

## 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 4 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21350100

研究課題名（和文） 合理的な分子設計に基づいた高効率色素増感太陽電池の創製

研究課題名（英文） Rational Molecular Design for Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells

研究代表者

今堀 博 (IMAHORI HIROSHI)

京都大学・物質-細胞統合システム拠点・教授

研究者番号：90243261

研究成果の概要（和文）：色素増感太陽電池が環境・エネルギー問題の観点から注目を集めている。従来用いられてきたルテニウム色素は貴金属であり、元素戦力的に貴金属を含まないあるいは安価な金属を用いた色素の開発が望まれている。我々はポルフィリン、フタロシアニン、ペリレンなど従来あまり注目されていなかった大きな電子系を有する色素を分子設計により改良し、色素増感太陽電池の色素として有用であることを見いだした。

研究成果の概要（英文）： Recently, dye-sensitized solar cells have attracted much attention relevant to global environmental issues. Thus far, ruthenium(II) bipyridyl complexes have proven to be the most efficient TiO<sub>2</sub> sensitizers in dye-sensitized solar cells. However, a gradual increment in the highest power conversion efficiency has been recognized in the past decade. More importantly, considering that ruthenium is a rare metal, novel dyes without metal or using inexpensive metal are desirable for highly efficient dye-sensitized solar cells. Large  $\pi$ -aromatic molecules, such as porphyrins, phthalocyanines, and perylenes, are important classes of potential sensitizers for highly efficient dye-sensitized solar cells, owing to their photostability and high light-harvesting capabilities that can allow applications in thinner, low-cost dye-sensitized solar cells. They were found to be promising as sensitizers for highly efficient dye-sensitized solar cells.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・機能材料・デバイス

キーワード：有機太陽電池、色素増感太陽電池、ポルフィリン、ペリレン、オリゴチオフェン、フタロシアニン、半導体電極、電子移動

## 1. 研究開始当初の背景

抜本的な二酸化炭素排出抑制を目指して、太陽光エネルギーを有効利用できる有機太陽電池の高効率化を目指す。具体的には金属を含まない、または安価な金属を用いた有機色素を開発し、従来の性能を上回る色素増感太陽電池を低コストで

製造できる基盤を構築する。地球温暖化抑制のための二酸化炭素排出削減に繋がる科学技術として、クリーンで事実上無尽蔵な太陽光の有効利用に関心があつまっている。特に太陽光発電は、二酸化炭素を排出することなく太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換できることから重要性が増し

ている。現在の太陽光発電の主流は単結晶および多結晶シリコンを用いた無機太陽電池である。しかしながら、原料となる高純度シリコンの安定供給や製造コストを考えると、より安価に製造できる太陽電池の出現が期待される。その候補のひとつが有機太陽電池である。たとえば、実用化が期待されている色素増感太陽電池は製造コストがシリコン太陽電池と比べると、1/5-1/10 程度と試算されている。従って、色素増感太陽電池はシリコン太陽電池並の変換効率が安定に得られる量産プロセスが確立され、同時に長期的な耐久性が保証されれば、安価な太陽電池として普及する可能性を秘めている。

## 2. 研究の目的

色素増感太陽電池は1991年のグレッツェルらによる多孔性酸化チタン電極とルテニウム増感色素を用いた高効率化の成功以来、変換効率が連続的に向上している。現在、実験室レベルで色素増感太陽電池の場合11-12%の変換効率が達成されている。しかし、実用化を考慮すると、実験室レベルで変換効率15%以上が必要だとされている。色素増感太陽電池では、ルテニウム色素を用いた場合、最も高いセル性能が達成されている。しかしながら、ルテニウム色素およびデバイス構造の改良が多数試みられているにもかかわらず、変換効率はここ数年11%止まりと頭打ちとなっている。また、ルテニウムがレアメタルで近年急速に価格が高騰していることを考えると、安価な金属錯体または金属を含まない有機色素の開発が望まれている。それにもかかわらず、ルテニウム色素の性能を上回る色素はまだ見つかっていない。従って、抜本的にその光電変換機構を再検討し、ルテニウムに替わる高性能新規色素を開発することが研究の目的である。

