

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25810043

研究課題名(和文)自己共増感型錯体色素の開発とこれを用いた超高性能光電変換デバイスの作製

研究課題名(英文) Highly Efficient Photovoltaic Devices Based on a Ruthenium-Complex Sensitizer Showing a Self-Cosensitization Effect

研究代表者

小澤 弘宜(OZAWA, Hironobu)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：30572804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、短波長増感機能を示す機能性置換基を分子内に有する高性能な自己共増感型錯体色素の開発を目的として、ターピリジン配位子上に様々な置換基を導入した新規ルテニウム錯体色素の系統的な合成を行った。ターピリジンの4位に2-ヘキシルチオフェンを導入した配位子を持つルテニウム錯体色素(TUS-38)を用いた光電変換デバイスにおいては、既存の高性能ルテニウム錯体色素を用いた場合の光電変換効率(10.9%)よりも高い、世界最高レベルの光電変換効率(11.9%)を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a series of ruthenium-complex sensitizers have been synthesized by introducing a functional group, which can serve as a sensitizer for the wavelength range below 500 nm, to the terpyridine ligand for the development of an efficient ruthenium-complex sensitizer showing a self-cosensitization effect. 2-hexylthienyl unit was found to be the most suitable and effective functional group, and the 4-position of the terpyridine derivative ligand was also found to be the most effective position to improve the cosensitization effect. Novel ruthenium sensitizer with a terpyridine derivative ligand having a 2-hexylthionyl unit at the 4-position (TUS-38) showed an effective cosensitization effect, and 11.9% conversion efficiency, which is much higher than that obtained in the photovoltaic devices based on a well-known highly efficient ruthenium sensitizer, was obtained in the photovoltaic devices based on TUS-38.

研究分野：無機化学、錯体化学、色素、光電変換

キーワード：金属錯体 ルテニウム 色素 光電変換

## 1. 研究開始当初の背景

色素増感太陽電池(DSC)は太陽光を電気エネルギーに直接変換できるクリーンな光電変換デバイスであり、12%を超える光電変換効率が昨年報告された(Grätzel, *et al.*, *Science*, **2011**, 334, 629)。DSCは色素、TiO<sub>2</sub>光電極、対極、および電解液などで構成されるが、その性能は色素の光電変換特性に大きく依存する。Black dyeと呼ばれるルテニウム錯体色素は最も著名な高性能色素の1つであり、紫外～可視光に加えて950 nmまでの近赤外光も光電変換することが可能である。高性能色素は紫外～可視～近赤外に及ぶ広い波長範囲(300～1000 nm)において高い光電変換効率を達成することが必要であるが、このように広い波長範囲の光を単一の色素だけでカバーするのは非常に困難である。

これを解決する方法として、異なる波長領域に強い吸収帯を持つ2種類の色素を組み合わせた“共増感型”DSCの作製が試みられてきた。相補的な光吸収特性を持つ色素同士を組み合わせることにより、紫外～可視～近赤外に及ぶ全ての波長の光を効率良く光電変換することが可能になると期待されるが、複数種の色素を用いた共増感型DSCにおいては、ほとんどの場合、単一の色素を用いた場合よりも変換効率が低下してしまうことが分かっている。これは、共増感させる第2色素がTiO<sub>2</sub>表面に吸着することにより、第1色素の吸着量が減少してしまうことが主な理由である。しかし最近、このような第1色素の吸着量減少を引き起こすことなく、巧く光電変換効率を向上させることに成功した共増感型DSCが報告された(Ogura, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **2009**, 94, 073308; Han, *et al.*, *Energy Environ. Sci.*, **2012**, 5, 6057.)。これらの例ではBlack dyeを第1色素として用い、その変換効率が低い450 nm付近に強い吸収帯を持つ有機色素を第2色素として用いることにより、光電変換効率を向上させることに成功している。申請者らの研究グループにおいても、Black dyeと有機色素(D131)の共増感型DSCにおいて、世界最高性能に匹敵する高い光電変換効率(11.6%)を達成している。

