分光

1. 研究開始当初の背景

地球上の生命の生存を支えている大気中の酸素は、植物及びシアノバクテリアが行う光合成水分解反応によって供給される。この反応は、光化学系II蛋白質複合体に存在する、いわゆるマンガンクラスターにおいて行われているが、その分子メカニズムはほとんど

不明であった。特に、基質水分子に関しては、マンガンクラスターにおける結合位置、各中間状態での構造などの情報がほとんどなく、また、 O_2 形成直前の過渡的中間状態である S_4 状態の実体も不明であった。これまで水分解反応の解析が進まなかった最大の理由は、溶媒である水の中で基質水分子のみを検出

するのが極めて困難なことであった。しかし、申請者のそれまでの研究により、フーリエ変換赤外 (FTIR) 法を用いて、マンガクラーター近傍の蛋白質に加え、水分子の構造・反応を調べることが可能になっていた。

2. 研究の目的

本研究では、赤外分光法を用いて、光合成水分解・酸素発生反応のメカニズムを原子・分子レベルで解明することを目的とする。そのため、光誘起フーリエ変換赤外 (FTIR) 差スペクトル法を用いて、マンガクラーターと相互作用する蛋白質および基質水分子の動きを検出し、それらの反応を逐次追跡することによって、反応プロセス全体を明らかにする。また、時間分解赤外法を用いて、水分解反応における電子・プロトン移動および蛋白質反応の時間挙動を調べ、反応メカニズムの詳細を解明する。特に、 O_2 形成直前の過渡的中間状態の実体及び基質中間体の構造明らかにする。本研究の成果は、太陽光エネルギーによる人工水分解デバイスや人工光合成系の開発のための基盤的知見を与える。

3. 研究の方法

シアノバクテリア (*Thermosynechococcus elontgatus* および *Synechocystis* sp. PCC 6803) より調製した光化学系 II 蛋白質およびハウレンソウ由来の光化学系 II 膜標品を用いて研究を行った。スペクトルの詳細解析のため、アミノ酸選択的同位体置換や特定のアミノ酸残基に部位特異的変異を施した光化学系 II 蛋白質を用いた。また、表在性蛋白質の機能を調べるため、変異導入した表在性蛋白質 PsbP を再構成した光化学系 II 試料を用いた。

これらの光化学系 II 試料について、光誘起フーリエ変換赤外 (FTIR) 差スペクトルおよび全反射吸収赤外 (ATR-FTIR) スペクトルを測定し、水分解反応における蛋白質および基質水分子の構造変化を検出した。また、時間分解赤外分光法を新たに導入して、各中間状態遷移における電子移動、プロトン移動反応、および蛋白質のダイナミクスを調べた。

4. 研究成果

(1) プロトン放出機構の解明

水分解反応の光駆動中間状態サイクルにおけるプロトン放出過程を調べるため、フーリエ変換赤外 (FTIR) 法を用いた新たなプロトン検出法を開発した。高濃度の Mes 緩衝液に水分解によるプロトンをトラップさせその Mes のプロトン化反応を FTIR 差スペクトルで観測した。その結果、水分解過程におけるプロトン放出パターンは 4 つの中間状態遷移でほぼ 1:0:1:2 となることが示された。

(2) 水分解反応における近傍アミノ酸側鎖

の役割

シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 の CP43-E354Q 部位特異変異体を用いて水分解系の FTIR 差スペクトルを測定することにより、CP43-E354 は Mn 原子への配位子の一つであることが示された。また、アルギニン側鎖のグアニジウム基を ^{13}C , ^{15}N などで同位体置換した光化学系 II を用いて FTIR 解析を行った。その結果、マンガクラーターと直接相互作用する Arg 残基の存在を確かめ、それが S_1 , S_2 状態においてプロトン化構造を持っていることが明らかとなった。さらに、偏光 ATR-FTIR 法を用い、光化学系 II 膜標品中のマンガクラーターのアミノ酸配位子の構造を調べた。その結果、反応に関与する Asp, Glu, C 端由来のカルボキシル基の配向構造、及びその変化に関する知見を得た。

