

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26708003

研究課題名(和文)ポルフィリン・フタロシアニンの特性を活かした機能性分子の創出とその集積化法の開発

研究課題名(英文)Creation of Functional Molecules based on Unique Properties of Porphyrins and Phthalocyanines and Development of Methodologies for Creating Molecular Assemblies

研究代表者

清水 宗治 (Shimizu, Soji)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70431492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：ポルフィリンとフタロシアニンの構造と物性の相関解明に基づいて、新たに分子設計を行うことで、円偏光発光や近赤外発光、吸収の広帯域化などの光物性や、メビウス構造などの構造的特徴、さらに超分子集積能などを示す一連の新規機能性分子の創製に成功した。特にaza-BODIPY類縁体では光吸収と共役構造を利用することで、有機薄膜太陽電池のドナー材料への応用も検討しており、初材料としては良好な結果を報告している。また多電子授受能を示すフタロシアニン類縁体では二次電池への応用も試みており、基礎から応用を指向した基盤研究まで幅広く展開した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a series of novel functional molecules, which exhibit photophysical properties like circularly polarized fluorescence, NIR emission, and panchromatic absorption in the vis/NIR regions, structural features like Mobius structures, and supramolecular assembling behaviors, was successfully synthesized by carrying out new molecular designs based on structure-property relationships of porphyrins and phthalocyanines. Among them, we found potential utility of aza-BODIPY analogues with unique absorption and highly conjugated structures as donor units for organic photovoltaics. In addition, we have also examined application of phthalocyanine analogues with multi-redox activities as a cathode material for rechargeable batteries. During the period of this grant, we have conducted wide range of research covering basic investigations and exploratory investigations in order to target a variety of applications.

研究分野：化学

キーワード：ポルフィリン フタロシアニン BODIPY 光物性 複合材料・物性

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギー・情報・医療分野など、基礎科学研究の発展が貢献しうる応用分野において、現代社会が抱える諸問題の解決・改善のために、単分子の持つ優れた分子物性やその集積化・複合化による物性発現に大きな期待が寄せられている。その中において、ポルフィリン (Por) およびフタロシアニン (Pc) は可視光吸収、酸化還元特性、金属配位能など、多くの有用な物性を示すことから、光学材料・有機半導体材料として特に関心を集めている。しかしながら、多くの従来研究では既存の分子骨格を大きく変えることなく、各応用分野に必要な分子物性に摺り合わせているものが散見され、本質的な発展が望めるものは多くなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では Por および Pc の分子物性を最大限に引き出すため、構造・物性相関の解明とその知見に基づく、応用研究に必要な物性発現のための新たな分子設計と研究の視点の探索を、**Por・Pcの特性を活かした機能性分子の創出および物性解明、Por・Pcの機能性に関与している部分骨格を基盤とした機能性分子の創出と物性解明、Por・Pcの集積化法の開発と物性発現**の3つの研究テーマにおいて展開することを目的とした。具体的には Por・Pc の軌道角運動量や電子遷移における変化量を用いることで、円偏光発光 (CPL) や単分子磁性 (SMM) などの強磁性の発現を目的とした。Por では Pc 特有の光吸収特性に着想を得て、新たな分子骨格を構築することで、可視近赤外領域に優れた光吸収および発光を示す機能性分子の創出を目的とした。Pc を基盤とした Metal-Organic-Framework (MOF) を構築することで、一義的な構造体構築を目的とした。また Por および Pc で見いだした新規機能性分子を Por で確立する手法で集積化することで、発光・磁気材料あるいは有機薄膜太陽電池などへのエネルギー変換材料の創出も目的とした。

### 3. 研究の方法

新規骨格の分子設計は DFT および TDDFT 計算を用いて、HOMO-LUMO ギャップや理論吸収を予測した後に行った。適宜、新規反応を開発して合成を行い、化合物の同定は NMR、質量分析等で行った。多くの新規化合物は X 線単結晶構造解析により構造決定まで行った。また応用研究につながる基礎物性として、電気化学測定を用いた HOMO および LUMO エネルギーの評価や、CPL 分光計を用いた CPL 測定を行った。一部の分子においては、二次電池の正極活物質特性や有機薄膜太陽電池特性について評価を行った。

