

## 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 4月1日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22750171

 研究課題名（和文） 高い配向性を持つチオフェン縮環フタロシアニン類の開発と  
有機薄膜デバイスへの応用

研究課題名（英文）

 Development of thiophene-fused phthalocyanines with high  
crystallinity and application to organic thin-film devices

研究代表者

宮崎 栄吾 (Miyazaki Eigo)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00432683

研究成果の概要（和文）：ヘテロ五員環およびその共役拡張したポルフィラジンを合成し、有機薄膜デバイスに応用した。溶液法により作製した OFET 素子の移動度は最大  $0.3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  であった。また、二層型 OPV 素子では光電変換効率 1.2%を示した。これらの結果は、Pc 類においては単純な共役拡張や HOMO 準位を制御するだけではデバイス特性の向上につながらないことを示唆している。

研究成果の概要（英文）：In order to improve device performance of organic field-effect transistors (OFETs) and organic photovoltaics (OPVs) based on phthalocyanines (Pcs), I have investigated properties of new porphyrazines with aromatic 5-membered fused-ring heterocycle and its  $\pi$ -extended compound, and applied to organic thin-film devices. In this project, I have designed thiophene-fused porphyrazine (Tc), benzothiophene-fused porphyrazine (BTc), and thiadiazole-fused porphyrazine (TzPz) as new Pcs. Alkylated Tc- and BTc-based devices showed p-channel characteristics with mobility of  $\sim 0.3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  for Tc and  $\sim 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  for BTc. However, alkylated TzPz-based devices showed no field-effect response. Alkylated Tc/C<sub>60</sub> bilayer OPV showed the efficiency of 1.2%. Whereas other Pcs-based OPVs showed no photovoltaics response. These results indicate that simple modification of molecule by  $\pi$ -extension leads to no improvement of device performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料科学・機能材料・デバイス

キーワード：フタロシアニン・有機半導体・有機薄膜デバイス・電子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

フタロシアニン (Pc) は、光・酸・塩基・酸素等に対して安定な有機色素として利用されてきた。近年、Pc の芳香族 18 $\pi$ 電子系に基づく電子授受能に着目し、有機薄膜デバイスの活性層として Pc が盛んに用いられている。例えば、銅フタロシアニン (CuPc) を用いた有機薄膜トランジスタ (OFET) では p 型特性を示し、その移動度は  $0.03 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  を (Bao, Z. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **1996**, 69, 3066.)、C<sub>60</sub> と組み合わせた薄膜太陽電池では 1.2% の光電変換効率 (Mutolo, K. L. et al. *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, 128, 8108.) を示す。

このように、Pc を用いた有機薄膜デバイスは優れた特性を示すが、詳細に考察すると Pc 自身が持つ電子構造だけではなく、薄膜内における分子の配向性が優れた特性を示す鍵となっている。有機薄膜デバイスにおいて、薄膜中で如何に配向性を制御するかが、半導体特性を決める重要な要素となっている。

申請者は Pc の配向性を高める置換基として長鎖アルキル基に着目した。長鎖アルキル基は可溶性置換基として利用できるだけでなく、van der Waals 力による凝集能も示す。そのため、薄膜中において Pc が高い配向性を示すことが期待できる。しかし、Pc に単純に四箇所アルキル基を導入した Pc (図 1) はアモルファスとなり、薄膜中での配向性は低い。その理由としてアルキル Pc では置換基の向きが異なる異性体混合物となり、薄膜中でアルキル基が分子間で揃わないことが原因と考えられる。アルキル基の方向を揃えることが出来れば Pc でも高い配向性を示すと考え、Pc のベンゼン環を五員環チオフェンに置換したチオフェン縮環ポルフィラジン (Tc, 図 2) に注目した。