(3) 水分解反応における阻害剤の効果

光合成水分解反応は基質アナログであるアンモニアによって阻害されることが知られているが、その分子機構は不明であった。そこで、アンモニア阻害の分子機構を、酸素発生阻害の pH 依存性の測定と光誘起 FTIR 差スペクトル法を用いて調べた。その結果、pH7 以下の酸性領域ではアンモニウムイオン NH_4^+ が阻害剤として働くこと、 NH_4^+ がマンガクラーター近傍のカルボキシル基と相互作用することによって阻害が起こること、などが明らかとなった。

(4) 表在性蛋白質による水分解反応の制御機構

FTIR 法を用いて表在性蛋白質の酸素発生反応への関与について調べた。表在性蛋白質 PsbP, PsbQ, PsbO を除去・再構成した光化学系 II 試料、また、様々な部位特異的変異を施した PsbP 蛋白質を再構成した試料を用いて、その相互作用部位および水分解系の構造への効果を FTIR 法を用いて調べた。その結果、PsbP の脱着によってのみ水分解系の蛋白質二次構造が変化すること、PsbP の N 末端及び H144 近傍がコア蛋白質への結合に関与することが示された。また、PsbP が適切に結合することにより、水分解系の蛋白質二次構造が変化し、水分解系の構成要素である Ca^{2+} および Cl^- の結合が安定化することが明らかとなった。さらに、PsbQ は単独では水分解能に寄与しないが、PsbP の結合を補助する役割を持ち、それによって水分解反応を制御していることが示された。

(5) 中間状態遷移の量子効率の測定

閃光誘起フーリエ変換赤外 (FTIR) 差スペクトル法を用いて、人工電子受容体として添加したフェリシアン化物イオンの反応を追跡し、光化学系 II 蛋白質中の電子移動反応の量子効率を調べた。その閃光数依存性から、光合成水分解反応の各中間状態遷移 ($S_0 \rightarrow S_1$, $S_1 \rightarrow S_2$, $S_2 \rightarrow S_3$, $S_3 \rightarrow S_0$) のミスファクター

(次の中間状態に遷移しなかった水分解中心の割合)を見積もる新たな手法を開発した。この手法を用いてシアノバクテリア及びホウレンソウの水分解反応を解析した結果、ミスファクターは $S_0 \rightarrow S_1 \approx S_1 \rightarrow S_2 < S_2 \rightarrow S_3 < S_3 \rightarrow S_0$ の順に大きくなり、酸素が放出される $S_3 \rightarrow S_0$ 遷移において最大となることが示された。

(6) 酸素発生系における過渡的中間体の時間分解赤外測定

T. elongatus より単離・精製した光化学系 II コア蛋白質複合体に、連続した閃光照射 (2 Hz) を与え、その際の赤外吸収変化をマイクロ秒からミリ秒オーダーで追跡した。1400 cm^{-1} の赤外吸収変化によって蛋白質中の Asp, Glu 由来のカルボキシル基 (COO^-) の動きを、また、2500 cm^{-1} の吸収変化によって、水素結合ネットワークにおける高いプロトン分極を持つ水素原子の動きを検出した。その結果、酸素が放出される $S_3 \rightarrow S_0$ 遷移において、マンガククラスターからチロシンラジカル (Y_Z^-) への電子移動に先立つ約 200 μs のいわゆる “lag time” においてプロトン放出を示唆する大きなプロトンの動きが観測された。また、 $S_1 \rightarrow S_2$ 遷移においては、共役したプロトン移動と電子移動が、 $S_2 \rightarrow S_3$ 遷移においてはマンガククラスターから Y_Z^- への電子移動よりも速いプロトン移動が観測された。一方、 $S_0 \rightarrow S_1$ 遷移では、カルボキシル基の約 1 ms のゆっくりとした構造変化が観測され、 S_1 状態における蛋白質の緩和過程を示すと解釈された。本研究は水分解反応における蛋白質及びプロトンの動きを時間分解赤外法で示した初めての研究であり、この手法が水分解機構の解明に極めて有効であることを示した。

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 24 件)