### 4. 研究成果

Por 類縁体では最近、構造の柔軟性に由来するトポロジカルな芳香族性である Möbius 芳香族性が見いだされ、関心を集めているが、類似の構造を Pc 類縁体で実現した例は無かった。今回、我々は Por の研究テーマにおいて、Möbius 構造を取る Pc 類縁体の合成に初めて成功した (図 1)。結晶構造では、Möbius 構造が確認できたものの、予想に反して、*p*-フェニレンを介した共役の寄与が小さいために、Möbius 芳香族性は示さないことを明らかにした。

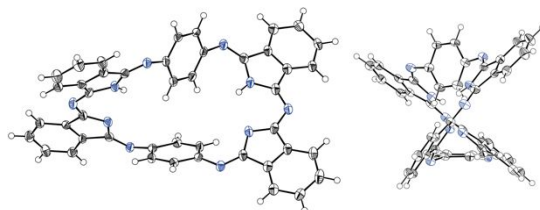


図 1. Möbius 構造を取る Pc 類縁体

また、Pc の電子遷移における大きな軌道角運動量変化を利用して、CPL 特性の発現も試みた。サブフタロシアニンの *1,2*-位でベンゼン環が縮環した 1,2-サブナフタロシアニンはお椀構造に起因して光学活性分子であり、先行研究において、その光学分割に成功している。今回、このキラルな 1,2-サブナフタロシアニンの CPL を測定したところ、キラリティに対応して、符号の異なる CPL を示すことを明らかにした。一方で、その *g* 値は  $10^{-4}$  程度と小さく、Pc 骨格では蛍光に対応する光吸収の禁制が弱く、遷移磁気双極子モーメントに比べて、遷移電気双極子モーメントが大きいために、本質的に高い *g* 値は見込めないことがわかった。

Por では Pc と類似の骨格を有し、近赤外吸収および発光特性が期待されている aza-BODIPY 類縁体をラクタム構造を有する分子から簡便に合成する合成法を確立した (図 2 および 3)。

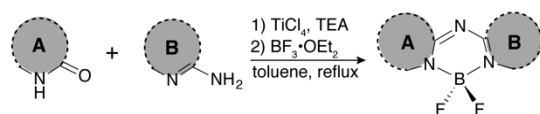


図 2. 共役ラクタムとヘテロ芳香族アミンを用いた aza-BODIPY 合成法

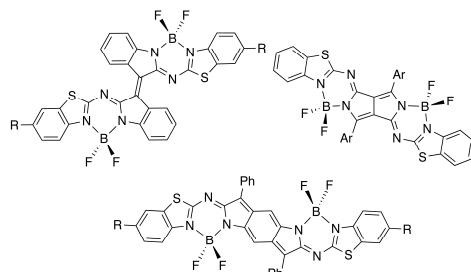


図 3. 本研究で合成した新規 aza-BODIPY 類縁体

得られた一連の aza-BODIPY 類縁体は可視近赤外領域に強い光吸収と発光を示すことを明らかにした。また、構造の一部に  $sp^3$  炭

素を組み込むことで分子振動により、溶液状態では消光するものの、固体状態ではその分子振動が抑制されるために発光する、凝集誘起発光挙動を示すことを見いだした(図4)。

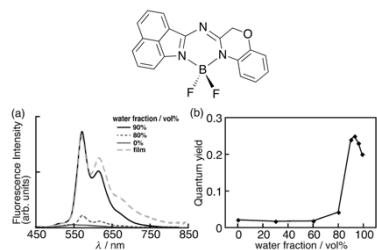


図4. 凝集誘起発光挙動を示す aza-BODIPY 類縁体

また、この aza-BODIPY 類縁体をピチオフェンを介して二量化したところ、可視近赤外領域の広帯域に吸収を示した。この特異な広帯域化は、理論計算を用いた解析とビフェニル連結の対照分子では見られなかったことから判断して、チオフェン周りの回転異性化に起因することを明らかにした(図5)。

