

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 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(S)

研究期間：2007 ~ 2011

課題番号：19675001

研究課題名（和文） 未踏物性発現を目指した π 電子系化学研究課題名（英文） Chemistry of New π -Electron Systems with Unusual Properties

研究代表者

山口 茂弘 (YAMAGUCHI SHIGEHIRO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60260618

研究成果の概要（和文）：有機エレクトロニクス分野の発展を担う鍵材料の創出を目指し、優れた光・電子物性をもつ新奇 π 電子系分子の開発に取り組んだ。典型元素に特徴を生かした分子設計、新反応の開発、分子配向制御を機軸に取り組み、新奇な骨格をもつ一連の π 電子系分子の合成を達成した。高効率固体発光、白色発光、高電荷移動度などの標的物性を実現するとともに、安定ホウ素材料や反芳香族性 π 電子系の設計指針などの新たな分子設計指針を確立した。

研究成果の概要（英文）：A series of new π -electron materials with superb photophysical and electronic properties, such as intense solid-state emission, white emission, and high carrier mobility, have been developed based on new molecular designs exploiting characteristic features of main group elements, development of new reactions, and controlling of molecular alignments in the solid state. Some new design principles, such as the stabilization of organoboron materials and the construction of highly antiaromatic building units, have also been established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	24,000,000	7,200,000	31,200,000
2008年度	15,700,000	4,710,000	20,410,000
2009年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2010年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2011年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
総計	87,900,000	26,370,000	114,270,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・有機化学

キーワード： π 電子系，有機エレクトロニクス，典型元素，電子物性，光物性

1. 研究開始当初の背景

近年，有機 EL ディスプレイや有機トランジスタ，有機太陽電池に代表される有機エレクトロニクスが急速に注目を集めている。従来，無機材料で実現されてきたデバイスを有機物に置き換えることにより，単に軽い，折り曲げられるなどの有機物の利点を超えて，人々の暮らしをより豊かにする様々な新たな応用展開が期待できる。その主役となるのが，炭素-炭素不飽和結合がつながった π 電子系分子である。これまで多彩な π 電子系分子の開発競争が世界中で繰り広げられてきている。 π 電子系分子に求められる物性は，

発光から電荷輸送まで，応用展開に応じて多様であり，個々の目的に応じた究極の物性の発現のための分子設計が求められる。

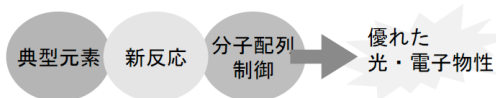
2. 研究の目的

本研究では，有機エレクトロニクス分野の飛躍的進展や新たな応用開拓を実現する上で鍵となる材料の創出を目指し，光・電子物性という観点で突出した物性，あるいは，これまで達成できなかった未踏物性をもつ π 電子系分子の設計と合成に取り組んできた。

3. 研究の方法

秀逸な π 電子系材料の分子設計では，「一分子としていかに特異な電子構造をもたせ」，

また、それらが凝集状態をとる際に、「いかに分子間の相互作用を制御し、特異な物性を引き出すか」が鍵となる。前者の点に対する我々のアプローチは、 π 共役骨格への典型元素の導入である。13-16 族までの典型元素は、電気陰性度、軌道準位、配位数といった点で多様である。個々の元素の特性を生かした分子設計により、特異な電子的特徴をもつ π 電子系の創出が可能となる。また、独自の新反応の開拓に基づいた新奇骨格の構築も本研究で重要な位置を占める。既存の骨格への置換基導入による構造修飾に終始するのではなく、全く新奇でかつ素性の良い骨格を生み出すことによりこの分野の飛躍につながれるものと考えられる。一方で、後者の分子間相互作用の制御には、凝集状態における分子配列をいかに制御するかが問われる。本研究では、水素結合や長鎖アルキル基どうしの相互作用を利用するといった従来からある分子設計に依存するのではなく、弱い非結合性分子間相互作用や π 共役骨格の形を巧みに生かした高次構造制御に取り組んだ。このように典型元素の利用、新反応の開拓、分子配列制御の三つを有機的に組み合わせたアプローチにより、新たな光・電子機能性分子の創出に取り組んだ。