一方、光電変換効率のさらなる向上には、共増感型DSCにおいてもまだ十分に利用できていない850 nmよりも長波長の近赤外光の光電変換効率向上が必要である。その方法として、上述の共増感型DSCにおいて、850～950 nm付近に強い吸収帯を持つ色素を加えた3種混合型DSCが思い浮かぶが、この方法によるさらなる光電変換効率の向上は極めて困難である。それは、TiO<sub>2</sub>表面における色素吸着サイト数が有限であることに起因している。すなわち、2種混合系における各色素の吸着量を減少させることなく第3色素を十分に吸着させるには、TiO<sub>2</sub>表面の色素未吸着サイト数が不十分であるためである。また、TiO<sub>2</sub>光電極の作製法の改善によるTiO<sub>2</sub>表面積の増大にも限度があるため、3種混合

型DSCの作製という方法では、さらなる光電変換効率の向上は見込めないと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、高性能なBlack dyeの構造を保持したまま、分子内に450 nm付近の光を光電変換できる機能性置換基(短波長色素)を導入した“自己共増感型”錯体色素を合成極めて高い光電変換効率を示す高性能DSCの開発を目指す。自己共増感型錯体色素は単一の色素で共増感型DSCと同等の光電変換効率を示すと期待でき、これを用いることで第2色素(近赤外色素)の十分な吸着量も見込める。

申請者らは以前、400 nm付近に強い吸収帯を持つ天然色素を配位子として有するルテニウム錯体色素(TUS-22)の合成を行った。また最近、450 nmに非常に強い吸収を示す発色団を配位子上に導入したルテニウム錯体色素(TUS-27)の合成にも成功している。しかし、これらの錯体色素では天然色素配位子や発色団からTiO<sub>2</sub>への電子移動反応が効率良く進行せず、目的の自己共増感機能を示さないことが明らかになっている。これらの結果は、単に強い吸収帯を持つ発色団等を導入した配位子を持つ錯体色素を合成すれば、自己共増感機能が発現するという訳ではなく、その導入位置や配位子との結合様式が非常に重要であるということを示している。本課題では、高性能色素であるBlack dyeと同様にターピリジン配位子を有する錯体色素において、短波長増感機能を有する機能性置換基の導入位置や結合方法を変化させた一連の新規錯体色素の合成を行い、その光電変換機能を調査することにより、自己共増感機能の発現に重要な因子(機能性置換基の導入位置や配位子との結合様式)を明らかにし、高性能自己共増感型錯体色素の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

我々は、本課題の推進以前に自己共増感型錯体色素のプロトタイプとして、アンカー基を持つターピリジン配位子に2-ヘキシルチオフェン(発色団)を導入した錯体色素(TUS-25)の合成を行った。TUS-25は400 nm付近に2-ヘキシルチオフェンの導入に伴う強い吸収帯を持ち、これ自身が光増感機能を示すことにより、2-ヘキシルチオフェンを持たない類似構造の色素と比べて400 nm付近の光電変換効率が著しく向上することが確認されている。残念ながら、TUS-25を用いたDSCはBlack dyeを用いたDSCと比べて変換効率が全波長領域においてやや低い、発色団を適切な位置に導入することで目的の自己共増感機能が発現することが明らかになっている。即ち、本研究構想が単なる机上の空論ではなく、実験事実に基づいた提案であることを示している。

これまでの研究において、オルトジカルボキシフェニル基をアンカー基として有する

錯体色素(TUS-28)は、カルボキシル基をアンカー基として有する錯体色素と比べて TiO<sub>2</sub> への電子移動反応が効率良く進行し、その結果、より高い変換効率を示すことを明らかにしている。初年度は、TUS-25 の光電変換効率の向上を狙い、骨格構造は保持したままオルトジカルボキシフェニル基をアンカー基として導入した新規錯体色素の合成と機能評価を行う。また、発色団の導入位置や結合様式は変化させず、他の発色団を用いることにより、より効果的に 400 nm 付近の光電変換効率を向上できる発色団の探索も行う。

一方、オルトジカルボキシフェニル基をアンカー基として有する TUS-21 は、全波長領域において Black dye とほぼ同程度の光電変換効率を示すことが明らかになっている。第 2 年度はこの TUS-21 をベースとし、これに発色団を導入した自己共増感型錯体色素の合成を行うことにより、Black dye を超える高性能錯体色素の開発を目指す。TUS-21 では、ターピリジン骨格のカルボキシル基の 1 つが TiO<sub>2</sub> 表面への結合に関与していると考えられているため、発色団の導入は 1 か所のみとし、初年度に得られた成果を基に最適構造の発色団を導入した自己共増感型錯体色素の合成を行う。