## 3. 研究の方法

色素増感太陽電池の高効率化に関して、安定性に優れてはいるが、従来色素増感太陽電池にあまり用いられてこなかったポルフィリン、フタロシアニン、ペリレン、アゾジピロメタンなどに再着目し、分子設計・合成を行った。分子の基礎的物性は吸収スペクトル、蛍光スペクトル、電気化学測定、理論計算により評価した。また、太陽電池特性は3極湿式系または2極湿式系疑似太陽光照射下(AM1.5, 100 mW cm<sup>-2</sup>)の条件で測定した。

## 4. 研究成果

(1) 近年、ルテニウム錯体にかわる、より安価で性能の高い有機色素を用いた色素増感太陽電池の研究が盛んである。これまでの研究から、有機色素と酸化チタンとの結合部位であるアンカー基は、色素から酸化チタン伝導帯への電子移動効率に大きく寄与することが知られており、その最適化が必要とされている。そこで本研究では、新規アンカー基として1-オキソ-1-ヒドロキシジチエノホスホールの有するオリゴチオフェン(TP)を合成した。TPのテトラヒドロフラ

ン溶液中での吸収スペクトルは300-500 nmにかけてオリゴチオフェン由来の吸収を示した。また、TPを修飾した酸化チタン表面におけるX線光電子分光、赤外吸収測定の結果から、1-オキソ-1-ヒドロキシジチエノホスホールのホスフィン酸部位が酸化チタン表面に二座配位で化学吸着していることが示唆された。次に、浸漬法により酸化チタン電極上にTPをコール酸と共に吸着させ、TP修飾酸化チタン電極を作製した。この電極の光電池特性を湿式2極系疑似太陽光照射条件下で評価したところ、1.6%のエネルギー変換効率を達成した。また、アクションスペクトルでは、TPの吸収に由来する光電流発生が確認され、外部量子収率は400 nmで最高値66%に達した。この値は同一条件下でのN719色素の外部量子収率に匹敵する。以上の結果より、1-オキソ-1-ヒドロキシジチエノホスホールは色素増感太陽電池における新規アンカー基として有望であるとわかった。

(2) 化石燃料の枯渇への懸念と環境問題への関心の向上に伴い、シリコン太陽電池の実用化が始まっている。しかしながら、シリコン太陽電池は高純度シリコンの製造費用が高いという根本的な問題点を抱えている。一方、シリコン太陽電池に変わる太陽電池として色素増感太陽電池が注目されている。色素増感太陽電池は安価に製造でき、カラフルで、しかもフレキシブルという特徴を有する。現在までにルテニウム錯体と多孔性酸化チタンを用いた系において11%を越える高いエネルギー変換効率( $\eta$ )が報告されている。しかし、ルテニウムは高価で、資源制約もある。そのため、ルテニウム錯体にかわる安価で高性能な色素の開発が求められている。そこで安価な金属を利用できるフタロシアニン・ポルフィリン錯体に注目した。フタロシアニンについては、300-400 nmにソレー帯、600-700 nm付近にQ帯の強い吸収帯を有するが、分子の平面性による強い会合のため、電子注入効率を低下させてしまう問題がある。そこで $\beta$ 位にメチル基を導入した色素、また2個のアンカー基を導入した色素を用いることで、会合を抑え効率良く電子注入ができるのではないかと考えた。また、ポルフィリンは400-450 nm付近に強いソレー帯、550-600 nm付近に比較的強いQ帯を示すが、500 nm付近、600 nm以上の波長領域において光捕集能が十分ではない。我々は、 $\beta$ 位にキノキサリンを導入することでパイ系を拡張したポルフィリンを用いて6.3%の変換効率を達成している。そこでさらなる光捕集能向上のため、キノキサリン部位を2個導入したポルフィリンを合成した。セル性能を評価した結果、フタロシアニン系で2.5%、キノキサリンポルフィリン系で4.7%の変換効率を達成できた。また、ペリレンに電子供与性基を導入することで色素増感太陽電池への適用が可能であることを見いだした。