優れた光・電子物性獲得への本研究のアプローチ

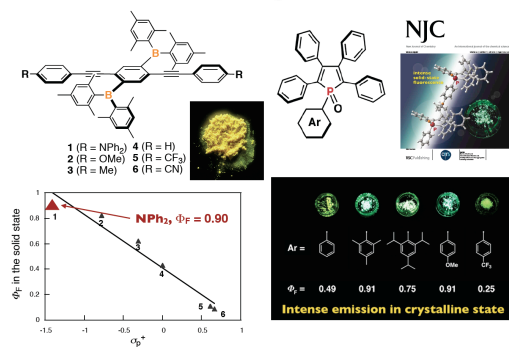
4. 研究成果

以下には標的物性ごとに分けて、開発してきた分子系およびそれらの物性について述べる。

(1) **高効率固体発光**：多くの蛍光性分子の場合、希薄溶液中では強い蛍光を示しても、凝集状態になると消光されてしまい、蛍光量子収率が著しく低下する。固体状態でも 100%に近い量子収率で発光する有機化合物をいかに合理的に設計するかが本研究の一つ目の課題である。これに対し、i) 立体的にかさ高い置換基の導入による分子間相互作用の抑制、および ii) ストークスシフトの大きな分子内電荷移動型発光の実現による分子間エネルギー移動の抑制の2点が鍵となることを提案し、これらを満たす構造として「かさ高いホウ素置換基を側鎖として導入する」というシンプルなコンセプトのもと、一連のホウ素置換 π 電子系を設計、合成した。それらの構造-物性相関について詳細に検討し、分子内電荷移動遷移の性質が強くなることにより高い蛍光量子収率が得られることを実験的に示した。さらに、励起状態での分子軌道計算により、励起状態での構造変化の詳細を明ら

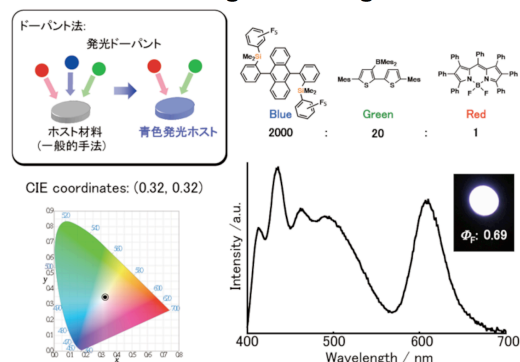
かにした。また、上述の要件を満たす全く異なる骨格として、2,3,4,5-テトラフェニルホスホールオキシド誘導体を設計、合成し、それらが結晶状態において高い量子収率の蛍光を示すことを明らかにし、この考え方の一般性を示した。この考え方の汎用性は高く、その後の多くの発光性固体材料の開発研究の契機となるとともに、我々が開発したいくつかのホウ素材料に関しては発光性材料として市販されるに至っている。

B and P-Containing Emissive Solids



(2) **白色発光**：白色発光固体の実現には、単一波長の励起により少なくとも2色の発光を得る必要がある、このためには、大きなストークスシフトを伴った赤色発光を示す発色団と、小さなストークスシフトをもつ青色発光発色団の両方の開発が必要である。前者は(1)で開発を達成したが、後者は本質的に達成が難しい課題である。分子間相互作用を巧く抑制し、かつ分子内での無輻射失活過程を徹底的に抑える分子設計が必要である。これに対し、基本骨格としてジフェニルアントラセン骨格を用い、(ペルフルオロフェニル)シリル基を π スタッキング部位として導入することにより構造の固定化を行い、この物性を実現することに成功した。そしてこの化合物をホスト材料に用いることにより、量子収率 0.69 で光る白色発光薄膜の作製に成功した。