#### 4. 研究成果

我々は、約 11% の光電変換効率を示す Black dye よりも高性能な新規ルテニウム錯体色素の開発を目的とし、ターピリジン誘導体を配位子として有する多数のルテニウム錯体色素の合成と、その光電変換特性の評価を行った。

まず、モル吸光係数の向上を期待して、アンカー基としてオルトジカルボキシフェニル基を有する新規色素(TUS-20、TUS-21)の合成を行った。TUS-20 はターピリジンにオルトジカルボキシフェニル基を導入した配位子を持つ色素であり、その吸収スペクトルは Black dye に比べて約 30 nm ほど短波長側にシフトしていた。一方、TUS-21 はターピリジン配位子の両端のピリジン環にもカルボキシル基を有し、より Black dye に近い構造を持つ色素である。TUS-21 の吸収スペクトル

の吸収端は Black dye とほぼ同程度であり、可視光領域全体において Black dye よりも大きなモル吸光係数を持つことが分かった。

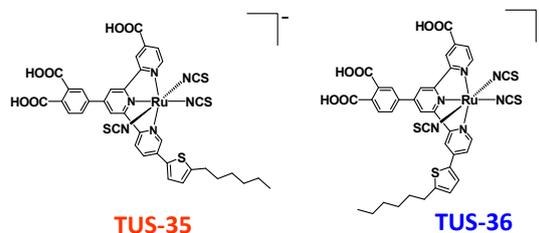
R = H (TUS-20), COOH (TUS-21)

TUS-20 を用いた DSC では変換効率 7.5% が得られた。Black dye を用いた DSC と比べて光電流 ( $J_{sc}$ ) の値が著しく小さく、また電圧 ( $V_{oc}$ ) の値も小さいことが分かった。IPCE スペクトルを測定したところ、TUS-20 では 650 nm よりも長波長側における変換効率が Black dye に比べて著しく小さかった。この結果は、

TUS-20 の吸収スペクトルが Black dye に比べて短波長側にシフトしていることを反映していると考えられる。また、TiO<sub>2</sub> 光電極中における電子寿命が著しく短いことも確認された。一方、TUS-20 は Black dye よりも TiO<sub>2</sub> への吸着速度が遥かに大きく、飽和吸着量も大きいことが分かった。さらに、TiO<sub>2</sub> からの脱離が完全には進行しないことも分かった。以上の結果は、オルトジカルボキシフェニル基がアンカー基として有用であり、TUS-20 が Black dye よりも優れた吸着特性を持つことを示すものである。

一方、TUS-21 を用いた DSC では変換効率 10.2% が得られた。 $J_{sc}$  は Black dye の値を超える 20.83 mA/cm<sup>2</sup> であった。TUS-21 は、520 nm よりも長波長領域においては Black dye と同じ IPCE 値を示し、短波長領域ではより高い値を示した。TUS-21 が可視光領域全域において Black dye よりも高いモル吸光係数を持つことが IPCE の向上につながったと考えられる。一方、TUS-21 の吸着量は TUS-20 の半分ほどに留まり、また、TUS-20 とは異なり TiO<sub>2</sub> から容易に脱離することが分かった。この結果は、TUS-21 が TUS-20 とは異なる様式で TiO<sub>2</sub> に結合していることを示唆していると考えられる。すなわち、TUS-21 はオルトジカルボキシフェニル基ではなく、ターピリジン上のカルボキシル基とフェニル基上の 3 位のカルボキシル基の 2 つで TiO<sub>2</sub> に結合していると考えられる。

