

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25288035

研究課題名(和文) 超分子および高分子における反応中間体励起状態のダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics of Excited Intermediates in Supramolecules and Polymers

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：一般に光化学反応は最低励起状態から進行するが、反応が充分高速であれば高励起状態など反応中間体励起状態も反応前駆体になることが予想され、高いエネルギー状態に基づく新たな反応が期待できる。本研究では超高速分光を用い、高励起状態および励起ラジカルイオンからの反応を系統的に検討した。一連の研究により、ポルフィリン類の高励起状態からの電子移動や、励起ラジカルイオン種からの電子移動など新たな反応とその詳細が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In general, photochemical reactions in solution occur from the lowest excited state as known as Kasha's rule. But if rate is fast enough, various reactions will become possible even for the higher excited states and excited intermediates. For these reaction precursors, efficient reactions, which are not possible for the lowest excited state, are expected because of their higher energies. In the present research project, systematic studies on reactions from the higher excited states and excited intermediates have been carried out. In this project, we found electron transfer from the higher excited porphyrins. In addition, electron transfer from the excited radical ions has been clarified systematically. Especially, comparison with the electron transfer theory provides us characteristics of reactions from the excited radical ions. The present information will be useful to design various novel photofunctional materials.

研究分野：光化学

キーワード：分子素子 トリシス 励起状態 パルスラジオリシス マルチレーザー 超高速分光 電子移動 マーカス理論 レーザーフラッシュホ

### 1. 研究開始当初の背景

通常、溶液中で励起分子の反応は最低励起状態から進行する。これは Kasha 則として知られた光化学の基本的なルールであり、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ことに起因している。しかし、高励起状態からの反応も少数ではあるが報告されており、例えば高励起一重項状態( $S_2$ )からの電荷分離については複数のグループによって検討されてきた。<sup>1</sup> 一方、高励起三重項状態の反応性は生成物解析や二台のナノ秒レーザーの同期照射により検討されてきたが、<sup>2</sup> そのピコ秒領域のダイナミクスの知見は限られている。また、種々の化学反応の中間体であるラジカルイオンおよびラジカルは通常基底状態( $D_0$  状態)にあるが、その寿命内に光励起することで  $D_1$  状態を含む励起状態が生成すると考えられる。実際、一部の化合物についてラジカルイオン励起状態の物性が報告されている。<sup>3</sup> 高励起状態や励起ラジカルおよび励起ラジカルイオン等の反応中間体励起状態は、短寿命ながら高い励起エネルギーに起因する高反応性が予想されるものの、そのダイナミクスと反応性の理解には超高速分光に基づく系統的かつ詳細な研究が不可欠であった。特に近年、さまざまな光起電デバイスや触媒などにおいて、これら高励起状態や反応中間体励起状態の寄与を示す現象が報告されるようになってきており、その重要性が認識されつつある。

### 2. 研究の目的

本研究計画では、高励起状態やラジカルおよびラジカルイオン励起状態等の反応中間体励起状態からのみ進行する超分子および高分子内反応の検討を超高速分光を用いて行う。具体的には以下の研究を行う。(1)機能性分子のラジカルイオン励起状態の直接観察および寿命の導出。(2)ラジカルアニオン励起状態からの分子内電子移動の検討。(3)ラジカルカチオン励起状態からの分子内ホール移動の検討。(4)ラジカルイオンの励起に起因する超分子および高分子内電荷ホッピングの検討。(5)機能性色素高分子の高励起状態および電子移動反応の直接観察。得られた知見に基づき、新たな分子素子を創製およびナノテクノロジーへの提案することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

反応中間体励起状態の生成は、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) または高強度フェムト秒レーザー照射による多光子吸収 (シングルレーザー照射)、さらには電子線照射や電気化学反応等で生じた反応中間体のレーザー光励起など、超高速分光を駆使することで、反応プロセスの直接観測を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) $S_2$ 状態からの電荷分離の検討<sup>4</sup>

機能性分子であるポルフィリンの一部は Soret 帯を励起すると高励起状態を生成し、 $S_2$  蛍光を生じることが知られている。本研究では電子受容体であるアンチモン(Sb)およびゲルマニウム(Ge)テトラフェニルポルフィリン(TPP)のメソ位に電子供与性基を導入した一連の化合物(図 1)にフェムト秒レーザーを用いたアップコンバージョンによる蛍光寿命測定ならびに過渡吸収測定を適用することで、 $S_2$  状態からの電子移動過程を検討した。