White Light Emitting Film

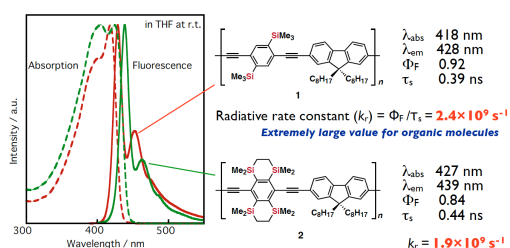


さらに全く異なる白色発光材料として、発光性液体の設計を提案した。エキシマー発光により青色発光をもつピレンを基本骨格に用いた液体材料が凝集状態、室温で量子収率

0.53 の強い蛍光をもつことを示した。さらに、この液体材料にシアノ置換スチルベンを基本骨格とする橙色発光材料を混ぜ合わせるにより、量子収率 0.63 の白色発光を実現した。この液体材料は蛍光の温度依存性を示し、温度を変化させることにより白色発光から桃色発光へと変化した。温度応答性発光性液体といえる材料である。

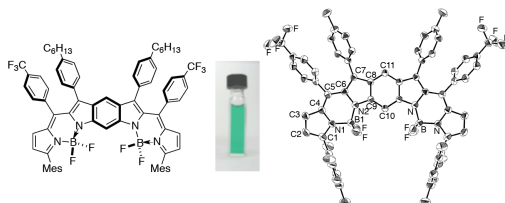
(3)低閾値増幅自然放出発光：有機レーザー材料の開発を念頭に、増幅自然放出発光(ASE)の閾値が極めて低い材料の開発に取り組んだ。より大きな放射失活速度定数をもつ分子ほど ASE 特性の閾値は低くなることが知られている。大きな放射失活速度定数をもつ分子の設計として、ケイ素置換基と π 電子系との軌道相互作用 (σ - π 相互作用) による電子的修飾を考え、ジシリルフェニレンおよびテトラシリルフェニレンを構成単位に含む一連のポリ(アリーレンエチニレン)の合成を行い、これらが有機分子系としては上限に近い大きな放射失活速度定数をもつことを明らかにした。

Emissive Polymers with Large k_r



大きな放射失活速度定数の実現には、大きな吸光係数をもたせることが重要な設計指針となる。そして、可視-近赤外領域での大きな吸光係数を実現できれば、有機太陽電池材料としても有望な材料となる。そのような材料として、縮環構造により連結したBODIPY二量体を設計し、新たな合成経路の確立によりその合成を達成した。縮環位置の適切な選択により電子受容性を付与することができ、実際に得られたBODIPY二量体は、低い還元電位を示した。そして、可視-近赤外領域に幅広くかつ強い吸収帯を示した。新たな有機太陽電池材料として期待できる。

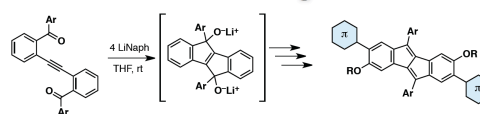
BODIPY Dimers



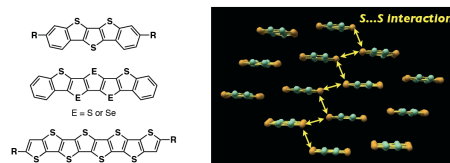
(4) 結晶状態での高電荷移動度：高電荷移動度をもつ有機トランジスタ材料の開発を目指し、その候補としてジベンゾペンタレンを

設計した。ビス[*o*-(アリールカルボニル)フェニル]アセチレンからの協奏的ラジカル 5-endo-dig 環化機構で進行する還元的環化反応を開発し、この骨格を合成することに成功した。得られた化合物は低い還元電位を示し、*n* 型半導体材料としての潜在性を示した。また、チオフェン環が縮環した一連のオリゴチエノアセン類の合成に取り組み、分子間の S...S 非結合性相互作用と末端置換基の立体障害とのバランスを調整することにより結晶構造の制御が可能であることを示した。それらの有機トランジスタへの応用についても検討し、長鎖アルキル基を末端に導入した誘導体においては $3.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ という高い電荷移動度を示した。これらの化合物は高い安定性をもつことが利点であり、安定トランジスタ材料として大いに期待できる。

Ladder Materials for Organic Transistors



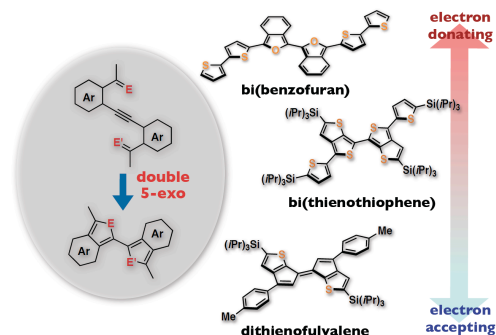
New Synthesis of Dibenzo[*a,e*]pentalenes