次に我々は、10% を超える変換効率を示した TUS-21 に対してチエニル基を導入した新規色素の合成を行った。

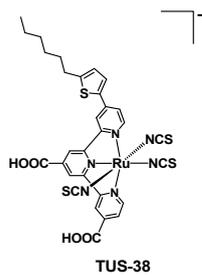


2-ヘキシルチオフェンをピリジン環上の 5 位に導入した TUS-35 は、380 nm 付近に主に配位子の  $\pi-\pi^*$  遷移に由来する強い吸収帯を持つものの、400 nm よりも長波長領域におけるモル吸光係数は TUS-21 よりも小さいことが分かった。一方、2-ヘキシルチオフェンをピリジン環上の 4 位に導入した TUS-36 は、350 nm 付近に配位子の  $\pi-\pi^*$  遷移に由来する強い吸収帯を持ち、400 nm よりも長波長領域におけるモル吸光係数は TUS-21 とほぼ同程度であることが分かった。また、いずれの色素も HOMO、及び LUMO のエネルギー準位は TUS-21、Black dye とほぼ同程度であった。

これらの色素を用いた DSC のセル性能を調べたところ、TUS-35 では 6.4%、TUS-36 では 5.6% と TUS-21 と比べて著しく低い変換効率しか示さないことが分かった。TiO<sub>2</sub> 光電極から色素を脱離し、各色素の吸着量

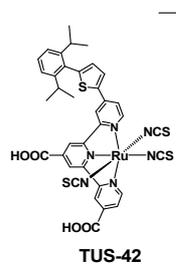
を調べたところ、TUS-35とTUS-36においては全ての色素をTiO<sub>2</sub>から脱離させることが出来なかったにもかかわらず、その量はTUS-21よりも多い事が分かった。これまでの検討により、TUS-21はフェニル環上の3位のカルボキシル基とピリジン環上の4位のカルボキシル基の2つでTiO<sub>2</sub>に吸着していることが明らかとなっている。一方、フェニル環上の3位と4位の2つのカルボキシル基でTiO<sub>2</sub>に吸着する場合は、色素吸着量が多く、且つ容易に脱離できないことも明らかとなっている。これらの結果は、TUS-35とTUS-36がフェニル環上の3位と4位の2つのカルボキシル基でTiO<sub>2</sub>に吸着していることを強く示唆していると考えられる。他方、TUS-35とTUS-36の分子軌道計算の結果より、いずれの色素においてもLUMO、及びLUMO+1は主にターピリジン配位子上に分布していることが分かっている。即ち、ターピリジン配位子上のカルボキシル基を用いてTiO<sub>2</sub>に吸着する場合、色素からTiO<sub>2</sub>への電子移動反応は効率良く進行すると考えられるものの、フェニル環上の2つのカルボキシル基でTiO<sub>2</sub>に吸着する場合は、色素からTiO<sub>2</sub>への効率の良い電子移動反応は進行しにくいと予想される(下図)。分光特性、及び電気化学特性に大きな違いが見られないにも関わらず、TUS-35とTUS-36においてTUS-21よりも変換効率が著しく低下してしまったのは、TiO<sub>2</sub>表面における色素の吸着形態の違いが主な理由であると考えられる。

上記の結果は、より高い変換効率を得るためには、ターピリジン配位子上のカルボキシル基によってTiO<sub>2</sub>に吸着することが重要であることを示唆していると考えられる。



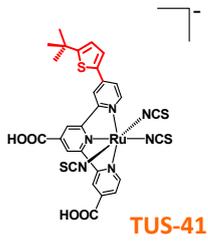
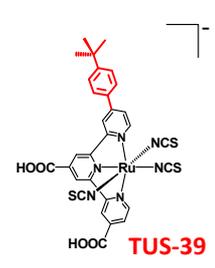
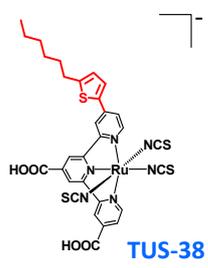
TUS-38は同じくピリジン環上の4位に2-ヘキシルチオフェンを持つTUS-36と同様に350 nm付近に配位子のπ-π\*遷移に由来する強い吸収帯を持ち、可視光領域全体においてBlack dyeよりも大きなモル吸光係数を持つことが分かった。一方、TUS-38のHOMO、及びLUMOのエネルギー準位はBlack dyeとほぼ同程度であることも分かった。TUS-38を用いたDSCのセル性能の評価を行ったところ、TUS-21の値を超える10.6%という比較的高い変換効率を示すことが明らかとなった。TUS-38を用いたDSCでは、Black dyeを用いた場合より