- (1) K. Hasegawa and T. Noguchi, Molecular interactions of the quinone electron acceptors Q_A , Q_B and Q_C in photosystem II as studied by the fragment molecular orbital method, *Photosynth. Res.* in press. (査読有)
DOI:10.1007/s11120-012-9787-9
- (2) T. Noguchi, Monitoring the reactions of photosynthetic water oxidation using infrared spectroscopy, *Biomedical Spectroscopy and Imaging* 2, 115-128 (2013). (査読有) DOI:10.3233/BSI-130040
- (3) H. Suzuki, M. Sugiura, and T. Noguchi, Determination of the miss probabilities of individual S-state transitions during photosynthetic water oxidation by monitoring electron flow in photosystem II using FTIR spectroscopy, *Biochemistry* 51, 6776-6785 (2012). (査読有) DOI:10.1021/bi300708a
- (4) K. Ido, S. Kakiuchi, C. Uno, T. Nishimura, Y. Fukao, T. Noguchi, F. Sato, and K. Ifuku, Structure around conserved His144 and Asp165 in the PsbP protein is important for the interaction between its N-terminus and the Cyt b559 subunit of photosystem II, *J. Biol. Chem.* 287, 26377-26387 (2012). (査読有) DOI:10.1074/jbc.M112.385286
- (5) T. Noguchi, H. Suzuki, M. Tsuno, M. Sugiura, and C. Kato, Time-resolved infrared detection of the proton and protein dynamics during photosynthetic oxygen evolution, *Biochemistry* 51, 3205-3214 (2012). (査読有)
DOI:10.1021/bi300294n
- (6) S. Kakiuchi, C. Uno, K. Ido, T. Nishimura, T. Noguchi, K. Ifuku, and F. Sato, The PsbQ protein stabilizes the functional binding of the PsbP protein to photosystem II in higher plants, *Biochim. Biophys. Acta* 1817, 1346-1351 (2012). (査読有)
DOI:10.1016/j.bbabi.2012.01.009
- (7) T. Noji, H. Suzuki, T. Gotoh, M. Iwai, M. Ikeuchi, T. Tomo, and T. Noguchi, Photosystem II-gold nanoparticle conjugate as a nano-device for the development of artificial light-driven water-splitting systems, *J. Phys. Chem. Lett.* 2, 2448-2452 (2011). (査読有)
DOI:10.1021/jz201172y
- (8) I. Idedan, T. Tomo, and T. Noguchi, Herbicide effect on the photodamage process of photosystem II: Fourier transform infrared study, *Biochim. Biophys. Acta* 1807, 1214-1220 (2011). (査読有)
DOI:10.1016/j.bbabi.2011.06.006
- (9) H. Ishikita, K. Hasegawa, and T. Noguchi, How does the Q_B site influence propagate to the Q_A site in Photosystem II? *Biochemistry* 50, 5436-5442 (2011). (査読有) DOI: 10.1021/bi102023x
- (10) M. Tsuno, H. Suzuki, T. Kondo, H. Mino, and T. Noguchi, Interaction and inhibitory effect of ammonium cation in the oxygen evolving center of photosystem II, *Biochemistry* 50, 2506-2514 (2011). (査読有)
DOI:10.1021/bi101952g
- (11) Y. Shimada, H. Suzuki, T. Tsuchiya, M. Mimuro, and T. Noguchi, Structural