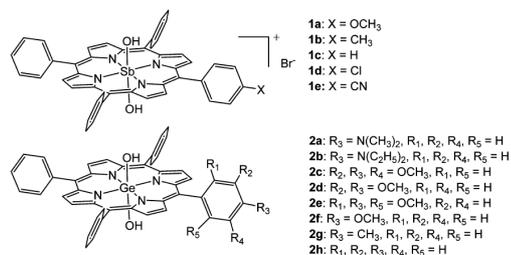


図 1 Sb および Ge テトラフェニルポルフィリン

一連の Sb および GeTPP の  $S_2$  蛍光を測定したところ、メソ位の置換基の電子供与性の増加に伴い、 $S_2$  蛍光寿命が減少することを確認した。さらに、過渡吸収測定より、電荷分離状態に帰属される吸収帯が生成することを確認した。なお、これらの TPP の Q 帯を励起したところ、電荷分離が確認されなかったことより、電荷分離状態は高励起状態生成に特有であることを明らかにした。また  $S_2$  からの電荷分離速度は溶媒緩和速度に一致することから、電子カップリングの強さが電子移動速度に大きく影響する断熱過程にあることを明らかにした。

(2)ナフタレンジイミドラジカルアニオン励起状態からの分子間および分子内電子移動<sup>5</sup>  
 ナフタレンジイミド(NDI)は良好な電子受容体であることから、さまざまな分子集合体に応用されている。NDI を含むイミド類はラジカルアニオン状態で明瞭な吸収帯を可視および近赤外領域に示すことから、これら吸収帯をパルスレーザーで選択励起することにより、励起ラジカルアニオンの励起状態物性および電子移動反応性を検討した。

NDI を含む溶液にパルスラジオリシスを適用することで NDI<sup>•-</sup> を生成した後、ナノ秒レーザーで NDI<sup>•-</sup> を励起することで励起 NDI<sup>•-</sup> を生成した。溶液中にアクセプター(図 2)が存在する場合には分子間電子移動により、アクセプターラジカルアニオンが生成することを過渡吸収測定より確認した。アクセプターラジカルアニオン生成量を検討することで、電子移動が拡散律速で進行していることを確認した。

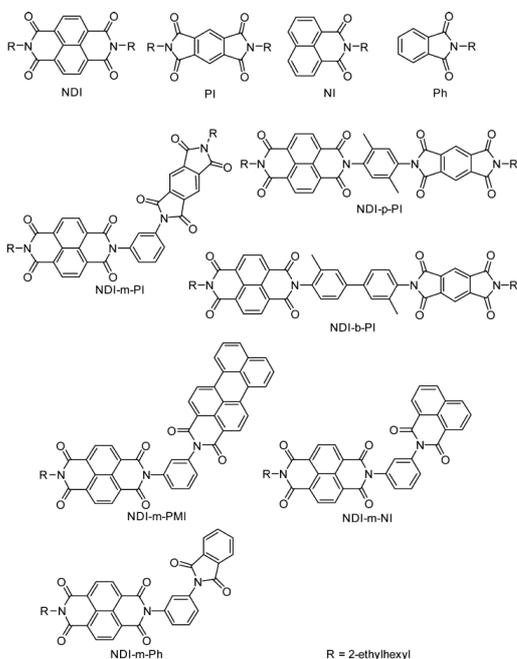


図 2 分子間および分子内電子移動の検討に用いた NDI およびアクセプターとダイアッド分子

NDI とアクセプターをスペーサーを介して結合したダイアッド分子(図 2)を合成し、NDI を化学還元により還元した後、フェムト秒レーザーで選択励起することで励起 NDI<sup>•</sup>からの分子内電子移動を検討した。実際、過渡吸収測定により、励起 NDI<sup>•</sup>の生成および電子移動に伴うアクセプターラジカルアニオンの生成を確認した。電子移動速度の距離依存性は電子移動距離を  $r$  とすると  $\exp(-\beta r)$  に比例することを確認し、 $\beta$  値は中性分子の電子移動過程について従来報告されている値と同様または若干低い値にあることを初めて明らかにした。また、電子移動速度の自由エネルギー変化依存性より電子移動における電子カップリングおよび再配向エネルギーを求め、分子軌道計算によりその妥当性を確認した。