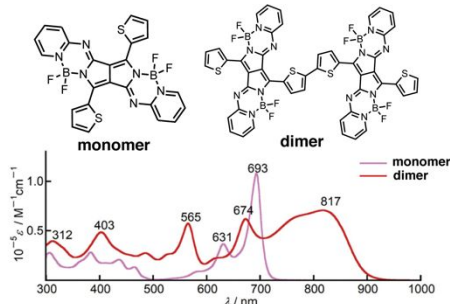


図5. 広帯域吸収を示す aza-BODIPY 二量体と吸収スペクトル

これらの一連の aza-BODIPY 類縁体の光吸収特性を利用して、バルクヘテロジャンクション(BHJ)型の有機薄膜太陽電池を作成し、その特性評価も行った。電気化学測定およびマイクロ波過渡伝導度測定の結果から、今回の aza-BODIPY 類縁体は主に p 型材料として機能することがわかった。n 型材料に PCBM を用いた BHJ 型有機薄膜太陽電池を作成したところ、変換効率が最大で 1.3% を示した(図6)。変換効率がそれほど高くない理由としては、500 ナノメートル付近の光吸収が弱いことが考えられた。現在、光吸収を広帯域化した多量体分子や別の機能性色素分子ユニットとの複合化により、変換効率の改善を試みている。

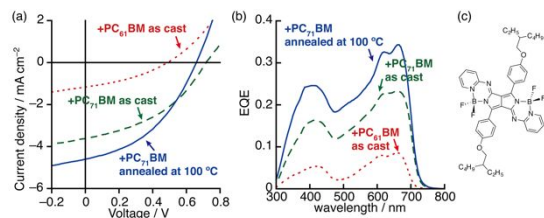


図6.(a) aza-BODIPY 類縁体と PCBM の薄膜の光電変換特性、(b)素子の EQE スペクトル、(c)素子作成

に使用した aza-BODIPY 類縁体の構造式

では目的分子の合成ができなかったために MOF 型の集積化には成功していない。しかしながら、お椀状構造を持つサブフラコシアニンの周辺に電子ドナーであるテトラチアフルバレン(TTF)を縮環した分子において、強い  $\pi$ -相互作用により、超分子的に積層した構造を取り、またその積層構造が TTF 部位の酸化還元により、制御可能であることを見いだしている。また、類似の系で、多電子授受能を利用することで、リチウム二次電池の正極活物質への応用も試みており、高いサイクル特定を示すなど、新規材料としては良好な結果を得ている。

全体として本研究において、Por および Pc の構造物性相関解明に基づく分子設計を駆使することで、従来に無い、電子構造、光吸収特性、電気化学的特性を示す新規機能性分子の創製に多く成功したと言える。集積化については当初計画とは異なるが、超分子相互作用を利用した可逆な集積構造の構築に成功していることから、一定の方向性を得たと考えている。本研究成果の評価は高く、周辺研究成果も含めて、23 件の論文発表、70 件の学会発表を行うに至っている。今後も継続していくことで、エネルギー・情報・医療分野に資する機能性分子材料の創出に貢献したい。

## 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、全て査読有り)

1. “The First Silicon(IV) Corrole Complexes: Synthesis, Structures, Properties, and Formation of a  $\mu$ -Oxo Dimer”, K. Ueta, M. Fukuda, G. Kim, S. Shimizu, T. Tanaka, D. Kim, A. Osuka, *Chem. Eur. J.* 2018 in press.

DOI:10.1002/chem.201800165

2. “Blackening aza-BODIPY Analogues by Simple Dimerization: Panchromatic Absorption of Pyrrolopyrrole aza-BODIPY Dimer”, Y. Kage, S. Mori, M. Ide, A. Saeki, H. Furuta, S. Shimizu, *Mater. Chem. Front.* 2018, Vol. 2, 112-120.

DOI:10.1039/C7QM00438A

3. “フタロシアニンの構造変換に基づく新規機能性分子の創出”, 清水宗治, 有機合成化学協会誌, 2017, Vol. 75, 1012-1022.

DOI:10.5059/yukigoseikyokaiishi.75.1012

4. “Facile Synthesis of Dimeric aza-BODIPY Analogues from Electron-Deficient Bis lactams and Their Intriguing Optical and Electrochemical Properties”, M. Tamada, T. Iino, Y. Wang, M. Ide, A. Saeki, H. Furuta, N. Kobayashi, S. Shimizu, *Tetrahedron Lett.* 2017, Vol. 58, 3151-3154.

