

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 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21350075

研究課題名（和文） 高励起状態生成をトリガーとして機能する分子素子の開発

研究課題名（英文） Study on Molecular Devices with Functions Triggered by Higher Excited State Generation

研究代表者

藤塚 守 (FUJITSUKA MAMORU)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：40282040

研究成果の概要（和文）：高励起状態からのみ進行する化学反応を検討することで分子素子へ展開することを目的とした。光機能分子の高励起状態の生成は、短波長光レーザー照射または照射間隔および照射波長を制御した複数レーザーの多段階照射（マルチレーザー照射）で行い、超高速分光を駆使することで反応過程を解明した。本研究の遂行により、新規 S₂ 蛍光性分子、高励起三重項状態から電子移動する分子系および分子素子の開発が主たる成果として得られた。

研究成果の概要（英文）：The present research project aimed at the development of molecular devices with functions triggered by higher excited state generation. The higher excited state of functional molecules were generated by means of irradiation of short-wavelength laser pulse or multi-laser irradiation, in which two laser pulses were irradiated to samples in step wise manner, and photoinduced processes of functional molecules were observed by means of ultrafast spectroscopic methods. The main achievements of this research project are (1) development of a class of functional molecules exhibiting S₂ emission and (2) development of molecular systems for photoinduced charge separation from the higher triplet excited state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2010 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：分子素子、励起状態、マルチレーザー、超高速分光、電子移動、S₂ 蛍光、蛍光アップコンバージョン、レーザーフラッシュホトリシス

1. 研究開始当初の背景

光励起により駆動する分子素子の設計において、励起状態からの反応制御が本質的に必要であり、高速反応の実現が不可欠である。溶液中での光誘起反応は通常最低励起状態から進行する。これは高励起状態から最低励起状態への内部転換が極めて高速なため、ほとんどの一分子および二分子反応で高励起状態の寄与が無視できることに起因してお

り、Kasha 則として一般的に良く知られた光化学のルールとなっている。したがって、従来の光照射によって駆動する分子素子は最低励起状態から種々プロセスが進行することが前提となっており、応答速度はピコ秒からマイクロ秒まで広範囲にわたるものであった。しかし、高励起状態からも種々の反応が起こることは、Kasha 則の例外的過程として古くから知られており、特に最近の超短パ

ルスレーザーを用いた蛍光測定や過渡吸収測定などにより、高励起状態からの反応が実に多彩であることが明らかになってきた。例えば亜鉛ポルフィリンの meso 位に電子アクセプターを直接結合した分子では S_2 状態からの電荷分離が観察されている(N. Mataga et al. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 12422 など)。また、高励起三重項状態やラジカル励起状態も二台のナノ秒レーザーを同期させ、化合物に照射することで検討されてきた(W. G. McGimpsey and J. C. Scaiano, *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, *110*, 2299 など)。国内においては東北大学の國分教授らが、1970年代に高励起三重項状態から励起一重項状態への項間交差を報告している(S. Kobayashi, K. Kikuchi, and H. Kokubun, *Chem. Phys. Lett.* **1976**, *42*, 494 など)。これらの検討例のうち時間分解測定のごく多くはナノ秒の時間分解能での測定に基づくものであり、超短パルスレーザーによる詳細な検討はほとんど行われていなかった。

本報告者もこれまで波長および照射間隔を制御したナノ秒レーザー照射(マルチレーザー照射)を用いることで、高励起状態の反応を種々明らかにしてきた。高励起三重項状態からの電子移動(*J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, 9709 など)やエネルギー移動(*Tetrahedron Lett.*, **2003**, *44*, 6117 など)、さらに結合解離反応(*J. Am. Chem. Soc.*, **2004**, *126*, 7432 など)はその例である。さらにラジカル励起状態からの電子移動も解明してきた(*J. Phys. Chem. A*, **2005**, *109*, 6830 など)。近年では上述したように高励起状態の超短パルスレーザーによる直接観察等の詳細な検討の必要性を鑑み、高励起三重項状態や励起ラジカルの直接観察を報告してきた。

高励起状態からの反応はピコ秒程度であることから、最低励起状態からの駆動を前提とした分子素子よりはるかに高速動作する分子素子を構築できる可能性がある。さらに、フェムト秒レーザー等の超短パルスレーザーを用いることで、高励起状態を応用した論理演算や多段階酸化還元過程を応用したマルチビットメモリなどの分子素子の動作原理を確認することが可能と考え、今回の研究では、高励起状態を生成することによって進行する分子素子を実現するための基礎を研究することを計画した。