(3)C<sub>60</sub> ラジカルアニオン励起状態からの電子移動過程<sup>6</sup>

化学還元により生じた C<sub>60</sub><sup>•</sup>をフェムト秒レーザー励起することでその励起緩和過程を観測した。光励起による D<sub>1</sub> 状態生成と誘導放出の観測、さらに D<sub>0</sub> 熱緩和過程を観測することに成功した。さらに C<sub>60</sub> にイミド類をアクセプターとして結合したダイアッド分子(図 3)を合成し、C<sub>60</sub><sup>•</sup>を励起することで D<sub>1</sub> 状態からの電子移動過程を観測した。基底状態からの電子移動と比較すると、D<sub>1</sub> 状態からの電子移動は高速であることを見出した。これらの知見は Marcus 理論により説明可能であり、電子移動の高速化にラジカルイオンの励起が有用であることが示された。

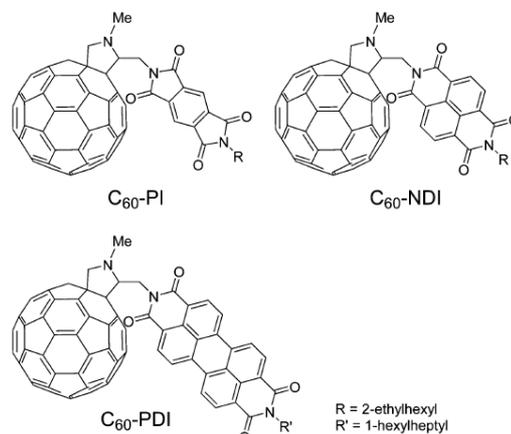


図 3 C<sub>60</sub> とイミド類のダイアッド分子 (4)励起ラジカルイオンの分子内不均化反応の確認<sup>7</sup>

ペリレンジイミド(PDI)とイミド類のダイアッド分子を用い、励起 PDI<sup>•</sup>からの分子内電子移動過程を検討し、電子移動速度の自由エネルギー依存性を明らかにした。特に二個の PDI<sup>•</sup>を結合した分子で励起 PDI<sup>•</sup>を生成した場合、ジアニオンを生成する不均化反応が起こることを初めて確認した。本反応は励起ラジカルアニオンに特有の反応であるとともに、有機半導体内において二価電荷を有するバイポロン生成メカニズムに対応することから、光起電デバイス等に有用な知見であると考えられる。

<引用文献>

- (1) N. Mataga, H. Chosrowjan, Y. Shibata, N. Yoshida, A. Osuka, T. Klukuzawa, T. Okada. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 12422-12423.
- (2) W. G. McGimpsey, J. C. Scaiano, *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, *110*, 2299-2301.
- (3) D. Gosztola, M. P. Niemczyk, W. Svec, A. S. Lukas, M. R. Wasielewski *J. Phys. Chem. A* **2000**, *104*, 6545-6551.
- (4) M. Fujitsuka, T. Shiragami, D. W. Cho, S. Tojo, M. Yasuda, T. Majima *J. Phys. Chem. A* **2014**, *118*, 3926-3933.
- (5) M. Fujitsuka, S. S. Kim, C. Lu, S. Tojo, T. Majima *J. Phys. Chem. B* **2015**, *119*, 7275-7282.
- (6) M. Fujitsuka, T. Ohsaka, T. Majima *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, *17*, 31030-31038.
- (7) C. Lu, M. Fujitsuka, A. Sugimoto, T. Majima *J. Phys. Chem. C* in press.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 44 件)

以下の雑誌論文はすべて査読有

1. M. Fujitsuka, T. Miyazaki, T. Shinmyozu, T. Majima (計 5 名、1 番目) “Multistep electron transfer systems containing [2.2]- or [3.3]paracyclophane” *J. Phys. Chem. A* **2016**, *120*, 1184-1189. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b11766
2. M. Fujitsuka, K. Satyanarayana, T.-Y. Luh, T. Majima “Singlet-singlet and singlet-triplet annihilations in structure-regulated porphyrin