DOI:10.1016/j.tetlet.2017.06.088

5. “Supramolecular Dimeric Structures of Pyrazole-Containing *meso*-Oxo Carbaphlorin

- Analogues”, M. Ishida, H. Fujimoto, T. Morimoto, S. Mori, M. Toganoh, S. Shimizu, H. Furuta, *Supramol. Chem.* 2017, Vol. 29, 8-16.  
DOI:10.1080/10610278.2016.1158408
6. “Phenylene-Bridged Expanded Porphyrazines“, F. Iizuka, Y. Kage, N. Kobayashi, H. Furuta, S. Shimizu, *ChemPlusChem*, 2017, Vol. 82, 1021-1024.  
DOI:10.1002/cplu.201600482
7. “Polymeric Self-Assemblies with Boron-Containing Near-Infrared Dye Dimers for Photoacoustic Imaging Probes”, K. Miki, A. Enomoto, T. Inoue, T. Nabeshima, S. Saino, S. Shimizu, H. Matsuoka, K. Ohe, *Biomacromolecules*, 2017, Vol. 18, 249–256.  
DOI:10.1021/acs.biomac.6b01568
8. “Recent Advances in Subporphyrins and Triphyrin Analogues: Contracted Porphyrins Comprising Three Pyrrole Rings”, S. Shimizu, *Chem. Rev.* 2017, Vol. 117, 2730-2784.  
DOI:10.1021/acs.chemrev.6b00403
9. “Stacked Antiaromatic Porphyrins”, R. Nozawa, H. Tanaka, W.-Y. Cha, Y. Hong, I. Hisaki, S. Shimizu, J.-Y. Shin, T. Kowalczyk, S. Irle, D. Kim, H. Shinokubo, *Nat. Commun.* 2016, Vol. 7, 13620.  
DOI:10.1038/ncomms13620
10. “Pyrene-Bridged Boron Subphthalocyanine Dimers: Combination of Planar and Bowl-Shaped  $\pi$ -Conjugated Systems for Creating Uniquely Curved  $\pi$ -Conjugated Systems”, S. Nakano, Y. Kage, H. Furuta, N. Kobayashi, S. Shimizu, *Chem. Eur. J.* 2016, Vol. 22, 7706-7710.  
DOI:10.1002/chem.201600548
11. “A Novel Isoindole-Containing Polyaromatic Hydrocarbon Unexpectedly Formed During the Synthesis of *meso*-2,6-Dichlorophenyl-Substituted Tribenzosubporphyrin”, Y. Shiina, H. Karasaki, S. Mori, N. Kobayashi, H. Furuta, S. Shimizu, *J. Porphyrins Phthalocyanine* 2016, Vol. 20, 1049-1054.  
DOI:10.1142/S1088424616500541
12. “Core-Modified Phthalocyanines and Subphthalocyanines: a Synthetic Strategy Towards Core-Modification and Novel Properties Arising from the Inner Ring-Expansion”, S. Shimizu, H. Furuta, *Macroheterocycles*, 2015, Vol. 8, 332-342.  
DOI:10.6060/mhc151102s
13. “Synthesis of a Tetrabenzotetraaza[8]circulene by a “Fold-In” Oxidative Fusion Reaction”, F. Chen, Y. S. Hong, S. Shimizu, D. Kim, T. Tanaka, A. Osuka, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, Vol. 54, 10639-10642.  
DOI:10.1002/anie.201505124
14. “Benzo[*c,d*]indole-Containing aza-BODIPY Dyes: Asymmetrization-Induced Solid-State Emission and Aggregation-induced Emission Enhancement as New Properties of a Well-Known Chromophore”, S. Shimizu, A. Murayama, T. Haruyama, T. Iino, S. Mori, H. Furuta, N. Kobayashi, *Chem. Eur. J.* 2015, Vol. 21, 12996-13003.  