Oligothienoacenes as Stable Transistor Materials

また、この他に全く新奇な基本骨格として、種々の縮環型モノマー単位の合成に取り組んだ。オルト位に不飽和結合をもつビス(*o*-置換フェニル)アセチレンからの分子内 5-exo-dig 様式で進行する反応の開発により、ビ(ベンゾ[*c*]フラン)、ビ(チエノ[2,3-*c*]チオフェン)、チエノ縮環ペンタフルバレンといった基本骨格の効率的合成を達成した。特筆すべきは、一つの反応様式で、基質を変えることにより、電子供与性に富んだ π 骨格から電子受容性に富んだ骨格まで自在に作り分けられる点である。

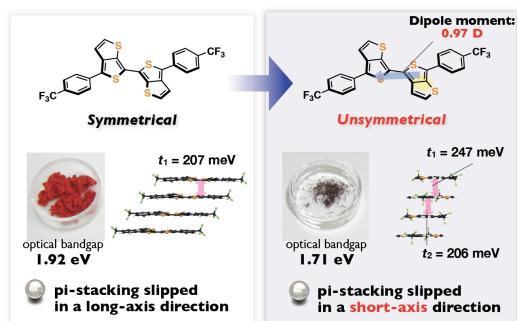
Double 5-exo Cyclization



このうち特にビ(チエノ[2,3-*c*]チオフェン)を基本骨格とする π 電子系においては、溶液状態と固体状態とで顕著な蛍光特性の違いが見られた。例えば、末端 5,5'位に *p*-CF₃C₆H₄

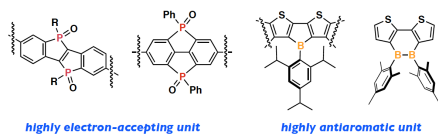
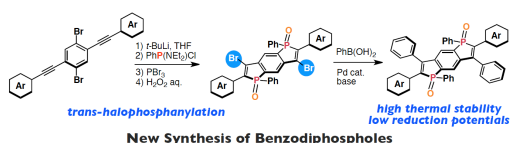
基を導入した誘導体では、CH₂Cl₂ 中では 520 nm (緑色蛍光) に蛍光極大を示すのに対し、結晶状態では 667 nm (赤色蛍光) に蛍光極大を示した。この大きな変化は分子間での強い π スタッキングによるものであり、チエノ [2,3-*c*]チオフェン骨格という縮環構造をもたせることにより実現できた特性といえる。分子間相互作用を生じさせるのに適した構造をもたせることが、分子配列制御の重要な設計指針となることを示した例と位置づけられる。この骨格では、さらに縮環しているチオフェン環の一つの向きをひっくり返し双極子をもたせることにより、 π スタッキングの様式を修飾し、さらに強い分子間相互作用を実現できることも示した。これらの固体構造と電荷輸送特性との相関について現在検討を進めている。

Control of π -Stacking Modes



(5)アモルファス状態での高い電子輸送性: 電荷移動度だけを見れば、高度に分子が配向した結晶性材料の方が優れているのは明白であるが、有機 EL などの面発光が求められる応用の場合にはアモルファス薄膜を用いることが必須である。アモルファス性電子輸送材料の開発を目指し、まず一連のホスホール類の合成に取り組んだ。分子内 5-endo-dig 型ハロホスファニル化反応を開発し、一連のベンゾジホスホール誘導体の合成を達成した。なかでもジスルフィド体は、高い熱安定性と低い還元電位を示し、高い潜在性をもつことを明らかにした。さらにこの他にも、基本骨格として、可溶性ビスホスファニル架橋スチルベン、ビスホスファニル架橋ビフェニル、チオフェン縮環ポロロール、チオフェン縮環ジボリンといった一連の電子受容性骨格の合