- polymers" *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 印刷中 DOI: 10.1016/j.jphotochem.2015.10.011
3. C. Lu, M. Fujitsuka, A. Sugimoto, T. Majima "Unprecedented intramolecular electron transfer from excited perylene diimide radical anion" *J. Phys. Chem. C* 印刷中 DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b02454
4. S.-H. Lin, M. Fujitsuka, T. Majima "Sequence-dependent photocurrent generation through long-distance excess-electron transfer in DNA" *Angew. Chem. Int. Ed.* 印刷中 DOI: 10.1002/anie.201602850
5. P. Zhang, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima "Atomic layer deposition-confined nonstoichiometric TiO<sub>2</sub> nanocrystals with tunneling effects for solar driven hydrogen evolution" *J. Phys. Chem. Lett.* **2016**, *7*, 1173-1179. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.6b00227
6. O. Elbanna, P. Zhang, M. Fujitsuka, T. Majima "Facile preparation of nitrogen and fluorine codoped TiO<sub>2</sub> mesocrystal with visible light photocatalytic activity" *App. Catal. B: Environ.* **2016**, *192*, 80-87. DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.03.053
7. P. Zhang, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima "In situ fluorine doping of TiO<sub>2</sub> superstructures for efficient visible-light driven hydrogen generation" *ChemSusChem* **2016**, *9*, 617-623. DOI: 10.1002/cssc.201501558
8. S.-H. Lin, M. Fujitsuka, T. Majima "Excess-electron transfer in DNA by a fluctuation-assisted hopping mechanism" *J. Phys. Chem. B* **2016**, *120*, 660-666. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b10857
9. S. Kim, M. Fujitsuka, M. Miyata, T. Majima "Excited-state dynamics of Si-rhodamine and its aggregates: Versatile fluorophores for NIR absorption" *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2016**, *18*, 2097-2103. DOI: 10.1039/c5cp06541k
10. P. Zhang, M. Fujitsuka, T. Majima "TiO<sub>2</sub> mesocrystal with nitrogen and fluorine codoping during topochemical transformation: Efficient visible light induced photocatalyst with the codopants" *App. Catal. B: Environ.* **2016**, *185*, 181-188. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.12.022
11. M. Abe, M. Fujitsuka, T. Majima, Y. Hisaeda (計 6 名、4 番目) "Covalently attached porphycene-ferrocene dyads: Synthesis, redox-switched emission, and observation of the charge-separated state" *Inorg. Chem.* **2016**, *55*, 7-9. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b02078
12. M. Fujitsuka, T. Ohsaka, T. Majima "Dual electron transfer pathways from the excited C<sub>60</sub> radical anion: enhanced reactivities due to the photoexcitation of reaction intermediates" *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, *17*, 31030-31038. DOI: 10.1039/c5cp05254h
13. M. Fujitsuka, S. S. Kim, S. Tojo, T. Majima (計 5 名、1 番目) "Intermolecular and intramolecular electron transfer processes from excited naphthalene diimide radical anions" *J. Phys. Chem. B* **2015**, *119*, 7275-7282. DOI: 10.1021/jp510850z
17. M. Fujitsuka, D. W. Cho, J. Choi, T. Majima (計 5 名、1 番目) "Detection of structural changes upon one-electron oxidation and reduction of stilbene derivatives by time-resolved resonance Raman spectroscopy during pulse radiolysis and theoretical calculations" *J. Phys. Chem. A* **2015**, *119*, 6816-6822. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b04127
15. M. Fujitsuka, E. Kayahara, S. Yamago, T. Majima (計 6 名、1 番目) "Radical ions of cyclopyrenylene: Comparison of spectral properties with cycloparaphenylene" *J. Phys. Chem. A* **2015**, *119*, 4136-4141. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b01189
16. J. Choi, M. Fujitsuka, H. Ihee, T. Majima (計 6 名、3 番目) "Proton transfer of guanine radical cations studied by time-resolved resonance Raman spectroscopy combined with pulse radiolysis" *J. Phys. Chem. Lett.* **2015**, *6*, 5045-5050. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b02313
17. S.-H. Lin, M. Fujitsuka, T. Majima "Dynamics of excess-electron transfer via consecutive thymines versus alternating adenine-thymine sequences in DNA" *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 16190-16194. DOI: 10.1002/chem.201503115
18. M. Yamaji, S. Tojo, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、3 番目) "Mesolysis mechanisms of aromatic thioether radical anions studied by pulse radiolysis and DFT calculations" *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 7890-7896. DOI: 10.1021/acs.joc.5b00660
19. C. Lu, M. Fujitsuka, Y. Wei, T. Majima (計 6 名、2 番目) "Emission from charge recombination during the pulse radiolysis of bis(diarylamino)dihydro-indenoindene derivatives" *J. Phys. Chem. C* **2015**, *119*, 17818-17824. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b04823
20. S. Kim, M. Fujitsuka, M. Miyata, T. Majima (計 7 名、2 番目) "The unprecedented J-aggregate formation of rhodamine moieties induced by 9-phenylanthracenyl substitution" *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 11580-11583. DOI: 10.1039/c5cc03969j
21. S.-H. Lin, M. Fujitsuka, T. Majima "How does guanine-cytosine base pair affect excess-electron transfer in DNA?" *J. Phys. Chem. B* **2015**, *119*, 7994-8000. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03494
22. T. Takada, M. Fujitsuka, T. Majima, K. Yamana (計 8 名、5 番目) "Photocurrent generation through charge-transfer processes in noncovalent perylene diimide/DNA complexes" *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 6846-6851. DOI: 10.1002/chem.201406592
23. P. Zhang, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima "Efficient charge separation on 3D architectures of TiO<sub>2</sub> mesocrystals packed with a