も大きなJ<sub>sc</sub>が得られるものの、V<sub>oc</sub>が低いことも明らかとなった。TUS-38は700 nmまでの可視光領域においてBlack dyeよりも高いIPCE値を示し、それより長波長領域においてはほぼ同程度であった。色素吸着量はBlack dyeよりやや少ないため、大きなモル吸光係数を持つことによって、より大きなJ<sub>sc</sub>が得られたと考えられる。これら結果は、2-ヘキシルチオフェンの導入位置としては、ターピリジン配位子上の4位がより適していることを示唆している。



次に、さらなる高性能色素の開発を目指し、TUS-38の改良型色素の合成を行った。下図のTUS-42は、TUS-38のチエニル基に2,6-ジイソプロピルフェニル基を導入した構造を持ち、光吸収特性のさらなる向上が期待される。また、フェニル環の2位と6位にイソプロピル基を持つことから、チエニル基の硫黄原子が立体的に保護されることによって、I<sub>3</sub>の接近を阻害し、これによる逆電子移動反応の抑制効果も期待される。TUS-42はTUS-38と比べ、500~700 nmにおけるMLCT吸収帯のモル吸光係数が僅かではあるが大きくなっていることが分かった。一方、TUS-42のHOMO、及びLUMOのエネルギー準位はTUS-38とほぼ同じであり、フェニル基の導入によって電気化学特性はほとんど変化しないことが明らかとなった。

TUS-42を用いたDSCのセル性能の評価を行ったところ、TUS-38の10.4%よりも高い10.7%の変換効率を得られた。この値は、Black dyeの値(10.8%)とほぼ同等であった。TUS-42の吸着量はBlack dyeよりも少ないものの、同程度のJ<sub>sc</sub>が得られた。これは、2,6-ジイソプロピルフェニル基を導入したことによるモル吸光係数の増大が主な理由であると考えられる。



一方、TUS-42におけるTiO<sub>2</sub>光電極中における電子寿命の測定を行ったところ、TUS-38と比べて電子寿命の顕著な向上は見られなかった。従って、イソプロピル基に

よる I<sub>3</sub><sup>-</sup>の接近に対する抑制効果は小さいと考えられる。

以上の結果を踏まえ、ターピリジン配位子上の4位に導入する置換基の種類を変化させた下図に示す3種類の新規色素の合成と、その太陽電池性能の評価を行った。

TUS-38の2-ヘキシルチエニル基の代わりに *tert*-ブチルフェニル基を導入した TUS-39では、350 nm 付近の配位子由来の強い吸収帯の短波長シフト、及び400~800 nmにおけるMLCT吸収帯のモル吸光係数の減少が確認された。一方、TUS-38のヘキシル基を *tert*-ブチル基に代えた TUS-42においては、吸収スペクトルの変化はほとんど見られなかった。従って、ターピリジン配位子への置換基としては、フェニル基よりもチエニル基の方が光吸収特性の点においては優れているということが判明した。他方、異なる置換基を持つこれらの3つの色素においては、HOMO、及びLUMOのエネルギー準位はほぼ同程度であった。従って、ターピリジン配位子上の置換基の種類は、錯体色素の電気化学特性にはほとんど影響を与えないことが明らかとなった。

TUS-38を用いたセルでは10.8%、TUS-39を用いたセルでは9.4%、TUS-41を用いたセルでは同じく9.4%の光電変換効率が得られた。TUS-38においては、これまでの精製方法を改善することによって、Black dyeとほぼ同程度の変換効率を得ることに成功した。一方、TUS-39、TUS-41においては、TUS-38と比べて色素吸着量がやや少なく、変換効率も低いことが明らかとなった。これは両色素が比較的嵩高い *tert*-ブチル基を持つことがその理由であると考えられる。しかしいずれの色素においても、得られた *J*<sub>sc</sub>の値はBlack dyeよりも大きいことから、ターピリジン配位子上の4位に適切な置換基を導入することは、光電流値を向上させるうえで一定の効果があることは明らかである。また、3種類の置換基の中では、ヘキシルチエニル基が最も適した置換基であることも判明した。いずれの色素を用いた場合においても、セルの内部抵抗の値に大きな変化がないことが明らかとなった。一方、チタニア光電極中における電子寿命を調べたところ、2-ヘキシルチエニル基を持つ TUS-38において、最も電子寿命が長いことが明らかとなった。これらの結果は、チタニア光電極からの逆電子移動反応の抑制効果は、2-ヘキシルチエニル基が最も高いことを強く示唆していると考えられる。