Electron-Accepting Skeletons

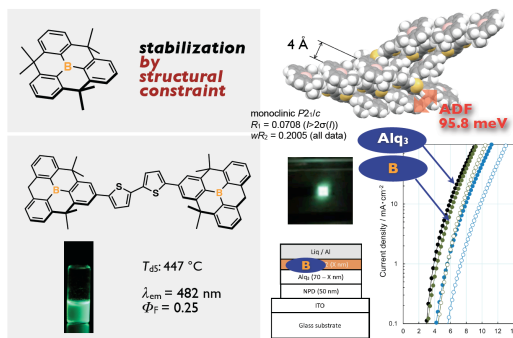


Various Electron-Accepting Skeletons

成を達成し、特徴的な電子的特性を明らかにした。特にチオフェン縮環ポロロールでは、複素環縮環構造により反芳香族性が増大するという従来の理解とは逆の電子効果をもたらすことを発見し、その理由を解明した。

他のアモルファス性材料として、トリアルールボラン骨格を電子受容性部にもつ材料開発にも取り組んだ。三配位ホウ素化合物は高いルイス酸性のために本質的に不安定であり、その安定化のためにかさ高い置換基の導入による速度論的安定化が必須であった。しかし、そのかさ高さのために分子間相互作用が阻害され、高い電子移動度が実現できないというジレンマがあった。この問題に対し、新たな安定化の手法として「構造規制による安定化」という考え方を導入し、実際にメチレン鎖で平面固定化したトリフェニルボラン類がきわめて安定な材料として取り扱えることを初めて示した。さらに、この骨格を置換基としてもつビチオフェン誘導体を合成し、実際に有機 EL デバイスの電子輸送性材料として応用したところ、速度論的安定化無しでも十分に安定な材料としてデバイス作製が可能であり、その電子輸送能もこれまで最も広く用いられてきている Alq₃ とほぼ同程度の高い性能を示した。この化合物は結晶状態において高度に配向した構造をとることがわかっており、その配向しや分子構造がアモルファス薄膜においても反映され、高い性能の発現につながっているものと推察される。

Electron-Transporting Materials



以上のように、本研究では、有機エレクトロニクス分野の鍵材料の創出を目的に、多様な π 電子系分子の開発を行ってきた。新たな分子設計指針と新反応開拓をもとに、全く新奇な構造をもつ一連の基本骨格の創出を達成した。高効率固体発光、白色発光、電荷移動度など、幾つかの物性については狙い通りに達成できたといえる。また、速度論的安定化を用いないホウ素化合物の安定化や、反芳香族性をもつ基本骨格の創出など新たな展開も生み出すこともできた。これらの成果を基盤に、さらに優れた π 電子系材料の創出を目指し化学を展開していく予定である。

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 45 件) (全て査読有)