- chemically exfoliated MoS<sub>2</sub> shell in synergetic hydrogen evolution” *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 7187–7190. DOI: 10.1039/c5cc01753j
24. J. Choi, D. W. Cho, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、4 番目) “Structural study of various substituted biphenyls and their radical anions based on time-resolved resonance Raman spectroscopy combined with pulse radiolysis” *J. Phys. Chem. A* **2015**, *119*, 851–856. DOI: 10.1021/jp511229t
25. S. Tojo, M. Fujitsuka, A. Ouchi, T. Majima “Selenium-Selenium bond cleavage of diaryl diselenide radical anions during pulse radiolysis” *ChemPlusChem* **2015**, *80*, 68–73. DOI: 10.1002/cplu.201402300
26. J. Choi, D. W. Cho, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、4 番目) “Configurational changes of heme followed by cytochrome *c* folding reaction” *Mol. BioSyst.* **2015**, *11*, 218–222. DOI: 10.1039/c4mb00551a
27. M. Fujitsuka, T. Shiragami, M. Yasuda, T. Majima (計 6 名、1 番目) “Solvent dynamics regulated electron transfer in S<sub>2</sub>-excited Sb and Ge tetraphenylporphyrins with an electron donor substituent at the meso-position” *J. Phys. Chem. A* **2014**, *118*, 3926–3933. DOI: 10.1021/jp502153x
28. M. Fujitsuka, D. W. Cho, J.-S. Yang, T. Majima (計 7 名、1 番目) “Radical cation of star-shaped condensed oligofluorenes having isotruxene as a core: Importance of rigid planar structure on charge delocalization” *J. Phys. Chem. A* **2014**, *118*, 2307–2315. DOI: 10.1021/jp412744p
29. M. Fujitsuka, E. Kayahara, S. Yamago, T. Majima (計 6 名、1 番目) “Properties of triplet-excited [*n*]cycloparaphenylenes (*n* = 8–12): Excitation energies lower than those of linear oligomers and polymers” *J. Phys. Chem. A* **2014**, *118*, 4527–4532. DOI: 10.1021/jp504689q
30. M. Fujitsuka, E. Kayahara, S. Yamago, T. Majima (計 6 名、1 番目) “Radical ions of cycloparaphenylenes: Size dependence contrary to the neutral molecules” *J. Phys. Chem. Lett.* **2014**, *5*, 2302–2305. DOI: 10.1021/jz5009054
31. S.-H. Lin, M. Fujitsuka, M. Ishikawa, T. Majima “Driving force dependence of charge separation and recombination processes in dyads of nucleotides and strongly electron-donating oligothiophenes” *J. Phys. Chem. B* **2014**, *118*, 12186–12191. DOI: 10.1021/jp509691f
32. S. Kim, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima “Far-red fluorescence probe for monitoring singlet oxygen during photodynamic therapy” *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 11707–11715. DOI: 10.1021/ja504279r
33. J. Choi, S. Tojo, M. Fujitsuka, T. Majima “Dynamics in the heme geometry of myoglobin induced by the one-electron reduction” *Int. J. Rad. Biol.* **2014**, *90*, 459–467. DOI: 10.3109/09553002.2013.876115