2. 研究の目的

本研究計画では、高励起状態からのみ進行する化学反応を検討することで分子素子への展開を図る。高励起状態の生成は、照射間隔および照射波長を制御したフェムト秒レーザーを光機能分子に多段階照射(マルチレーザー照射)または短波長光照射(シングルレーザー照射)により制御できるため、高励起状態生成がきっかけ(トリガー)となり機能発現

する分子系が構築可能であると予想される。超高速分光を適用することで、高励起状態化学に有用な分子系を探索し、さらに高励起状態を経た電子移動等の反応プロセスを直接観測し、新たな分子素子を作り出すことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

高励起一重項状態は短波長光レーザー照射により生成し、蛍光アップコンバージョンによる短寿命蛍光減衰観察および過渡吸収測定により励起ダイナミクスを解明した。また、高励起三重項状態などの短寿命励起状態は、フェムト秒レーザーを複数にわけ、それぞれ波長変換した後、適切なタイミングでサンプルに多段階照射することで生成し、過渡吸収測定により直接観察した。また、必要に応じ、ナノ秒レーザーの多段階照射により、反応プロセスの解析を行った。

4. 研究成果

本研究課題で得られた主たる成果は以下にまとめたとおりである。

(1) S_2 蛍光を示す新規色素分子の検討

高励起状態からの電荷分離等のダイナミクスを検討するためには高励起状態からの発光である S_2 蛍光の測定が重要であるが、 S_2 蛍光を生じる分子はピレン類やポルフィリン類に限られていた。従って新たな超分子系を構築することを目的として、 S_2 蛍光性分子を検討したところ、図1に示した BODIPY 類が S_2 蛍光を生じることを確認した。

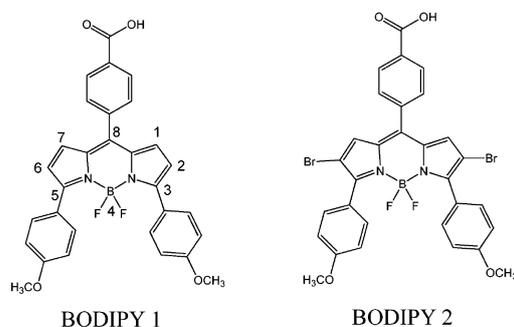


図1. S_2 蛍光の検討に用いた BODIPY 類の分子構造。

実際、 S_2 蛍光寿命は数ピコ秒のオーダーであることを確認した(図2)。さらにフェムト秒過渡吸収スペクトル測定より、 S_2 状態からの内部転換の速度の見積もりを行った。 S_2 からの緩和過程の詳細を検討し、重原子が高励起状態失活過程に及ぼす効果などを明らかにした。

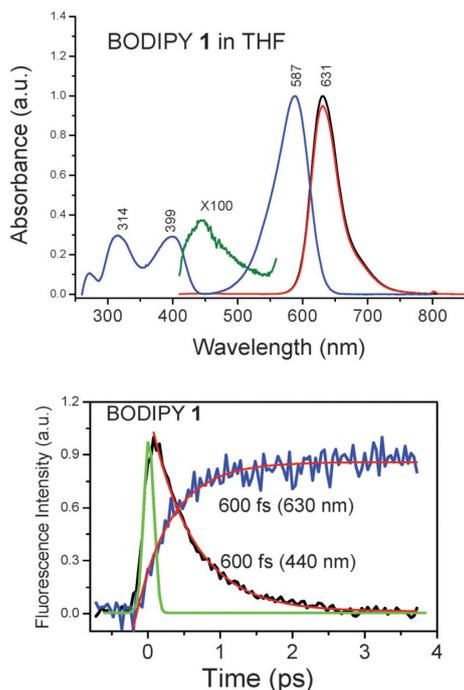


図 2. (上図)BODIPY 1 の THF 中における吸収 (青)、 S_1 蛍光 (赤) および S_2 蛍光 (緑) スペクトル。 (下図) 蛍光アップコンバージョンにより測定した S_2 励起により生じた S_1 蛍光 (青) および S_2 蛍光 (黒) の蛍光プロファイル。 S_2 の減衰に伴い S_1 が生成していることが確認された。