図 1. アルキル Pc の構造

## 2. 研究の目的

Pc 類の OFET 素子における更なる特性向上を目的として、Tc を共役拡張したベンゾチオフェン縮環ポルフィラジン (BTc, 図 2) を合成すると共に、その薄膜の配向性を調査する。また Pc 類の新たな機能・物性発現を期待して、アルキル Tc ならびに BTc のポルフィラジン環の各種金属錯体を合成し、薄膜の配向性・物性を調査すると共に、OFET 等の薄膜デバイスへと応用する。

## 3. 研究の方法

研究内容は大きく分けて二つあり、新規 Pcs の合成と物性研究、ならびに各種有機薄膜デバイスの作製・評価である。これらを達成するために、以下に示す方法を考案した。

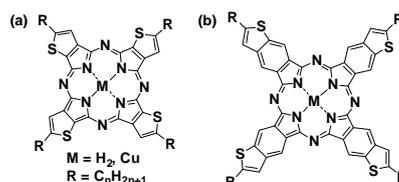


図 2. アルキル Tc (a) およびアルキル BTc (b) の化学構造

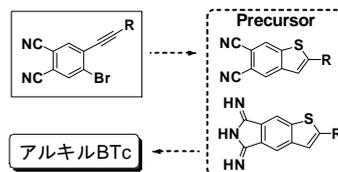
### 3-1) 新規 Pcs の合成、物性研究

Pc 類合成において、一般的にはジシアノ誘導体を前駆体とする合成法が用いられている。本研究においてもこの手法を検討するが、前駆体であるベンゾチオフェン誘導体が未知化合物であるため、その合成も検討する。注意すべき事項として Pc 環形成反応時の収率向上が挙げられる。これらの課題を克服するために、以下の合成戦略を考案した。

(i) ジシアノベンゾチオフェン誘導体の合成 ジシアノベンゾチオフェン誘導体の合成について、ベンゾチオフェンを出発原料に用いた場合にはシアノ基導入位置への反応性が低く、位置選択的な官能基導入が困難である。そこで、ベンゼン誘導体からチオフェン環を形成する合成ルートを検討する。申請者らが開発したプロモエチルベンゼン誘導体を用いたベンゾチオフェンの合成法は、ベンゾチオフェンへの位置選択的な置換基の官能基化が可能であり、合成が期待できる。

#### (ii) 環化反応時の収率向上

ジシアノ誘導体にリチウムアルコキシドを用いる Linstead 法もしくは強塩基法による Pc 環形成反応を検討する。しかし、化合物によっては低収率となることもあるため別ルートとして、Pc 骨格の一部を含むジイミノピロール誘導体を経由する反応も検討する。予想される問題点と対策を基に、スキーム 1 に示す合成ルートを考案した。



スキーム 1. アルキル BTc の合成スキーム

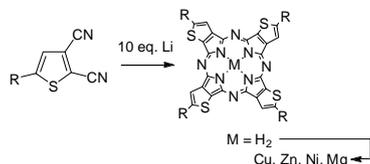
3-2) 有機薄膜デバイスの作製・評価: Pc 類の半導体特性を明らかにするために有機デバイスとして i) OFET ならびに ii) 有機薄膜太陽電池を作製し、特性評価を行う。

i) OFET 素子: スピンコート法によりシリコン基板上に有機薄膜を作製後、電極を蒸着して トップコンタクト型素子 を作製し評価を行う。  
ii) 有機薄膜太陽電池: ITO 基板上に有機薄膜を作製後、フラーレン (C<sub>60</sub>) 薄膜を真空蒸着した 二層型のヘテロ接合型薄膜太陽電池 を作製し、特性評価を行う。

## 4. 研究成果

### (4-1) アルキル Tc について

アルキルジシアノチオフェンを前駆体として用いて各種アルキル  $H_2Tc$ 、および得られた無金属体を用いて対応する金属錯体を合成した (スキーム 2)。各種アルキル誘導体は塩化メチレンやクロロホルムに対して高い溶解性を示した。また、無金属体ではアルキル鎖の伸長と共に溶解度が向上した。