(3) 有機トランジスタ、有機太陽電池において、

有機薄膜中のナノ微粒子内の配列は制御できても、ナノ微粒子間の電荷輸送に劣るために、電流を効率よく外部に取り出すことは困難である。そこで、有機溶媒に分散可能な化学修飾単層カーボンナノチューブを用いて、ドナー・アクセプターからなるナノメートルサイズの微粒子を自己組織化的に架橋し、照射下での光電流増幅効果を色素増感太陽電池において検討した。その結果、ドナー・アクセプターナノ微粒子間を化学修飾単層カーボンナノチューブで架橋した3元複合体を酸化スズ半導体電極に泳動電着した場合、化学修飾単層カーボンナノチューブがない参照系よりも約2倍の光電流増幅効果が観測された。以上より、カーボンナノチューブは1次元状の電荷輸送材料として優れた特性を有していることを見いだした。一方、グラフェンは2次元状の電荷輸送材料としての利用が期待されているが、有機・無機材料との階層的な複合化は困難であり、またグラフェンのパイ電子系がどの程度電荷輸送能に影響を与えるかわかっていない。そこで無機・有機材料の超分子的な自己組織化を介して、亜鉛ポルフィリン、酸化亜鉛ナノ粒子、部分還元された酸化グラフェンを階層的に酸化スズ半導体電極上に組織化させた。その結果、この3元複合体は電極上で亜鉛ポルフィリン励起状態から酸化亜鉛ナノ粒子、部分還元された酸化グラフェンと順次電子移動を移動させることで高い光電変換特性を色素増感太陽電池において示すことが明らかになった。また、酸化亜鉛ナノロッド電極にポルフィリンを自己組織化し、その組織化状態と光物性との相関を解明できた。

##### 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 19 件)

- 1) Self-Assembled Porphyrins on Modified Zinc Oxide Nanorods: Development of Model Systems for Inorganic-Organic Semiconductor Interface Studies, H. Saarenpää, E. Sariola-Leikas, A. Pyymaki-Perros, J. Kontio, A. Efimov, H. Hayashi, H. Lipsanen, H. Imahori, H. Lemmetyinen, and N. V. Tkachenko, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 2336-2343 (2012). 査読有 DOI: 10.1021/jp2104769
- 2) Optical, Electrochemical, and Photovoltaic Effects of an Electron-Withdrawing Tetrafluorophenylene Bridge in a Push-Pull Porphyrin Sensitizer used for Dye-Sensitized Solar Cells, M. Simon, H. Iijima, Y. Toude, T. Umeyama, Y. Matano, S. Ito, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, and H. Imahori, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 14415-14424 (2011). 査読有 DOI: 10.1021/jp2030208
- 3) Bisquinoxaline-Fused Porphyrins for Dye-Sensitized Solar Cells, H. Imahori, H. Iijima, H. Hayashi, Y. Toude, T. Umeyama, Y. Matano, and S. Ito, *ChemSusChem*, **2011**, *4*, 797-805. 査読有 DOI: 10.1002/cssc.201100029