(2) 高励起三重項状態からの電子移動過程の検討

① 高励起三重項状態をへた分子間電子移動過程の検討

Polythiophene や oligothiophene は光学的電氣的に興味深い性質を示すことから広く研究されている。光機能性材料への応用を考えたときに、その励起状態に関する知見が重要であることから、レーザーフラッシュホトリシス等を用いることにより励起緩和過程ならびに光誘起反応が検討されており、かなり詳細な知見が得られている。しかしながら、それらの知見の多くは最低励起状態に限られ、高励起状態についてはほとんど知れていない。われわれの研究グループでは二台以上のレーザーを用いて化合物を多段階励起することにより得られる種々の高励起状態について検討を行っており、最低励起状態からは進行しない種々の反応を見出してきた。Oligothiophene の高励起三重項状態に関しては、高励起三重項状態の直接観察による寿命の導出 (*ChemPhysChem* 2004, 5, 1240)、分子間エネルギー移動によるエネルギーレベルの決定 (*J. Phys. Chem. C* 2007, 111, 1024)、分子内エネルギー移動による励起エネルギー移動経路の制御 (*J. Phys. Chem. A* 2007, 111, 9781) を実現してきた。さらに、oligothiophene のラジカルカチオンをさらに励起することによ

って、励起状態を経たホール移動も見出している (*J. Phys. Chem. A* 2008, 112, 2008)。本研究では oligothiophene (3T および 4T, 図 3) の高励起三重項状態を経た分子間電子移動を検討した。

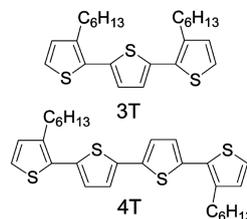


図 3. 高励起三重項状態を経た分子間電子移動の検討に用いた oligothiophene 誘導体。

分子間電子移動では oligothiophene (図 3) を 355 nm レーザーで励起することで最低励起三重項状態を生じ、さらに 532 nm レーザーを照射することにより高励起三重項状態を生成した。溶液内に電子アクセプターである trichlorobenzene が存在する場合には、高励起三重項状態を経た分子間電子移動が起こり、oligothiophene の radical cation が生成することを過渡吸収により確認した (図 4, 5)。

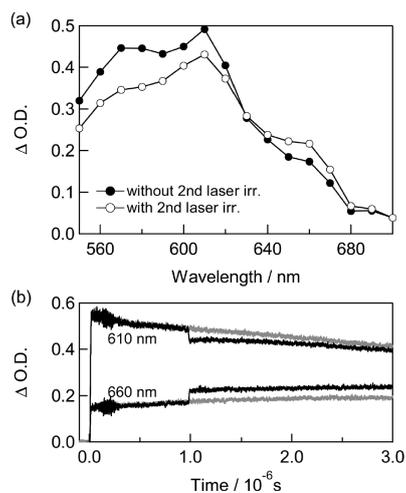


図 4. Trichlorobenzene 存在下の 4T の過渡吸収スペクトル。第二レーザー照射により高励起三重項状態を生成すると 4T radical cation の生成を示す 650 nm の吸収帯が観測されている。

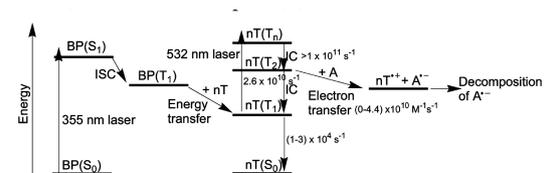


図 5. 高励起三重項状態の 4T からの分子間電子移動過程のエネルギーダイアグラム。

電子移動速度の電子アクセプター濃度依

存性から電子移動速度定数(k_{ET})を導出し、電子移動速度定数の自由エネルギー依存性(ΔG)を検討したところ、3Tと4Tのいずれの場合においても Marcus 理論により電子移動速度が説明できることを確認した(図 6)。

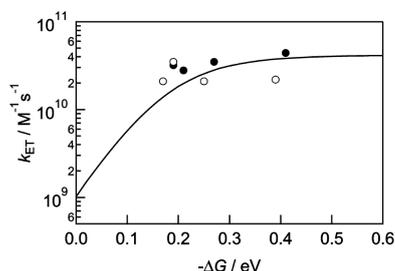


図 6. 分子間電子移動速度の自由エネルギー依存性(●:4T, ○:3T)。実線は Marcus 理論により導出した依存性。

②高励起三重項状態生成をトリガーとした電子移動を示す分子素子の開発

上述したように oligothiophene の多段階励起により生成した高励起三重項状態から分子間電子移動が進行することより、分子素子への応用を図るため、oligothiophene をドナーとした高励起三重項状態から分子内電荷分離を示すドナー・アクセプター結合分子(図 7)を合成した。