スキーム 2. アルキル Tc の合成ルート

#### 4-1-1) 無金属体

溶液の紫外可視吸収スペクトルおよびサイクリックボルタモグラムを測定したが、各アルキル  $H_2Tc$  間で吸収スペクトルの形状、および酸化還元挙動に違いは見られなかった。一方、薄膜状態においては紫外可視吸収スペクトルの長波長領域の吸収に注目すると、アルキル鎖が伸長につれて最大吸収波長がレッドシフトした (図 3)。これはアルキル鎖の伸長に伴って分子間相互作用が強くなっており、ファスナー効果が発現したためであると考えられる。

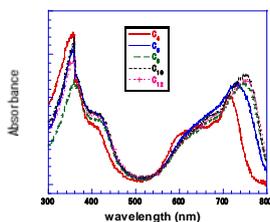


図 3. 薄膜の紫外可視吸収スペクトル

XRD 測定においてはアモルファス性の薄膜となった  $C_4$  体を除いた化合物において回折ピークが観測された。図 4. に一例として薄膜のデシル Tc の XRD を、表 1 には回折ピークから計算した  $d$  値を示した。鎖長が長くなるにつれて  $d$  値は大きくなっていることからアルキル基が基板に対して垂直方向に伸びており、edge-on 配向の形成が示唆された。

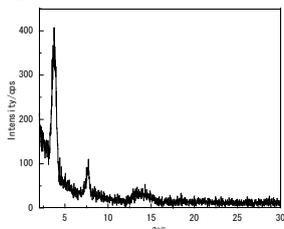


図 4. 薄膜におけるデシル Tc の XRD

これらの無金属体を用いて OFET 素子を作製、特性を評価した。各アルキル誘導体の素子のホール移動度分布を図 5 に示す。い

表 1 XRD パターンから計算した  $d$  値

Alkyl chain (R)	$d$ spacing/Å
$C_4H_9$	-
$C_6H_{13}$	16.1
$C_8H_{17}$	20.0
$C_{10}H_{21}$	23.3
$C_{12}H_{25}$	26.4

れの素子においても p 型のトランジスタ挙動を示し、 $C_4$  体を除いて、 $10^{-2}$  から  $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  の移動度を示した。興味深いことにアルキル鎖が長くなるにつれて OFET 素子の移動度は徐々に大きくなった。これは薄膜の紫外可視吸収スペクトルにおいてファスナー効果による吸収極大のレッドシフトが観測されていることから、アルキル鎖が伸長することにより分子間相互作用が強くなった結果であると考えられる。

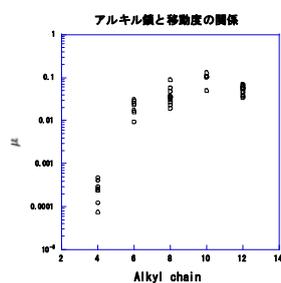


図 5.  $RH_2Tc$  の OFET 素子の移動度分布

#### 4-1-2) 金属錯体

$CaMTc$  の各種金属錯体の物性評価を行った。二価金属錯体では、紫外可視吸収スペクトルの形状、およびサイクリックボルタメトリにおける酸化還元挙動に大きな違いは見られなかった。対照的に薄膜の XRD において大きな違いが観測され、銅錯体の回折強度が最も強く、高い結晶性を示した (図 6)。

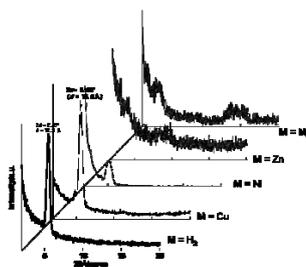


図 6. 金属錯体の薄膜の XRD

これらの金属錯体を用いてスピコート法によりシリコン基板上に薄膜を作製後、電極として金を蒸着しトップコンタクト型 OFET 素子とした。いずれも p 型特性を示し、その移動度は Cu 錯体で最大  $0.2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  となった (図 7, 表 2)。これらの結果は XRD 測定で得られた薄膜の結晶性と関連しており、高い結晶性を示した銅錯体が最も高くなったと考えられる。一方、Zn 錯体は XRD からアモルファスであるにも関わらず、結晶性薄膜を形成する Ni 錯体よりも高い移動度を