- 4) Electron Transfer Cascade by Organic/Inorganic Ternary Composites of Porphyrin, Zinc Oxide Nanoparticle, and Reduced Graphene Oxide on Tin Oxide Electrode that Exhibits Efficient Photocurrent Generation, H. Hayashi, I. V. Lightcap, M. Tsujimoto, M. Takano, T. Umeyama, P. V. Kamat, and H. Imahori, *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 7684-7687 (2011). 査読有 DOI: 10.1021/ja201813n
- 5) Photoinduced Charge Carrier Dynamics of Zn-Porphyrin-TiO<sub>2</sub> Electrodes – the Key Role of Charge Recombination for Solar Cell Performance, H. Imahori, S. Kang, H. Hayashi, M. Haruta, H. Kurata, S. Isoda, S. E. Canton, Y. Infahsaeng, A. Kathiravan, T. Pascher, P. Chabera, A. P. Yartsev, and V. Sundström, *J. Phys. Chem. A*, **115**, 3679-3690 (2011). 査読有 DOI: 10.1021/jp103747t
- 6) Tunable, Strongly-Donating Perylene Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells, S. Mathew and H. Imahori, *J. Mater. Chem.*, **21**, 7166-7174 (2011). 査読有 DOI: 10.1039/c1jm10993f
- 7) Carbon Nanotube Wiring of Donor-Acceptor Nanograins by Self-Assembly and Efficient Charge Transport, T. Umeyama, N. Tezuka, F. Kawashima, S. Seki, Y. Matano, Y. Nakao, T. Shishido, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, and H. Imahori, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 4615-4619 (2011). 査読有 DOI: 10.1002/anie.201007065
- 8) Enhanced Photocurrent Generation by Semiconducting Single Walled Carbon Nanotube Enriched Thin Film, L. Wei, N. Tezuka, T. Umeyama, H. Imahori, and Y. Chen, *Nanoscale*, **3**, 1845-1849 (2011). 査読有 DOI: 10.1039/c0nr00986e
- 9) Stoichiometric Complexation of Supramolecular Composites for Organic Solar Cells Revealed by Solid-State NMR, H. Kaji, H. Hayashi, T. Yamada, M. Ueda, S. Kang, T. Umeyama, Y. Matano, and H. Imahori, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 113301 (2011). 査読有 DOI: 10.1063/1.3565237
- 10) Photophysics and Photoelectrochemical Properties of Nanohybrids Consisting of Fullerene-Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes and Poly-(3-hexyl- thiophene), N. Tezuka, T. Umeyama, Y. Matano, T. Shishido, K. Yoshida, T. Ogawa, S. Isoda, K. Stranius, V.