TUS-38を用いたDSCにおける変換効率向上に向けて、TiO<sub>2</sub>光電極に対する色素吸着条件と、電解液組成の検討を行った。従来条件のセルにおいてBlack dyeは10.9%、TUS-38は10.8%の変換効率を示した。一方、最適条件で作製したセルにおいては、Black dyeは10.9%であったのに対して、TUS-38では11.9%の変換効率を得ることに成功した。この値は、論文で報告されているルテニウム錯

体色素としては世界最高性能である(1 sun照射下)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

① **Hironobu Ozawa**, Yasuyuki Yamamoto, Hiroki Kawaguchi, Ryosuke Shimizu, Hironori Arakawa

Ruthenium Sensitizers with a Hexylthiophene-Modified Terpyridine Ligand for Dye-Sensitized Solar Cells: Synthesis, Photo- and Electrochemical Properties, and Adsorption Behavior to the TiO<sub>2</sub> Surface

*ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2015**, 7, 3152-3161.

DOI: 10.1021/am507442s 査読有

② Naoyuki Shibayama, **Hironobu Ozawa**, Yousuke Ooyama, Hironori Arakawa

Highly Efficient Cosensitized Plastic-Substrate Dye-Sensitized Solar Cells with Black Dye and Pyridine-Anchor Organic Dye

*Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2015**, 88, 366-374.

DOI:10.1246/bcsj.20140344 査読有

③ **Hironobu Ozawa**, Yuki Tawaraya, Hironori Arakawa

Effects of the Alkyl Chain Length of Imidazolium Iodide in the Electrolyte Solution on the Performance of Black-Dye-Based Dye-Sensitized Solar Cells

*Electrochim. Acta*, **2015**, 151, 447-452.

DOI:10.1016/j.electacta.2014.11.067 査読有

④ **Hironobu Ozawa**, Takahiro Kuroda, Shohei Harada, Hironori Arakawa

Efficient Ruthenium Sensitizer with a Terpyridine Ligand Having a Hexylthiophene Unit for Dye-Sensitized Solar Cells: Effects of the Substituent Position on the Solar Cell Performance

*Eur. J. Inorg. Chem.*, **2014**, 4734-4739.

DOI:10.1002/ejic.201402530 査読有

⑤ **Hironobu Ozawa**, Takahito Sugiura, Ryosuke Shimizu, Hironori Arakawa

Novel Ruthenium Sensitizers Having Different Numbers of Carboxyl Groups for Dye-Sensitized Solar Cells: Effects of the Adsorption Manner at the TiO<sub>2</sub> Surface on the Solar Cell Performance

*Inorg. Chem.*, **2014**, 53, 9375-9384.

DOI:10.1021/ic501479p 査読有

⑥ **Hironobu Ozawa**, Kei Fukushima, Takahito Sugiura, Ayako Urayama, Hironori Arakawa

Ruthenium Sensitizers Having an Ortho-Dicarboxyl Group as an Anchoring Unit for Dye-Sensitized Solar Cells: Synthesis, Photo- and Electrochemical Properties, and Adsorption Behavior to the TiO<sub>2</sub> Surface

*Dalton Trans.*, **2014**, 43, 13208-13218.

DOI: 10.1039/c4dt01450b 査読有

⑦ Naoyuki Shibayama, **Hironobu Ozawa**, Masahiro Abe, Yousuke Ooyama, Hironori Arakawa

A New Cosensitization Method Using the Lewis Acid Sites of a TiO<sub>2</sub> Photoelectrode for Dye-Sensitized Solar Cells

*Chem. Commun.*, **2014**, 50, 6398-6401.

DOI: 10.1039/c3cc49461f 査読有

⑧ **Hironobu Ozawa**, Yu Okuyama, Hironori Arakawa

Dependence of the Efficiency Improvement of Black-Dye-Based Dye-Sensitized Solar Cells on Alkyl Chain Length of Quaternary Ammonium Cations in Electrolyte Solutions

*ChemPhysChem*, **2014**, 15, 1201-1206.