DOI:10.1002/chem.201501464
15. “Ring-Fused Porphyrins: Extension of  $\pi$ -Conjugation Significantly Affects the Aromaticity and Optical Properties of the Porphyrin  $\pi$ -Systems and Lewis Acidity of the Central Metal Ions”, Y. Saegusa, T. Ishizuka, K. Komamura, S. Shimizu, H. Kotani, N. Kobayashi, T. Kojima, *PCCP* 2015, Vol. 17, 15001-15011.  
DOI:10.1039/C5CP01420D
16. “Cyclophanes Containing Bowl-Shaped Aromatic Chromophores: Three Isomers of *anti*-[2.2](1,4)Subphthalocyaninophane”, Q. Liu, S. Shimizu, N. Kobayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, Vol. 54, 5187-5191.  
DOI:10.1002/anie.201411510
17. “Asymmetric Core-Expanded aza-BODIPY Analogues: Facile Synthesis and Optical Properties”, H. Liu, H. Lu, Z. Zhou, S. Shimizu, Z. Li, N. Kobayashi, Z. Shen, *Chem. Commun.* 2015, Vol. 51, 1713-1716.  
DOI:10.1039/c4cc06704e
18. “Rational Molecular Design Towards vis/NIR Absorption and Fluorescence by using Pyrrolopyrrole *aza*-BODIPY and its Highly Conjugated Structures for Organic Photovoltaics”, S. Shimizu, T. Iino, A. Saeki, S. Seki, N. Kobayashi *Chem. Eur. J.* 2015, Vol. 21, 2893–2904.  
DOI:10.1002/chem.201405761
19. “Sizeable Red-Shift of Absorption and Fluorescence of Subporphyrazine Induced by Peripheral Push and Pull Substitution”, X. Liang, S. Shimizu, N. Kobayashi, *Chem. Commun.* 2014, Vol. 50, 13781–13784.  
DOI:10.1039/c4cc05943c
20. “Unexpected Formation of a Triphyrin in the Reaction of Dibromodipyrromethene and *N,N*-Dimethylaminoethanol”, S. Shimizu, S. Hirokawa, N. Kobayashi, *J. Porphyrins Phthalocyanines* 2014, Vol. 18, 727-734.  
DOI:10.1142/S1088424614500527
21. “Dearomatization-Induced Transannular Cyclization: Synthesis of Electron-Accepting Thiophene-S,S-Dioxide-Fused Biphenylene”, A. Fukazawa, H. Oshima, S. Shimizu, N. Kobayashi, S. Yamaguchi, *J. Am. Chem. Soc.* 2014, Vol. 136, 8738-8745.  
DOI:10.1021/ja503499n
22. “Core-Modified Rubyrins Containing Dithienylethene Moieties”, Z. Zhou, Y. Chang, S. Shimizu, J. Mack, C. Schütt, R. Herges, Z. Shen, N. Kobayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, Vol. 53, 6563-6567.  
DOI:10.1002/anie.201402711
23. “Structurally-Modified Subphthalocyanines: Molecular Design Towards Realization of Expected Properties from the Electronic Structure and Structural Features of Subphthalocyanine”, S. Shimizu, N. Kobayashi, *Chem. Commun.* 2014, Vol. 50, 6949-6966.  
DOI:10.1039/c4cc01526f
- 〔学会発表〕(計 7 0 件)
1. 日永田泰斗, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環フタロシアニン  $\mu$ -oxo 二量体の合成と物性”, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年