- coupling of an arginine side chain with the oxygen evolving Mn₄Ca cluster in photosystem II as revealed by isotope-edited Fourier transform infrared spectroscopy, *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 3808-3811 (2011). (査読有)
DOI:10.1021/ja200186h
- (12) T. Ishizuka, A. Kamiya, H. Suzuki, R. Narikawa, T. Noguchi, T. Kohchi, K. Inomata, and M. Ikeuchi, The cyanobacteriochrome, TePixJ, isomerizes its own chromophore by converting phycocyanobilin to phycoviolobilin, *Biochemistry* **50**, 953-961 (2011). (査読有)
DOI:10.1021/bi101626t
- (13) R. Takahashi, K. Hasegawa, A. Takano, and T. Noguchi, The structures and binding sites of phenolic herbicides in the Q_b pocket of photosystem II, *Biochemistry* **49**, 5445-5454 (2010). (査読有) DOI:10.1021/bi100639q
- (14) M. Sugiura, Y. Kato, R. Takahashi, H. Suzuki, T. Watanabe, T. Noguchi, F. Rappaport, and A. Boussac, Energetics in photosystem II from *Thermosynechococcus elongatus* with a D1 protein encoded by either the *psbA1* or *psbA3* gene, *Biochim. Biophys. Acta* **1797**, 1491-1499 (2010). (査読有)
DOI:10.1016/j.bbabi.2010.03.022
- (15) M. Iizasa, H. Suzuki, and T. Noguchi, Orientations of carboxylate groups coupled to the Mn cluster in the photosynthetic oxygen-evolving center as studied by polarized ATR-FTIR spectroscopy, *Biochemistry* **49**, 3074-3082 (2010). (査読有)
DOI:10.1021/bi1002647
- (16) Y. Shibuya, R. Takahashi, T. Okubo, H. Suzuki, M. Sugiura, and T. Noguchi, Hydrogen bond interactions of the pheophytin electron acceptor and its radical anion in photosystem II as revealed by Fourier transform infrared difference spectroscopy, *Biochemistry* **49**, 493-501 (2010). (査読有)
DOI:10.1021/bi9018829
- (17) T. Noguchi, Fourier transform infrared spectroscopy of special pair bacteriochlorophylls in homodimeric reaction centers of heliobacteria and green sulfur bacteria, *Photosynth. Res.* **104**, 321-331 (2010). (査読有)
DOI:10.1007/s11120-009-9509-0
- (18) R. Takahashi, A. Boussac, M. Sugiura, and T. Noguchi, Structural coupling of a tyrosine side chain with the non-heme iron center in photosystem II as revealed by light-induced Fourier transform infrared difference spectroscopy, *Biochemistry* **48**, 8994-9001 (2009). (査読有)
DOI:10.1021/bi901195e
- (19) M. Tomita, K. Ifuku, F. Sato, and T. Noguchi, FTIR evidence that the PsbP extrinsic protein induces protein conformational changes around the oxygen-evolving Mn cluster in photosystem II, *Biochemistry* **48**, 6318-6325 (2009). (査読有)
DOI:10.1021/bi9006308
- (20) Y. Shimada, H. Suzuki, T. Tsuchiya, T. Tomo, T. Noguchi, and M. Mimuro, Effect of a single amino acid substitution of the 43 kDa chlorophyll-protein on the oxygen-evolving reaction of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803: Analysis of the Glu354Gln mutation, *Biochemistry* **48**, 6095-6103 (2009). (査読有) DOI:10.1021/bi900317a
- (21) H. Suzuki, M. Sugiura, and T. Noguchi, Monitoring proton release during photosynthetic water oxidation in photosystem II by means of isotope-edited infrared spectroscopy, *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 7849-7857 (2009). (査読有) DOI:10.1021/ja901696m
- (22) T. Okubo, T. Tomo, and T. Noguchi, Detection of the D₀ → D₁ transition of β-carotene radical cation photoinduced in photosystem II, *Photochem. Photobiol. Sci.* **8**, 157-161 (2009). (査読有) DOI:10.1039/B804961K
- (23) 野口 巧, 光誘起フーリエ変換赤外差スペクトル法、「光合成研究法」*低温科学* **67**, 483-489 (2009). (査読無)
<http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/39182>
- (24) 野口 巧, 共鳴ラマン分光法、「光合成研究法」*低温科学* **67**, 491-496 (2009). (査読無)
<http://eprints2008.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/39183>
- [学会発表] (計 92 件)
- (1) 野口巧, 赤外光で探る光合成水分解メカニズム, 日本植物生理学会年会, 岡山大学, 2013年3月21-23日
- (2) 河原弘典, 井上名津子, 加藤祐樹, 中西華代, 軈達也, 菓子野康浩, 野口巧, 光化学系Iおよび光化学系IIの金ナノ粒子への結合による人工光合成ナノデバイスの開発, 日本植物生理学会年会, 岡山大学, 2013