示した。理由は明らかではないが、Zn 錯体は溶液中で強い会合挙動を示すことから、薄膜中においてもランダムな構造ではなく、局所的に会合しホールが移動しやすい構造を取っている可能性があると考えられる。

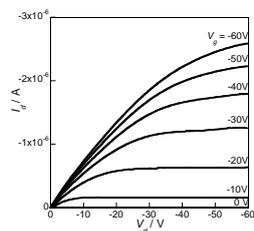


図 7. Ni 錯体の OFET 素子の Output 特性

表 2. 金属錯体の OFET 素子のホール移動度

M	$\mu/\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
H <sub>2</sub>	0.02
Cu	0.2
Ni	$5 \times 10^{-4}$
Mg	$1 \times 10^{-5}$
Zn	$3 \times 10^{-3}$

#### 4-1-3) 銅錯体

最も移動度が高くなった銅錯体のデバイス特性の向上を目的として、銅錯体のアルキル鎖依存性を調査した。図 8 に薄膜の紫外可視吸収スペクトルを示す。長波長側の吸収に注目すると、鎖長伸長に伴って吸収極大のレッドシフトが見られるが、C8 以上の長鎖アルキル誘導体ではスペクトルに大きな違いは見られなかった。これは C8 まではアルキル鎖の伸長によって分子間相互作用が大きくなるが、さらに鎖長が伸長してもファスナー効果は大きくならないと考えられる。

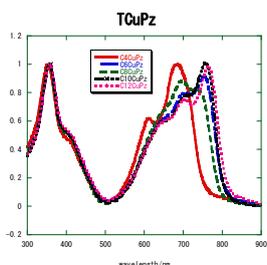


図 8. 銅錯体の紫外可視吸収スペクトル

続いて、OFET 素子を作製し特性を評価した (図 9)。Si/SiO<sub>2</sub> の表面をオクチルトリクロロシランにて SAM 処理を行ったものを OFET 素子に用いた。いずれの素子も p 型挙動を示した。C4 体は移動度が低く  $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  であったが、C6 体においては移動度が二桁向上した。C8 体、C10 体においてはさらに高い移動度を示したが、移動度の大幅な向上は見られなかった。

最後に、アルキルチオフェン縮環ポルフィラジンを有機薄膜太陽電池へと応用した。1b, 2b を p 型半導体、C<sub>60</sub> を n 型半導体として用

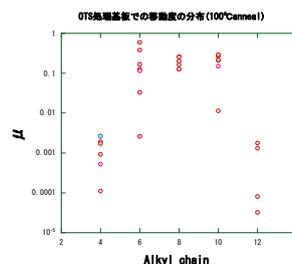


図 9 アルキル鎖長の違いによる移動度

いたヘテロ接合型薄膜太陽電池を作製し、特性を評価した。AM1.5 光照射条件下で素子を実験した結果、光電変換特性  $\eta$  は 1b, 2b でそれぞれ 1.0, 1.2% となった (図 10)。この結果は CuPc を p 型有機半導体として用いた太陽電池素子の特性 ( $\eta = 0.93$ ) と同程度であり、アルキルチオフェン縮環ポルフィラジンが縦型デバイスの有機半導体としても有用であることを示唆する結果である。