- Chukharev, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, and H. Imahori, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 741-750 (2011). 査読有 DOI: 10.1039/c0ee00482k
- 11) Good Solvent Effects of C<sub>70</sub> Cluster Formations and Their Electron-Transporting and Photoelectrochemical Properties, N. Tezuka, T. Umeyama, Y. Matano, T. Shishido, M. Kawasaki, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, Y. Honsho, S. Seki, and H. Imahori, *J. Phys. Chem. B*, **114**, 14287-14297 (2010). 査読有 DOI: 10.1021/jp911141s
- 12) Fabrication of Dye-Sensitized Solar Cells Using Natural Dye for Food Pigment: Monascus Yellow, S. Ito, T. Saitou, H. Imahori, H. Uehara, and N. Hasegawa, *Energy Environ. Sci.*, **3**, 905-909 (2010). 査読有 DOI: 10.1039/c000869a
- 13) Effects of  $\pi$ -Elongation and Fused Position of Quinoxaline-Fused Porphyrins as Sensitizers in Dye-Sensitized Solar Cells on Optical, Electrochemical, and Photovoltaic Properties, A. Kira, Y. Matsubara, H. Iijima, T. Umeyama, Y. Matano, S. Ito, M. Niemi, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, and H. Imahori, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 11293-11304 (2010). 査読有 DOI: 10.1021/jp1004049
- 14) Effects of meso-Diarylamino Group of Porphyrins as Sensitizers in Dye-Sensitized Solar Cells on Optical, Electrochemical, and Photovoltaic Properties, H. Imahori, Y. Matsubara, H. Iijima, T. Umeyama, Y. Matano, S. Ito, M. Niemi, N. V. Tkachenko, and H. Lemmetyinen, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 10656-10665 (2010). 査読有 DOI: 10.1021/jp102486b
- 15) Selective Formation and Efficient Photocurrent Generation of [70]Fullerene-Single-Walled Carbon Nanotube Composites, T. Umeyama, N. Tezuka, S. Seki, Y. Matano, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, Y. Nakao, S. Sakaki, and H. Imahori, *Adv. Mater.*, **22**, 1767-1770 (2010). 査読有 DOI: 10.1002/adma.200903056
- 16) Oligothiophene Bearing 1-Oxo-1-hydroxydithieno[2,3-b:3',2'-d]phosphole as Novel Anchoring Group for Dye-sensitized Solar Cells, A. Kira, Y. Shibano, S. Kang, H. Hayashi, T. Umeyama, Y. Matano, and H. Imahori, *Chem. Lett.*, **39**, 448-450 (2010). 査読有 DOI: 10.1246/cl.2010.448
- 17) Comparison of Cluster Formation, Film Structure, Microwave Conductivity, and Photoelectrochemical Properties of Composites Consisting of Single-Walled Carbon Nanotubes with C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, and C<sub>84</sub>, N. Tezuka, T. Umeyama, S. Seki, Y. Matano, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, Y. Nakao, S. Sakaki, and H. Imahori, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 3235-3247 (2010). 査読有 DOI: 10.1021/jp910832a
- 18) Effects of Porphyrin Substituents and Adsorption Conditions on Photovoltaic Properties of Porphyrin-Sensitized TiO<sub>2</sub> Cells, H. Imahori, S. Hayashi, H. Hayashi, A. Oguro, S. Eu, T. Umeyama, and Y. Matano, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 18406-18413 (2009). 査読有 DOI: 10.1021/jp907288h
- 19) Effects of Electrode Structures on Photoelectrochemical Properties of ZnO Electrodes Modified with Porphyrin-Fullerene Composite Layers with Intervening Fullerene Monolayer, H. Hayashi, A. Kira, T. Umeyama, Y. Matano, P. Charoensirithavorn, T. Sagawa, S. Yoshikawa, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, and H. Imahori, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 10798-10806 (2009). 査読有 DOI: 10.1021/jp902623g
- [学会発表] (計 34 件)
- 1) Rational Design of Organic Materials for Solar Energy Applications, H. Imahori, 243th American Chemical Society National Meeting, San Diego, March 25-29, 2012.
- 2) Rational Materials Design and Strategy for Organic Electronics and Solar Energy Conversion, H. Imahori, International Conference, Next Generation Solar Energy, From Fundamentals to Applications, Schloss Erlangen, Germany, December 12-14, 2011.
- 3) 有機材料を用いた人工光合成, 今堀 博, 第 122 回微小光学研究会, 京都工芸繊維大学, 2011 年 12 月 2 日.
- 4) 自己組織化と光電荷分離・電荷輸送機能発現, 今堀 博, TCCI (Theoretical and Computational Chemistry Initiative) 第 1 回実験化学との交流シンポジウム, 京都大学福井謙一記念センター, 2011 年 1 月 1 日.
- 5) Porphyrin-Based Organic Photovoltaics, H. Imahori, 2<sup>nd</sup> International Conference on Green & Sustainable Chemistry 2011, Singapore, November 14-16, 2011.
- 6) Rational Materials Design and Strategy for Organic Electronics and Solar Energy Conversion, H. Imahori, First International Conference on Bioinspired Materials for Solar Energy Utilization, Chania, Crete, Greece, September 12-17, 2011.
- 7) 光電変換材料を指向したナノカーボン材料の開発, 今堀 博, CREST 有機太陽電池シ

- ンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2011年7月15-16日.
- 8) Supramolecular Approach for Solar Energy Conversion, H. Imahori, Nanotechnology and Printed Electronics International Symposium 2011 (NanoPrint 2011), Nanyang Technological University, Singapore, July 4-5, 2011.
  - 9) ナノカーボン材料の化学修飾と光機能化, 今堀 博, 第30回無機高分子シンポジウム「魅力ある炭素材料—ナノからマクロスケールの無機高分子材料」, 東京理科大学記念講堂神楽坂キャンパス, 2011年6月17日.
  - 10) Porphyrins and Phthalocyanines for Dye-Sensitized Solar Cells, H. Imahori, 219th Meeting of The Electrochemical Society, Montreal, May 1-6, 2011.
  - 11) Carbon Nanostructures and Aromatic  $\pi$  Systems for Artificial Photosynthesis and Solar Energy Conversion, Honorary Applied Chemistry Lecture Series, H. Imahori, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun, China, April 7, 2011.
  - 12) Artificial Photosynthesis and Solar Energy Conversion, H. Imahori, 3eme Cycle-Vortrag Swiss Lectureship, March 14-18, 2011.
  - 13) Carbon Nanostructures for Photochemistry and Solar Energy Conversion, H. Imahori, Pacificchem 2010, Hawaii, USA, December 15-20, 2010.
  - 14) Nanocarbon Materials for Artificial Photosynthesis and Solar Energy Conversion, H. Imahori, International Symposium on the Chemistry of Synthetic Carbon Allotropes, Erlangen, Germany, November 25-26, 2010.
  - 15) Fullerenes for Artificial Photosynthesis and Solar Energy Conversion, H. Imahori, Fullerene Silver Anniversary Symposium, Hersonissos, Crete, Greece, October 4-10, 2010.
  - 16) Nanostructured Materials for Efficient Solar Energy Conversion, H. Imahori, IEEE NANO 2010, Seoul, Korea, August 17-20, 2010.
  - 17) Rational Molecular Design for Efficient Solar Energy Conversion, H. Imahori, 18th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (IPS18), Seoul, Korea, July 25-30, 2010.
  - 18) 高効率分子太陽電池を目指した分子創製, 今堀 博, CREST有機太陽電池シンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2010年7月16-17日.
  - 19) Porphyrins as Promising Donors in Molecular Photovoltaics, H. Imahori, Sixth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, New Mexico, USA, July 4-9, 2010.
  - 20) Novel Synthetic Strategy for Organic Solar Cells, H. Imahori, The 30<sup>th</sup> Korea University Memorial Celebration International Conference on Frontier Photoscience and Functional Materials, Sejong, Korea, June 3-5.
  - 21) Nanocarbon-Based Photoelectrochemical and Photovoltaic Devices, H. Imahori, 213th Meeting of The Electrochemical Society, Vancouver, April 25-30, 2010.
  - 22) Porphyrin Conjugated Copolymers for Bulk Heterojunction Solar Cells, H. Imahori, 213th Meeting of The Electrochemical Society, Vancouver, April 25-30, 2010.
  - 23) Porphyrins and Nanocarbon Materials for Dye-Sensitized Solar Cells, H. Imahori, The 11<sup>th</sup> International Symposium on Eco-Materials Processing and Design (ISEPD2010), Sakai, January 9-12, 2010.
  - 24) Synthetic Approaches toward the Development of Highly Efficient Molecular Photovoltaics, H. Imahori, MRS meeting, Boston, USA, November 29-December 4, 2009.
  - 25) Synthetic Challenge for Efficient Solar Energy Conversion, H. Imahori, 2009 International Symposium of Dye-Sensitized Solar Cells, Chung-Li, Taiwan, October 22-23, 2009.
  - 26) Molecular Engineering for Highly Efficient Organic Solar Cells, H. Imahori, The 4th Korea-Japan Bilateral Workshop on Dye-Sensitized and Organic Solar Cells, Seoul, Korea, August 24-25, 2009.
  - 27) Large  $\pi$  Aromatic Molecules as Sensitizers in Dye-Sensitized Solar Cells, H. Imahori, The Sixth China International Conference on High-Performance Ceramics, Harbin, China, August 16-19, 2009.
  - 28) Artificial Photosynthetic Mimics, H. Imahori, The Fifth iCeMS International Symposium, Kyoto, Japan, July 27-28, 2009.
  - 29) 高効率有機太陽電池を目指した基本原理の解明, 今堀 博, CREST有機太陽電池シンポジウム, 京都, 2009年7月13日.
  - 30) Molecular Design of Nanostructured Interfaces for Solar Energy Conversion, H. Imahori, The 4th East Asia Symposium on Functional Dyes and Advanced Materials (EAS4), Osaka, Japan, June 2-5, 2009.
  - 31) Artificial Photosynthetic Mesomaterials for Solar Energy Conversion, H. Imahori, The Fourth iCeMS International Symposium, Kyoto, Japan, May 27-May 29, 2009.
  - 32) Arrangement of Fullerenes on Sidewall of Single-Walled Carbon Nanotubes, H. Imahori, 211th Meeting of The Electrochemical Society, San Francisco, USA, May 24-May 28, 2009.
  - 33) Self-Assembly of Amphiphilic Porphyrins, H. Imahori, 211th Meeting of The Electrochemical Society, San Francisco, USA, May 24-May 28,