- 年3月21-23日
- (3) 大田該、野口巧、光合成水分解反応に関与する水分子および水素結合ネットワークの赤外分光解析、日本植物生理学会年会、岡山大学、2013年3月21-23日
 - (4) 宇野千尋、鈴木博行、長尾遼、鞆達也、野口巧、紅藻の酸素発生系における表在性蛋白質の相互作用と機能発現機構：赤外分光法による解析、日本植物生理学会年会、岡山大学、2013年3月21-23日
 - (5) 野口巧、光合成による光駆動水分解反応のメカニズム、第43回中部化学関係学協会支部連合秋季大会、名古屋工業大学、2012年11月10-11日
 - (6) Takumi Noguchi, Infrared Studies on the Molecular Mechanism of Photosynthetic Water Oxidation, Okayama University International Symposium, "Structure and Dynamics of Photosynthetic Systems" October 22-23, 2012, Okayama, Japan
 - (7) Kai Ota, Takumi Noguchi, FTIR analysis of the hydrogen bonding network around the O_2 -evolving Mn_4CaO_5 cluster, 日本生物物理学会年会、名古屋大学、2012年9月22-24日
 - (8) Takashi Kobayashi, Takumi Noguchi, Mechanism of NH_4^+ inhibition in the S-state cycle of photosynthetic oxygen evolution, 日本生物物理学会年会、名古屋大学、2012年9月22-24日
 - (9) Kousuke Kawahara, Tatsuya Tomo, Takumi Noguchi, Development of artificial light-driven water splitting nanodevice using gold nanoparticles and photosystem II, 日本生物物理学会年会、名古屋大学、2012年9月22-24日
 - (10) Takumi Noguchi, Infrared monitoring of reactions in photosystem II, Gordon Research Conference: Photosynthesis, Davidson College, Davidson, NC, USA, July 8-13, 2012
 - (11) 大田該、野口巧、光合成酸素発生マンガングラスターに配位する水分子の構造と反応、日本光合成学会年会、東京工業大学、2012年6月1-2日
 - (12) 小林聖、津野将弥、野口巧、光合成酸素発生の中状態遷移における NH_4^+ 阻害のメカニズム、日本光合成学会年会、東京工業大学、2012年6月1-2日
 - (13) 宇野千尋、井戸邦夫、垣内秀介、西村大志、佐藤文彦、伊福健太郎、野口巧、光合成酸素発生系における表在性タンパク質の機能発現機構のFTIR解析、日本光合成学会年会、東京工業大学、2012年6月1-2日
 - (14) 宇野千尋、井戸邦夫、垣内秀介、西村大志、佐藤文彦、伊福健太郎、野口巧、光合成酸素発生系における表在性蛋白質PsbPの機能発現機構：FTIR法による解析、日本植物生理学会年会、京都、2012年3月16-18日
 - (15) Chihiro Uno, Shusuke Kakiuchi, Fumihiko Sato, Kentaro Ifuku, and Takumi Noguchi, Interaction and function of the PsbP extrinsic protein in the oxygen evolving center of photosystem II, 日本生物物理学会年会、兵庫県立大学、2011年9月16-18日
 - (16) 津野将弥、鈴木博行、野口巧、光合成酸素発生反応におけるアンモニア阻害のメカニズム、生体分子科学討論会、筑波大、2011年6月23-24日
 - (17) 宇野千尋、垣内秀介、佐藤文彦、伊福健太郎、野口巧、光合成酸素発生系における表在性タンパク質PsbPの相互作用と機能、日本光合成学会年会、京都大学、2011年6月3-4日
 - (18) 津野将弥、鈴木博行、野口巧、光合成酸素発生反応におけるアンモニア阻害の分子機構、日本光合成学会年会、京都大学、2011年6月3-4日
 - (19) 野口巧、赤外分光で探る光合成水分解反応の分子メカニズム、理研シンポジウム「生物を律する揺らぎのメカニズムを追い求めて—光合成と生体信号—」、和光、2011年4月19-21日
 - (20) 鈴木博行、杉浦美羽、野口巧、FTIR法による光合成酸素発生サイクルにおける各S状態遷移の効率の評価、日本植物生理学会年会、仙台、2011年3月21-23日
 - (21) 津野将弥、鈴木博行、野口巧、光合成酸素発生反応におけるアンモニウムイオンの阻害効果、日本植物生理学会年会、仙台、2011年3月21-23日
 - (22) 野口巧、光合成水分解反応の赤外分光解析、阪大蛋白研セミナー「分子科学と生理学が解き明かす植物の光エネルギー変換の新展開」大阪大学蛋白質研究所、2011年3月9-10日
 - (23) 野口巧、光合成酸素発生研究：試料系と分光測定のカップリング、光合成シンポジウム「光合成による光エネルギー利用の過去・現状・未来」、京都大学、2010年12月29日
 - (24) Hiroyuki Suzuki, Miwa Sugiura, and Takumi Noguchi, FTIR study on the efficiencies of individual S-state transitions during photosynthetic water oxidation, The 70th Okazaki International Conference on Molecular Mechanism of Photosynthetic energy conversion: The Present Research and Future Prospects, Dec. 4-6, 2010, Okazaki Conference Center