2. 西山彰秀, 福田雅弥, 森重樹, 古田弘幸, 清水宗治, “反芳香族性 5,15-ジオキサポルフィリン及び  $\beta,\beta$  結合二量体の合成と物性”, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年
3. S. Shimizu, “Synthesis of Chalcogen-Containing Antiaromatic Porphyrinoids”,  $\pi$ -Figuration German-Japanese Workshop Heidelberg, 2017 年
4. S. Shimizu, “Creation of Novel  $\pi$ -Conjugated Systems and Their Functionalities Based on Phthalocyanine Chemistry”, Bath University Department Seminar, 2017 年
5. 日永田泰斗, 古田弘幸, 清水宗治, “テトラチアフルバレン縮環低対称ケイ素フタロシアニンの合成と物性”, 第 54 回化学関連支部合同九州大会, 2017 年
6. 西山彰秀, 福田雅弥, 森重樹, 古田弘幸, 清水宗治, “反芳香族性 5,15-ジオキサポルフィリンの合成および物性”, 第 54 回化学関連支部合同九州大会, 2017 年
7. 西山彰秀, 福田雅弥, 森重樹, 古田弘幸, 清水宗治, “反芳香族性 5,15-ジオキサポルフィリンの合成および物性”, 第 29 回若手研究者のためのセミナー, 2017 年
8. 日永田泰斗, 古田弘幸, 清水宗治, “テトラチアフルバレン縮環低対称ケイ素フタロシアニンの合成と物性”, 第 29 回若手研究者のためのセミナー, 2017 年
9. 西山彰秀, 福田雅弥, 森重樹, 古田弘幸, 清水宗治, “反芳香族性 5,15-ジオキサポルフィリンの合成および物性”, 第 28 回基礎有機化学討論会, 2017 年
10. 福田雅弥, 清水宗治, 古田弘幸, “N-混乱ポルフィリン-アザジピリン複合体の合成とその錯化挙動”, 第 28 回基礎有機化学討論会, 2017 年
11. 日永田泰斗, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環低対称ケイ素フタロシアニンダイマーの合成と分子配列制御”, 第 28 回基礎有機化学討論会, 2017 年
12. 内原岬哉, 古川真, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環サブフタロシアニンをを用いた超分子ポリマーの構築”, 第 28 回基礎有機化学討論会, 2017 年
13. 清水宗治, “反芳香族性 5,15-ジオキサポルフィリンの合成と物性”,  $\pi$  造形科学 第 4 回公開シンポジウム, 2017 年
14. S. Shimizu, Y. Shiina, K. Uchihara, N. Kobayashi, H. Furuta, “Fabrication of External Stimuli-Responsive Molecular Systems Based on TTF-Annulated Phthalocyanine and Subphthalocyanine”, The 23rd Joint Seminar of the Busan Branch of the Korean Chemical Society (KCS) and the Kyushu Branch of the Chemical Society of Japan (CSJ), 2017 年
15. T. Hieida, H. Furuta, S. Shimizu, “Synthesis of Low Symmetric Tetrathiafulvalene-Annulated Silicon Phthalocyanine and m-oxo Dimer”, 2017 年
16. A. Nishiyama, M. Fukuda, S. Mori, H. Furuta, S. Shimizu, “Synthesis and Properties of 5,15-Dioxaporphyrin”, The 23rd Joint Seminar of the Busan Branch of the Korean Chemical Society (KCS) and the Kyushu Branch of the Chemical Society of Japan (CSJ), 2017 年
17. S. Shimizu, Y. Shiina, K. Uchihara, N. Kobayashi, H. Furuta “External Stimuli-Responsive Molecular Systems Based on TTF-Annulated Phthalocyanine and Subphthalocyanine”, International Symposium on Macrocyclic and Supramolecular Chemistry in conjunction with ISACS, 2017 年
18. 内原岬哉, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環サブフタロシアニンをを用いた超分子ポリマーの構築”, 第 53 回化学関連支部合同九州大会, 2016 年
19. S. Shimizu, “Synthesis of Novel aza-BODIPY Analogues from Lactams and Their Intriguing Optical and Electrochemical Properties”, Symposium of Fluoro-Boron-Silicon Dyes, 2016 年
20. S. Shimizu, “Design and Creation of Novel Porphyrinoids Based on the Structure-Property Relationship”, Ninth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-9), 2016 年
21. M. Fukuda, S. Shimizu, H. Furuta, “Synthesis of a N-Confused Porphyrin-aza-Dipyrrin Conjugate : a Porphyrin Analogue Bearing Exterior and Interior Coordination Sites”, Ninth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-9), 2016 年
22. Y. Kage, S. Mori, H. Furuta, S. Shimizu, “Pyrrolopyrrole Aza-BODIPY Monomers and Dimers : Control of Absorption in the Far-red and NIR Regions”, Ninth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-9), 2016 年
23. 清水宗治, “TTF 縮環サブフタロシアニンの合成とその超分子構造の構築”, 構造有機若手研究者 研究会 2016, 2016 年
24. 鹿毛悠冬, 森重樹, 古田弘幸, 清水宗治, “ピロロピロール-アザ-BODIPY の可視および近赤外領域における吸収特性制御”, 有機合成化学協会九州山口支部 第 28 回若手研究者のためのセミナー, 2016 年
25. 福田雅弥, 清水宗治, 古田弘幸, “外部及び内部に配位サイトを有する N-混乱ポルフィリン-アザジピリン複合体の合成”, 有機合成化学協会九州山口支部 第 28 回若手研究者のためのセミナー, 2016 年
26. 内原岬哉, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環サブフタロシアニンをを用いた超分子ポリマーの構築”, 有機合成化学協会九州山口支部 第 28 回若手研究者のためのセミナー, 2016 年
27. 唐崎秀朗, 古田弘幸, 清水宗治, “ピロロピロール部位を組み込んだアザジピリン亜鉛錯体の合成および超分子ポリマー形成”, 第 27 回基礎有機化学討論会, 2016 年
28. 内原岬哉, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環サブフタロシアニンをを用いた超分子ポリマーの構築”, 第 27 回基礎有機化学討論会, 2016 年
29. 福田雅弥, 清水宗治, 古田弘幸, “アザジピリン様骨格を含む N-混乱ポルフィリン誘導体の合成とその錯化挙動”, 第 27 回基礎有機化学討論会, 2016 年
30. 鹿毛悠冬, 古田弘幸, 清水宗治, “ピロロピロール-アザ-BODIPY 二量体の合成および吸収スペクトルの広帯域化”, 第 27 回基礎有機化学討論会, 2016 年
31. 清水宗治, 内原岬哉, 古田弘幸, “TTF 縮環フ