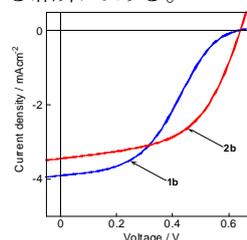
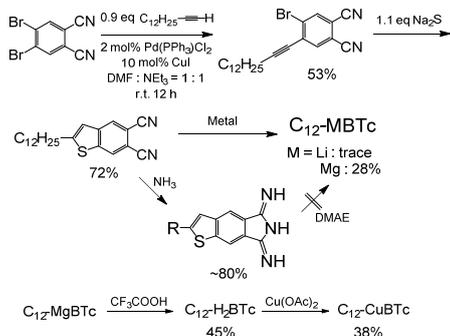


図 10. C<sub>6</sub>MTc の薄膜太陽電池素子の I-V 特性  
素子構造: ITO/C<sub>6</sub>MTc (1b: H<sub>2</sub>, 2b: Cu)/C<sub>60</sub>/BCP/LiF/Al

#### (4-2) アルキル BTc について

まず C<sub>n</sub>BTc の合成を検討した。4,5-ジプロモタロニトリルを出発原料として用い、菌頭カップリング反応によりアセチレンユニットを 1ヶ所導入した後、硫化ナトリウムを用いた分子内環化反応を経て、前駆体であるジシアノベンゾチオフェン誘導体を合成した (スキーム 3)。前駆体に対してリチウムを用いた Linstead 法を試みた所、ベンゾチオフェン縮環ポルフィラジンは痕跡量しか得られなかった。そこで、マグネシウムを用いる強塩基法を適応した結果、目的のマグネシウム錯体を収率 28% で得ることができた。また、ジシアノ体にアンモニアを作用させてフタルイミド誘導体への導いた後にポルフィラジン環の形成反応を検討したが反応は進行しなかった。マグネシウム錯体にトリフルオロ酢酸を反応させて C<sub>12</sub>-H<sub>2</sub>BTc を合成し、更に酢酸銅 (II) と反応させることにより C<sub>12</sub>-CuBTc を得た。

C<sub>12</sub>-H<sub>2</sub>BTc と C<sub>12</sub>-CuBTc の基本的物性を測定した。C<sub>12</sub>-H<sub>2</sub>BTc、C<sub>12</sub>-CuBTc は有機溶媒に対して高い溶解性を示し、クロロホルム、トルエンに可溶で非常に溶解であった。C<sub>12</sub>-H<sub>2</sub>BTc のトルエン溶液の UV-vis 吸収スペクトルを図 11 に示す。600-800 nm および 300-400 nm 付近に強い吸収バンドが見られ、Pc 誘導体に特有の Q および Soret バンドに帰属できる。また、スペクトルは濃度依存性



スキーム 3 アルキル BTc の合成

を示し、高濃度では見かけの吸光係数が小さくなることから溶液中で会合していることが示唆され、分子間相互作用が強いと考えられる。CV 測定より見積もった HOMO 準位は  $-4.8 \sim -5.0$  eV であり、 $C_6$ MTc と比較して  $0.2$  eV 高くなっており、共役拡張の効果であるとされる。

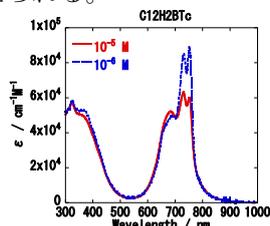


図 11.  $C_{12}$ BTc の溶液の UV-Vis スペクトル

XRD 測定においては薄膜では回折ピークが観測されずアモルファス性を示した。これは共役拡張により分子が大きくなり、分子の配向性が低くなったためと考えられる。

これらの OFET 素子を作製し、評価を行った。無金属体の典型的なトランスファー特性を図 12 に示した。いずれの化合物の素子においても p 型特性を示し、移動度は無金属体の素子では最大  $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、銅錯体の素子では最大  $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  を示した。

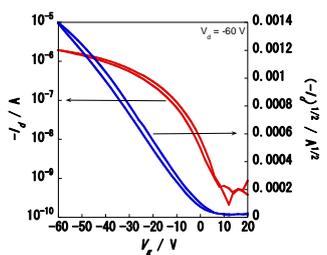


図 12. 無金属体の OFET におけるトランスファー特性

一方で、銅錯体の素子では無金属体のものよりも低い性能となった。いずれもアモルファス性薄膜であり、薄膜においても吸収スペクトルより会合していることが示唆されていることから銅錯体と無金属体では分子間の重なり様式が異なっている等の可能性が考えられるが、明確な原因は分らなかった。