34. T. Takada, M. Fujitsuka, T. Majima, K. Yamana (計 6 名、4 番目) “Photocurrent generation enhanced by charge delocalization over stacked perylenediimide chromophores assembled within DNA” *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 6814–6817. DOI: 10.1021/ja501535z
35. D. W. Cho, M. Fujitsuka, U. C. Yoon, T. Majima (計 6 名、2 番目) “Regulation of photodynamic interactions in 1,8-naphthalimide-linker–phenothiazine dyads by cyclodextrins” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2014**, *16*, 5779–5784. DOI: 10.1039/c3cp54803a
36. Z. Bian, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、4 番目) “A nanocomposite superstructure of metal oxides with effective charge transfer interfaces” *Nature Commun.* **2014**, *5*, 4038/1–4038/9. DOI: 10.1038/ncomms4038
37. Z. Bian, T. Tachikawa, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、4 番目) “Au/TiO<sub>2</sub> superstructure-based plasmonic photocatalysts exhibiting efficient charge separation and unprecedented activity” *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 458–465. DOI: 10.1021/ja410994f
38. M. Fujitsuka, S. Tojo, J.-S. Yang, T. Majima “ $\gamma$ -Ray radiolysis and theoretical study on radical ions of star-shaped oligofluorenes having a truxene or isotruxene as a core” *Chem. Phys.* **2013**, *419*, 118–123. DOI: 10.1016/j.chemphys.2012.12.035
39. M. Fujitsuka, E. Kayahara, S. Yamago, T. Majima (計 5 名、1 番目) “Enhancement of the quinoidal character for smaller [*n*]cycloparaphenylenes probed by Raman spectroscopy” *ChemPhysChem* **2013**, *14*, 1570–1572. DOI: 10.1002/cphc.201300144
40. J. Choi, A. Tanaka, M. Fujitsuka, T. Majima (計 5 名、4 番目) “Efficient electron transfer in i-motif DNA with a tetraplex structure” *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 12937–12941. DOI: 10.1002/anie.201306017
41. J. Matsumoto, M. Fujitsuka, T. Majima, M. Yasuda (計 8 名、6 番目) “Spectroscopic analysis of the interaction of human serum albumin with tricationic phosphorus porphyrins bearing axial pyridinio groups” *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2013**, *86*, 1240–1247. DOI: 10.1246/bcsj.20130191
42. S. Kim, M. Fujitsuka, T. Majima “Photochemistry of singlet oxygen sensor green” *J. Phys. Chem. B* **2013**, *117*, 13985–13992. DOI: 10.1021/jp406638g
43. E. Kayahara, M. Fujitsuka, T. Majima, S. Yamago (計 10 名、5 番目) “Synthesis and physical properties of a ball-like three-dimensional  $\pi$ -conjugated molecule” *Nature Commun.* **2013**, *4*, 3694/1–3694/7. DOI: 10.1038/ncomms3694
44. S. Tojo, M. Fujitsuka, T. Majima “Mesolysis of radical anions of tetra-, penta-, and hexaphenylethanes” *J. Org. Chem.* **2013**, *78*,