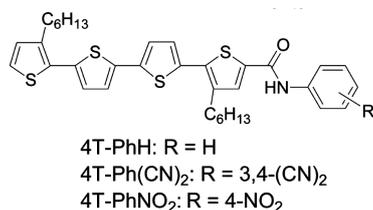


図 7. 高励起三重項状態を経た分子内電荷分離の検討に用いたドナー・アクセプター結合分子。

これらの分子に対し 400 nm フェムト秒レーザーを照射することで励起し、項間交差をへて最低励起三重項状態を生成させ、さらに 650 nm のフェムト秒レーザーを照射することで高励起三重項状態を生成した。分子内電子移動を示すラジカルカチオンは観察されなかったが、最低励起三重項状態の再生速度は電子移動の自由エネルギー変化の大きさを反映したことより、図 8 に示す電子移動の存在が示唆された。特に本電子移動では 4T の T₂ 状態から電荷分離が進行していることが示唆された。

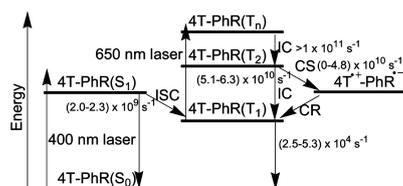


図 8. 高励起三重項状態の 4T からの分子内電荷分離過程のエネルギーダイアグラム。

(3)その他

上述の成果の他に、分子素子構成要素となる分子ワイヤである DNA 内における過剰電子移動速度の導出、ラジカルカチオン励起状態からのホール移動の確認、超分子系の電荷移動の検討、励起状態における構造変化の実時間観測などの分子素子に関する成果が本研究より得られた。

以上、本研究の遂行により、高励起状態化学に有用な分子系を実現し、さらに高励起状態からのみ進行する電子移動過程が解明できた。これらは、マルチレーザー照射による機能スイッチング分子を実証するものである。このような研究例はまだわずかであるが、本研究成果は今後の展開の基礎となると予想される。

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 23 件)

1. Dae Won Cho, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 7 名、2 番目), S₂ emission from chemically modified BODIPYs, Chemical Communications, 査読有, Vol. 48, 3424-3426 (2012), DOI: 10.1039/c2cc30569k.

2. Man Jae Park, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、2 番目), Excess-electron injection and transfer in terthiophene-modified DNA: Terthiophene as a photosensitizing electron donor for thymine, cytosine, and adenine, Chemistry-A European Journal, 査読有, Vol. 18, 2056-2062 (2012), DOI: 10.1002/chem.201103663.

3. Yasuko Osakada, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 7 名、4 番目), Generation of singlet oxygen during photosensitized one-electron oxidation of DNA, Chemistry-A European Journal, 査読有, Vol. 18, 1060-1063 (2012), DOI: 10.1002/chem.201101964.

4. Mamoru Fujitsuka, Dae Won Cho, Tetsuro Majima (計 5 名、1 番目), Structural relaxation in the singlet excited state of star-shaped oligofluorenes having a truxene or isotruxene as a core, The Journal of Physical Chemistry B, 査読有, Vol. 115, 13502-13507 (2011), DOI: 10.1021/jp2074336.