これらの化合物を p 型半導体として用いた二層型 OPV 素子を作製し特性を評価したが、光電変換を示さなかった。原因として先の

FET 評価よりホール移動度がかなり低く、ホールを取り出せていない可能性があると考えられる。

以上、配向制御という観点から新しい可溶性フタロシアニン類を開発し、OFET、有機薄膜太陽電池へと応用した。これは Pc 類においては単純な共役拡張ではデバイス特性の向上につながらないことが明らかとなり、今後の有機半導体開発における重要な知見が得られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 30 件)

1. A Soluble  $\alpha$ -Dithienotetrathiafulvalene Derivative for Organic Field-Effect Transistors, I. Doi, K. Goshome, E. Miyazaki, K. Takimiya, *Chem. Lett.* Vol.41, pp435-437(2012). 査読有  
DOI: 10.1246/cl.2012.435
2. Facile synthesis of anthra [2,3-*b*] chalcogenophenes, K. Niimi, E. Miyazaki, S. Shinamura, K. Takimiya, *Synthesis -Stuttgart*, 44, pp2102-2106(2012). 査読有  
DOI: 10.1055/s-0031-1291141
3. Largely  $\pi$ -Extended Thienoacenes with Internal Thieno[3,2-*b*]thiophene Substructures: Synthesis, Characterization, and Organic Field-Effect Transistor Applications, T. Yamamoto, T. Nishimura, T. Mori, E. Miyazaki, I. Osaka, K. Takimiya, *Org.Lett.*14, pp4914-4917(2012). 査読有  
DOI: 10.1021/ol302243t
4. Organic photovoltaics based on 5-hexylthiophene-fused porphyrazines, H. Mori, E. Miyazaki, I. Osaka, K. Takimiya, *Org. Electronics*,13, pp1975-1980(2012). 査読有  
DOI:10.1016/j.orgel.2012.05.023
5. Orthogonally Functionalized Naphthodithiophenes: Selective Protection and Borylation, S. Shinamura, R. Sugimoto, N. Yanai, N. Takemura, T. Kashiki, I. Osaka, E. Miyazaki, K. Takimiya, *Org.Lett.*14, pp4718-4721(2012). 査読有  
DOI: 10.1021/ol301797g
6. Alkylated Dinaphtho[2,3-*b*:2',3'-*f*]Thieno[3,2-*b*] Thiophenes (C-*n*-DNTTs): Organic Semiconductors for High-Performance Thin-Film Transistors, M. J. Kang, I. Doi, H. Mori, E. Miyazaki, K. Takimiya, M. Ikeda, H. Kuwabara, *Adv. Mater.*, Vol.23, pp1222 (2011). 査読有  
DOI:10.1002/adma.201001283
7. General Synthesis of Dinaphtho [2,3-*b*:2',3'-*f*]thieno[3,2-*b*]thiophene (DNTT) Derivatives, K. Niimi, M. J. Kang, E. Miyazaki, I. Osaka, K. Takimiya, *Org.Lett.*, Vol.13,