DOI: 10.1002/cphc.201301025 査読有

⑨ **Hironobu Ozawa**, Shunsuke Honda, Daichi Katano, Takahito Sugiura, Hironori Arakawa  
Novel Ruthenium Sensitizers with a Dianionic Tridentate Ligand for Dye-Sensitized Solar Cells: the Relationship Between the Solar Cell Performances and the Electron-Withdrawing Ability of Substituents on the Ligand

*Dalton Trans.*, **2014**, 43, 8026-8036.

DOI: 10.1039/c3dt52873a 査読有

⑩ **Hironobu Ozawa**, Hiroki Kawaguchi, Yu Okuyama, Hironori Arakawa

Ruthenium Sensitizers with 2,2'-Bipyrimidine or a 5,5'-Disubstituted 2,2'-Bipyrimidine Ligand : Synthesis, Photo- and Electrochemical Properties, and Application to Dye-Sensitized Solar Cells

*Eur. J. Inorg. Chem.*, **2013**, 5187-5195.

DOI:10.1002/ejic.201300345 査読有

⑪ **Hironobu Ozawa**, Yu Okuyama, Hironori Arakawa

Effects of Cation Composition in the Electrolyte on the Efficiency Improvement of Black Dye-Based Dye-Sensitized Solar Cells

*RSC Adv.*, **2013**, 3, 9175-9177.

DOI: 10.1039/c3ra23495a 査読有

⑫ **Hironobu Ozawa**, Yasuyuki Yamamoto, Kei Fukushima, Satoshi Yamashita, Hironori Arakawa

Synthesis and Characterization of a Novel Ruthenium Sensitizer with a Hexylthiophene-Functionalized Terpyridine Ligand for Dye-Sensitized Solar Cells

*Chem. Lett.*, **2013**, 42, 897-899.

DOI:10.1246/cl.130217 査読有

[学会発表] (計 5 件)

① **小澤弘宜**, 杉浦崇仁, 福島 慶, 荒川裕則

4 位に様々な置換基を導入したターピリジン配位子を有する新規ルテニウム錯体色素の合成とこれを用いた色素増感太陽電池  
電気化学会 第 82 回大会、横浜国立大学、2015 年 3 月 15 日

② **小澤弘宜**, 山本靖之、荒川裕則

2-ヘキシルチオフェンで修飾したターピリジン配位子を持つ新規ルテニウム錯体色素の合成とこれを用いた色素増感太陽電池  
第 64 回錯体化学討論会、中央大学(後樂園)、2014 年 9 月 14 日

③ **小澤弘宜**, 山本靖之、清水亮佑、荒川裕則  
オルトジカルボキシフェニル基を持つルテニウム錯体色素を用いた色素増感太陽電池における置換基導入効果

日本化学会第 93 回春季年会、名古屋大学、2014 年 3 月 29 日

④ **Hironobu Ozawa**, Takahito Sugiura, Kei Fukushima and Hironori Arakawa

Ruthenium Sensitizers Having an Ortho-Dicarboxyl Unit for Dye-Sensitized Solar Cells  
DSC-OPV8, Busan, 25 Nov., 2013, OL-11

⑤ **小澤弘宜**, 本田駿介、片野大地、荒川裕則  
色素増感太陽電池の光電変換効率に対するアニオン性三座配位子を持つルテニウム錯体色素の置換基効果

第 63 回錯体化学討論会、琉球大学、2013 年 11 月 3 日

[図書] (計 4 件)

① **小澤弘宜**, 荒川裕則

色素増感太陽電池の高性能化技術  
光合成研究と産業応用最前線, NTS, 2014, 329-338.

② **小澤弘宜**, 荒川裕則

太陽電池の仕組み  
図解入門 よくわかる最新太陽光発電の基本と仕組み 第 4 章、秀和システム、2013, 83-114.

③ **小澤弘宜**, 荒川裕則

色素増感太陽電池の高効率化  
工業材料 6 月号, 日刊工業新聞社, 2013, 26-29.

④ **小澤弘宜**, 荒川裕則

有機太陽電池 1(色素増感太陽電池)  
図解入門 よくわかる最新太陽電池の基本と仕組み 第 5 章、秀和システム、2013, 103-120.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 弘宜 (OZAWA, Hironobu)

東京理科大学・工学部工業化学科・助教

研究者番号 : 30572804