タロシアン類を基盤とした外部刺激応答性分子ワイヤの創出”, 第 65 回高分子討論会, 2016 年

32. 内原岬哉, 古川貢, 古田弘幸, 清水宗治, “フッ素軸配位子を有する TTF 縮環サブタロシアンを用いた超分子ポリマーの構築”, 第 43 回有機典型元素化学討論会, 2016 年

33. 鹿毛悠冬, 椎名祐太, 小林長夫, 古田弘幸, 清水宗治, “TTF 縮環ケイ素フタロシアン多量体の酸化還元による分子配列制御”, 第 43 回有機典型元素化学討論会, 2016 年

34. S. Shimizu, Y. Shiina, H. Furuta, N. Kobayashi, “TTF-annulated Silicon Phthalocyanine and Redox Control of Molecular Alignment of Its  $\mu$ -Oxo Oligomers”, 5th Georgian Bay International Conference on Bioinorganic Chemistry, 2015 年

35. S. Shimizu, T. Iino, A. Murayama, M. Tamada, H. Karasaki, N. Kobayashi, H. Furuta, “Synthesis of Novel aza-BODIPY Analogues from a Schiff Base Formation Reaction of Lactams and Their Unique Optical and Electrochemical Properties”, 16th International Symposium on Novel Aromatic Compounds (ISNA-16), 2015 年

36. S. Shimizu, “Synthesis of Novel aza-BODIPY Analogues from Lactams and Their Intriguing Optical and Electrochemical Properties”, I SYMPOSIUM ON AROMATIC COMPOUNDS, 2015 年

37. S. Shimizu, H. Karasaki, Y. Kage, H. Furuta, “Synthesis of Novel Dimeric aza-BODIPY Analogues from Lactams and Their Intriguing Optical and Electrochemical Properties”, The 10th International Conference on Cutting-Edge Organic Chemistry in Asia (ICCEOCA-10), 2015 年

38. S. Shimizu, X. Liang, S. Hirokawa, A. Miura, N. Kobayashi, “Chiral Subphthalocyanine and Its Related Compounds”, Eighth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-8), 2014 年

〔図書〕(計 2 件)

1. “Recent advances in the chemistry of phthalocyanine as functional chromophores” in Chemical Science of  $\pi$ -Electron Systems (Eds. T. Akasaka, A. Osuka, S. Fukuzumi, H. Kandori), S. Shimizu, N. Kobayashi, Springer, 2015  
DOI: 10.1007/978-4-431-55357-1

2. ラクタム分子を基盤とした元素ブロック材料の創出 (元素ブロック材料の創出と応用展開 (監修: 中條善樹))清水宗治, シー・エム・シー出版, 2016 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~furuta/ab/>

6 . 研究組織  
(1)研究代表者  
清水 宗治 (SHIMIZU SOJI)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号 : 70431492

(2)研究分担者  
( )

研究者番号 :

(3)連携研究者  
( )

研究者番号 :

(4)研究協力者  
( )