- pp3430-3433 (2011). 査読有  
DOI: 10.1021/ol2010837
- Linear- and Angular-Shaped Naphthodithiophenes: Selective Synthesis, Properties, and Application to Organic Field-Effect Transistors, S. Shinamura, I. Osaka, E. Miyazaki, A. Nakao, M. Yamagishi, Jun Takeya, K. Takimiya, *J. Am. Chem. Soc.* Vol.133, pp5024-5035 (2011). 査読有  
DOI: 10.1021/ja110973m
  - General Synthesis of Dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNTT) Derivatives, K. Niimi, M. J. Kang, E. Miyazaki et al, *Org. Lett.* Vol.13, pp3430-3433, (2011). 査読有  
DOI:10.1021/ol2010837
  - Linear- and Angular-Shaped Naphthodithiophenes: Selective Synthesis, Properties, and Application to Organic Field-Effect Transistors, S. Shinamura, I. Osaka, E. Miyazaki, *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.133, pp5024-5035 (2011). 査読有  
DOI: 10.1021/ja110973m
  - Simple Oligothiophene-Based Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs): Anchoring Group Effects on Molecular Properties and Solar Cell Performance, E. Miyazaki, E. Okanishi, Y. Suzuki, *Bull. Chem. Soc. Jpn*, Vol.84, pp459-465 (2011). 査読有  
DOI:10.1246/bcsj.20100302
  - Thienoacene-Based Organic Semiconductors, K. Takimiya, S. Shinamura, I. Osaka, E. Miyazaki et al., *Heterocycles*, Vol.82, pp1317, 査読有  
DOI: 10.3987/com-10-s(e)78
  - ((Alkyloxy)carbonyl)cyanomethylene-Substituted Thienoquinoidal Compounds: a New Class of Soluble n-Channel Organic Semiconductors for Air-Stable Organic Field-Effect Transistors, Y. Suzuki, E. Miyazaki, K. Takimiya, *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.132, pp10453-10466 (2010). 査読有  
DOI: 10.1021/ja103171y.
  - Synthesis, Properties, Crystal Structures, and Semiconductor Characteristics of Naphtho[1,2-b:5,6-b']-dithiophene and -diselenophene Derivatives, S. Shinamura, E. Miyazaki, K. Takimiya, *J. Org. Chem.* Vol.75, 1228-1234 (2010). 査読有,  
DOI:10.1021/jo902545a
  - Unique Three-Dimensional (3D) Molecular Array in Dimethyl-DNTT Crystals: a New Approach to 3D Organic Semiconductors, M. J. Kang, T. Yamamoto, S. Shinamura, E. Miyazaki, K. Takimiya, *Chem. Sci.*, Vol.1, 179-183 (2010). 査読有,  
DOI:10.1039/c0sc00156b
- [学会発表] (計 6 件)
- 宮崎 栄吾, Synthesis of Benzo[b]thiophene-fused Porphyrazines and Application to Organic Field-Effect Transistor, ISOE2012: International Symposium on Organic Electronics 2012, 2012年10月3日, 沖縄科学技術大学院大学
  - 宮崎 栄吾, Synthesis of Thiophene-fused Porphyrazines Bearing Quaterthiophenes and Application to Organic Photovoltaics, MDF Workshop, 2011年10月7日, 梅田スカイビルディング
  - 宮崎 栄吾, Synthesis and Properties of Benzo[b]thiophene-fused Porphyrazines, 14th International Symposium on Novel Aromatic Compounds, 2011年7月24日, University of Oregon, アメリカオレゴン州
  - 宮崎 栄吾, 5-Alkylthiophene-fused porphyrazines: application to solution-processed organic thin-film devices, PACIFICHEM 2010, 2010年12月18日, Kamehameha Halls II and III Convention Center, アメリカハワイ州
  - 宮崎 栄吾, Synthesis of Thiophene-Fused Porphyrazines and Application to Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors, ICSM2010, 2010年7月5日, 京都国際会館
  - 宮崎 栄吾, Solution-Processable Phthalocyanine-based Semiconductor: Development of Thiophene-fused Porphyrazines and Application to Organic Thin-film Devices, Ftr9, 2010年5月27日, Georgia Institute of Technology, アメリカジョージア州
- [その他]  
ホームページ等
- 研究組織  
(1) 研究代表者  
宮崎 栄吾 (MIYAZAKI EIGO)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 00432683
  - (2) 研究分担者  
無し
  - (3) 連携研究者  
無し