2009.

- 34) 化学の観点からの有機太陽電池設計, 今堀博, 第56回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学, 2009年3月30-4月2日.

[図書] (計11件)

- 1) *Application of Multiporphyrin Arrays to Solar Energy Conversion*, S. Mathew and H. Imahori, "Multiporphyrin Arrays," ed by D. Kim, Pan Stanford Publishing, Singapore (2012), Chapter 9, pp. 439-498.
- 2) *Fullerene Modified Electrodes and Solar Cells*, H. Imahori and T. Umeyama, "Fullerenes," ed by F. Langa and J.-F. Nierengarten, RSC Publishing, Cambridge (2012), Chapter 13, pp. 462-506.
- 3) *Fullerene for Photoelectrochemical and Photovoltaic Devices*, H. Imahori and T. Umeyama, "Handbook of Carbon Nano Materials," ed by F. D'Souza and K. M. Kadish, World Scientific, Singapore (2012), Vol. 2, Chapter 18, pp. 593-636.
- 4) *Solar Energy Conversion-Natural to Artificial*, H. Nêmec, E. Galoppini, H. Imahori, and V. Sundström, "Comprehensive Nanoscience and Technology," ed by D. L. Andrews, G. D. Scholes, and G. P. Wiederrecht, Academic Press, Oxford (2011), Vol. 2, Chapter, 12, pp 325-359.
- 5) ナノテクノロジー, 今堀博, 金光義彦, 有賀克彦 (分担), *化学マスター講座*, 大島幸一郎, 大塚浩二, 川崎昌博, 木村俊作, 田中一義, 田中勝久, 中條善樹編, 丸善(2010).
- 6) ここまで来た光合成の模倣, 今堀博 (分担), *人工光合成と有機太陽電池*, 日本化学会編, 化学同人, p74-80 (2010).
- 7) *Novel Electron Donor Acceptor Nanocomposites*, H. Imahori, D. M. Guldi, and S. Fukuzumi, "Chemistry of Nanocarbons," ed by T. Akasaka, F. Wudl, and S. Nagase, John Wiley & Sons, Chichester, pp 93-127 (2010).
- 8) *Photoinduced Energy Transfer in Artificial Photosynthesis*, H. Imahori and T. Umeyama, *Progress in Nano-Electro-Optics VII*, ed by M. Ohtsu, Springer, Berlin, pp 37-72 (2010).
- 9) 光電変換超分子, 今堀博, 梅山有和 (分担), *超分子サイエンス&テクノロジー*, 国武豊喜編, エヌ・ティー・エス, pp 647-656 (2009).
- 10) カーボンナノチューブの光機能化, 梅山有和, 今堀博 (分担), *有機薄膜太陽電池の最新技術 II*, CMC, pp 131-139 (2009).
- 11) *Self-Assembly for Photoinduced Energy and Electron Transfer*, H. Imahori and T. Umeyama, *Bottom-up Nanofabrication*, ed by K. Ariga and H. S. Nalwa, American Scientific Publishers, Chapter 13, pp347-373. (2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 新規なポルフィリン錯体およびその用途  
発明者: 今堀 博  
権利者: 京都大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-053679  
出願年月日: 2010年3月10日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

[http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/%7Emoleng\\_05/index.html](http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/%7Emoleng_05/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今堀 博 (IMAHORI HIROSHI)

京都大学・物質-細胞統合システム拠点・教授

研究者番号: 90243261

### (2) 研究分担者

梅山 有和 (UMEYAMA TOMOKAZU)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号: 30378806