5. Jungkweon Choi, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 5 名、4 番目), pH-Induced intramolecular folding dynamics of i-motif DNA, *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 133, 16146–16153 (2011), DOI: 10.1021/ja2061984.
6. Jungkweon Choi, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 5 名、4 番目), Unfolding dynamics of cytochrome c revealed by single-molecule and ensemble-averaged spectroscopy, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 査読有, Vol. 13, 5651–5658 (2011), DOI: 10.1039/c0cp02689a.
7. Man Jae Park, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、2 番目), Direct measurement of the dynamics of excess electron transfer through consecutive thymine sequence in DNA, *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 133, 15320–15323 (2011), DOI: 10.1021/ja2068017.
8. Shi-Cong Cui, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Photoinduced electron transfer in a quantum dot–cucurbituril supramolecular complex, *The Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, Vol. 115, 1824–1830 (2011), DOI: 10.1021/jp1110828.
9. Mamoru Fujitsuka, Hisashi Shimakoshi, Tetsuro Majima (計 4 名、1 番目), Reorganization energy of supramolecular donor–acceptor dyad of octaethylporphyrin isomers and axial-coordinated acceptor: Experimental and computational study, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 査読有, Vol. 217, 242–248 (2011), DOI: 10.1016/j.jphotochem.2010.10.016.
10. Mamoru Fujitsuka, Takeshi Nakatani, Tetsuro Majima (計 5 名、1 番目), Electron transfer from oligothiophenes in the higher triplet excited states, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, Vol. 114, 10789–10794 (2010), DOI: 10.1021/jp106056e.
11. Yusaku Eda, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 6 名、4 番目), Synthesis and properties of fullerene (C₇₀) complexes of 2,6-bis(porphyrin)-substituted pyrazine derivatives bound to a Pd(II) ion, *Supramolecular Chemistry*, 査読有, Vol. 22, 517–523 (2010), DOI: 10.1080/10610278.2010.487566.
12. Jun Rye Choi, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Europium-based metal-organic framework as a photocatalyst for the one-electron oxidation of organic compounds, *Langmuir*, 査読有, Vol. 26, 10437–10443 (2010), DOI: 10.1021/la101770h.
13. Jun Rye Choi, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Evaluating host–guest interactions in a metal–organic framework using a polarity-sensitive probe, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 査読有, Vol. 1, 1101–1106 (2010), DOI: 10.1021/jz100243u.
14. Mamoru Fujitsuka, Hisashi Shimakoshi, Tetsuro Majima (計 7 名、1 番目), Electron transfer in the supramolecular donor–acceptor dyad of zinc hemiporphycene, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, Vol. 114, 4156–4162 (2010), DOI: 10.1021/jp9119342.
15. Daisuk Maeda, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 6 名、4 番目), Synthesis of a novel Sn(IV) porphycene–ferrocene triad linked by axial coordination and solvent polarity effect in photoinduced charge separation process, *Inorganic Chemistry*, 査読有, Vol. 49, 2872–2880 (2010), DOI: 10.1021/ic902444x.
16. Shi-Cong Cui, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Solvent-polarity dependence of electron-transfer kinetics in a CdSe/ZnS quantum dot–pyromellitimide conjugate, *The Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, Vol. 114, 1217–1225 (2010), DOI: 10.1021/jp909579j.
17. Masanori Sakamoto, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Photochemical reactivity of gold clusters: Dependence on size and spin multiplicity, *Langmuir*, 査読有, Vol. 25, 13888–13893 (2009), DOI: 10.1021/la901552f.
18. Shingo Samori, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), Important factors for the radiolysis-induced emission intensity of aromatic hydrocarbons, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 査読有, Vol. 205, 179–185 (2009), DOI: 10.1016/j.jphotochem.2009.05.003.
19. Yi Wei, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 7 名、4 番目), Emission mechanism of doubly ortho-linked quinoxaline/diphenylfluorene or cis-stilbene/fluorene hybrid compounds based on the transient absorption and emission measurements during pulse radiolysis, *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 131, 6698–6707 (2009), DOI: 10.1021/ja8090005.
20. Tadao Takada, Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima (計 4 名、3 番目), "Signal-On" detection of DNA hole transfer at the single molecule level, *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 131, 6656–6657 (2009), DOI: 10.1021/ja9009919.
21. Shingo Samori, Mamoru Fujitsuka, Torben Ryhding, Tetsuro Majima (計 8 名、3 番目), Emission from regioisomeric bis(phenylethynyl)benzenes during pulse radiolysis, *The Journal of Organic Chemistry*, 査読有, Vol. 74, 3776–3782 (2009), DOI: 10.1021/jo900494j.
22. Mamoru Fujitsuka, Yoshio Hisaeda, Tetsuro

Majima (計 7 名、1 番目), Electron transfer in the supramolecular donor-acceptor dyad of zinc porphycene, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, Vol. 113, 3330-3335 (2009), DOI: 10.1021/jp810617a

23. Mamoru Fujitsuka, Sachiko Tojo, Tetsuro Majima (計 4 名、1 番目), Intramolecular dimer radical anions of [3_n] cyclophanes: transannular distance dependent stabilization energy, *Chemical Communications*, 査読有, 1553-1555 (2009), DOI: 10.1039/b810122a.