- (25) Takumi Noguchi, Infrared studies of photosynthetic oxygen evolving reactions, The 70th Okazaki International Conference on Molecular Mechanism of Photosynthetic energy conversion: The Present Research and Future Prospects, December 4-6, 2010, Okazaki Conference Center
- (26) Takumi Noguchi, Redox Potential Control of π -Conjugated Redox Cofactors in Photosynthetic Protein, 2nd International symposium on emergence of highly elaborated π -space and its function Nov. 13-14, 2010, Kyoto University
- (27) Masaya Tsuno, Hiroyuki Suzuki and Takumi Noguchi, The molecular mechanism of ammonia inhibition of photosynthetic oxygen evolution, 日本生物物理学会年会、東北大学、2010年9月20-22日
- (28) Hiroyuki Suzuki, Miwa Sugiura, Takumi Noguchi, Estimation of the efficiencies of individual S-state transitions during photosynthetic water oxidation using FTIR spectroscopy, 日本生物物理学会年会、東北大学、2010年9月20-22日
- (29) Takumi Noguchi, Infrared detection of water oxidation reactions in photosystem II, 15th International Congress of Photosynthesis, Beijing, China, Aug 22-27, 2010
- (30) 鈴木博行、杉浦美羽、野口巧、光合成酸素発生反応における各S状態遷移の効率：FTIR法による解析、日本光合成学会年会、東京大学、2010年6月4-5日
- (31) 津野将弥、鈴木博行、野口巧、光合成酸素発生反応におけるアンモニア阻害のメカニズム、日本光合成学会年会、東京大学、2010年6月4-5日
- (32) 高橋亮太、杉浦美羽、Alain Boussac、野口巧、光化学系 II におけるクロシン Y_2 と D1-H190 の相互作用、日本植物生理学会年会、熊本、2010年3月18-21日
- (33) 井手段一聖、野口巧、除草剤効果による光化学系 II の光傷害機構の解析、日本植物生理学会年会、熊本、2010年3月18-21日
- (34) Takumi Noguchi, Molecular mechanism of photosynthetic water oxidation, 1st Symposium of the Innovative Center of Nanomaterials Science for Environment and Energy, NIMS, Tsukuba, Feb. 9, 2010
- (35) Hiroyuki Suzuki Yuichiro Shimada, Tohru Tsuchiya, Tatsuya Tomo, Mamoru Mimuro and Takumi Noguchi, FTIR study on the structure of CP43-E354 in the photosynthetic oxygen-evolving center、

- 日本生物物理学会年会、徳島、2009年10月30日-11月1日
- (36) Issei Idedan, Yuichi Shibuya, and Takumi Noguchi, The mechanism of photodamage of photosystem II as revealed by herbicide effects and FTIR difference spectroscopy, 日本生物物理学会年会、徳島、2009年10月30日-11月1日
- (37) Takumi Noguchi, Evolutionary aspects of the special pair chlorophyll P680 in photosystem II: How was the extremely high oxidation potential achieved?, 15th International Congress on Photobiology, Düsseldorf, Germany, June 18-23, 2009

〔図書〕 (計3件)

- (1) 野口巧、光合成水分分解反応：水の酸化による酸素発生メカニズム、**光合成のエネルギー・物質変換**、化学同人、京都 (印刷中)
- (2) 野口巧、 π 系生体ナノ電極における光合成電子移動反応の分子制御機構、**高次 π 空間の創発と機能開発**、シーエムシー出版、東京、pp. 229-232 (2013)
- (3) J. Messinger, T. Noguchi, and J. Yano, Photosynthetic O_2 Evolution, in *Molecular Solar Fuels* (T. Wydrzynski and W. Hillier, Eds.) Chapter 7, RSC Publishing, Cambridge UK, pp. 163-207 (2012).
DOI:10.1039/9781849733038-00163

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等
<http://glab.phys.nagoya-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
野口 巧 (NOGUCHI TAKUMI)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：60241246
- (2) 研究分担者
加藤 千尋 (KATO CHIHIRO)
神奈川県産業技術センター・化学技術部・
専門研究員
研究者番号：50233804