- (1) S. Saito, K. Matsuo, and S. Yamaguchi, “Polycyclic π -Electron System with Boton at Its Center”, *J. Am. Chem. Soc.*, ASAP (2012).
- (2) T. Araki, A. Fukazawa, and S. Yamaguchi, “Electron-Donating Tetrathienyl-Substituted Borole”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 5484-5487 (2012).
- (3) Z. Zhou, A. Wakamiya, T. Kushida, and S. Yamaguchi, “Planarized Triarylboranes: Stabilization by Structural Constraint and Their Plane-to-Bowl Conversion”, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 4529-4532 (2012).
[Highlighted in 日経産業新聞, etc.]
- (4) Y. Miyata, E. Yoshikawa, T. Minari, K. Tsukagoshi, and S. Yamaguchi, “High-Performance Organic Field-Effect Transistors Based on Dihexyl-Substituted Dibenzo[d,d']thieno[3,2-b;4,5-b']-dithiophene”, *J. Mater. Chem.*, **22**, 7715-7717 (2012).
- (5) T. Araki, A. Wakamiya, K. Mori, and S. Yamaguchi, “Elucidation of π -Conjugation Modes in Diarene-Fused 1,2-Dihydro-1,2-diborin Dianions”, *Chem. Asian J.*, (2012).
[Selected as a VIP]
- (6) A. Iida, A. Sekioka, and S. Yamaguchi, “Heteroarene-Fused Boroles: What Governs the Antiaromaticity and Lewis Acidity of the Borole Skeleton?”, *Chem. Sci.* (Advanced Article), **3**, 1461-1466 (2012).
[DOI: 10.1039/C2SC20100C]
[Highlighted in Chemical Science Blog]
- (7) S. Saito, K. Nakakura, and S. Yamaguchi, “Macrocyclic Restriction with Flexible Alkylene Linkers: A Simple Strategy to Control the Solid-State Properties of π -Conjugated Systems”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 714-717 (2012).
[Selected as a Hot Paper]
- (8) A. Bruch, A. Fukazawa, E. Yamaguchi, S. Yamaguchi, and A. Studer, “Bis(phosphoryl)-bridged Biphenyls by Radical Phosphanylation: Synthesis, Photophysical and Electrochemical Properties”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 12094-12098 (2011).
- (9) A. Iida and S. Yamaguchi, “Thiophene-Fused Ladder Boroles with High Antiaromaticity”, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 6952-6955 (2011).
- (10) A. Fukazawa, Y. Ichihashi, and S. Yamaguchi, “Intense Fluorescence of 1-Aryl-2,3,4,5-tetraphenylphosphole Oxides in the Crystalline State”, *New J. Chem.*, **34**, 1537-1540 (2010).
[Highlighted as an Inside Front Cover]
- (11) A. Fukazawa, H. Yamada, Y. Sasaki, S. Akiyama, and S. Yamaguchi, “Zwitterionic Ladder Bis(arylethenyl)benzenes with Large Two-Photon Absorption Cross Sections”, *Chem. Asian J.*, **5**, 466-469 (2010).
[Most accessed articles]
- (12) A. Job, A. Wakamiya, G. Kehr, G. Erker, and S. Yamaguchi, “Electronic Tuning of Thiazolyl-Capped π -Conjugated Compounds via a Coordination/Cyclization Protocol with $B(C_6F_5)_3$ ”, *Org. Lett.*, **12**, 5470-5473 (2010).
- (13) A. Fukazawa, Y. Ichihashi, Y. Kosaka, and S. Yamaguchi, “Benzo[b]phosphole-Containing π -Electron Systems: Synthesis Based on an Intramolecular trans-Halophosphanylation and Some Insights into Their Properties”, *Chem. Asian J.*, **4**, 1729-1740 (2009).
[Most accessed articles in 10/2009]
- (14) A. Wakamiya, K. Mori, T. Araki, and S. Yamaguchi, “A B-B Bond-Containing Polycyclic π -Electron System: Dithieno-1,2-dihydro-1,2-diborin and Its Dianion”, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 10850-10851 (2009).
[Highlighted in SYNFACTS]
- (15) C.-H. Zhao, E. Sakuda, A. Wakamiya, and S. Yamaguchi, “Highly Emissive Diborylphenylene-Containing Bis(phenylethynyl)benzenes: Structure-Photophysical Property Correlations and Fluoride Ion Sensing”, *Chem. Eur. J.*, **15**, 10603-10612 (2009).
- (16) H. Zhang, T. Karasawa, H. Yamada, A. Wakamiya, and S. Yamaguchi, “Intramolecular Reductive Double Cyclization of *o,o'*-Bis(arylcarbonyl)-diphenylacetylenes: Synthesis of Ladder π -Conjugated Skeletons”, *Org. Lett.*, **11**, 3076-3079 (2009). [Highlighted in SYNFACTS]
- (17) A. Iida and S. Yamaguchi, “Intense Solid-State Blue Emission with a Small Stokes' Shift: π -Stacking Protection of Diphenyl- anthracene Skeleton”, *Chem. Commun.*, 3002-3004 (2009).
[Selected as Back Cover]
- (18) H. Zhang, A. Wakamiya, and S. Yamaguchi, “Highly Electron-Donating 3,3'-Diaryl-1,1'-Bi(isobenzofuran)s Synthesized by Photochemical Exocyclic [2+2+2] Cycloaddition”, *Org. Lett.*, **10**,