1887-1893. DOI: 10.1021/jo301853g

〔学会発表〕(計 16 件)

1. 藤塚守, 真嶋哲朗 “C<sub>60</sub> ラジカルアニオン励起状態からの分子内電子移動過程” 日本化学会第 96 春季年会, 2016 年 3 月 24 日~2016 年 3 月 27 日, 同志社大学(京都府・京田辺市)
2. 藤塚守, D. W. Cho, J. Choi, 藤乗幸子, 真嶋哲朗 “バルスラジオリシス-時間分解共鳴ラマン測定によるスチルベンラジカルイオンの検討” 日本化学会第 96 春季年会, 2016 年 3 月 24 日~2016 年 3 月 27 日, 同志社大学(京都府・京田辺市)
3. M. Fujitsuka, T. Majima “Time resolved resonance Raman spectroscopy during pulse radiolysis of functional materials” 13th DAE-BRNS Biennial Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry incorporating 6th Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry, 2016 年 1 月 5 日~2016 年 1 月 9 日, Mumbai (India)
4. M. Fujitsuka, T. Majima “Direct observation of excess electron transfer in DNA” The 7th Asia and Oceania Conference on Photobiology, 2015 年 11 月 15 日~2015 年 11 月 18 日, Taipei (Taiwan)
5. 藤塚守, C. Lu, 岩本貴寛, 茅原栄一, 山子茂, 真嶋哲朗 “シクロパラフェニレンの励起三重項物性の環サイズ依存性”, 2015 年光化学討論会, 2015 年 9 月 9 日~2015 年 9 月 11 日, 大阪市立大学(大阪府・大阪市)
6. M. Fujitsuka, S. S. Kim, T. Majima “Photoinduced electron transfer processes from excited naphthalene diimide radical anions as an efficient electron donor” 27th International Conference on Photochemistry, 2015 年 6 月 28 日~2015 年 7 月 3 日, Jeju (Korea)
7. M. Fujitsuka, C. Lu, T. Iwamoto, E. Kayahara, S. Yamago, T. Majima “Properties of Triplet-Excited [n]Cycloparaphenylenes (n = 8 - 12)” The 11th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2015 年 6 月 26 日~2015 年 6 月 28 日, Jeju (Korea)
8. M. Fujitsuka, T. Majima “Study on radical ions of oligomers by time-resolved resonance Raman spectroscopy during pulse radiolysis” 15th International Congress of Radiation Research 2015 年 5 月 25 日~2015 年 5 月 29 日, 京都国際会館 (京都府・京都市)
9. 藤塚守, S. S. Kim, C. Lu, 藤乗幸子, 真嶋哲朗 “励起ナフタルジイミドラジカルアニオンからの電子移動” 日本化学会第 95 春季年会, 2015 年 3 月 26 日~2015 年 3 月 29 日, 日本大学(千葉県・船橋市)
10. 藤塚守, 藤乗幸子, 岩本貴寛, 茅原栄一, 山子茂, 真嶋哲朗 “シクロパラフェニレンラジカルイオン種の環サイズ依存性” 日本化学会第 95 春季年会, 2015 年 3 月 26 日~2015 年 3 月 29 日, 日本大学(千葉県・船橋市)
11. M. Fujitsuka, T. Majima “Electron transfer from excited radical ions in functionalized

organic molecular systems” Kobe mini-symposium on functionalized organic molecules, 2014 年 11 月 10 日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

12. 藤塚守, 白上努, 趙大源, 藤乗幸子, 保田昌秀, 真嶋哲朗 “S<sub>2</sub> 励起 Sb および Ge ポルフィリンの電子移動過程” 2014 年光化学討論会 2014 年 10 月 11 日~2014 年 11 月 13 日, 北海道大学(北海道・札幌市)

13. M. Fujitsuka, D. W. Cho, J. Choi, J.-S. Yang, T. Majima “Radical cation of star-shaped condensed oligofluorenes having isotruxene as a core: importance of rigid planar structure on charge delocalization” The 10th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2014 年 6 月 21 日~2014 年 6 月 23 日, Seoul (Korea)

14. M. Fujitsuka, D. W. Cho, T. Iwamoto, S. Yamago, T. Majima “Size-dependent properties of [n]cycloparaphenylenes (n=8-13), hoop-shaped pi-conjugated molecules” The 10th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2014 年 6 月 21 日~2014 年 6 月 23 日, Seoul (Korea)

15. M. Fujitsuka, H. Shimakoshi, Y. Hisaeda, T. Majima “Photoinduced electron transfer processes in supramolecular donor-acceptor dyads using porphyrin isomers” The 10th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, 2014 年 6 月 21 日~2014 年 6 月 23 日, Seoul (Korea)

16. 藤塚守, D. W. Cho, J. Choi, 藤乗幸子, J.-S. Yang, 真嶋哲朗 “二次元状縮合オリゴフルオレンのラジカルイオン” 日本化学会第 94 春季年会 2014 年 3 月 27 日~2014 年 3 月 30 日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

〔図書〕(計 1 件)

1. M. Fujitsuka, T. Majima “Fundamental reaction mechanisms in radiation chemistry and recent examples” in “Applications in EPR in Radiation Research” Springer, 2014, 773 (3-32).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/mec/index1>

## 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