[学会発表] (計 19 件)

1. 藤塚守, シクロバラフェニレンの蛍光の環サイズ依存性, 日本化学会第 92 春季年会, 2012.3.25, 慶應義塾大学 (横浜)

2. 立川貴士, 酸化ニッケルナノ粒子上における色素増感電荷移動反応の単一分子蛍光観察, 日本化学会第 92 春季年会, 2012.3.25, 慶應義塾大学 (横浜)

3. Mamoru Fujitsuka, Excess Electron Injection and Transfer in Terthiophene-Modified DNA, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2011.10.30, Konkuk University (Seoul, Korea)

4. Mamoru Fujitsuka, Delocalization of Positive Charge in π -Stacked Multi-Benzene Rings in Multi-Layered Cyclophanes, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2011.10.29, Konkuk University (Seoul, Korea)

5. Mamoru Fujitsuka, Structural Relaxation in the Singlet Excited State of Star-Shaped Oligofluorenes having a Truxene or Isotruxene as a Core, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2011.10.29, Konkuk University (Seoul, Korea)

6. Mamoru Fujitsuka, Excess Electron Transfer in Tetrathiophene-Conjugated DNA, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2011.10.29, Konkuk University (Seoul, Korea)

7. Mamoru Fujitsuka, Excess Electron Transfer in DNA, China-Japan Joint Symposium on Functional Supramolecular Architecture, 2011.10.8, Beijing Normal University (北京, 中国)

8. 藤塚守, 多層シクロファン内正電荷非局在の検討, 第 54 回放射線化学討論会, 2011.9.29, 大阪大学 (茨木市)

9. 藤乗幸子, 放射線化学による分離型ラジカルカチオンの吸収と発光, 第 54 回放射線化学討論会, 2011.9.29, 大阪大学 (茨木市)

10. 山路稔, パルスラジオリシス法を用いた芳香族化合物の一電子還元種の炭素-イオウ結合解離による分解反応機構の研究, 第 54 回放射線化学討論会, 2011.9.29, 大阪大学 (茨木市)

11. Man Jae Park, Excess electron transfer through consecutive thymine sequence in DNA,

第 54 回放射線化学討論会, 2011.9.28, 大阪大学 (茨木市)

12. 藤塚守, DNA 過剰電子移動の直接観測, 2011 年光化学討論会, 2011.9.7, 宮崎観光ホテル (宮崎市)

13. 崔正権, i-motif DNA の構造変化のダイナミクス, 2011 年光化学討論会, 2011.9.7, 宮崎観光ホテル (宮崎市)

14. 藤塚守, オリゴチオフェン高励起三重項状態からの電子移動, 日本化学会第 91 春季年会, 2011.3.27, 神奈川大学 (横浜市)

15. 藤塚守, ポルフィリンおよび異性体の超分子内電荷分離過程, 2010 年光化学討論会, 2010.9.10, 千葉大学 (千葉市)

16. Mamoru Fujitsuka, Electron Transfer in Supramolecular Donor-Acceptor Dyads of Porphyrin Isomers, XXIII IUPAC Symposium on Photochemistry 2010, 2010.7.14, Univ. Ferrara, Ferrara (Italy)

17. 藤塚守, 亜鉛へミポルフィセン超分子ドナー-アクセプターダイアド内電荷分離過程, 日本化学会第 90 春季年会, 2010.3.27, 近畿大学 (東大阪市)

18. Mamoru Fujitsuka, Electron Transfer in Supramolecular Donor-Acceptor Dyad of Zinc Porphycene, The 6th Korea Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2009.10.31, Chungnam, Korea

19. 藤塚守, 亜鉛ポルフィセンを用いたドナー・アクセプター超分子の光誘起電子移動, 2009 年光化学討論会, 2009. 9.16, 桐生市市民文化会館

[図書] (計 4 件)

1. Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima, John Wiley & Sons, Inc., *Supramolecular Chemistry: From Molecules to Nanomaterials*, (2012), 2365-2395.

2. Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima, John Wiley & Sons, Inc., *Encyclopedia of Radicals in Chemistry, Biology and Materials*, (2012), 1397-1424.

3. Mamoru Fujitsuka, Tetsuro Majima, John Wiley & Sons, Inc., *Supramolecular Photochemistry Controlling Photochemical Processes*, (2011), 517-546.

4. 藤塚守, 真嶋哲朗, 化学同人, *核酸化学のニュートレンド*, (2011), 116-123.

[その他]

ホームページ等

[http:// www.sanken.osaka-u.ac.jp](http://www.sanken.osaka-u.ac.jp)

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤塚 守 (FUJITSUKA MAMORU)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号: 40282040