- 3591-3594 (2008).
- (19) Y. Suzuki, T. Okamoto, A. Wakamiya, and S. Yamaguchi, "Electronic Modulation of Fused Oligothiophenes by Chemical Oxidation", *Org. Lett.*, **10**, 3393-3396 (2008).
- (20) A. Wakamiya, N. Sugita, and S. Yamaguchi, "Red-Emissive Polyphenylated BODIPY Derivatives: Effect of Peripheral Phenyl Groups on the Photophysical and Electrochemical Properties", *Chem. Lett.*, **37**, 1094-1095 (2008).
- (21) A. Iida, K. Nagura, and S. Yamaguchi, "Disilylphenylene and Tetrasilylphenylene as a New Building Unit for Highly Fluorescent Poly(aryleneethynylene)s", *Chem. Asian J.*, **3**, 1456-1464 (2008).
- (22) A. Fukazawa, H. Yamada, and S. Yamaguchi, "Phosphonium and Borate-Bridged Zwitterionic Ladder Stilbene and Its Extended Analogues", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **47**, 5582-5585 (2008).
[Highlighted in SYNFACTS]
- (23) A. Fukazawa, M. Hara, T. Okamoto, E.-C. Son, C. Xu, K. Tamao, and S. Yamaguchi, "Bis-Phosphoryl-Bridged Stilbenes Synthesized by an Intramolecular Cascade Cyclization", *Org. Lett.*, **10**, 913-916 (2008).
- (24) A. Wakamiya, K. Mishima, K. Ekawa, and S. Yamaguchi, "Kinetically Stabilized Dibenzoborole as an Electron-Accepting Building Unit", *Chem. Commun.*, 579-581 (2008).
- [学会発表] (計 165 件)
- (1) "Boracyclic pi-Conjugated Compounds with Unusual Electronic Structures", S. Yamaguchi, International Symposium on Functional pi-Electron Systems, October 13-17 (2011), Beijing, China. **[Invited]**
- (2) "Boracyclic pi-Conjugated Compounds", S. Yamaguchi, The XIVth International Conference on Boron Chemistry (IME Boron XIV), September 11-15 (2011), Niagara Falls, Canada. **[Invited]**
- (3) "Intramolecular Double Cyclizations for New pi-Conjugated Skeletons", S. Yamaguchi, 93rd Canadian Chemistry Conference and Exhibition, May 29-June 2, 2010, Toronto, Canada **[Invited]**
- (4) "New pi-Conjugated Skeletons Constructed by New Acetylene Cyclizations", S. Yamaguchi, 23rd International Conference of Heterocyclic Chemistry, July 31-August 4, (2011), Glasgow, UK. **[Invited]**
- (5) "New Functional Organoboron pi-Conjugated Compounds", S. Yamaguchi,

- The 9th International Conference on Heteroatom Chemistry (ICHAC-9), June 30-July 4 (2009), Oviedo, Spain. **[Invited]**
- (6) "Ladder pi-Electron Materials Synthesized by Intramolecular Double Cyclization of *o,o'*-Disubstituted Diphenylacetylenes", S. Yamaguchi, The 8th International Symposium on Functional pi-Electron Systems (Fpi8), July 20-25 (2008), Graz, Austria. **[Invited]**

[図書] (計 2 件)

山口茂弘, シー・エム・シー出版, 電子共役系有機材料の創製・機能開発・応用(監修: 檜山為次郎), 2008, pp.154-167.

[産業財産権]

名称: π 共役有機化合物及びその製造方法, ならびに該 π 共役有機化合物の (共) 重合体
発明者: 山口茂弘, 深澤愛子, 丹下 聡
権利者: 名古屋大学
種類: 特願
番号: 2011-196516
出願年月日: 平成 23 年 9 月 8 日
国内外の別: 国内

名称: π 共役有機ホウ素化合物及びその製造方法
発明者: 山口茂弘, 若宮淳志
権利者: 名古屋大学
種類: 特願
番号: 2011-196567
出願年月日: 平成 23 年 9 月 8 日
国内外の別: 国内

名称: ヘテロ環縮環オリゴチオフェン及びその製造方法, 並びにポリマー
発明者: 山口茂弘, 深澤愛子, 田中裕紀
権利者: 名古屋大学
種類: 特願
番号: 2009-048542
出願年月日: 平成 21 年 3 月 2 日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ: <http://orgreact.chem.nagoya-u.ac.jp/Home.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口茂弘 (YAMAGUCHI SHIGEHIRO)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 60260618

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし